



Département de Technologie chimique industrielle

Rapport de soutenance

En vue de l'obtention du diplôme
de Licence professionnelle en :

Génie de la formulation

Thème :

**Etude des caractéristiques physiques et mécaniques du ciment
portland**

Réalisé par :

M^{elle} Ziat nahla

Encadré par :

- MERAKCHI Akila

MCB /Institut de technologie

- Mme N.KAROUZI

Ingénieure /L'Entreprise des Ciments et Dérivés
d'ECH-CHLEF (ECDE)

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Avant tout, je tiens particulièrement à remercier, mon créateur Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage et la volonté pour élaborer et finaliser ce modeste travail.

*Mes remerciements à ma promotrice Mme **MERAKCHI Akila** pour l'honneur qu'elle m'a donnée en acceptant de diriger ce travail, et qui a contribué avec son aide, ses efforts et sa disponibilité pour l'élaboration de ce projet.*

Mes remerciements vont également aux membres de jury qui me font l'honneur d'examiner mon travail.

Je tiens à remercier également l'ensemble du corps enseignants département de Génie des procédés de l'institut de Technologie de Bouira.

Mes remerciements les plus profonds pour ma chère famille, pour son soutien moral et ses encouragements.

J'adressons mes sincères remerciements à tous les membres du laboratoire de contrôle de qualité ECDE, les ingénieurs et les techniciens avec qui j'ai eu le plaisir de travailler.

J'exprime tous le bonheur du monde à mes collègues de la promotion sortante 2020 de Licence Professionnalisant en Génie de la formulation ; de chimie et de hydraulique.

Enfin, Je tiens à exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce document.

Dédicace

*Avec l'aide de Dieu, j'ai pu réaliser ce modeste travail que je dédie:
A mes très chers parent qui m'ont toujours soutenue et ma donné la force.
Je leurs souhaite une bonne santé, que Dieu me les garde.*

A ma très chère sœur : Marwa.

A mes très chers frères : Youssouf et Islam.

*A mes grands-parents maternels qu'Allah leur pardonne et les accueille
dans son vaste paradis.*

*A mes grands-parents paternels qui ma toujours encouragé et souhaités la
réussite.*

A mes tantes et oncles. Mes cousins et cousine :

A mon marie Mohamed et sa famille kairia.

A mes très chères amies :

*Rekia, Fatma, Somia, Zineb, Souad, Kheira, Rekia, Fatima, Nafisa, Ahlem
et Fadwa qui étaient toujours à mes côtés et soutenus dans les moments difficiles.*

A mon petit Ahmed.

A toute personne que j'ai connue durant mon parcours universitaire.

A tous et à toutes un grand merci.

Résumé

Le ciment se caractérise par un nombre de caractères physiques et mécaniques mesurés de façons conventionnelles, soit sur la poudre, soit sur la pâte ou sur le mortier normale. Ces caractéristiques permettent de connaître la classe d'un ciment.

Mots clés: ciment, caractéristiques physiques et mécaniques, poudre, pâte, mortier.

ملخص:

يتميز الأسمنت بعدد من الخصائص الفيزيائية والميكانيكية المقاسة بالطريقة التقليدية إما على المسحوق أو

العجينة أو الملاط العادي. هذه الخصائص تجعل من الممكن معرفة فئة الأسمنت.

الكلمات المفتاحية: الاسمنت ، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية ، البودرة ، المعجون ، الملاط.

Sommaire

Sommaire

| | |
|-------------------------|----|
| Liste des figures..... | i |
| Liste des tableaux..... | ii |
| Introduction..... | 1 |

Chapitre I: présentation de L'entreprise des ciments et dérivés d'ECH-CHLEF (ECDE)

| | |
|--|----------|
| I.1.Histoire de cimenterie de chlef (ECDE)... | 3 |
| I.2.Les différents services de production à l'ECDE..... | 4 |
| I.2.1. Sous-direction exploitation..... | 5 |
| I.2.2. Sous-direction maintenance | 5 |
| I.3.Produits fabriqués..... | 6 |
| Conclusion..... | 7 |

Chapitre II: Généralités sur le ciment

| | |
|---|-----------|
| II.1. Définition..... | 8 |
| II.2. Historique..... | 9 |
| II.3.Les familles du ciment..... | 9 |
| II.4. Principales catégories des ciments Algériens | 11 |
| II.4.1. Classification des ciments en fonction de leur composition..... | 11 |
| II.4.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale..... | 11 |
| II.5.Principaux constituants de base des ciments..... | 13 |
| II.5.1. Matières premières | 13 |

| | |
|---|-----------|
| II.5.1.1. Calcaires..... | 13 |
| II.5.1.2. L'argile..... | 14 |
| II.5.1.3. Eléments argileux calcaires..... | 14 |
| II.5.2. Matériaux de correction..... | 14 |
| II.5.2.1. Minerai de fer (Fe_2O_3)..... | 14 |
| II.5.2.2. Gypse..... | 15 |
| II.5.2.3. Bauxite..... | 15 |
| II.5.2.4. Calcaire sableux..... | 15 |
| II.5.2.5. Sable..... | 15 |
| II.5.3. Matières secondaires : Ajouts..... | 16 |
| II.5.3.1. Pouzzolane naturelle | 16 |
| II.5.3.2. Laitier..... | 16 |
| II.5.3.3. Cendres volantes..... | 17 |
| II.5.3.4. Schistes calcinés..... | 17 |
| II.5.3.5. Fumées de silice..... | 17 |
| II.5.3.6. Piliers..... | 18 |
| II.5.3.7. Avantages des ajouts cimentaires | 18 |
| II.5.4. Produit semi-fini: Le clinker..... | 19 |
| II.5.4.1. Composition chimique | 20 |
| II.5.4.2. Composition minéralogique..... | 21 |
| II.6. Procédés et techniques de fabrication du ciment..... | 21 |
| II.6.1. Procédés de fabrication du ciment..... | 21 |

| | |
|---|----|
| II.6.2. Techniques de fabrication du ciment | 23 |
| II.6.2.1. Préparation de la matière première | 23 |
| II.6.2.1.1. Extraction des matières premières | 23 |
| II.6.2.1.2. Concassage | 24 |
| II.6.2.1.3. Pré-homogénéisation | 24 |
| II.6.2.1.4. Broyage et le séchage | 24 |
| II.6.2.1.5. Homogénéisation | 25 |
| II.6.2.2. Cuisson du cru | 25 |
| II.6.2.2.1. Préchauffage: la décarbonatation partielle | 25 |
| II.6.2.2.2. Pré-calcination | 25 |
| II.6.2.2.3. Clinkérisation | 25 |
| II.6.2.2.4. Refroidissement | 27 |
| II.6.2.3. Obtention du ciment | 27 |
| II.6.2.3.1. Broyage du ciment | 27 |
| II.6.2.3.2. Stockage du ciment | 28 |
| II.6.2.3.3. Conditionnement et expédition | 28 |
| II.7. Caractéristiques du ciment | 30 |
| II.7.1. Caractéristiques physiques | 30 |
| II.7.1.1. Prise | 30 |
| II.7.1.2. Durcissement | 31 |
| II.7.1.3. Fausse prise | 31 |

| | |
|--|-----------|
| II.7.1.4. Chaleur d'hydratation..... | 31 |
| II.7.1.5. Retrait | 32 |
| II.7.1.6. Gonflement..... | 32 |
| II.7.1.7. Expansion..... | 32 |
| II.7.1.8. Finesse de mouture (surface spécifique de Blaine) | 33 |
| II.7.2.Caractéristiques mécaniques..... | 33 |
| II.7.2.1. Résistance mécanique..... | 33 |

Chapitre III: Matériels et méthodes

| | |
|--|-----------|
| III.1. Méthodes physiques..... | 35 |
| III.1.1. Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine..... | 35 |
| III.1.2. Mesure de la densité..... | 37 |
| III.1.3. Détermination du pourcentage des refus..... | 38 |
| III.1.4. Consistance normale..... | 39 |
| III.1.4.1. Définition..... | 39 |
| III.1.4.2. Pâte normale..... | 39 |
| III.1.4.3. Préparation de la pâte..... | 40 |
| III.1.4.4.Vérification de la consistance normale..... | 40 |
| III.1.5. Essais de prise..... | 41 |
| III.1.5.1.Début de prise..... | 42 |
| III.1.5.2. Fin de prise..... | 42 |
| III.1.6. Essai d'expansion..... | 42 |

| | |
|---|-----------|
| III.2. Essais mécaniques (flexion et compression)..... | 44 |
|---|-----------|

Chapitre IV: Résultats et discussions

| | |
|---|-----------|
| IV.1. Identification des échantillons..... | 47 |
| IV.2.Préparation du mortier..... | 47 |
| IV.3. Analyses physiques et mécaniques..... | 48 |
| IV.3.1. Caractéristiques physiques du ciment..... | 48 |
| IV.3.1.1. Consistance normale du ciment..... | 48 |
| IV.3.1.2. Temps de Prise..... | 48 |
| IV.3.1.4. Stabilité du ciment..... | 49 |
| IV.3.2. Caractérisation mécaniques du ciment..... | 50 |
| IV.3.2.1. Résistance à la Compression et à la flexion..... | 50 |
| Conclusion générale..... | 52 |
| Références bibliographiques..... | 53 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure.I.1: Vue d'ensemble de la cimenterie de Chlef..... | 3 |
| Figure.II.1 : Matière premières constituent le ciment ; a)calcaire, b) argile, c)schiste, d)sable, e) minerai de fer..... | 15 |
| Figure.II.2: Clinker de Chlef de taille environ 5 mm..... | 20 |
| Figure II.3: Minéraux principaux du clinker..... | 21 |
| Figure.II.4: Fabrication du ciment par voie sèche et humide..... | 22 |
| Figure.II.5: Carrière de Chlef..... | 23 |
| Figure. II.6: Concassage des matières premières au niveau de la carrière..... | 23 |
| Figure. II.7: Schéma d'un four rotatif de cimenterie..... | 26 |
| Figure. II.8: Transport et stockage du clinker..... | 26 |
| Figure. II.9: Granulés de clinker prêt à être broyé..... | 27 |
| Figure. II.10: Intérieur d'un broyeur à boulets..... | 29 |
| Figure .II.11 : Différentes étapes de fabrication du Ciment..... | 29 |
| Figure. I.12: chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment..... | 31 |
| Figure. II.13: Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression..... | 33 |
| Figure. II.14: Résistance mécanique du mortier normale..... | 34 |
| Figure. III.1: Permeabilimètre de Blaine (ECDE)..... | 36 |
| Figure. III.2: Principe de fonctionnement du permeabilimètre de Blaine..... | 37 |
| Figure. III.4: Tamis de 90 μm et de 45 μm | 38 |
| Figure. III .5: L'appareil Alpine..... | 39 |

| | |
|---|----|
| Figure. III.6: Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance..... | 40 |
| Figure. III.7: Le malaxeur..... | 41 |
| Figure. III.8: Prosimètre automatique multipostes..... | 43 |
| Figure. III.9: Aiguille de Le châtelier..... | 44 |
| Figure. III.10: Essai de stabilité avec l'appareil de Le chatelier..... | 45 |
| Figure.III.11: Moules pour moulage des éprouvettes de mortier..... | 45 |
| Figure. III.12: Chambre humide..... | 45 |
| Figure. III.13: Dispositif pour l'essai de résistance à la traction par flexion..... | 46 |
| Figure. III.14: Dispositif de ruptures en compression..... | 46 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I.1: Caractéristiques chimiques du CPJ CEM II/A 42.5..... | 7 |
| Tableau I.2: Caractéristiques physiques du CPJ CEM II/A 42.5..... | 7 |
| Tableau II.1: Exigences mécaniques garanties des ciments selon la norme NA442.. | 12 |
| Tableau II.2: Composition chimique de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf..... | 16 |
| Tableau II.3: Caractéristiques chimiques du laitier..... | 17 |
| Tableau II.4: Caractéristiques chimiques de la fumée de silice..... | 18 |
| Tableau II.5: Récapitulatif des avantages des ajouts cimentaires..... | 18 |
| Tableau II.6: Composition chimique du clinker de ciment Portland ordinaire..... | 20 |
| Tableau IV. 1: Identification des échantillons..... | 47 |
| Tableau IV.2: Evolution de la consistance normale du ciment prepare..... | 48 |
| Tableau IV.3: Temps de prise du ciment préparé..... | 49 |
| Tableau IV.4: Résultats de l'expansion..... | 49 |
| Tableau IV.5: Evolution de la résistance normale à la compression et à la flexion des 3 types d'échantillons étudiés..... | 50 |

Introduction

Introduction

L'industrie cimentière met aujourd'hui à la disposition de l'utilisateur un grand nombre de ciments qui présentent des caractéristiques précises et adaptées à des domaines d'emploi déterminés. La gamme étendue de compositions, de résistances, de vitesse de prise et de durcissement répond aux usages très divers qui sont faits de béton sur chantier ou en usine.

Exigences climatiques, résistances à des agents agressifs, autant de paramètres qui impliquent de choisir le ciment le plus approprié. Pour faire ce choix, il est important de connaître les caractéristiques spécifiques des différents types de ciments prévus par la normalisation.

Les réactions du ciment Portland permettent de lier les différentes particules de ciment et de granulats ce qui confère au béton ces qualités de résistance mécanique. Ces réactions s'accompagnent d'effets secondaires qui peuvent produire des dégradations du matériau lorsqu'ils ne sont pas pris en compte. L'un de ces effets est la chaleur dégagée lors de ces réactions dont la grandeur dépend de la composition du ciment. La dynamique des réactions va dépendre de nombreux facteurs tels que finesse de mouture, composition, ajout d'éléments secondaires (gypse par exemple). Ces propriétés liées aux réactions doivent permettre de pouvoir travailler le produit béton jusqu'à sa mise en forme. Elles doivent aussi permettre au produit de durcir dans un temps suffisamment court pour pouvoir poursuivre les travaux de construction [1].

L'objectif de mon travail est de contribuer à l'étude des caractéristiques physico-mécaniques du ciment fabriqué au sein de la cimenterie ECDE de Chlef.

Alors, dans une première partie de ce travail, une partie théorique est présentée en deux chapitres. Dans un premier, on s'intéresse à la présentation de la cimenterie ECDE de Chlef. Dans un deuxième chapitre, des notions et définitions générales sur le matériau ciment est données, ainsi que les différents processus et étapes de fabrication du ciment (principalement par voie sèche) et leur utilisation, sont détaillées.

La deuxième partie de ce mémoire est consacrée à donner tous les matériels et méthodes utilisés pour effectuer les expériences concernant le thème étudié ainsi que les

différents résultats obtenus et leurs discussions séparés en deux chapitres. A la fin de ce manuscrit, les différentes conclusions tirées de ce travail seront données.

Ce travail s'est déroulé dans le laboratoire de la cimenterie de Chlef, j'en remercie très vivement le responsable ainsi que toute l'équipe. Ce séjour dans le milieu industriel m'a permis de voir de près et de manipuler.

Chapitre I:
Présentation de l'entreprise

La partie pratique de ce travail a été réalisée au niveau de L'entreprise des ciments et dérivés d'ECH-CHLEF (ECDE) qui représente l'une des grandes sociétés à 100%.

Alors, le premier chapitre de ce manuscrit présente cette cimenterie en citant ses différents services de production, sa capacité de production et ses produits fabriqués.

I.1.Histoire de cimenterie de chlef (ECDE) [2]

L'entreprise des ciments et dérivés d'ECH-CHLEF(ECDE) est située dans la zone industrielle d'Oued Sly environ 9km au sud –ouest de la ville de CHLEF, elle est construite entre 1957 et 1978 par une firme japonaise (KAWASAKI HEAVY INDUSTRY) en collaboration d'une société Belge(ACEC) pour l'installation des équipements électriques et la société Algérienne (Nord –African) pour le génie civil. L'entreprise des ciments et dérivés d'ECH (ECDE) est une société mono-unité créée par le décret N°82/325 du 25 octobre 1982. Elle est devenue une entreprise publique économique le 09/10/1989. Les activités de cette entreprise sont la fabrication et la commercialisation du ciment portland artificiel (CPA) et ciment portland aux ajouts (CPJ CEM II/A 42.5) d'où 42.5 est la résistance à la compression pendant 28 jours en MPa et ciment résistant au sulfate (CRS).



Figure. I.1: Vue d'ensemble de la cimenterie de Chlef.

CHAPITRE I: PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE

L'entreprise(ECDE) fabrique le ciment par le procédé de la voie Sèche .Au sein de l'ECDE, la fabrication du ciment passe par des étapes, chacune de ses étapes s'effectue au niveau d'une zone de travail, l'entreprise est constituée de six zones qui sont les suivantes :

1. Zone carrière
 - Carrière **SIDI LAROUSSI** (calcaire).
 - Carrière de **MAAMERIA** (argile).
 - Carrière **SIDI AMEUR** (sable).
 - Carrière de **BOUZGHAIA** (gypse).
2. Zone matière première.
3. Zone cru.
4. Zone cuisson.
5. Zone ciment.
6. Zone d'expédition.

L'unité de production couvre une superficie d'environ de 40 hectares et elle est dotée de deux lignes de fabrication EAL et EALL.

Le procédé utilisé est la voie sèche pour les deux lignes EAL et EALL de production d'une capacité nominale unitaire de 3000 tonnes/jours de clinker chacune avec :

- Un concassage calcaire-Argile commun aux deux lignes.
- Un parc de pré-homogénéisation de 100000 tonnes.
- Deux ateliers de broyages cru de 290t/h chacun.
- Deux lignes de cuisson, et un atelier de stockage de clinker comportant un all couvert de 4000 tonnes et de 8 silos d'une capacité de 48000 tonnes.
- Trois broyeurs à boulets d'une capacité globale de 350 t/h pour le broyeur du ciment.

La Part du marché de l'ECDE : 16 % du marché national. La Capacité nominale de la cimenterie est 1000.000 Tonnes de clinker.

I.2. Les différents services de production à l'ECDE [2]

La direction de production à la société des ciments de Chlef (ECDE) est chargée de la production et de la gestion de production, elle est divisée en deux sous-directions: la sous-direction exploitation et la sous-direction maintenance.

I.2.1. Sous-direction exploitation

Elle est chargée de la fabrication du produit, le suivi du processus de production et l'exploitation de la matière première. Elle comprend deux sous-départements:

- **Département fabrication** : Ce département comprend les quatre services suivants:
 - Service fabrication.
 - Service exploitation.
 - Service environnement.
 - Service laboratoire.
- **Département matière première** : Il comprend deux services: service matière première et service entretien engins roulants

I.2.2. Sous-direction maintenance

Elle gère les problèmes de la maintenance et de l'investissement et comprend deux départements: département maintenance et département bureau d'études et méthodes.

- **Département maintenance**

Il assure l'exécution des travaux de maintenance de toutes les installations de la cimenterie, en assurant les ensembles des opérations de dépannage et d'entretien. Les services de ce département sont:

- Service mécanique d'entretien.
- Service électrique.
- Service utilités.
- Service de contrôle, mesure et régulation (C.M.R).

➤ Département bureau des méthodes

Il est chargé de la gestion, étude, préparation, ordonnancement et lancement des travaux en urgence; Programme hebdomadaire et Programme grand arrêt. Il comprend les services suivants :

- Service magasin général (Gestion de stock)
- Service approvisionnement
- Service visite
- Service méthodes
- Service étude et réalisation

I.3.Produits fabriqués [3]

L'activité principale de l'entreprise est la fabrication et la commercialisation du ciment portland CPJ CEM II/A 42.5. ECDE produit à la commande d'autres types de ciments tels que : le CPJ CEM II/A 52.5 et le CPJ CEM II/A 32.5. Le CPJ-CEM II/A 42,5 de l'ECDE répond aux exigences de la norme **NA 442- 2000**.La capacité de production de cette cimenterie dépasse les deux millions de tonnes de ciment.

Le ciment Portland CPJ-CEM II/A 42.5 fabriqué au sein de cette entreprise est constitué de:

- 80 à 94% de clinker Portland ;
- 6 à 20% maximum d'ajouts (calcaire pur) ;
- 0 à 5% de sulfate de calcium comme régulateur de prise (Constituants secondaires).

Les caractéristiques chimiques et physiques du ciment fabriqué sont résumées dans les tableaux I.1 et I.2 Respectivement.

Tableau I.1: Caractéristiques chimiques du CPJ CEM II/A 42.5.

| Caractéristiques chimiques | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Norme NA 442 | Ciment ECDE |
| Sulfates SO ₃ ≤ 3.5 % | SO ₃ ≤ 2.00 % |
| Chlorures Cl ⁻ ≤ 0.1 % | Cl ⁻ ≤ 0.08 % |

Tableau I.2: Caractéristiques physiques du CPJ CEM II/A 42.5.

| Caractéristiques physiques | |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Norme NA 442 | Ciment ECDE |
| Début de prise ≥ 60 mn | Début de prise > 60 mn |
| Stabilité a chaud ≤ 10mm | Stabilité a chaud < 7mm |
| Retrait 28j ≤ 1000 µm/m% | Retrait 28j < 650 µm/m |

Conclusion

Etant donné l'importance économique de la cimenterie d'ECDE de Chlef et son emploi d'une grande masse de main d'œuvre, avec un potentiel productif théorique de plus de deux millions de tonnes de ciments, elle est devenue l'une des plus performantes unités de production, dans son domaine, en Algérie et ceci en termes de capacité de production et de distribution qui couvre une bonne partie du territoire national.

Chapitre II:
Généralités sur le ciment

Le Ciment est le matériau du 20ème siècle, matériau centenaire, est un élément essentiel dans la construction qui intervient dans la composition du béton. Ce matériau joue le rôle de liant au contact de l'eau.

Le développement du ciment n'a pu s'effectuer que grâce à l'apparition de nouveaux matériels (fours rotatifs et broyeurs à boulets en particulier). Et les procédés de fabrication n'ont pas cessé de se perfectionner.

Dans cette première partie du document, quelques notions et définitions générales sur le ciment, ses principaux constituants, ses propriétés ainsi que les différents processus et étapes de sa fabrication, seront détaillés. Des statistiques nationales et internationales correspondant à la production de ce matériau seront aussi données à la fin de ce chapitre.

II.1. Définition

Le ciment est une matière pulvérulente formant avec de l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées. Son emploi le plus habituel est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable et des graviers (granulats) pour donner le béton [4]. Comme définition physique; le ciment est un liant hydraulique se présentant sous forme de poudre fine qui est à base de calcaire et d'argile utilisé qui fait prise par ajouts d'eau [5]. Il durci rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau.

Une définition chimique peut être aussi donnée à ce matériau: alors, un ciment artificiel est un produit provenant de la cuisson de mélanges artificiels (de la main de l'homme) de silice, d'alumine et de carbonate de calcium (de chaux), sur lesquels l'eau n'a aucune action (ou qu'une action particulièrement lente avant la trituration) et qui, réduits en poudre mécaniquement, font prise sous l'effet de l'eau en des temps variables suivant leur qualité.

II.2. Historique

Les ciments auraient en premier lieu été découverts par les Égyptiens puis perfectionnés par quelques civilisations, telles que les Mayas et les chinois, par l'utilisation de chaux obtenue par cuisson de roches calcaires, suivie d'une extinction à l'eau [6]. Les Grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques (cendres volcaniques de la région de Pouzzoles), usage repris et généralisé par les Romains.

Jusqu'à l'Époque moderne, le ciment est un liant, fréquemment une chaux, additionnée d'adjuvant comme les tuiles ou briques concassées dont l'argile a des propriétés hydrauliques. La pouzzolane (terre volcanique de Pouzzoles, région de Naples, Italie) est particulièrement utilisée comme adjuvant. Le ciment ne prend son acception contemporaine qu'au XIX^{ème} siècle, quand Louis Vicat identifie le phénomène d'hydraulicité des chaux en 1817 et celle des ciments [7].

En revanche, cette propriété d'hydraulicité du mélange ainsi constitué est restée totalement inexplicée jusqu'aux travaux de Louis Vicat qui élabore, en 1817, la théorie de l'hydraulicité et fait connaître le résultat de ses recherches concernant la proportion d'argile et la température de cuisson. Il donne des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires pour constituer le mélange qui, après cuisson à la température convenable et broyage, sera un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement : le ciment artificiel. L'industrie du ciment était née.

Quelques années plus tard, en 1824, le Britannique Joseph Aspdin dépose un brevet pour la fabrication d'une chaux hydraulique à prise rapide qu'il nomme commercialement le cimentPortland (car la couleur de son produit ressemble aux célèbres pierres des carrières de la péninsule de «Portland» localisées en Manche.

En 1828, Louis Vicat réalise un pont suspendu en ciment, au-dessus de la Corrèze, à Argentat, qui démontre la qualité de son matériau [6]. Dans les années qui suivent, Vicat parcourt la France afin de découvrir plus de trois cents carrières capables de fournir ces chaux hydrauliques et en publie les listes dans les Annales des Ponts et Chaussées.

Mais il faut attendre 1840, et la découverte des principes d'hydraulicité des ciments lents (dits actuellement ciments Portland) toujours par Louis Vicat (société Vicat) - une cuisson à la température de fusion pâteuse soit 1450 °C qui permet d'obtenir le clinker - pour voir une réelle fabrication de ces ciments modernes et apparaître ensuite une architecture de béton coffré puis béton armé [7].

▪ Naissance de l'industrie cimentière

En France, un polytechnicien, Pavin de Lafarge, installe en 1833 des fours à chaux au Teil et la première usine du ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1848 à Boulogne-sur-Mer. La production industrielle du ciment débute alors dans la première moitié du XIXème siècle. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de nouveaux matériels : four rotatif et broyeur à boulets en particulier. Le premier composant du béton est donc opérationnel à la fin de la première moitié du 19ème siècle [6]. Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse : en 1870, pour produire une tonne de clinker (constituant de base du ciment) il fallait 40 heures, actuellement, il faut environ 3 minutes [7].

II.3. Les familles du ciment

Il existe deux grandes familles du ciment :

- **Les ciments Portland**, constitués majoritairement de silice et de chaux et qui sont utilisés principalement dans les bétons de bâtiments et les ouvrages de génie civil.
- **Les ciments alumineux** qui se composent essentiellement d'alumine et de chaux. Ils ont été développés au début du 20ème siècle par Bied. En raison de leur résistance aux attaques chimiques, de leur prise rapide ou de l'absence de chaux, ils sont utilisés en génie civil pour la confection des sols industriels, d'ouvrages d'assainissements ou des mises en service rapides, et dans la réalisation des réfractaires monolithiques utilisés dans l'industrie sidérurgique ou verrière [8].

II.4. Principales catégories des ciments Algériens

Toutes les normes algériennes sont élaborées par : L'institut Algérien de Normalisation (IANOR).

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normales, selon l'arrêté interministériel du 3 RabieEthani 1424 correspondant au 4 juin 2003 portant sur les spécifications techniques et les règles applicables aux ciments.

II.4.1. Classification des ciments en fonction de leur composition [9]

Selon la teneur des constituants autres que le gypse ajouté ou non au clinker, la norme Algérienne NA442 donne la classification suivante:

- CEM I Ciment Portland Artificiel (CPA) ;
- CEM II Ciment Portland Composé (CPJ) ;
- CEM III Ciment de Haut Fourneau (CHF) ;
- CEM IV Ciment Pouzzolaniques ;
- CEM V Ciment aux Laitiers et aux Cendres.

Ces ciments diffèrent par le type d'ajout et sa teneur, incorporé dans le but de modifier certaines de leurs propriétés en raison des conditions d'environnement ou de performances mécaniques auquel ces ciments sont destinés.

II.4.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale [9]

La norme **NA442** classe les ciments courants d'après leur résistance à la compression déterminée conformément à la norme **NA234**, mesurée à 28 jours, en six classes de résistance (tableau I.2).

CHAPITRE II: GÉNÉRALITÉS SUR LE CIMENT

Tableau II.1 : Exigences mécaniques garanties des ciments selon la norme NA442.

| Classe de résistance | Résistance à la compression (MPa) | | | |
|----------------------|-----------------------------------|--------|-----------------------------|-------------|
| | Résistance à court terme | | Résistance courante 28jours | |
| | 2jours | 7jours | | |
| 32,5 | | | $\geq 32,5$ | $\leq 52,5$ |
| 32,5 R | – | | | |
| 42,5 | \geq | 13,5 | $\geq 42,5$ | $\leq 62,5$ |
| 42,5 R | – | | | |
| 52,5 | \geq | 12,5 | $\geq 52,5$ | – |
| 52,5 R | – | | | |
| | \geq | 20 | | |
| | – | | | |
| | \geq | 20 | | |
| | – | | | |
| | \geq | 30 | | |
| | – | | | |

❖ La nomenclature du ciment [2]

Une nomenclature régit le nom des produits industriels (ciments), afin de donner des indications sur sa composition, simplement à partir de son nom.

➤ Exemple du ciment de Chlef : **CPJ - CEM II / A 42, 5 R**

- Le premier chiffre romain **II** indique le type de ciment (composition).
- La lettre majuscule **A** veut dire Algérienne.
- Les chiffres **42, 5** indiquent la classe de résistance.
- Enfin, la dernière lettre indique la résistance (soit **R** au jeune âge ou soit **N** normale).

II.5. Principaux constituants de base des ciments

La composition « potentielle » est calculée à partir des quantités d'oxydes contenues dans le clinker comme si la cristallisation complète des produits d'équilibre avait eu lieu. Quatre composés, également appelés « phase », sont habituellement considérés comme les principaux constituants du ciment. En effet, cette notation abrégée, utilisée par les chimistes de l'industrie du ciment, décrit chaque oxyde par une lettre : $\text{CaO} = \text{C}$; $\text{SiO}_2 = \text{S}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ et $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$. De la même façon, H_2O dans le ciment hydraté est désigné par H et SO_3 par S [10].

On peut théoriquement fabriquer du ciment portland à partir de matériaux quelconques renfermant chaux, silice, alumine et fer. Mais en pratique, les possibilités sont beaucoup plus limitées car on est obligé de choisir, pour des raisons évidentes, des matières premières faciles à extraire, traiter et combiner. On peut utiliser aussi comme appoint des sous-produits d'autres industries tels le laitier des hauts fourneaux ou les cendres des centrales thermiques [11].

II.5.1. Matières premières

On classe habituellement les matières premières naturelles en :

- **Calcaire:** plus de 80% de CaCO_3 .
- **Argile:** moins de 40% de CaCO_3 .
- **Éléments argilo- calcaires:** de 40% à 80% de CaCO_3 .

II.5.1.1. Calcaires

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

Certains de ces dépôts soumis à une pression et à une température suffisante, ont donné des calcaires cristallins [11].

Les principales impuretés rencontrées dans les calcaires sont: la silice, la magnésie, le fer, les alcalis. La réaction chimique de base de la fabrication du ciment commence avec la

décomposition du carbonate de calcium (CaCO_3) en chaux (oxyde de calcium, CaO) accompagnée d'un dégagement du gaz carbonique (CO_2) [12].

II.5.1.2. L'argile

L'argile est une roche sédimentaire, composée par une large part de minéraux spécifiques, silicates en générale, d'aluminium plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée.

Cette matière constitue essentiellement de silice, d'alumine et de fer elle peut être sous forme d'argile résiduelle provenant de la décomposition sur place de roches existantes, du fait d'agents physico-chimiques ou d'argile transportée et déposée sous l'effet des mers, des cours d'eaux des glaciers et du vent [13].

II.5.1.3. Éléments argileux calcaires

Ils contiennent les éléments principaux nécessaires à la fabrication du ciment mais doivent être corrigés par des apports de calcaire ou d'argile afin de faire leur dosage.

Certains calcaires argileux renferment naturellement les divers constituants du ciment portland en proportion voulu. Ces « pierres à ciment » sont évidemment très rare [11].

II.5.2. Matériaux de correction

II.5.2.1. Minerai de fer (Fe_2O_3) [14, 15]

Le minerai de fer est une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes, comme la bauxite.

Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferrifère, sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels, réduit la teneur théorique.

II.5.2.2. Gypse [16]

Le gypse est une espèce minérale composée de sulfate dihydraté de calcium de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Le mot gypse désigne ainsi à la fois une espèce chimique et une roche.

Le gypse est le minerai qui permet de fabriquer le plâtre. Il entre aussi dans la composition des ciments.

II.5.2.3. Bauxite

La bauxite, minerai naturel utilisé pour produire l'aluminium, elle est extraite et transformée par affinage en alumine, qui est ensuite transformée en aluminium par électrolyse [17].

II.5.2.4. Calcaire sableux

Les calcaires sableux sont d'origine détritique. Ils contiennent principalement la silice [18].

II.5.2.5. Sable

Le sable est fait de grains minéraux tous petits (\leq millimètres). C'est de la roche effritée par l'érosion [19].



Figure. II.1 : Matière premières constituant le ciment ; a)calcaire, b) argile, c)schiste, d)sable, e) minerai de fer.

II.5.3. Matières secondaires: Ajouts

Un ajout est tout ingrédient autre que l'eau ou le ciment qui est ajouté à ces deux composés pendant le malaxage pour améliorer leurs caractéristiques hydrauliques et rhéologiques (stabilité et fluidité), pour augmenter ou diminuer leur temps de prise ou pour assurer des critères de performance obtenus à long terme de la pâte de ciment (résistance, chaleur dégagée, etc.) [20].

II.5.3.1. Pouzzolane naturelle

La pouzzolane est une roche naturelle constituée par des scories (projections) volcaniques basaltiques ou de composition proche. Elle est généralement rouge ou noire, constituée principalement par la silice, l'alumine et l'oxyde de fer [21].

La composition chimique de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf après broyage est montrée dans le tableau II.2.

Tableau II.2: Composition chimique de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf [22].

| | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % |
|------|------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----|-----|-------------------|---|
| CaO | SiO ₂ | AlO ₃ | FeO ₃ | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | MgO | Cl | CaCO ₃ | |
| 1 | 4 | 1 | 9 | 0 | | 3 | 4 | | 10 | |
| 2.36 | 2.95 | 6.32 | .49 | .01 | .39 | .00 | .20 | .00 | .75 | |

II.5.3.2. Laitier

Les laitiers des hauts fourneaux sont des sous-produits formés lors de l'élaboration de fonte, à partir de minerai de fer ils contiennent la silice (SiO₂), chaux (CaO), alumine (Al₂O₃) et l'oxyde de magnésium (MgO) [18].

Tableau II.3: Caractéristiques chimiques du laitier [23].

| | | | | |
|-------------------|--------------------|---------------------------------|----------------------------------|---|
| %SiO ₂ | %CaO | %Al ₂ O ₃ | % Fe ₂ O ₃ | %MgO |
| 35.85 | 37.22 | 5.08 | 7.77 | 3.55 |
| %MnO | %Na ₂ O | %K ₂ O | %TiO ₂ | %P₂O₅ %PAF |
| 2.02 | 0.12 | 0.27 | 0.17 | 0.09 1.74 |

II.5.3.3. Cendres volantes

Elles contiennent principalement de la chaux et de silice réactive, sont des produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques [18].

II.5.3.4. Schistes calcinés

Ce sont des schistes que l'on porte à une température d'environ 800°C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques [18].

II.5.3.5. Fumées de silice

Les fumées de silice sont des sous-produits de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de 0,1 µm). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent être présentées pour au moins 85 % (en masse). Elles ont des propriétés pouzzolaniques [18].

CHAPITRE II: GÉNÉRALITÉS SUR LE CIMENT

Tableau II.4: Caractéristiques chimiques de la fumée de silice [24].

| % SiO ₂ | % CaO | % Al ₂ O ₃ | % FeO ₃ | % MgO | % Na ₂ O | % K ₂ O | % PAF |
|-----------------------|----------|-------------------------------------|-----------------------|----------|------------------------|-----------------------|----------|
| 87 | 0. | 1. | 4. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| 3 | 4 | 0 | 4 | 3 | 2 | 6 | 6 |

II.5.3.6. Piliers

Ce sont des constituants secondaires des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment. Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau) [18]

II.5.3.7. Avantages des ajouts cimentaires [25]

Le tableau ci-dessous représente les avantages des ajouts cimentaires.

Tableau II.5: Récapitulatif des avantages des ajouts cimentaires.

| Avantages techniques | Avantages économiques | Avantages écologiques |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> *améliorer la maniabilité * réduit la demande en eau * amélioration des propriétés mécaniques et de la | <ul style="list-style-type: none"> * leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation. * réduit le prix du béton pour | <ul style="list-style-type: none"> * diminution de l'émission du CO₂ par l'industrie cimentière * élimination des sous-produits de la nature |

| | | |
|---|--------------------------------|--|
| <p>durabilité du béton</p> <p>* diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton</p> <p>* diminue la fissuration d'origine thermique</p> | <p>le coût du combustible.</p> | |
|---|--------------------------------|--|

II.5.4. Produit semi-fini: Le clinker

Le clinker est un constituant qui résulte de la cuisson, à 1450 °C, d'un mélange composé d'environ 80 % de calcaire (qui apporte le calcium) et de 20 % de matériaux aluminosilicates (notamment les argiles qui apportent le silicium, l'aluminium et le fer).

Tous les ciments ont pour constituant de base le clinker qui assure la fonction liante grâce à laquelle on passe d'un état initial de fluide modulable à un état final de solide mécaniquement résistant. La norme «NF P 18-301 » spécifie que le clinker doit être constitué d'au moins de deux tiers en masse de silicates de calcium.

Le clinker est accompagné de sulfate de calcium (le gypse) nécessaire pour régulariser la prise (le ciment reste coulable pendant une période suffisamment longue afin de permettre sa mise en place) [26].



Fig. II.2: Clinker de Chlef de taille environ 5 mm.

II.5.4.1. Composition chimique

Le clinker est principalement composé d'oxydes métalliques, les quatre oxydes principaux sont : l'oxyde de calcium (CaO), de silicium (SiO₂), d'aluminium (Al₂O₃) et de fer (Fe₂O₃), représentant environ 95% en masse.

La composition chimique moyenne du clinker est présentée dans le tableau suivant.

Tableau II.6: Composition chimique du clinker de ciment Portland ordinaire [27].

| Comp osants du clinker | Si O ₂ | A l ₂ O ₃ | F e ₂ O ₃ | C aO | M gO | S O ₃ | K ₂ O | N a ₂ O |
|---------------------------------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------|---------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| Notati ons cimentière | S | A | F | C | M | S | K | N |
| % (en masse) | 19 -25 | 2 -9 | 1 -5 | 6 2-67 | 0 -3 | 1 -3 | 0 .6 | 0 .6 |

II.5.4.2. Composition minéralogique [28]

Divers composés chimiques se forment, dont les principaux sont :

- Le silicate tricalcique C3S (alite) : $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$ [45 à 65 %] ;
- Le silicate bicalcique C2S (bélite) : $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$ [10 à 30 %] ;
- L'aluminate tricalcique C3A (célite) : $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$ [5 à 15 %];
- L'alumino-ferrite tétracalcique C4AF (Aluminoferrite) : $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ [5 à 15 %].

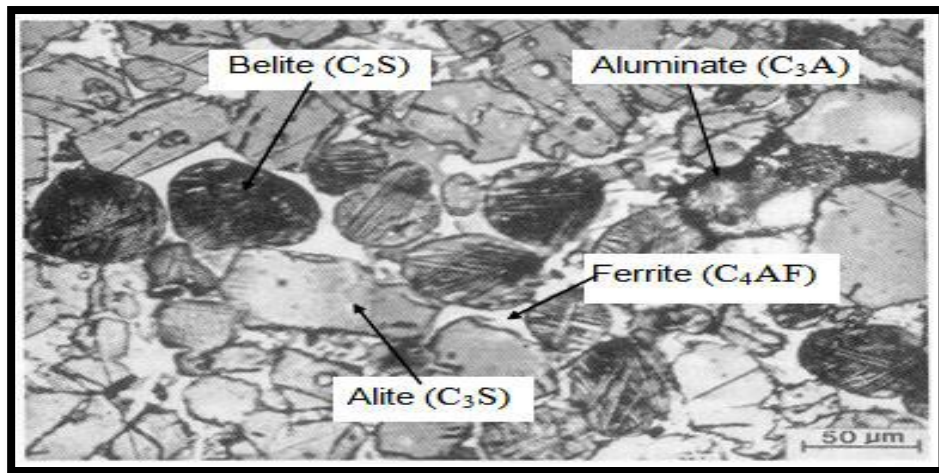


Figure II.3 : Minéraux principaux du clinker.

II.6. Procédés et techniques de fabrication du ciment

II.6.1. Procédés de fabrication du ciment [29]

Il existe quatre grands procédés de fabrication du ciment : le procédé par voie sèche, le procédé par voie semi-sèche, le procédé par voie semi-humide et le procédé par voie humide.

Dans le **procédé par voie sèche**, la matière première broyée et séchée passera d'abord dans un préchauffeur à cyclone avec ou sans précalcinateur (de type AT 'air- through' ou AS 'air séparé'), puis dans un four tubulaire de 80 m. C'est le procédé le plus récent et le plus répandu car il est moins énergivores, mais il nécessite la mise en œuvre des moyens

importants de captation des poussières (électro filtres, filtres cyclones et multi cyclones, dépoussiéreurs électrostatiques...).

Dans le **procédé par voie semi-sèche**, la poudre est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20 mm de diamètre par ajout de 12 à 14 % d'eau, séchée et préchauffée dans une chambre 'Grille LEPOL' puis dans le four.

Dans le **procédé par voie semi-humide**, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres presses. Le gâteau de filtre-pressé est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru.

Dans le **procédé par voie humide**, la farine crue est transformée en pâte liquide par ajout d'eau puis broyage et malaxage avant d'être introduite directement dans un four qui sera alors plus long (jusqu'à 200 m). Ce procédé consomme beaucoup de combustible pour évaporer l'eau excédentaire : c'est pourquoi avec le 1er choc pétrolier de 1973, les procédés par voie sèche et semi-sèche lui sont préférés car ils sont plus économiques en besoin énergétique. La voie humide est amenée à disparaître car elle présente l'inconvénient de consommer de 30 à 40 % d'énergie en plus par rapport à la voie sèche.

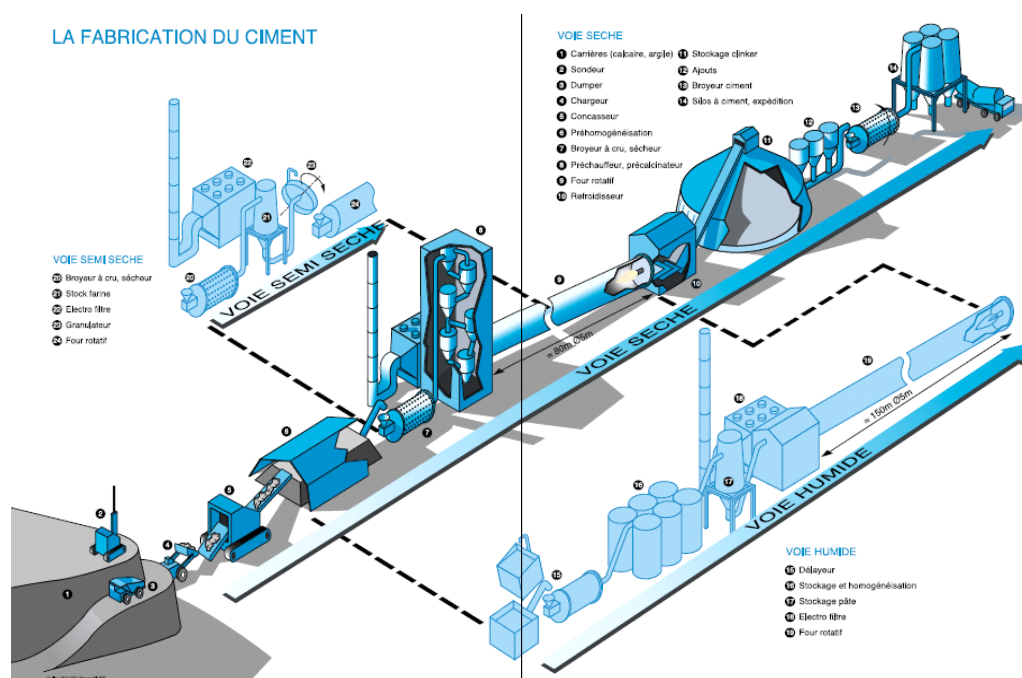


Figure. II.4 : Fabrication du ciment par voie sèche et humide.

II.6.2. Techniques de fabrication du ciment

Avant d'arriver aux produits finis que sont les différents types de ciments, le mélange de départ va passer successivement par différentes phases durant lesquelles la matière va subir une transformation chimique et cristalline importante. La fabrication du ciment passe par 3 phases essentielles: la préparation de la matière première, la cuisson du cru et l'obtention du ciment et chacune de ces phases est divisée en sous-étapes.

II.6.2.1. Préparation de la matière première

II.6.2.1.1. Extraction des matières premières

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique ou encore par ripage aux bulldozers. La roche est reprise par dumpers vers un atelier de concassage [30].



Figure. II.5: Carrière de Chlef.

II.6.2.1.2. Concassage

Les blocs obtenus sont réduits, dans des concasseurs situés généralement sur le site même de la carrière. La matière ainsi obtenue est amenée par bande transporteuse ou convoyeur jusque dans l'usine [6].



Figure. II.6: Concassage des matières premières au niveau de la carrière.

II.6.2.1.3. Pré-homogénéisation

Après concassage des blocs extraits de la carrière, on mélange, de façon aussi homogène que possible, leurs différents composants et les ajouts déterminés lors de la formulation. C'est la phase appelée de pré-homogénéisation.

La pré-homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des constituants essentiels du ciment et de créer un mélange homogène [31].

II.6.2.1.4. Broyage et le séchage

Le broyage procède par fragmentations successives des grains jusqu'à obtenir des grains de faible dimension pour faciliter leur cuisson.

À la sortie du hall de pré-homogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs, qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre

qui présente la finesse requise. Cette poudre, appelé le « cru », est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation [6].

II.6.2.1.5. Homogénéisation

En sortant du broyeur, le cru doit être malaxé pour que le mélange acquière sa rhéologie optimale avant introduction dans les différents types de four. Le cru est homogénéisé et stocké dans des silos [32].

II.6.2.2. Cuisson du cru

II.6.2.2.1. Préchauffage: la décarbonatation partielle

Avant introduction dans le four, la farine (le cru) est chauffée à environ 800 °C dans un préchauffeur à grille ou à cyclones appelé échangeur de chaleur. Le préchauffage permet essentiellement de préparer la farine du point de vue chimique et thermique [32].

II.6.2.2.2. Pré-calcination

Elle se fait dans le précalcinateur placé entre le préchauffeur et le four. La décarbonatation commencée dans le préchauffeur se fait pour l'essentiel dans le précalcinateur et se termine dans le four. Cette opération, qui s'effectue à des températures entre 650 et 900°C, permet de libérer le gaz carbonique pour obtenir la chaux nécessaire à la fabrication de clinker [32].

II.6.2.2.3. Clinkérisation [33]

Cette opération a lieu dans le four. Portés à haute température, entre 1450 et 1550° C, la chaux, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer, apportés par les matières premières, se combinent entre eux pour former les nouveaux composés chimiques qui entrent dans la composition minéralogique du clinker. Après refroidissement, le clinker se présente sous la forme de granules d'environ (0.5a 4 cm) de diamètre.

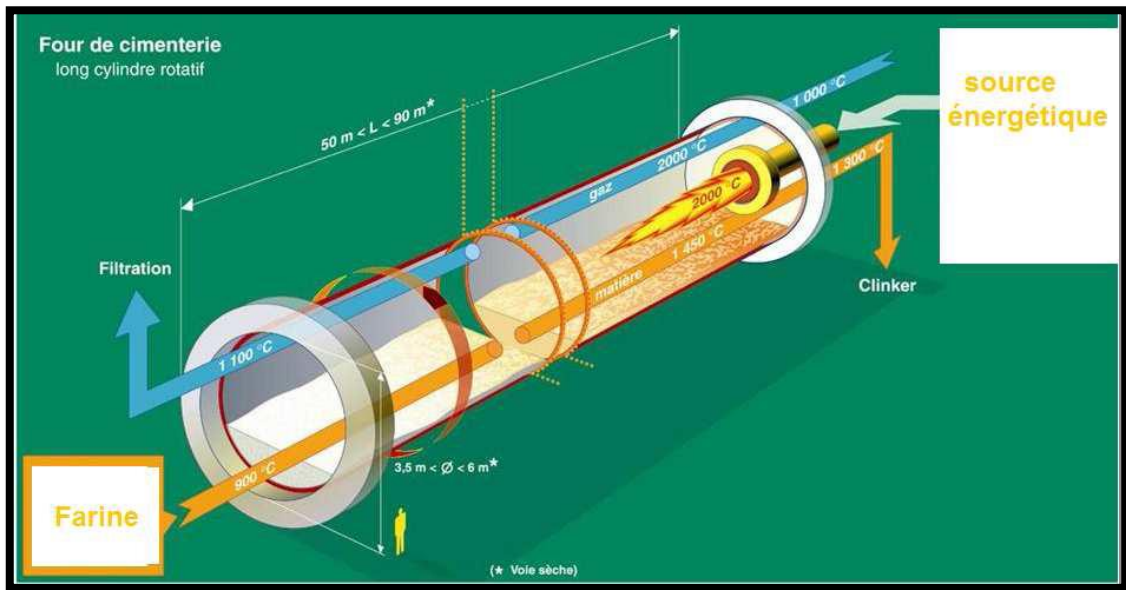


Figure. II.7: Schéma d'un four rotatif de cimenterie.

Le clinker évacué par tapis vers le hall/silo à clinker ou il sera stocké en attendant d'être broyé pour faire du ciment.

La capacité de stockage peut atteindre plusieurs dizaines de milliers de tonnes (60 000 tonnes en bas).

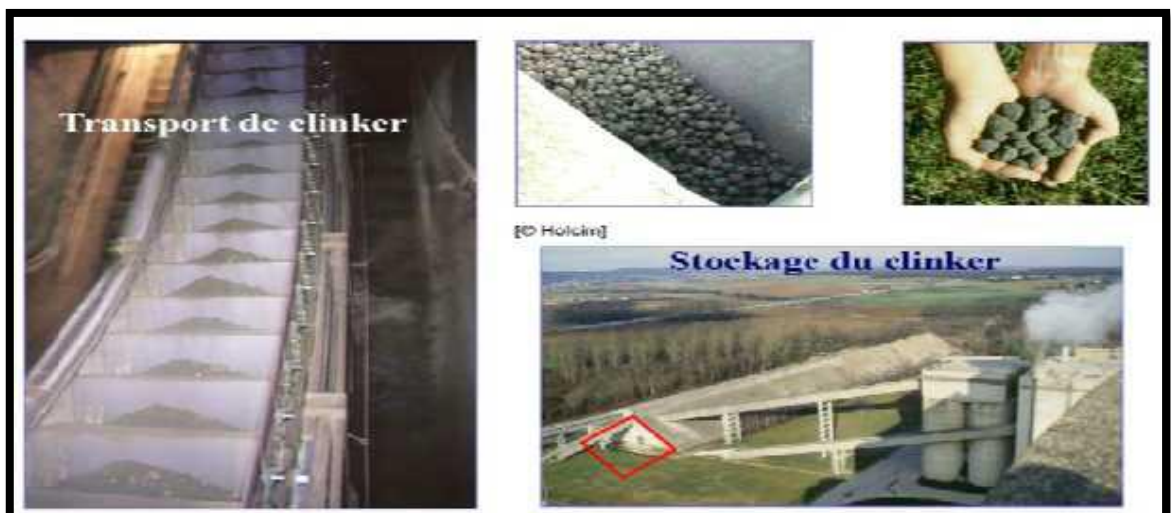


Figure. II.8: Transport et stockage du clinker.

II.6.2.2.4. Refroidissement

À la fin de la cuisson, la matière est brusquement refroidie à l'air, ce qui permet de lui donner la structure cristallographique optimale. On obtient ainsi des grains solides à 150 °C : c'est le clinker, qui est transporté vers d'énormes silos de stockage. Le clinker se présente sous la forme de granules d'environ 2 cm de diamètre (**Fig. II.9**) [32].



Figure. II.9: Granulés de clinker prêt à être broyé.

II.6.2.3. Obtention du ciment

II.6.2.3.1. Broyage du ciment

À la fin de la cuisson, la matière brusquement refroidie se présente sous forme de granules qui constituent le clinker. Celui-ci, finement broyé avec du gypse (environ 5 %) pour régulariser la prise, donne le ciment Portland. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets, dispositifs cylindriques chargés de boulets d'acier et mis en rotation (20 tours/minute). D'autres ciments sont obtenus en ajoutant à cette phase de broyage divers constituants : laitier granulé de haut fourneau, cendres volantes, fillers, schistes calcinés, qui sont des matériaux pouzzolaniques [32].

Au niveau de l'entreprise ECDE les ajouts principaux sont le gypse qui joue le rôle d'un retardateur de prise et le calcaire pour minimiser les coûts de fabrication ainsi d'obtenir des quantités en plus.



Figure. II.10: Intérieur d'un broyeur à boulets.

II.6.2.3.2. Stockage du ciment

Des systèmes de transport mécaniques et pneumatiques peuvent être utilisés pour acheminer le ciment jusqu'aux silos de stockage [34].

II.6.2.3.3. Conditionnement et expédition

Le ciment est chargé directement en vrac dans des camions citernes, des péniches ou des wagons (ou même en bateau) ou envoyé dans un atelier d'ensachage et de séchage [32].

Les schémas suivants résument le processus de fabrication ainsi les compositions dans chaque étape jusqu'à l'obtention du produit fini (Ciment).

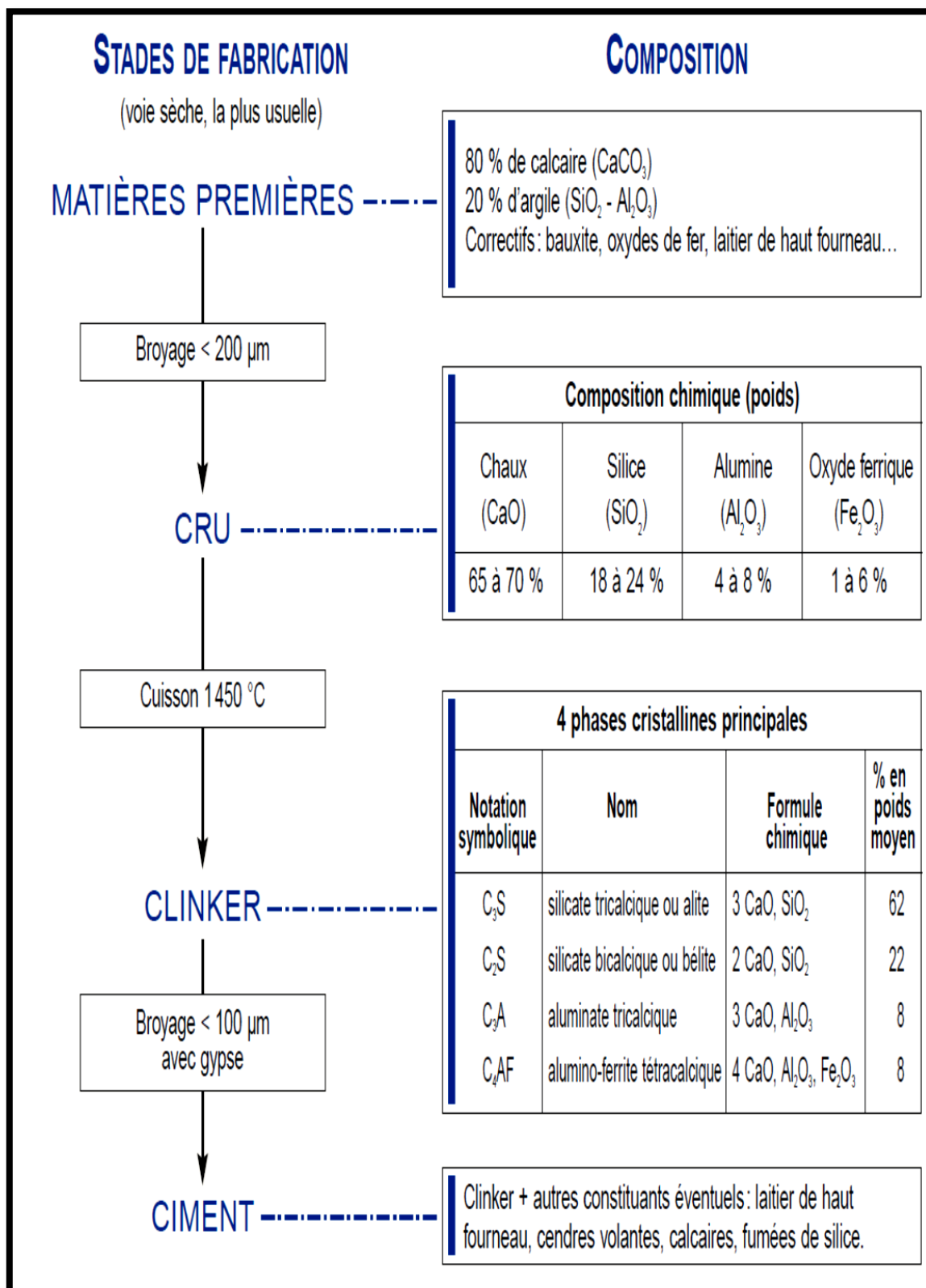


Figure .II.11: Différentes étapes de fabrication du Ciment.

II.7. Caractéristiques du ciment

II.7.1. Caractéristiques physiques

Comme cela a été étudié précédemment, le ciment est essentiellement constitué de :

- Silicate tricalcique : C3S ;
- Silicate bicalcique : C2S ;
- Aluminate tricalcique : C3A ;
- Ferro-Aluminate tetracalcique: C4AF.

Une fois la poudre de ciment mélangé à l'eau, les réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés avec formation de cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produisant la prise. Les réactions chimiques d'hydratation s'accompagnent d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon le ciment et la rapidité de prise [35].

II.7.1.1. Prise

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important, est lié à de nombreux paramètres:

- le type du ciment, certains d'entre eux ayant des temps de prise beaucoup plus courts que d'autres dans les mêmes conditions d'ambiance ;
- la finesse de mouture, le début de prise étant d'autant plus rapide que la finesse de mouture est grande;
- la température ambiante, la prise étant stoppée à 0 °C, alors qu'elle est très accélérée dès que la température dépasse 30°C ;
- la présence de matières organiques dans l'eau ;
- l'excès d'eau de gâchage qui agit alors comme retardateur. La norme spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :
 - 1 h 30 pour les ciments des classes 32,5 et 32,5 R ;
 - 1 h pour les ciments des classes 42,5 - 42,5 R - 52,5 - 52,5 R.

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 min à 3 h 30 min pour la grande majorité des ciments, ces valeurs s'entendant pour une température ambiante de 20 °C [29].

II.7.1.2. Durcissement

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment. Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter [35].

II.7.1.3. Fausse prise

Dans la composition des ciments rentre en général un peu de gypse (sulfate de calcium hydraté à deux molécules d'eau : $\text{SO}_4\text{Ca}, 2\text{H}_2\text{O}$). Si les clinkers sont trop chauds ou s'échauffent trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre [$\text{SO}_4\text{Ca}, 1/2 \text{H}_2\text{O}$] dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est la « fausse prise ». Dans ce cas, il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage. Les ciments les plus sensibles sont ceux à très fine mouture ou à assez fort pourcentage de gypse [29].

II.7.1.4. Chaleur d'hydratation

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

- La finesse de mouture: plus le ciment est broyé finement, plus la chaleur d'hydratation est élevée ;
- La nature des constituants: les ciments CPA comportent presque exclusivement du clinker et dégagent plus de chaleur que les ciments avec constituants secondaires ;
- La nature minéralogique du clinker : plus les teneurs en aluminat tricalcique (C3A) et silicate tricalcique (C3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte ;
- La température extérieure [35].

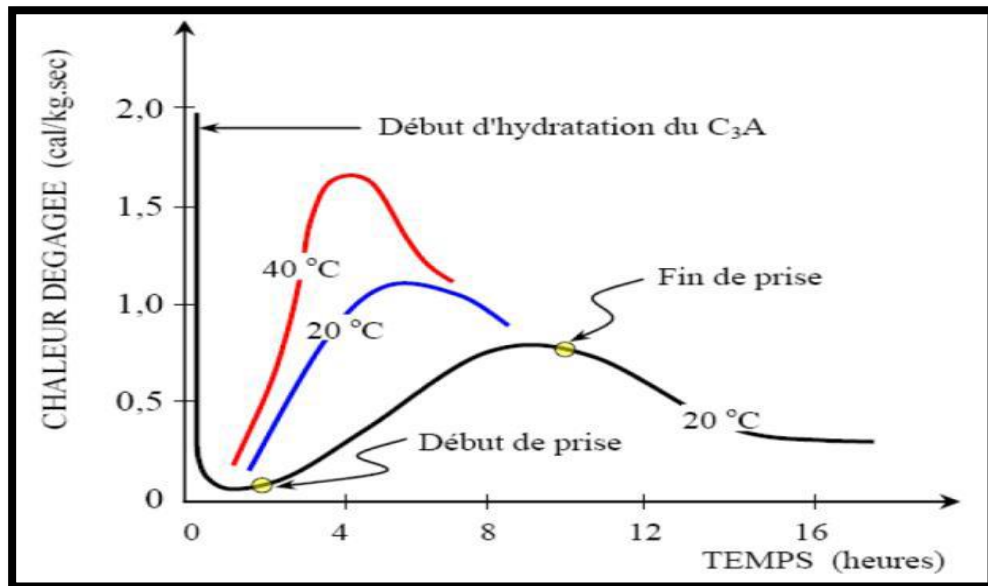


Figure. II.12: chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment.

II.7.1.5. Retrait

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de $4 \times 4 \text{ cm}^2$, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50% [35].

II.7.1.6. Gonflement

Bien que non normalisé, il est utile de rappeler que bien qu'il se rétracte dans l'air, le ciment augmente de volume lorsqu'il est immergé dans l'eau, ses variations dimensionnelles étant environ le 1/10e de celle constatées dans l'air [36].

II.7.1.7. Expansion

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie libre [36].

Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

II.7.1.8. Finesse de mouture (surface spécifique de Blaine)

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm²/g). Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm²/g. Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes, par contre plus le ciment est sensible et plus le retrait est important [35].

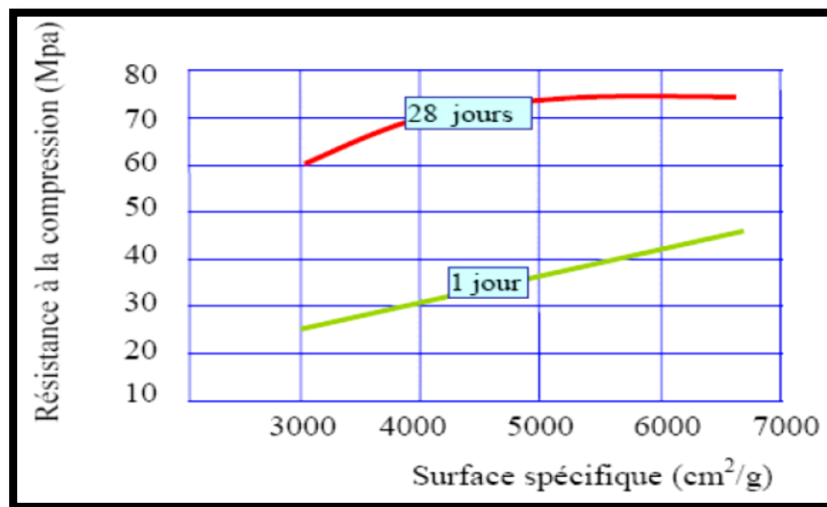


Figure. II.13: Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression.

II.7.2. Caractéristiques mécaniques

II.7.2.1. Résistance mécanique

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm (figure). La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa.

Le mortier utilisé est réalisé conformément à la norme EN 196-1. Le sable utilisé est un sable appelé: "sable normalisé".

Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales [37].

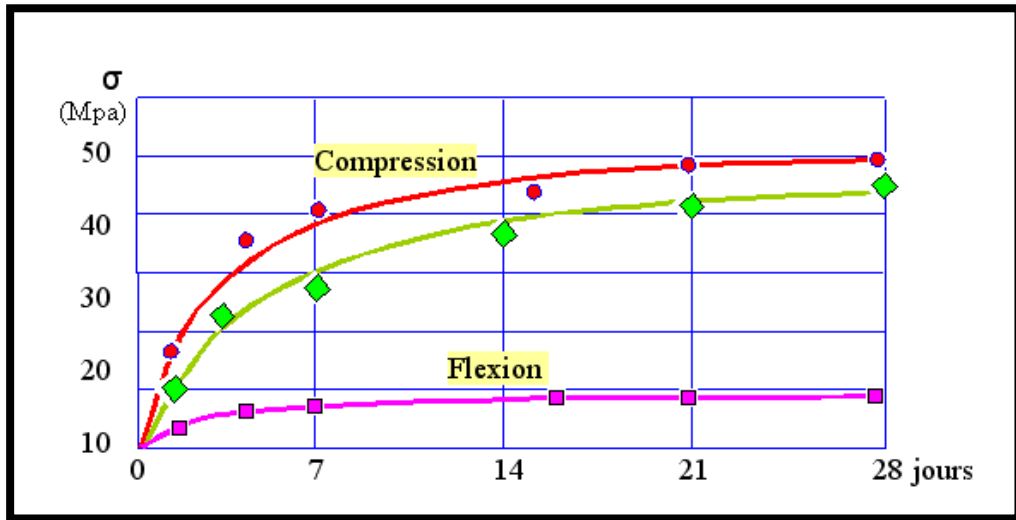


Figure. II.14: Résistance mécanique du mortier normale.

Chapitre III :
Matériels et méthodes

Dans cette partie, on va étudier les caractéristiques physiques et mécaniques du ciment portland fabriqué au niveau de la cimenterie d'ECDE de Chlef. Les essais physiques sont principalement réalisés sur le ciment (mesure de la finesse par tamisage alpine), sur la pâte c'est-à-dire: ciment plus eau (mesure de la consistance normalisée, du temps de prise et de la stabilité). Les essais mécaniques sont réalisés sur le mortier (résistances mécaniques à la compression et à la flexion).

III.1. Méthodes physiques

III.1.1. Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine

- **But:** Pour la détermination de la finesse du ciment ou bien le degré de broyage.
- **Principe:** La finesse du ciment est mesurée en observant le temps mis un volume fixé d'air pour traverser un lit de ciment compact à une porosité spécifique à 0.5.
- **Mode opératoire**

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé «Permeabilimètre de Blaine». Cet appareil est montré sur la figure III.1. Il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur ($n^{\circ}4$) d'une huile légère. La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure. Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini. Le principe de fonctionnement de cet appareil est schématisé sur la figure III.2.

Pour réaliser cette partie, il faut:

1. Une balance précise à 0,001g près.
2. Un chronomètre précis à 0,2 S près.
3. Du ciment de référence de surface massique (S_0) et de masse volumique (ρ_0) connues.
4. Des rondelles de papier filtrent adaptées au diamètre de la cellule.
5. Du mercure pour mesurer le volume V de la couche tassée.
6. Un thermomètre précis à 0,1 °C près pour mesurer la température de l'air ambiant.

En notant le temps écoulait t , la surface spécifique sera calculée par la formule suivante.

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

Avec :

S : surface spécifique (cm^2/g).

K : constante de l'appareil.

e : porosité de la couche tassée (0.5).

ρ : Masse volumique des grains.

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



Figure. III.1: Permeabilimètre de Blaine (ECDE).

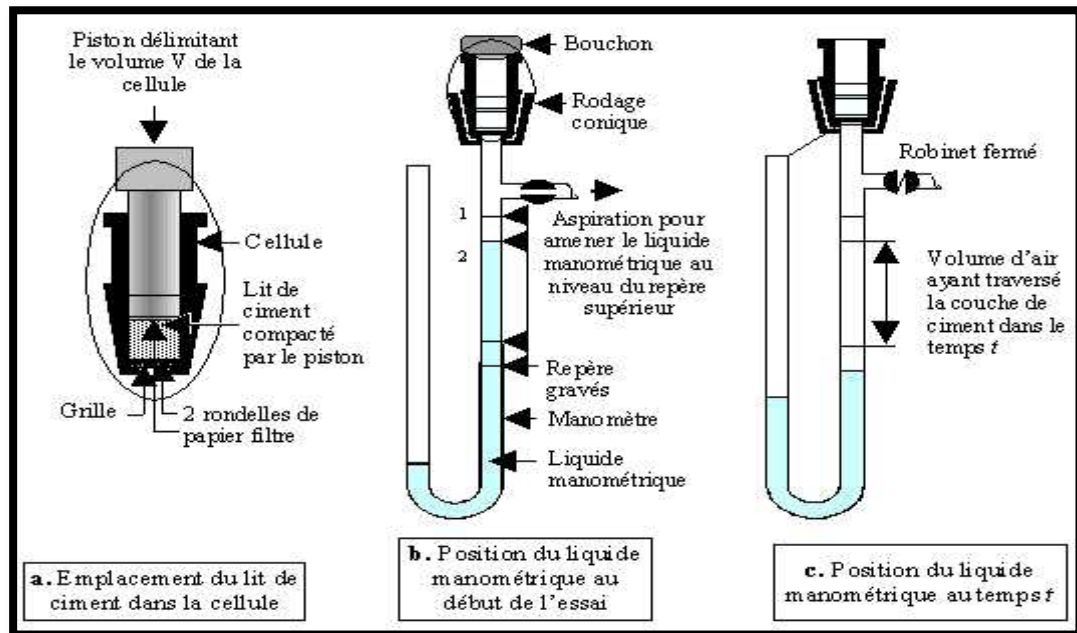


Figure. III.2: Principe de fonctionnement du permeabilimètre de Blaine.

III.1.2. Mesure de la densité

- **But :** On mesure la densité du ciment, pour déterminer le poids réel du ciment rempli dans les sacs. Si la densité est supérieure à 1 (densité > 1) donc le sac doit contenir plus que son poids réel de 50kg. Si la densité est inférieure à 1 (densité < 1) donc le sac doit contenir moins de 50 kg.
- **Mode Opérateur**
 1. Prendre le poids du pot métallique vide d'un dm^3 p_1
 2. Remplir le pot avec du ciment non tassé.
 3. Peser p_2 Densité = $p_2 - p_1$

III.1.3. Détermination du pourcentage des refus

- **But :** Elle a pour but de déterminer le pourcentage des refus le ciment après le broyage. Les refus sont déterminés pour contrôler l'état de fonctionnement du broyeur et le degré du broyage.
- **Mode Opérateur**
 1. Peser 100 g du ciment.
 2. Tamiser à l'aide d'un pinceau un sur un tamis de 45 μm puis sur un tamis de 90 μm .
 3. Les particules au-dessus du tamis représentant le pourcentage des refus.



Figure. III.3: Tamis de 90 μm et de 45 μm .

N.B. L'appareil Alpine donne automatiquement le pourcentage des refus.



Figure. III.4: L'appareil Alpine.

III.1.4. Consistance normale

III.1.4.1. Définition

La consistance normale caractérise la propriété rhéologique des pâtes. Elle est déterminée par la méthode décrite par la norme NFP.15.402 qui consiste à la détermination de la quantité d'eau qu'il faut ajouter à une quantité du ciment préalablement pesé pour obtenir une pâte du ciment dite normale.

III.1.4.2. Pâte normale

La Pâte normale est une pâte de consistance normale ; c'est-à-dire tel qu'en opérant avec l'appareil de Vicat, la lecture donnant l'épaisseur de la pâte restante entre l'extrémité de la sonde et le fond du moule quand celle – ci a cessé de s'enfoncer sous son propre poids est de $5 \text{ mm} \pm$.

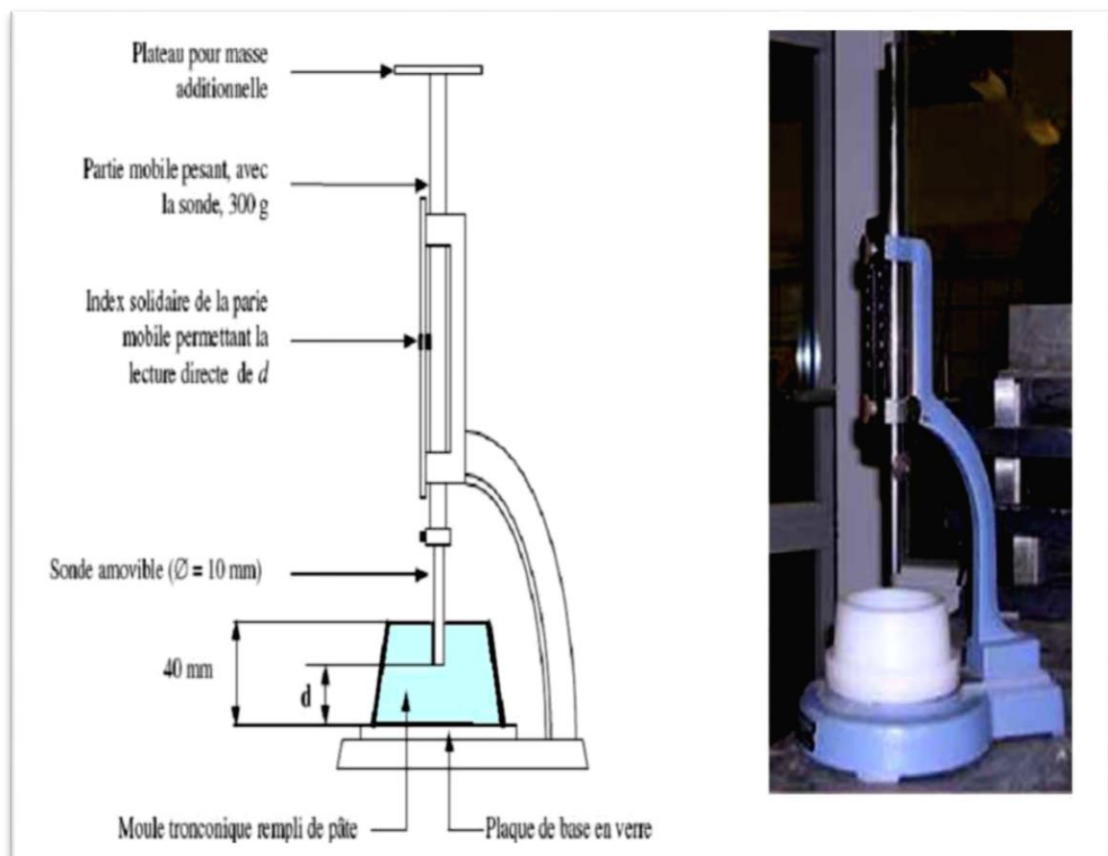


Figure. III.5: Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance.

III.1.4.3. Préparation de la pâte

Verser dans le récipient du malaxeur la quantité d'eau préalablement déterminée par des successifs de manière à réaliser la consistance normale. Lui ajouter 500g du ciment dans le moule tronconique.



Figure. III.6: Le malaxeur.

III.1.4.4. Vérification de la consistance normale

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.
- Laisser 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.

- Placer l'éprouvette dans l'armoire humide pour raison de déterminer les prises du ciment.

III.1.5. Essais de prise

- **But :** On utilise l'essai de prise pour déterminer le temps de prise, c'est-à-dire, le temps qui s'écoule entre l'instant où le liant a été mis en contact avec l'eau de gâchage et le début de prise et fin de prise.
- **Principe de l'essai :** On détermine le début de prise ou fin de prise à l'aide de l'aiguille de Vicat s'enfonçant dans un moule tronconique rempli de pâte.

N.B. Le laboratoire d'essais physiques de la cimenterie ECDE de Chlef dispose d'un équipement appelé « Prosimètre automatique multiposte » qui est montré sur la figure suivante.

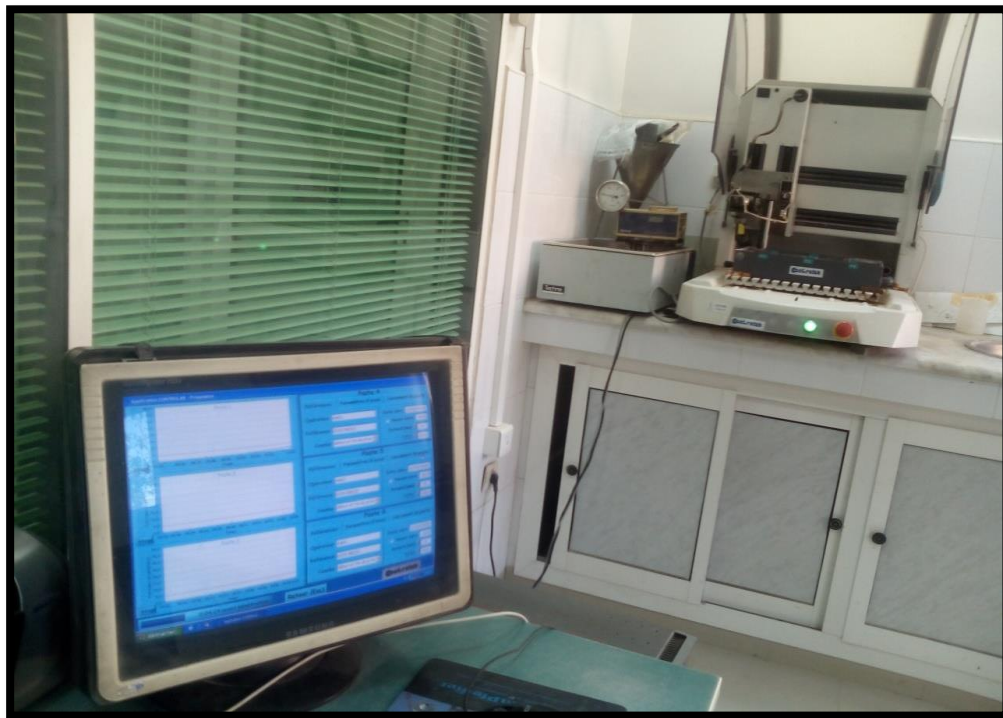


Figure. III.7: Prosimètre automatique multipostes.

III.1.5.1. Début de prise

Le début de prise est l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant du début de gâchage et celui où l'aiguille de Vicat s'arrête à une distance du fond du moule supérieur à $4 \text{ mm} \pm 1$.

III.1.5.2. Fin de prise

C'est la période qui sépare le début de gâchage de ciment jusqu'au moment où la sonde porte-aiguille ne s'enfonce plus la pâte.

NB: L'essai de prise est normalement effectué sur pâte normale, il est exécuté sur moule tronconique.

III.1.6. Essai d'expansion

- **Définition**

Elle comporte deux essais effectués sur des éprouvettes de pâte pure, cylindrique de 30 mm de diamètre et 30 mm de hauteur, conservées dans leurs moules constitués par une feuille de laiton (épaisseur 0.5 mm). Ces moules fendus selon une génératrice, comportant deux aiguilles longues de 15 cm (Aiguille Lechatelier) soudée de chaque côté de la fente.

La variation de l'écartement initiale de ces aiguilles renseignera sur la valeur du gonflement.

L'essai de déformation à chaud décèle la présence de chaux vive libre CaOL surcuit et de magnésie expansives (MgO).



Figure. III.8: Aiguille de Le châtelier

- **Mode opératoire**

1. Remplir le moule d'expansion par la pâte préparée.
2. Mettre sur plaque de verre et arroser la surface à l'aide d'une truelle.
3. Couvrir d'une plaque de verre.
4. Conserver les aiguilles dans l'armoire humide pendant une journée.
5. Après 24 heures, enlever les aiguilles de l'armoire humide, on marque l'écartement entre les deux aiguilles et les mettre dans un bain marie de température $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, pendant 3 heures.
6. Ensuite, mesurer après cette durée l'écart (pendant la confection du moule). La variation de l'écartement représente l'expansion à chaud.

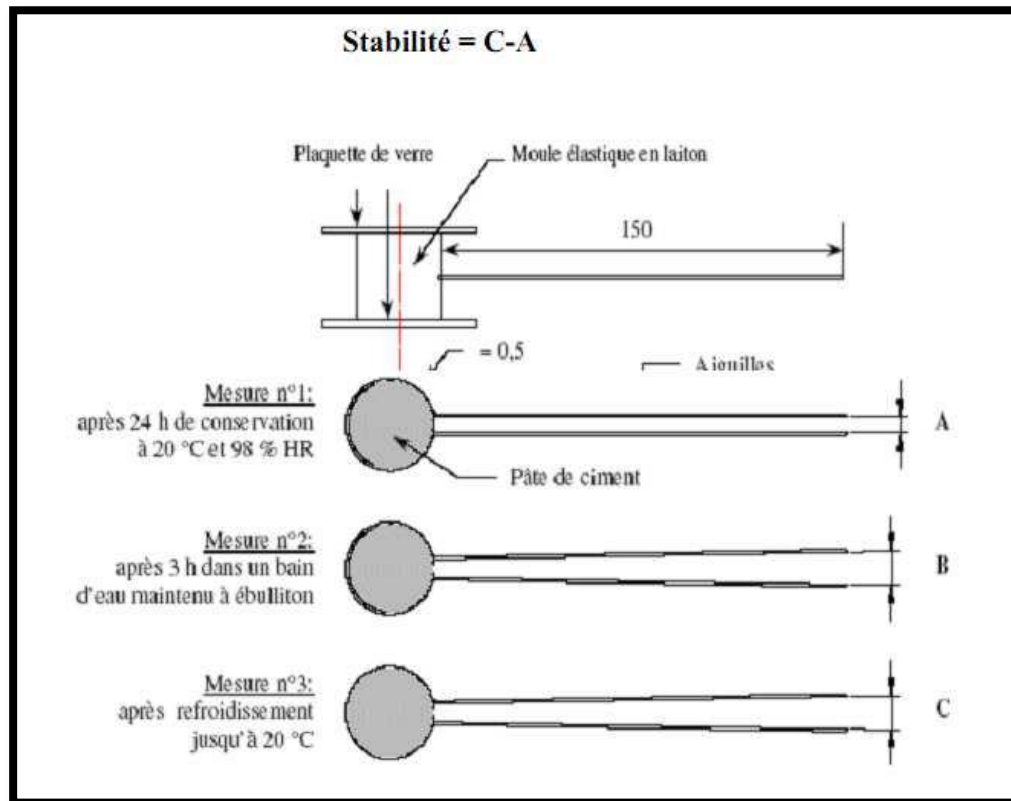


Figure. III.9: Essai de stabilité avec l'appareil de Le chatelier.

III.2. Essais mécaniques (flexion et compression)

- **But:** Ils ont pour but de mesurer les résistances aux différentes contraintes au bout d'un certain temps.

Les essais de flexion et de compression permettent de déterminer la contrainte de rupture à la traction par flexion et la compression des liants hydrauliques.

- **Préparation du mortier normal**

1. Le malaxeur étant en position de fonctionnement.
2. Verser 225 ml d'eau dans le récipient et ajouter 450 g du ciment.
3. Mettre le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant une minute dans les 30 dernières secondes puis introduire 1350 g de sable normalisé sec.

CHAPITRE III: MATÉRIELS ET MÉTHODES

4. Mettre le malaxeur à la vitesse rapide pendant 30 secondes puis arrêter le mouvement pendant 90 secondes, reprendre le mélange pendant 2 mn à la vitesse rapide.
5. Ensuite, verser le mélange dans le moule à l'aide d'une spatule, et peut être bien tassé, après un doublé de choc en utilisant l'appareil à choc. Le mortier est mis dans la chambre humide à température $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ et 90% d'humidité.
6. Après 24 heures, faire le démoulage et conserver les éprouvettes dans le bain d'eau : une éprouvette pour 2 jours, 1 éprouvette pour 7 jours et 1 éprouvette pour 28 jours.



Figure.III.10: Moules pour moulage des éprouvettes de mortier.



Figure. III.11: Chambre humide.

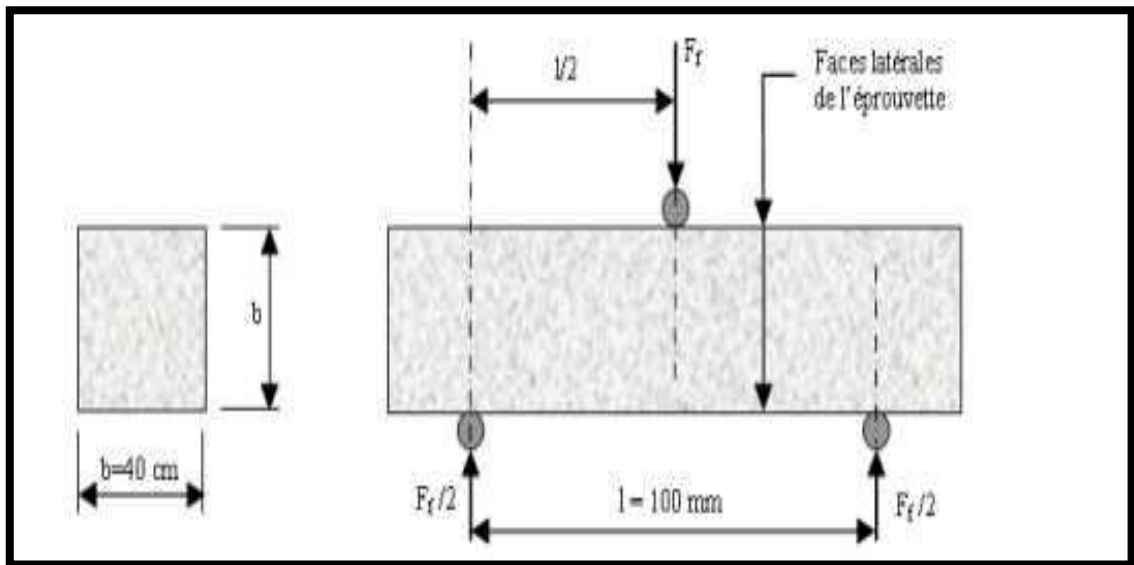


Figure. III.12: Dispositif pour l'essai de résistance à la traction par flexion.

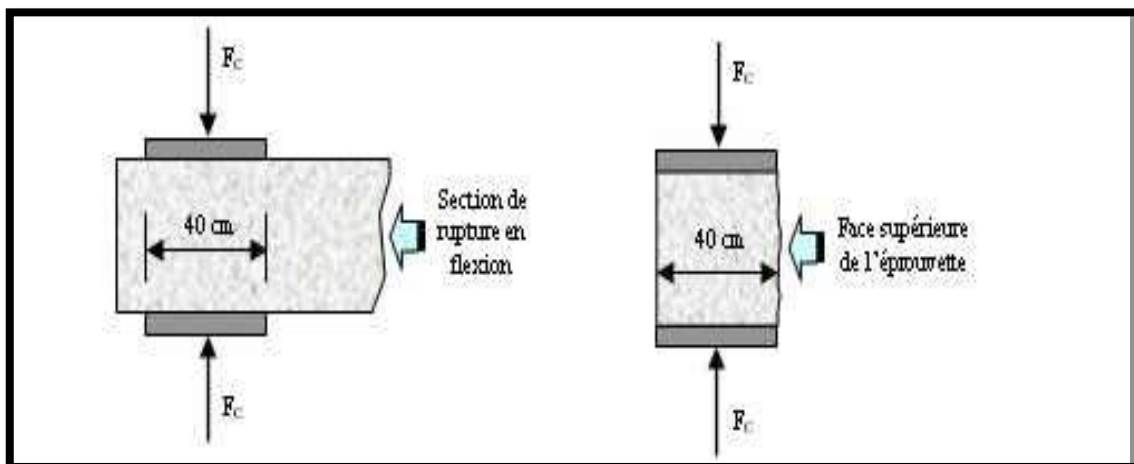


Figure. III.13: Dispositif de rupture en compression.

Chapitre IV:
Résultats et discussions

Ce chapitre résume les résultats des différentes analyses effectuées sur les trois échantillons du ciment dans le laboratoire des essais physiques de la cimenterie d'ECDE de Chlef pour étudier les caractéristiques physiques et mécaniques du ciment fabriqué au sein de cette entreprise.

IV.1. Identification des échantillons

Le ciment qu'on a obtenu, on le sépare en trois échantillons selon la granulométrie autrement dit, la surface spécifique du Blaine qui a une relation avec le temps de broyage.

Tableau IV. 1: Identification des échantillons

| Echantillon | 1 | 2 | 3 | Norme |
|----------------------------|------|------|------|--------|
| La SSB (m ² /g) | 1941 | 2828 | 3320 | ≥ 2000 |

Le tableau IV.1 nous présente la surface spécifique du Blaine (SSB) des différents échantillons préparés.

La SSB du ciment varie en fonction du temps de broyage parce qu'il influe sur la finesse du clinker et de refus, elle est très élevée dans le troisième cas parce que le ciment est finement broyé autrement dit, le vide entre les grains est presque nul, c'est pourquoi le passage de l'air est difficile et prend beaucoup du temps.

IV.2.Préparation du mortier

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques du ciment et notamment la résistance à la compression. Ce mortier a été réalisé conformément à la norme EN 196-1. C'est le mélange d'élément sec (1350 g de sable normalisé et 450 g de ciment) avec un rapport E/C = 0.5.

N.B: L'eau de gâchage est une eau potable de robinet de la région d'Oued sly.

IV.3. Analyses physiques et mécaniques

IV.3.1. Caractéristiques physiques du ciment

IV.3.1.1. Consistance normale du ciment

L'évaluation de la consistance normale du ciment préparé est donnée dans le tableau suivant.

Tableau IV.2: Evolution de la consistance normale du ciment préparé.

| Echantillon | 1 | 2 | 3 |
|-----------------|------|------|------|
| Consistance (%) | 26.4 | 26.3 | 28.4 |

Le tableau IV.2 ci-dessus présente la consistance normale du ciment préparé. On constate une augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale par rapport le ciment témoin. Pour expliquer cette augmentation, on peut dire que la demande en eau croît proportionnellement avec l'augmentation de la finesse de mouture du liant qui contribue à une augmentation de la consistance de la pâte du ciment. Cela est dû au fait que la surface de mouillage du liant augmente au fur et à mesure que le ciment est broyé plus finement.

IV.3.1.2. Temps de Prise

Pour ce paramètre, les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant:

Tableau IV. 3 : Temps de prise du ciment préparé.

| Echantillon | 1 | 2 | 3 |
|-----------------------------|-----|-----|-----|
| Début de prise (min) à 4 mm | 125 | 112 | 143 |
| Fin de prise (min) à 4cm | 269 | 239 | 278 |

Le tableau IV.3 ci-dessus présente l'ensemble des résultats obtenus lors de la mesure du temps de prise du ciment préparé.

On remarque que les temps de début et de fin de prise augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la SSB. Cela s'explique par le fait que la réaction chimique est retardée à court terme. Ce qui veut dire aussi que la cinétique d'hydratation du liant devient de plus en plus lente en fonction de l'augmentation de la quantité du ciment hydraté. Par conséquent les cristaux de CSH (élément responsable du phénomène de durcissement de la pâte) existent uniquement en faible quantité aux très jeunes âges.

IV.3.1.3. Stabilité du ciment

Pour étudier la stabilité du ciment fabriqué ; l'expansion a été déterminée et les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau IV.4 : Résultats de l'expansion.

| Echantillon | 1 | 2 | 3 | Norme |
|----------------|-----|-----|-----|-------|
| Expansion (mm) | 0.5 | 1.5 | 0.5 | < 10 |

Les résultats obtenus montrent que les ciments sont stables. En effet, les trois échantillons étudiés présentent une faible expansion (inférieure à la limite maximale imposée par la norme EN 196-3 qui est de 10 mm) qui n'a pas donc un effet significatif sur la stabilité du ciment.

L'expansion a une relation opposée avec la SSB, parce que la pâte n'est pas compatible pour les petits grains.

IV.3.2. Caractérisation mécaniques du ciment

IV.3.2.1. Résistance à la Compression et à la flexion

L'évolution des résistances normales à la compression et la flexion est donnée dans le tableau IV.5.

Tableau IV.5: Evolution de la résistance normale à la compression et à la flexion des 3 types d'échantillons étudiés.

| | 2 jours | | | 7 jours | | | 28 jours | | |
|-------------------------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|----------|---|---|
| Echantillon | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Flexion (MPa) | 3.81 | 5.82 | 3.81 | 5.82 | 5.74 | 6.19 | / | | |
| Compression(MPa) | 19.88 | 20.27 | 19.89 | 37.36 | 39.31 | 40.29 | / | | |
| Normes | ≥10 | | | | | | ≤62,5 | | |

Les résultats des essais mécaniques réalisés sur les éprouvettes de mortier testées aux différents âges de durcissement (2, 7 et 28 jours) sont rapportés dans le tableau IV.5.

On remarque que l'accroissement des résistances en fonction de l'âge de durcissement est pratiquement identique pour tous les échantillons testés. Alors que pour le même âge de

CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

durcissement on constate que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du SSB. Le meilleur échantillon est le troisième, parce qu'il a la plus forte résistance.

La résistance normale du troisième échantillon est très élevée parce que son type de clinker est bien broyé et a un bon temps du début de prise et une bonne résistance normale.

Alors la surface spécifique du Blaine a une influence sur la résistance normale d'où ; plus qu'elle est élevée plus que la résistance est optimale. Ainsi que le broyage est un facteur principal dans cet essai car plus que le temps de broyage est suffisant plus que la surface spécifique du Blaine est bonne (élevée).

La classe de résistance d'un ciment exprime la résistance minimale qu'il développe après 28 jours sur prismes du mortier normalisé.

NB : Les résultats d'évolution de la résistance normale à la compression et la flexion de 28 jours et quelques autres résultats ne sont pas effectués à cause de confinement.

Conclusion

Conclusion

Ce travail qui s'inscrit dans le cadre du projet de fin d'études m'a permis d'appliquer les connaissances théoriques que j'ai acquises durant mon cursus universitaire, de contacter le domaine industriel et de se comporter comme étant un future cadre capable de prendre des décisions, de convaincre l'autre et de défendre ces choix. Ce stage m'a permis aussi de choisir mon sujet de fin d'étude, de définir les démarches à suivre et de réaliser des essais de caractérisation du ciment, sans oublier bien sûr d'établir des contacts humains.

Le ciment est le matériau le plus utilisé dans la vie quotidienne, cependant son emploi exige des contraintes de sécurité, de fiabilité et surtout de qualité.

La fabrication du ciment nécessite une grande surveillance et un contrôle permanent, afin d'obtenir un produit avec les spécifications voulues.

Dans ce contexte s'est inscrit le but de mon projet de fin d'étude. Il consiste à étudier les caractéristiques physiques et mécaniques du ciment à partir des analyses sur le produit fini.

Au terme de ce travail, plusieurs conclusions peuvent être retenues:

1. Les dimensions des grains de clinker (petites, moyennes ou bien grandes), ont une influence sur la surface spécifique du ciment préparé. Pour cette raison on dit que la résistance des granulats du ciment est variable.
2. L'expansion a une relation opposée avec la SSB, parce que la pâte n'est pas compatible pour les petits grains.
3. Le temps de début de prise illustre le délai de mise en œuvre avant durcissement de la pâte du ciment.
4. La conformité à l'exigence de stabilité confirme que la pâte du ciment n'est pas sujette à expansion.
5. La classe de résistance d'un ciment exprime la résistance minimale qu'il développe après 28 jours sur prismes de mortier normalisé.

Références bibliographiques

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] :GHERMAOUI. A. "Effets de certains métaux sur les propriétés physico des mortiers de ciment de Béni-Saf sans ou avec ajout de pouzzolane". Université de Tlemcen : Mémoire de MASTER, 2015.
- [2] : Documents de l'entreprise.
- [3] : <http://www.ecde-chlef.dz/contact>.
- [4] : www.svt.ac-versailles.fr
- [5] : www.ens-prof.ac-dijon.fr.
- [6] : Groupe Industriel des Ciments d'Algérie : Historique de la production du secteur public de ciment, <http://gica.dz/>
- [7] : <http://www.ciment.wikibis.com>
- [8] : J.M.Auvray, "Elaboration et caractérisation à haute température de bétons réfractaire à based'alumine Spinelle" thèse de doctorat, université de Limoges Science et technologie de santé 2003.
- [9] : http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_deux.html.
- [10] :Bourezeg Abd Elkrim. « Conception et réalisation d'un appareil Vicat».Université Mohamed Boudiaf - M'sila.Mémoire de master.2015.
- [11] :BENGUEDOUAR Afeff ;« Synthèse et caractérisation de silicates de calcium hydrates (C.S.H) hybrides », Mémoire Magister en chimie, Université de YAOUNDE I ,2013.
- [12] :Jacquese André Hertig, étude d'impacte sur l'environnement, page 173, 174 ,176, édition 2006.
- [13] :Professeur Camille Defossé, chimie du ciment valorisation des déchets en cimenterie (Université Libre de Bruxelles Faculté des Sciences Appliquées Laboratoire de Chimie industrielle), édition 2004.
- [14] :Le Centre d'information sur l'eau Paris France;
<http://www.cieau.com/toutpubl/sommaire/texte/4/contenu/423.htm>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[15] : J. Beauchamp; Mécanique des roches et des sols; Cours en ligne; Université de Picardie Jules Verne; <http://www.u-picardie.fr/~beaucham/eadaa/mecasol.htm>;septembre 2003.

[16] : Le site web : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Gypse>.

[17] :Rio Tinto Alcan «Navire d'déchargeant de l'aluminium». Colombie Britannique.

[18] :Mohammed Aminé Benhadda, en vu de l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'état en chimie industrielle sur La durabilité du mortier à base de ciment de Béni-Saf vis-à-vis de milieux basiques NaOH et H₄OH, en Génie des procédés, Université Abou- Bakr Belkaïd, page 2-13, 2011/2012.

[19] :Pablo Picasso. Dossiers rallye, N°5, France, 11 novembre 2004.

[20] : PAILLERE, A. M. (1982) Les adjuvants. Chapitre 4 de l'ouvrage "le Bétonhydraulique" (Baron, Sauterey). Presse de l'ENPPC pp 99- 113.

[21] :Amina Sidi Aïssa,Leila Sidi Yakoub en vue de l'obtention du Diplôme DEUA en chimie industrielle sur l'Optimisation du taux des incuits pour la fabrication de ciment CPJ CEM I A/42,5 ,Département de chimie, Université Abou-Bakr Belkaïd, 2007/2008, P.4.

[22] : Kaid N; « Contribution à l'étude des caractéristiques physico-chimiques des mortiers pouzzolaniques », Mémoire de Magistère en Génie civil, USTMB d'Oran, Algérie, 2000.

[23] : Mr. BESSENOUCI Mohammed Zakaria ;« Impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolaniques dans l'habitat », Mémoire de magister en physique, Université ABOU BAKR BELKAID Tlemcen, 2009/2010.

[24] :Mouna BOUHIDEL épouse MEKAHLI ; « Application d'analyse du cycle de vie (ACV) pour un développement durable : cas des cimenteries algériennes», Mémoire de Magister en HYGIENE et sécurité industrielle, Université EL-HADJ LAKHDAR BATNNA, 2009.

[25] :« Supplementary cementing materials » Gouvermment of Canada Plan 2000 on climate changes. 2005.

[26] :GEORGES DREUX : «Nouveau guide du béton » Edition Eyrolles, 1981.

[27] :H.F.W. Taylor, "Cement chemistry", 2nd edition, University of Aberdeen, 2007.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[28] : NF EN 197-1 (P15-101-1): Ciment-partie1 : composition, spécifications et critères de conformité de ciment courants.

[29] :YAHIA Mohamed. « Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie(ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment ».Université Mohamed Boudiaf - M'sila. Mémoire de master.2015.

[30] :Ben inak Chouaib Amine, « processus de fabrication du ciment, et gestion des poussières » ; Mémoire fin étude, Université Badji Mokhtar Annaba, 2014.

[31] : GHOMARI. F. "Science des matériaux de construction". Cour en ligne, site Web - Université de Tlemcen, 2006.

[32] :Mohammed Rafiq KADRI ; Soumia ROUIGUEB et Hadjer Abir CHIKH. « Contribution à la réduction des émissions de CO2 et de la consommation énergétique dans l'industrie cimentaire par l'amélioration d'un système de production : Cas de la cimenterie de Béni-Saf ».Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen. Mémoire de master.2017.

[33] :MOUMENE SARA et ATHAMNIA GHANIA. « Ciment et cimenterie en Algérie : production et normalisation».Universite de Guelma. Mémoire de master.2013.

[34] : BENHADDA. A. MALTI. O. BENTIFOUR. M. "La société des ciments de Beni Saf (SCIBS)". Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen: Rapport de stage, 2017.

[35] :RACHI LEILA et DENDANI MOHAMED AMINE. «Influence des différents granulométries des agrégats sur le comportement mécaniques du béton ordinaire ».Université de M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES. Mémoire de master. 2017.

[36] : Chanvillard.G et Laplante.P. « Viser une résistance à court terme pour tenir les délais de fabrication : les bétons bases et donnés pour leur formulation ». 1997.

[37] :Neville.A.M : propriété des bétons traduit par le CRIB, Ed. Eyrolles, 1998.