

FACULTE : THECNOLOGIE

DEPARTEMENT : Génie Civil

N° : .....



FILIERE : Génie civil

OPTION : MATERIAUX

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master

Par: AZZOUT Zakaria

**Influence des ajouts minéraux sur le  
durcissement des matériaux cimentaires**  
**Etude bibliographique**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Pr. BIBI Mekki

Université M'sila .

Président

Dr CHIKOUCHE M<sup>ed</sup> AZIZ

Université M'sila .

Rapporteur

Dr. SILINE Mohammed

Université M'sila .

Examineur

**Année universitaire : 2021 / 2022**

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : THECNOLOGIE  
DEPARTEMENT : Génie Civil



FILIERE : Génie civil  
OPTION : MATERIAUX

N° :.....

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master

Par: AZZOUT Zakaria

**Influence des ajouts minéraux sur le  
durcissement des matériaux cimentaires**  
**Etude bibliographique**

**Soutenu devant le jury composé de:**

|                       |                     |            |
|-----------------------|---------------------|------------|
| Pr. BIBI Mekki        | Université M'sila . | Président  |
| Dr CHIKOUCHE Med AZIZ | Université M'sila . | Rapporteur |
| Dr. SILINE Mohammed   | Université M'sila . | Examineur  |

**Année universitaire : 2021 / 2022**

# **REMERCIEMENT**

**Merci et louanges à Dieu Tout-Puissant pour mon succès dans l'accomplissement de ce travail. Louange à Dieu pour ses bénédictions.**

**J'exprime mes sincères remerciements et ma gratitude au Dr CHIKOUCHE MOHAMED AZIZ pour ses grands efforts qu'il m'a apporté.**

**Je remercie également tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.**



# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

**A mes chers parents:**

Que dieu les protège les protège, pour leurs soutiens, sacrifices, et pour leur inépuisable amour.

**A mon oncle le professeur ALLOUTI ACHOUR**

qui ma encouragé et m'aider et motivé pour terminer le  
MASTER

**A ma sœurs et mon frère :**

Que dieu vous garde, vous protégez comble de bonheur et de réussite. Soyons toujours unis.

Spéciale dédicace pour **SABRINA LOUGHRAIEB** qui ma encourage , m'a soutenu et m'a donné la motivation pour réaliser et terminer ce travail .

**À toute ma famille**

**A tous mes amis**

Pour leurs encouragements, et pour les moments inoubliables que nous avons passés ensemble.

A tous ceux qui, par leurs contributions actives et bénévoles, nous ont aidé de près ou de loin à réaliser de ce travail.

# SOMMAIRE

| Titre  | Page |
|--|------|
| Remerciements.....                               |      |
| Dédicaces .....                                  |      |
| Sommaire.....                                    |      |
| Listes des figures.....                          | VII  |
| Liste des tableaux.....                          | IX   |
| ملخص .....                                       | X    |
| Résumé .....                                     | XI   |
| Abstract .....                                   | XII  |
| INRODUCTION.....                                 | 2    |
| <b>CHAPITRE I : Les ciments</b>                  |      |
| I.1.Introduction .....                           | 5    |
| I.2.Définition .....                             | 5    |
| I.3.Historique .....                             | 5    |
| I.4. Les constituants du ciment .....            | 6    |
| I.4.1.Le Clinker .....                           | 6    |
| I.4.2.Le gypse .....                             | 7    |
| I.5.Fabrication du ciment .....                  | 7    |
| I.5.1.Fabrication par voie humide .....          | 8    |
| I.5.2.Fabrication par voie semi humide .....     | 8    |
| I.5.3.Fabrication par voie sèche .....           | 8    |
| I.5.4.Fabrication par voie semi sèche .....      | 8    |
| I.6. Etapes de fabrications du ciment .....      | 10   |
| I.6.1.Extraction et concassage .....             | 10   |
| I.6.2.Préparation brute .....                    | 10   |
| I.6.3. La cuisson .....                          | 10   |
| I.6.4. Le Broyage .....                          | 10   |
| I.7. Catégories et types de ciment .....         | 10   |
| <b>CHAPITRE II : Les ajouts cimentaires</b>      |      |
| II.1. Définition .....                           | 13   |
| II.2.Classification des ajouts cimentaires ..... | 13   |
| II.2.1. Laitier des hauts fourneaux .....        | 14   |
| II.2.1.1. Définition .....                       | 14   |
| II.2.1.2. Historique .....                       | 15   |
| II.2.1.3. Effets avantageux .....                | 15   |
| II.2.2. Cendres volantes .....                   | 17   |
| II.2.2.1. Définition .....                       | 17   |
| II.2.2.2. Historique .....                       | 18   |
| II.2.2.3. Effets avantageux .....                | 18   |
| II.2.3. Fumée de silice .....                    | 20   |
| II.2.3.1. Définition .....                       | 20   |
| II.2.3.2. Historique .....                       | 21   |
| II.2.3.3. Effets avantageux .....                | 21   |

|  |    |
|--|----|
| II.2.4. Les argiles calcinées :                            | 23 |
| II.2.4.1. Définition .....                                 | 23 |
| II.2.4.2. Historique .....                                 | 24 |
| II.2.4.3. Effets avantageux.....                           | 25 |
| II.2.5. La pouzzolane                                      | 27 |
| II.2.5.1. Définition .....                                 | 27 |
| II.2.5.2. Historique .....                                 | 29 |
| II.2.5.3. Effets avantageux .....                          | 29 |
| II.2.6. Le verre finement broyé                            | 31 |
| II.2.6.1. Définition .....                                 | 31 |
| II.2.6.2. Historique .....                                 | 31 |
| II.2.6.3. Effets avantageux .....                          | 32 |
| II.2.7. La Balle de Riz                                    | 34 |
| II.2.7.1. Définition .....                                 | 34 |
| II.2.7.2. Effets avantageux.....                           | 35 |
| <b>CHAPITRE III : Durcissement des ciments</b>             |    |
| III.1. Définition du durcissement des ciments .....        | 38 |
| III.2. Théorie des réactions d'hydratation .....           | 39 |
| III.2.1. Définition de l'hydratation du ciment .....       | 39 |
| III.1.2. Théories des réactions d'hydratation : .....      | 40 |
| III.1.2.1.La théorie cristalloïde .....                    | 40 |
| III.1.2.2.La théorie colloïdale .....                      | 40 |
| III.1.2.3. La théorie mixte .....                          | 42 |
| III.3. Mécanisme de durcissement .....                     | 43 |
| III.3.1. Hydratation des silicates .....                   | 43 |
| III.3.1.1 Hydratation du silicate tricalcique $C_3S$ ..... | 43 |
| III.3.1.2 Hydratation du silicate bi calcique $C_2S$ ..... | 43 |
| III.3.2. Hydratation des aluminates : .....                | 45 |
| III.4. Produits affectant l'hydratation du ciment .....    | 46 |
| III.4.1. Les adjuvants accélérateurs .....                 | 46 |
| III.4.2. Effet du carbonate de calcium : .....             | 47 |
| III.4.3. Retardateurs de durcissement : .....              | 48 |
| III.5. Rôle des ajouts dans le mécanisme : .....           | 49 |
| III.5.1. Laitier des hauts fourneaux : .....               | 49 |
| III.5.2. Cendres volantes : .....                          | 52 |
| III.5.3. Fumée de silice : .....                           | 56 |
| III.5.4. Les argiles calcinées : .....                     | 59 |
| III.5.5. La pouzzolane : .....                             | 63 |
| III.5.6. Le verre finement broyé : .....                   | 65 |
| III.5.7. La balle de riz : .....                           | 68 |
| <b>CONCLUSION</b> .....                                    | 71 |
| <b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....                                 | 73 |

# Liste Des Figure

| Titre   | Page |
|---|------|
| <b>CHAPITRE I : Les ciments</b>   |      |
| Figure I.1. Le ciment .....   | 5    |
| Figure I.2. Composition chimique du clinker.....  | 7    |
| Figure I.3. Le gypse dans les milieux salins .....  | 7    |
| Figure I.4.Principe de production du ciment .....   | 9    |
| <b>CHAPITRE II : Les ajouts cimentaires</b>   |      |
| Figure II-1. Laitier de haut fourneau .....   | 15   |
| Figure II – 2- Variations de la résistance à la compression en fonction du temps et de la température de durcissement sous différents taux de remplacement du laitier.<br>a) Conditions de durcissement normales. b) condition de température de durcissement élevée. | 16   |
| Figure II-3- Développement de la résistance à la compression du mortier SC et PC.   | 17   |
| Figure II-4- Résistance à la compression à températures élevées.....  | 17   |
| Figure II-5-Cendres volantes .....  | 17   |
| Figure II–6-Valeurs moyennes de largeur de microfissure (Wc)des bétons analysés.  | 19   |
| Figure II–7-Impact de la finesse (a) et de la perte au feu (b) de cendre sur la demande en eau du mélange de cendres volantes de ciment (70 % OPC et 30 % CV).....  | 20   |
| Figure II–8-Principe de production de la fumée de silice .....  | 21   |
| Figure II–9-chaaleur cumulé et énergie thermique étudiées des pâtes .....   | 22   |
| Figure II-10-DRX des pâtes étudiées des pâtes .....   | 22   |
| Figure II –11 .Effets de la fumée de silice dans l'ITZ .....  | 23   |
| Figure II-12-Esquisse de la feuille octaédrique .....   | 24   |
| Figure II-13-Esquisse de la feuille tétraédrique .....  | 24   |
| Figure II-14- Courbe thermique différentielle de la kaolinite .....   | 25   |
| Figure II- 15- Viscosité des différents mortiers .....  | 26   |
| Figure II- 16- Résultats de la résistance à la compression .....  | 26   |
| Figure II- 17- Indice d'activité des différentes montmorillonites .....   | 27   |
| Figure II- 18- La pouzzolane naturelle .....  | 28   |
| Figure II-19-Les déférentes types de pouzzolanes .....  | 28   |
| Figure II- 20- Effet de la pouzzolane naturelle sur la consistance .....  | 30   |
| Figure II- 21- Effet de la pouzzolane naturelle sur le temps de prise .....   | 30   |
| Figure II- 22- Courbes d'écoulement des pâtes .....   | 30   |
| Figure II - 23 -Evolution de la viscosité des pâtes .....   | 30   |
| Figure II-24-Variation de l'activité pouzzolanique de la zéolithe X .....   | 31   |
| Figure II-25- Influence du dosage en PV sur la résistance à la compression (à gauche) et à la flexion (en droite) .....   | 33   |
| Figure II-26- Effet de la poudre de verre sur la résistance à la compression du béton   | 34   |
| Figure II-27-Composition d'un grain de riz .....  | 34   |
| Figure II-28- Courbes de flux de chaleur spécifiques des mélanges étudiés.....  | 36   |
| <b>CHAPITRE III : Durcissement des ciments</b>  |      |
| Figure III.1. Prise de ciment .....   | 38   |
| Figure III.2. Représentation schématique de l'hydratation du ciment .....   | 39   |
| Figure III.3. Principaux constituants de la pâte de ciment hydraté .....  | 42   |
| Figure III.4. Hydratation du grain de ciment. ....  | 43   |
| Figure III.5. C-S-H externe cristallisé par précipitation .....   | 43   |

|   |    |
|---|----|
| Figure III.6. Évolution du dégagement de chaleur et de la conductivité électrique lors de l'hydratation d'une pâte de $C_3S$ .....        | 44 |
| Figure III.7. Composition d'une pâte constituée de $C_3A$ et de gypse en présence de chlorure de calcium à différents temps.....          | 47 |
| Figure III.8. Vitesse de dégagement de chaleur pendant l'hydratation du $C_3S$ avec différents ajouts de $CaCO_3$ .....                   | 48 |
| Figure III.9. Effet de la dextrine soluble sur la courbe de flux de chaleur de l'hydratation du ciment.....                               | 49 |
| Figure III.10. Chaleur d'hydratation des liants à 25°C, 45°C, et 60°C, de haut en bas respectivement.....                                 | 51 |
| Figure III.11. Taux de dégagement de chaleur mesurés par un calorimètre isotherme   | 52 |
| Figure III.12. La chaleur d'hydratation cumulées en 72 heures.....  | 53 |
| Figure III.13. DRX des pâtes durcies.....   | 54 |
| Figure III.14. Le volume des différentes phases en fonction du temps calculé par modélisation thermodynamique .....                       | 55 |
| Figure III.15. Flux de chaleur des liant fumée de silice/ciment.....  | 56 |
| Figure III.16. Résistance à la compression des mortiers avec fumée de silice.....   | 57 |
| Figure III.17. Courbes DTG en fonction du temps de durcissement de SF10.....  | 57 |
| Figure III.18. DRX à 28 jours des pâtes étudiées.....   | 58 |
| Figure III.19. Diagrammes DRX pour les trois mélanges à 90 jours d'hydratation....  | 59 |
| Figure III.20. Diagrammes DRX des ciment à 25% d'illite à 2,7, 28 et 90 jours.....  | 60 |
| Figure III.21. Résistances à la compression des mortiers témoins et à NCMC à (a) 28 jours et (b) 90 jours .....                           | 61 |
| Figure III.22. Diagramme DRX des mortiers NCMC à 5 % exposés à différentes températures à 28 jours : (a) 25°C ; (b) 250°C; (C) 900°C..... | 62 |
| Figure III.23. Résistances à la compression des mortiers à cendre volcanique .....  | 63 |
| Figure III.24. Diagrammes DRX des pâtes, a) 100PC, b) 70PC-30NP .....   | 64 |
| Figure III.25. Degré de réaction d'hydratation du ciment et ciment à VGP.....   | 65 |
| Figure III.26. Résistance à la compression du béton en fonction du GP et de l'âge....   | 66 |
| Figure III.27. Images du mélange 50GP50CH montrant la formation de rebords autour des particules de verre.....                            | 67 |
| Figure III.28. Diagrammes DRX d'échantillons avec RHA : (a) RHA-1 ; (b) RHA-2; (c) RHA-3; (d) RHA-4 .....                                 | 68 |
| Figure III.29. Teneur en CH des pâtes de mélange minéral à différents âges.....   | 69 |

# LISTE DES TABLEAUX

| Titre   | Page |
|---|------|
| <b>CHAPITRE I : Les ciments</b>   |      |
| I.1. Liste des différents types de ciments courants normalisés .....  | 11   |
| <b>CHAPITRE II : Les ajouts cimentaires</b>   |      |
| Tableau II-1. Classification des ajouts selon leur réactivité. ....   | 13   |
| Tableau II-2- Propriétés à l'état frais et durcie des bétons. ....  | 35   |
| Tableau II-3- Perte de masse à l'abrasion à 28 et 91 jours .....  | 35   |
| <b>CHAPITRE III : Durcissement des ciments</b>  |      |
| Tableau III.1. Degré d'hydratation (%) et poids absolu (g/100 g anhydre) entre<br>parenthèses des différentes phases de clinker déterminées. .... | 52   |
| Tableau III.2. Pourcentage de portlandite calculé selon la DTG .....  | 58   |

# ملخص

عند دراسة الأوضاع البيئية وخصوصاً حصيلة غازات الاحتباس الحراري ، تكون مصانع الأسمنت في مقدمة المعنيين. بمساعدة الباحثين، تحاول هذه الصناعة دائماً تحسين هذا الوضع. وبالفعل يتم إحراز تقدم وإنجازات لا حصر لها للحد من الأضرار البيئية. لتقليل استهلاك المواد الطبيعية، يتم استخدام بدائل الكلنكر أو الأسمنت بشكل متزايد.

الهدف من مشروعنا هو دراسة آثار بعض الإضافات مثل خبث الأفران العالية، ودخان السليكا، وما إلى ذلك، على آليات تصلب المواد الإسمنتية. إما بتحسين النشاط البوزولاني أو الطاقة الهيدروليكية أو حتى تأثير الحشو ، فإن كل إضافة تطبع تأثيرها على تفاعل الإماهة.

كلمات مفتاحية: الاسمنت - الإماهة- التصلب- الإضافات الاسمنتية.

# Résumé

Les usines cimentaires sont toujours pointées du doigt lorsque les bilans des gaz à effet de serre sont révélés. Avec l'aide des scientifiques, cette industrie tente toujours d'améliorer cette situation. D'innombrables progrès sont réalisés afin de réduire l'atteinte à l'environnement. Pour minimiser la consommation des produits naturels, des substitutions de clinker ou de ciment sont de plus en plus exploitées.

L'objectif de notre projet consiste dans l'étude des effets des ajouts minéraux tels que le laitier, la fumée de silice, etc, sur les mécanismes de durcissement des matériaux cimentaires. Que ce soit l'amélioration de l'activité pouzzolanique, le pouvoir hydraulique ou l'effet filler, chaque ajout imprime, son effet sur la réaction d'hydratation.

Mots clés : Ciment – hydratation – durcissement- ajouts cimentaires.

# Abstract

Cement plants are always singled out when the greenhouse gas balance sheets are revealed. With the help of scientists, this industry is constantly trying improving this situation. Countless progress is being achieved to reduce environmental damage. To reduce the consumption of natural products, substitutions of clinker or cement, are increasingly used.

The objective of our study is to examine the effects of mineral additions such as slag, silica fume, etc., on the mechanisms of hardening of cementitious materials. Either the improvement of the pozzolanic activity, the hydraulic power or the filler effect, each addition print, its effect on the hydration reaction.

Keywords: Cement- hydration – hardening- supplementary cementitious materials

# **Introduction générale**

# Introduction générale

Les matériaux de construction ont un rôle important à jouer dans cette ère moderne de la technologie. Bien que leur utilisation la plus importante soit dans les activités de construction, aucun domaine de l'ingénierie n'est concevable sans leur utilisation. De plus, l'industrie des matériaux de construction est un contributeur important à l'économie, car sa production régit à la fois le rythme et la qualité des travaux de construction.

Les premiers ciments ont été produits par les Grecs et les Romains, qui ont découvert que la cendre volcanique, finement broyée et mélangée à de la chaux et de l'eau, produisait un mortier durci, résistant aux intempéries. Passant par d'énormes progrès, aujourd'hui le ciment est le matériau le plus utilisé au monde.

Afin de réduire l'impact environnemental résultant de la fabrication du ciment, des ajouts de toutes sortes ont vu le jour. En améliorant le caractère pouzzolanique des matériaux cimentaires ou augmentant le pouvoir hydraulique du ciment ces ajouts, comme le laitier de hauts fourneaux, la fumée de silice, le calcaire, etc, sont devenus incontournables.

Les ajouts font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques des matériaux cimentaires. D'autre part leurs utilisations ont pour objectif de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

L'utilisation croissante de ces matériaux respectueux de l'environnement s'explique par les nombreux avantages, comme une maniabilité accrue et une meilleure consolidation, une amélioration des résistances à la flexion et à la compression, une amélioration de la pompabilité, une meilleure résistance aux chlorures et aux sulfates, des températures inférieures pour le béton de masse, de faibles réactions silico-alcalines, et une diminution de la perméabilité.

Lors de l'hydratation du ciment un ensemble de changements se produisent. Les réactions chimiques sont généralement plus complexes que de simples conversions de composés anhydres en hydrates correspondants. En ajoutant de l'eau, les différents minéraux cimentaires commencent leurs réactions. Ils se lient, s'enchevêtrent, certaines phases disparaissent pour que d'autres apparaissent. Cette chimie de silicates et d'aluminates, est accentuée par la présence des ajouts, des granulats, des conditions climatiques, l'eau de gachage, etc.

## **Objectif de l'étude :**

Le but de cette étude est l'étude et la compréhension des rôles que les ajouts cimentaires jouent dans le déclenchement du durcissement des produits cimentaires.

### **Présentation du mémoire :**

Cette mémoire<sup>13</sup> comporte trois parties avec une introduction générale et une conclusion.

\*Le premier chapitre est dédié à la connaissance du produit dit « ciment » à travers le savoir les représentations étapes de fabrication, ainsi que les différents types de ciments.

\*Le deuxième chapitre relate sur les différents ajouts cimentaires utilisés dans le monde comme le laitier, la pouzzolane, le verre broyé, etc, et leurs effets sur le comportement des matériaux cimentaires.

\*Le troisième chapitre est consacré à la compréhension des mécanismes du durcissement des ciments et ces minéraux, en étudiant les différents mécanismes.



# **CHAPITRE I**

# **LES CIMENTS**

# Chapitre I : Les Ciments

---

## I.1.Introduction

Le ciment est un liant hydraulique (durci par l'action de l'eau) utilisé dans la fabrication du béton et est le plus couramment utilisé aujourd'hui dans la fabrication de chaussées, de blocs de béton, d'enduits et de mortiers.

Le terme « ciment Portland » a été oublié depuis la fin des années 1970 et remplacé par les termes « CPA » (ciment Portland artificiel) et « CPJ » (ciment Portland composite). Celles-ci ont été supprimées en raison du passage aux normes européennes, mais encore trouvé dans certains pays.

Le ciment est désormais classé sous l'appellation « CEM » selon sa teneur en clinker et autres composants (chaux, fumée de silice, pouzzolane, laitier de haut fourneau, etc.), suivis de chiffres romains et de lettres majuscules de I à V...

## I.2.Définition

Le ciment (figure I.1) est un liant hydraulique ou une substance inorganique finement broyée qui forme une pâte lorsqu'elle est mélangée à de l'eau. Elle durcit par un processus d'hydratation.

Le ciment est composé de petites particules individuelles de matériaux différents, mais il doit avoir une composition statistiquement homogène. Le haut degré d'uniformité de toutes les propriétés du ciment est atteint par des processus de production de masse continue, en particulier des processus de broyage et d'homogénéisation appropriés.

Le procédé de fabrication du ciment et sa maîtrise doivent garantir que la composition des ciments est maintenue entre les limites fixées dans la norme « NF EN 197-1 ».



Figure I.1. Le ciment

## I.3.Historique

La fabrication des cendres à l'aide d'un four est plus ancienne que l'art de la poterie. Les sols en terrazzo combinés à la chaux ont été découverts lors des constructions céramiques néolithiques (vers 9000 à 8000 avant JC) Les mortiers seront ensuite améliorés par les civilisations ultérieures en ajoutant de la chaux à l'argile.

Les Grecs utilisaient le plâtre et la chaux, principalement dans la production d'enduits et de mortiers. Les Romains ont en effet généralisé l'utilisation de la chaux comme mortier.

# Chapitre I : Les Ciments

---

Ils le renforcèrent avec des briques ou de la cendre pouzzolanique selon une recette donnée par Vitruve.

L'ajout de pouzzolanes (Scories volcaniques exploitées autour du Vésuve), dans un mortier humide avec de l'eau de mer, lui confère une résistance élevée suite à une réaction impliquant de l'aluminium volcanique qui stabilise le complexe de silicate de calcium hydraté, avant de durcir le mortier de carbonatation, notamment contre les agressions de la mer, comme dans la baie de Naples, où la maçonnerie a plus de 2 000 ans.

Jusqu'à l'époque moderne, le mortier était constitué d'un mélange de chaux, de tuiles ajoutées ou de briques concassées, d'argile aux propriétés hydrauliques. De plus, Pozzolane (Terre volcanique de Pouzzoles, dans la région de Naples, en Italie) est également largement utilisé.

En 1796, sur l'île de Sheppey, en Angleterre, James Parker découvrait le ciment rapide. Cette chaux hydraulique ou ciment rapide naturel est produite comme la chaux naturelle commune à 900°C.

Le ciment n'a pris son importance actuelle qu'au XIXe siècle, lorsque Louis Vicat a identifié le phénomène de la chaux hydraulique en 1817. L'étude de l'hydraulicité de la chaux a commencé à la fin du XVIIIe siècle et a conduit à la production du ciment moderne vers 1840.

En 1824, le Britannique Joseph Aspdin fait breveter la production de chaux hydraulique à durcissement rapide. Appelé commercialement "ciment Portland" car la couleur de son produit ressemblait aux fameuses pierres de la carrière de la péninsule "Portland".

La première cimenterie est fondée en 1846 par DuPont et Demar de Boulogne-sur-Mer (Ciments français).

Le développement n'a pu être réalisé qu'avec l'avènement de nouveaux appareils tels que les fours rotatifs et les broyeurs à boulets.

Le processus de fabrication ne cesse de s'améliorer, réduisant le temps nécessaire pour produire une tonne de clinker, la matière première de base du ciment, de 40 heures en 1870 à environ trois minutes aujourd'hui.

## **I.4. Les constituants du ciment**

Le ciment est formé par mélange et broyage de constituants principaux et d'autres secondaires. Il est généralement dit composé de: clinker et de gypse.

### **I.4.1.Le Clinker**

Le clinker Portland est le principal composant hydraulique du ciment courant. Il est obtenu par calcination (1450°C) d'un mélange de matières premières composé d'environ 80% de calcaire et 20% d'argile (farine brute ou pâte) contenant des éléments couramment désignés comme oxydes de CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de petites quantités d'autres matériaux. La farine brute ou la pâte est finement répartie et intimement mélangée et donc homogène.

# Chapitre I : Les Ciments

Le clinker (Figure I.2) est un matériau hydraulique qui doit être constitué d'au moins deux tiers de sa masse de silicates de calcium ( $3\text{CaO},\text{SiO}_2: \text{C}_3\text{S}$  et  $2\text{CaO},\text{SiO}_2: \text{C}_2\text{S}$ ), le reste étant constitué de phases contenant de l'aluminium et du fer :  $\text{C}_3\text{A}$  et  $\text{C}_4\text{AF}$  et de la chaux libre.

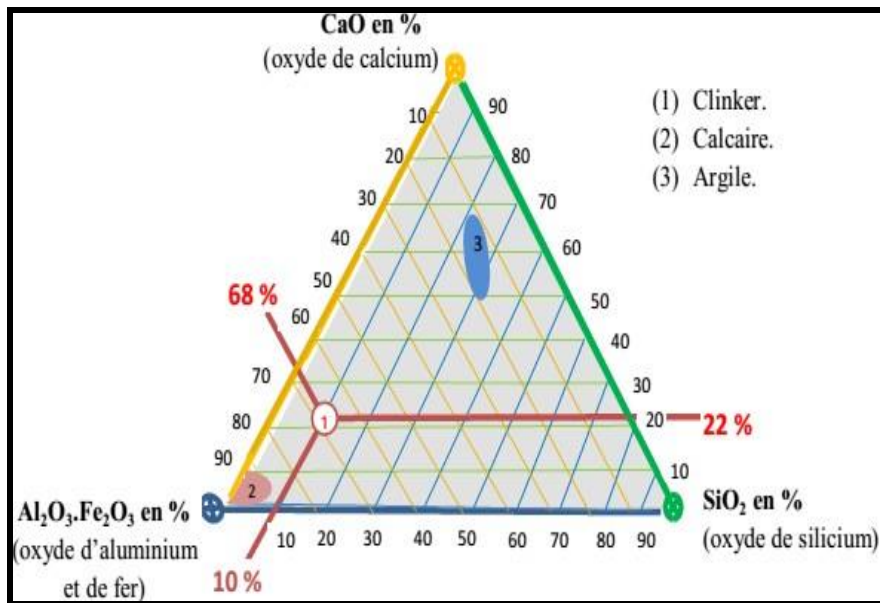


Figure I.2. Composition chimique du clinker.

## I.4.2. Le gypse

Le gypse (Figure I.3), dont la formule est  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , une densité de 2,31 à 2,33 et une dureté de 1,5 à 2, se présente sous forme de masses compactes et granuleuses telles que le gypse d'albâtre et le gypse de sucre, ainsi que sous forme de cristaux.

C'est le sulfate de calcium qui permet de réguler la prise et notamment le contrôle de l'hydratation des aluminates tricalciques ; En effet, en présence d'eau et de sulfate de calcium, le  $\text{C}_3\text{A}$  est recouvert d'une fine couche plus ou moins perméable. L'ettringite empêche ainsi une hydratation supplémentaire de  $\text{C}_3\text{A}$ . Lors d'un broyage avec du clinker et à une température de 100°C à 150°C, le gypse se déshydrate partiellement pour former de l'hémi hydraté ou gypse. La plupart des experts admettent que l'hémi hydraté serait la cause de la mauvaise prise du ciment.



Figure I.3. Le gypse dans les milieux salins

# Chapitre I : Les Ciments

---

## I.5.Fabrication du ciment

La composition de base des ciments est le mélange de silicats et d'aluminates de calcium. Ces deux composants sont fournis respectivement par l'argile et le calcaire. Ces matières premières (figure I.4) sont extraites des carrières proches du site de production puis portés à haute température dans un four à calcination 1450 °C [1].

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment :

- \*Fabrication par voie humide.
- \*Fabrication par voie semi humide.
- \*Fabrication par voie sèche.
- \*Fabrication par voie semi sèche.

### I.5.1.Fabrication par voie humide

Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont broyés finement et mélangés avec l'eau de façon à constituer une pâte assez liquide.

La pâte est ensuite entreposée dans de grands bassins de volumes de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et homogénéisée. Ce mélange est appelé le « cru ». Des analyses chimiques permanentes permettent de contrôler la composition de cette pâte et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson.

La pâte est ensuite acheminée à l'entrée d'un four rotatif, chauffé à son extrémité par une flamme intérieure. Ce four rotatif légèrement incliné est constitué d'un cylindre d'acier dont la longueur peut atteindre deux cents mètres. On distingue à l'intérieur du four plusieurs zones, dont les trois principales sont :

- \*La zone de séchage
- \*La zone de décarbonatation
- \*La zone de clinkérisation.

### I.5.2.Fabrication par voie semi humide

Cette méthode est une variante du procédé par voie humide. La pâte est essorée par des filtres presses, boudinée, décarbonatée, avant d'être cuite dans les fours.

### I.5.3.Fabrication par voie sèche

Après avoir été finement broyée, les matières premières sous forme de poudre sont transportées depuis le silo d'homogénéisation jusqu'au four, soit par pompe, aérogليسeur (lit fluidisé) puis par aérolift ou élévateur.

Les fours sont constitués de deux parties : Le préchauffage et le four lui-même.

### I.5.4.Fabrication par voie semi sèche

La poudre est agglomérée avec de l'eau pour former des granulats. Ces granulats passent sur une grille de décarnisation. Dans cette voie ; l'utilisation des fours droites est requise.

# Chapitre I : Les Ciments

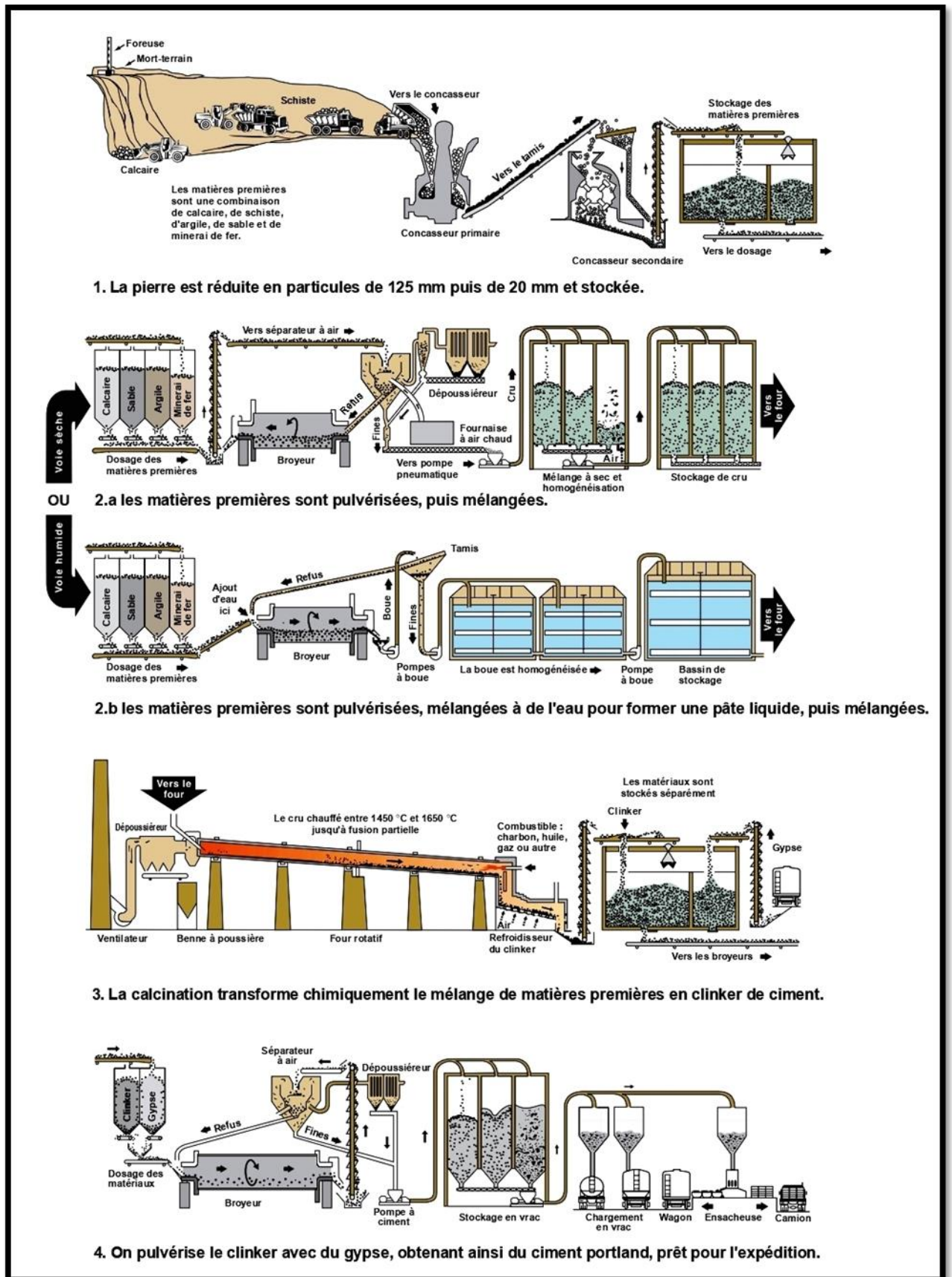


Figure I.4.Principe de production du ciment

# Chapitre I : Les Ciments

---

## I.6. Etapes de fabrications du ciment

### I.6.1.Extraction et concassage

Le calcaire est extrait dans des carrières qui doivent être à proximité de la cimenterie. L'argile plus molle est extraite et transportée à la cimenterie par des moyens de transport tels que de gros camions. Le broyage sur le site minier réduit la taille des particules du matériau, réduisant ainsi la taille de l'argile.

### I.6.2.Préparation brute

Le mélange de calcaire et d'argile est malaxé pour obtenir un mélange homogène. La quantité de chaque élément est déterminée par sa composition chimique, souvent autour de 80 % de calcaire et 20% d'argile. Le mélange est broyé en une poudre d'une granulométrie inférieure à 200  $\mu\text{m}$ . Jusqu'à ce que la poudre résultante soit homogénéisée.

### I.6.3. La cuisson

La combustion transforme la matière première en clinker (granulés de 0,5 à 4 cm). Elle est réalisée dans des fours rotatifs à une température maximale d'environ 1450 °C. A la sortie du four, le clinker est refroidi rapidement (de 50 à 250 °C) pour éviter une cristallisation excessive

### I.6.4. Le Broyage

Le clinker est mélangé à du gypse et parfois à des ajouts cimentaires (laitier, pouzzolane, calcaire, etc.) et broyer en une poudre fine de granulométrie inférieure à 80  $\mu\text{m}$ . C'est ainsi que nous obtenons du ciment Portland.

## I.7. Catégories et types de ciment

Avec l'introduction des ajouts cimentaires, différents types de ciment sont exploités. La pâte de ciment Portland est fabriquée à partir de clinker broyé à l'aide de cendres volantes. Le ciment métallurgique (également appelé ciment de haut fourneau) est un mélange de clinker broyé et de laitier de haut fourneau. Le ciment composite est fabriqué à partir de clinker, de cendres volantes et de laitier de haut fourneau. Enfin, des ciments spéciaux présentant une excellente résistance aux sulfates ou une teneur en alcali limitée sont utilisés dans la fabrication du béton, en particulier dans des conditions de fonctionnement difficiles.

Avant l'organisation des appellations par la norme 197-1, les ciments étaient :

***Le Ciment Portland Artificiel*** : Obtenu par cuisson jusqu'à ramollissement d'un mélange intime de carbonate de chaux, de silice et d'alumine.

***Le Ciment Artificiel à Haute Résistance*** : Il se caractérise par une finesse de mouture plus grande. Il présente un durcissement plus rapide et permet d'effectuer l'opération de décoffrage plus tôt et donne en plus une résistance à la compression supérieure à celle obtenue par le CPA.

***Le ciment Alumineux ou Ciment FONDU*** : Est obtenu par fusion d'un mélange de bauxite et de calcaire. C'est un ciment à prise lente mais son durcissement est très rapide.

# Chapitre I : Les Ciments

**Ciment Laitier ou Ciment métallurgique** : Ces ciments sont obtenus par mélange du laitier provenant des hauts fourneaux avec le CPA. Ils sont utilisés pour les travaux des fondations et pour les ouvrages en contact avec l'eau.

Suite à l'apparition de la norme NF EN 197-1 (tableau I.1), les ciments sont 27 courants regroupés en cinq types selon leur composition :

**Ciment Portland pur (CEM I)** : Il contient au moins 95% de clinker et au plus 5% de constituants secondaires.

**Ciment Portland composé (CEM II)/A ou B** : Il contient au moins 65% de clinker et au plus 35% d'autres constituants : laitier de haut fourneau, fumée de silice, pouzzolane, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires.

**Ciment de haut fourneau (CEM III) A ou B** : S'il contient entre 36 et 80% de laitier et 20 à 64% de clinker. CEM III/C, s'il contient au moins 81% de laitier et 5 à 19% de clinker.

**Ciment pouzzolanique (CEM IV) / A ou B** : Il contient 45 à 89% de clinker et 11 à 55% de pouzzolanes.

**Ciment composé (CEM V) / A ou B** : Il contient 20 à 64% de clinker, 18 à 49% de laitier et 18 à 49% de cendres volantes ou de pouzzolanes.

Les ciments blancs à faible teneur en oxydes de fer (et donc pauvres en phase  $C_4AF$ ) ne constituent pas une catégorie à part entière mais rentrent dans la catégorie CEM I ou CEM II.

Tableau I.1. Liste des différents types de ciments courants normalisés

| Désignations                   | Notation  | Clinker |
|--------------------------------|-----------|---------|
| <b>Ciment Portland</b>         | CEM I     | 95-100  |
| <b>Ciment Portland Composé</b> | CEM II/A  | 80-94   |
|                                | CEMII/B   | 65-79   |
| <b>Ciment de hautFourneau</b>  | CEM III/A | 35-64   |
|                                | CEM III/B | 20-34   |
|                                | CEM III/C | 5-19    |
| <b>Ciment Pouzzolanique</b>    | CEM IV/A  | 65-90   |
|                                | CEM IV/B  | 45-64   |
| <b>Ciment composé</b>          | CEMV/A    | 40-64   |
|                                | CEMV/B    | 20-39   |



# **CHAPITRE II**

## **LES AJOUTS CIMENTAIRES**

# Chapitre II : les ajouts cimentaires

## II.1. Définition

Les ajouts sont des matières premières naturelles, artificielle ou sous-produits d'une autre industrie, ils peuvent être des résidus industriels ou des déchets industriels polluants. Ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, à la farine crue et même au clinker avant ou après le broyage.

Lorsqu'ils sont combinés au ciments (ciment portland au calcaire, ou aux ciments composites), ils améliorent les propriétés du béton par une activité hydraulique, pouzzolanique ou les deux. Les ajouts cimentaires donnent des bétons plus performants et plus durable que les bétons conventionnels. En plus, ils contribuent à la réduction des répercussions sur le climat mondial grâce à une diminution de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre. Ces matériaux contribuent grandement à la construction durable. L'utilisation des ciments avec ajouts cimentaires dans la fabrication du béton permet de réduire la consommation d'énergie et améliore l'efficacité et les performances des bâtiments.

L'utilisation croissante de ces matériaux respectueux de l'environnement peut s'expliquer par les nombreux avantages qu'elle procure, comme exemple une maniabilité accrue, une meilleure consolidation, une amélioration des résistances à la flexion et à la compression, une meilleure résistance aux chlorures et aux sulfates, des températures inférieures pour le béton de masse, de faibles réactions silico-alcalines, et une diminution de la perméabilité.

## II.2. Classification des ajouts cimentaires

Selon la norme NF EN 197-1 les ajouts minéraux sont inertes ou actifs [2] . Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau ci-dessous (Tableau II-1).

Tableau II-1. Classification des ajouts selon leur réactivité.

| Type               | Réactivité          | Matériau  |
|--------------------|---------------------|---|
| Hydraulique        | Fortement réactif   | Ciments spéciaux –chaux hydraulique   |
| Hydraulique Latent |                     | Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium (calciques)   |
| Pouzzolanique      | Fortement réactif   | Fumée de silice   |
|                    | Moyennement réactif | Cendres volantes pauvre en calcium, Pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, terres a diatomées |
|                    | Faiblement réactif  | Scories cristallines  |
| Inerte             | Non réactif         | Fillers (farine calcaire ....) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique           |

Les ajouts utilisés dans les bétons et les ciments en générale sont les suivants :

- 1- Les laitiers de haut fourneau
- 2- Les cendres volantes
- 3- Les fumées de silice
- 4- Les argiles calcinées
- 5- La pouzzolane .....

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

---

### II.2.1. Laitier des hauts fourneaux

#### II.2.1.1. Définition

Le laitier de haut fourneau est produit lors de la fabrication du fer dans un haut fourneau. Il résulte de la fusion d'un fondant calcaire avec des cendres de coke et des résidus siliceux et alumineux subsistant après la réduction et la séparation du fer du minerai (figure II-1).

Pour transformer le laitier en une forme convenant à une utilisation en tant que matériau cimentaire, l'une des deux techniques peut être employée, à savoir la granulation ou la pelletisation ; avec l'une ou l'autre technique, il est essentiel que le laitier soit rapidement refroidi pour former une structure désordonnée vitreuse.

Avec la granulation, le flux de scories fondues est forcé sur un déversoir dans des jets d'eau à haute pression. Cela provoque le refroidissement rapide du laitier en granulés vitreux ne dépassant pas environ 5 mm de diamètre. Dans la plupart des granulateurs modernes, la température de l'eau est maintenue en dessous d'environ 50°C et le rapport de laitier d'eau est normalement compris entre dix et vingt pour un. Le granulat est séché et broyé à la finesse du ciment dans un broyeur à clinker de ciment classique.

La pelletisation consiste à verser le laitier fondu sur un tambour rotatif en acier refroidi à l'eau d'environ 1 m de diamètre. Le tambour a des ailettes en saillie qui projettent le laitier dans l'air à l'intérieur d'un bâtiment où de l'eau est pulvérisée dessus, ce qui le refroidit rapidement. La granulation produit des matériaux d'environ 100 mm jusqu'à la poussière ; les plus grosses particules ont tendance à être de nature cristalline et ont peu ou pas de valeur cimentaire. Les particules supérieures à 6 mm environ sont donc tamisées et utilisées comme granulat léger dans le béton et seule la fraction la plus fine (< 6 mm) est utilisée pour la fabrication de laitier de hauts fourneaux proprement dit. La granulation est beaucoup plus efficace pour produire des matériaux à haute teneur en verre, mais les coûts d'investissement d'un granulateur sont environ six fois supérieurs à ceux d'un broyeur [3].

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

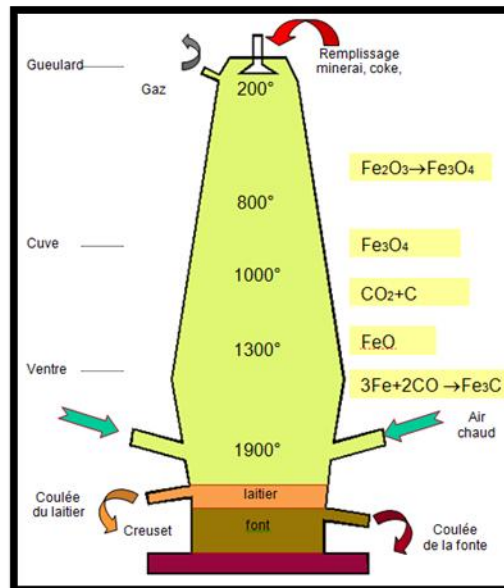


Figure II-1. Laitier de haut fourneau

### II.2.1.2. Historique

En 1818 Louis Vicat mentionnait une possibilité d'utiliser le laitier dans le ciment. En 1862, Emil Langen a découvert le potentiel hydraulique du laitier lors d'un mélange de laitier broyé et de la chaux. En 1882 commença la fabrication industrielle du ciment de laitier en Allemagne grâce à G. Prussing. Les ciments à laitier n'apparaissent que bien plus tard et vers 1928. Actuellement, un très grand nombre de cimenteries fabriquent des liants hydrauliques à différentes teneurs en laitier.

### II.2.1.3. Effets avantageux

Le ciment portland s'hydrate plus rapidement que le laitier surtout dans sa période initiale. Cette différence implique un développement de résistance moins rapide.

Dans les ciments à laitier on observe une dessiccation accrue, car le laitier retient un peu moins bien l'eau de gâchage que le portland. Mais chimiquement, il résiste à l'action destructrice des sulfates et la dissolution de la chaux par les eaux pures ou chargées de certains sels [4].

Dans le travail de Shumuye et al. (2021) ont étudiés l'effet de la température de durcissement (cure normale à 20°C et 95RH, cure avec augmentation de la température aux 7èmes jours à 45°C) sur les propriétés du béton de ciment de laitier (30, 50 et 70%). Ils démontrés que la résistance à la compression à 7 jours dans la condition de température de durcissement élevée pour les groupes de béton a augmenté, par rapport à la condition de durcissement normal. Ce résultat encourage l'utilisation du ciment de laitier dans les régions à climat chaud car une perte considérable de la résistance à la compression ultime est peu probable. Cependant, à 28 et 56 jours, les variations de résistance à la compression sont devenues négatives par rapport au groupe de béton témoin pour les deux conditions de cure [5].

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

Les résultats de ces tests démontrent qu'un durcissement à température élevée peut entraîner un développement de résistance précoce élevé avantageux, mais un développement de résistance à long terme désavantageux (figure II-2) .

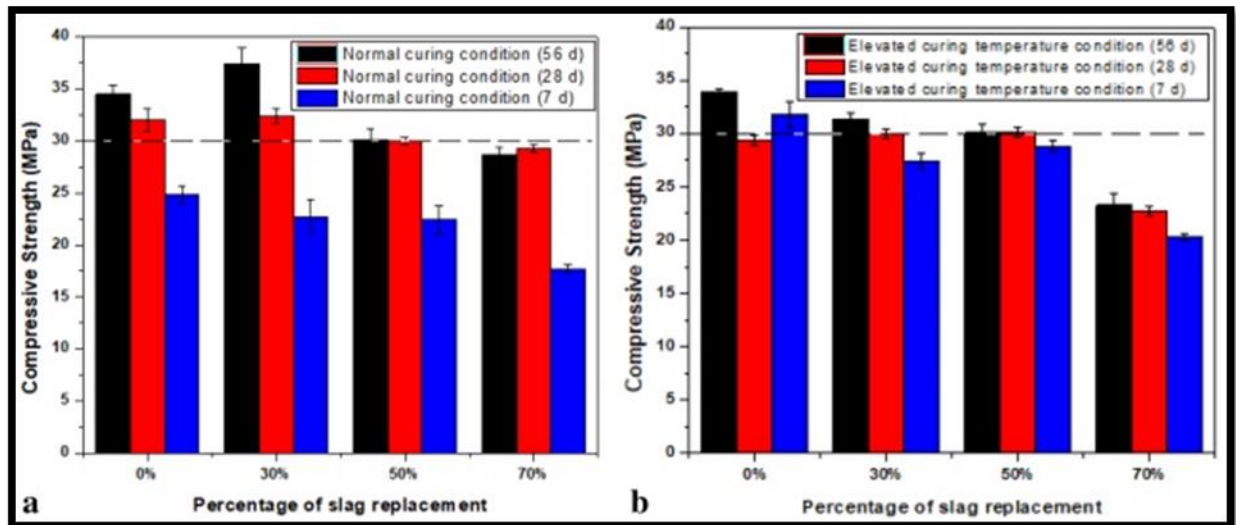


Figure II – 2- Variations de la résistance à la compression en fonction du temps et de la température de durcissement sous différents taux de remplacement du laitier.

a) Conditions de durcissement normales. b) condition de température de durcissement élevée.

Saafan et al. (2021), ils ont mesuré la résistance à la compression pour des spécimens de mortier avec CEM III/A 42.5 N (SC) et CEM I 42.5 N (PC) à différents âges jusqu'à 210 jours (figure II-3). Ils constataient que les mortiers SC avaient une résistance légèrement inférieure à celle des mortiers PC jusqu'à 7 jours. A partir du 28<sup>ème</sup> jours l'augmentation de la résistance s'inversait, la résistance à la compression des mortiers SC était plus élevée à des âges plus avancés. On peut conclure que l'utilisation du SC est plus optimisée lorsqu'il est utilisé dans des mélanges de béton à haute résistance conçus pour une résistance caractéristique de 90 jours. Le gain de résistance dû à la formation de CSH est lié à la réduction continue de la taille des pores et à la consommation de cristaux d'hydroxyde de calcium (CH) qui affectent négativement la liaison entre la pâte de ciment et les granulats[6].

Même avec une exposition à 200, 400, 600°C pendant 2 heures des mortiers âgés de 28 jours, la résistance à la compression des mortiers SC est supérieure au PC (figure II-4). A 400 ° C la diminution s'explique par la déshydratation du CH en oxyde de calcium provoquant le rétrécissement et la fissuration de la pâte. Une désintégration supplémentaire se produit lorsque l'oxyde de calcium se réhydrate.

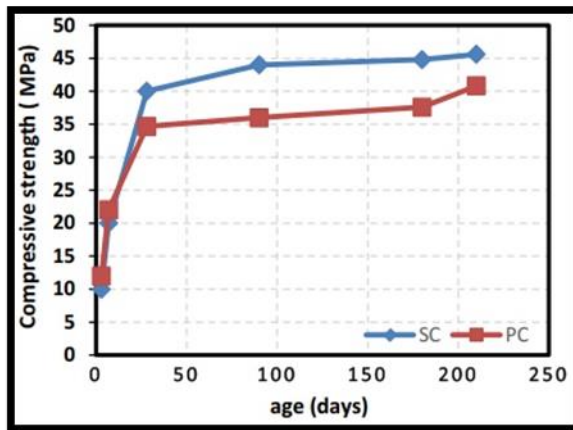


Figure II-3- Développement de la résistance à la compression du mortier SC et PC.

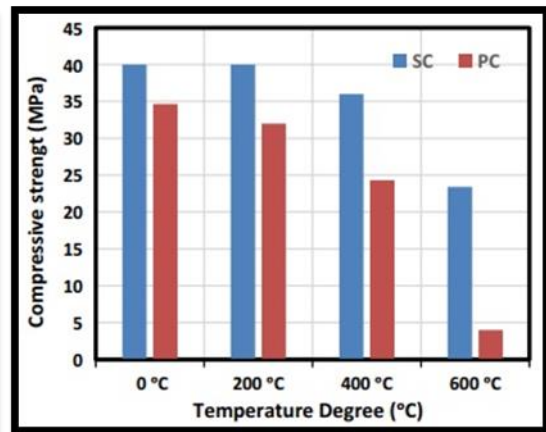


Figure II-4- Résistance à la compression à températures élevées.

### II.2.2. Cendres volantes

#### II.2.2.1. Définition

Les cendres volantes (figure II-5) sont obtenues standard des dépoussiérages électrostatiques ou mécaniques de particules pulvérulentes provenant du courant des gaz de chaudière, alimentées au charbon pulvérisé, pour la création d'électricité dans les centrales thermiques. Afin de réduire la contamination atmosphérique, les cheminées de ces centrales sont équipées de dépoussiéreurs qui captent les cendres pour éviter leur scattering dans l'atmosphère. Le temps nécessaire au processus de burning du charbon, à la combinaison, au transport des gaz vers les filtres et à la résolidification des particules est de l'ordre de quelques secondes.



FigureII-5-Cendres volantes

Les cendres sont stockées de trois façons :

#### ✓ Cendres sèches :

Captées à la base des cheminées, les cendres sont totalement exemptes d'eau. Ces cendres sèches demandent un mode de transport spécifique aux produits pulvérulents secs et elles sont stockées à l'abri de l'eau.

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

---

### ✓ Cendres humidifiées :

Une fois humidifiées, le transport des cendres standard camion ou cart devient concevable. Ces cendres peuvent être stockées en plein air.

### ✓ Cendres liquéfiées :

Ces cendres sont acheminées standard voie hydraulique dans des bassins de décantation.

#### **II.2.2.2. Historique [7]**

La première étude sur la possibilité d'ajouter du charbon pulvérisé au ciment sous forme de pouzzolane est publiée en 1914 avec l'article "An investigation of the pozzolanic nature in Coal Ash »

L'appellation de cendre volante apparaît quant à elle en 1937 dans l'article de R. E. Davis, R. W. Carlson, J. W. Kelly, H. E. Davis : « Properties of cements and concrete containing flyash ».

Aux États-Unis, les recherches sur la qualité des cendres volantes et leur utilisation dans le béton de masse commencent à porter leurs fruits, notamment dans les grands barrages comme le Hungry Horse Dam, dont la construction a commencé en 1948.

En 1949, l'ASTM a publié une revue de l'état de l'art dans ce domaine dans Publication Technique n° 99, qui comprenait un essai de H. S. Meissner intitulé "Pozzolans in Mass Concretes".

La première norme ASTM sur les cendres volantes est apparue en 1954, avec le titre « Tentative specification for flyash for use as an admixture in Portland cement concrete ». La norme NF P 15-302 établit l'existence des ciments dans les cendres en 1964.

En 1968, l'utilisation des cendres volantes s'est développée au point que MastaneKokubu présente un article majeur sur les cendres volantes et les ciments volants au 5e Congrès sur la chimie des produits chimiques, tenu à Tokyo.

Depuis les années 1950, le Centre canadien de technologie des ressources énergétiques et minérales joue un rôle clé dans la recherche sur les additions de phosphate. En tant que membre de l'American Concrete Institute, il a organisé des conférences internationales sur le sujet de 1986 à 2007.

#### **II.2.2.3. Effets avantageux**

Dans le travail de Golewski, G. L.[8], il présente l'effet des cendres volantes à raison de 0 %, 20 % et 30 % en poids de ciment sur les microfissures interfaciales des bétons soumis à des charges dynamiques et statique. La largeur moyenne des microfissures ( $W_c$ ) dans la zone de transition interfaciale (ITZ) des granulats grossiers à matrice cimentaire a été étudiée.

Golewski relève l'effet bénéfique de des cendres volantessur la réduction de la taille de ( $W_c$ )dans l'ITZ des composites de béton sous chargement dynamique (figure II-6). Sur la base des résultats des tests obtenus, il a été constaté que l'utilisation de l'additif à 20 % de

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

cenres volantes provoque des rétrécissements favorables dans la microstructure des bétons matures.

Dans ce composite, la valeur moyenne de ( $W_c$ ) est inférieure de plus de 40 % par rapport au résultat obtenu pour le béton de référence. En revanche, le béton contenant 30 % d'additif cenres volantes présentait des microfissures plus importantes dans la zone ITZ de plus de 60 % par rapport au matériau sans additif.

A 20% de substitution les cenres volantes ont provoqué un renforcement distinct de la structure en béton dans la zone ITZ en raison des réactions pouzzolaniques intensives. Mais à 30%, de nombreux grains de cenres volantes n'ayant pas réagi et des taches après la séparation des grains de la matrice étaient visibles. Ceci a provoqué un affaiblissement de sa structure.

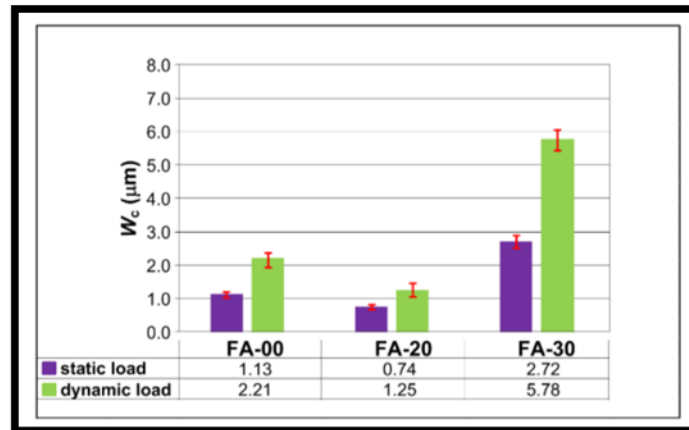


Figure II-6-Valeurs moyennes de largeur de microfissure ( $W_c$ )des bétons analysés.

Giergiczny [9] relate les principaux mécanismes de l'impact des cenres volantes sur le béton. Il fait référence à la morphologie des grains, à l'activité (principalement pouzzolanique) et à l'effet filler.

La morphologie des cenres volantes permet d'obtenir un mélange de béton plus liquide avec autant ou moins d'eau. Elle dépend de la température de combustion du charbon, de la composition chimique et de la vitesse de refroidissement post-combustion.

Le mélange de béton avec l'ajout de la cenre montre une meilleure maniabilité en raison de la teneur accrue en fraction fine dans la composition du béton (ciment, cenres) en raison de la différence de densité spécifique des cenres volantes ( $2.0-2.5 \text{ g/cm}^3$ ) par rapport à la densité du ciment ( $3,0-3,2 \text{ g/cm}^3$ ).

Le remplacement du ciment par la même masse en cenres permet d'obtenir un volume de pâte plus important. Leurs présences dans le béton contribuent à une réduction significative du ressuage et de la ségrégation du mélange de béton.

La demande en eau de la cenre est largement influencée par sa finesse et la teneur en carbone imbrûlé de forme irrégulière, principalement présent dans les grains  $> 45 \mu\text{m}$ .

Lors de l'utilisation de cenres volantes à forte teneur en charbon imbrûlé, l'efficacité des adjuvants chimiques, notamment des entraîneurs d'air, plastifiants et superplastifiants, diminue. Les cenres volantes à haute teneur en calcium HCFA sont composées d'ingrédients actifs ( $\text{CaO}$  libre, aluminates et silicates de calcium) qui, peu de temps après le mélange avec de l'eau, participent au processus d'hydratation et affectent la rhéologie des mélanges de béton. Plus la teneur en composés actifs dans les HCFA est élevée, plus la demande en eau est élevée (figure II-7).

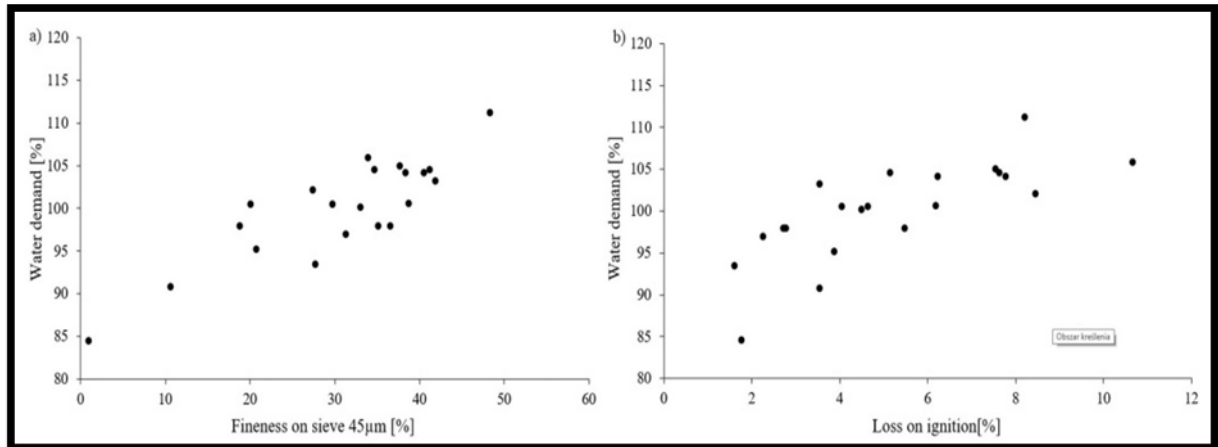


Figure II-7-Impact de la finesse (a) et de la perte au feu (b) de cendre sur la demande en eau du mélange de cendres volantes de ciment (70 % OPC et 30 % CV).

### II.2.3. Fumée de silice

#### II.2.3.1. Définition

Les fumées de silice sont un sous-produit de la fabrication du silicium ou de différents alliages de ferrosilicium (figure II-8). Cet adjuvant minéral que l'on commence à peine à utiliser dans l'industrie du béton est principalement caractérisé par son extrême finesse ainsi que par son activité pouzzolanique rapide lorsqu'il est incorporé dans des bétons ou des mortiers.

La fumée de silice est une poudre très fine constituée principalement de particules sphériques ou des microsphères.

Ces produits sont fabriqués dans un four à arc, en réduisant le quartz par un apport approprié de carbone, à une température d'environ 2 000 °C. La fumée de silice est extraite en surface du four de réduction par des ventilateurs principaux et résulte de la condensation du gaz  $\text{SiO}$ , intermédiaire réactionnel du procédé de carboréduction. Elle est ensuite récupérée et filtrée dans un filtre à manches, avant d'être densifiée pour en faciliter la manipulation.

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

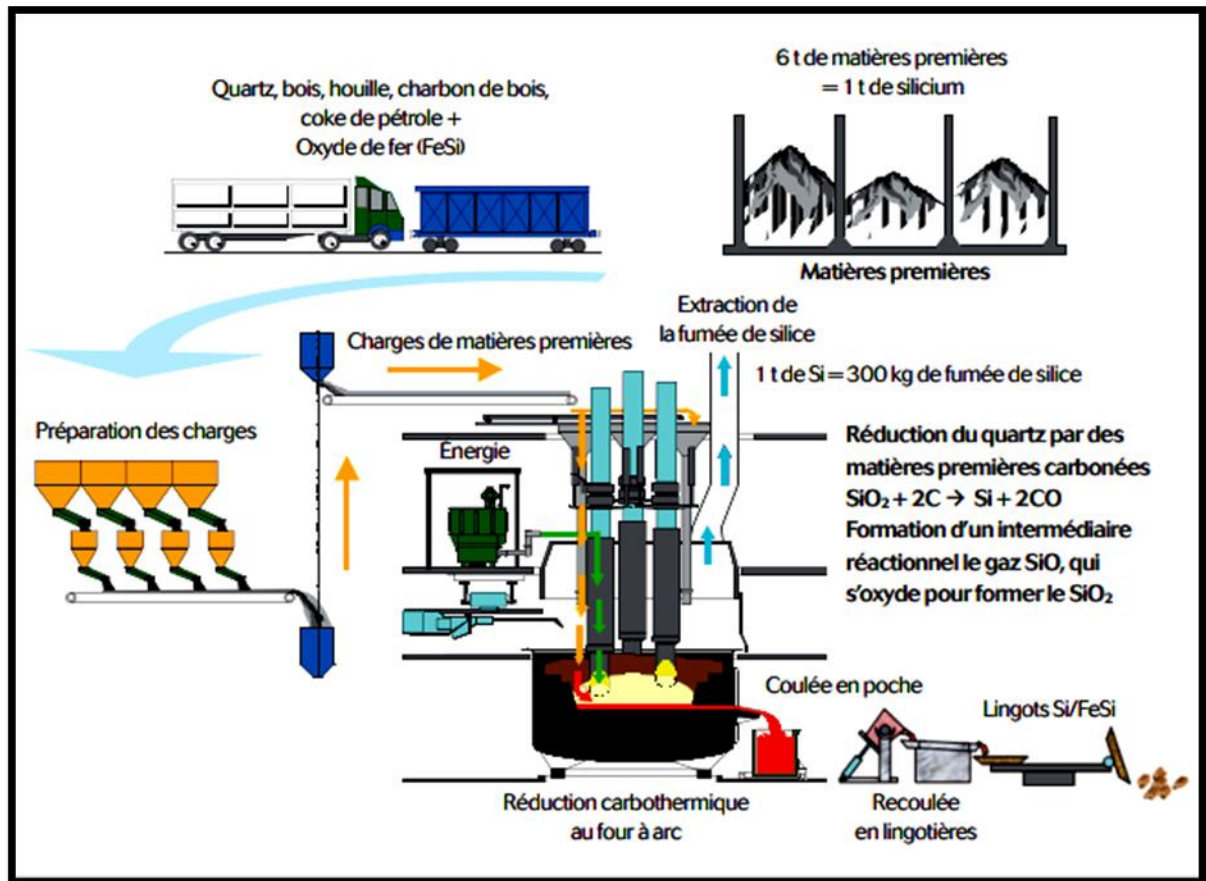


Figure II-8-Principe de production de la fumée de silice

### II.2.3.2. Historique

Jusqu'au milieu des années 1970, les fumées de silice étaient quasi universellement éjectées dans l'atmosphère. Dans un souci de préservation de l'environnement, des procédés de valorisation ont été développés pour éviter ces rejets de déchets. Le produit a d'abord été tenu en réserve, son utilisation dans le béton a été reconnue à partir des années 1980.

Ce qui était autrefois une réflexion après coup est maintenant devenu une fonctionnalité incontournable pour les producteurs de béton. Des centaines de millions de tonnes sont actuellement valorisées de cette manière dans le monde.

### II.2.3.3. Effets avantageux

Tavares et al. [10] indiquent que Le remplacement partiel du ciment par de la fumée de silice (SFP) a réduit la température d'hydratation maximale atteinte par la pâte de référence (RP), indiquant que la fumée de silice peut abaisser la chaleur d'hydratation. La fumée de silice a une surface spécifique beaucoup plus grande (environ 90 fois que le ciment), c'est-à-dire qu'elle a une plus grande surface disponible pour la nucléation des phases hydratées. Donc son effet pendant les premières heures de cure consiste principalement à stimuler physiquement l'hydratation du ciment avec peu d'influence sur l'activité pouzzolanique (figure II-9).

L'étalement de la pâte à fumée de silice (SFP) était le plus faible. La grande finesse de la fumée de silice contribue à l'augmentation de la demande en eau dans le mélange, ce qui réduit la diffusion de l'eau.

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

Dans les analyses chimiques, la portlandite n'a pas été détectée dans le (SFP), indiquant qu'après 28 jours de cure, l'activité pouzzolanique de la fumée de silice a contribué à augmenter la densité de C-S-H présent dans le composite cimentaire (figure II-10).

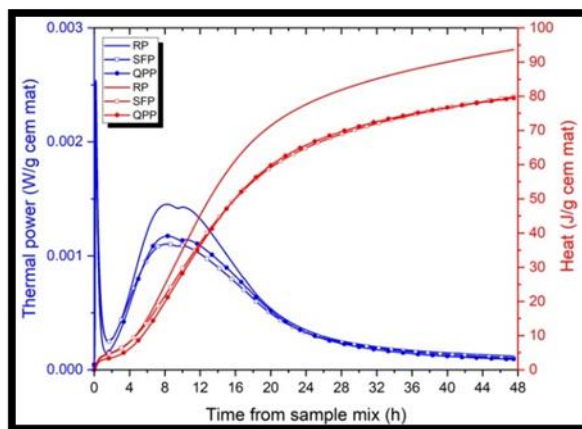


Figure II-9-chaleur cumulé et énergie thermique

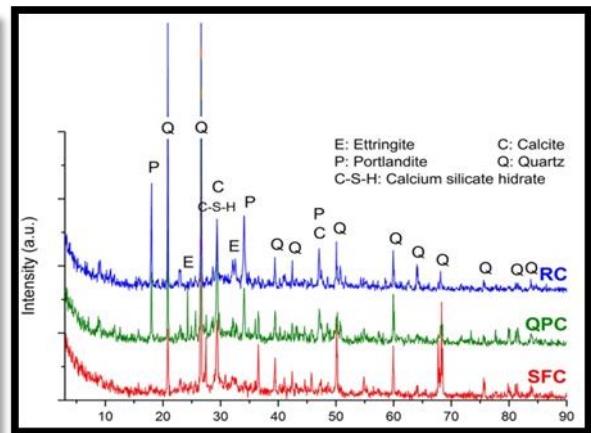


Figure II-10-DRX des pâtes étudiées des pâtes

La découverte des avantages de l'utilisation de la fumée de silice dans les formulations de béton a donné naissance à une nouvelle classe de béton, le béton à haute résistance.

La nature amorphe et très fine de la fumée de silice affecte le béton sous deux formes très différentes:

\*En réagissant avec l'hydroxyde de calcium, il forme un C-S-H qui ressemble à celui provenant de l'alite augmentant ainsi la quantité de la phase liante

\*La nature très fine lui permet de servir de bon site pour la nucléation hétérogène des produits d'hydratation du ciment.

Ces deux effets affectent directement la résistance et les propriétés du béton. La fumée de silice augmente le rythme des réactions et réduit la fraction volumétrique des gros pores, néanmoins la porosité totale reste inchangée.

Carrillo suggère que la contribution de la fumée de silice pourrait être liée à la densification de la zone de transition améliorant la liaison granulat/matrice pâteuse. Il remarque aussi que la quantité de fumée de silice utilisée n'affecte pas la densité de tassement du ciment, laissant la même distribution spatiale du ciment non hydraté.

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

Bien que les gradients de porosité existent toujours dans le mélange de fumée de silice, il existe une réduction de la porosité en présence de fumée de silice, ceci est attribué à la capacité de la fumée de silice de remplir les vides de ciment. Cette diminution de la porosité est présente dès le premier jour mais n'affecte pas la résistance jusqu'à ce que la fumée de silice ait suffisamment de temps pour agir. [11]

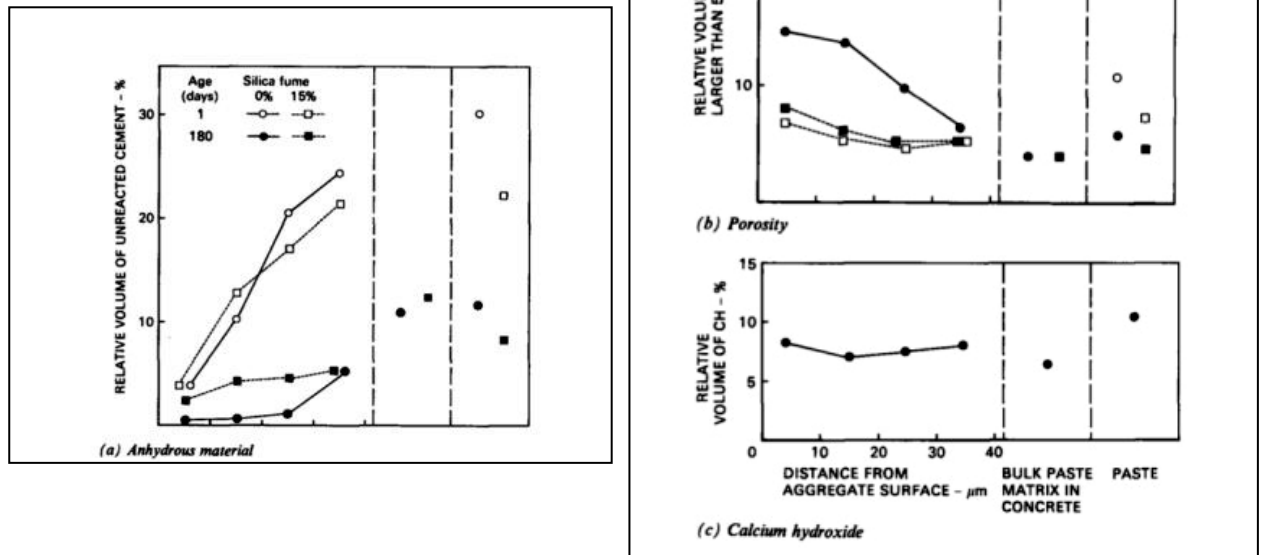


Figure II -11 .Effets de la fumée de silice dans l'ITZ

### II.2.4. Les argiles calcinées :

#### II.2.4.1. Définitions :

L'argile est une matière rocheuse naturelle à base de silicates ou d'aluminosilicates hydratés de structure lamellaire, provenant en général de l'altération de silicates à charpente tridimensionnelle, tels que les feldspaths.

L'argile est un minéral (plus exactement une famille de minéraux) de la famille des silicates, plus précisément des phyllosilicates (silicates en feuillets), leur structure est identifiable par étude au rayon X.

La structure atomique des minéraux argileux se compose de deux unités de base, une feuille octaédrique et une feuille tétraédrique.

La feuille octaédrique est composée d'oxygènes et d'hydroxyles étroitement emballés dans lesquels les atomes d'aluminium, de fer et de magnésium sont disposés en coordination octaédrique (figure II-12).

Le deuxième motif structurel est la couche tétraédrique de silice dans laquelle l'atome de silicium est équidistant de quatre oxygènes ou éventuellement hydroxyles disposés sous la forme d'un tétraèdre avec l'atome de silicium au centre. Ces tétraèdres sont disposés pour

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

former un réseau hexagonal répété à l'infini dans deux directions horizontales pour former ce qu'on appelle le feuillet tétraédrique de silice (figure II-13).

La feuille tétraédrique de silice et la feuille octaédrique sont jointes en partageant les oxygènes ou hydroxyles apicaux pour former ce que l'on appelle la couche minérale argileuse 1:1 (par exemple la kaolinite) ou la couche minérale argileuse 2:1 (par exemple l'illite).

La structure et la composition des principales argiles industrielles, c'est-à-dire les kaolins, les smectites et la palygorskite-sépiolite, sont très différentes même si elles sont chacune constituées de feuillets octaédriques et tétraédriques comme blocs de construction de base. La disposition et la composition des feuillets octaédriques et tétraédriques expliquent la plupart des différences dans leurs propriétés physiques et chimiques. [12]

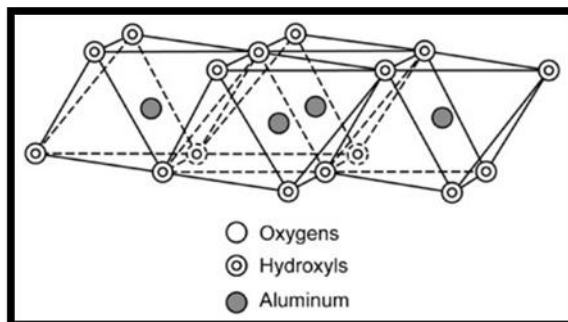


Figure II-12-Esquisse de la feuille octaédrique

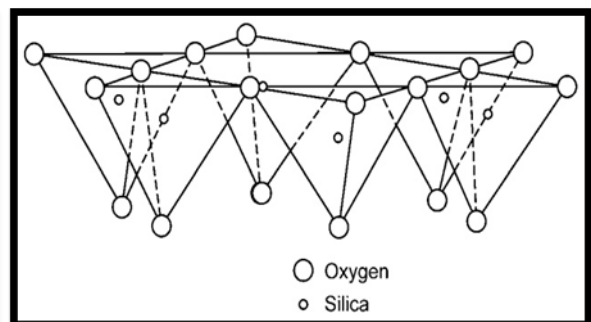


Figure II-13-Esquisse de la feuille tétraédrique

Parmi les argiles utilisées pour l'obtention des pouzzolanes artificielles on cite : la muscovite, l'illite et la kaolinite.

L'argile calcinée est utilisée dans les constructions en béton conventionnel, tout comme dans le cas des autres pouzzolanes. Elle peut être utilisée en remplacement partiel du clinker ou de ciment

### II.2.4.2. Historique [13]

En 1887, Le Chatelier, lors de ses recherches sur les argiles, montra que l'on pouvait se baser sur les anomalies thermiques qui se produisent lors du chauffage pour établir une classification des minéraux. Elle supposait une série de transformations qui dépendait de la structure d'origine, variant de 150 à 770°C.

Selon les plages de déshydratation, En 1910, H.E. Ashley a noté que la perte d'eau colloïdale peut continuer jusqu'à 300°C. Entre 500 et 575°C l'eau combinée est expulsée. La même année, J.W. Mellor et A.D. Holdcroft ont découvert que la déshydratation de l'argile n'a pas de température fixe, mais que la décomposition est appréciable à 500°C.

En 1927 à Paris, J. Orcel applique la méthode thermique différentielle sous sa forme moderne à l'étude des minéraux argileux. Depuis lors, cette procédure a été utilisée dans l'étude des argiles par de nombreux chercheurs dans de nombreux pays différents. En 1945, S. Spiel et al. tracé une courbe thermique différentielle pour la kaolinite.

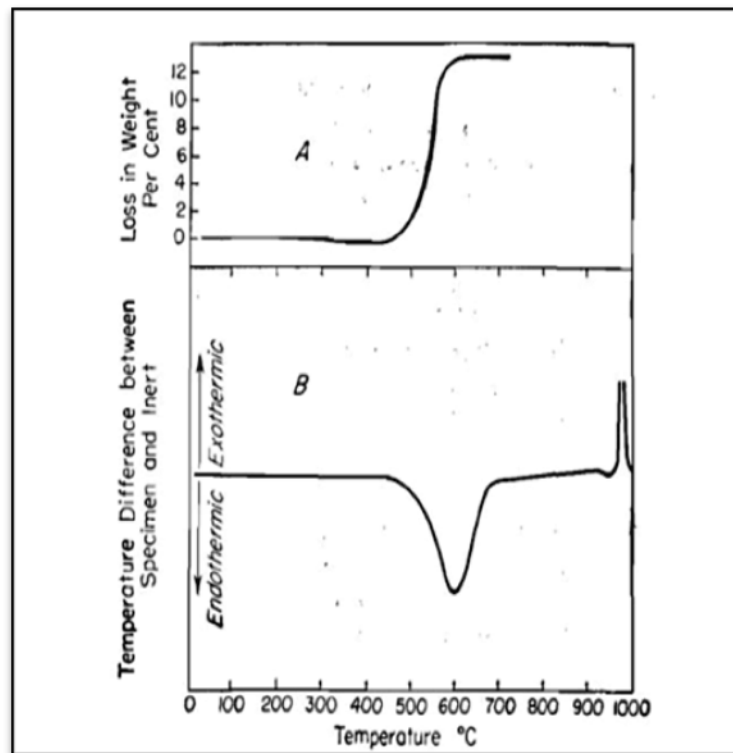


Figure II-14- Courbe thermique différentielle de la kaolinite

### II.2.4.3. Effets avantageux

Karatas et al. [14] ont mis en œuvre un programme expérimental pour évaluer les effets du kaolin (K) et du kaolin calciné (CK) comme remplaçant partiellement le ciment. Le ciment a été partiellement remplacé par du kaolin et du kaolin calciné aux taux de substitution de 0 %, 5, 10, 15 et 20 % en poids.

La figure II-15 illustre la variation de la viscosité des mortiers K et CK et le mortier témoin à différentes vitesses. Les mélanges au K et au CK ont révélé une réduction de la viscosité à mesure que la vitesse augmente. Lorsque la vitesse de rotation est faible à 1 tr/min, les mortiers CK et le témoin présentaient un comportement visqueux supérieur à celui des mortiers K. Lorsque les vitesses varient de 1 à 100 tr/min, les mortiers K et le témoin ont révélé plus de viscosité que ceux des mélanges CK.

Les mortiers à CK présentaient la viscosité la plus faible de tous les mélanges de à 60 tr/min. Ceci est lié à la valeur de cohésion élevée du kaolin. En introduisant le kaolin K et le kaolin calciné CK dans des mélanges, les valeurs de viscosité augmentent à mesure que la vitesse de rotation augmente.

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

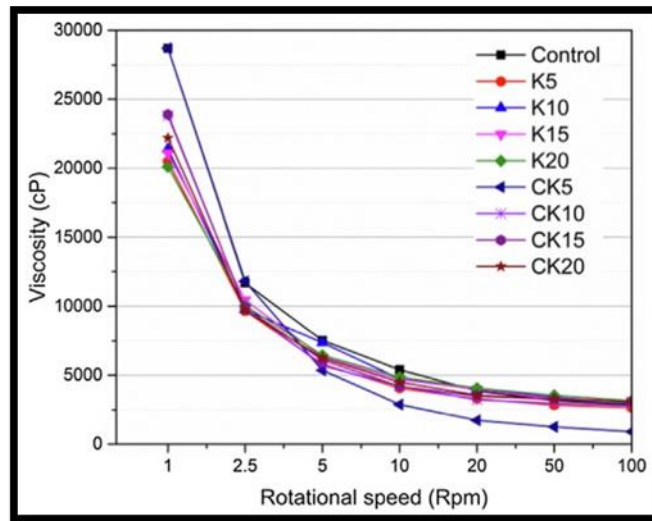


Figure II- 15- Viscosité des différents mortiers

La résistance à la compression à jeune âge des spécimens K et CK a augmenté très rapidement (figure II-16). La résistance à la compression à 3 jours de tous les spécimens à kaolin a représenté des valeurs plus élevées que celle des spécimens témoins, à l'exception du K20. Lorsque les taux d'inclusion de K et CK augmentent, généralement, une légère réduction de la résistance à la compression a été obtenue à mesure que le temps de durcissement augmente. A 28 jours une réduction de la résistance à la compression est enregistrée. Cette diminution peut être liée à une finesse inférieure des particules de K par rapport au ciment. Cela peut être dû aussi à la température de calcination du kaolin à 600°C qui peut résulter en une calcination insuffisante du kaolin pour obtenir du métakaolin. L'introduction du métakaolin a un effet de remplissage ce qui accélère le processus d'hydratation. En accélérant ce processus d'hydratation, plus d'hydroxyde de calcium est produit et des hydrates secondaires d'aluminosilicate de calcium sont produits en faisant réagir CH avec les phases de silice et d'aluminate à un âge précoce. La formation de ces produits secondaires entraîne le développement de la résistance. Mais la diminution de la résistance à la compression peut être due à la température de calcination de 600 ° C dans laquelle le kaolin ne s'est pas complètement transformé en métakaolin et peut également être moins pur.

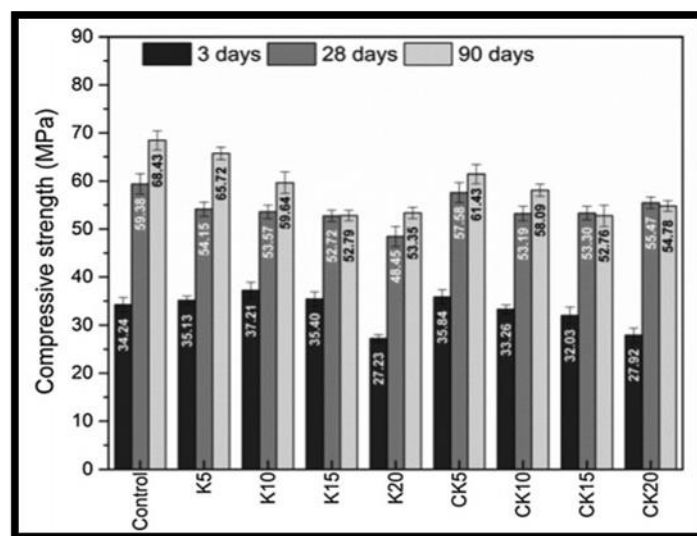


Figure II- 16- Résultats de la résistance à la compression

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

Rehman et al.[15] ont étudiés la performance des mortiers contenant un minéral argileux de type montmorillonite (Mmt) en remplacement partiel du ciment. Calcinée à (100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C , 900°C & 1000°C) le test de l'indice d'activité a révélé que, à l'exception des mélanges modifiés avec de l'argile Mmt calcinée à 900°C et 1000°C. Les valeurs de l'indice des mortiers modifiés étaient respectivement de 82 % et 83 % sur 7 et 28 jours. Alors que le meilleur indice était celui des mortiers modifiés avec un Mmt calcinée à 800°C. Lors du chauffage initial de 100°C à 300°C, l'activité pouzzolanique était un peu améliorée. Les températures d'activation de 700°C et 800°C montrent de bien meilleurs résultats parmi toutes les températures. Cette activation de l'argile est due à la phase de déshydroxylation de l'argile Mmt,. Pour les températures élevées, les valeurs de l'indice ont montré une déclinaison de la réactivité pouzzolanique, cette déclinaison est due à la recristallisation de la structure argileuse et à la production de nouvelles phases minérales (figure II-17).

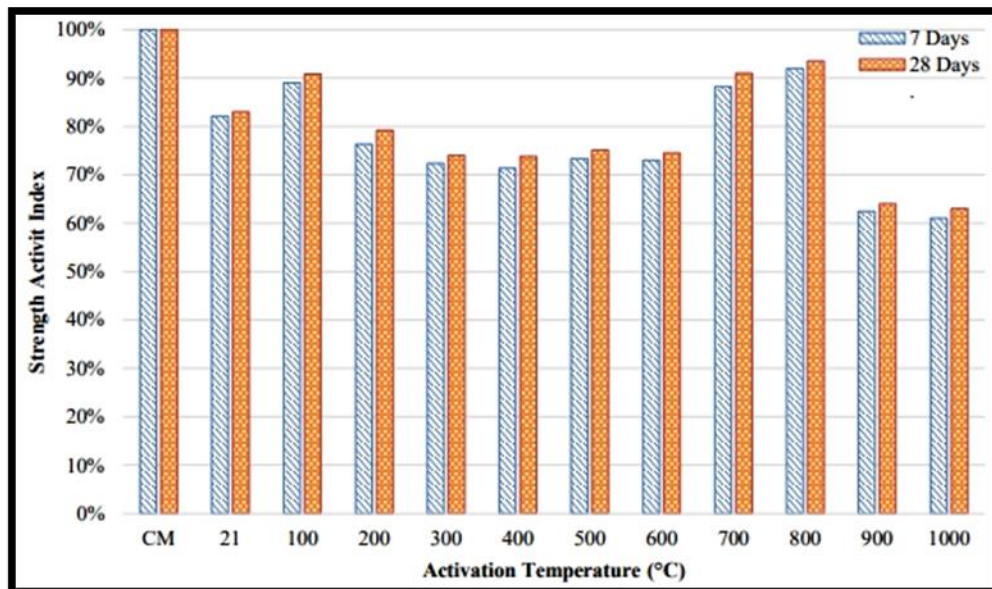


Figure II- 17- Indice d'activité des différentes montmorillonites

### II.2.5. La pouzzolane

#### II.2.5.1. Définitions

La pouzzolane est une roche naturelle formée d'affleurements de basalte volcanique, dont la couleur varie du noir au rouge en passant par le gris, et ayant une structure alvéolaire.

La pouzzolane est mélangée à de la chaux aérienne, ce qui permet à ces mortiers de prendre et de durcir hydrauliquement en présence d'eau. Elle est utilisée pour la construction, le béton, l'agriculture de surface et même pour filtrer l'eau car cette pierre est poreuse (figure II-18).

En général, ce matériau de construction est plus léger que d'autres matériaux comme la brique silico-calcaire. En travaux publics, cela permet l'utilisation de remblais allégés.



Figure II- 18- La pouzzolane naturelle

Une classification précise de la pouzzolane est presque impossible car elle inclut une variété de matériaux différents. Cependant, les matériaux pouzzolaniques peuvent être divisés en deux groupes principaux : la pouzzolane naturelle et artificielle [16] (figure II-19).

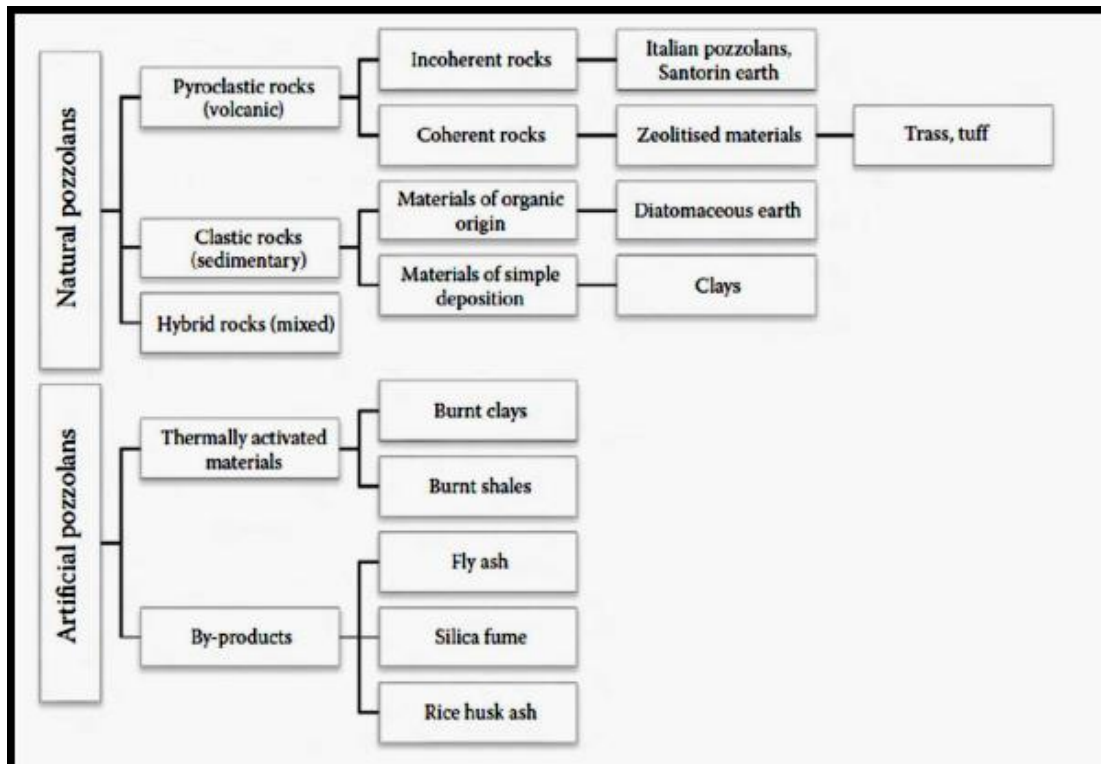


Figure II-19- Les différents types de pouzzolanes

### a. Pouzzolane naturelle

C'est un produit d'origine volcanique constitué essentiellement de silice, d'alumine et d'oxyde de fer aux propriétés pouzzolaniques naturelles.

L'Algérie dispose d'une quantité appréciable de matériaux pouzzolaniques d'origine volcanique qui s'étend sporadiquement sur une longueur de 160 km entre la frontière algéro-marocaine et le Sahel d'Oran. Le massif d'Oran est constitué d'une ceinture volcanique de 20

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

---

km de large, contenant plusieurs unités volcaniques (environ 60) et s'étendant sur une superficie de 1000 km<sup>2</sup>.

A partir de 1985, et après une étude sur les matériaux pouzzolaniques du gisement de Bou-Hamidi (situé à 2 km 500 au sud de Béni-Saf), l'unité FER-PHOS a commencé à exploiter cette pouzzolane et grâce à la ligne ferroviaire Béni-Saf – Ain Temouchent, il est expédié à Zahana, Saïda, Chlef et d'autres régions du territoire Algérien.

### **b. Pouzzolane artificielle**

C'est un matériau composé essentiellement de silice, d'alumine et d'oxyde de fer qui a subi un traitement thermique pour lui conférer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement comme exemple sont les argiles, la latérite, la bauxite, etc.

#### **II.2.5.2. Historique [17]**

Les Romains utilisaient la pouzzolane (tuf de zéolithe qu'ils trouvaient dans la baie de Naples, pied du mont Vésuve, à Pozzuoli), qui, mélangé à de la chaux grasse, donnait un mortier très résistant et durable. Mais ils n'étaient pas les seuls à les trouver. En effet, dans l'île de Bali, à l'est de Java (Indonésie), les habitants utilisent depuis plus de deux mille ans, pour construire les murs de leurs rizières en terrasses, un mélange de chaux, de corail, de cocos cuits, et de cendres de leur volcan sacré, l'Agung, qu'ils trouvent dans le sable fin de leurs rivières.

Les murs du panthéon, célèbre temple de Rome (construit en 27 av. J.-C.), ont été cimentés par un mortier constitué d'un mélange de chaux et de pouzzolane ; de même, pour la construction de son dôme, les romains utilisaient un mortier à base de pouzzolane.

On sait que les Grecs mélangeaient de la chaux grasse avec des cendres volcaniques de l'île de Santorin, obtenant ainsi de véritables liants hydrauliques. Au Moyen Âge, la cendre était ajoutée à la chaux pour construire des habitations. Nous avons ajouté également avec des tuiles à la chaux et de la brique concassée, des déchets de poterie, des mâchefers de foyers domestiques.

#### **II.2.5.3. Effets avantageux :**

##### **a. La pouzzolane naturelle**

Douaïssia et al.(2020) [18] , ont étudié l'effet de la substitution progressive de 10 à 50 % du volume de ciment par la pouzzolane naturelle sur les propriétés physicomécaniques des pâtes et des mortiers.

La pouzzolane naturelle engendre une augmentation de l'eau de gâchage nécessaire pour avoir une consistance normale. Cette augmentation n'est pas trop significative elle est de l'ordre de 2% (figure II-20). Suite à l'augmentation progressive de la consistance, le temps de prise se trouve allongé comme l'indique la figure II-21.

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

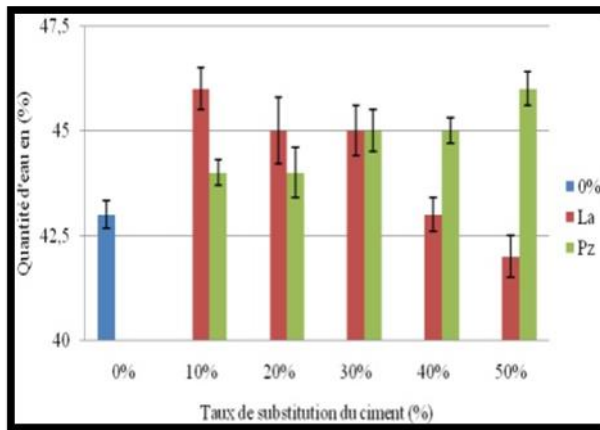


Figure II- 20- Effet de la pouzzolane naturelle sur la consistance

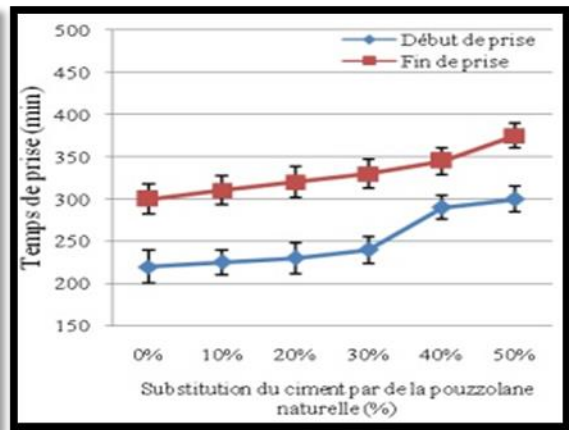


Figure II- 21- Effet de la pouzzolane naturelle sur le temps de prise

Lors de la substitution du ciment par de la pouzzolane naturelle jusqu'à 20%. Mansour & Ghernouti [19] ont constaté que le comportement rhéologique des pâtes de ciment change avec le taux de remplacement de la pouzzolane. Les courbes d'écoulement montrent que les contraintes de cisaillement auxquelles sont soumises les pâtes de ciment contenant 5% et 10% sont faibles par rapport à celles de la pâte témoin sans la pouzzolane (0% PZ) (Figure II-22). Les taux de 15% et 20% n'ont pas d'effet positif puisqu'ils provoquent une augmentation de la contrainte de cisaillement par rapport à ceux de la pâte témoin (0% PZ). Ceci est confirmé par la diminution de la viscosité de la pâte de ciment en remplaçant le ciment par le même taux (Figure II-23).

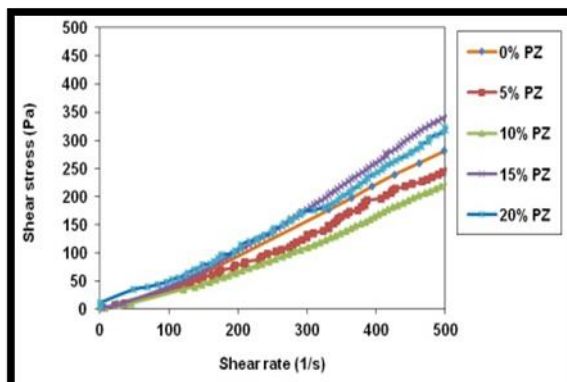


Figure II- 22- Courbes d'écoulement des pâtes

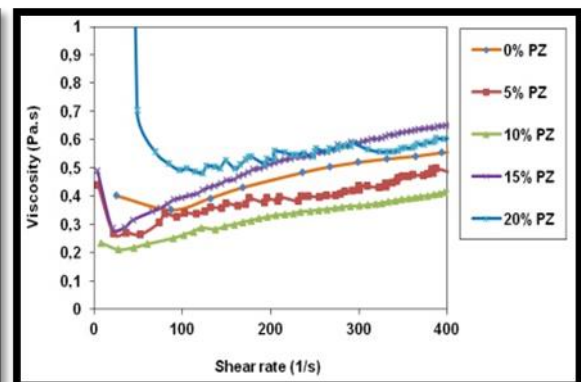


Figure II - 23 -Evolution de la viscosité des pâtes

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

### b. La pouzzolane artificielle

Benredouane et al [20]. Ont étudié une nouvelle pouzzolane artificielle à base de zéolithe X synthétisée à partir de kaolin naturelle

L'activité pouzzolanique de cette zéolithe déterminée par le test de chaux saturée, indique qu'elle est fortement pouzzolanique comme l'indique la figure II-22.

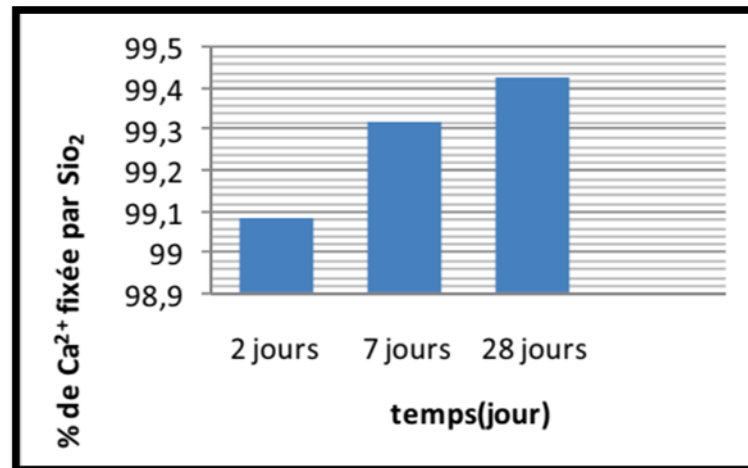


Figure II-24-Variation de l'activité pouzzolanique de la zéolithe X

### II.2.6. Le verre finement broyé

#### II.2.6.1 Définition :

La poudre de verre est un ajout cimentaire. Elle est obtenue après collecte et broyage de fragments de verre, sa forte teneur en silice amorphe SiO<sub>2</sub> lui confère des propriétés pouzzolaniques lorsqu'elle est associée à la chaux pour créer d'autres hydrates.

Le verre est obtenu par le refroidissement brutal d'un liquide, entraînant sa vitrification. Sa structure non cristalline, dans laquelle l'ordre n'est maintenu que sur une courte distance, ressemble à celle d'un liquide. Son état vitreux est ainsi caractérisé par un désordre de type liquide propice à la cristallisation, mais sa cinétique de cristallisation est généralement si lente que le matériau apparaît stable à l'œil humain.

Le réseau de verre désordonné à grande échelle est basé sur des éléments "formateurs de réseau", qui sont généralement des éléments de haute valence tels que le silicium. Cependant, la silice cristalline se forme à partir d'un empilement régulier de ces tétraèdres SiO<sub>4</sub> (elle a un ordre à longue portée), contrairement à la silice vitreuse, qui est considérée comme un empilement anarchique de ces éléments formant.

#### II.2.6.2. Historique :

Plusieurs chercheurs ont donné l'initiative de l'utilisation du verre comme substituant de granulats en jouant sur la forme, la couleur et le taux de remplacement. Le remplacement était dans plusieurs cas en substitution totale ou partielle des gros granulats ou de granulats fins. Les travaux menés par plusieurs chercheurs ont été focalisés sur le phénomène de la réaction alcalis silice. Les premiers travaux datent de 1973, lorsque la pouzzolanité du verre était étudiée par. Le pourcentage d'utilisation du verre broyé par substitution dans la matrice cimentaire peut varier selon la disponibilité du verre et les performances voulues du béton.

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

---

La résistance en compression pour certains ouvrages peut être une référence du pourcentage utilisé, sans omettre la durabilité qui est devenue une autre obligation pour la qualité des bétons d'aujourd'hui.[21]

### II.2.6.3. Effets avantageux

L'utilisation du verre dans l'industrie cimentière a fait l'objet d'une attention particulière ces dernières décennies. Au-delà des motivations économiques, la poudre de verre offre la possibilité de construire de manière durable, rationnelle et écologique.

Arab et al.[22] ont constaté que la consistance diminue avec l'augmentation de la poudre de verre (PV), suggérant un excès d'eau qui peut être expliqué par la différence de surface spécifique entre la PV et le ciment et par la plus faible absorption de l'eau de gâchage par la PV, ce qui augmente la quantité d'eau libre dans la matrice cimentaire.

La poudre de verre, modifiée la cinétique de développement de la résistance à la compression des bétons. Elle a entraîné un développement lent de la résistance (figure II-23). Cette observation peut s'expliquer par les modifications de l'hydratation de la matrice induites par la substitution de ciment par la PV qui absorbe moins d'eau que le ciment. En revanche, à 90 jours de prise, on observe que l'addition de 10 % ou 20 % de PV améliore la résistance à la compression.

Ceci est attribué à l'activité pouzzolanique. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante à jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la PV et le  $\text{Ca(OH)}_2$  libéré par l'hydratation du ciment.

La résistance à la flexion est quant à elle améliorée à 28 jours comme à 90 jours de prise. La poudre de verre exerce un effet physique et chimique. L'ajout de 10 ou 20 % de PV améliore la résistance à la flexion à 28 jours et à 90 jours de prise. Le phénomène peut s'expliquer par une adhérence entre les grains de ciment et de sable accrue en présence de poudre de verre.

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

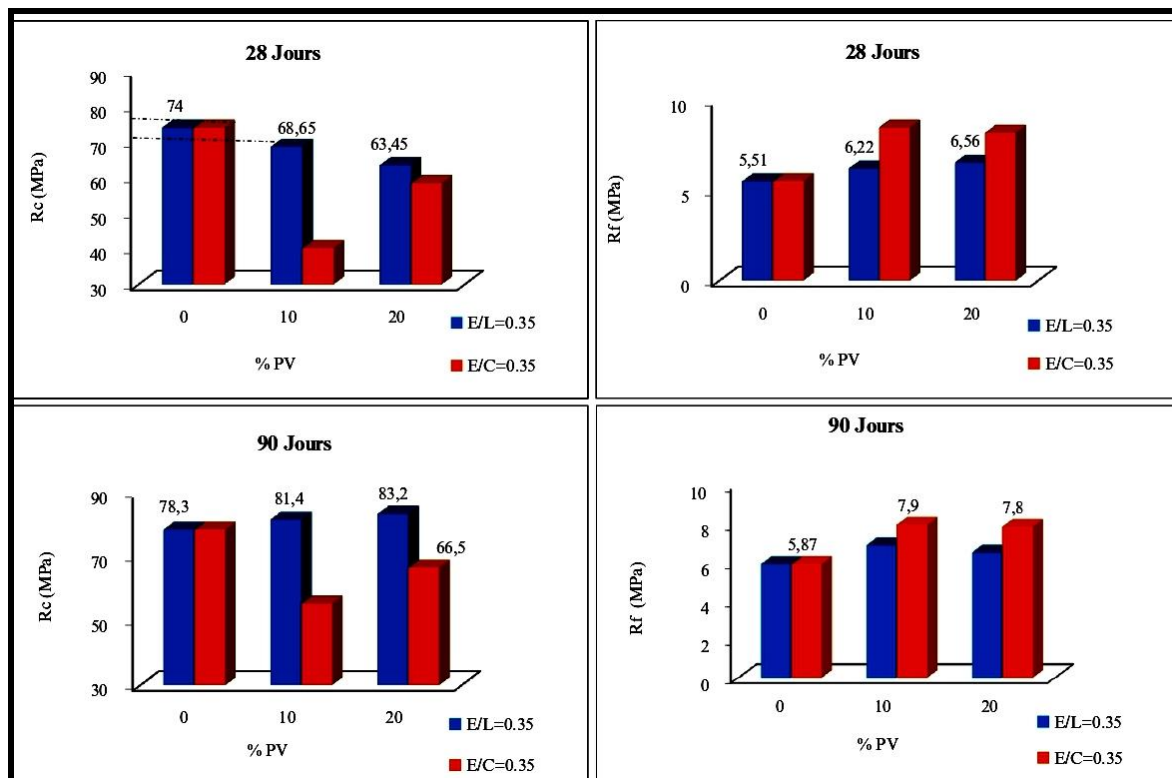


Figure II-25- Influence du dosage en PV sur la résistance à la compression (à gauche) et à la flexion (en droite)

La même constatation est soulignée par He et al. [23] A jeune âge les résistances des bétons avec différents pourcentages de PV sont inférieures à la référence. A 28 jours les bétons avec 10 et 20% reprennent le dessus (30% de PV est le plus mauvais béton de l'étude).

A jeune âge la PV démontre un effet filler pour réduire les résistances à la compression. Avec l'avancement du temps, la réaction pouzzolanique de la PV est progressivement activée par la portlandite (CH) produite par l'hydratation du ciment.

Par conséquent, l'effet combiné de la réaction pouzzolanique et l'effet filler dû aux particules de la PV n'ayant pas réagi augmente les résistances à la compression des éprouvettes aux âges plus avancés. Lorsque la teneur en PV est trop faible (10%), la réaction pouzzolanique du fait de sa moindre quantité est limitée, et lorsque la teneur en PV est trop importante (30%), peu de CH est produit du fait l'effet de dilution. Ainsi, 70% de ciment ne peut pas activer suffisamment la réaction pouzzolanique de la PV, ce qui affecte l'augmentation des résistances à la compression (figure II-24). Cependant, les teneurs optimales en PV ne sont pas exactement similaires, ce qui peut être attribué aux différentes qualités de, rapport eau sur liant, types de béton, conditions de durcissement, etc.

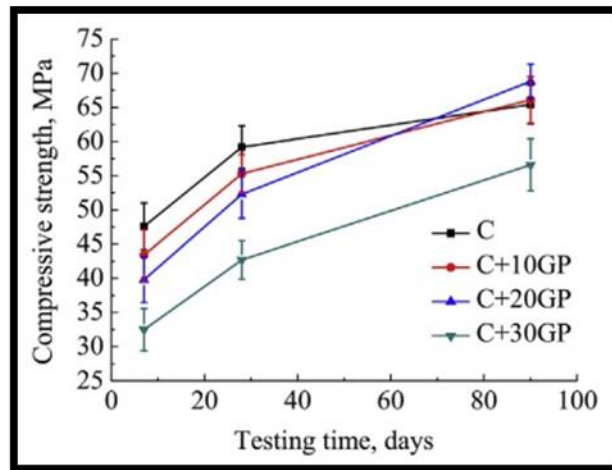


Figure II-26- Effet de la poudre de verre sur la résistance à la compression du béton

### II.2.7. La balle de riz

#### II.2.7.1. Définition :

Les balles de riz sont un sous-produit de l'industrie du riz. C'est une opération qui transforme le riz récolté en riz brun. Ce dernier doit subir une deuxième étape de transformation « le blanchiment », qui consiste à enlever la peau pour produire du riz blanc.

Les balles de riz sont constituées de glumes et de glumelles, bractées modifiées qui enveloppent les épillets, de sorte que les caryopses à maturité constituent le grain de riz. La coquille peut être utilisée comme matériau de construction, engrais ou combustible.

La balle de riz a une variété d'utilisations, et elle est encore souvent considérée comme un déchet de production et est donc soit brûlée à l'air libre, soit enterrée.

Les balles de riz sont utilisées pour isoler les bâtiments, en matériaux composites ; elles peuvent être utilisées comme combustible pour les fours des générateurs de vapeur dans les rizeries. Ils sont utilisés dans la production d'engrais, dans la fabrication d'isolants de bâtiments, de matériaux de remplissage, de panneaux, dans la fabrication de résines synthétiques, de produits de nettoyage et aussi comme paillis.

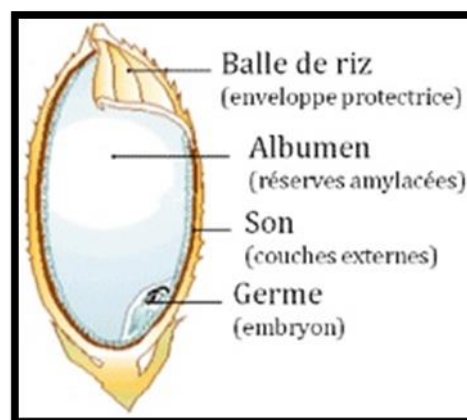


Figure II-27-Composition d'un grain de riz

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

### II.2.7.2. Effet avantageux

La résistance à la compression du la cendre de la balle de riz (en anglais Rice Hush Ash « RHA ») naturelle (NRHA) est inférieure à celle du béton témoin à tous les âges comme indiquait par Djamaluddin et al.[24] (tableau II-1); cela est dû à la faible activité pouzzolanique du NRHA en raison de ses particules plus grossières. Ils produisent des pores plus gros dans la pâte de ciment, réduisant ainsi la résistance à la compression du béton. D'autre part, le mélange de NRHA avec des granulats grossiers pendant 5 et 8 min (5mNRHA et 8mNRHA) améliore significativement la résistance à la compression par rapport au NRHA.

L'augmentation de la résistance à la compression est due à la réduction de la taille des particules de cendres dans le processus de mélange, qui à son tour réduit le volume des pores plus gros dans la pâte de ciment. Cette augmentation est peut-être attribuée à la silice amorphe et à la granulométrie fine du RHA, qui a fourni une excellente activité pouzzolanique.

**Tableau II-2- Propriétés à l'état frais et durcie des bétons.**

| Mixture | SP (kg/m <sup>3</sup> ) | Slump (mm) | Fresh density (kg/m <sup>3</sup> ) | Compressive strength (MPa) |         |
|---------|-------------------------|------------|------------------------------------|----------------------------|---------|
|         |                         |            |                                    | 28 days                    | 91 days |
| Control | 0                       | 90         | 2365                               | 20.83                      | 25.31   |
| NRHA    | 2.2                     | 90         | 2287                               | 19.93                      | 20.31   |
| 5mNRHA  | 1.7                     | 95         | 2293                               | 22.21                      | 26.56   |
| 8mNRHA  | 1.4                     | 90         | 2307                               | 24.21                      | 30.21   |

Cette amélioration de la résistance à la compression à son impact sur la résistance à l'abrasion et la réduction de la perméabilité. Le mélange 8mNRHA, a améliorée la résistance à l'abrasion de 10,35 et 23,62 % par rapport au béton témoin à 28 et 91 jours, respectivement (tableau II-2).

**Tableau II-3- Perte de masse à l'abrasion à 28 et 91 jours**

| Full rotations | Weight loss (%) at 28 days |       |        |        | Weight loss (%) at 91 days |        |        |        |
|----------------|----------------------------|-------|--------|--------|----------------------------|--------|--------|--------|
|                | N                          | NRHA  | 5mNRHA | 8mNRHA | N                          | NRHA   | 5mNRHA | 8mNRHA |
| 100            | 8.75                       | 11.22 | 9.49   | 8.52   | 5.75                       | 9.22   | 7.49   | 6.52   |
| 200            | 15.30                      | 19.48 | 14.03  | 12.82  | 12.30                      | 17.48  | 13.03  | 10.82  |
| 300            | 21.13                      | 26.73 | 19.85  | 17.68  | 18.13                      | 23.73  | 18.85  | 14.68  |
| 400            | 26.03                      | 31.89 | 24.75  | 20.97  | 23.03                      | 29.89  | 23.75  | 18.97  |
| 500            | 31.82                      | 38.39 | 30.28  | 27.23  | 28.82                      | 36.388 | 28.28  | 22.23  |
| 600            | 37.19                      | 45.88 | 35.27  | 33.27  | 35.19                      | 42.88  | 33.27  | 26.27  |
| 700            | 44.38                      | 54.44 | 43.17  | 39.73  | 41.38                      | 50.44  | 38.17  | 30.73  |
| 800            | 49.87                      | 61.70 | 48.99  | 44.94  | 45.87                      | 58.69  | 43.99  | 34.94  |
| 900            | 55.60                      | 69.79 | 54.71  | 49.66  | 52.60                      | 64.79  | 48.71  | 39.66  |
| 1000           | 61.55                      | 79.40 | 60.23  | 55.18  | 56.55                      | 72.40  | 53.23  | 43.18  |

## Chapitre II : les ajouts cimentaires

Dans le cas d'une RHA traitée thermiquement à 600 °C pendant 3 heures Vieira et al.[25] ont indiqué que l'utilisation de RHA en remplacement du ciment augmentait la cinétique d'hydratation par rapport à la pâte de référence (Figure II-26) . Une diminution de la période d'induction est observée, ainsi qu'une augmentation du taux de chaleur pendant les périodes d'induction et d'accélération en raison de la présence de RHA.

La surface spécifique élevée et la porosité élevée observées dans la RHA grossière étaient peut-être responsables de l'amélioration de l'hydratation du ciment et ont généré une influence significative sur le comportement observé. La nucléation hétérogène est la raison des réductions pendant la période d'induction et des augmentations du taux de chaleur. Ce phénomène est lié à une surface spécifique plus élevée des matériaux de granulométrie fine.

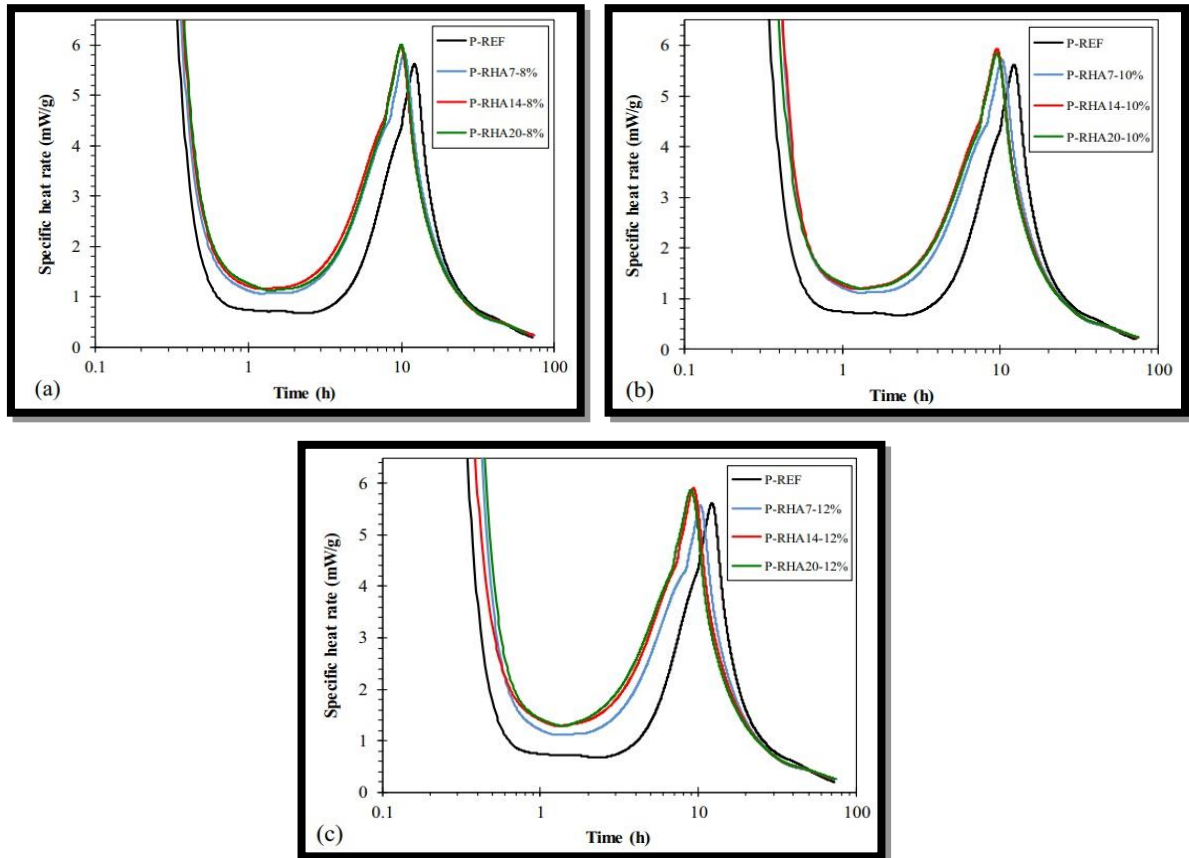


Figure II-28- Courbes de flux de chaleur spécifiques des mélanges étudiés.



**CHAPITRE III**  
**DURCISSEMENT DES CIMENTS**

### CHAPITRE III : Durcissement des ciments

#### Nomenclature

- ✓ C = CaO : Chaux
- ✓ S = SiO<sub>2</sub> : Silice
- ✓ H = H<sub>2</sub>O : Eau
- ✓ A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Alumine
- ✓ F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Hématite
- ✓ Les silicates tricalciques (ou alite) : 3CaO.SiO<sub>2</sub> ou C<sub>3</sub>S
- ✓ Les silicates bicalciques (ou belite) : 2CaO.SiO<sub>2</sub> ou C<sub>2</sub>S
- ✓ Les aluminates tricalciques : 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou C<sub>3</sub>A
- ✓ Les ferro-aluminates tétracalciques : 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou C<sub>4</sub>AF
- ✓ Le gel de silicate de calcium hydraté CSH
- ✓ La portlandite CH

#### III.1. Définition du durcissement des ciments

En chimie du ciment, le terme « hydratation » désigne l'ensemble des changements qui se produisent lorsqu'un ciment anhydre, ou l'une de ses phases constitutives, est mélangé avec de l'eau. Les réactions chimiques qui se produisent sont généralement plus complexes. Un mélange de ciment et d'eau dans des proportions telles que la prise et le durcissement se produisent, est appelé une pâte, le sens de ce terme étant étendu pour inclure le matériau durci [26].

Le durcissement du béton est un phénomène lié à l'hydratation du ciment. Les cristaux se forment (à partir d'un temps correspondant au début de la prise) et s'enchevêtrent les uns avec les autres. Le béton, complètement liquide avant la prise du ciment, durcit progressivement. En se solidifiant, le mélange eau-ciment enserre les granulats et donne un matériau compact. Le durcissement prend plusieurs mois en continu (figure III.1).

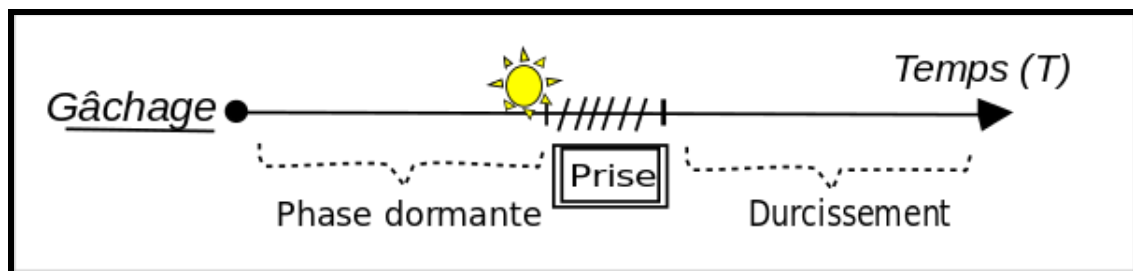


Figure III.1. Prise de ciment

Le mécanisme de durcissement du ciment est très différent de celui de la chaux. Le ciment durcit par hydratation des silicates et aluminates de chaux, tandis que la chaux durcit lentement par carbonisation à l'air.

La chaux est obtenue en brûlant du calcaire, CaCO<sub>3</sub>, qui perd son dioxyde de carbone et se transforme en chaux vive, CaO. Celui-ci doit d'abord être trempé avec de l'eau, qui le transforme en chaux hydratée, Ca(OH)<sub>2</sub>. Ce dernier absorbe alors lentement à nouveau le dioxyde de carbone de l'air et produit à nouveau progressivement du calcaire tendre.

# Chapitre III : Durcissement des ciments

## III.2. Théorie des réactions d'hydratation

### III.2.1. Définition de l'hydratation du ciment

L'étude du processus d'hydratation et des produits dans le béton ou même dans les mortiers est compliquée par la présence des granulats, mais une certaine concentration de la pâte peut généralement être influencée par le concassage, le broyage ou le tamisage des granulats. , des informations beaucoup plus détaillées peuvent être obtenues à partir d'études sur la pâte.

L'hydratation du ciment est très complexe en raison de l'interférence de différents processus et de l'interaction mutuelle entre les différentes phases du clinker qui réagissent avec l'eau. De plus, l'image du procédé devient plus exigeante, puisque les grains de ciment notamment sont poly-minéraux. Malgré cela, les phases de clinker conservent leur vitesse d'hydratation spécifique. [27] .

Le terme hydratation est l'ensemble des réactions chimiques qui produisent du ciment anhydre en présence d'eau (le contact des composants du ciment avec l'eau).

Ces derniers ont donné de nouveaux composés appelés hydrates. Ce processus est initié simplement par le contact des constituants anhydres du ciment avec de l'eau, les phases anhydres réagissent à des vitesses différentes et forment des hydrates différents (figure III.2).

Lorsqu'il y a un changement dans la structure chimique du ciment hydraté, une hydrolyse se produit. La cristallisation commence par une phase de germe. Lorsque des conditions énergétiques favorables sont trouvées, des ions aléatoires sont assemblés par des noyaux stables pour former noyaux.

Ces derniers croissent par agglomération de couches successives d'ions à l'interface cristal-suspension à une vitesse liée à la vitesse de sursaturation (vitesse de diffusion des ions). Ces réactions affectent les composants du ciment.

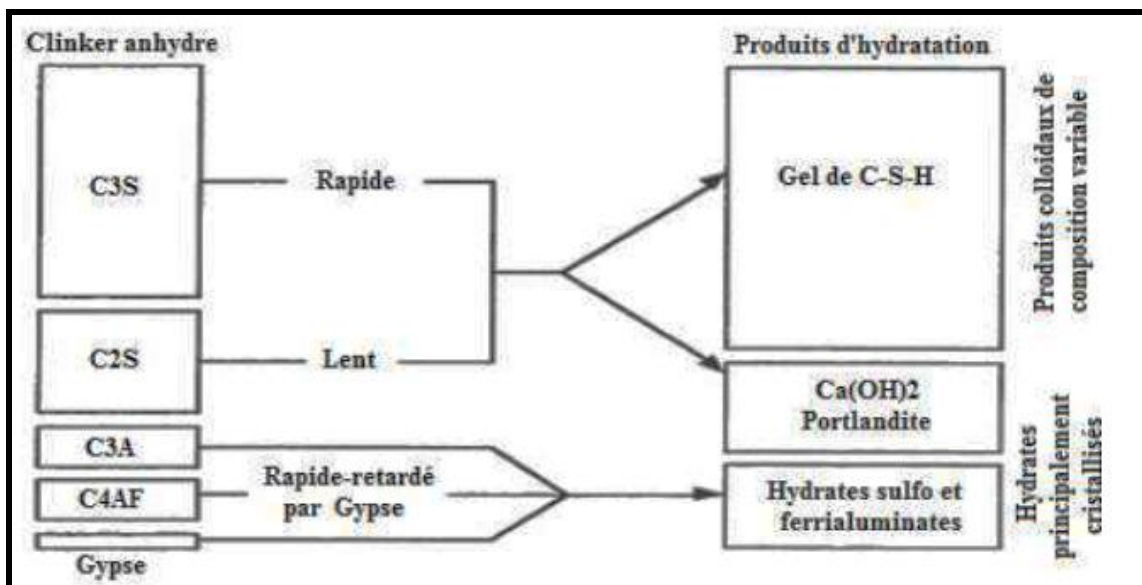


Figure III.2. Représentation schématique de l'hydratation du ciment

# Chapitre III : Durcissement des ciments

## III.1.2. Théories des réactions d'hydratation :

La propriété essentielle des ciments est de donner, avec l'eau, une pâte qui fait prise et durcit bien à l'air que sous l'eau. Les premières réactions ont lieu en surface et il en résulte une augmentation de la viscosité de la pâte, c'est la prise. La réaction gagne ensuite tous les grains, ce qui accroît la cohésion.

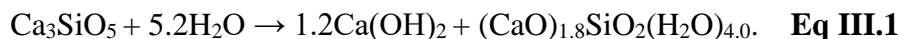
L'étude scientifique du ciment Portland a commencé à prendre de l'ampleur vers la fin du XIXe siècle. Des théories sur la prise et le durcissement du ciment Portland ont été proposées par Le Chatelier (1883), W. Michaelis (1893) et plus tard par Baikov (1926) puis Rebinder (1954).

La technique d'examen la plus enrichissante a été la microscopie. Le Chatelier a utilisé l'approche pétrologique et, par microscopie, il a considéré que le composant essentiel du ciment Portland était le  $3\text{CaO},\text{SiO}_2$ , l'un des quatre types de cristaux. Une étude indépendante de Tornebohm (1897) a rapporté quatre types de cristal auxquels il a donné les noms d'alite, de bélite, de célite et de félite. Assarson et Sundius ont réexaminé (1929) les spécimens de Tornebohm et leurs travaux cristallographiques ont montré que l'alite était essentiellement  $3\text{CaO},\text{SiO}_2$ , la bélite et la félite étaient  $\beta\text{-}2\text{CaO},\text{SiO}_2$  et la célite était une solution solide [28].

### III.1.2.1. La théorie cristalloïde

En 1882, Le Chatelier présente la théorie du durcissement par cristallisation, selon laquelle les composants minéraux anhydres du ciment, dont la solubilité dans l'eau est supérieure à celle de ses produits d'hydratation, sont des solutions sursaturées par rapport aux composés hydratés formés. Ils précipitent hors de la solution sursaturée sous forme de cristaux et provoquent ensuite la formation d'un agrégat cristallin de résistance suffisamment élevée [29].

Le Chatelier établit que l'hydratation du ciment Portland commence par la dissolution des espèces de silicate de calcium dans l'eau à partir de la phase de silicate la plus soluble. Ce processus est suivi par la précipitation d'hydrates de silicate de calcium complexes peu cristallins (C-S-H) et la cristallisation de la CH, selon la réaction [30]



### III.1.2.2. La théorie colloïdale

Les colloïdes, ou « solutions » colloïdales, sont des mélanges (liquide, gel) qui contiennent, en suspension, des particules. Ces particules, ou objets colloïdaux, ont une taille supérieure aux molécules qui les constituent (taille supramoléculaire) mais suffisamment petite pour que le mélange demeure homogène.

D'après la définition officielle, leur taille est comprise entre un nanomètre ( $10^{-9}$  m) et une dizaine de micromètres (soit  $10^{-5}$  m). Des produits industriels tels qu'un parfum sans alcool, une peinture à l'eau, ainsi que des produits naturels tels que le lait, sont des exemples de solutions colloïdales. Dans tous les cas, ces mélanges doivent posséder une stabilité suffisante pour être fonctionnels [31].

## Chapitre III : Durcissement des ciments

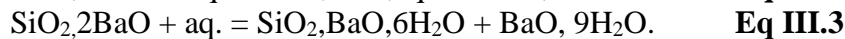
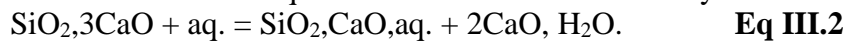
V. Michaelis, qui proposa en 1893 une théorie colloïdale, ne niait pas le fait de formation des cristaux lors du durcissement du ciment portland ; mais il considérait important de souligner non pas la résistance des ciments, mais leur « hydraulicité ». Le rôle essentiel dans l'acquisition des qualités de résistance, d'étanchéité à l'eau ainsi que d'autres propriétés du ciment durci sont attribués aux hydrogels des silicates, des aluminates et des ferrites de calcium se formant au cours du durcissement.

Selon Michaelis les hydrosilicates ne cristallisent pas lors du gâchage du ciment et le durcissement se réduit à la formation des gels par gonflement des grains du ciment en présence de l'eau, suivit de leur consolidation et de la germination des cristaux au sein de ces gels .

Le Chatelier en 1919 s'opposait à cette théorie, il déclarait [32] que les solutions colloïdales n'étaient pas de vraies solutions, mais simplement des suspensions de matière très finement divisée et rigoureusement insoluble.

Il donne l'exemple des aluminates de calcium, qui jouent un rôle important dans le durcissement des ciments à prise rapide. Les C<sub>3</sub>A s'hydratent au même rythme que le plâtre, et ils donnent également une masse blanchâtre. Si, au lieu de doser l'aluminate avec un peu d'eau, on met quelques grains isolés d'aluminate. On constate que les grains s'entourent de longs cristaux d'aluminate hydraté, bien visibles sous le microscope et peut parfois être vu directement à l'œil nu.

Un autre exemple, le silicate de calcium. Ses cristaux sont certainement très petits ; de nombreuses analogies empêchent cependant de nier leur existence. L'hydratation est exactement la même que dans le cas du silicate de baryum.



Les cristaux de chaux hydratée sont parfaitement visibles, comme ceux de la baryte hydratée ; ils peuvent atteindre des dimensions de plusieurs mm. Les cristaux de silicate de baryum sont toujours visibles à l'aide d'une lentille, parfois même à l'œil nu. En vertu de l'analogie, nous pouvons dire que le silicate de calcium hydraté cristallisera certainement aussi ; mais comme il est beaucoup moins soluble que les composés du baryum, les cristaux seront trop petits pour être discernables.

Depuis lors, des travaux expérimentaux sur le développement d'un modèle avaient commencé en 1934 par Powers et Brownyard. En 1946-1947 le premier modèle en pâte de ciment hydraté, le modèle « P-B », est publié par les deux chercheurs [33].

La structure du C-S-H, a été visualisé comme une sphère, dont la section transversale est représentée par les zones circulaires de la figure III-3.

Des particules non colloïdales de ciment n'ayant pas réagi (zone grisée) et d'hydrates colloïdaux, également appelés hydrate de silicate de calcium (zone tachetée) sont enfermées dans le gel sphérique. Les sphères sont entourées d'eau capillaire et bien que le système représenté sur la figure III.3.A soit en dessous de la saturation, lorsqu'il atteint la saturation, l'espace interstitiel sera rempli d'eau capillaire. La pâte représentée sur la figure III.3.B représente un rapport eau/ciment inférieur, les sphères se fusionnant les unes dans les autres, minimisant l'eau capillaire.

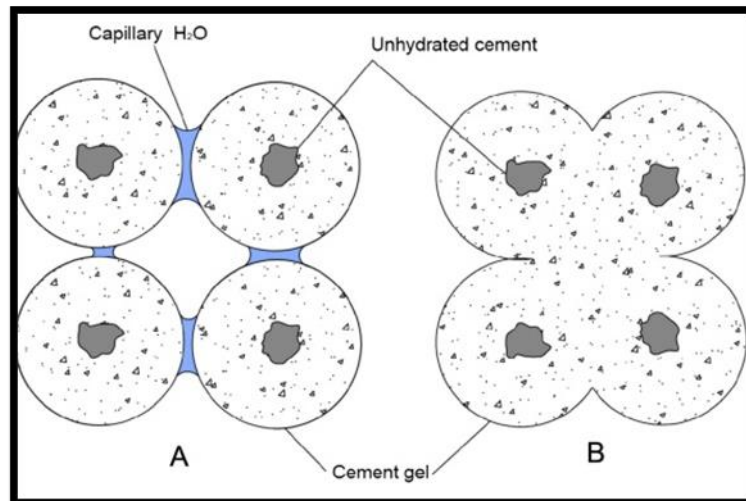


Figure III.3. Principaux constituants de la pâte de ciment hydraté

### III.1.2.3. La théorie mixte

En 1923 A. Baikov émit une théorie de durcissement des liants qui, dans une large mesure, a synthétisé les conceptions de Le Chatelier et de V. Michaelis. A. Baikov expliquait le durcissement par l'ensemble de la cristallisation et de la formation des gels. Il a énoncé le principe que tout liant hydraulique passe obligatoirement par une phase colloïdale et ceci même si en fin de compte il aboutit à une formation d'un véritable agrégat cristallin.

Selon Baikov [34], peu de temps après avoir mélangé le liant avec de l'eau, il se dissout, comme dans la théorie de Le Chatelier. Mais au moment où la concentration de saturation est atteinte, le processus de dissolution de la matière première doit s'arrêter, mais sa transformation chimique en hydrate ne peut pas s'arrêter. Par conséquent, les produits d'hydratation doivent être répartis sous la forme d'un système finement dispersé en raison de l'ajout direct d'eau aux grains de liant. Le noyau qui unit ces théories est qu'après la liaison des liants à l'eau, les hydrates se forment sous la forme de minuscules particules qui ont les propriétés des colloïdes et sont en équilibre avec l'environnement.

Que ces particules soient formées par précipitation à partir de solutions, ou lors d'une réaction topochimique d'hydratation, ou par dispersion de grains de ciment, les particules hydratées possèdent toutes les propriétés des formations colloïdales.

Dans cette théorie, on remarque deux phases : la prise ou l'étape colloïdale, qui permet le passage d'un état de suspension à celui d'un solide avec la formation de composés hydratés à haute dispersion colloïdale, puis le durcissement ou l'étape de cristallisation correspondant à l'évolution des caractéristiques physiques et mécaniques. Cette dernière étape commence par l'enveloppement des grains de ciment par les CSH et la cristallisation de la CH (figure III.4.A et B). Enfin, La pâte de ciment durcie par le remplissage graduel de l'espace entre les grains de ciment (figure III- 4 -C) [35].

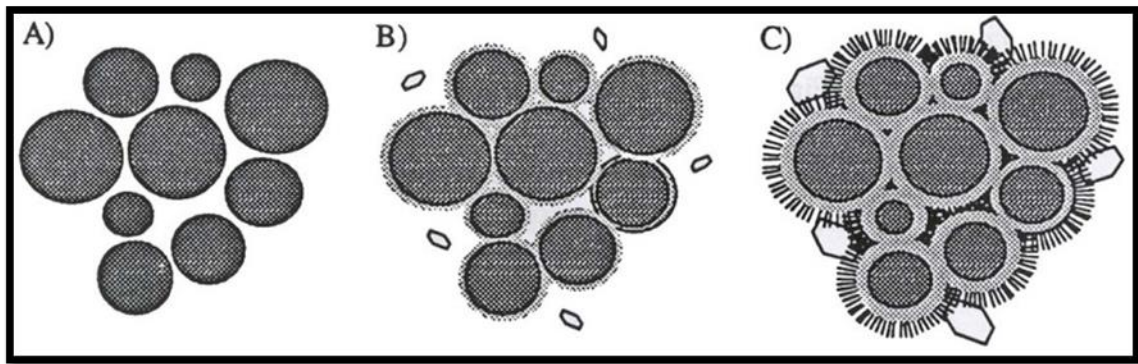


Figure III.4. Hydratation du grain de ciment.

### III.3. Mécanisme de durcissement

Le processus d'hydratation du ciment consiste en une série de réactions chimiques des composants anhydres qui composent le ciment, gypse et l'eau. Les conséquences de ces réactions et le durcissement de la "pâte".

#### III.3.1. Hydratation des silicates

##### III.3.1.1 Hydratation du silicate tricalcique $C_3S$

L'hydratation du silicate produit un gel de silicate de calcium hydraté et d'hydroxyde de calcium (figure III.5). La réaction du  $C_3S$  avec l'eau est la suivante :

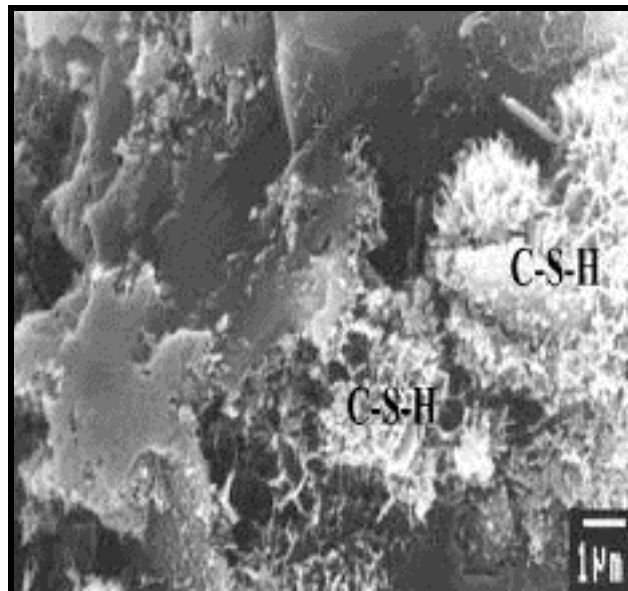
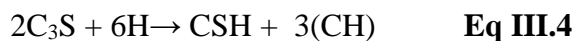


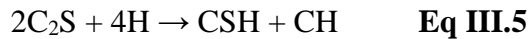
Figure III.5. C-S-H externe cristallisé par précipitation

##### III.3.1.2 Hydratation du silicate bi calcique $C_2S$

Son hydratation se fait de la même façon que  $C_3S$ . Ce composé existe sous différentes variétés polymorphiques ( $\alpha C_2S$ ,  $\beta C_2S$ ,  $\gamma C_2S$ ). [36]

## Chapitre III : Durcissement des ciments

La cinétique d'hydratation du  $\beta$   $C_2S$  est plus lente et la quantité de portlandite formée est plus faible. [37]



Le type de C-S-H dépend de son origine ( $C_3S$  ou  $C_2S$ ) et des conditions d'hydratation. De plus, le rapport E/C et le degré de maturation affecte la composition du gel de C-S-H. La progression de la réaction d'hydratation peut être suivie avec des mesures de calorimétrie et de conductivité (Figure III-6). L'hydratation des silicates peut être séparée en cinq périodes distinctes. [13]

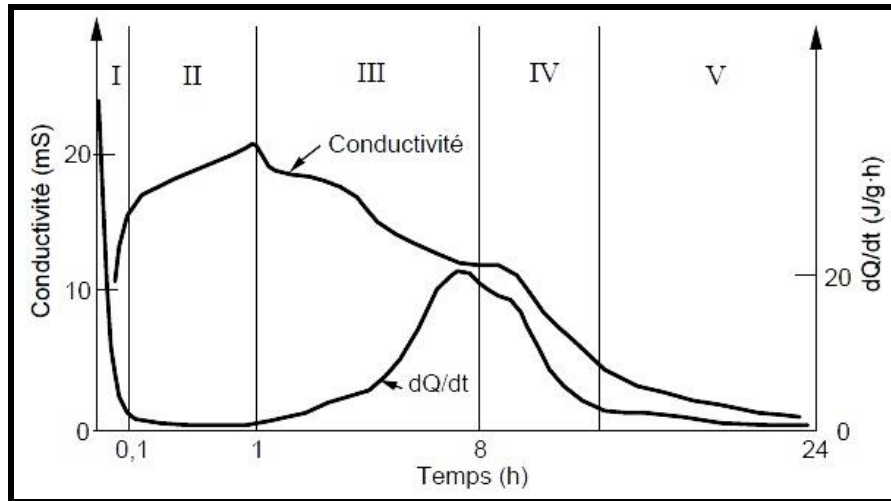


Figure III.6. Évolution du dégagement de chaleur et de la conductivité électrique lors de l'hydratation d'une pâte de  $C_3S$ .

### \*Période 1 : réactions initiales

Lorsque les silicates entrent en contact avec l'eau, les ions  $SiO_4^{4-}$  qui sont en surface des grains passent en solution (sous la forme de complexes  $H_2SiO_2^{4-}$  ou  $H_3SiO_2^-$ ). La présence de ces ions fait alors augmenter la conductivité du milieu. Une couche protectrice de C-S-H enveloppe les grains ne permettant plus la réaction entre les silicates et l'eau.

### \*Période 2 : période d'induction

Durant cette période (appelée aussi période dormante) il y a peu d'activité chimique, ce qui se traduit par un faible dégagement de chaleur. La concentration en calcium croît alors que celle en silice décroît. La conductivité augmente toujours, mais elle est plus faible que dans la 1ère période. Ainsi, il apparaît que des C-S-H dit métastables ( $C-S-H(m)$ ) continuent de se former autour des grains de  $C_3S$  alors que la portlandite ne se précipite pas. Cette période peut varier considérablement d'un type de mélange à l'autre.

## Chapitre III : Durcissement des ciments

---

### **\*Période 3 : période d'accélération**

Cette période est marquée par un fort dégagement de chaleur, ce qui se traduit par une activité chimique intense. En général, c'est durant cette période que survient la prise. Deux types de réactions mènent à la formation des C-S-H dit stables (C-S-H(s)) et de la portlandite : soit par l'hydroxylation des C-S-H(m), soit par celle des C<sub>3</sub>S. La formation de ces hydrates fait diminuer les concentrations ioniques de la solution interstitielle, ce qui se traduit alors par une baisse de la conductivité.

### **\*Période 4 : période de décélération**

La couche d'hydrates formée ne permet pas de réaction d'hydratation par diffusion. L'eau diffuse dans le matériau afin d'atteindre les composants anhydres du système, ralentissant alors considérablement la cinétique d'hydratation. Ceci correspond sur la courbe à une diminution de la chaleur dégagée. De même que pour la 3<sup>ème</sup> période, plus les hydrates se forment, moins il y a d'ions dans la solution interstitielle, ce qui entraîne une diminution de la conductivité.

### **\*Période 5 : période de consolidation**

Le ralentissement, dû au caractère diffusion de la réaction d'hydratation, peut s'étaler sur des mois ou des années.

### **III.3.2. Hydratation des aluminates :**

L'hydratation des aluminates étant très rapide, les cimentiers ajoutent du sulfate sous forme de gypse au clinker pour contrôler ces réactions. Ainsi, les réactions avec les aluminates se font en plusieurs étapes [37] :

#### **\*Étape 1 : Formation d'ettringite (phase AF<sub>t</sub>)**

Les aluminates réagissent avec le sulfate de gypse pour former de l'ettringite. Cette période de fort dégagement de chaleur correspond à la période de pré-induction, ou période dormante. Une couche d'hydrates vient entourer les aluminates qui forment alors une couche protectrice autour du grain.

#### **\*Étape 2 : Transformation de l'ettringite en monosulfate de calcium hydraté**

Lorsque la source de gypse s'est épuisée, la concentration en sulfates de la solution baisse. L'ettringite devient alors instable et se dissout pour former du monosulfate de calcium hydraté (appelé AF<sub>m</sub>).

Cette période est aussi appelée période d'accélération : les réactions chimiques s'intensifient.

#### **\*Étape 3 : Hydratation des aluminates résiduels**

Une fois que l'ettringite a fini sa transformation, les aluminates restants réagissent avec l'eau afin de donner trois types d'hydrates : C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> et C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>.

# Chapitre III : Durcissement des ciments

## III.4. Produits affectant l'hydratation du ciment

### III.4.1. Les adjuvants accélérateurs [38]

L'accélérateur de prise a pour fonction principale de diminuer les temps de début et de fin de prise du ciment dans les bétons, les mortiers ou les coulis. L'accélérateur du durcissement a pour fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiales des bétons, des mortiers ou des coulis. Bien souvent ces deux fonctions sont liées et l'on retrouve l'une d'elle comme effet secondaire de l'autre. Ils sont à recommander pour les bétonnages par temps froid, les décoffrages rapides, les scellements, les travaux en galerie, les travaux sous l'eau, etc. Il est à noter qu'un béton fortement accéléré, au moyen d'adjuvants, risque d'avoir une résistance mécanique finale légèrement diminuée.

Cette catégorie d'adjuvants est basée principalement sur les principales matières premières, le chlorure de calcium, le nitrate de calcium, le formiate de calcium et le thiocyanate de calcium, avec des quantités mineures d'autres matériaux parfois inclus dans les formulations, comme le thiosulfate de calcium et la triéthanolamine. (TEA). Le TEA n'est normalement pas utilisé seul, mais comme il est parfois utilisé dans d'autres catégories d'adjuvants pour compenser les influences retardatrices, il sera inclus dans cette section.

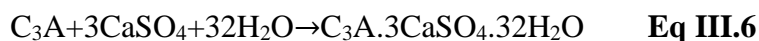
Dans le cas du chlorure de calcium comme exemple, Les points suivants concernent les réactions se produisant dans les pâtes de ciment Portland contenant des proportions normales de C<sub>3</sub>A, C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>4</sub>AF et de gypse en présence de chlorure de calcium.

\* Il n'y a de réaction chimique entre le chlorure de calcium et les C<sub>2</sub>S et C<sub>3</sub>S bien que leur vitesse de réaction soit augmentée.

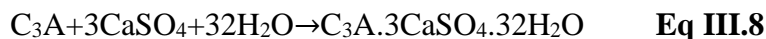
\*Le chlorure de calcium ne réagit pas avec les pâtes de ciment pendant une période de 2 à 6 h après le mélange, bien qu'une prise rapide puisse se produire pendant cette période.

\*Des nouvelles formations entre le C<sub>3</sub>A, le gypse et le chlorure de calcium et la disparition des produits initiaux sont présentés schématiquement à la Figure III.7 et peuvent être résumés comme suit :

A) Au premier contact entre la solution de chlorure de calcium et les particules de ciment, le gypse et le chlorure réagissent pour former respectivement de très petites quantités d'ettringite et de chloroaluminate de calcium :



B) Le gypse continue à réagir pour former de l'ettringite alors que le chlorure de calcium ne réagit pas, mais peut continuer à favoriser l'hydratation du silicate :



c) Lorsque tout le gypse a été consommé, le chlorure de calcium recommence à réagir avec le C<sub>3</sub>A jusqu'à ce que le chlorure en solution soit réduit à peu près à zéro :



d) Lorsque l'ion chlorure a été éliminé, le C<sub>3</sub>A restant est hydraté pour donner C<sub>3</sub>A.Ca(OH)<sub>2</sub>.12 H<sub>2</sub>O, qui convertit alors le trisulfoaluminate en monosulfoaluminate :



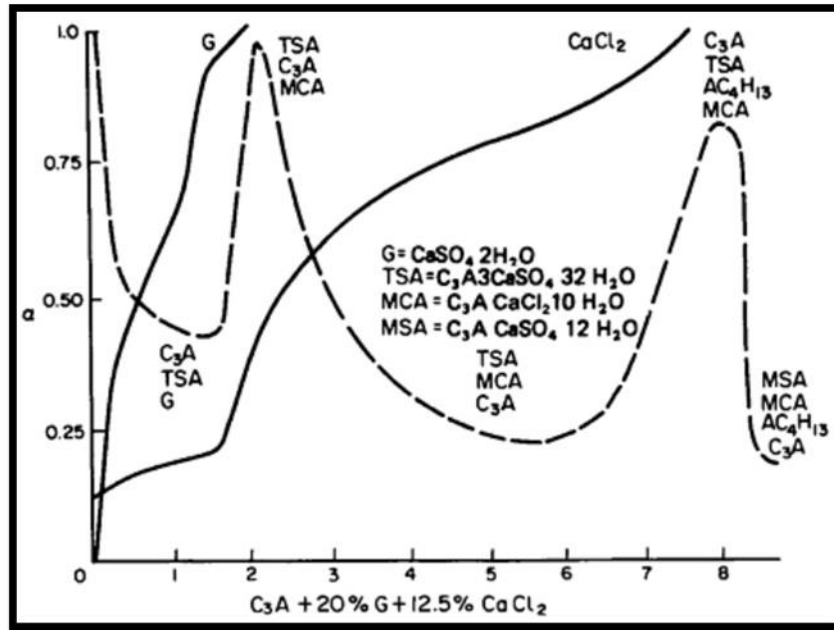


Figure III.7. Composition d'une pâte constituée de  $\text{C}_3\text{A}$  et de gypse en présence de chlorure de calcium à différents temps.

### III.4.2. Effet du carbonate de calcium :

L'ajout de calcaire étant de plus en plus utilisé dans la fabrication du ciment, l'effet de ce composant sur l'hydratation du ciment et les propriétés de la pâte de ciment a fait l'objet de multiples études.

Le calcaire était considéré comme une charge inerte dans la pâte, cependant, la réaction entre le carbonate de calcium et les aluminates pour former des hydrates de carboaluminate de calcium a été démontrée. La vitesse de dissolution du  $\text{CaCO}_3$  est faible et donc les produits de réaction n'apparaissent que dans la zone étroite de l'interface.

La phase  $\text{C}_3\text{A} \cdot \frac{1}{2}\text{CO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  se forme d'abord puis se transforme lentement en  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ . Les hydrates de carboaluminate de calcium dans la zone de transition modifient la surface de l'agrégat ; il devient plus rugueux et la liaison pâte-granulat se renforce.

En présence de  $\text{CaCO}_3$ , l'hydratation du  $\text{C}_3\text{S}$  est accélérée (figure III.8) surtout avec l'augmentation de la finesse [27]. La période d'induction est raccourcie et la chaleur dégagée dans la zone du second pic augmente, le mécanisme de cet effet du  $\text{CaCO}_3$  n'est pas expliqué ; peut-être que les cristaux de calcite jouent un rôle de noyaux hétérogènes et facilitent la cristallisation  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . D'autre part, il existe des hypothèses selon lesquelles le  $\text{CO}_3$  peut entrer dans l'espace intercalaire en C-S-H.

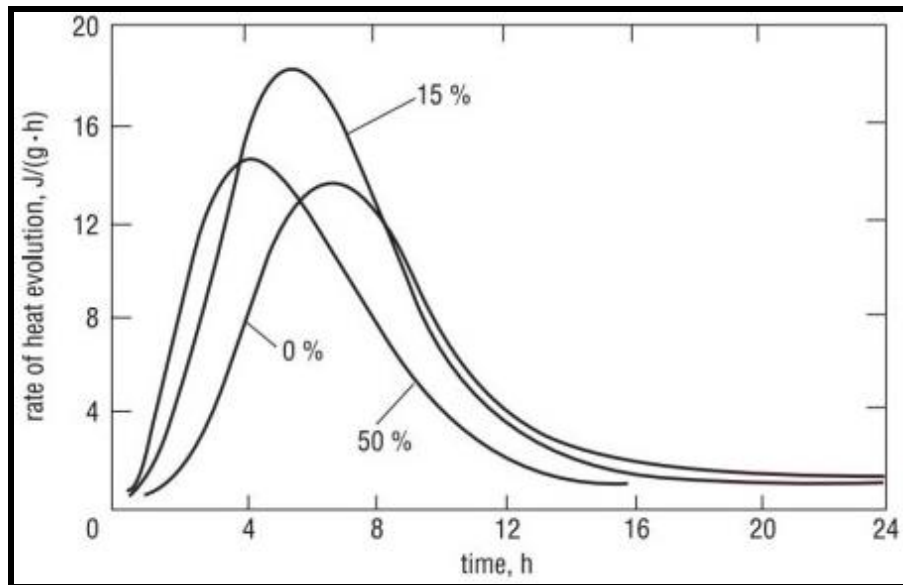


Figure III.8. Vitesse de dégagement de chaleur pendant l'hydratation du C<sub>3</sub>S avec différents ajouts de CaCO<sub>3</sub>

### III.4.3. Retardateurs de durcissement :

Introduits dans l'eau de gâchage, ils ont pour fonction principale d'augmenter le temps de début de prise et le temps de fin de prise du ciment dans le béton, le mortier ou le coulis. En général, les retardateurs freinent la diffusion de la chaux libérée par l'hydratation du ciment et retardent de ce fait la cristallisation. Par rapport au témoin, l'augmentation du temps de début de prise est comprise entre une heure et deux heures. Au-delà de vingt-huit jours et souvent même dans un délai plus court, les résistances mécaniques sont en général augmentées par rapport au témoin. Les retardateurs de prise sont particulièrement recommandés pour les bétonnages par temps chaud et les bétonnages en grande masse. Ils permettent aussi de faciliter les reprises de bétonnage.

La plupart des adjuvants retardateurs sont commercialisés en tant que produits retardateurs plastifiants/superplastifiants multifonctions. Ils sont basés sur les mêmes produits chimiques que les adjuvants dispersants mais ont de la mélasse, du sucre ou du gluconate ajouté pour fournir le retard. Les retardateurs purs sont généralement à base de gluconate et/ou de saccharose bien que ceux-ci plastifient également.

Les phosphates sont parfois utilisés et retardent avec peu d'action plastifiante. Un surdosage important de la plupart des adjuvants retardateurs conduit rapidement à de grandes prolongations du temps de prise de plusieurs jours et, dans des cas extrêmes, peut empêcher le ciment de s'hydrater correctement et de gagner en résistance. Les phosphates sont plus tolérants au surdosage mais sont moins efficaces dans la plupart des applications et sont rarement utilisés [39].

Yan et al. [40] ont étudiés l'effet de trois types d'adjuvants à base d'amidon, le glucose, la dextrine soluble et un inhibiteur d'élévation de température appelé « TRI » sur le processus exothermique d'hydratation du ciment. Ils constatés, un retard dans l'apparition du pic d'hydratation principal.

## Chapitre III : Durcissement des ciments

Les dextrines solubles par exemple sont moins efficaces pour retarder le pic principal d'hydratation à faible dosage que le glucose. Lorsque le dosage augmente jusqu'à 0,2%, les dextrines solubles peuvent retarder le pic d'hydratation principal davantage. Du point de vue du dégagement de chaleur, les dextrines solubles sont plus efficaces pour atténuer la forte augmentation de la chaleur cumulée lors de l'hydratation précoce, ce qui est utile pour réduire le risque de fissuration thermique (figure III.9).

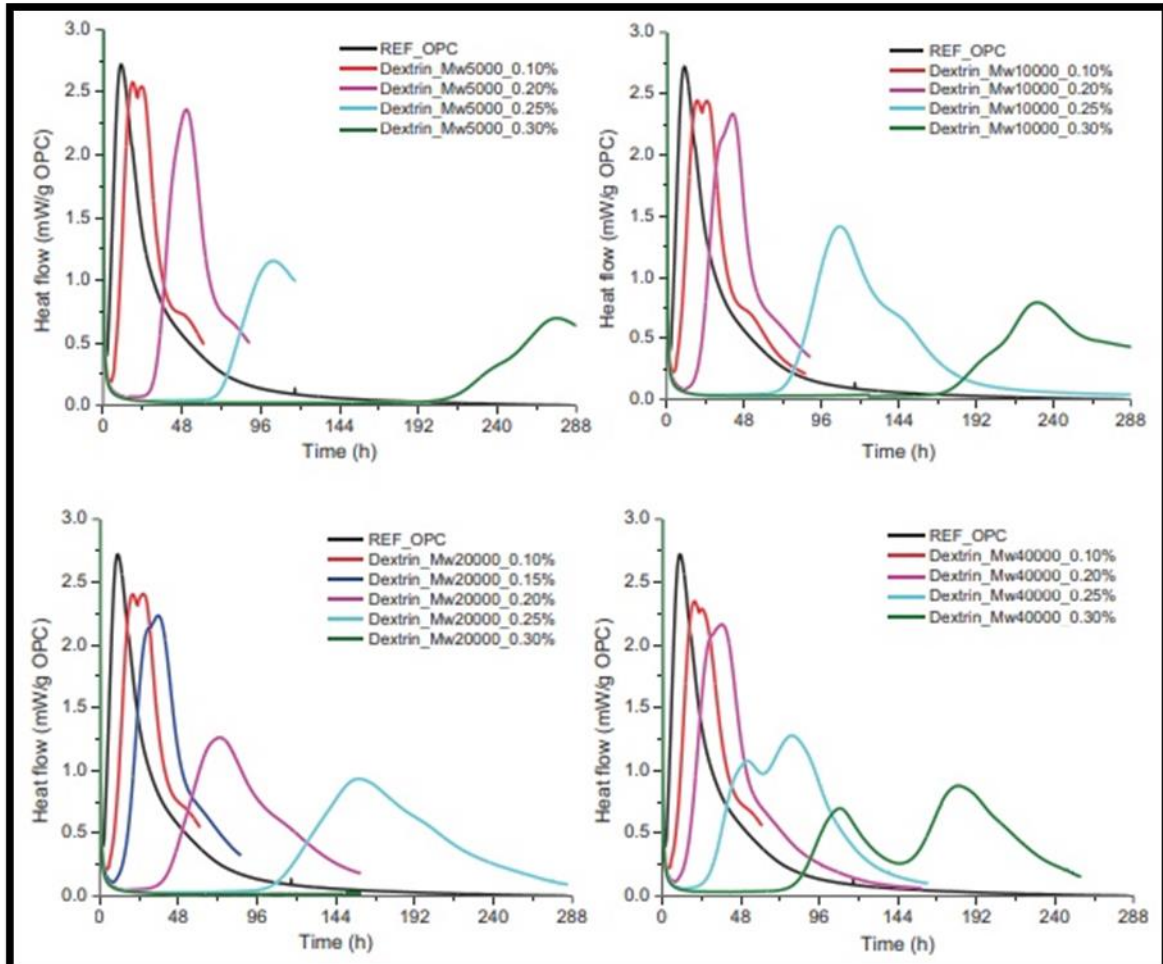


Figure III.9. Effet de la dextrine soluble sur la courbe de flux de chaleur de l'hydratation du ciment.

### III.5. Rôle des ajouts dans le mécanisme de durcissement du ciment :

La compréhension de la cinétique de réaction dans les systèmes mixtes, est compliquée par le fait que l'hydratation se produit simultanément et plus important encore, par la difficulté à mesurer indépendamment le degré de réaction de ces deux composants. Pour ces raisons, chaque ajouts cimentaires à ces propres atouts.

#### III.5.1. Laitier des hauts fourneaux :

Dans le travail de Shumuye et al [5] . ils démontrés que la résistance à la compression à 7 jours dans la condition de température de durcissement élevée pour les groupes de béton a augmenté, par rapport à la condition de durcissement normal. Cependant, à long terme, les variations de résistance à la compression sont devenues négatives.

## Chapitre III : Durcissement des ciments

---

Sous un durcissement à température élevée, le taux de perte d'eau du béton est plus rapide, ce qui conduit à plus de porosité dans la structure en béton et influence significativement sa résistance. Une exposition à une température de durcissement élevée est favorable pour accélérer la vitesse de la réaction d'hydratation du ciment. La promotion de cette réaction entraîne un développement rapide de la résistance au cours du temps de durcissement initial. La formation de gels C-S-H présentant des structures en forme d'aiguilles aux premiers âges retarde le processus d'hydratation ultérieur en raison de la réduction de la résistance à la compression à un âge plus avancé en raison de structures plus poreuses et moins cohésives.

A long terme, les éprouvettes de béton durcies à  $45 \pm 2$  °C n'ont pas présenté de meilleurs résultats de résistance à la compression que celles durcies à  $20 \pm 2$  °C. Ceci est attribué à la réactivité du laitier à hautes températures. Ceci indique qu'un durcissement prolongé à de basses températures, est plus bénéfique pour le développement de la microstructure du béton à base de laitier.

Dans une autre étude Han et al. [41] ont étudiés la chaleur d'hydratation d'un liant contenant jusqu'à 70 % de laitier à différentes températures (25°C, 45°C et 60°C). Ils remarquaient que le laitier montre une activité pouzzolanique dans une solution fortement alcaline et l'augmentation de son pourcentage retarde l'hydratation et réduit le taux exothermique (figure III.10).

Une augmentation du taux de remplacement du ciment par le laitier prolonge le temps de fin de la période d'induction et réduit la deuxième valeur maximale du taux d'évolution de la chaleur d'hydratation du liant composite. Ceci est lié à la diminution de la quantité de ciment Portland. Le temps nécessaire aux produits d'hydratation pour atteindre la sursaturation augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier. Le taux d'évolution de la chaleur d'hydratation du laitier est évidemment inférieur à celui du ciment Portland, ce qui conduit à un taux d'évolution de la chaleur d'hydratation global plus faible du liant composite.

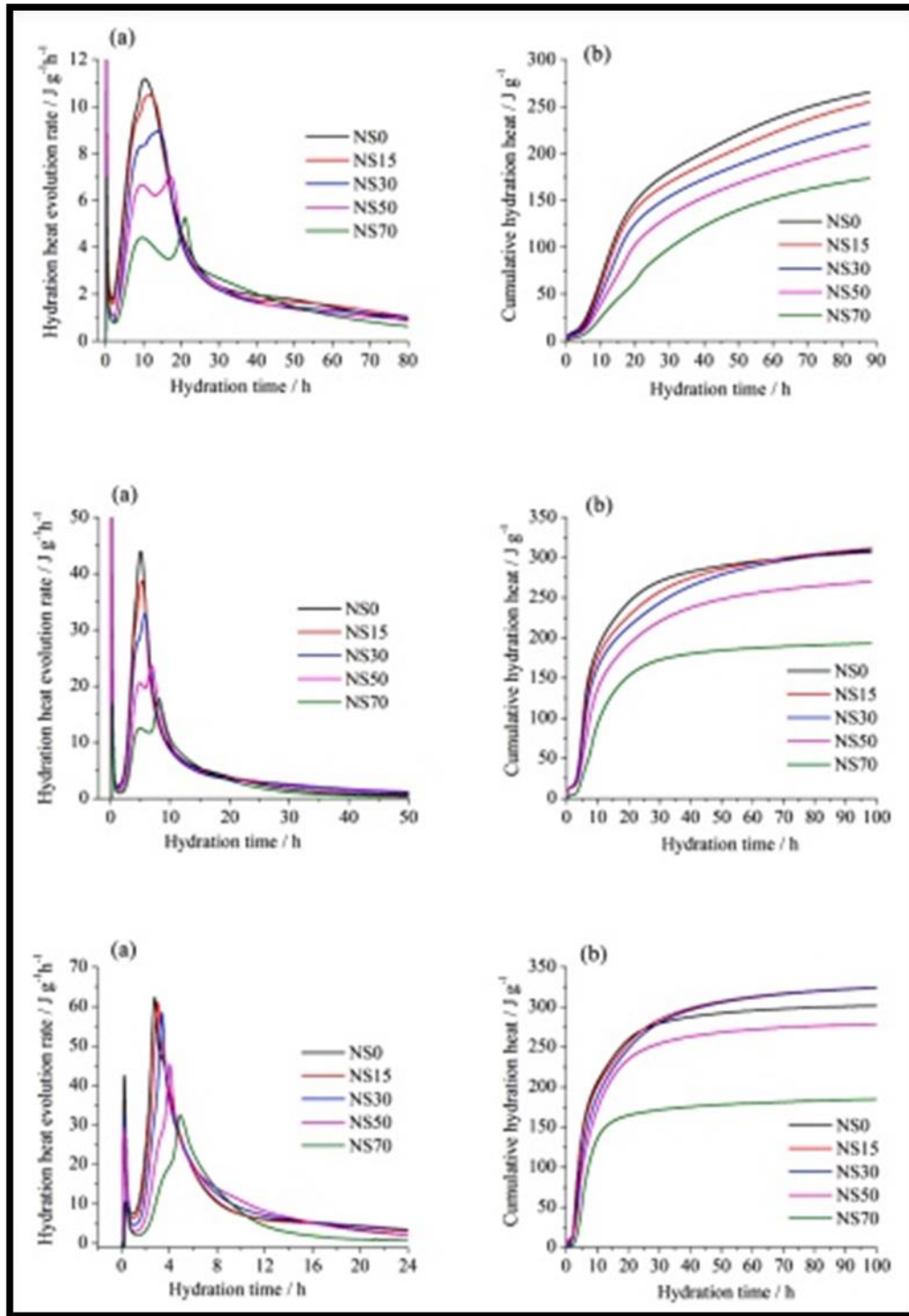


Figure III.10. Chaleur d'hydratation des liants à 25°C, 45°C, et 60°C, de haut en bas respectivement.

Cet effet de température, est aussi étudié par Joseph & Cizer [42] . Entre 10°C et 20°C, un mortier à base de CEMIII/B, ne se comporte pas de la même manière. L'intensité du premier pic augmente avec une augmentation de la température (figure III.11)

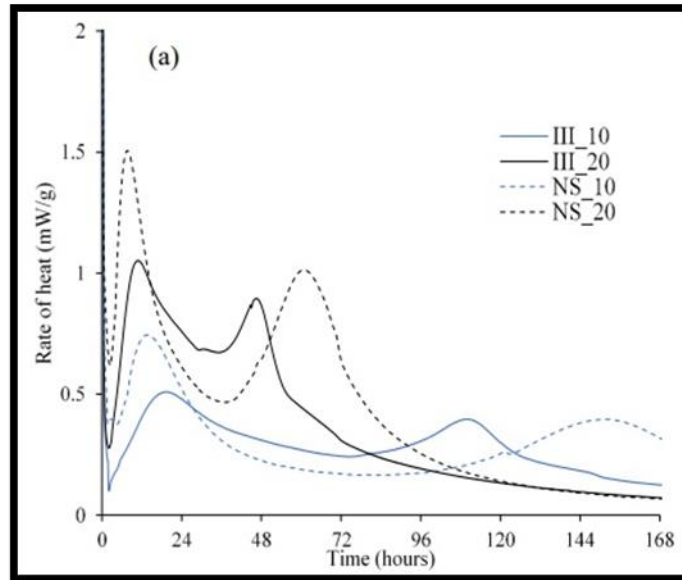


Figure III.11. Taux de dégagement de chaleur mesurés par un calorimètre isotherme

Cela indique un degré plus élevé de réaction de l'alite à jeune âge. Le tableau III.1, confirme (à partir du DRX) que le degré d'hydratation de l'alite après 1 jour est significativement amélioré avec l'augmentation de la température de durcissement.

Tableau III.1. Degré d'hydratation (%) et poids absolu (g/100 g anhydre) entre parenthèses des différentes phases de clinker déterminées.

|                    | Age (Days) | C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
|--------------------|------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| CEM III/B<br>42.5N | 0          | 0 (18.0)         | 0 (2.3)          | 0 (2.0)          | 0 (2.0)           |
|                    | 1          | 37.4 (11.3)      | 18.4 (1.9)       | 10.6 (1.8)       | -7.7 (2.2)        |
| III_10             | 7          | 92.5 (1.3)       | -11.9 (2.6)      | 75.0 (0.5)       | 19.3 (1.6)        |
|                    | 28         | 93.8 (1.1)       | 4.9 (2.2)        | 100 (0)          | 17.1 (1.7)        |
|                    | 90         | 96.3 (0.7)       | 28.4 (1.6)       | 100 (0)          | 62.7 (0.7)        |
| III_20             | 1          | 70.3 (5.3)       | 0.6 (2.3)        | 17.0 (1.7)       | 38.6 (1.2)        |
|                    | 7          | 94.7 (1.0)       | -14.7 (2.6)      | 94.4 (0.1)       | 40.4 (1.2)        |
|                    | 28         | 93.3 (1.2)       | -13.3 (2.6)      | 100 (0)          | 51.0 (1.0)        |
|                    | 90         | 98.0 (0.7)       | 35.7 (1.5)       | 100 (0)          | 71.6 (0.6)        |

### III.5.2. La cendre volante

Avec ses excellentes performances en termes d'avantages économiques et écologiques, les cendres volantes sont le mélange minéral le plus largement utilisé pour l'industrie de la construction dans le monde entier.

Les caractéristiques physiques et chimiques des cendres volantes varient considérablement selon le type de charbon utilisé à la centrale et les équipements. En remplaçant 25 % en poids de ciment par 16 types de cendres volantes, les résistances à la compression des mortiers ont été évaluées par Cho et al.[43] . La réaction pouzzolanique des cendres volantes a été significativement affectée par les composants SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, qui forment la charpente de la phase vitreuse, et les composants CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O et K<sub>2</sub>O, qui dépolymérisent la structure vitreuse.

Dans la réaction pouzzolanique des cendres volantes, la réactivité de la surface des particules de cendres volantes est augmentée en raison des ions Na et K qui sont dissous dans les cendres, et des hydrates Ca-Si et Ca-Al sont créés lorsque le Si et Al dissous les ions réagissent avec Ca(OH)<sub>2</sub>, qui est un produit du processus d'hydratation du ciment. De plus, la phase amorphe des cendres volantes est dissoute par OH lors de la réaction pouzzolanique ; par conséquent, une concentration suffisante d'OH est nécessaire pendant la réaction. De

## Chapitre III : Durcissement des ciments

plus, la solution interstitielle utilisée dans le processus d'hydratation du ciment doit être maintenue à 20 °C pendant au moins une semaine pour augmenter la concentration en OH de la solution afin d'atteindre un pH de 13,3 ou plus. Par conséquent, la réaction pouzzolanique ne se produit qu'après 1 semaine.

En termes de finesse Han et al. [44] étudiés l'effet d'une cendres volantes ultrafines (UFA) et une cendre volante fine (FA) sur le comportement des pâtes. Avec une substitution du ciment à hauteur de 25 et 50%, ces produits montrés une chaleur d'hydratation cumulée inférieure à celle de la pâte de ciment au début de l'étape d'hydratation (figure III-12).

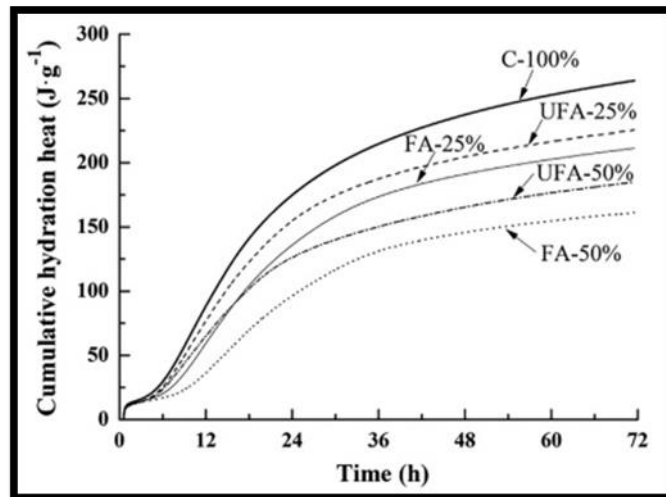


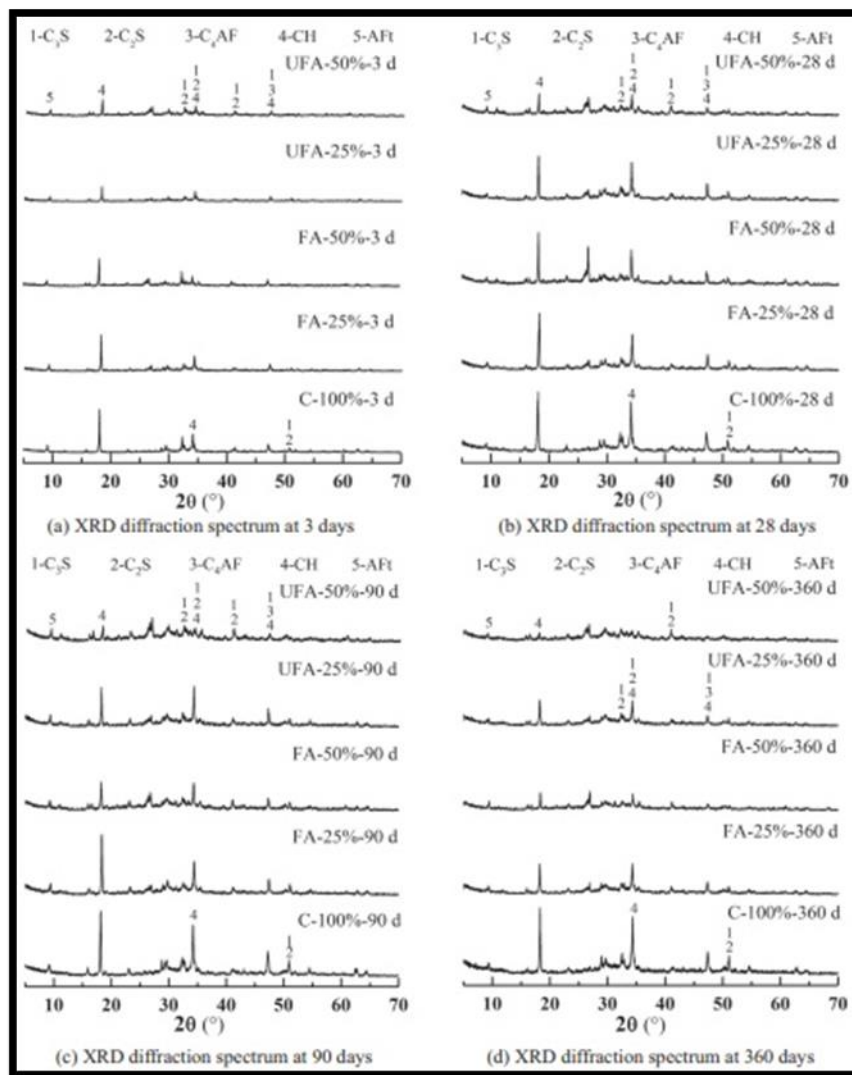
Figure III.12. La chaleur d'hydratation cumulées en 72 heures

Ces résultats valident l'effet nucléant et l'effet pouzzolanique des UFA est meilleur que le FA au cours du processus d'hydratation précoce.

Dans la même étude Han et al. constatait à travers le spectre de diffraction XRD de pâtes durcies avec un temps de durcissement de 3, 28, 90 et 360 jours, qu'aucun nouveau produit d'hydratation n'a été généré pour les pâtes (Figure III.13) . La seule différence réside dans l'intensité du pic de diffraction de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

L'ajout de FA ou d'UFA dans le composite réduit la teneur en ciment, par conséquent une teneur en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dans les produits d'hydratation relativement plus faible. Mais, les FA ou UFA dans fournit plus de  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ces composés réagissent avec  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Par conséquent, pour la pâte de ciment, l'intensité du pic de diffraction de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  était plus élevée que les autres.

L'intensité du pic de diffraction de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de la pâte UFA à chaque âge de durcissement était inférieure à celle de la pâte FA, ce qui signifie que la consommation de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  par UFA est plus évidente en raison de l'étendue de la réaction pouzzolanique. L'intensité du pic de diffraction du  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de l'UFA augmente relativement de 3 jours à 28 jours, ce qui indique que l'hydratation du ciment joue un rôle prédominant dans cette étape. Après 28 jours, l'intensité du pic de diffraction de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  diminue pour la pâte UFA, ce qui indique que l'hydratation joue un rôle majeur. Cependant, pour la pâte FA, l'hydratation n'était évidente que 90 jours plus tard.



**Figure III.13. DRX des pâtes durcies**

Dans la modélisation de Sun et al. [45] (Figure III.14), ils illustrent l'évolution de l'assemblage des phases à l'équilibre et des volumes des phases des pâtes de ciment mélangées avec un Haut Volume de cendres volantes « HVFA » hydratées en fonction du temps. Au fur et à mesure que l'hydratation progresse, les phases anhydres se dissolvent progressivement et le volume d'hydrates change en conséquence dans tous les mélanges étudiés.

En l'absence de cendre volante, C-S(A)-H, CH et AF<sub>t</sub> sont les principaux hydrates comme le montre la Figure III.14a. Avec un rapport SO<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> élevé, le C<sub>3</sub>A réagit avec le gypse et l'eau pour former l'AF<sub>t</sub>. Le volume de cette dernière diminue après environ 12 h, car le gypse s'est épuisé. De plus, le monosulfate a été consommé avec plus d'ettringite formée au cours de ce processus. Ces deux effets rendent le volume d'AF<sub>t</sub> stable et expliquent également la quantité assez faible de monosulfate dans le système PC.

Lorsque le ciment a été remplacé par du HVFA, un autre assemblage de phases s'est constitué avec un volume d'hydrate différent (Figure III.14b – d). La figure 14b (40% de ciment remplacé par FA), le processus d'hydratation peut être divisé en deux étapes en présence de HVFA. La première étape s'est produite aux premiers temps d'hydratation. En raison des quantités inférieures de ciment dans les mélanges et de la plus faible activité de réaction du HVFA par rapport au ciment, les volumes des principaux

## Chapitre III : Durcissement des ciments

hydrates, principalement C-S(A)-H et CH, ont augmenté de manière continue mais bien inférieurs à ceux du PC au cours de cette étape.

La deuxième étape s'est produite après 7 jours d'hydratation. Contrairement à la première étape, on constate que la teneur en CH diminue et que le taux de formation de C-S(A)-H augmente. Cette observation résulte de la réaction pouzzolanique de HVFA par laquelle la CH a été consommé et du C-S(A)-H supplémentaire s'est formé.

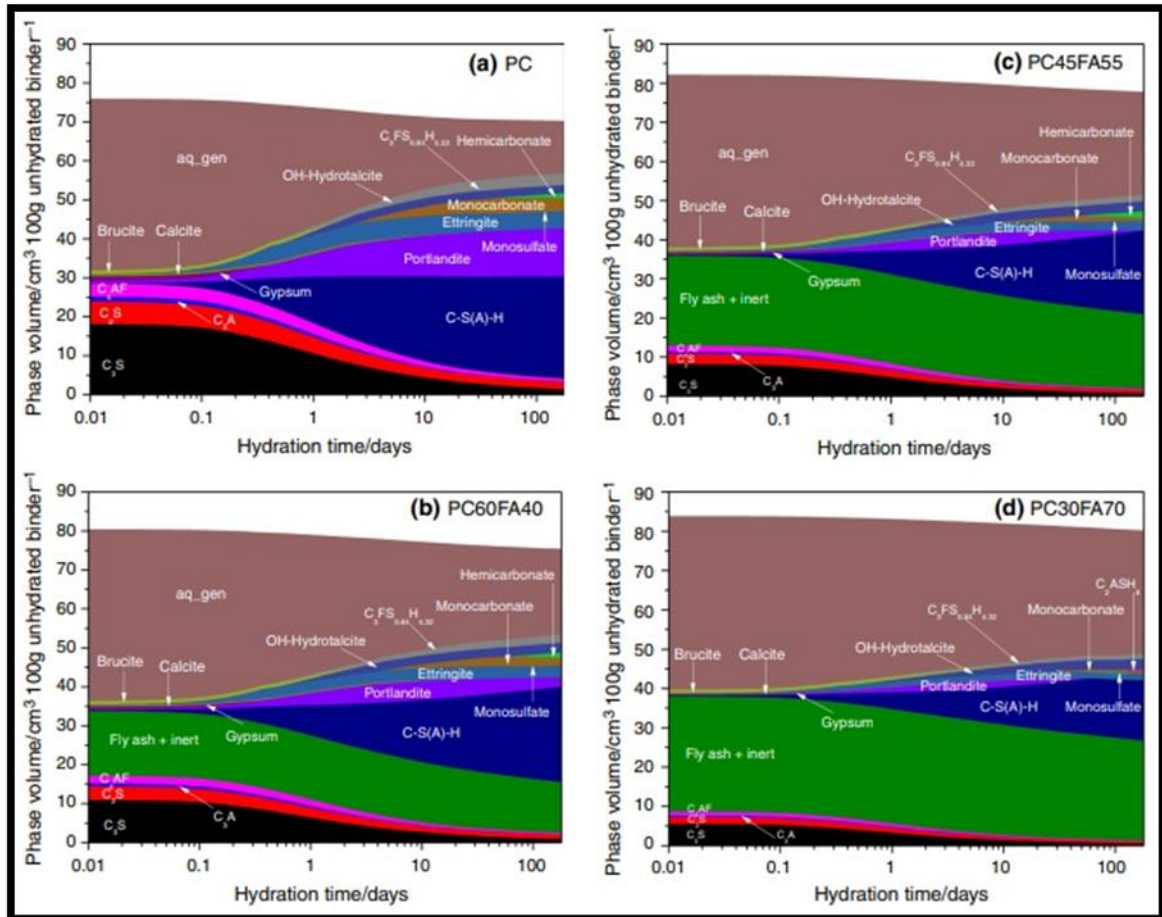


Figure III.14. Le volume des différentes phases en fonction du temps calculé par modélisation thermodynamique

### III.5.3. La fumée de silice

Les particules de fumée de silice sont extrêmement petites, avec plus de 95 % des particules plus fines que 1  $\mu\text{m}$ . Il est composé essentiellement de silice pure sous forme non cristalline.

Sous une température de 5°C, Li et al. [46] étudiaient l'effet des fumées de silice d'une densité de 2,20 et d'une surface spécifique de 22500  $\text{m}^2/\text{kg}$  sur le flux de chaleur d'hydratation (la substitution du ciment par la fumée de silice est 2 %, 5 %, 8 %, 10% et 12%). Lorsque le liant comprenait de la fumée de silice, la période d'induction d'hydratation est raccourcie et le taux exothermique a augmenté pendant la période d'accélération.

Au début de l'hydratation (figure III.15), la fumée de silice est hydrolysée et forme des ions  $\text{SiO}^-$  chargé négativement, qui se combinent avec les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et l'ion alcalin pour former des hydrates de silicate de calcium (C-S-H). De plus, en tant que charge active, la fumée de silice apporte une densité de nucléation accrue qui raccourcie la durée de sa période d'induction.

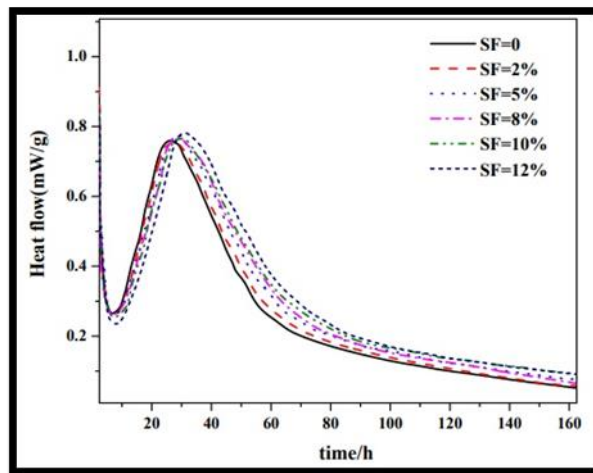


Figure III.15. Flux de chaleur des liant fumée de silice/ciment.

Cette amélioration de la nucléation conduisant à une activité accrue à comme résultat l'amélioration de la résistance à la compression. Jeong et al. [47] dans leur étude sur mortier à base de ciment substitué par 5 et 10% (SF5 et SF10) constaté une amélioration visible de la résistance par rapport à la référence (Figure III.16).

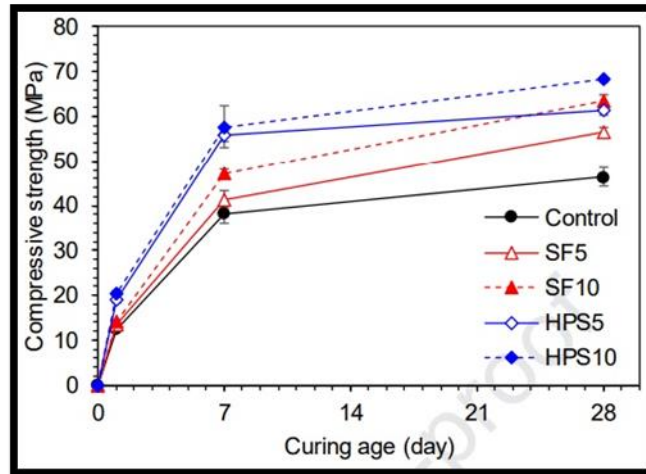


Figure III.16. Résistance à la compression des mortiers avec fumée de silice

Cette activité est dû à la consommation de la portlandite. Les courbes dérivées thermogravimétrique DTG présentées sur la figure III.17 (SF10 comme exemple) de la même étude indique les pics suivants :

- La perte de poids large entre 100 et 200°C, est principalement attribués aux déshydratations de l'ettringite et de C-S-H, respectivement. Les petits pics autour de 150°C proviennent des déshydratations des phases carbonatées AF<sub>m</sub>, c'est-à-dire monocarboaluminate et hémicarboaluminate. Ces pics de déshydratation des phases d'AF<sub>m</sub> carbonatées ne sont pas clairement identifiés dans tous les échantillons après 1 jour, mais apparaissent après 7 jours.
- Les pics autour de 430°C sont dus à la déshydroxylation de la portlandite.
- Les pertes de poids après 500°C sont attribuées à la décarbonation des phases calcite ou clinker.

Cette figure (III.17) confirme que les pertes de poids totales augmentent avec le temps, quels que soient les échantillons, ce qui implique que davantage de produits d'hydratation sont produits avec l'âge de durcissement.

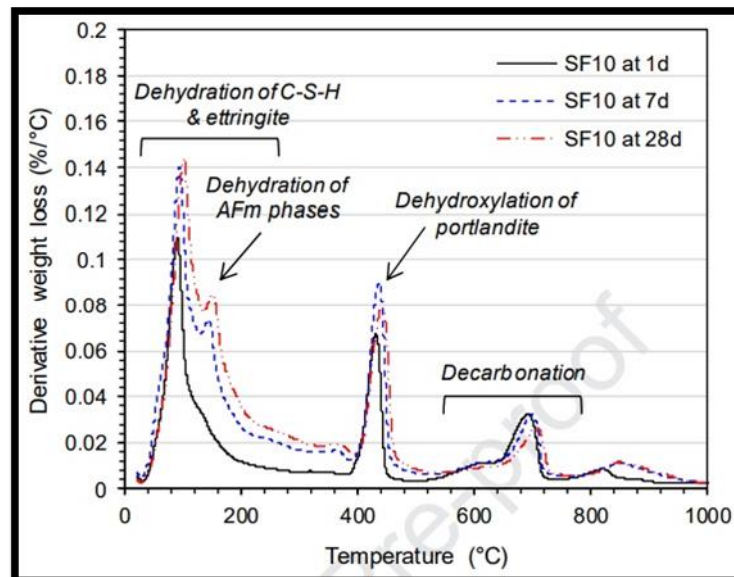


Figure III.17. Courbes DTG en fonction du temps de durcissement de SF10.

Le tableau III.2 montre la teneur en portlandite calculée. Tous les échantillons contenant de la fumée de silice contiennent moins de portlandite que l'échantillon témoin en raison de la faible teneur en clinker et de la réaction pouzzolanique induite avec la silice.

## Chapitre III : Durcissement des ciments

Ainsi, la réaction pouzzolanique a produit plus de produits d'hydratation de C-S-H, contribuant à l'augmentation de la résistance à la compression.

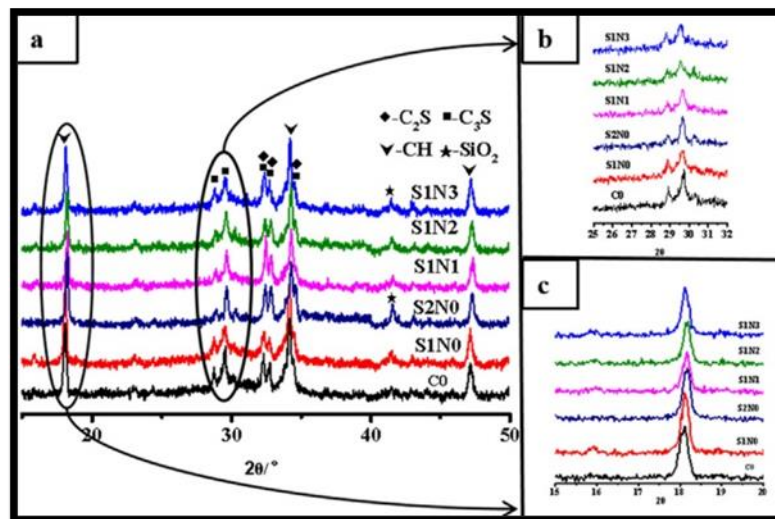
**Tableau III.2. Pourcentage de portlandite calculé selon la DTG**

|                | 1 day | 7 days | 28 days |
|----------------|-------|--------|---------|
| <b>Control</b> | 7.90  | 15.62  | 16.70   |
| <b>SF5</b>     | 7.54  | 13.19  | 12.89   |
| <b>SF10</b>    | 7.86  | 11.71  | 11.47   |

Selon la finesse de la fumée de silice, Wang et al.[48] ont étudiées l'effet simultané d'une fumée (avec une taille moyenne de 0.1 $\mu$ m) de silice et des nano-silice (surface spécifique 300 m<sup>2</sup>/g et la taille des particules était d'environ 7 à 40 nm). La fumée de silice a remplacé le ciment haut résistant aux sulfates de 5% (S1) et 10% (S2).

Les compositions minérales des pâtes hydratées pendant 28 jours sont présentées à la Figure III.18. On peut voir que les principales compositions minérales de toutes les pâtes contiennent du CH et du C<sub>2</sub>S et C<sub>3</sub>S non hydratés. Il convient de noter que l'ettringite n'a pas été trouvée dans les produits d'hydratation, car le ciment est un haut résistant aux sulfates. De plus, les pâtes avaient du SiO<sub>2</sub> n'ayant pas réagi, ce qui indique qu'elle joue un rôle de remplissage physique dans les pâtes.

Les figures III.18 (b) et (c), indiquent que 5% en poids de la fumée de silice pourraient favoriser l'hydratation du C<sub>3</sub>S et consommer le CH par hydratation secondaire. De plus, l'ajout de la nano-silice avec 5% en poids de la fumée de silice affaiblit le pic caractéristique de CH, ce qui se traduit par une réactivité pouzzolanique plus élevé.



**Figure III.18. DRX à 28 jours des pâtes étudiées**

# Chapitre III : Durcissement des ciments

## III.5.4. Les argiles calcinées

Selon le type d'argile calcinée utilisé dans le liant et selon le type de liant (binaire ou ternaire), les produits d'hydratation sont différents.

Cardinaud et al.[49] ont substitués CEM I 52.5R par deux argiles calcinées entre 800 et 850° C. La première argile, appelée « CC1 », contenait 68% de métakaolin, le second, appelé « CC2 », contenait 21 % de métakaolin. La figure III.19 montre les diagrammes DRX pour les systèmes étudiés après 2, 28 et 90 jours d'hydratation (à cause de la grande taille de la figure d'origine on a choisi les diagrammes DRX à 90 jours).

Après deux jours d'hydratation, les deux principales phases détectées par DRX sont la portlandite et l'ettringite ; les pics associés au monosulfoaluminate et à l'hémicarboaluminate peuvent être légèrement identifiés dans les deux mélanges binaires. Selon les auteurs, bien que non clairement visible sur la figure 2, la teneur en portlandite est toujours plus élevée pour PC<sub>100</sub>.

A 28 jours, dans le mélange binaire PCC2<sub>25</sub>, le monosulfoaluminate était largement formé, plus que dans PCC1<sub>25</sub>. Cependant, le mélange PCC1<sub>25</sub> montre la formation de strätlingite (C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub>). Ce résultat peut s'expliquer par la composition de l'argile calcinée utilisée dans PCC1<sub>25</sub>, avec une teneur plus élevée en alumine.

Après 90 jours d'hydratation, les tendances observées à 28 jours se renforcent. Le mélange PC<sub>100</sub> présentait la teneur en portlandite la plus élevée (Fig. 3b). Tous les mélanges contenant de l'argile calcinée indiquent une consommation de portlandite. En comparant les deux mélanges binaires de substitution à 25 %, le PCC2<sub>25</sub> avait une teneur en portlandite plus élevée, ce qui suggère que CC2 a un potentiel pouzzolanique inférieur à CC1.

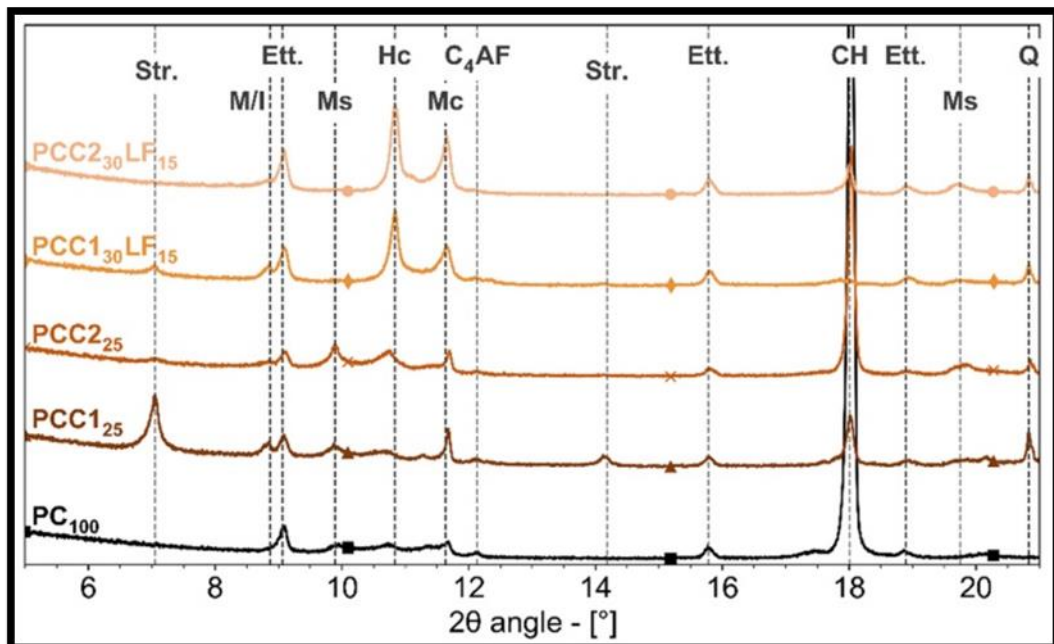


Figure III.19. Diagrammes DRX pour les trois mélanges à 90 jours d'hydratation.

## Chapitre III : Durcissement des ciments

Dans le cas de l'illite, Marchetti et al. [50] étudiés deux pâtes élaborées par la substitution de 25% de ciment . Deux types d'illite différentes MI1 et MI2 calcinés à 950 C, ont une densité spécifique égale à 2,63g/cm<sup>3</sup> et 2,72g/cm<sup>3</sup>, et une surface spécifique Blaine de 622 et 507 m<sup>2</sup>/kg respectivement, ont été choisie pour l'étude.

les diagrammes DRX (figure III.20) de la pâte à ciment montre de l'ettringite (E) et de l'hydroxyde de calcium (CH) comme composés d'hydratation à 2 jours, accompagnés de calcite (CC) et de phases non hydratées (C<sub>4</sub>AF et C<sub>2</sub>S) du ciment.

Pour les ciments mélangés, les produits hydratés (E et CH) et les composés non hydratés sont les mêmes que dans la pâte à ciment ; avec du quartz supplémentaire (Q) provenant de l'illite calciné. La phase AFm (hémicarboaluminate - Hc) a été détecté pour tous les ciments à 7 jours. Pour les ciments mélangés avec MI1, l'intensité des pics CH a diminué à 28 jours ; mais il avait une intensité élevée pour le ciment mélangé avec MI2. La transformation AFm a commencé et le monocarboaluminate (Mc) a coexisté avec Hc. Plus tard, le Mc était la phase AFm prédominante. A 90 jours, le CH a été en partie consommé et à en juger par son intensité maximale, la réaction pouzzolanique de MI2 est inférieure à celle correspondant à MI1.

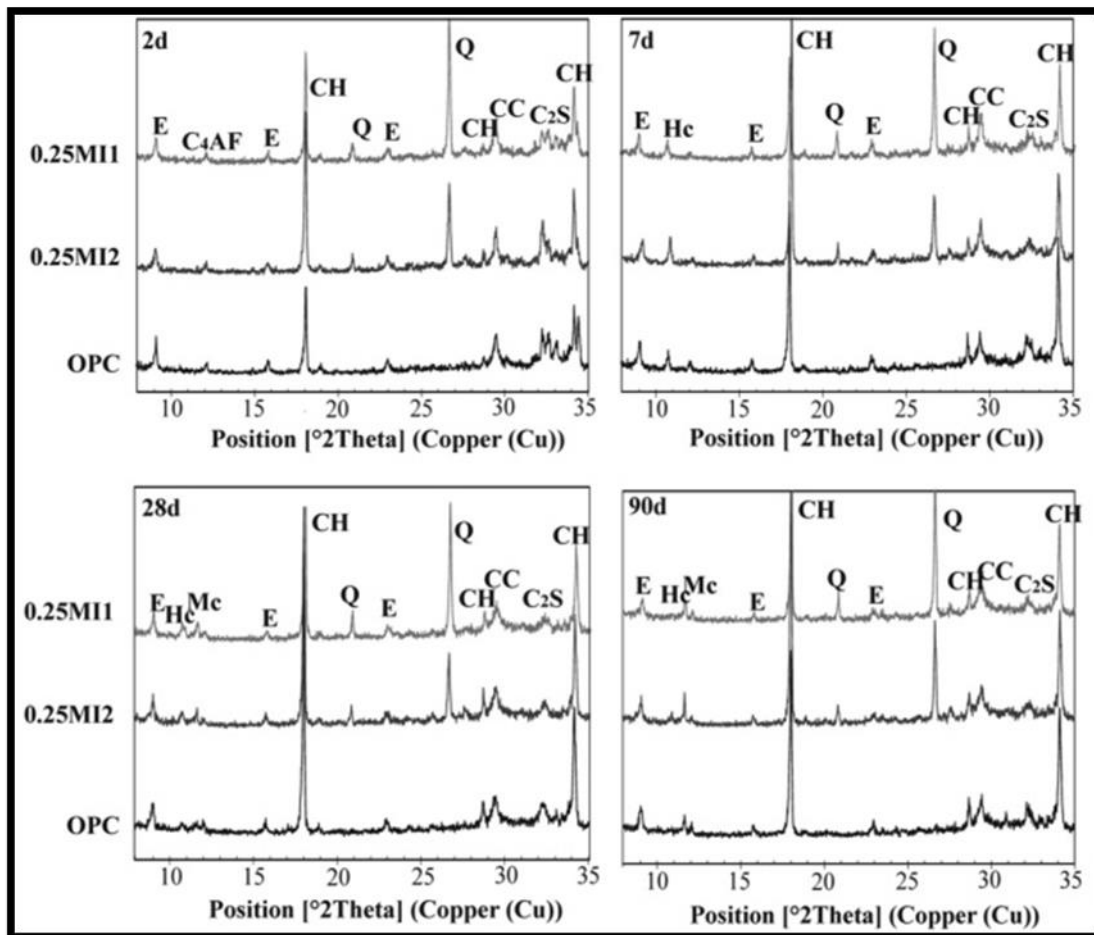


Figure III.20. Diagrammes DRX des ciment à 25% d'illite à 2,7, 28 et 90 jours.

## Chapitre III : Durcissement des ciments

Dans le cas de la monmorillonite Alani et al. [51] ont étudiés l'effet de la température sur des mortiers à monmorillonite. Les résistances à la compression de mortier de référence et des mortiers modifiés à NCMC (nano-monmorillonite calciné) à 28 et 90 jours sont illustrées à la Figure III.21.

À température ambiante, tous les échantillons contenant du NCMC présentaient des résistances à la compression améliorées pour les deux âges. À 28 jours, un pourcentage plus élevé d'incorporation de NCMC entraîne une résistance plus élevée. À 90 jours, les mortiers avec des remplacements NCMC similaires présentaient des résistances à la compression supérieures à celles des mortiers témoins. Ces résultats indiquent les avantages des particules nanométriques à des âges plus avancés et reflètent l'activité continue des particules d'argile calcinée dans l'amélioration de la microstructure de la pâte de ciment et des réactions pouzzolaniques.

Lors d'une exposition à une température de 250°C, la résistance à la compression des mortiers témoins et modifiés a augmenté. Cela s'est produit en raison de l'accélération de la réaction pouzzolanique due à une augmentation de la température, qui a conduit à la formation d'un gel CSH.

Lorsque la température augmentée à 900 C, tous les mortiers présentés des réductions significatives des résistances à la compression à 28 et 90 jours. À 90 jours, l'impact de la réactivité plus élevée de la NCMC amorphe est devenu clair. La différence en pourcentage entre les mortiers contenant 3 et 5 % de NCMC était presque nulle, ce qui indique que l'augmentation du niveau de remplacement de NCMC de 66 % ne s'est pas traduite par une augmentation proportionnelle de la résistance résiduelle lors de l'exposition à la température élevée.

La tendance générale est que de faibles niveaux de remplacement des NCMC sont aussi bénéfiques que des niveaux de remplacement plus élevés. Le niveau de remplacement NCMC de 3 % donn une amélioration similaire de la rétention de la résistance résiduelle au niveau de remplacement de 5 % (66 % plus élevé).

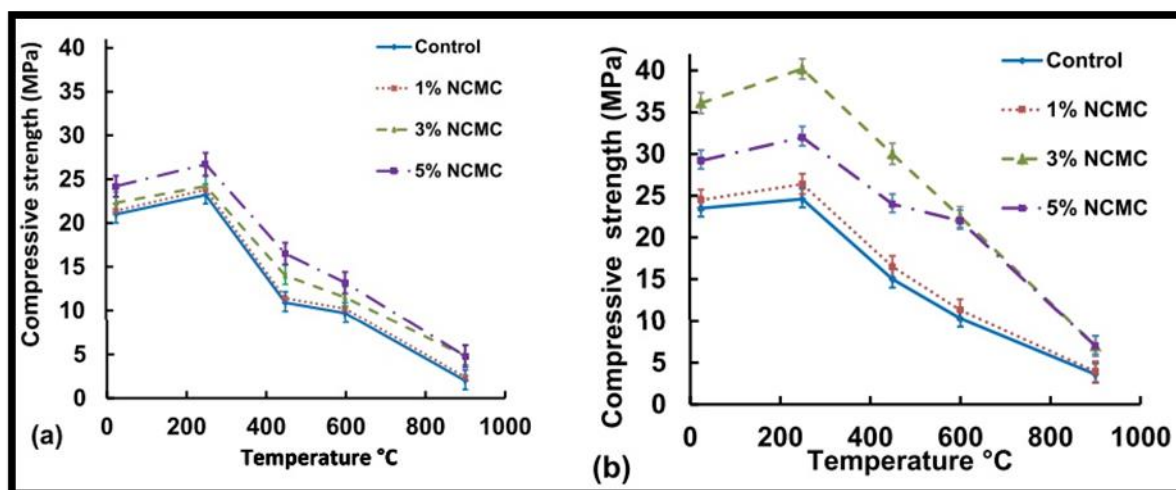


Figure III.21. Résistances à la compression des mortiers témoins et à NCMC à (a) 28 jours et (b) 90 jours.

Les diagrammes DRX pour les échantillons de référence et des mortiers à nano-monmorillonite calcinées « NCMC » avant et après exposition à des températures élevées sont présentés dans la Figure III.22 (cas de 5%). Les changements dans la phase cristalline de la bélite ( $2\theta = 32,4$ ) et du CH ( $2\theta = 18$  et  $34,2$ ) indiquent l'effet du NCMC sur l'hydratation et ses contributions à la durabilité et à la résistance du composite.

## Chapitre III : Durcissement des ciments

A 250 °C, le mortier témoin et les mortiers à NCMC présentent des pics de CH d'intensité plus élevée que leurs homologues à température ambiante, ce qui indique une hydratation supplémentaire des grains de ciments non hydratés. De plus, la comparaison des diagrammes de diffraction des mortiers témoins et NCMC (Figure III.22b), révèle que les échantillons modifiés avec des particules NCMC étaient plus réactifs avec la CH que les échantillons témoins, formant le gel CSH. Le pic  $2\theta=18$  a été réduit d'un facteur de 2 pour 5% de NCMC. Cette réactivité est attribuée à la taille nanométrique des particules de NCMC. La réduction de l'intensité des pics de CH indique que le NCMC a produit du CSH supplémentaire par la consommation de CH et a donc augmenté les résistances mécaniques.

Lors d'une exposition à des températures extrêmement élevées (900°C). Une nette disparition d'une partie des pics CH, alors que les composants de la bélite étaient tracés (Fig. III.22c). L'augmentation notable des intensités des pics de bélite ( $2\theta = 32,4$ ) est attribuée à la décomposition complète du CSH et du CH. L'effet de décomposition du CSH était légèrement plus prononcé pour les mortiers témoins que pour les mortiers NCMC, car le pic de bélite pour les mortiers témoins était supérieur de 8% à celui des mortiers NCMC.

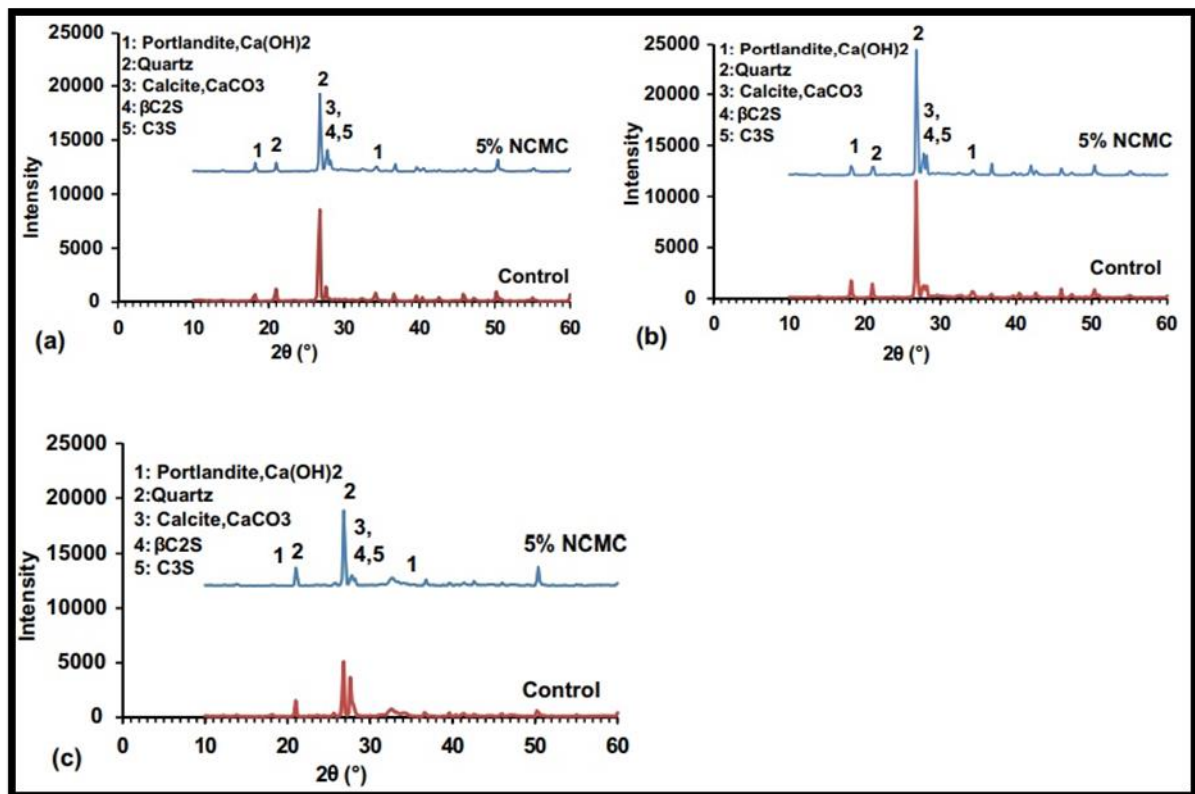


Figure III.22. Diagramme DRX des mortiers NCMC à 5 % exposés à différentes températures à 28 jours : (a) 25°C ; (b) 250°C ; (C) 900°C.

## Chapitre III : Durcissement des ciments

### III.5.5. Les pouzzolanes

Il y a environ 2000 ans, les Romains produisaient du béton à partir de cendres volcaniques et de chaux hydratée. Ces édifices sont toujours témoin de cette civilisation. Cette longévité du béton romain est attribuée aux pouzzolane et cendres volcaniques riches en alcalis et en alumine.

Celik et al.[52] ont étudiés l'effet d'une cendre volcanique sur différents caractéristiques des pâtes et mortiers. Les résultats pour les résistances à la compression des spécimens de mortier incorporant de la pouzzolane naturelle « NP » à différents âges sont présentés à la Figure III.23. Toutes les proportions de NP dans les mortiers ont eu des effets néfastes sur l'évolution de la résistance des mortiers, mais les résistances continuent leurs augmentation . Ce phénomène de récupération de la résistance est due aux réactions pouzzolaniques surtout dansle cas de 30% de substitution.

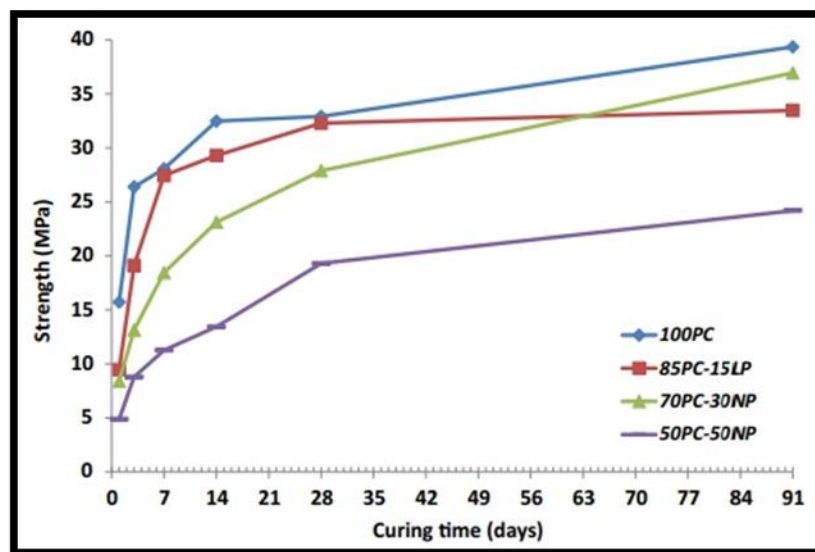


Figure III.23. Résistances à la compression des mortiers à cendre volcanique

Quant aux diagrammes DRX avec la même échelle d'intensité de 100PC et 70PC-30NP à différents âges d'hydratation sont présentés à la Figure III.24. On observe que dans tous les échantillons, la bélite et la ferrite sous forme de phases anhydres sont toujours présentes après 91 jours d'hydratation. Les produits d'hydratation de (100PC) sont l'ettringite, le monosulfate et la portlandite, tandis que. Le pic d'ettringite, visible à 7 jours, a significativement diminué à 28 jours et disparu à 91 jours.

En comparaison, la figure III.24c révèle que du monosulfate a été observé dans à 28 jours et 91 jours. Cela montre que l'ettringite est devenue instable quelque temps après 7 jours d'hydratation dans des mélanges binaires 70PC-30NP, et que les aluminates, ferrites et NP n'ayant pas réagi ont réagi avec l'ettringite pour produire du monosulfate. Alors que le monosulfate a été observé pour la première fois à 91 jours dans 100PC, il a été détecté à 28 jours dans l'échantillon 70PC-30NP. La détection plus précoce de monosulfate dans 70PC-30NP peut être attribuée à une quantité accrue d'aluminium disponible dans le système. Après l'épuisement du sulfate de calcium, l'aluminium supplémentaire entrant en solution à partir de la dissolution d'aluminate, de ferrite ou de NP produira des hydrates riches en aluminium et pauvres en sulfate, tels que le C-A-S-H et le monosulfate.

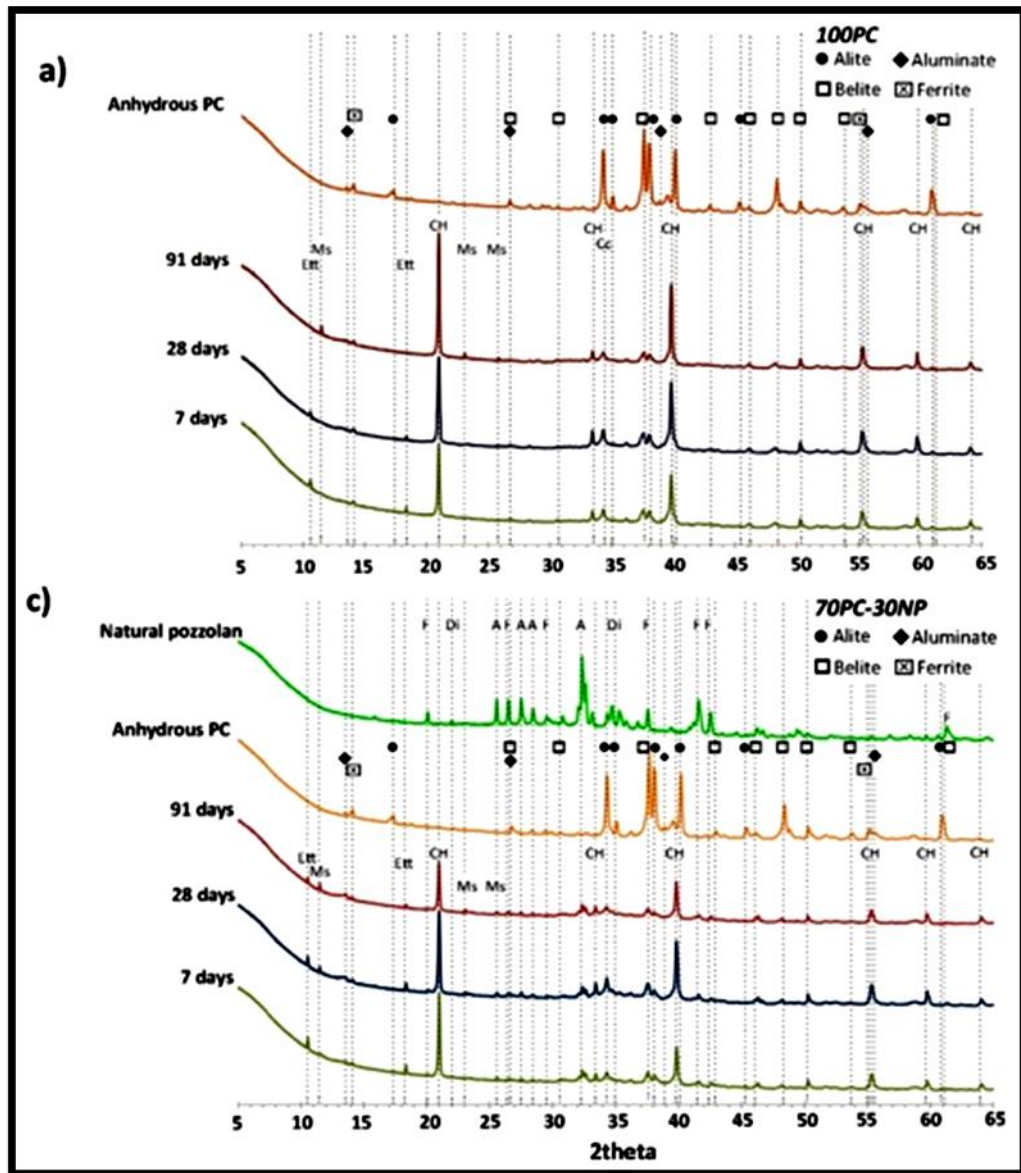


Figure III.24. Diagrammes DRX des pâtes, a) 100PC, b) 70PC-30NP

Un autre type de pouzzolane volcanique a fait l'objet d'une investigation. Un ciment ordinaire est substitué à 1à et 20% par une poudre volcanique (surface spécifique 69000cm<sup>2</sup>/g) « VGP » Ren et al. ont constaté dans la figure III.25 que la VGP a accélérée l'hydratation initiale du ciment à 20°C grace à l'effet filler.

La VGP a fournie les sites de nucléation supplémentaires pour les hydrates. Cet effet du VGP devient de plus en plus visible à partir du 7<sup>ème</sup> jours à 20°C. De plus, lorsque la température de durcissement augmente, l'effet filler de la VGP diminue. L'augmentation de la température favorise l'hydratation du clinker de ciment à un âge précoce. Cependant, l'impact de la température sur l'hydratation est différent.

La stagnation de l'hydratation de C<sub>3</sub>A et C<sub>4</sub>AF est confirmée sur la figure III.25. Elle est causé par la formation de gel hydraté à la surface de C<sub>3</sub>A et C<sub>4</sub>AF. Ce gel est amorphe, il comprene des ions sulfate et des ions carbonate.

La densification des hydrates de gel à la surface de C<sub>3</sub>A et C<sub>4</sub>AF entrave le transfert d'ions et se qui bloque l'hydratation. D'autre part, la VGP réduit l'effet de la stagnation de l'hydratation de C<sub>3</sub>A et C<sub>4</sub>AF par rapport au ciment pur. Avec l'augmentation du taux de VGP, le degré d'hydratation du C<sub>3</sub>A augmente à 40°C et 60°C. L'hydratation de C<sub>4</sub>AF à 40°C et 60°C est presque indépendante de la VGP, mais la comparaison avec la référence montre une tendance

## Chapitre III : Durcissement des ciments

à l'augmentation de l'hydratation. On peut considérer que la quantité de gel hydraté a diminué car la proportion de ciment a diminué due au remplacement par la VGP.

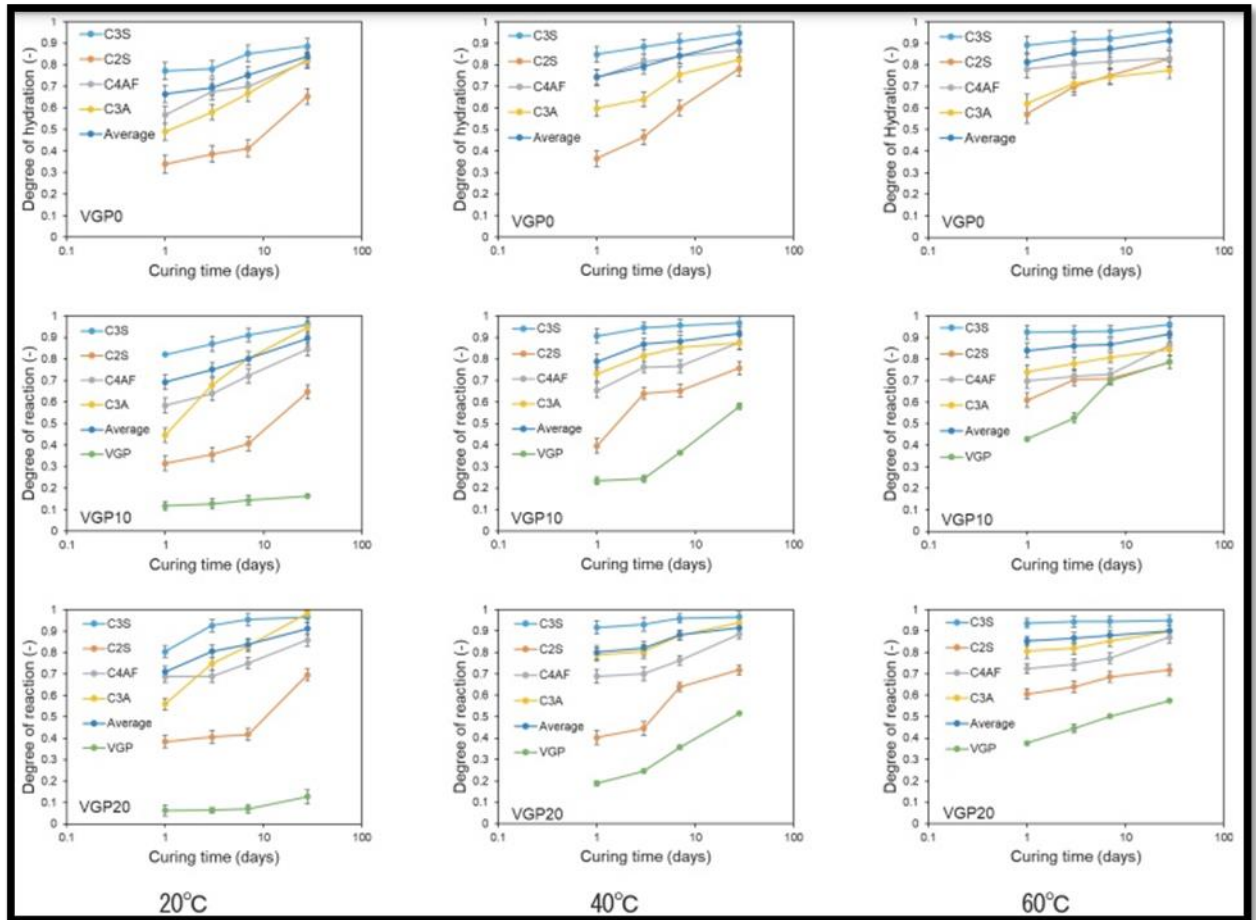


Figure III.25. Degré de réaction d'hydratation du ciment et ciment à VGP.

### III.5.6. Le verre finement broyé

La gestion des déchets est devenue d'une importance vitale depuis que la demande en ressources naturelles a fortement augmenté, ce qui ajoute une énorme pression sur l'environnement.

Le verre est un produit courant que l'on retrouve sous différentes formes : bouteilles, bords, fenêtres et pare-brise, ampoules, tubes cathodiques, etc. Ces produits ont une durée de vie limitée et doivent être recyclés afin d'éviter les problèmes environnementaux liés à leur stockage ou mise en décharge.

Sous forme de poudre Elaqla et al [53]. montrent que la résistance à la compression en fonction du temps et du remplacement du ciment par la poudre de verre « GP », enregistre une diminution lorsque la quantité de GP augmente jusqu'à 28 jours. A long terme (90 jours) une augmentation de la résistance à la compression est détectée pour 10% et 20% de GP (figure III.26).

A court terme, la résistance à la compression des mélanges 10% et 20% GP est très proche du mélange témoin.

## Chapitre III : Durcissement des ciments

A 90 jours, les mélanges à 10 % et à 20 % de GP montrent une résistance à la compression supérieure à celle du mélange témoin. Cette augmentation est attribuée à la réaction pouzzolanique qui se produit à des âges plus avancés. Elle affecte la zone de transition interfaciale entre la pâte de ciment, les granulats et les pores qui sont plus raffinés dans la zone de transition interfaciale.

L'immersion du GP dans l'eau peut conduire à la création d'ions libres de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{CaO}$  dans l'eau avant le mélange avec le ciment, de sorte que les ions libres seront prêts à réagir avec le ciment. En conséquence, davantage de produits hydratés seront formés, en particulier la formation de CSH à un âge précoce. La diminution de la résistance à la compression normalisée après 2 jours peut être le résultat de la participation de tous les ions libres à la réaction à 2 jours. Plus tard à 28 et 90 jours, les particules de GP qui ne se sont pas dissoutes et présentes dans la structure participeront à la formation du nouveau CSH, augmentant ainsi la résistance à la compression.

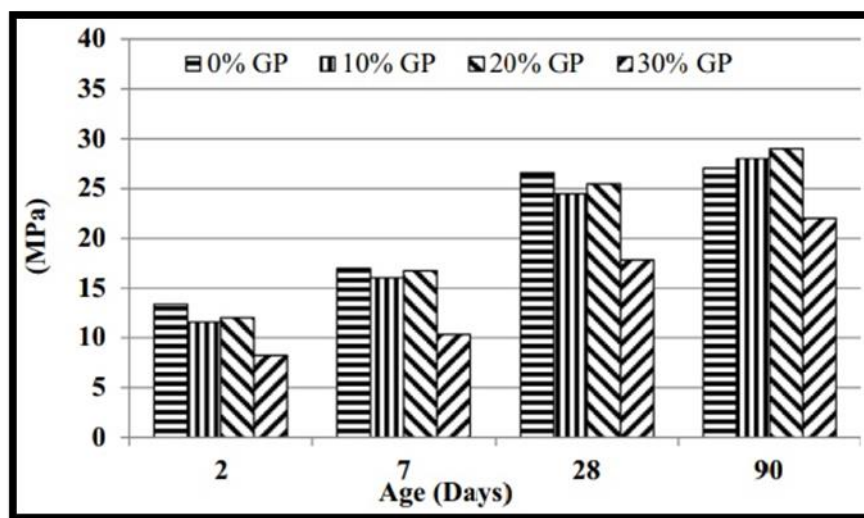


Figure III.26. Résistance à la compression du béton en fonction du GP et de l'âge.

Afin de mieux comprendre le phénomène Medjdi et al. [54] ont travaillé sur des mélanges poudre de verre et portlandite. Les résultats des investigations menées permettent de mieux comprendre la réaction pouzzolanique de la poudre de verre pour différents rapports CH sur GP.

La séquence réactionnelle commence par la dissolution de la portlandite augmentant ainsi le pH de la solution interstitielle. L'attaque nucléophile de  $\text{OH}^-$  sur le verre induit sa dissolution, et fournit ainsi de la silice et du sodium à un système déjà riche en  $\text{Ca}^{+2}$ . Cela conduit à la précipitation de Ca/Si C-S-H élevé en particulier à la périphérie des particules de GP induisant une diminution de sa vitesse de dissolution. Lorsque la portlandite est consommée localement, les ions de silice libérés commencent à réagir avec le C-S-H riche en Ca pour former du C-S-H plus polymérisé avec des rapports Ca/Si inférieurs. En même temps, le pH élevé du système augmente la déprotonation des groupes silanol des hydrates de silicate de calcium conduisant à l'apparition de charges sur la surface C-S-H. Cette charge négative est compensée d'abord par les liaisons covalentes ioniques des ions calcium et des groupements  $\text{SiO}^-$ , et après la consommation des ions calcium, par l'adsorption des alcalis. Par conséquent, l'absorption d'alcali dans le C-S-H riche en Si peut atteindre un rapport Na/Si de 0,17 à 0,19 comme c'est le cas pour le mélange 75GP25CH (75% poudre de verre 25% portlandite).

## Chapitre III : Durcissement des ciments

A cette étape, la GP agit comme une pouzzolane en consommant du CH pour former du C-S-H avec une teneur relativement élevée en Na. Cependant, des rebords ont été observés à la périphérie des particules de verre avec un Ca/Si particulièrement faible alors que ce rapport augmente en s'éloignant davantage des grains de verre. Pour le mélange 75GP25CH, cette observation a été attribuée à la consommation totale de CH alors que la GP se dissout encore et abaisse le rapport Ca/Si ( $\sim 0,36$ ) du C-S-H interne. Ainsi, en l'absence d'ions  $\text{Ca}^{+2}$ , cela pourrait conduire à terme à l'apparition de gel ASR (Réaction alkali-silica) autour des particules.

En revanche, des rebords (rims en anglais, figure III.27) similaires sont observées dans le mélange 50GP50CH (50% poudre de verre 50% portlandite) mais avec un rapport Ca/Si relativement stable (respectivement  $\sim 0,67$ ,  $0,65$  et  $0,64$  à 28, 56 et 91 jours). Cette légère variation pourrait être liée au ralentissement du transport chimique du Ca et du Si à travers les couches de C-S-H et à la disponibilité du CH dans le système.

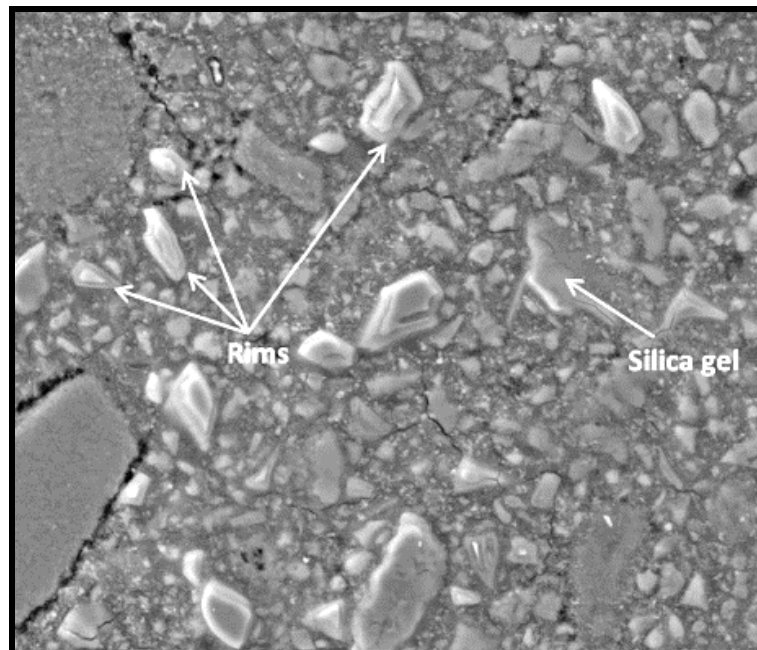


Figure III.27. Images du mélange 50GP50CH montrant la formation de rebords autour des particules de verre.

# Chapitre III : Durcissement des ciments

## III.5.7. La balle de riz

La substitution du ciment (5-10-15%) par la balle de riz « RHA » (RHA-2, RHA-3, RHA-4, respectivement, la pâte sans RHA est RHA-1) étudié par Wang et al.[55] montrés par des images XRD d'échantillons après durcissement standard pendant 28 jours, révèle que le pic de diffraction de l'hydroxyde de calcium (CH) a augmenté puis diminué avec la cure (Figure III.28). Cela est attribué au fait qu'à jeune âge, les principales phases du clinker comme  $C_3S$  ou  $C_2S$  ont réagi avec  $H_2O$ , puis des hydrates C-S-H et CH se sont formés. Au premier jour de durcissement, on observe que le pic de diffraction de l'hydroxyde de calcium CH augmente avec l'augmentation de la teneur en RHA, indiquant que l'hydratation précoce peut être accélérée avec l'incorporation de RHA. Comme le montre la figure 4d, lorsque la teneur en RHA était la plus élevée (à 15%, RHA-4), le pic de diffraction de CH a d'abord augmenté puis diminué avec l'augmentation des âges de durcissement, ce qui pourrait être attribué à la réaction pouzzolanique de  $SiO_2$  avec CH. A partir de tous les diagrammes XRD, on peut observer que le pic principal de  $C_3S$  situé à environ  $29^\circ$  diminue avec le durcissement, indiquant l'épuisement progressif du  $C_3S$  au cours de l'hydratation, en particulier avec la plus grande quantité de RHA (RHA -4).

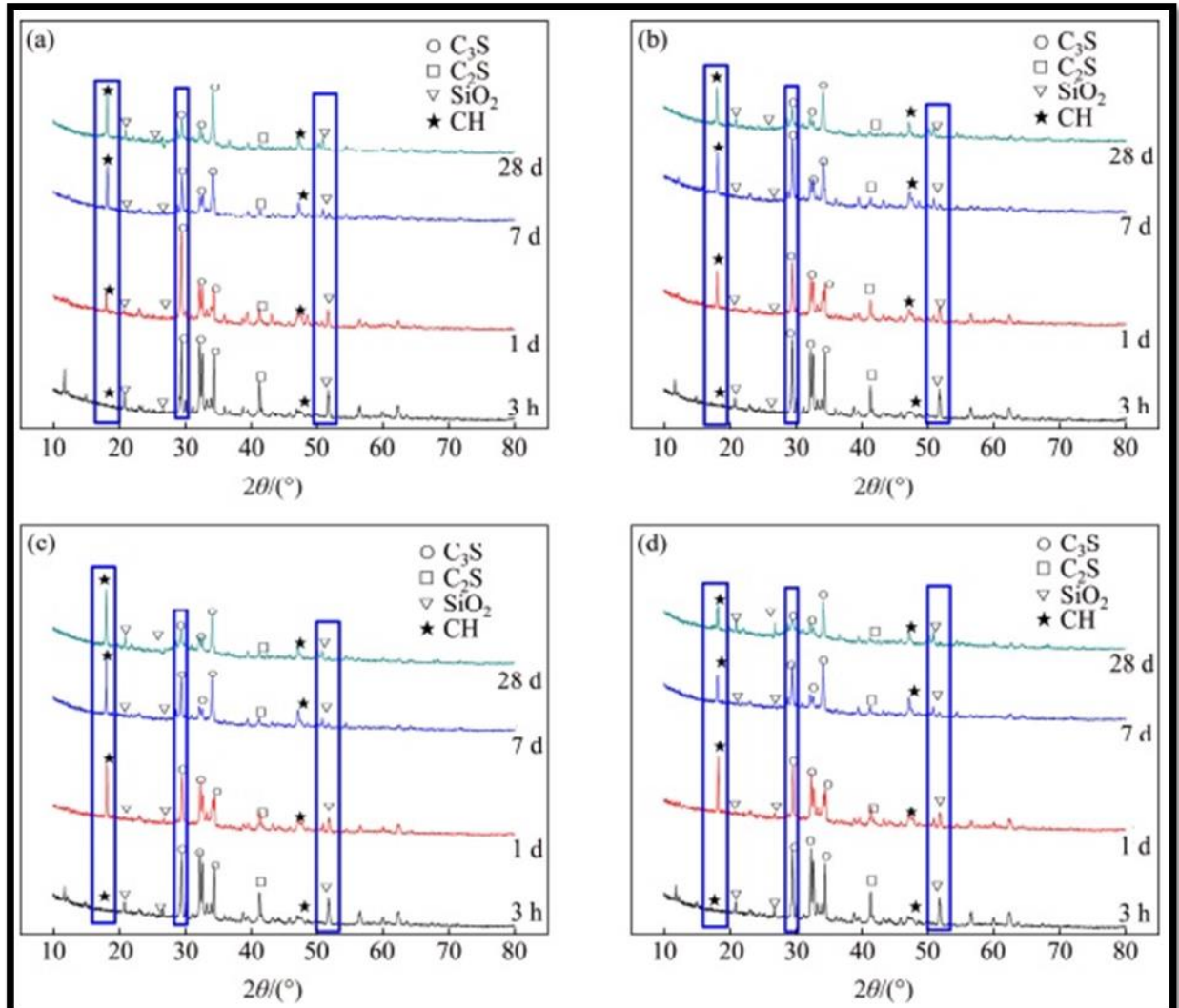


Figure III.28. Diagrammes DRX d'échantillons avec RHA : (a) RHA-1 ; (b) RHA-2; (c) RHA-3; (d) RHA-4

## Chapitre III : Durcissement des ciments

Cet ajout cimentaire est comparé à d'autre dans le travail de Hu et al.[56] . La figure III.29 montre les teneurs résiduelles en hydroxyde de calcium (CH) après réaction pouzzolanique de la chaux avec RHA, à différents âges. La RHA présentée des résultats de consommation de CH significativement plus élevés que la cendre volante ou le métakaolin. À une journée de cure, le pourcentage de réduction le plus élevé de CH enregistré à partir du lot RHA était de 57,4 % et cette tendance se poursuit jusqu'à 28 jours. La diminution rapide de la teneur en CH dans les échantillons de RHA montrés une activité pouzzolanique élevée, le  $\text{SiO}_2$  hautement réactif à l'intérieur des matériaux peut réagir avec le CH et générer un gel C-S-H à un rythme rapide.

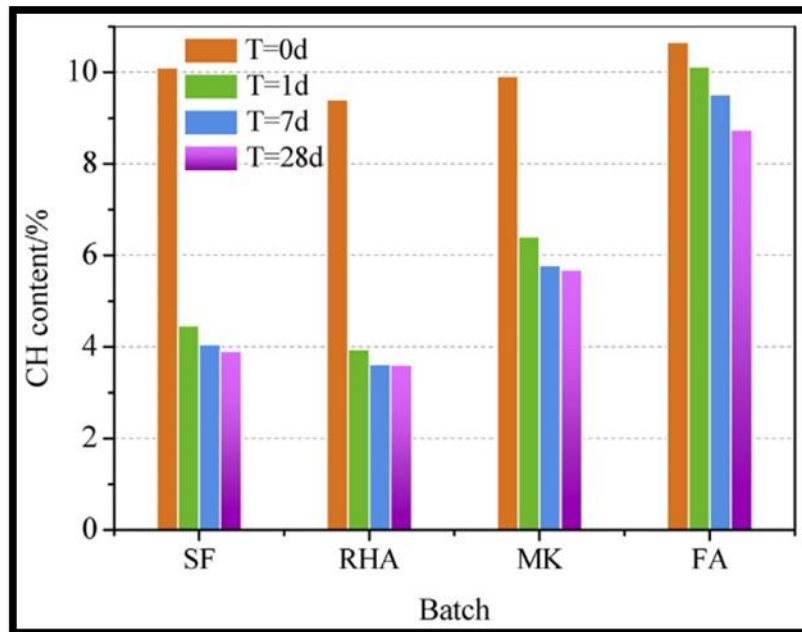
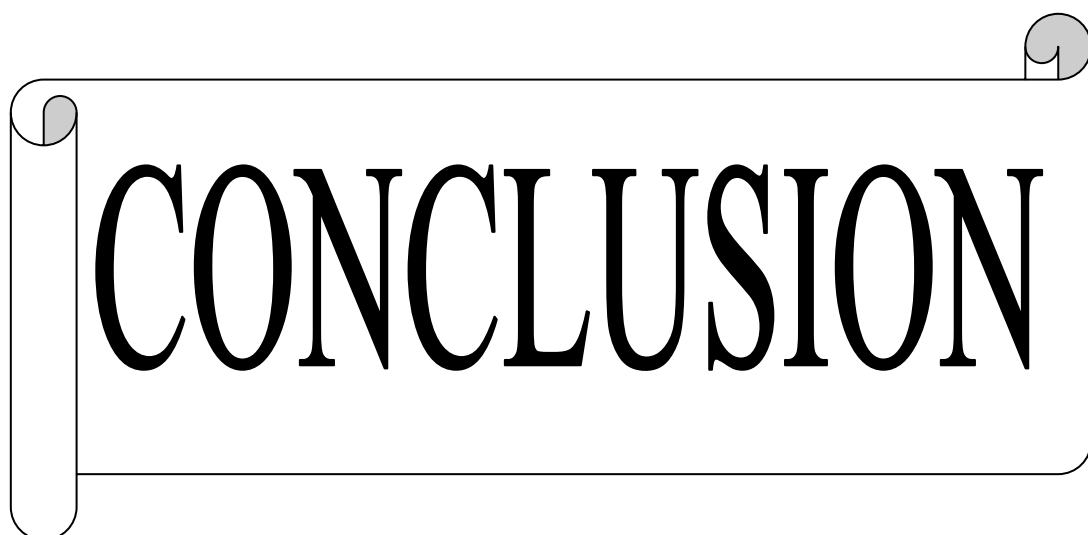


Figure III.29. Teneur en CH des pâtes de mélange minéral à différents âges.

A decorative scroll graphic with the word "CONCLUSION" written on it. The scroll is white with a black outline and features three grey circular elements at the top corners, suggesting it is a rolled-up document. The word "CONCLUSION" is written in a large, bold, black, serif font across the center of the scroll.

**CONCLUSION**

# Conclusion générale

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé en raison de son économie, de la disponibilité des matières premières, de sa résistance et de sa durabilité. Les scientifiques, ingénieurs et industriels travaillent en permanence pour rendre les matériaux cimentaires de plus en plus respectueux vers l'environnement. Intervenant sur les fours rotatifs, en améliorant ses caractéristiques ou en introduisant des ajouts facilitant le broyage, de nouvelles techniques sont périodiquement mise à jour.

L'utilisation des ajouts cimentaires, procure à l'industrie cimentaires, des avantages environnementaux en raison de la réduction des gaz à effet de serre comme exemple. Les réglementations strictes en matière de pollution ont produit une accumulation de sous-produits industriels comme le laitier de hauts fourneaux, la fumée de silice, etc, qui peuvent être utilisés comme matériaux cimentaires supplémentaires.

Ces ajouts cimentaires sont souvent utilisés dans les mélanges cimentaires ou la fabrication du ciment lui-même. Afin de réduire le pourcentage clinker/ciment ou ciment/béton l'utilisation de ces ajouts améliore les propriétés du béton à l'état frais et durci.

Ce travail passe en revue la compréhension de la réactivité des ajouts cimentaires et leur impact sur le processus de durcissement des matériaux cimentaires (pâte, mortier, béton). Quelques travaux sur la microstructure des ciments composés par différents ajouts sont répertoriés et discutés.

D'après les travaux cités dans ce projet de fin d'étude ont peut annoncer que les ajouts cimentaires:

- \* Ils ne modifient pas la nature des produits d'hydratation responsables de la prise et du durcissement.

- \* Provoque une modification du taux de dégagement de chaleur, soit en réduisant la latence. Période ou intensification de la période d'accélération maximale.

- \* Diminue la teneur en portlandite des pâtes de ciment, suggérant que les bétons mélangés avec ces matériaux devraient présenter une plus grande durabilité que les témoins.

- \* Réduit la quantité de portlandite dans l'interface entre les granulats et la pâte de ciment.



**BIBLIOGRAPHIE**

# BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., MacLeod, F. N., & MacGrath, R. J. (2004). Dosage et contrôle des mélanges de béton, EB101.
- [2] NF EN 197-1: Ciment: Composition, Spécifications Et Critères De Conformité Des Ciments Courants. Part 1; 2012.
- [3] Lewis, R., Sear, L., Wainwright P., & Ryle R. (2003). Cementitious additions. Newman J., Choo B.S., (Eds) *Advanced concrete technology : Constituent materials* (pp. 19-34). England : Elsevier.
- [4] Festa, J., & Dreux, G. (1998) *Nouveau guide du béton et de ses constituants* (8èmed.) Eyrolles (Ed.). France : Paris.
- [5] Shumuye, E. D., Zhao, J., & Wang, Z. (2021). Effect of the curing condition and high-temperature exposure on ground-granulated blast-furnace slag cement concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 15(1), 1-20. <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00437-6>.
- [6] Saafan, M. A., & Etman, Z. A. (2021). Microstructure and durability of ground granulated blast furnace slag cement Mortars. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(3), 1457-1465.
- [7] LermInfos "Les Cendres Volantes", N°26, Janvier 2014
- [8] Golewski, G. L. (2021). The beneficial effect of the addition of flyash on reduction of the size of microcracks in the ITZ of concrete composites under dynamic loading. *Energies*, 14(3), 668.
- [9] Giergiczny, Z. (2019). Fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*, 124, 105826.
- [10] Tavares, L. R. C., Junior, J. F. T., Costa, L. M., da Silva Bezerra, A. C., Cetlin, P. R., & Aguilar, M. T. P. (2020). Influence of quartz powder and silica fume on the performance of Portland cement. *Scientific reports*, 10(1), 1-15.
- [11] Carrillo, G. H. (2021). EFFET DE REMPLISSAGE DES POUDRES MINÉRALES SUR LE BÉTON À ULTRA HAUTE PERFORMANCE FILLER EFFECT OF MINERAL POWDERS ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN).
- [12] Murray, H. H. (2006). *Applied clay mineralogy: occurrences, processing and applications of kaolins, bentonites, palygorskite sepiolite, and common clays*. Elsevier.
- [13] Chikouche M.A 2016 « Optimisation Des Ajouts À Base D'Argiles Vaseuses Et Leurs Effets Sur Les Propriétés Des Matériaux Cimentaires », These Présentée En Vue De L'Obtention Du Diplôme De Doctorat En Sciences. Université De M'sila,
- [14] Karatas, M., Benli, A., & Arslan, F. (2020). The effects of kaolin and calcined kaolin on the durability and mechanical properties of self-compacting mortar subjected to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 265, 120300.
- [15] Rehman, S. U., Yaqub, M., Ali, T., Shahzada, K., Khan, S. W., & Noman, M. (2019). Durability of Mortars Modified with Calcined Montmorillonite Clay. *Civil Engineering Journal*, 5(7), 1490-1505.
- [16] Tokyay, M. (2016). *Cement and concrete mineral admixtures*. CRC Press.
- [17] Bendoukha R. « Etude Dynamique, Pétrographique Et Géochimique Du Volcanisme Plio-Quaternaire De L'Oranie (Algérie Nord Occidentale), Thèse Présentée Pour L'obtention d'un Diplôme De Doctorat D'état En Géologie, Université Des Sciences Et De La Technologie Houari Boumediene,

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [18] Douaïssia, Z., Merzoud, M., Habita, M. F., & Benazzouk, A. (2021). Effets du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle sur les propriétés physico-mécaniques et sur la réaction alcali silice des mortiers à base de verre recyclé. *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 26(1), 78-91.
- [19] Mansour, S. M., & Ghernouti, Y. (2020). Conception of eco-friendly cement based on natural pozzolan to improve rheological behavior of concrete. *Journal of Building Materials and Structures*, 7(2), 130.
- [20] Benredouane, A.D., Kacimi, L., Rodriguez Largo, O., & Lopez Delargo, A. (2014). Elaboration d'une Pouzzolane Artificielle à Base de la Zéolithe X Synthétisée à partir de Kaolin Naturel. *MATEC Web of Conferences*, 11, 01005.
- [21] Aladdine, F. (2011). Propriétés à l'état frais, à l'état durci et durabilité des bétons incorporant du verre finement broyé. *Library and Archives Canada= Bibliothèque et Archives Canada*, Ottawa.
- [22] Arab, B., Mehaddene, R., & Bouchnab, Y. (2017). Substitution du ciment CPA par la poudre de verre dans les mortiers à hautes performances. *Déchets Sciences et Techniques*, 75, 1-8.
- [23] He, Z. H., Zhan, P. M., Du, S. G., Liu, B. J., & Yuan, W. B. (2019). Creep behavior of concrete containing glass powder. *Composites Part B: Engineering*, 166, 13-20.
- [24] Djamaluddin, A. R., Caronge, M. A., Tjaronge, M. W., Rahim, I. R., & Noor, N. M. (2018). Abrasion resistance and compressive strength of unprocessed rice husk ash concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, 19(7), 867-876.
- [25] Vieira, A. P., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., & Cordeiro, G. C. (2020). Effect of particle size, porous structure and content of rice husk ash on the hydration process and compressive strength evolution of concrete. *Construction and Building Materials*, 236, 117553.
- [26] Taylor, H. F. (1997). *Cement chemistry* (Vol. 2, p. 459). London: Thomas Telford.
- [27] W. Kurdowski, 2014, *Cement and concrete chemistry*, Ed Springer, London 3
- [28] Hewlett, P., & Liska, M. (Eds.). (2004). *Lea's chemistry of cement and concrete*. Butterworth-Heinemann.
- [29] Komar, A. G. (1973). *Matériaux et éléments de construction*. Éditions Mir..
- [30] Cuesta, A., Zea-Garcia, J. D., Londono-Zuluaga, D., De la Torre, A. G., Santacruz, I., Vallcorba, O., Monica Dapiaggi, Susana G. Sanfélix & Aranda, M. A. (2018). Multiscale understanding of tricalcium silicate hydration reactions. *Scientific reports*, 8(1), 1-11.
- [31] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/colloides/> consulté le 17/05/2022
- [32] Le Chatelier, H. (1919). Crystalloids against colloids in the theory of cements. *Transactions of the Faraday Society*, 14, 8-11.
- [33] Papatzani, S., Paine, K., & Calabria-Holley, J. (2015). A comprehensive review of the models on the nanostructure of calcium silicate hydrates. *Construction and Building Materials*, 74, 219-234
- [34] Khasanov, B., Irmuhamedova, L., Firlina, G., & Mirzaev, T. (2020, June). Theoretical foundations of the structure formation of cement stone and concrete. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 869, No. 3, p. 032032). IOP Publishing.
- [35] Backelandt, A. (2005). *Etude des mécanismes d'adhésion à l'interface résine/ciment en vue de la réparation des ouvrages de génie civil* (Doctoral dissertation, Lyon, INSA).

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [36] M.LANEZ (2005) ; « Contribution à l'étude de béton de poudre réactives » thèse Magister USTHB
- [37] A.BRESSON ( 2006 ) « Influence de la minéralogie sur le comportement des mortier et du ciment au jeune âge » Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en Génie Civil pour l'obtention du grade de maître ès sciences Université de laval canada .
- [38] Mailvaganam, N. P., Rixom, M. R., Manson, D. P., & Gonzales, C. (1999). *Chemical admixtures for concrete*. Crc Press.
- [39] Newman, J., & Choo, B. S. (Eds.). (2003). *Advanced concrete technology :constituent materials*. Elsevier.
- [40] Yan, Y., Wang, R., Wang, W., Yu, C., & Liu, J. (2021). Effect of starch-based admixtures on the exothermic process of cement hydration. *Construction and Building Materials*, 289, 122903.
- [41] Han, F., Zhang, H., Pu, S., & Zhang, Z. (2021). Hydration heat and kinetics of composite binder containing blast furnace ferronickel slag at different temperatures. *Thermochimica Acta*, 702, 178985.
- [42] Joseph, S., & Cizer, Ö. (2022). Hydration of hybrid cements at low temperatures: A study on portland cement-blast furnace slag—Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Materials*, 15(5), 1914.
- [43] Cho, Y. K., Jung, S. H., & Choi, Y. C. (2019). Effects of chemical composition of fly ash on compressive strength of fly ash cement mortar. *Construction and Building Materials*, 204, 255-264.
- [44] Han, X., Yang, J., Feng, J., Zhou, C., & Wang, X. (2019). Research on hydration mechanism of ultrafine fly ash and cement composite. *Construction and Building Materials*, 227, 116697.
- [45] Sun, J., Shen, X., Tan, G., & Tanner, J. E. (2019). Compressive strength and hydration characteristics of high-volume fly ash concrete prepared from fly ash. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136(2), 565-580.
- [46] Li, Y., Deng, Y., & Liu, R. (2019). Hydration Kinetics of Portland Cement–Silica Fume Binary System at Low Temperature. *Materials*, 12(23), 3896.
- [47] Jeong, Y., Kang, S. H., Kim, M. O., & Moon, J. (2020). Acceleration of cement hydration from supplementary cementitious materials: Performance comparison between silica fume and hydrophobic silica. *Cement and Concrete Composites*, 112, 103688.
- [48] Wang, X., Gong, C., Lei, J., Dai, J., Lu, L., & Cheng, X. (2021). Effect of silica fume and nano-silica on hydration behavior and mechanism of high sulfate resistance Portland cement. *Construction and Building Materials*, 279, 122481.
- [49] Cardinaud, G., Rozière, E., Martinage, O., Loukili, A., Barnes-Davin, L., Paris, M., & Deneele, D. (2021). Calcined clay–Limestone cements: Hydration processes with high and low-grade kaolinite clays. *Construction and Building Materials*, 277, 122271.
- [50] Marchetti, G., Rahhal, V., Pavlík, Z., Pavlíková, M., & Irassar, E. F. (2020). Assessment of packing, flowability, hydration kinetics, and strength of blended cements with illitic calcined shale. *Construction and Building Materials*, 254, 119042.
- [51] Alani, S., Hassan, M. S., Jaber, A. A., & Ali, I. M. (2020). Effects of elevated temperatures on strength and microstructure of mortar containing nano-calcined montmorillonite clay. *Construction and Building Materials*, 263, 120895.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [52] Celik, K., Hay, R., Hargis, C. W., & Moon, J. (2019). Effect of volcanic ash pozzolan or limestone replacement on hydration of Portland cement. *Construction and Building Materials*, 197, 803-812.
- [53] Elaqla, H. A., Elmasry, I. H., Tabasi, A. M., Alwan, M. D., Shamia, H. N., & Elnashar, M. I. (2021). Effect of water-to-cement ratio and soaking time of waste glass powder on the behaviour of green concrete. *Construction and Building Materials*, 299, 124285.
- [54] Mejdi, M., Wilson, W., Saillio, M., Chaussadent, T., Divet, L., & Tagnit-Hamou, A. (2019). Investigating the pozzolanic reaction of post-consumption glass powder and the role of portlandite in the formation of sodium-rich CSH. *Cement and Concrete Research*, 123, 105790.
- [55] Wang, H., Zhang, A. L., Zhang, L. C., Wang, Q., Han, Y., Liu, J. Z., Gao, X.J., Shi, F.T., Lin X.Y., & Feng, L. Y. (2020). Hydration process of rice husk ash cement paste and its corrosion resistance of embedded steel bar. *Journal of Central South University*, 27(11), 3464-3476.
- [56] Hu, L., He, Z., & Zhang, S. (2020). Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: Environmental evaluation and performance improvement. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121744.