

**UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB-BLIDA1**

**Faculté de Technologie**

Département de Génie Civil

## **MEMOIRE DE MASTER**

Spécialité : Matériaux de Génie Civil



### **Effet de la finesse sur les propriétés physiques et mécaniques du ciment à base d'ajout calcaire**

Par :

- Rabet Amina
- Battache Fouzia

Devant le jury composé de :

Dr Abdessemed Mouloud                      Université Blida1                      Président

Dr AzzazAbdessemed Université Blida1                      Examineur

Prof KenaiSaidUniversité Blida1Promoteur

Dr. Bensaci Hamza                      Université Blida1Co-promoteur

Blida, 2021



## ملخص

يوجد حاليا أكثر من ثمانية عشر مصنعا للإسمنت في الجزائر بإنتاج متنوع يتجاوز خمسة و عشرون مليون طن سنويا. يستعمل مضاف الكلس بكثرة في صناعة الإسمنت و هذا للفوائد التي يقدمها و المتمثلة في تخفيض سعر الإسمنت و المحافظة على البيئة, غير أن استعماله لن يكون مفيدا إلا إذا كان الإسمنت الناتج ذو نوعية جيدة.

في هذه الدراسة تم طحن الاسمنت الموجود في مصنع المفتاح من الصنف CEMII/A-L 42.5N ذات الحجر الجيري ثابت 1 4.1 % لدراسة خواصه الفيزيائية و الميكانيكية و الكيميائية.

سمحت لنا النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها بان كلما زادت نعومة الاسمنت زادت مقاومة الانضغاط و الشدة.

**كلمات المفاتيح:** الاسمنت, إضافات الاسمنت , الحجر الجيري , مقاومة الانضغاط , مقاومة الشد.

## RESUME

Actuellement, il existe plus de dix-huit cimenteries en Algérie avec une production diversifiée dépassant les vingt-cinq millions de tonnes par an. L'ajout calcaire est l'ajout le plus utilisé dans les cimenteries algériennes, pour ses propriétés avantageuses qui incluent la réduction du coût de fabrication et la préservation de l'environnement. Néanmoins, son utilisation ne sera totalement avantageuse que si le liant obtenu présente de bonnes performances.

Dans cette étude, les propriétés physiques, chimiques et mécaniques du ciment CEM II/A-L 42,5 N de la cimenterie de Meftah avec une substitution partielle de 14,1% en poids de ciment par du calcaire broyé. Les résultats expérimentaux ont montré que plus la finesse du ciment est élevée, plus la résistance à la compression et la résistance à la traction sont élevées.

**Mots clés :** ciment, ajout cimentaire, calcaire, résistance à la compression, et résistance à la flexion.

## ABSTRACT

Currently, there are more than eighteen cement factories in Algeria with a diversified production exceeding twenty-five million tons per year. The addition of limestone is widely used in the cement industry, for its advantageous properties which include reducing the cost of manufacture and preserving the environment. However, its use will only be completely advantageous if the binder obtained exhibits good performance.

In this research, the physical, chemical and mechanical properties of cement CEM II/A -L 42, 5 N from Meftah cement plant was partially substituted by 14.5% by cement weight with crushed limestone. The experimental results obtained allowed us that the higher the fineness of the cement, the higher the compressive strength and flexural tensile strength.

**Key words:** cement, cement addition, limestone, compressive strength, and flexural strength.

## Remerciements

J'en profite pour remercier le **bon dieu** et tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, en particulier :

- Directeur de thèse, Directeur du Laboratoire de Génie Civil de l'Université de Blida 1, Pr. **Said Kenai** et Dr **Hamza Bensaci** pour leurs efforts dévoués et leur suivi attentif tout au long de l'élaboration de ce travail.

- Nous remercions également les responsables de l'usine de ciment de Meftah qui nous ont fourni les matériaux nécessaires, et tous les travailleurs de l'usine de contrôle de qualité, et en particulier le Directeur **Derradji Hamid** et Monsieur **Kobi** pour leur effort avec nous et leur assistance à chaque étape de nos expériences et de notre travail.

Les membres du jury dont la présence donne une dimension supplémentaire à ce travail. Avons présentons nos sincères remerciements.

## *Dédicace*

Avant de commencer, je tiens d'abord à remercier le bon dieu pour m'accorder la patience et la sérénité pour la réalisation de ce travail en premier, je dédie ce travail à mes très **chers parent** pour leurs grands sacrifices

A mes frères et mes sœurs.

A mes ami (e)s.

Et à tous ceux qui me sont chers

Merci pour votre aide et merci pour votre patience qui m'a poussé vers le succès vous êtes toujours les plus importants dans ma vie.

## TABLE DES MATIERES

RESUME.....	1
REMERCIEMENT.....	4
DEDICACE.....	5
TABLE DES MATIERES.....	6
Liste des figures.....	10
Liste des tableaux.....	14
Liste des symboles et des abreviations.....	15
INTRODUCTION GENERALE.....	16
<b>CHAPITRE 01 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
1.1. Introduction.....	18
1.2. Définition du ciment.....	18
1.3. Les types de ciment.....	18
1.3.1. CEM I.....	19
1.3.1.1. Les principaux constituants du clinker.....	19
1.3.2. Ciments composés.....	20
1.4. Résistance à la compression .....	20
1.5. Fabrication de ciment.....	20
1.5.1. Extraction et concassage.....	21
1.5.2. Préparation de cru.....	23
1.5.3. Cuisson .....	23
1.5.4. Broyage.....	25
1.5.5. Le produit final (ciment).....	25
1.6. Hydratation du ciment Portland.....	26
1.6.1. Hydratation du C3S et C2S.....	26
1.6.2. Hydratation des C3A et C4AF .....	27
1.7. Les ciments en Algérie.....	27
1.7.1. Entreprise GICA.....	27
1.7.2. Groupe LAFARGE et autres.....	28



1.8. Les ajouts minéraux.....	29
1.8.1. Définition.....	29
1.8.2. Fillers calcaires.....	29
1.8.3. Cendres volantes.....	30
1.8.4. Laitiers de hauts fourneaux.....	30
1.8.5. Fume de silice.....	31
1.8.6. La pouzzolane naturelle (p).....	31
1.8.7. Pouzzolane naturelle calcinée .....	31
1.8.8. Les sulfate de calcium.....	31
1.9. Avantage de certains ajouts cimentaires.....	31
1.9.1. Avantage techniques.....	31
1.9.2. Avantage économiques.....	32
1.9.3. Avantage écologique.....	32
1.10. Broyage des ciments au calcaire et leurs répartitions granulométriques.....	32
1.11. Influence des fillers calcaires.....	34
1.11 .1. L’ouvrabilité.....	34
1.11 .2. Le temps de prise.....	35
1.11.3. Le retrait.....	37
1.11 .4. Expansion à chaud.....	37
1.11 .5. Résistance à la compression.....	38
1.11 .6. Résistance à la flexion.....	40
1.12. Effet de la finesse du ciment.....	41
1.13. Contrôle de qualité du ciment.....	41
1.13.1. Prélèvement « cutting ».....	41
1.13.2. Préparation tas argile et calcaire.....	42
1.13.3. Réception matières premières livrées.....	42
1.13.4. Contrôle de l’alimentation du Broyeur Cru.....	42
1.13.5. Contrôle du cru sorti BC .....	43
1.13.6. Suivi de la régularité du cru alimentation fours .....	43

1.13.7. Suivi de la décarbonatation de la farine four.....	43
1.13.8. Cuisson du clinker.....	43
1.13.9. Suivi de la régularité du clinker.....	43
1.13.10. Contrôle des constituants à l'alimentation du BK.....	43
1.13.11. Broyage des produits finis.....	43
1.13.12. Stockage des ciments.....	44
1.13.13. Dispositions à prendre en cas de panne des équipements.....	44
1.13.14. Traitement des non-conformités.....	44
1.14. Conclusion.....	44
<b>CHAPITRE 02: Matériaux utilisés et essais réalisés.</b>	
2.1. Introduction.....	46
2.2. Les constituants .....	46
2.2.1. Le ciment.....	46
2.2.2. Le sable.....	46
2.2.3. L'eau.....	46
2.3. Préparation des échantillons .....	47
2.4. Les essais chimiques.....	48
2.4.1. Mesure des refus par tamisage ALPIN.....	48
2.4.2. Détermination de la perte au feu.....	50
2.4.3. Préparation des échantillons pour analyser chimique.....	51
2.4.4. Essai de densité de ciment.....	54
2.4.4.1. Mode opératoire de la masse volumique absolue.....	54
2.4.5. Essai de la surface spécifique du Blain.....	55
2.4.6. Essai de la Chaux libre par acidimétrie.....	59
2.5. Les Essais Physico-mécaniques.....	61
2.5.1. Essai de flexion et compression.....	61
2.5.2 Détermination de la consistance normale et du temps de prise.....	66
2.5.3. Détermination du début de prise.....	68
2.5.4. Essais d'expansion.....	69

2.6. Conclusion.....	71
<b>CHAPITRE 03 : RESULTATS ET DISCUSSIONS</b>	
3.1. Introduction.....	73
3.2. Les essais chimiques.....	73
3.2.1. Résultats des refus par tamisage ALPINE .....	73
3.2.2. La perte au feu .....	73
3.2.3. La surface spécifique du Blaine.....	74
3.2.4. La Chaux libre .....	75
3.3. Les essais physico-mécaniques .....	75
3.3.1. La résistance à la compression et résistance à la traction par flexion .....	75
3.3.2. La consistance.....	77
3.3.3. Le temps début et fin de prise.....	78
3.3.4. L'expansion à chaud.....	79
3.4. Conclusion .....	79
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	
Conclusion générale.....	81
Perspectives et recommandations .....	81
REFERENCES.....	82

## LISTE DE FIGURES

Figure 1.1 : Schéma de la fabrication du ciment Portland.....	22
Figure 1.2 : Carrière de calcaire et argile.....	22
Figure 1.3 : Concassage de matière.....	22
Figure 1.4 : Composition du cru.....	23
Figure 1.5 : La chaleur dans le four.....	23
Figure 1.6 : Cuisson le cru.....	24
Figure 1.7 : Réactions chimiques dans le four.....	24
Figure 1.8 : Broyage de clinker.....	25
Figure 1.9 : Grains du ciment au microscope.....	26
Figure 1.10 : Répartition granulométrique d'un ciment Portland composé avec une teneur en calcaire de 12%, ainsi que celle des deux constituants du matériau après broyage simultané.....	33
Figure 1.11 : Contenu de différentes fractions de clinker (C) et calcaire (L) après broyage simultané.....	33
Figure 1.12 : Effet du contenu des fillers en $Al_2O_3$ sur le rapport E/C.....	35
Figure 1.13 : Influence de la finesse du ciment sur le retrait endogène d'une pâte E/C=0,30.....	38
Figure 1.14 : Classification des ciments donnant les classes de résistance de la prénorme européenne EN 197 – 1.....	39
Figure 1.15 : Principe du comportement de l'ajout calcaire.....	40
Figure 1.16 : Rapport des résistances à la flexion pour des mortiers confectionné avec des ciments au calcaire et des échantillons témoin faits avec des ciments Portland sans ajout.....	41

Figure 1.17 : Prélèvement cutting.....	42
Figure 1.18 : Tas argile et calcaire.....	42
Figure 2.1 : Verser le ciment dans le disque de broyage.....	47
Figure 2.2 : placé le disque dans le broyeur.....	47
Figure 2.3 : Ciment I et ciment II et ciment III.....	48
Figure 2.4 : Matériel d'essai refus par tamisage ALPINE .....	48
Figure 2.5 : Creuset.....	50
Figure 2.6 : Balance.....	50
Figure 2.7 : Four à moufle 950°C.....	50
Figure 2.8 : Peser 10±0.1 g de ciment.....	51
Figure 2.9 : Ajouter 0.6 g de cellulose.....	51
Figure 2.10 : Broyé le ciment et cellulose Utilisation le broyeur HERZOG.....	51
Figure 2.11 : Choisir le programme 1 min.....	52
Figure 2.12 : Récupérer le ciment et cellulose broyée.....	52
Figure 2.13 : Mettre l'anneau dans la pastilleuse et Verser le ciment broyé dans cet anneau.....	52
Figure 2.14 : Machine de préparation des pastilles.....	52
Figure 2.15 : Appareille XRF.....	53
Figure 2.16 : Peser le pycnomètre vide.....	54
Figure 2.17 : Remplir le pycnomètre avec le toluène et pesé.....	54
Figure 2.18 : Peser 25g de ciment.....	55
Figure 2.19 : Peser le pycnomètre + ciment + toluène.....	55
Figure 2.20 : Appareil utilisé pour déterminer la surface spécifique.....	56

Figure 2.21 : Peser la masse du ciment à test.....	56
Figure 2.22 : Placer la grille au fond de la cellule.....	56
Figure 2.23 : Appliquer le papier filtre.....	57
Figure 2.24 : Verser le ciment dans la cellule en utilisant un entonnoir.....	57
Figure 2.25 : Placer sur celle-ci un autre disque neuf de papier filtre.....	57
Figure 2.26 : Tasser avec précaution au moyen du piston.....	58
Figure 2.27 : Retirer le piston lentement.....	58
Figure 2.28 : Mets la cellule en place.....	58
Figure 2.29 : Reprend la valeur du SSB.....	59
Figure 2.30 : Peser 1g $\pm$ 0.1 de ciment.....	59
Figure 2.31 : Introduire le ciment pesé dans un Erlenmeyer de 250 ml.....	59
Figure 2.32 : Verser dans cet Erlang 50 ml d'éthylène glycol.....	59
Figure 2.33 : Agiter fortement et mettre dans bain marie pour chauffage à Une Température de 80°C.....	60
Figure 2.34 : Filtrer ensuite sous vide.....	60
Figure 2.35 : Ajouté deux goutte du bleu de bromocresol 1%.....	60
Figure 2.36 : Titrer le filtrat avec une solution de HCl 0.1 N en présence du bleu de Bromocresol.....	60
Figure 2.37 : Changement de la coloration.....	61
Figure 2.38 : pesé 225 g d'eau et verse dans le récipient.....	61
Figure 2.39 : pesé 450 g de ciment et ajouté dans le récipient.....	62
Figure 2.40 : ajouté le sable normalise.....	62
Figure 2.41 : Mortier normal.....	62

Figure 2.42 : Préparation Le moule.....	63
Figure 2.43 : La table à chocs.....	63
Figure 2.44 : Moulage le mortier.....	64
Figure 2.45 : Raser le mortier avec l'arête d'une règle métallique .....	64
Figure 2.46 : Conservation des éprouvettes.....	65
Figure 2.47 : Démoulage des éprouvettes prismatiques.....	65
Figure 2.48 : Conservation des éprouvettes dans l'eau.....	66
Figure 2.49 : Appareil de flexion et compression.....	66
Figure 2.50 : Essai de résistance à la traction par flexion et à la compression.....	66
Figure 2.51 : Essai de la consistance normale .....	68
Figure 2.52 : Essai du début de prise.....	68
Figure 2.53 : Préparation des éprouvettes.....	70
Figure 2.54 : Appareil de bouilloire.....	70
Figure 2.55 : Essais d'expansion.....	70
Figure 2.56 : Organigramme récapitulatif des essais réalisés.....	71
Figure 3.1 : la surface spécifique du Blaine par rapport le refus .....	75
Figure 3.2 : Résistance à la compression en fonction de l'âge.....	76
Figure 3.3 : Résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge.....	76
Figure 3.4 : la quantité d'eau nécessaire pour consistance normale.....	78
Figure 3.5: Début et fin de prise pour tout le ciment.....	78

## LISTE DES TABLEAU

Tableau1.1 : Les principaux constituants du clinker.....	19
Tableau1.2 : Résistance à la compression .....	20
Tableau 1.3 : Les différents types de ciments courants.....	21
Tableau 1.4 : Les cimenteries GICA en Algérie.....	28
Tableau 1.5 : Influence de l'ajout calcaire sur le rapport E/C des bétons à maniabilité constante.....	34
Tableau 1.6: Effet de la substitution du gypse par le calcaire sur le temps de prise.....	36
Tableau 1.7 : Effet de l'addition calcaire au ciment sur le retrait dessiccation ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).....	37
Tableau 1.8 : Expansion à chaud (%) des ciments avec et sans calcaire.....	38
Tableau 2.1 : Composition granulométrique du sable normalisé.....	46
Tableur 2.2 : les différents ciments en fonction de temps de broyage.....	48
Tableau 2.3 : composition chimique du ciment.....	53
Tableau 2.4 : composition minéralogique du ciment.....	53
Tableau3.1 : Résultats des refus par tamisage ALPINE.....	73
Tableau3.2 : Résultats d'essai de la perte au feu.....	74
Tableau 3.3 : Résultats de la surface spécifique du Blaine.....	74
Tableau 3.4 : Résultats de la Chaux libre.....	75
Tableau 3.5 : Résultats de la résistance à la traction par flexion et résistance à la compression.....	76
Tableau 3.6 : Résultats de la consistance.....	77
Tableau 3.7 : Résultats du début et fin de prise.....	78
Tableau 3.8 : Résultats d'essais d'expansion.....	79



## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

- API American Petroleum Institute
- $Al_2O_3$  Alumine
- C2S Silicate bicalcique (belite)
- C3A Aluminate tricalcique
- C3S Silicate tricalcique (alite)
- C4AF Aluminate-ferrite tétracalcique
- $CaCO_3$  Carbonate de calcium
- CaO Oxyde de calcium
- CAH Aluminate de calcium hydraté
- $Ca(OH)_2$  Hydroxyde de calcium (la chaux)
- $CaSO_4$  Sulfate de calcium
- CEM Le ciment portland
- $CO_2$  Dioxyde de carbone
- C-S-H Silicate de calcium hydraté
- E/C Rapport de l'Eau sur Ciment
- GICA Groupe industriel des ciments d'Algérie
- MgO Oxyde de magnésium
- MSA Monosulfoaluminate
- $SiO_2$  Dioxyde de silicium
- SSB Surface spécifique du Blaine
- XRF La spectrométrie de fluorescence des rayons X

## INTRODUCTION GENERALE

La fabrication du ciment consomme beaucoup d'énergie et dégage une quantité importante de gaz à effet de serre notamment le gaz CO<sub>2</sub>. L'une des solutions pour réduire l'impact environnemental de la fabrication du ciment est la substitution partielle du ciment par des ajouts minéraux. Ces ajouts minéraux sont principalement le laitier de haut fourneau, la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, la schiste calcinée et le calcaire. L'utilisation de l'ajout calcaire est la plus répandue dans les cimenteries algériennes en raison de sa disponibilité à proximité des cimenteries et son intérêt technique et économique considérable. Cependant, il réduit la résistance à la compression du ciment. La réduction de la résistance à la compression peut être compensée par un broyage plus poussé du calcaire pour augmenter sa réactivité et améliorer la compacité.

L'objectif de cette étude est d'analyser l'effet de la finesse de ciment sur les performances physiques et mécaniques du ciment produit à la cimenterie de Meftah.

Le travail est décomposé en trois chapitres. Après une introduction générale citant l'objectif du travail expérimental réalisé, le premier chapitre présente une revue bibliographique sur la fabrication du ciment, le contrôle de sa qualité ainsi que les ajouts cimentaires et leurs effets sur la performance mécanique du ciment.

Le deuxième chapitre présente les détails du programme expérimental réalisé, les différents matériaux utilisés et leurs propriétés ainsi que les différents essais réalisés sur mortier.

Le troisième chapitre présente les résultats et l'analyse des résultats de l'étude expérimentale réalisée sur mortier.

En dernier, nous terminons cette étude par une conclusion générale, qui rappelle les principaux résultats obtenus et des perspectives pour des futurs travaux.

***CHAPITRE 01 :***

***ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE***

## **CHAPITRE 01 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

### **1.1. Introduction**

Dans le présent chapitre, on présente une revue bibliographique sur la fabrication et type de ciment, puis donne une généralité sur les ajouts minéraux et le contrôle de sa qualité. Une attention particulière est donnée à l'ajout calcaire et son effet sur la performance des mortiers et bétons à l'état frais et durci.

### **1.2. Définition du ciment**

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, réagi avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment appelé ciment CEM, mélangé avec des granulats et gâché avec de l'eau de façon appropriée, doit être capable de produire un mortier ou un béton qui conserve son ouvrabilité pendant un temps suffisamment long et doit, après des périodes déterminées, atteindre des niveaux de résistance prescrits et présenter une stabilité de volume à long terme.

Les ciments CEM sont constitués de différents matériaux et sont de composition statistiquement homogène du fait d'une assurance qualité couvrant les processus de production et de manutention [1, 2].

### **1.3. Les types de ciment**

Il existe cinq catégories de ciment reconnus [3] :

- Ciment portland (CEM I) : contient au moins 95% de clinker et à 5% de constituants secondaires ;
- Ciment portland composé (CEM II) : contient au moins 65% de clinker et a 35% d'autres constituants (laitier, fumée de silice, pouzzolane naturelle, cendres volantes...) ;
- Ciment de haut fourneau (CEM III) : contient entre 36 et 80% de laitier de haut-fourneau et de 20 à 64% de clinker.
- Ciment pouzzolanique (CEM IV) : contient entre 45 et 90% de clinker et de 10 à 55% de pouzzolane naturelle.

- Ciment composé (CEM V) : contient de 20 à 64% de clinker, de 18 à 50% de cendres volantes et de 18 à 50% de laitier de haut-fourneau.

### 1.3.1. CEM I

Le ciment Portland est obtenu par cuisson à haute température (1450°C) d'un mélange de 80% de calcaire et 20 % d'argile (silicates d'alumine hydraté). Les constituants principaux du clinker sont regroupés dans le Tableau 1.1.

**Tableau 1.1** : Les principaux constituants du clinker [4]

Nom du constituant	Formule chimique	Notation cimentière	Proportions moyennes(%)
Silicate tricalcique (alite)	$3\text{CaO}_3 \text{ SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	60à65
Silicate bi calcique (bélite)	$2\text{CaO}_3 \text{ SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	20à25
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO}_3 \text{ Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	8à12
Aluminoferrite tétra calcique	$4\text{CaO}_3 \text{ Al}_2\text{O}_3 \text{ Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	8à10

Les éléments décrits dans le tableau 1.1 représentent plus de 90% en masse de la composition totale du ciment Portland, ils déterminent ces principales propriétés. Des éléments d'additions, visant à substituer des matières plus ou moins hydrauliques à une partie du ciment, peuvent être ajoutés à la matrice cimentaire.

#### 1.3.1.1. Les principaux constituants du clinker :

- Silicate tricalcique ( $\text{C}_3\text{S}$ ) :

Cette phase constitue le composé principal du ciment (50 à 70%). Le  $\text{C}_3\text{S}$  (l'alite) confère essentiellement au ciment sa résistance en particulier à court terme.

- Silicate bi calcique ( $\text{C}_2\text{S}$ ) :

Le  $\text{C}_2\text{S}$  constitue entre 15 et 30% du ciment Portland. Les cimentiers le désignent par bélite qui est une forme impure de  $\text{C}_2\text{S}$ . La bélite fournit au ciment sa résistance à long terme.

- Aluminate tricalcique ( $\text{C}_3\text{A}$ ) :

Le  $\text{C}_3\text{A}$ , qui représente de 5 à 10% de la composition du ciment Portland, est la phase du clinker dont la vitesse de réaction initiale est la plus importante.

- Aluminoferrite tétra calcique ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) :

Le  $\text{C}_4\text{AF}$  représente entre 5 et 10% de la composition du ciment Portland. Les formes  $\text{C}_6\text{A}_2\text{F}$  et  $\text{C}_4\text{AF}$  sont les plus couramment rencontrées dans le ciment. La réactivité de

L'aluminoferrite tétra calcique dans l'eau est modérée et elle augmente avec la teneur en alumine. Les phases C<sub>3</sub>A et C<sub>4</sub>AF sont liquides à la température de formation du clinker, et elles constituent au cours du refroidissement, une phase interstitielle qui cristallise entre les cristaux de C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S [5].

### **1.3.2. Ciments composés**

Les éléments d'ajout sont utilisés depuis longtemps dans les matériaux cimentaires et leur utilisation est aujourd'hui devenue courante [6,7]. Ces additions peuvent être d'origines naturelle ou artificielle et la majorité sont des sous-produits de l'industrie.

### **1.4. Résistance à la compression**

Pour chaque classe de résistance normale, deux classes de résistance au jeune âge sont définies, une classe avec une résistance au jeune âge ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec une résistance au jeune âge élevée (indiquée par la lettre R) (Tableau 1.2). Les différents types de ciment sont donnés dans le tableau 1.3.

Tableau 1.2: Résistance à la compression [3]

Résistance à la compression (en MPA)				
Désignation de la classe de résistance	Résistance à court terme		Résistance courante à 28 jours	
	A2 jours	A7 jours		
32,5 N	-	≥16	≥32	≤52,5
32,5 R	≥10	-		
42,5 N	≥10	-	≥42,5	≤62,5
42,5 R	≥20	-		
52,5 N	≥20	-	≥52	-
52,5 R	≥30	-		

### **1.5. Fabrication du ciment**

La matière première composée de calcaire et d'argile est extraite de carrière, ceci vient s'ajouter d'autre matière telles que du laitier, de la pyrite, des pouzzolanes et autres en fonction du type de ciment fabriqué.

Le schéma de fabrication est donné par la figure 1.1.

Tableau 1.3: Les différents types de ciments courants[3]

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse <sup>b)</sup> )										Constituants secondaires	
			Constituants principaux											
			Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire			
						Naturelle	Naturelle calcinée	Siliceuse	Calciq		L			LL
K	S	D <sup>b)</sup>	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	66-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-P	66-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	66-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	66-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	66-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
		CEM II/B-T	66-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
		CEM II/B-L	66-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
		CEM II/B-LL	66-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
	Ciment Portland composé <sup>c)</sup>	CEM II/A-M	80-88	←----- 12-20 ----->									0-5	
		CEM II/B-M	66-79	←----- 21-35 ----->									0-5	
	CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	95-94	96-85	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CEM III/B			20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM III/C			5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique <sup>c)</sup>	CEM IV/A	66-89	—	←----- 11-35 ----->					—	—	—	0-5	
		CEM IV/B	45-64	—	←----- 36-55 ----->					—	—	—	0-5	
CEM V	Ciment composé <sup>c)</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	—	←----- 18-30 ----->			—	—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	—	←----- 31-49 ----->			—	—	—	—	0-5	

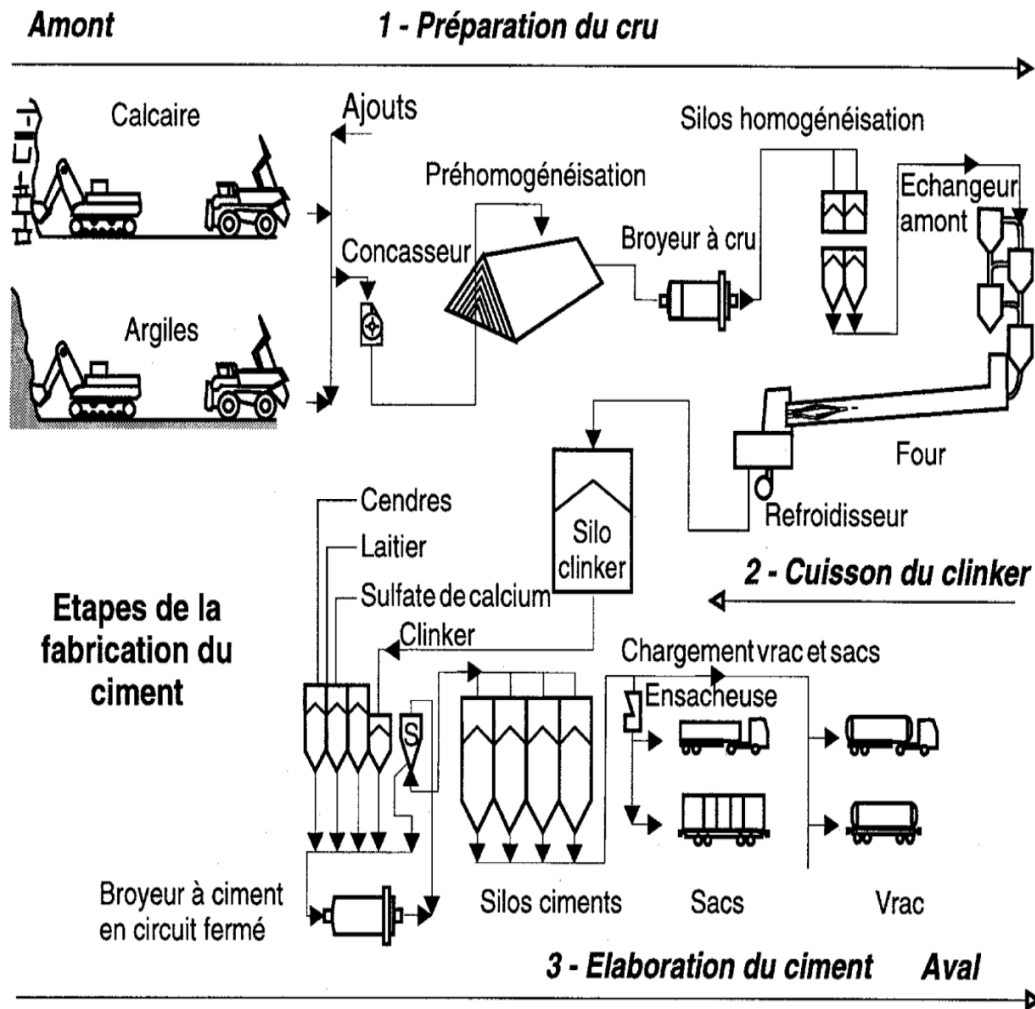
a) Les valeurs indiquées au tableau se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.

b) La proportion de fumées de silice est limitée à 10 %.

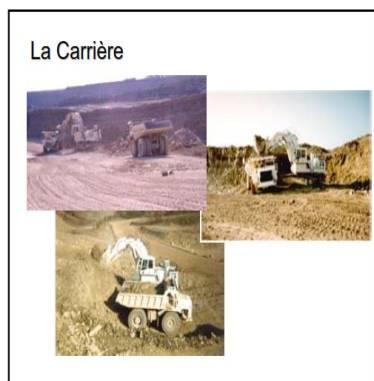
c) Dans les cas des ciments Portland composés CEM II/A-M et CEM II/B-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B et des ciments composés CEM V/A et CEM V/B, les constituants principaux autres que le clinker doivent être déclarés dans la désignation du ciment (voir des exemples à l'Article 8).

### 1.5.1. Extraction et concassage

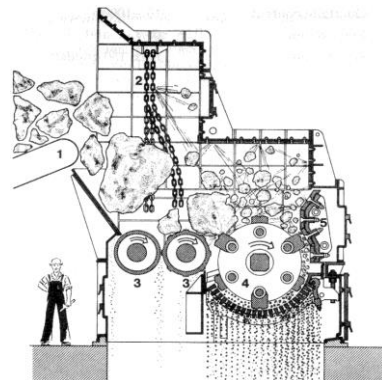
Le calcaire est extrait par explosif dans des carrières généralement prêt de la cimenterie. L'argile, plus meuble, est extraite par des engins mécaniques et transportée en cimenterie (Figure 1.2). Le concassage, fait sur les lieux de l'extraction, réduit la granulométrie des matériaux à environ 50 mm (Figure 1.3).



**Figure 1.1** : Schéma de la fabrication du ciment Portland



**Figure 1.2** : Carrière de calcaire et argile



**Figure 1.3** : Concassage de matière



### 1.5.2 .Préparation de 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. La poudre obtenue est homogénéisée par un mélangeur pneumatique ou mécanique. Le produit obtenu est appelé « le cru » (Figure 1.4).

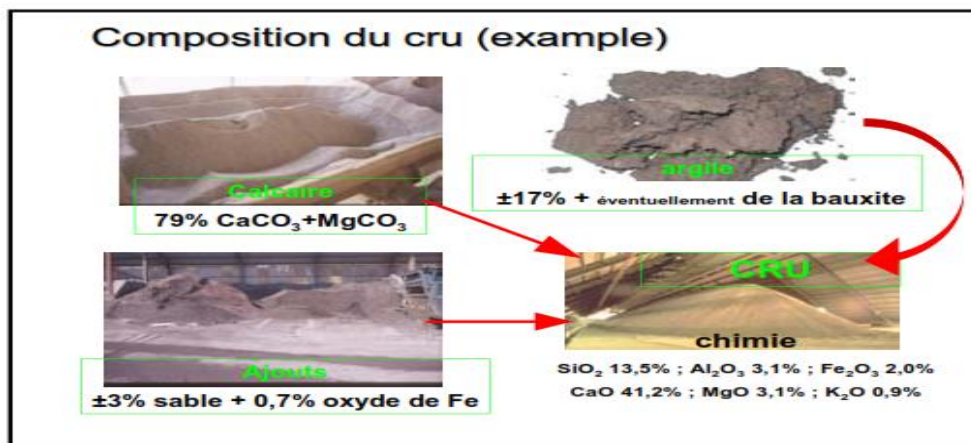


Figure 1.4 : Composition du cru.

### 1.5.3. Cuisson

Réalisée dans des fours rotatifs à une température maximale d'environ 1450°C, la cuisson permet la transformation du cru en clinker (forme de grains de 0,5 à 4 cm de diamètre) (Figures 1.5 et 1.6).

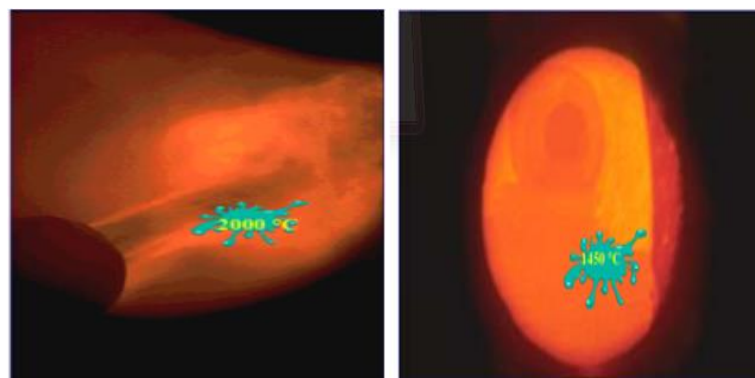
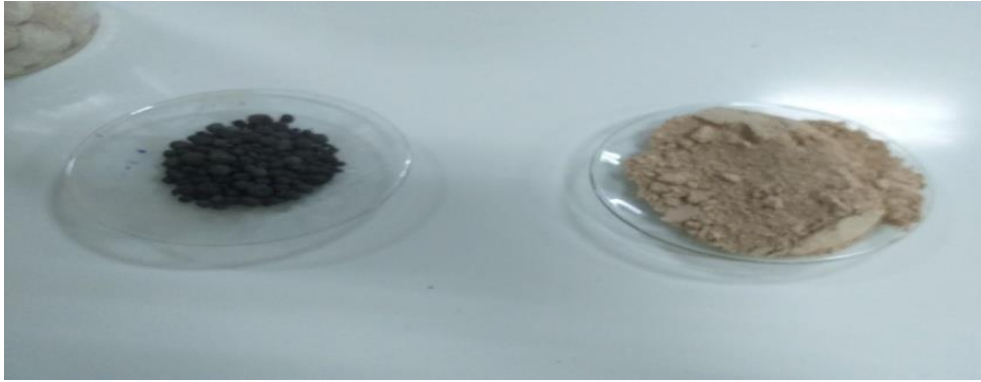


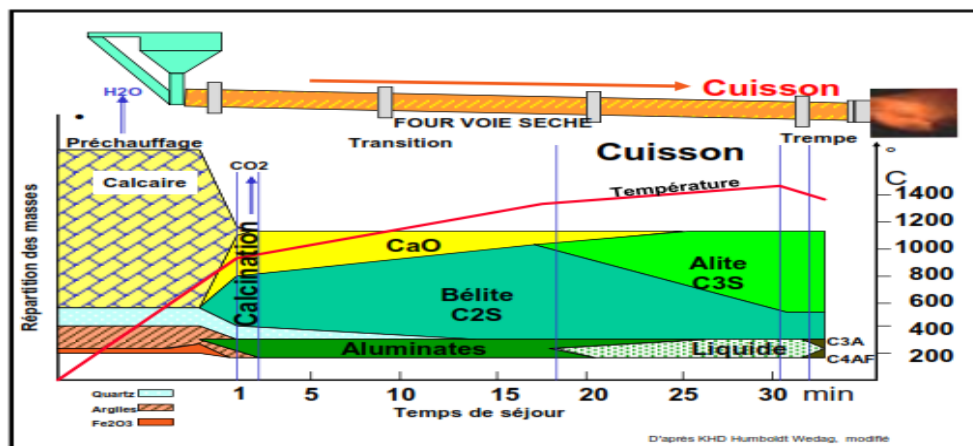
Figure 1.5 : La chaleur dans le four



**Figure1.6 :** Cuisson du cru

La matière première est finement broyée, dosée et mélangée avant d'être introduite dans un four rotatif. Circulant en sens inverse des gazes de combustion, le mélange subit les changements suivants (Figure 1.7) :

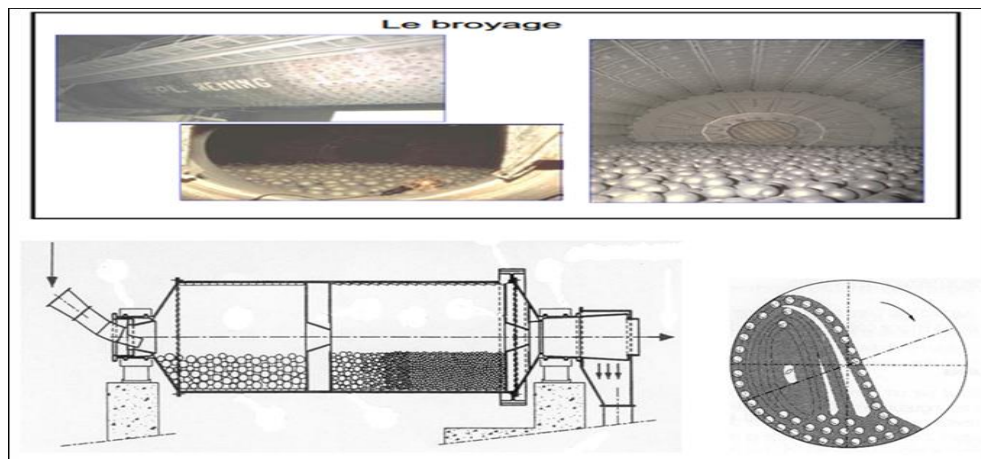
- A 700 °C, le mélange déshydraté.
- A 1100 °C, le calcaire est décarbonaté.
- Au-dessous de 1200 °C, les réactions entre composants commencent à se produire, la première formation de la phase liquide aura lieu, cette dernière s'avère essentielle en ce qui concerne les réactions de clinkerisation.
- A température finale d'environ 1450 C°, la formation des quatre principaux minéraux du clinker à savoir C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A et C<sub>4</sub>AF sera terminée (Figure 1.1). A la sortie du four, le clinker est refroidi rapidement (à une température de 50 à 250°C) pour éviter une forte cristallisation. Après un dernier broyage, pendant lequel on ajoute du gypse et éventuellement d'autres additifs, il prend la forme connue sous le nom : clinker portland..



**Figure 1.7:** Réactions chimique dans le four

#### **1.5.4. Broyage**

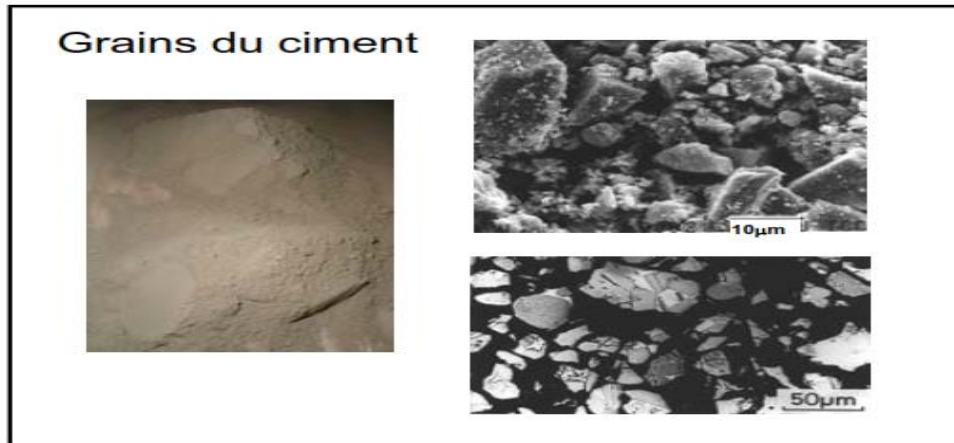
Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker doit être broyé très finement. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets (Figure 1.8). Les corps broyant sont constitués de boulets d'acier qui, par choc, font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine, ne comportant que très peu de grain supérieur à 80 microns. A la sortie du broyeur, un cyclone sépare les éléments suffisamment fins des autres qui sont renvoyés à l'entrée du broyeur. C'est également lors du broyage que l'on ajoute au clinker le gypse (3à5%) indispensable à la régulation de prise du ciment et on ajoute d'autres constituants tels que laitier de Haut-fourneau, les pouzzolanes, les fillers calcaires ou les centres volantes pour l'obtention de diverses catégories de ciment.



**Figure 1.8 :** Broyage de clinker

#### **1.5.5. Le produit final (ciment)**

Le ciment issu du broyage est conservé en silo un certain temps puis conditionné pour l'expédition en sac, en containers ou en vrac (wagon, camion, péniche)[8]. Une photo au microscope électronique à balayage des grains de ciment est donnée par la figure 1.9.



**Figure 1.9 :** Grains du ciment au microscope.

## **1.6. Hydratation du ciment Portland**

La pâte de ciment hydraté est le résultat de la réaction chimique entre l'eau et le ciment. C'est un processus chimique complexe où les principaux composés du ciment  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui durcissent avec le temps [9].

### **1.6.1. Hydratation du $C_3S$ et $C_2S$**

Les deux silicates s'hydratent immédiatement en présence de l'eau de gâchage selon les réactions chimiques suivantes ;

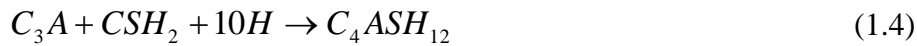


Les hydrates ainsi obtenus sont :

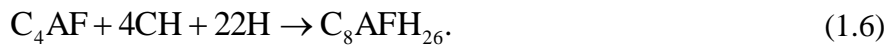
- Les silicates de calciums hydratés (C-S-H) ; Il s'agit d'un gel qui influence la plupart des propriétés de la pâte. Il se présente en une structure en feuillet, formée de cristaux très petits et mal cristallisés. Pourtant, il occupe entre 50% et 60% du volume solide d'une pâte de ciment complètement hydratée.
- La chaux hydratée  $Ca(OH)_2$  (CH ou portlandite) ; elle occupe de 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique. Dans la pâte de ciment hydraté, elle devient instable (lixiviation) lorsque le pH devient inférieur à environ 12,5.
- Elle participe peu au développement de la résistance du béton [9].

### 1.6.2. Hydratation des C<sub>3</sub>A et C<sub>4</sub>AF

Une partie de CH obtenue à partir des équations (1.1) et (1.2) réagit ensuite, avec les deux autres minéraux restants selon les réactions d'hydratation suivantes ; où le CSH<sub>2</sub> est le gypse (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O).



Ces réactions donnent un nouveau hydrate, c'est le tri sulfoaluminate, appelé sel de Condlot ou plus souvent « ettringite » (C<sub>n</sub>ASH<sub>3n</sub>). Il se dépose à la surface des grains de C<sub>3</sub>A formant une couche protectrice. Ce composé apparaît généralement sous forme de fines aiguilles enchevêtrées ou d'oursins très caractéristiques. Après la consommation totale du gypse, les deux équations (1.3) et (1.4) deviennent :



Les produits réactionnels groupés sous le nom générique d'aluminate de calcium hydraté CAH ne diffèrent que par leur teneur en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Lors de l'épuisement du gypse, la solution est sous saturée par rapport à l'ettringite ou il se transforme en quelque semaine en monosulfoaluminate (MSA). L'aluminate C<sub>4</sub>AF participe au début des réactions mais sa Contribution aux résistances est faible.

## **1.7. Les cimenteries en Algérie**

### **1.7.1. Entreprise GICA**

Le groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA) est créé le 26 novembre 2009, à la suite de la transformation juridique de l'ex-Société de Gestion des participations Industrie des ciments. Le tableau 1.4 présente les cimenteries de l'entreprise GICA en Algérie. GICA produit les ciments ordinaire mais aussi en août 2019, elle obtient deux certifications qualité de l'American Petroleum Institute (API) et l'Institut algérien de normalisation (IANOR) pour le ciment pétrolier, dans la production du ciment pétrolier à Ain El Kebira [10].

Tableau 1.4 : Les cimenteries de GICA en Algérie

Nom de cimenterie	Partenaires	Capacité de production/an
Société des ciments de Sour El Ghozlane (SCSEG-Bouira)	65 % GICA, 35 % Buzzi Unicem (Italie)	1 millions de tonnes de ciment
Société des ciments de la Mitidja (SCMI-Blida)	65 % GICA, 35% Lafarge (France)	1 millions de tonnes de ciment
Société des ciments de Zahana (SCIZ-Mascara)	65 % GICA, 35% ASEC cement company (Egypte)	1,2 millions de tonnes de ciment
Société des ciments de Hamma Bouziane (SCHB-Constantine)	100 % GICA	1 millions de tonnes de ciment
Société des ciments de Tebessa (SCT)	100 % GICA	500.000 millions de tonnes de ciment
Société des ciments d'Ain El Kebira (SCAEK-Sétif)	100 % GICA	1 millions de tonnes de ciment
Société des ciments de l'Algérois (SCAL)	100 % GICA	450.000 millions de tonnes de ciment
Société des ciments de Saida (SCIS)	100 % GICA	500.000 millions de tonnes de ciment
Société des ciments d'Ain Touta (SCIMAT-Batna)	100 % GICA	1 millions de tonnes de ciment
Société des ciments de Hadjar Soud (SCHS-Annaba)	65 % GICA ,35% Buzzi Unicem (Italie)	950.000 millions de tonnes de ciment
Société des ciments de Béni Saf (SCIBS-Ain Temouchent)	65% GICA ,35 % Pharaon group (Arabie Saoudite)	1,2 millions de tonnes de ciment
Entreprise des ciments d'Ech-Cheliff (ECDE)	100 % GICA	2 millions de tonnes de ciment
Sigues, Oum Elbouagui ( 21 juillet 2019)	100 % GICA	2,2 millions de tonnes
Béchar	100 % GICA	1 million de tonnes ??

### 1.7.2. Groupe LAFARGE et autres

Lafarge est un groupe français de matériaux de construction, leader mondial N°1 dans son secteur, et l'un des leaders mondiaux de la production de ciment. LafargeHolcim est né de la fusion de Lafarge et Holcim en 2015. Les usines cimentaires du LAFARGE en ALGERIE sont : usine de M'sila (LCM), usine de Djemorah (LCD), usine de Oggazù (LCO) [11].

En plus, plusieurs cimenteries sont rentrées en production par le secteur privé comme la cimenterie de Biskra avec une capacité de production de 6 millions de tonnes, cimenterie dans la région d'Aflou à Laghouat et la cimenterie d'Adrar.

## **1.8. Les ajouts minéraux**

### **1.8.1. Définition**

La plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation (broyage par exemple). Ainsi l'incorporation des ajouts minéraux à la formulation de béton comme substituant du ciment contribue à réduire le coût, à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO<sub>2</sub> de l'industrie cimentière dans la nature [12]. Les ajouts cimentaires ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner avec la chaux libérée par l'hydratation de C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S pour former un silicate de calcium hydraté de même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment portland [13].

Les ajouts cimentaires peuvent être des produits artificiels comme le laitier des hauts fourneaux, les cendres volantes et la fumée de silice ou des produits naturels comme la pouzzolane naturelle (cendres volcaniques, scories) et le calcaire [14].

### **1.8.2. Fillers calcaires**

Le calcaire est une roche sédimentaire, composée majoritairement de carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub>. Le calcaire a été introduit dans la fabrication des ciments à la suite des deux guerres mondiales pour augmenter la production et satisfaire la demande accrue de ce produit. Ainsi, son emploi a donné des résultats prometteurs de résistance et de durabilité. Par la suite, plusieurs études ont conclu que les fillers calcaires ont une action bénéfique sur la maniabilité des liants hydrauliques, ainsi que sur les propriétés mécaniques des bétons [15].

Le filler calcaire avait principalement un effet physique de comblement de vide et d'amélioration de la porosité. Plusieurs travaux [16,17] montrent que le filler calcaire laisse entrevoir une autre efficacité provenant de réaction superficielle entre les grains de calcite et le ciment, d'où les auteurs ont constaté les constatations suivantes :

- Le calcaire réagit avec les aluminates du ciment pour former des carboaluminates de calcium hydratés [17].

- L'ion  $\text{CO}_3$  peut se substituer aux ions  $\text{SO}_4^-$  dans les sulfates hydratés [16,17].
- Le calcaire finement broyé accélère l'hydratation du ciment et plus particulièrement celle de son composé principal ; le silicate tricalcique [17,18].
- Le ciment au calcaire possède une demande en eau moins importante que celle des autres ciments pouzzolanique [18,19].

### 1.8.3. Cendres volantes

Les cendres volantes sont un sous-produit de la combustion du charbon pulvérisé aux usines génératrices de puissance électriques. Les cendres volantes sont alors rassemblées des gaz d'échappement par les dépoussiéreurs électrostatiques ou les filtres à manches. Les constituants des cendres volantes sont principalement la silice, l'alumine, le fer et le calcium contenant en verre de silicate. La densité relative des cendres volantes s'étend généralement entre 1,9 et 2,8 et la couleur est généralement grise. Leur diamètre allant de  $1\mu\text{m}$  à  $100\mu\text{m}$  ( $50\% < 20\mu\text{m}$ ). La forme et la granulométrie des cendres volantes ont un effet important sur l'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais [20].

Les cendres volantes se divisent en trois catégories :

- Les cendres silico-alumineuses (cendre de houille).
- Les cendres sulfocalcique (cendre de lignite).
- Des cendres non typifiées de composition irrégulière ou de propriétés assez incertaines [21].

### 1.8.4. Laitiers de hauts fourneaux

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau puis broyé à une finesse égale ou inférieure à celle du ciment, lorsqu'il est activé, c'est un matériau hydraulique. Il est nodulaire et sa composition chimique contient 40% à 50% d'oxyde de calcium, 25% à 35% de silice, 12% à 30% d'alumine et une petite quantité d'oxyde de magnésium et d'autres oxydes. Tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker, il est considéré comme un bon additif parmi les matériaux cimentaires supplémentaires. L'ajout de laitier au ciment portland en vue d'amélioration des propriétés physico-chimiques des ciments a été l'objet d'étude de plusieurs chercheurs [22].



### **1.8.5. Fume de silice**

La fumée de silice est un sous-produit de fabrication du silicium ou de ferrosilicium. Ils se présentent sous forme de microsphères de silice ayant des diamètres moyen de 0.1µm. Leur teneur en silice vitreuse varie de 75% à 95% [23]. La taille fine de ses particules permet d'étendre la granulométrie de l'ensemble du squelette granulaire du ciment en comblant les vides et en augmentant la compacité. De plus, sa structure amorphe permet de déclencher une réaction pouzzolanique par la consommation de la chaux et la création de nouveaux hydrates [16]. D'un point de vue chimique, les fumées de silice sont essentiellement constituées de silice. Les caractéristiques très particulières des fumées de silice en font des pouzzolanes hautement réactives en raison de leur forte teneur en silice, de leur état amorphe et de leur finesse extrêmement élevée [21].

### **1.8.6. La pouzzolane naturelle (P)**

C'est un produit composé essentiellement de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. La pouzzolane naturelle peut être d'origine volcanique [24].

### **1.8.7. Pouzzolane naturelle calcinée (Q)**

Les pouzzolanes naturelles calcinées sont des matériaux d'origine volcanique, des argiles, des schistes ou des roches sédimentaires, activés thermiquement [25].

### **1.8.8. 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 teneur de 5% sous forme de gypse de l'hémihydrate [26].

## **1.9. Avantage de certains ajouts cimentaires**

### **1.9.1. Avantages techniques**

D'abord, l'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Ensuite, les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance, l'imperméabilité et la ténacité

aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts cimentaires améliorent la résistance à la fissuration.

### **1.9.2. Avantage économiques**

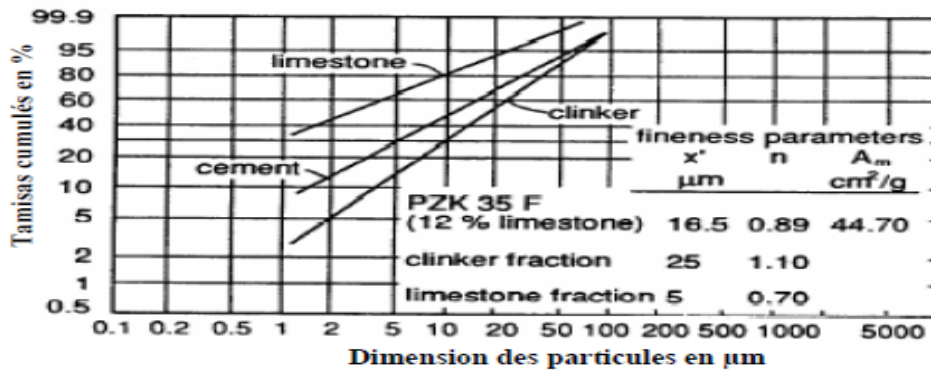
La plupart des matériaux (ajouts) susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou béton sont des sous-produits, et à ce titre, demandent relativement moins d'énergie. Toutefois, la distance qui sépare la source des ajouts cimentaires et le coût élevé du transport qui en résulte risquent de l'emporter sur leurs avantages économiques potentiels. De même, le manque de stockage abordable est parfois une barrière à leur utilisation dans certains marchés.

### **1.9.3. Avantage écologique**

Le remplacement du ciment portland par des ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO<sub>2</sub>. En général l'utilisation de cendres volantes et de fumées de silice comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie [27].

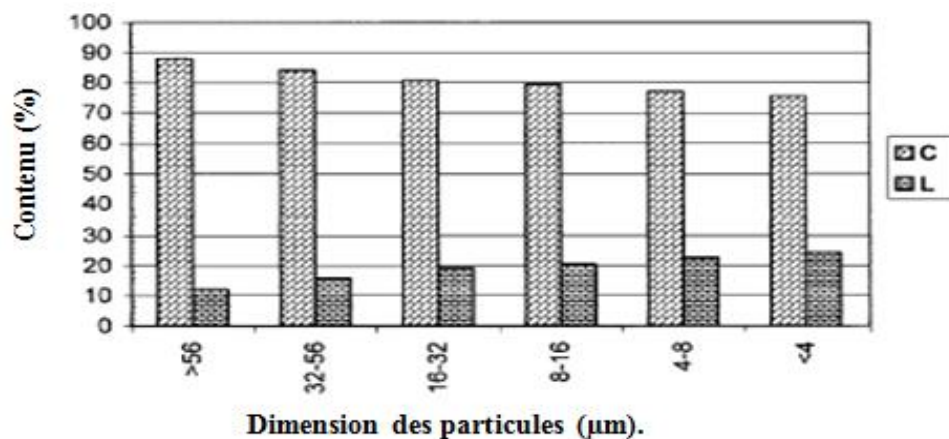
## **1.10. Broyage des ciments au calcaire et leurs répartitions granulométriques**

Les additions calcaires avec broyage instantané participent souvent à un moindre degré ou pas du tout aux réactions d'hydratation. Par conséquent, les ciments de même finesse qui contiennent des quantités significatives d'addition auront des résistances inférieures que les ciments correspondants sans addition, dû en partie à la dilution et en partie à une concentration du clinker dans les fractions des particules les plus brutes[28]. La perte de résistance peut être compensée par une augmentation de résistance résultant d'une répartition granulométrique plus large du mélange. Ceci peut être le résultat d'un broyage simultané du clinker et du calcaire, ou par un broyage global plus fin du ciment. Lors d'un broyage simultané du ciment et du calcaire, la répartition granulométrique du clinker est significativement différente que celle du mélange[29]. Le clinker étant plus difficile à broyer, sa répartition granulométrique est plus étroite. Le calcaire de son côté est plus facile à broyer, sa distribution est plus large. Le mélange obtenu aura une répartition plus large que celui du clinker. La figure 1.10 montre les répartitions granulométriques d'un ciment au calcaire et de ses deux différents constituants après un broyage simultané du clinker et l'ajout calcaire.



**Figure 1.10 :** Répartition granulométrique d'un ciment Portland composé avec une teneur en calcaire de 12%, ainsi que celle des deux constituants du matériau après broyage simultané [28].

Tsivilis et al.[29] ont étudié l'influence de l'ajout calcaire sur la répartition granulométrique des ciments au calcaire après un broyage simultané. Quatre mélanges de clinker/calcaire, contenant 10%, 20%, 30% et 40% de calcaire, ont été broyés à des finesses différentes, dans un broyeur à boule. Ils ont constaté qu'une augmentation du contenu de calcaire, mène à une répartition granulométrique plus large du mélange. Ceci se présente par une concentration du calcaire dans les fractions ( $< \mu\text{m} 8$ ), alors que le clinker est concentré dans les fractions les plus brutes. La figure 1.11 présente les fractions de différents diamètres du calcaire et du clinker pour un mélange d'une finesse de 3890  $\text{cm}^2/\text{g}$  et un contenu en calcaire de 20%.



**Figure 1.11 :** Contenu de différentes fractions de clinker (C) et calcaire (L) après broyage simultané [29].

## 1.11. Influence des fillers calcaires

### 1.11 .1. L'ouvrabilité

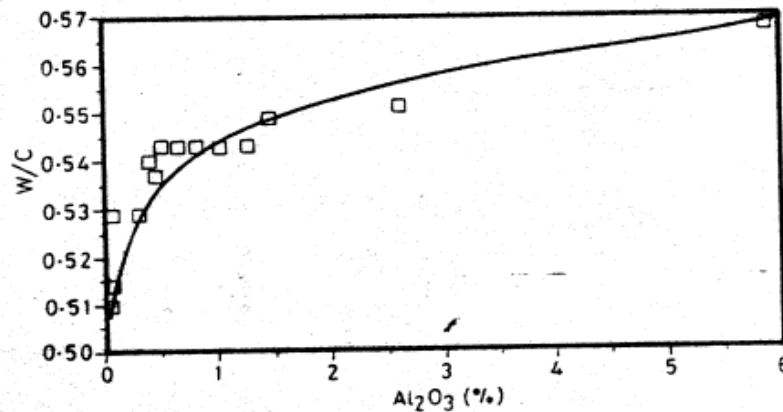
Du fait de leurs finesses, les fines calcaires auront naturellement pour effet d'accroître la quantité d'eau de mouillage des granulats, donc, devrait conduire à un accroissement du rapport E/C à maniabilité égale[30]. Par ailleurs, le calcaire, plus facile à broyer que le clinker, a généralement une répartition granulométrique plus large qui permet aux particules de calcaire de combler les vides entre les particules de clinker. Ceci conduit à une réduction de la demande en l'eau, et ainsi à une densification de la structure de la pâte durcie de ciment. Cet effet physique, vraisemblablement, plus que compensent tous les effets extérieurs qui tendraient à augmenter la demande de l'eau liée à un matériau plus fin. **Schmidt [28]**, explique l'effet bénéfique des additions de calcaire sur la rhéologie des bétons en termes d'améliorations de la répartition granulométrique. Les fines calcaires contribuent également au maintien de l'homogénéité des bétons en augmentant la cohésion et en s'opposant à la ségrégation [31]. L'étude conduite par **Livese [32]** montre l'influence des ajouts calcaires au ciment sur le rapport E/C des bétons à maniabilité constante (slump de  $40 \pm 10$  mm) (Tableau 1.5).

Tableau1.5 : Influence de l'ajout calcaire sur le rapport E/C des bétons à maniabilité constante [32]

Référence	Calcaire %	CaCO <sub>3</sub> %	Finesse (m <sup>2</sup> /kg)	Rapport E/C	Slump (mm)
A0	0	95	345	0.61	43
A5	5	95	500	0.59	40
A25	25	95	515	0.57	41
B0	0	65	345	0.58	39
B5	5	65	400	0.58	30
B25	25	65	675	0.63	37

De cette étude, on peut voir l'importance du choix des caractéristiques du calcaire (pourcentage de CaCO<sub>3</sub> et la finesse) sur l'ouvrabilité des bétons. Le calcaire avec un pourcentage élevé en CaCO<sub>3</sub> donne une meilleure ouvrabilité du béton que celui qui contient un faible taux de CaCO<sub>3</sub>.

La rhéologie, du mortier et du béton dépend de la qualité du filler, de sa finesse, et du gypse supplémentaire. À un rapport E/C constant, une addition calcaire grossièrement broyée diminue la contrainte de cisaillement. Comme les particules fines des fillers ont une action favorable sur la cohésion [30]. La proportion des gros grains doit être limitée. Quand les fillers sont finement broyés, leur action réductrice d'eau est plus grande pour un  $E/C < 0,4$ , mais cette propriété dépend également de la qualité du calcaire [33]. Certains d'entre eux contenant de l'argile par exemple peuvent produire l'effet opposé. C'est ce que démontre la Figure 1.12 qui représente le rapport E/C en fonction du pourcentage de l'alumine (représentant le contenu d'argile) pour béton à une ouvrabilité constante contenant 18% de calcaire finement broyé. Ainsi la nature du calcaire est aussi importante. Si la qualité de la roche calcaire est bien choisie, la rhéologie du mortier ou du béton n'est ni compromise ni sensiblement améliorée par l'addition des fillers calcaire [33].



**Figure 1.12:** Effet du contenu des fillers en  $Al_2O_3$  sur le rapport E/C [33].

### 1.11 .2. Le temps de prise

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important, est lié à de nombreux paramètres parmi eux ; le type de ciment, la finesse de mouture ; le temps de prise est d'autant plus rapide que la finesse est grande [34]. La réaction du  $C_3A$  avec l'eau est très violente (beaucoup de chaleur) et elle doit être contrôlée par les sulfates de calcium (gypse  $C\bar{S}$  ; H2 ou anhydrite:  $C\bar{S}$  ).

La réaction du  $C_3A$  forme des sulfoaluminates dont la forme la plus connue est l'ettringite ( $3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.31H_2O$ ) [9]. Le rôle joué par le calcaire lors de la prise des ciments

avec ajouts calcaire n'est pas encore définitivement éclairci. La théorie initialement admise était en général qu'il se comporte comme un filler inerte et que son influence est de ce fait purement physique. Cependant, récemment une réaction chimique entre le calcaire (carbonate de calcium) et le C<sub>3</sub>A du clinker donnant naissance à du monocarboaluminate de calcium (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.CaCO<sub>3</sub>.11H<sub>2</sub>O) a été mise en évidence [30]. Cette réaction s'établit plus ou moins de la même façon que celle du C<sub>3</sub>A avec le sulfate de calcium. Et de même le mono carbonate de calcium peut agir d'une manière semblable que le sulfoaluminate sur la régularisation du temps de prise [33].

Afin de réduire le coût de la production, certains chercheurs ont étudié la possibilité de substituer une partie de gypse par du calcaire. L'étude de **Bobrowski et al [35]** a montré que le temps de prise des ciments avec substitution d'une partie du gypse par du calcaire est maintenu à un niveau acceptable (Tableau 1.6). **Le Negro [36]** a aussi montré que la substitution partielle du gypse par le calcaire (jusqu' à 50%) est possible sans effets nuisibles sur le retrait et la résistance à la compression.

**Tableau 1.6** : Effet de la substitution du gypse par le calcaire sur le temps de prise [35]

Calcaire (%)	Gypse (%)	Cimenterie 1		Cimenterie 2	
		Début de prise (min)	Fin de prise (min)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)
8	0	435	480	/	/
06	02	161	530	166	255
04	04	261	451	187	297
02	06	196	454	197	302

Cette substitution dépend également de la teneur en C<sub>3</sub>A du clinker. Pour une teneur de 9% en C<sub>3</sub>A et de gypse, il est possible de remplacer de 25 à 50% du gypse par du calcaire. De même, avec un ciment contenant 14,5% C<sub>3</sub>A et de gypse, seulement la substitution 25% du gypse est recommandée. La substitution est encore réduite à 10% si le contenu de gypse est faible. L'optimal de contenu de sulfate de calcium s'élève avec l'augmentation de la finesse du ciment, puisqu'une augmentation de la surface spécifique soulève le taux de réaction, ceci implique que le taux de réaction entre C<sub>3</sub>A et gypse est commandé par la quantité des particules les plus fines du clinker.

### 1.11 .3. Le retrait

Plusieurs recherches [9, 37] ont prouvé que le retrait de dessiccation du ciment Portland peut être affecté par l'addition du calcaire ou du carbonate de calcium. Adams et Race [37] ont constaté que l'addition de 2 à 5% de calcaire au ciment peut de manière significative augmenter le retrait de dessiccation à 4 jours. Les valeurs trouvées à 4 jours sont supérieures à celles tolérées par le département de transport de la Californie à savoir 0.048%. Par contre, d'autres chercheurs n'ont trouvé aucune augmentation du retrait de séchage à 4 jours avec l'addition de 5,3% de calcaire, mais une augmentation de 0,005% a été observée à 11, 18 et 25 jours (Tableau 1.7).

**Tableau1.7:** Effet de l'addition calcaire au ciment sur le retrait dessiccation ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) [37].

Calcaire (%)	0	3.1	5.3
4 jours	430	430	430
11jours	640	640	690
18jours	740	740	790
25jours	770	770	820

Le mécanisme responsable de l'effet nuisible des additions calcaires sur le retrait de dessiccation n'est pas complètement compris. Un facteur de contribution serait la finesse. Beaucoup de chercheurs [9, 37] ont observé que le retrait du ciment augmente à mesure que la surface spécifique augmente (Figure1.13). D'autre part, les impuretés présentes dans le calcaire pourraient également contribuer à l'augmentation du retrait. Selon

Ramachandran et Zhang [38], l'ajout de  $\text{CaCO}_3$  au ciment peut augmenter la formation de C-S-H pendant l'hydratation et par conséquent la quantité de gel dans la pâte, donnant ainsi un retrait plus élevé.

### 1.11 .4. Expansion à chaud

D'après Bombled [33], l'expansion est identique pour un ciment avec ajout calcaire et un ciment sans ajout. Ces constatations sont confirmées par Hooton [39] qui a comparé trois ciments avec et sans calcaire (Tableau 1.7). On remarque que l'ajout calcaire n'a eu aucun effet nuisible sur l'expansion à chaud des ciments.

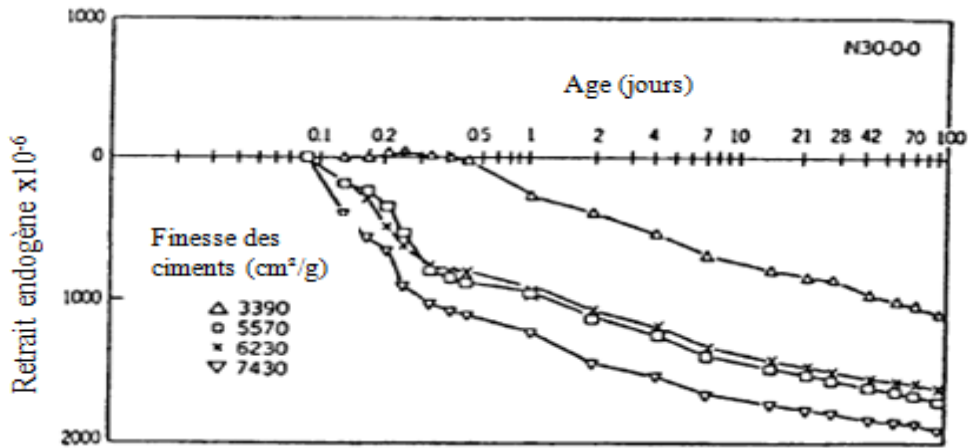


Figure 1.13. : Influence de la finesse du ciment sur le retrait endogène d'une pâte E/C=0,30) [9].

Tableau1.8 : Expansion à chaud (%) des ciments avec et sans calcaire [39].

Ciment	CaCO3 (%)	Expansion autoclave
1	0.3	0.038
1c	4.1	0.034
2	0.8	-0.010
2c	4.7	0.029
3	0.3	0.093
3c	2.6	0.026

### 1.11 .5. Résistance à la compression

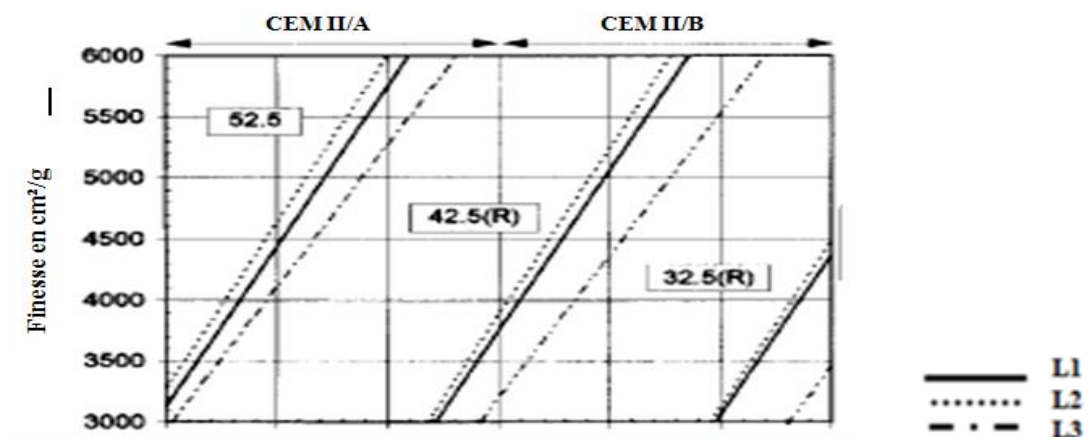
La présence du calcaire comme ajout aux ciments peut modifier considérablement leurs comportements vis-à-vis des résistances mécaniques. Plusieurs études [40, 32, 41] ont montré un développement rapide de la résistance à la compression à jeunes âges des mortiers avec ciment au calcaire. Cette augmentation est due selon **Borgholm** [41] à l'hydratation accélérée de l'alite du ciment en présence du calcaire. Par ailleurs les mêmes études rapportent des diminutions de la résistance à 28 jours. **Kakali et al** [42], ont montré que la teneur en eau liée (non évaporée), déterminée par essai de thermogravimétrie est plus élevée dans les pâtes de ciment avec ajout calcaire en comparaison au ciment sans ajout calcaire. Ceci indique que le calcaire améliore la réactivité du clinker et exploite son potentiel hydraulique. D'autre part, le contenu de  $\text{CaOH}_2$  dans la pâte de ciment au calcaire est plus élevé que dans celle sans calcaire. Cette augmentation indique une accélération d'hydratation des silicates de calcium. **Schmidt** [28] a observé que la



résistance des ciments n'est pas normalement réduite par l'addition de 5-10% de calcaire, mais l'effet de dilution est vu à des dosages plus élevés à moins que le ciment soit plus finement broyé.

Il est bien connu que la résistance du ciment Portland CEMI augmente avec la finesse du clinker. Néanmoins, à une finesse plus grande que 5000 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ), la résistance augmente lentement et des problèmes de l'ouvrabilité se produisent [33]. Pour atteindre la classe de résistance 45, la plupart des clinkers exigent une finesse de 2500  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

Ceci signifie qu'une grande fraction du ciment ne s'hydrate pas, et les problèmes rhéologiques sont susceptibles d'apparaître. Les ciments avec ajout calcaire, par rapport aux ciments Portlands exigent une augmentation de la finesse liée à une augmentation du contenu du ciment exigée pour obtenir la même résistance à 28 jours. L'étude effectuée par **Tsivilis et al [40]**, montre l'effet de la finesse du clinker et la composition du calcaire sur la résistance à la compression des ciments avec trois ajouts calcaires avec différents pourcentages en  $\text{CaCO}_3$  (L1= 95.3, L2=88.4, L3= 84.1%) (Figure 1.14).



**Figure 1.14 :** Classification des ciments donnant les classes de résistance de la prénorme européenne EN 197 – 1 [29].

Une autre interaction peut être susceptible d'affecter positivement la résistance à la compression ; c'est l' « effet liant » qui est constitué par la possibilité du calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) de former au contact de la phase aluminatée ( $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{AH}_13$ , ...) de composés dits carboaluminates. Cet effet se manifeste à tout âge (au moins à partir de 7 jours) [43, 44]. Il dépend de la teneur du  $\text{C}_3\text{A}$  du ciment. Bedard et Bergeron [36] ont trouvé que l'addition de 4,1% et 2,3% de calcaire donne une résistance à la compression à jeune âge (16 et 24h) supérieure à celle d'un ciment sans ajout calcaire avec une teneur élevée en  $\text{C}_3\text{A}$ .

La figure 1.15 montre le développement de la résistance avec la finesse et le pourcentage de l'ajout calcaire. On remarque que le ciment contenant du calcaire, développe la même résistance à la compression à 28 jours que le CEMI produit à partir du même clinker. Cependant, la résistance initiale à la compression est plus élevée pour le ciment avec ajout que celle du CEMI de faible finesse. La diminution de la finesse du clinker mène à une diminution identique de la résistance à tout âge. L'addition du calcaire a comme conséquence une diminution de la résistance proportionnelle à l'addition du fillers [33].

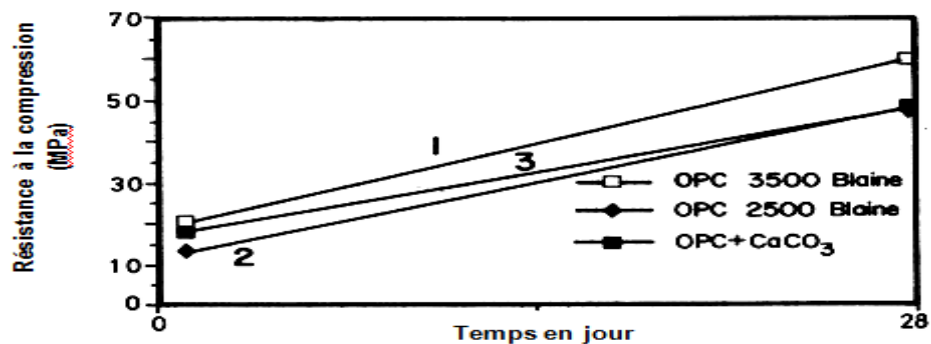
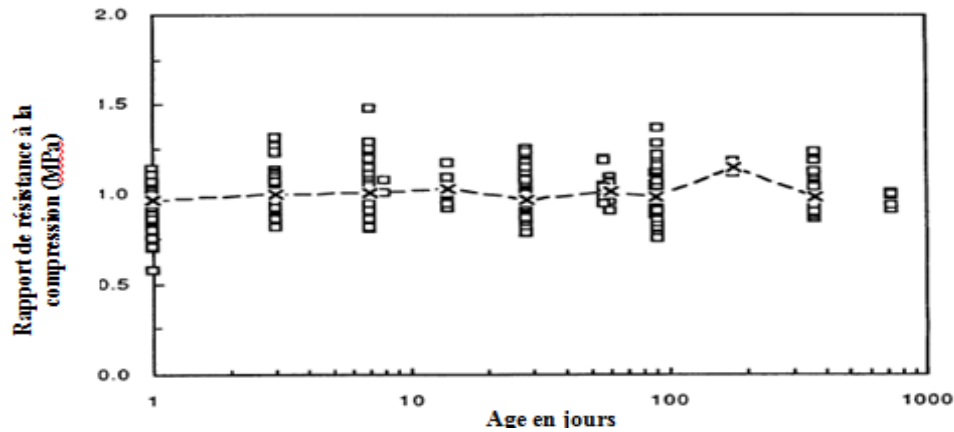


Figure 1.15 : Principe du comportement de l'ajout calcaire [33].

#### 1.11 .6. Résistance à la flexion

Bonavetti et al [43], n'ont observés que 10% d'ajout calcaire conduit à une légère diminution (l'ordre de 3 à 5 %) de la résistance à la traction à 28 jours. Cependant, ils n'ont constatés aucun changement à 7 jours, toutefois, une augmentation de la résistance à la traction à 1 jour a été enregistrée pour les bétons contenant du ciment avec ajout calcaire par rapport au béton de référence.

La figure 1.16 résume la variation de la résistance moyenne à la flexion de 59 ensembles d'échantillons provenant de trois sources différents portant sur l'effet de l'ajout calcaire sur la résistance à la flexion. La moyenne des rapports des résistances des mortiers avec ajout calcaire et celles sans ajout calcaire varie entre 0,99 et 1,08 pour tous les âges. Ces résultats montrent que l'effet de l'ajout calcaire est négligeable sur la résistance à la flexion.



**Figure 1.16:** Rapport des résistances à la flexion pour des mortiers confectionné avec des ciments au calcaire et des échantillons témoin faits avec des ciments Portland sans ajout [28].

### 1.12. Effet de la finesse du ciment

L'augmentation de la surface spécifique des grains solides augment la cinétique d'hydratation, et plus d'hydrates sont formés en début d'hydratation. Ceci a une influence directe sur l'évolution de la résistance au jeune âge, qui est intrinsèquement liée à l'apparition des amas de particules solides à travers la microstructure. La résistance en compression est ainsi d'autant plus importante que la surface spécifique est grande [45].

### 1.13. Contrôle de la qualité du ciment lors de la fabrication

#### **1.13.1. Prélèvement cutting**

Cette méthode d'analyse consiste à décrire les modalités de prélèvement des cuttings lors de la formation des trous en carrière. Elle s'applique aux cuttings produites lors de la formation des trous en vue d'abattre les fronts de calcaire haut titre et bas titre en carrière (Figure 1.17).



**Figure 1.17** :Prélèvement cutting

### **1.13.2. Préparation tas argile et calcaire**

Cette méthode d'analyse consiste à décrire les activités de laboratoire carrière (préparation tas de calcaire et argile), elle s'applique aux tas calcaire 1 et 2 par titre et humidité, ainsi que le suivi de la formation des tas d'argile par l'humidité (Figure 1.18).



**Figure 1.18** : Tas argile et calcaire

### **1.13.3. Réception matières premières livrées**

L'objet de cette méthode d'analyse est de décrire les modalités de réception et de vérification de la conformité des produits livrés. Elle s'applique aux produits achetés suivants :

- Matières premières d'addition : Minerai de fer, sable.
- Matières premières d'ajout au ciment : gypse.

### **1.13.4. Contrôle de l'alimentation du Broyeur Cru**

L'objet de cette méthode d'analyse est de décrire les modalités de contrôle qualité des matières premières alimentant le Broyeur Cru (BC).

L'objectif est de bien caractériser ces matériaux chimiquement afin d'assurer la qualité et la régularité de cru aux sortie de broyeur. Elle s'applique aux matières alimentant le Broyeur Cru.

#### **1.13.5. Contrôle du cru sorti BC**

L'objet de cette méthode d'analyse est de décrire comment contrôler le cru à la sortie du BC. Elle s'applique au cru prélevé à la sortie du BC quand ce dernier est en marche [45].

#### **1.13.6. Suivi de la régularité du cru alimentation Fours**

L'objet de cette méthode d'analyse est de décrire comment suivre la régularité du cru à l'alimentation du four.

#### **1.13.7. Suivi de la décarbonatation de la farine four**

L'objet de cette méthode d'analyse est de décrire les contrôles relatifs à la préparation de la farine cyclone (C4) au niveau de la tour de préchauffage avant introduction dans le four. Elle s'applique aux farines chaudes sorties cyclones C4 quand le four est en marche.

#### **1.13.8. Cuisson du clinker**

L'objet de cette méthode d'analyse est de décrire les contrôles relatifs au clinker à la sortie du refroidisseur nécessaires à l'orientation du stockage du clinker.

#### **1.13.9. Suivi de la régularité du clinker**

L'objet de cette méthode d'analyse est de décrire les contrôles nécessaires au suivi de la régularité du clinker produit [45].

#### **1.13.10. Contrôle des constituants à l'alimentation du BK**

L'objet de cette méthode d'analyse est de définir les modalités de contrôle des constituants entrant dans le broyage des produits finis.

#### **1.13.11. Broyage des produits finis**

L'objet de cette méthode d'analyse est de préciser les modalités de contrôle des ciments produits. L'objectif est d'assurer la qualité et la régularité des ciments produits et d'atteindre les cibles décrites sur les cartes de contrôle.

#### **1.13.12. Stockage des ciments**

L'objet de cette méthode d'analyse est d'assurer le stockage de chaque qualité de ciment dans le silo qui lui est désigné.

#### **1.13.13. Dispositions à prendre en cas de panne des équipements**

Maintenir le déroulement des contrôles sans perturber la qualité des produits fabriqués en attendant de réparer l'équipement défectueux par des inspections et étalonnage des équipements laboratoire.

#### **1.13.14. Traitement des non-conformités**

Cette procédure décrit l'organisation mise en place au niveau laboratoire pour traiter les non-conformités qualité. Elle s'applique au clinker à la sortie refroidisseur et entrée BK, au calcaire à l'entrée BK et aux ciments à la sortie du broyeur et aux ciments destinés à l'autocontrôle (à la sortie des silos) [46].

### **1.14 Conclusion**

La synthèse bibliographique a montré que l'incorporation des ajouts minéraux dans la fabrication du ciment réduit la consommation de clinker et par conséquent le coût de fabrication et réduit également les émissions de dioxyde de carbone dans l'air.

La présence du calcaire comme ajout aux ciments peut modifier considérablement leurs comportements vis-à-vis des résistances mécaniques. Les ciments de même finesse qui contiennent des quantités significatives d'addition auront des résistances inférieures que les ciments correspondants sans addition.

La finesse de mouture apparaît comme un paramètre déterminant dans le contrôle de ces propriétés. Elle intervient surtout sur la finesse du clinker car le calcaire, plus tendre, est toujours mieux pulvérisé. Cette finesse intervient aussi sur les performances. Si elle est médiocre, les résistances sont largement affectées, même en présence d'une faible quantité de fillers. Par contre, un broyage plus poussé ne permet pas de compenser une forte présence de fillers. Dans les chapitres 2 et 3, une étude expérimentale sur l'effet de la finesse de calcaire sur la performance du ciment sera présentée.

***Chapitre 02 :***

***Matériaux utilisés et essais réalisés***

## Chapitre02 : Matériaux utilisés et essais réalisés

### 2.1. Introduction

Le but de cette partie expérimentale est d'étudier l'effet de la finesse sur les propriétés du ciment avec un pourcentage de calcaire fixé à 14.1%. Cette étude est basée sur deux paramètres intrinsèques qui sont la résistance du ciment et le rapport E/C.

### 2.2. Les constituants

#### 2.2.1. Le ciment

Le matériau utilisé dans notre étude est le ciment portland composite, dont les propriétés physiques, mécaniques et chimiques répondent aux exigences de la cimenterie de Meftah CEM II /A-L 42.5N avec de pourcentage de calcaire 14.1%, clinker 80.7 % et gypse 5.2 %.

#### 2.2.2. Le sable

Le sable normalisé 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 ; il est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun 1350±5g. La composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences des normes EN 196-1 et ISO679 :2009[46].

Tableau 2.1 : Composition granulométrique du sable normalisé [47].

Tamis ouverture des mailles (mm)	Refus cumulés (%)
0.08	99±1
0.16	87±5
0.50	67±5
1.00	33±5
1.60	7±5
2.00	0

#### 2.2.3. L'eau

L'eau utilisée pour la confection des éprouvettes est une eau potable du robinet propre et exempte d'impuretés.



### 2.3. Préparation des échantillons

Le broyeur HERZOG (Marche automatique) a été utilisé pour le broyage des constituants (Figures 2.1 et 2.2). La procédure de broyage est comme suit :

- Ouvrir le capot de la machine.
- Ouvrir le couvercle du disque.
- Verser l'échantillon dans le disque de broyage (50g).
- Fermer le couvercle du disque de broyage.
- Fermer le capot de la machine.
- Choisir la durée de broyage par les touches numériques (1).
- Activer le bouton – poussoir démarré (2).

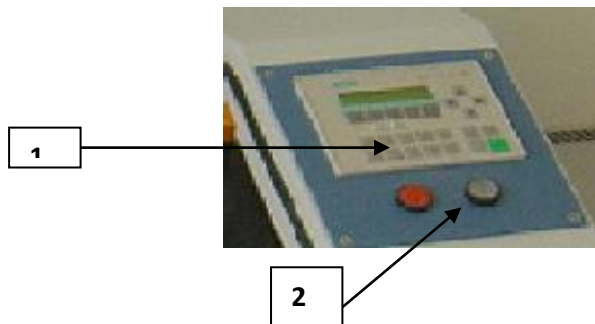


Figure 2.1: Verser le ciment dans le disque de broyage



Figure 2.2 : Placé le disque dans le broyeur

Le tableau 2.2 présente les temps de broyage pour les trois ciments testés. La figure 2.3 montre les ciments obtenus.

Tableur 2.2 : Les différents ciments en fonction de temps de broyage

Nom de ciment	CimentI	CimentII	CimentIII
Temps de broyage	/	30 s	1 :30 s



Figure 2.3 : Ciment I et cimentII et ciment III

## **2.4. Essais chimiques**

### **2.4.1. Mesure des refus par tamisage ALPINE**

L'objectif de cet essai détermination le pourcentage de refus pour chaque ciment pour le temps de broyage. Le matériel utilisé (Figure 2.4) consiste en :

- Balance de précision de 0.1mg peuvent peser jusqu'à 25 g.
- Verre de montre.
- Tamis d'essai.
- Spatule.
- Pinceau brosse plat



Figure 2.4: Matériel d'essai refus par tamisage ALPINE

Le mode opératoire est comme suit :

- Connecter le tamiseur « par le bouton d'allumage qui se trouve en dos de l'appareil alpine ».
- Insérer le tamis sur le carter.
- Peser  $25 \pm 0,5$ g ( $m_1$ ) à 0,01 g près du produit à tamiser.
- Disperser la masse du produit pesé sur le tamis.
- Poser le couvercle.
- Démarrer le tamisage avec un temps de 3min (2000Pa) pour cela procéder comme suite :
- Appuyer sur la touche 2.
- Appuyer sur la touche « Timer ».
- Attendre la fin du tamisage.
- Démonter le couvercle
- À l'aide d'un pinceau, enlever délicatement tout le matériau fin adhérent à la partie inférieure du fond, et le placer dans le réceptacle
- Peser le refus «  $m_2$  »
- Calculer le % de refus :

$$\% \text{Refus} = (m_2 / m_1) * 100$$

**Ciment I :**

Essai	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	Refus%
1	25	3.6	14.40
2	25	3.68	14.72

**Ciment II :**

Essai	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	Refus%
1	25	2.59	10.30
2	25	2.55	10.20

**Ciment III :**

Essai	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	Refus%
1	25	1.4	5.60
2	25	1.41	5.64

## 2.4.2. Détermination de la perte au feu

L'objectif de cette expérience est de connaître la perte au feu du ciment qui est l'évaporation du CO<sub>2</sub>, de l'eau et de la matière organique à température (950°C). Le matériel utilisé (Figures 2.5 à 2.7) consiste en :

- Balance de précision de 0.1mg.
- Verre de montre.
- Dessiccateur.
- Four à moufle 950°C ± 25°C.



Figure 2.5 : creuset      Figure 2.6 : Balance      Figure 2.7 : Four à moufle 950°C

Le mode opératoire se résume comme suit :

- Peser le creuset préalablement calciné et taré(m1)
- Peser le creuset et le ciment (m2).
- Porter le creuset avec le ciment dans un four à moufle à 950°C ± 25°C pendant ½ heure.
- Sortir le creuset du four.
- Refroidir le creuset dans un dessiccateur jusqu'à stabilisation à la température ambiante.
- Peser (m3).
- Calcule de la perte au feu :

$$\% \text{ PAF} = (m2 - m3) * 100 / (m2 - m1)$$

**m1 : masse Creuset**  
**m2 : masse de creuset + produit**  
**m3 : masse de creuset +Produit après calcination**

### 2.4.3. Préparation des échantillons pour analyse chimique

Pour déterminer la composition chimique et minéralogique du ciment, des pastilles sont préparées par la pesée d'environ 10 g de ciment. Les figures 2.8 à 2.15 montre les différentes étapes de préparation et l'appareil XRF utilisé dans la détermination de la composition chimique du ciment. -Les tableaux 2.3 et 2.4 présentent la composition chimique et minéralogique des ciments utilisés.



Figure 2.8 :  $10 \pm 0.1$  g de ciment



Figure 2.9 : 0.6 g de cellulose



Figure 2.10 : Broyé le ciment et cellulose utilisation le broyeur HERZOG.

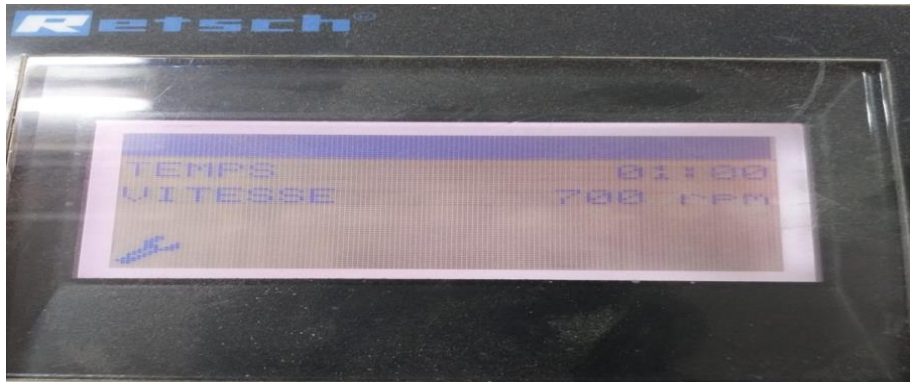


Figure 2.11 : Choisir le programme 1 min



Figure 2.12 : Récupérer le ciment et cellulose broyée



Figure 2.13 : Mettre l'anneau dans la pastilleuse et verser le ciment broyé dans cet anneau.

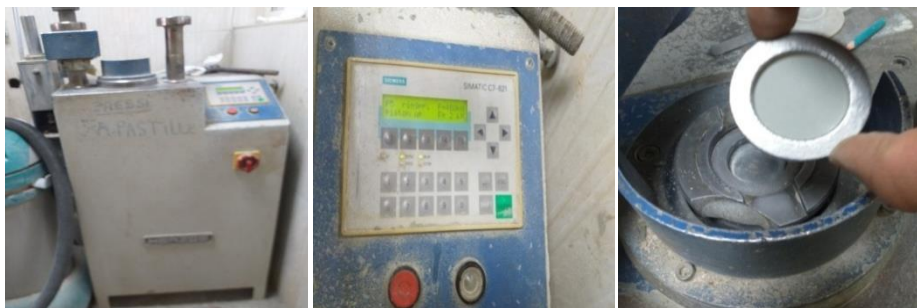


Figure 2.14 : Machine de préparation des pastilles



Figure 2.15: Appareille XRF

Tableau 2.3 : Composition chimique du ciment

Composition chimique	Ciment I (%)	Ciment II (%)	Ciment III (%)
SiO <sub>2</sub>	18.79	18.51	18.97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.54	4.63	4.41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.01	2.98	3.08
CaO	60.05	59.27	61.27
MgO	0.92	0.91	0.96
SO <sub>3</sub>	2.09	2.16	2.05
K <sub>2</sub> O	0.59	0.59	0.61
Na <sub>2</sub>	0.07	0.05	0.10
Cl	0.003	0.002	0.003

Tableau 2.4 : composition minéralogique du ciment

Composition minéralogique	Ciment I (%)	Ciment II (%)	Ciment III (%)
C <sub>3</sub> S	60.87	59.11	65.38
C <sub>2</sub> S	7.95	8.46	5.05
C <sub>4</sub> A	6.93	7.23	6.47
C <sub>4</sub> AF	9.17	9.07	9.37

#### 2.4.4. Essai de densité de ciment

La densité se calcule comme suit :

$$d = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

-d = densité.

$-\rho_1 = \rho_{\text{ciment}} \text{ (g/cm}^3\text{)} \Rightarrow d = \rho_{\text{ciment}}$

$-\rho_2 = \rho_{\text{eau}} \text{ (g/cm}^3\text{)} \Rightarrow \rho_{\text{eau}} = 1 \text{ g/cm}^3$

##### 2.4.4.1. Mode opératoire de la masse volumique absolu

Le mode opératoire de calcul de la masse volumique absolu est donné par les figures 2.16 à 2.19.

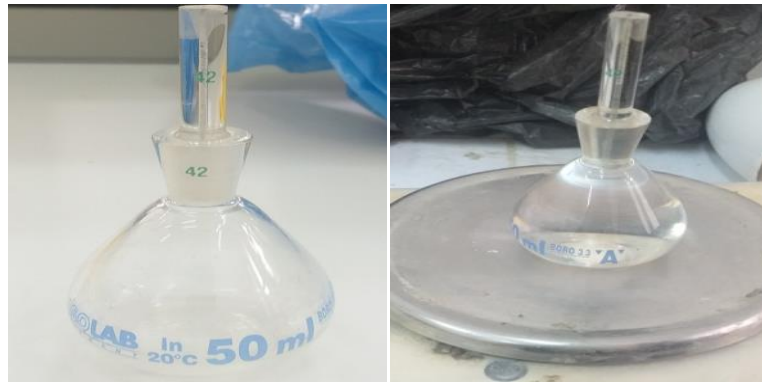


Figure 2.16 : le pycnomètre vide



Figure 2.17 : Remplir le pycnomètre avec le toluène



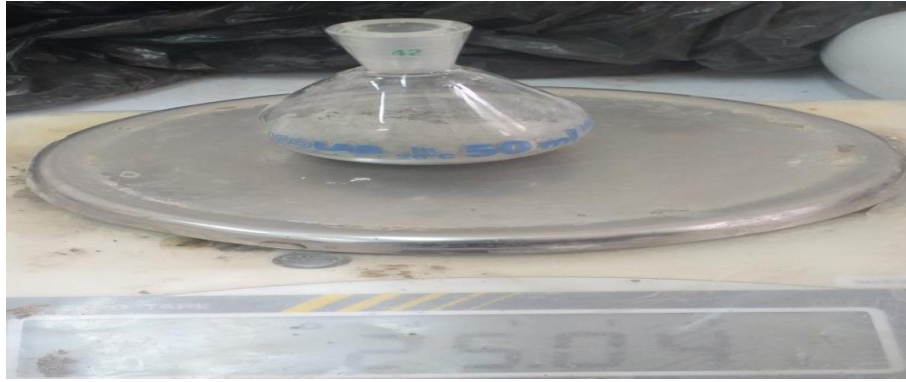


Figure 2.18 : 25g de ciment



Figure 2.19: le pycnomètre +ciment+toluène

La masse volumique absolue est calculée comme suit:

$m_1$  = masse de pycnomètre vide.

$m_2$  = masse de pycnomètre +toluène.

$m_3$  = masse de ciment 25 (g).

$m_4$  = masse de pycnomètre + toluène + ciment.

$$\rho_t = (m_2 - m_3) / V$$

$$m_t = m_2 - (m_4 - m_3)$$

$$v_c = m_t / \rho_t$$

$$\rho_c = m_3 / v_c$$

#### 2.4.5. Essai de la surface spécifique du Blaine

L'appareil de mesure de la surface spécifique de Blaine (SSB) est donné dans la figure 2.20. Les figures 2.21 à 2.29 présentent le mode opératoire pour mesurer la finesse SSB.



Figure 2.20 : Appareil utilisé pour déterminer la surface spécifique

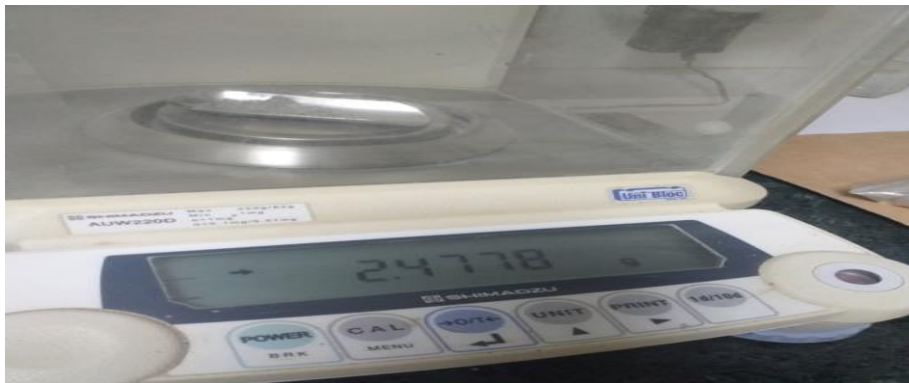


Figure 2.21 : Peser la masse du ciment



Figure 2.22 : Placer la grille au fond de la cellule

-Appliquer sur cette grille, au moyen d'une tige à face inférieure plane et d'équerre, un disque neuf de papier filtre.



Figure 2.23 : Appliquer le papier filtre



Figure 2.24 : Verser le ciment dans la cellule en utilisant un entonnoir.

-Donner quelques légères secousses à la cellule pour niveler la couche supérieure du ciment.



Figure 2.25 : Placer sur celle-ci un autre disque neuf de papier filtre



Figure 2.26 : Tasser avec précaution au moyen du piston

- évitant la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule.



Figure 2.27 : Retirer le piston lentement.

-Enduire de vaseline la partie rodée de la cellule et la placer sur son ajustage en lui imprimant un léger mouvement de rotation pour répartir la vaseline



Figure 2.28 : Mets la cellule en place

-Quand la cellule est en place, Appuyer sur la touche entrée pour lancer L'essai.



Figure 2.29 : Reprend la valeur du SSB

#### 2.4.6. Essai de la Chaux libre par acidimétrie

Le mode opératoire pour la détermination de la chaux libre par acidimétrie est comme suit

(Figures 2.30 à 2.37) :



Figure 2.30 :  $1\text{g} \pm 0.1$  de ciment.



Figure 2.31 : Introduire le ciment pesé dans un Ellen Meyer de 250ml

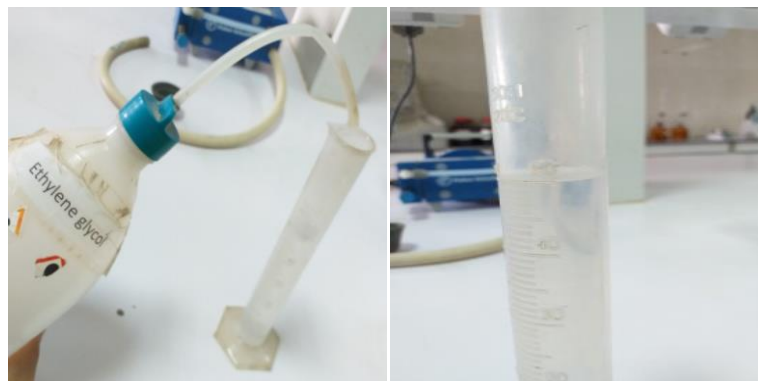


Figure 2.32 : Verser dans cet Ellen 50 ml d'éthylène glycol.



Figure 2.33 : Agiter fortement et mettre dans bain marie pour chauffage à  $T= 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

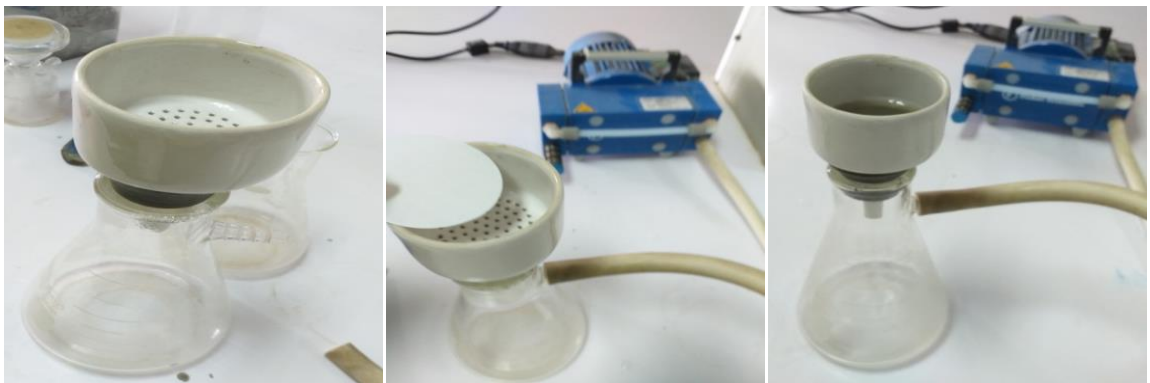


Figure 2.34 : Filtrer en suite sous vide.



Figure 2.35 : Ajouté deux gouttes du bleu de bromocresol 1%



Figure 2.36 : Titrer le filtrat avec une solution de HCl 0.1 N en présence du bleu de bromocresol

-Titrer le filtrat avec une solution de HCl 0.1 N en présence du bleu de bromocresol.

Lire le volume V correspondant au changement de la coloration



Figure 2.37 : changement de la coloration

-Lire le volume V correspondant au changement de la coloration.

## 2.5. Les Essais Physico-mécaniques

### 2.5.1. Essai de flexion et compression

Préparer les éprouvettes 4cm x4cmx16cm pour connaître la résistance de flexion et la compression à (2, 7 et 28 jour).Le mélange doit être effectué au moyen d'un malaxeur tel que spécifié dans la norme Algérienne NA 442/2000.Le malaxeur étant en position de fonctionnement. Les figures 2.38 à 2.50 montrent la procédure de préparation, de conservation et d'essais.



Figure 2.38 : 225 g d'eau et verse dans le récipient



Figure 2.39 : 450 g de ciment et ajouté dans le récipient

-Mettre le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant une minute ; Dans les 30 dernières secondes, introduire le sable normalise (1350 g). Mettre le malaxeur à la vitesse rapide pendant 2 minutes



Figure 2.40 : Ajouter le sable normalise

-Arrêter le mouvement pendant 90s ; Avec le batteur démonté de son axe, racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie du mortier n'échappe au malaxage. Après remontage du batteur, reprendre le malaxage pendant 2 mn à vitesse rapide.



Figure 2.41 : Mortier normal



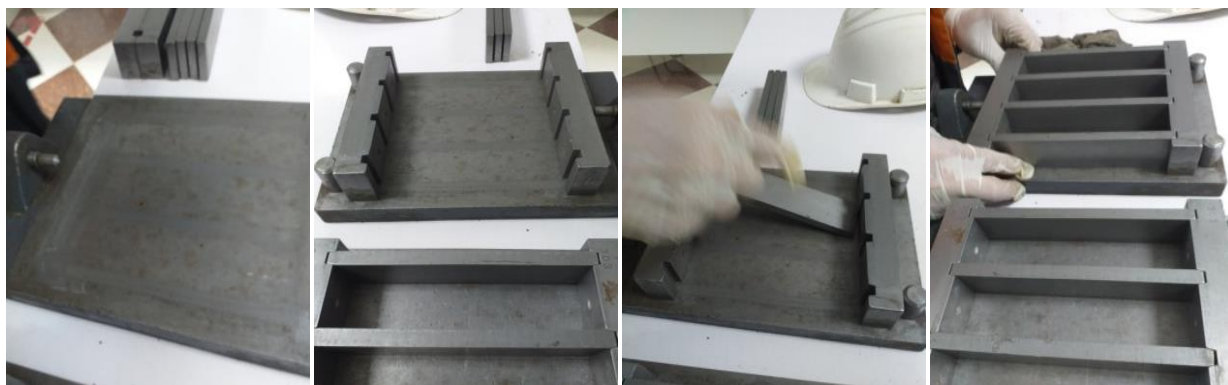


Figure 2.42 : Préparation des moules

Les éprouvettes sont moulées au moyen de l'appareil à chocs, décrit dans la norme algérienne NA 442/2013 conformément au mode opératoire suivant :



Figure 2.43 : La table à chocs

- Le malaxage du mélange – mortier - étant terminé, disposer celui - ci sur une plaque non réactive au liant et non absorbante; former une galette approximativement rectangulaire, la partager en 6 fractions sensiblement égales.
- Le moule ayant été muni de sa hausse, le fixer sur la table à chocs; introduire dans chacun des 3 compartiments une fraction de la galette; Egaliser la surface du mortier au moyen de la raclette maintenue verticale, déplacée dans un double aller et retour en prenant appui sur le bord supérieur de la hausse
- Mettre la machine en marche pour 60 chocs.
- Recommencer les mêmes opérations pour la deuxième couche. Après 60 nouveaux chocs, le moule et la hausse sur une faible hauteur sont remplis de mortier.



Figure 2.44 : Moulage le mortier

- Le moule étant retiré de la machine et débarrassé de sa hausse, raser le mortier avec l'arête d'une règle métallique plate maintenue verticale par un mouvement de scie de faible amplitude et perpendiculaire à la longueur des éprouvettes.

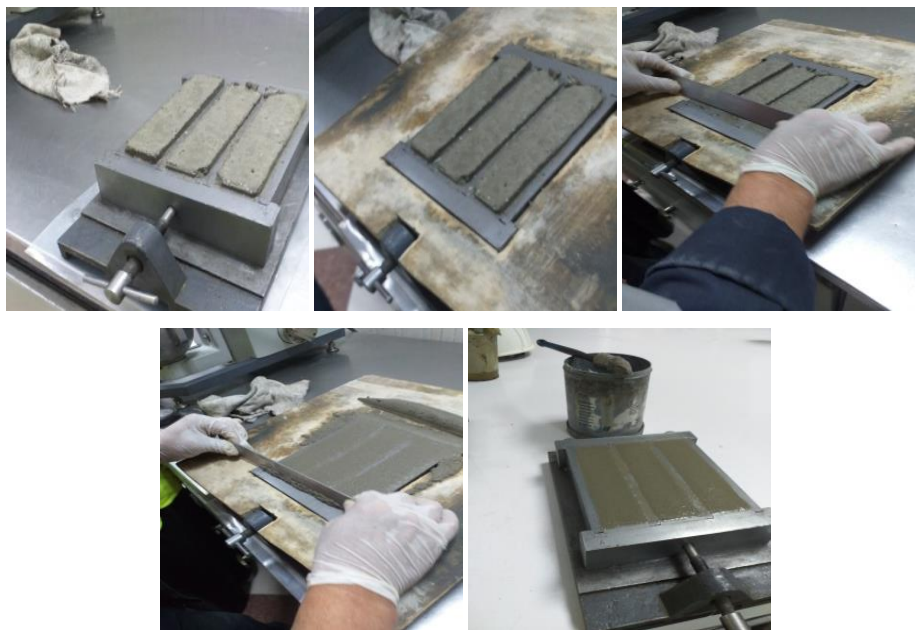


Figure 2.45 : Raser le mortier avec l'arête d'une règle métallique

Le moule rempli de mortier est placé jusqu'au moment du démoulage dans une enceinte humide à la température de  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  dont l'humidité relative aussi voisine que possible de la saturation est d'au moins 90%.



Figure 2.46 : Conservation des éprouvettes

Le démoulage qui intervient entre les deux périodes de conservation (avant démoulage, d'une part et conservation dans l'eau, d'une autre part) est exécuté entre 20 et 24 heures après la mise en moule. Toutefois, si au bout de 24 heures, le mortier n'a pas acquis une résistance suffisante pour qu'on puisse le manipuler sans danger de détérioration, le temps de démoulage est augmenté de 24 heures, mais le compte-rendu doit le mentionner. Quand il s'agit d'éprouvettes à rompre à 24 heures d'âge, si le démoulage a lieu plus de 20 minutes avant l'essai, les éprouvettes doivent être remises dans l'armoire humide jusqu'au moment de l'essai. Le démoulage doit être effectué avec précaution.

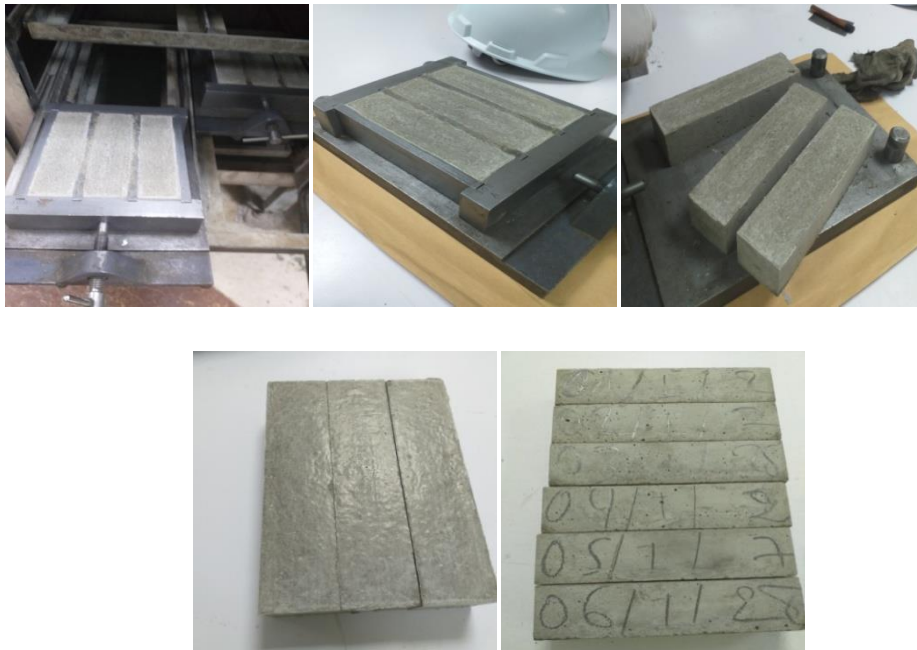


Figure 2.47 : Démoulage des éprouvettes prismatiques

Une fois démoulées et marquées, les éprouvettes sont conservées entièrement immergées dans l'eau :



La préparation de la pâte normale se fait comme suit :

- Le malaxeur étant en position de fonctionnement :
- Verser dans le récipient la quantité d'eau préalablement déterminée par des tâtonnements successifs de manière à réaliser la consistance normale ; lui ajouter 500g de ciment pour remplir le moule tronconique.
- Cliquer sur démarrer.
- Le malaxeur tourne à la vitesse lente pendant 1 mn puis à la vitesse rapide pendant 2 mn.
- Le mouvement s'arrête pendant 90s ; avec le batteur démonté de son axe, racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune fraction de pâte n'échappe au malaxage.
- Après remontage du batteur, reprendre le malaxage pendant 2 mn à la vitesse rapide.

La confection de l'éprouvette est comme suit (Figure 2.51) :

- Remplir immédiatement le moule tronconique avec la pâte ainsi préparée et araser la surface au moyen d'une truelle prenant appui sur le bord du moule, perpendiculaire à la surface et déplacée d'un mouvement de scie de faible amplitude.
- Immerger dans l'eau le moule rempli de pâte normale ou le placer dans l'armoire humide.

La vérification de la consistance normale est comme suit:

- L'appareil de Vicat, plateau nu, ayant été muni de la sonde de consistance, placer immédiatement le moule rempli de la pâte dans l'axe de la sonde, laissé descendre cette dernière perpendiculairement à la surface de la pâte et l'immobiliser à son contact; Marquer un temps d'arrêt puis abandonner la sonde à elle-même sans vitesse initiale.
- Procéder à la lecture d'épaisseur de la pâte, quand la sonde a cessé de descendre sous son propre poids, (pour les ciments à très fine mouture, la descente de la sonde peut avoir une assez longue durée).
- Ne jamais faire deux essais de consistance sur la pâte contenue dans un même moule.
- Enregistrer la lecture ( $6 \pm 2$ ) ; après avoir libéré avec 30 secondes



Figure 2.51 : Essai de la consistance normale

### 2.5.3. Détermination du début de prise

- L'aiguille de Vicat, descendue perpendiculairement à la surface de la pâte et immobilisée pendant un court arrêt quand elle entre en contact avec cette surface est abandonnée à elle-même sans vitesse initiale (Figure 2.52).
- Observer l'enfoncement de l'aiguille; les observations sont renouvelées jusqu'à constatation du début de prise.
- Ces différentes observations sont effectuées sur moule immergé ou extrait de l'ambiance de conservation pendant un temps ne dépassant pas 5 mn et en des points différents.
- Les points de mesurer doivent être écartés d'au moins 1.5 cm de la paroi du moule et de 2.0 cm entre eux.



Figure 2.52: Essai du début de prise

Le de fin de prise correspond au moment où l'aiguille cesse de s'enfoncer et s'arrête à une distance inférieure à 2 mm de la face supérieure du moule tronconique rempli de la pâte normale.

### **2.5.3. Essais d'expansion**

L'expansion a été mesuré à chaud au moyen de moules permettant la mesure de la déformation (Figures 2.53 à 2.55).

- Avant chaque essai, vérifier que les deux bords de la fente ou des points quelconques des deux aiguilles n'exercent aucune pression l'un sur l'autre.
- Placer les moules sur des plaques de verre, les emplir de pâte pure et recouvrir chacun d'eux d'une autre plaque de verre légèrement lestée, les immerger aussitôt dans l'eau à  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ .
- Au moins 24 heures après le gâchage et en tout cas dans un délai n'excédant pas 24 heures après l'époque où un échantillon de la même pâte conservé dans la même eau peut supporter sans déformation une pression du pouce, enlever les plaques de verre avec précaution et mesurer l'écartement des pointes des aiguilles et placer les moules, verticales dans leur bain définitif.

#### ➤ Essais d'expansion à chaud :

- Les moules sont immergés dans l'eau que l'on porte progressivement à l'ébullition en un temps qui doit être compris entre un quart d'heure et une demi-heure.
- Après ébullition, pendant 3 heures consécutives, on mesure de nouveau l'écartement final des pointes des aiguilles sans attendre le refroidissement.
- En cas de liants contenant de la magnésie plus de 3%, l'ébullition est prolongée jusqu'à ce qu'on ne constate plus en deux heures aucune augmentation de l'expansion.



Figure 2.53: Préparation des éprouvettes



Figure 2.54 : Appareil de bouilloire



Figure 2.55 : Essais d'expansion



## 2.6. Conclusion

Le programme expérimental réalisé est résumé dans la figure 2.56.

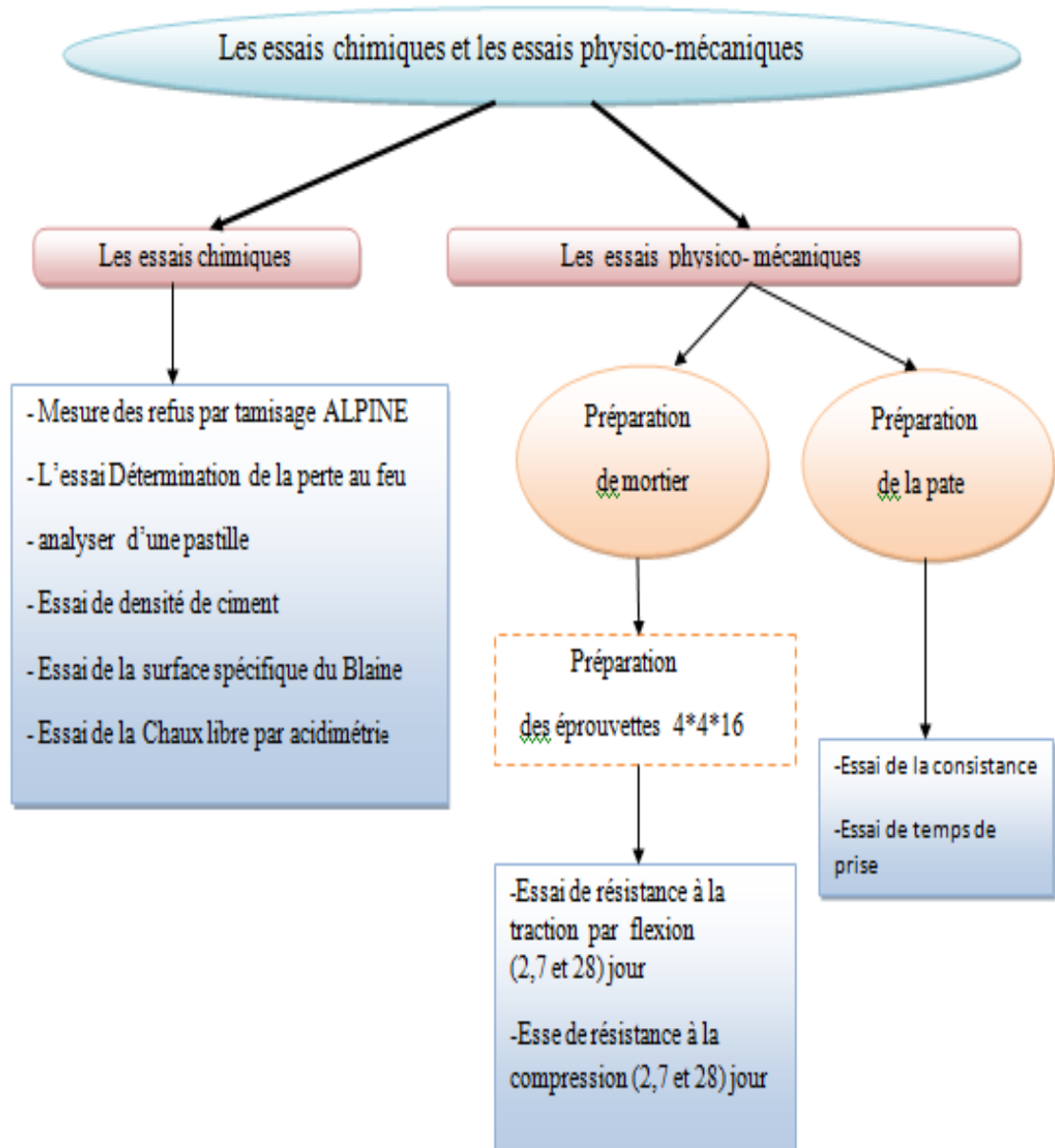


Figure 2.56 : Organigramme récapitulatif des essais réalisés.

***CHAPITRE 03 :***

***RESULTATS ET DISCUSSION***

## **CHAPITRE 03 : RESULTATS ET DISCUSSION**

### **3.1. Introduction**

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la présentation des résultats obtenus expérimentalement. En premier lieu nous avons commencé par la présentation des résultats des essais de broyage du ciment à base de calcaire ainsi que leurs interprétations.

En second lieu les potentialités du temps de broyage et la finesse sur les propriétés chimique et physico-mécanique sont discutées.

### **3.2. Les essais chimiques**

#### **3.2.1. Refus par tamisage ALPINE**

Pour déterminer le refus on a broyé le ciment avec pourcentage de calcaire fixé 14.1%. Le tableau suivant résumé les résultats de refus.

Tableau3.1 : Résultats des refus par tamisage ALPINE

ciment	I	II	III
Refus %	14.56	10.28	5.62

D'après les résultats présentés dans le tableau 3.1, on remarque qu'au fur et à mesure que le temps de broyage augmente, le refus diminue, ce qui entraîne une augmentation de la finesse. En prenant soin de ne pas faire monter la température à l'intérieur du broyeur car le calcaire peut se transformer en plâtre et perdre son seul rôle qui est la régulateur de prise. Le refus pour le ciment II diminue de 4,28% et diminue de 8,94% pour le ciment III par rapport au ciment I.

#### **3.2.2. La perte au feu**

La perte au feu est l'évaporation de CO<sub>2</sub>, l'eau et de matières organiques à haute température (950°C). Le tableau 3.2 suivant résumé les résultats d'essai de la perte au feu.

Tableau3.2 : Résultats d'essai de la perte au feu

	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	m <sub>3</sub> (g)	PAF %
Ciment I	19.3644	21.5969	21.4469	<b>6.72</b>
Ciment II	18.6469	21.3728	21.1888	<b>6.75</b>
Ciment III	18.6492	21.2095	21.0358	<b>6.78</b>

Ce tableau montre que la perte au feu du ciment, augmente légèrement (0.03 %) avec la finesse du ciment.

### 3.2.3. La surface spécifique du Blaine

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement divisée. Cette finesse est une caractéristique importante : lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète. La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface spécifique.

C'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface spécifique est généralement exprimée en cm<sup>2</sup> de surface des grains de ciment par gramme de poudre. Le tableau 3.3 donne les valeurs de la surface spécifique des 3 ciments utilisés.

Tableau 3.3 : Résultats de la surface spécifique du Blaine

<b>Refus%</b>	14,56			10,28			5,62		
<b>La Masse volumique (g /cm<sup>3</sup>)</b>	2.981			2,912			2,861		
<b>La masse pesée (g)</b>	2,648			2,520			2,477		
<b>SSB (cm<sup>2</sup>/g)</b>	Essai1	Essai2	Essai3	Essai1	Essai2	Essai3	Essai1	Essai2	Essai3
	3929	2842	3859	4052	4099	4119	4616	4594	4461
<b>Moy</b>	3541			4090			4557		

La figure 3.1 montre la relation entre le refus et la finesse mesurée. On constate que la surface spécifique de Blaine augmente avec la diminution du pourcentage de refus. Ceci est dû à l'augmentation de la finesse du ciment, ce qui entraîne une augmentation de la surface couverte par  $\text{cm}^2/\text{g}$  de ciment.

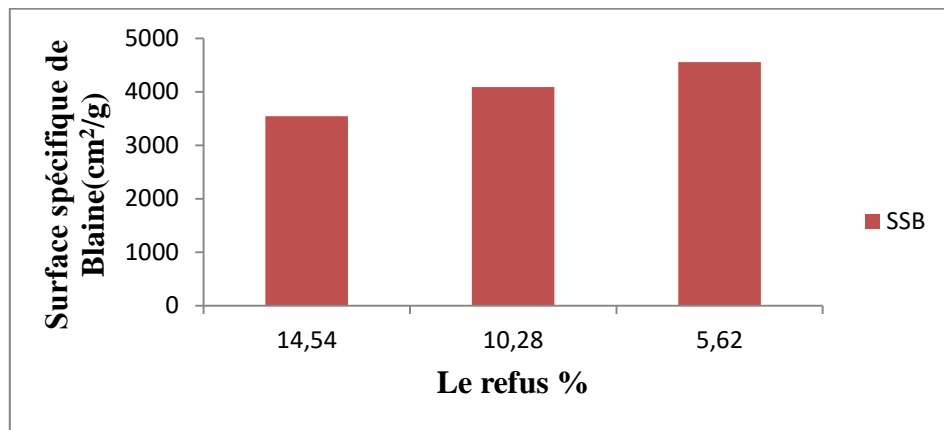


Figure 3.1 : la surface spécifique du Blaine par rapport au refus

### 3.2.4. La Chaux libre

Il est important de connaître dans de nombreux cas le pourcentage de chaux libre. Le tableau 3.4 résumé les résultats de la chaux libre.

Tableau 3.4 : Résultats de la Chaux libre

Refus%	14.56	10.28	5.62
V ( Hcl) (ml)	2.34	2.20	2.10
Cao (l) %	0.62	0.60	0.56

Nous remarquons que la chaux libre est légèrement affectée par la finesse du ciment. La chaux libre diminue de 0.02% pour le ciment II et de 0.06% pour le ciment III par rapport au ciment I.

## 3.3. Les essais physico-mécaniques

### 3.3.1. Résistance à la compression et résistance à la traction par flexion

La mesure de la résistance à la compression et à la flexion est effectuée sur éprouvettes prismatique ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ). Le tableau 3.5 et les figures 3.2 et 3.3 résument les résultats de la résistance à la compression et à la flexion, respectivement.

Tableau 3.5 : Résultats de la résistance à la traction par flexion et résistance à la compression

	Age	Compression (MPa)				moy	Flexion (MPa)		moy
		Epr. 1		Epr. 2			Epr. 1	Epr. 2	
Ciment I	2jour	20.4	19.2	20.90	21.0	20.38	4.5	4.6	4.55
	7jour	38.5	38.1	35.9	35.3	36.95	6.3	6.9	6.6
	28jour	46.2	46.9	41.9	43.7	44.67			
Ciment II	2jour	23.6	21.7	21.3	21.7	22.08	5.3	4.8	5.05
	7jour	40.9	40.5	38.8	36.9	39.28	7	6	6.7
	28jour	48.7	48.6	47.5	47.5	48.07			
Ciment III	2jour	25.3	24.7	25.3	26.3	25.40	4.9	5.3	5.1
	7jour	41.2	41.8	40.6	42.1	41.43	7.2	6.7	6.95
	28jour	49.8	48.7	48.8	51.6	49.72			

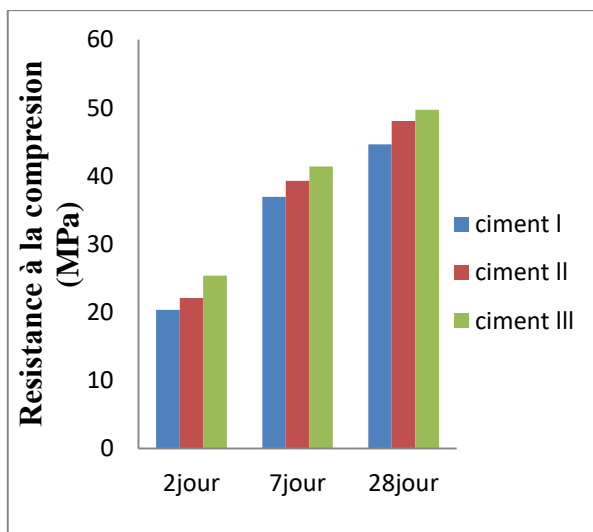


Figure 3.2 : Résistance à la compression en fonction de l'âge

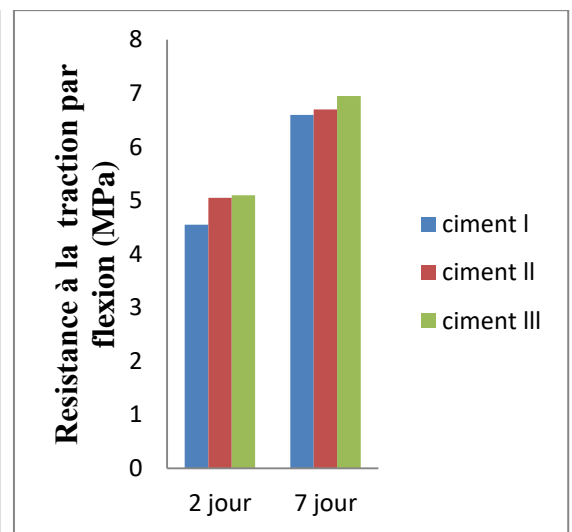


Figure 3.3 : Résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge

On remarque que la résistance à la compression augmente avec l'âge. Ceci est dû à l'augmentation de l'hydratation du ciment en fonction de l'âge.

Le filler calcaire n'a pas montré un effet négatif sur le développement de la résistance à la compression. Ceci peut être expliqué par le fait que les grains de fillers calcaire remplissent les pores du mortier que nous donne une résistance élevée [41]. La comparaison des résistances des différents ciments montre que le ciment III qui est le ciment le plus fin donne la plus grande résistance à la compression suivi du ciment II.

Ceci montre clairement que la finesse élevée augmente la résistance à la compression. Les grains de faibles diamètres s'hydratent facilement, ce qui entraîne une augmentation du silicate de calcium hydraté (C-H-S), responsable de l'augmentation de la résistance [45].

### 3.3.2. La consistance

L'essai de consistance permet déterminer la quantité d'eau optimale pour gâcher un liant afin d'obtenir une pâte normale. La pâte obtenue a une résistance spécifiée à la pénétration d'une sonde normale. Le tableau 3.6 résume les valeurs obtenues de la consistance normale.

La quantité d'eau nécessaire pour l'obtention de la consistance normale est donnée par la figure 3.3.

D'après les résultats obtenus, on constate que la quantité d'eau augmente au fur et à mesure que la finesse du ciment augmente, et cela est dû au fait que plus le ciment est fin, plus il a besoin d'eau pour la réaction chimique [45].

Tableau 3.6 : Résultats de la consistance

<b>Ciment</b>	<b>Ciment I</b>	<b>Ciment II</b>	<b>Ciment III</b>
Eau (g)	133	134	136.5
la lecture	5	7	5
Eau %	26.6	26.8	27.3

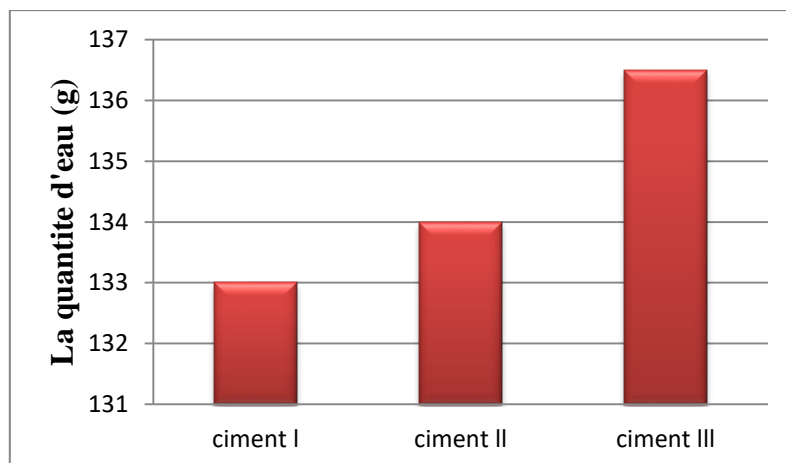


Figure 3.4 : La quantité d'eau nécessaire pour consistance normale.

### 3.3.3. Le temps début et fin de prise

Le tableau 3.7 et la figure 3.4 résument les résultats du début et fin de prise des différents ciments.

Tableau 3.7 : Résultats du début et fin de prise

	<b>Ciment I</b>	<b>Ciment II</b>	<b>Ciment III</b>
Début de prise (min)	177	193	189
Fin de prise (min)	213	230	227

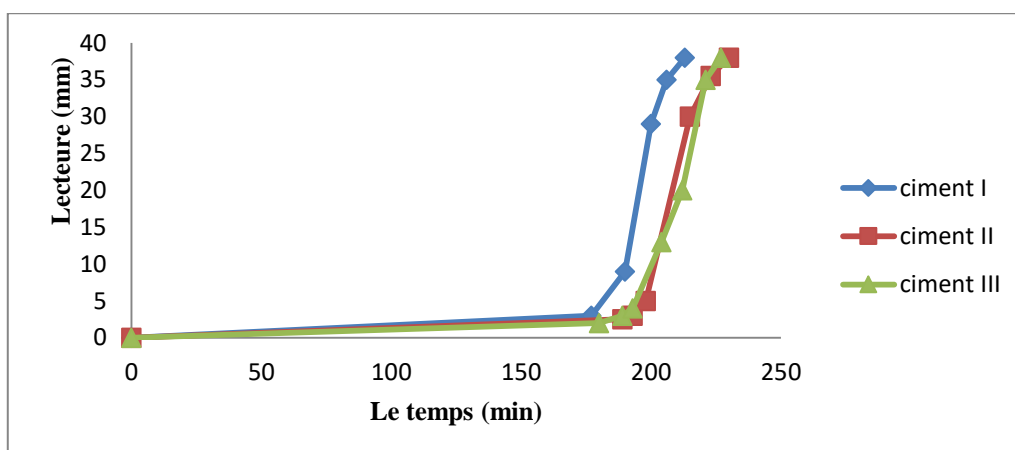


Figure 3.5 : Début et fin de prise pour tout le ciment.



Nous remarquons que le ciment III présente le temps de début de prise le plus rapide en temps en raison de sa finesse élevée. Le ciment III contient 5,62% de refus alors que le ciment II contient 10,28% de refus, ce qui signifie que le ciment III, contient plus de fines que le ciment II. Des études ont montré que plus la finesse est élevée, plus le temps de prise est rapide [34].

Les résultats obtenus dans Ciment I ne sont pas compatibles avec les autres résultats car peut-être nous n'avons pas effectué les essais le même jour. Cela peut être dû à une différence de température et d'humidité (nous avons fait l'essai en été).

### **3.3.4. Expansion à chaud**

Le tableau 3.8 résume les résultats des essais d'expansion à chaud.

On remarque qu'il n'y a pas de différence entre les différents ciments, bien qu'il existe des études qui ont prouvé que le pourcentage de finesse du ciment peut l'affecter [9] et il y a des études qui n'ont remarqué aucune différence [37], et cela est peut-être dû à l'absence de changement dans le pourcentage de calcaire dans cette étude.

Tableau 3.8 : Résultats d'essais d'expansion.

<b>ciment</b>	<b>Ciment I</b>	<b>Ciment II</b>	<b>Ciment III</b>
<b>Expansion (mm)</b>	0.5	0.5	0.5

### **3.4 Conclusion**

Cette étude préliminaire a été limitée par le temps et les difficultés d'accès au laboratoire en raison de restrictions liées au COVID19. L'étude a montré que la finesse du calcaire peut améliorer la performance du ciment en particulier sa résistance à la compression.

## ***CONCLUSION GENERALE***

## ***CONCLUSION GENERALE***

L'objectif principale de ce travail était l'étude de l'effet de la finesse de ciment sur les Propriétés physiques et mécaniques du ciment à base d'ajout calcaire. L'étude bibliographique et l'étude expérimentale nous amènent aux conclusions suivantes :

- Pour obtenir une grande surface spécifique du Blaine, il faut augmenter le temps de broyage du ciment en prenant soin de ne pas faire monter la température à l'intérieur du broyeur car le calcaire peut se transformer en plâtre et perdre son seul rôle qui est la régulateur de prise.
- La densité du ciment n'a pas été grandement affectée par le processus de broyage.
- La chaux libre et la perte au feu sont affectées par la finesse du ciment dans une faible proportion qui peut être négligée, et l'expansion n'est pas affectée par la finesse du ciment.
- Le rapport Eau/ Liant ( E/L) est significativement affecté ; plus la finesse est élevée, plus le ciment a besoin d'eau.
- La résistance a également été affectée par le processus de broyage du ciment, plus le ciment est fin, plus la résistance à la compression et à la traction par flexion sont élevées.

### **Perspectives et recommandations**

L'étude expérimentale a été limitée par le temps et par les difficultés d'accès au laboratoire durant la pandémie COVID19. Cette étude peut être compléter par d'autres études comme :

- Etude de l'effet d'autres finesses et d'autres pourcentages de calcaire
- Analyse de la performance du ciment à base de calcaire à long terme.
- Etude de la durabilité des mortiers et bétons à base de calcaire
- Analyse d'autres ajouts cimentaires comme le laitier et la pouzzolane naturelle.

## Références

- [1] EN 196-2 :2000, Méthodes d'essais des ciments — Partie 2 : Analyse chimique des ciments.
- [2] EN 197-2:2000, Ciment — Partie 2 : Évaluation de la conformité.
- [3] EN-197-1, (2001), Ciment : Partie 1 – Composition, spécifications, et critères de conformité des ciment courants.
- [4] V. Baroghel-Bouny, Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.
- [5] Amouri C., Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité), Thèse de Doctorat en science en Génie Civil, Université de Constantine
- [6] European Committee for Standardization, EN-197-1.Cement. Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, (2001).
- [7] EN 206-1. Concrete. Part 1: Specification, performance, production and conformity, (2004).
- [8] Maldji .S., Effet du mode d'incorporation des fillers calcaires sur les propriétés des bétons, Mémoire de Master Université de Boumerdes.
- [9] Gané. R.R ;, Cours de durabilité et réparation du béton (GCI-714) », chapitre 2 : la durabilité du béton. Université de Sherbrooke, Canada, 2002, pp.32.
- [10] Site web: <https://fr.wikipedia.org>
- [11] Site web: <https://www.lafarge.dz>
- [12] El-Barrak M., Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons auto plaçant à l'état frais, Thèse de Doctorat de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, Juillet 2005, 228 pages.

- [13] Lange F., Mörte H. and Rudert V., Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties, *Cement and Concrete Research*, 1997, vol. 27, pp. 1481-1488.
- [14] Boukendakdi, O., Etude de l'influence des paramètres de formulation sur la propriété du béton auto plaçant, Thèse de Doctorat, Université Saad Dahlab Blida, 2010.
- [15] Adjoudj M, Effet des additions minérales et organiques sur le comportement sur le comportement rhéologique du béton, thèse en cotutelle, université de Cergy-Pontoise France et Université de chlef Algérie, 2015.
- [16] Husson, S., Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciment- fillers, application aux mortiers, thèse de Doctorat, ENSM Saint-Etienne, INP Grenoble, 166p, 1991.
- [17] Chloup-Bondant M, étude des mécanismes réactionnels dans l'hydratation des silicates et aluminates tricalciques en présence d'un filler calcaire, thèse de Doctorat, Université d'Henri Poincaré, Nancy I, 156p, 1996
- [18] Heikal M, El-Didamony H, Morsy MS, Limestone-filled pozzolanic cement cement and concrete research, vol.30, pp.1827-1834, 2000.
- [19] Zhu W, Gibbs JC .Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete, *Cement and concrete research*, vol.35(8), pp.1457-62, 2005.
- [20] Cours Université de Sherbrooke : les ajouts dans le ciment.
- [21] Zeroub H, Valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable, Mémoire de Magister, Université M'hamed Bougera de Boumerdes, 2012.
- [22] Bechar S, Etude et formulation d'un laitier de ciment pétrolier élaboré avec l'incorporation des additions naturelles, Thèse de Doctorat, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2019.
- [23] Manai, K., Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons auto-nivelants, Mémoire de maitrise sciences, Université de 8 Mai 1945 Guelma.

- [24] Redha, E., Prévision du coefficient de la pouzzolane naturelle par les Réseaux De Neurones Artificiels, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, 2012.
- [25] NA 442 :2013, CIMENT : Composition, spécifications et critères de Conformité des ciments courants.
- [26] Tchakoute K.H., Elaboration et caractérisation de ciments Géo-polym rebase de scories volcaniques, Thèse de Doctorat, Université de Yaounde I 2013.
- [27] Kerbouche A, Mouli M , Laoufi, L., Senhadji Y, Benosmane S., Influence des ajouts minéraux sur les résistance mécanique des mortiers, Séminaire international, Université d'Oran, 2009.
- [28] Rachel, J. D., Paul C.T., The use of limestone in Portland cement: A state-of-the-art review, Portland Cement Association, 1996.
- [29] Tsivilis. S, Chaniotakis. E, Kakali. G, Batis. G. An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete, Cement & Concrete Composites, Vol. 24, 2002, pp.371–378.
- [30] Hermann. K., Les ajouts : Les filler, Bulletin du ciment, Vol.63, N 5, 1995, pp.4-7.
- [31] Habbouche. A., Propri t  mécaniques et durabilité du béton   base de sable de concassage, Mémoire de magist re, Université de Saad Dahleb Blida, 2002.
- [32] Livesey. P., Strength characteristics of Portland limestone cements, Construction and Building Materials, Vol.5, september 1991, pp.147-150.
- [33] Cochet. G, Sorrentino. F., Limestone filler cement; properties and uses, Mineral Admixture in Cement and Concrete, Vol. 4, First edition, 1993.
- [34] B ton hydraulique : Constituants du ciment, in technique de l'ingénieur, 1984, C.2211, pp 8-14.

- [35] Bobrowski. G.S., Limestone substitution for gypsum as a cement ingredient. General Portland Inc- Research & Development, Dallas, February, 1977 pp 64-67.
- [36] Ingrany. K.D and Dangherty. K.E., A review of limestone addition to Portland cement and concrete, Proceedings of Int. conf. on blended cement, Sheffield, U.K, September 1991.
- [37] Adams. D.L., Effect of limestone addition upon drying shrinkage of Portland cement mortar, Carbonate Addition to Cement. ASTM, Philadelphia, 1990, pp 41-45.
- [38] Ramachandran, V, Zhang, C.M., Cement with calcium carbonate addition, 8th Int. Cong. On the chemistry of cement, September 1986, Rio, Brazil, pp. 178-182.
- [39] Hooton, R. Douglas., Effects of carbonate additions on heat of hydration and sulfate resistance of Portland cement, Carbonate Additions to Cement, ASTM STP 1064, P. Klieger and R.D. Hooton, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 73-81.
- [40] Tsvivilis. S., A study of parameters affecting the properties of Portland limestone cement, Cement & Concrete Composite, Volume 21, 1999 pp. 107-116.
- [41] Borgholm. H, Duncan. H, Rasmussen. S., A new blended cement based on mineralized, World Cement Research and Development, Août 1995, pp 27-33.
- [42] Kakali.G et al., Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO<sub>3</sub>, Cement and Concrete Research Vol 30, 2000, pp. 1073-1077.
- [43] Bonavetti. V, Donza. H, Rahhal. V, Irassar. E., Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement, Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000, pp 703-708.
- [44] Care. S., Effet des addition minérale sur les propriétés d'usage des béton, plan d'expérience et analyse statistique, Presse de l'école des ponts et chaussées, Paris, Février 2000.

- [45] Lavinia S., E'tude expérimentale et modélisation de l'évolution des propriétés mécaniques au jeune âge dans les matériaux cimentaire ,Thèse de Doctorat, Université de Canada.
- [46] Procédure SCMI de Meftah.
- [47] Boubekeur T. ; Boulekbache B. Effet du calcaire et du laitier sur les propriétés physico-mécanique et la durabilité des ciments portland», thèse de Doctorat, Université de chelef.