

N° Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ de Bouira



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département de Génie Civil

**Mémoire de fin d'études**

Présenté par :

**SOUIDI Rania**  
**AZZI Bouchra Faten**

En vue de l'obtention du diplôme de Master 2en :

**Filière : Génie Civil**

**Spécialité : Matériaux en génie civil**

**Thème :**

**ETUDE DE L'ACTIVITE POUZZOULANIQUE d'un matériau cimentaire  
durable (5ans)**

**Devant le jury composé de :**

Mr Messboua.N  
Mr Aribi.ch  
Md louchedi.D

MCA  
MCB

UAMOB / GENIE CIVIL Encadreur  
UAMOB / GENIE CIVIL Examineur  
UAMOB / GENIE CIVIL Examineur

**Année Universitaire 2021/2022**

### **Dédicaces**

Je dédie ce modeste travail à :  
Mes très chers parents qui m'ont  
beaucoup soutenu et encouragée  
jusqu'au bout et que dieu leur accorde  
Une longue vie.

Mes frères NACERELDINE et RABEH, mes sœurs BOUCHRA et ASMA et mes  
deux beau-frère HAKIM et AMINE qui ont toujours souhaité ma réussite sans  
oubliés mes neveux

AMIR, DJAWED, NAHLA et ASSIL.

A tous les enseignants du département de Génie Civil.

Au personnel du laboratoire de Génie Civil.

Je dédie aussi ce travail à tous mes amis sans  
Exception.

En fin je le dédie à tous ceux qui me connaît de  
Près ou de loin.

S.RANIA.

### **Dédicaces**

Je dédie ce modeste travail à :  
Mes très chers parents qui m'ont  
beaucoup soutenu et encouragée  
jusqu'au bout et que dieu leur accorde  
Une longue vie.

Mes frères SOFIANE, BRAHIM, MUSTAPHA SALAH EDDIN , mon beau-frère  
BRAHIM et ma deuxième maman DJAOUIDA qui ont toujours souhaité ma réussite  
sans oubliés mes neveux

MANAR, MOHAMED, MERIEM, ABDRAHMAN, MAISSAM, MONCIF, MOURAD,  
HOURIA, DINA, MARIA, RANIM et ABDELGHANI.

Mes belles sœurs LOUIZA, ZENEB et HIBA.

Et un spécial dédicace à mon frère qui nous a quitté, MOURAD <3 que dieu accorde  
la paix à son âme.

A tous les enseignants du département de Génie Civil.

Au personnel du laboratoire de Génie Civil.

Je dédie aussi à tous mes amis sans

Exception.

En fin je le dédie à tous ceux qui me connaît de

Près ou de loin.

A. BOUCHRA FATEN.

# remerciment

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*Nous remercions tout d'abord le bon dieu qui nous nous avoir donné la chance d'accomplir se modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciement a notre promoteur Monsieur MESBOUA Noureddine pour ses conseils son suivi et ses engagements qui ont contribues largement a l'aboutissement de ce travail.*

*Nous tenons aussi à exprimer nos remerciements à tous le personnel de la société de ciment de Sour el Ghozlane filiale de groupe GICA en particulier Madame KOUICI Anissa et Monsieur AZZI Mustapha.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements tous le personnel de département génie civil, aussi les techniciens de laboratoires pédagogiques génie électrique et chimie pour leurs aides et orientations.*

*Nos sincère remerciements aux membres du jury d'avoir accepté de juger ce projet de fin d'étude.*

# Résumé

---

## Résumé

Les ajouts cimentaires actifs à caractère pouzzolanique font actuellement partie des développements Les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés soit rhéologiques ou physico-mécaniques des matériaux cimentaires (mortier). D'autre part leur utilisation a pour objectif de réduire la consommation d'énergie et de clinker, en Contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

Ce travail expérimental étudie a été d'évaluer expérimentalement l'influence des teneurs de substitution de la bentonite Calcinée (0%, 8%, 10%, 12%, 14% et 16 %) sur les propriétés à l'état durci et l'activité pouzzolanique des mortiers durable (après 5 ans de durcissement). Le but de ce travail est d'étudier la physico-chimie d'hydratation des mortiers, la caractérisation de l'ajout cimentaires, leur activité pouzzolaniques et leurs propriétés soit structurales ou microstructurales demandées d'une part l'influence de la substitution d'une partie de ciment sur l'activité pouzzolanique, d'autre part l'estimation de la durabilité des mortiers formuler à base des liants ciment - bentonite calcinée avec un taux allant de 0 à 16 % qui ont tout de même l'avantage d'atteindre des performances acceptables du point de vue de la durabilité a long terme.

Les résultats ont montré que les résistances augmentent légèrement à long terme et ceux pour les mortiers à base de 12% de bentonite calcinée, puisque c'est le taux moyen qui a satisfait les critères d'amélioration de la relation résistance- propriétés liantes et pour améliorer aussi la durabilité et le cycle de vie des mortiers.

**Mots-clés:** bentonite calcinée, ciment, mortier, activité pouzzolanique, durabilité.

# Abstract

---

## **Abstract**

Active pozzolanic cementitious additions are currently among the most recent developments in the production of cement, because their uses provide an improvement in the rheological and physico-mechanical properties of cementitious materials (mortar). On the other hand, their use aims to reduce energy and clinker consumption, contributing in a simple and economical way to solving problems related to the environment.

This experimental work study was to experimentally evaluate the influence of the substitution contents of Calcined Bentonite of (0%, 8%, 10%, 12%, 14% and 16%) on the properties in the hardened state and the pozzolanic activity of lasting mortars (after 5 years of hardening). The aim of this work is to study the physico-chemistry of hydration of mortars, the characterization of the cementitious addition, their pozzolanic activity and their properties either structural or microstructural requested on the one hand the influence of the substitution of a part of cement on the pozzolanic activity, on the other hand the estimation of the durability of mortars formulated based on binders cement - calcined bentonite with a rate ranging from 0 to 16% which all the same have the advantage of achieve acceptable performance from a long-term sustainability perspective.

The results showed that the resistances increase slightly in the long term and those for mortars based on 12% calcined bentonite, since it is the average rate that satisfied the criteria for improving the resistance-binding properties relationship and for also improve the durability and life cycle of mortars.

**Key word :** Calcined Bentonite, cement, Mortar, pozzolanic activity, durability.

### المُلخَص

تعتبر الإضافات الإسمنتية البوزولانية النشطة حالياً من بين أحدث مواد تكنولوجيا في إنتاج الأسمنت ، لأن استخداماتها توفر تحسناً في الخصائص الهيكلية و الفيزيائية- الميكانيكية للمواد الأسمنتية (الاملاط). من ناحية أخرى ، يهدف استخدامها في تقليل استهلاك الطاقة والكلنكر ، مما يساهم بطريقة بسيطة واقتصادية في حل المشكلات المتعلقة بالبيئة.

تهدف هذه الدراسة التجريبية إلى إجراء تقييم تجريبي لتأثير محتويات الاستبدال للبنتونيت المكلس (0% ، 8% ، 10% ، 12% ، 14% و 16%) على الخصائص في الحالة المتصلبة والنشاط البوزولاني للملاط الدائم (بعد 5 سنوات من التصلب). الهدف من هذا العمل هو دراسة الكيمياء الفيزيائية للملاط ، وتمييز الإضافة الأسمنتية ، ونشاطها البوزولاني وخصائصها الهيكلية أو الهيكلية الدقيقة المطلوبة من ناحية تأثير استبدال جزء من الأسمنت على النشاط البوزولاني ، من ناحية أخرى ، تقدير متانة الاملاط المصاغ على أساس (الأسمنت اللاصق – البنتونيت المكلس) بمعدل يتراوح من 0 إلى 16 % والتي تتمتع جميعها بميزة تحقيق الأداء المقبول من منظور الاستدامة على المدى الطويل

أظهرت النتائج أن المقاومة تزداد بشكل واضح على المدى الطويل وتلك الخاصة بالملاط على أساس 12% من البنتونيت المكلس ، حيث أنه المعدل المتوسط الذي يفي بمعايير تحسين علاقة خصائص الارتباط بالمقاومة ولتحسين المتانة ودورة الحياة المواد الاسمنتية.

الكلمات المفتاحية : البنتونيت المكلس, الأسمنت, الاملاط, النشاط البوزولاني, الاستدامة.

## SOMMAIRE

Résumé .....	
Table des matières .....	
Introduction général.....	8

### PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

#### CHAPITRE I : Chimie du ciment Portland et son hydratation

I.1 INTRODUCTION.....	10
I.2. Ciment Portland .....	10
I.3. Clinker.....	11
I.3.1. Composition chimique du clinker .....	11
I.3.2. Composition minéralogique du clinker .....	12
I.3.2.1. Silicate tricalcique ( $C_3S$ ou Alite) .....	13
I.3.2.2. Silicate bicalcique ( $C_2S$ ou bélite) .....	13
I.3.2.3. Aluminates tricalciques ( $C_3A$ ) .....	14
I.3.2.4. Alumino -ferrite tétracalcique ( $C_4AF$ ) .....	14
I.3.2.5. Oxyde de calcium ( $CaO$ ) .....	14
I.3.2.6. Gypse ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ).....	14
I.4. Classification des ciments .....	15
I.4.1. Classification des ciments en fonction de leur composition	15
I.4.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance mécanique..	16
I.5. Hydratation du ciment Portland .....	16
I.5.1. Evolution de l'hydratation .....	17
I.5.2. Mécanisme d'hydratation .....	18
I.6. Hydratation des phases du ciment Portland .....	19
I.6.1. Hydratation des aluminates .....	20
I.6.2. Hydratation du silicate calcique .....	21
I.6.2.1. Dissolution du silicate tricalcique .....	21
I.6.2.2. Précipitation des hydrosilicates de calcium (C-S-H) .....	22
I.6.2.3. Précipitation de la portlandite .....	22
I.7. Rôle des C-S-H dans l'hydratation du ciment Portland .....	23
I.8. Facteurs influençant la cinétique de l'hydratation.....	25
I.8.1. Classe du ciment .....	25

I.8.2.Granulométrie du ciment .....	25
I.8.3.Température d'hydratation.....	
I.8.4.Eau de gâchage .....	25
I.8.5.Composés solubles dans le ciment.....	25
I.9. Ajouts cimentaires .....	25
I.9.1. Classification des ajouts .....	26
I.10. les matériaux cimentaires .....	26
I.10.1. Mortier.....	26
I.10.1.1.Introduction.....	26
I.10.1.2.Composition .....	27
I.10.1.3.Les différents mortiers .....	29
I.10.2.Caractéristiques principales.....	31
I.11.Généralités sur les bétons.....	31
I.11.1.Introduction.....	31
I.11.2.Constituants d'un béton.....	33
I.11.3. Mise en œuvre .....	33
I.11.4.Durcissement.....	33
I.11.5.Vieillessement .....	34
I.11.6.Classification du béton.....	34
I.12. Coulis de ciment .....	35
I.13.Conclusion.....	36

## **CHAPITRE II : Etude de l'activité pouzzolanique à base de l'argile.**

II.1. Introduction.....	37
II.2. La pouzzolane .....	37
II.2.1. Histoire de pouzzolane .....	37
II.2.2.Définition .....	38
II.3. L'activité pouzzolanique .....	39
II.4.Réaction pouzzolanique .....	39
II.5. Evaluation de l'activité pouzzolanique .....	39
II.5.1. La détermination chimique (test chapelle)...	40
II.5.2. Méthode physique .....	40
II.5.3. Essais mécaniques .....	42
II.6. Les réactions physico-chimiques de la pouzzolane .....	42

II.7. Ajouts cimentaires .....	43
II.7.1. Définition des ajouts cimentaires .....	43
II.7.2. Rôle de l'ajout cimentaire .....	44
II.7.2.1. Rôle de la granulométrie de l'ajout .....	44
II.7.2.2. Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaire .....	44
II.7.2.3. Classification des ajouts minéraux .....	44
II.7.2.4. Principaux ajouts minéraux inertes .....	44
II.8. Types des Matériaux pouzzolaniques.....	45
II.8.1 La pouzzolane .....	45
II.8.1.1. Pouzzolane naturelle .....	46
II.8.1.2. Pouzzolane artificielle .....	47
II.9.Effets des ajouts sur les propriétés des bétons .....	50
II.9.1. Amélioration de l'ouvrabilité .....	50
II.9.2. Chaleur d'hydratation .....	50
II.10. Durabilité.....	51
II.10.1.Introduction.....	51
II.10.2.Définition .....	51
II.10.3. Les facteurs influent sur la durabilité .....	51
II.11. La résistance.....	52
II.11.1.Développement des résistances.....	52
II.12. L'utilisation des ajouts en Algérie .....	53
II.13. utilisations de la pouzzolane Dans l'industrie.....	53
II.14. Conclusion .....	54

## PARTIE II : ETUDE EXPERIMENTALE

### CHAPITRE III : Présentation des résultats expérimentaux et discussion

III.1 Introduction.....	56
III.2 Caractéristiques des matériaux .....	57
III.2.1. Le sable .....	57
III.2.1.1. Propreté .....	57
III.2.1.2. L'essai au bleu de méthylène .....	58
III.2.1.3. La composition chimique .....	59
III.2.1.4. La masse volumique .....	59
III.2.1.5. Analyse granulométrique.....	60

III.2.1.6. Module de finesse .....	62
III.2.2 Liant .....	62
III.2.2.1. Les essais physiques .....	62
III.2.2.2. Les essais mécaniques .....	63
III.2.2.3. Les essais chimiques .....	63
III.2.2.4. Les essais minéralogiques.....	64
III.2.3. L'eau de gâchage.....	64
III.2.4. L'adjuvant .....	64
III.2.5 Argile .....	65
III.2.5.1.La composition chimique des argiles (bentonite calciné) .....	65
III.2.5.2. propriétés physiques .....	66
III.3. Résultats et discussions .....	66
III.3.1.Essais physico-chimiques .....	66
III.3.1.1.Essai de la fluorescence X (FRX) .....	66
III.3.1.2.Essai diffraction aux rayons X (DRX) .....	67
III.3.1.2.1.Principe de la diffraction aux rayons X sur poudre .....	67
III.3.1.2.3.Résultats de l'analyse à la DRX des échantillons.....	69
III.3.1.3.Essai infrarouge .....	69
III.3.1.3.1.Principe de l'essai .....	69
III.3.1.3.2.Préparation des échantillons .....	70
III.3.1.3.3.Résultats de l'analyse .....	71
III.3.2.Essais non destructifs .....	72
III.3.2.1.Essai ultrason .....	72
III.3.2.1.1.Description de l'appareil .....	72
III.3.2.1.2.Principe de mesure .....	73
III.3.2.1.4.Résultats et discussion de l'analyse .....	75
III.3.3.Essai conductivité et capacité électrique .....	82
III.3.3.1.Principe de l'essai .....	82
III.3.3.2.Résultats de l'analyse.....	
III.3.4.Essai microstructural (Microscope Electronique à Balayage MEB ou SEM).....	84
III.3.4.1.Principe de l'essai .....	84
III.3.4.3.Résultats de l'analyse .....	85

Conclusion générale .....	87
Bibliographie.....	89

# Liste des tableaux

---

## Chapitre I : Chimie du ciment Portland et son hydratation.

<b>Tableau I.1.</b> Composition chimique du clinker Portland [7].....	11
<b>Tableau I.2.</b> Composition minéralogique du clinker.....	12
<b>Tableau I.3.</b> Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques des ciments suivant leur classe [24].....	16
<b>Tableau I.4.</b> Chaleur d'hydratation du ciment et de ses minéraux [7].....	17
<b>Tableau I.5.</b> Classification des ajouts selon leur réactivité. [38].....	26

## Chapitre II : Etude de l'activité pouzzolanique à base de l'argile.

<b>Tableau II.1.</b> Caractéristique physique de la pouzzolane naturelle	46
<b>Tableau II.2.</b> Caractéristique chimique de la pouzzolane naturelle.....	46
<b>Tableau II.3.</b> Composition chimiques de la fumée de silice.....	48
<b>Tableau II.4.</b> Composition chimique type de laitiers de haut fourneau.....	49
<b>Tableau II.5.</b> Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes.....	53

## Chapitre III : Matériaux et méthodes.

<b>Tableau III.1.</b> Codification des échantillons.....	56
<b>Tableau III.2.</b> Valeur de la propreté du sable.....	58
<b>Tableau III.3.</b> Résultat d'essai au bleu de méthyle.....	59
<b>Tableau III.4.</b> La composition chimique norme NF P 18-467.....	59
<b>Tableau III.5.</b> Valeur des masses volumiques norme NF P 18-554.....	60
<b>Tableau III.6.</b> Analyse granulométrique du sable de carrière 0/4.....	61
<b>Tableau III.7.</b> Valeur du module de finesse.....	62
<b>Tableau III.8.</b> Caractéristiques physiques.....	62
<b>Tableau III.9.</b> Caractéristiques mécaniques.....	63
<b>Tableau III.10.</b> Composition chimique du ciment.....	63
<b>Tableau III.11.</b> La composition minéralogique de ciment.....	64
<b>Tableau III.12.</b> Composition chimique de bentonite calcinée.....	65
<b>Tableau III.13.</b> Les propriétés physiques de bentonite calcinée.....	66
<b>Tableau III.14.</b> Propriétés chimiques des variantes.....	67
<b>Tableau III.15.</b> Résultats obtenus de l'essai ultrason.....	75

### INTRODUCTION GENERALE

Actuellement les différents ajouts minéraux sont utilisés plus en plus dans les matériaux cimentaires, ils sont valorisés en addition ou en substitution d'une partie du ciment comme matières cimentaires supplémentaires MCS, Pour plusieurs raisons soit pour des raisons techniques, économiques et environnementales soit pour améliorer certaines propriétés à l'état frais ou durci, soit pour des raisons écologiques (gaz à effet de serre). La production d'une tonne de ciment libère environ la même quantité de dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère le remplacement d'une partie de ciment par des ajouts cimentaires permettra de diminuer de façon systématique la quantité de dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  émise.

L'utilisation des matériaux géoressources naturelles ou artificielles dans la production des ciments Portland a résolu en grande partie, le problème d'autosuffisance nationale, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique. En faisant varier les taux de substitution en fonction des domaines d'utilisation et les différents types de ciments avec leurs propriétés soit structurales ou microstructurales demandées.

La géologie algérienne riche en ressources minières qui peuvent être utilisées dans la substitution d'une partie de ciment. L'exploration de ces ressources peut aboutir à des solutions pour rendre le ciment plus performant, plus économique et moins polluant, et apporter une très forte valeur ajoutée. Pour cela, Nous avons opté dans notre travail à explorer la possibilité d'utiliser la bentonite calcinée comme matériaux cimentaire de remplacement pouzzolanique.

L'objectif de notre étude a été d'évaluer expérimentalement l'influence des teneurs de substitution de la bentonite Calcinée (0%, 8%, 10%, 14% et 16 %) sur les propriétés et l'activité pouzzolanique des mortiers durables.

Ce mémoire se compose de deux parties :

**La première partie** (Etude bibliographique sur l'hydratation des matériaux cimentaires et leur activité pouzzolanique), est divisée en deux chapitres :

- Le premier chapitre comporte les généralités sur les matériaux cimentaires en traitant principalement les mécanismes d'hydratation du ciment portland et les propriétés de ses phases hydratées.

- Le deuxième chapitre présente la caractérisation et la classification des ajouts cimentaires et leurs activités pouzzolaniques.

**La deuxième partie :** Matériaux, Méthodes, Résultats et discussions.

Le troisième chapitre est consacré et comporte les résultats et leurs discussions relatifs aux essais :

- Essais spectrophotométrie InfraRouge à Transformée de Fourier IFTR ;
- Essais fluorescence des rayons X
- Essai diffraction aux rayons X (DRX)
- Essais d'auscultation sonore (ultra-son) ;
- Essai de la conductivité et la capacité électrique.
- Morphologie par Microscopie Electronique à Balayage (MEB) ou Scanning Electron Microscopy (SEM);

Enfin, ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale inspirée des résultats obtenus et par des Perspectives que nous avons jugé utiles de poursuivre dans notre prochaine recherche éventuelle.

### **I.1.Introduction**

Les mortiers et les bétons ont connu un essor important ces dernières années en Algérie dans de divers domaines à savoir: bâtiments, ouvrages d'arts, constructions spéciales, Composés essentiellement à partir de liants hydrauliques, ce sont des systèmes rendus complexes par l'incorporation de nombreux adjuvants, sous-produits et déchets issus des industries de fabrication des matériaux de construction, dont les effets, bénéfiques et parfois antagonistes ne sont pas encore totalement compris.

### **I.2. Ciment Portland**

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse. [1]

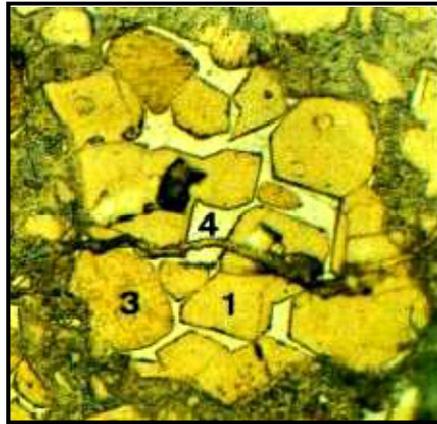
Le ciment peut être constitué aussi de laitier de haut fourneau (S), de pouzzolane naturelle (Z), de cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W), de fumée de silice (D), de calcaire (L), de schistes calcinés (T), de constituants secondaires, de sulfate de calcium (gypse, hémihydrates, anhydrite) et d'additifs. [2]

Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton autoplaçant est soit le ciment Portland CPA-CEM I 42,5 qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-CEM II/A et B 42,5 dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts. [3]

Le constituant principal du ciment Portland est le clinker. Ce dernier est issu de la cuisson à 1450°C d'un mélange de calcaire et d'argile dans les proportions respectives d'environ 80 et 20% [4]. A ce clinker est ajouté une faible quantité de sulfate de calcium (moins de 5%) pour obtenir le ciment. Cet ajout est destiné à augmenter le temps d'ouvrabilité du ciment en modifiant l'hydratation des phases aluminates. Il existe une variété importante de ciments industriels qui se différencient principalement par les ajouts minéraux additionnés au clinker. Ces derniers peuvent être inertes ou caractérisés par des propriétés d'hydraulicité et de pouzzolanité. [5]

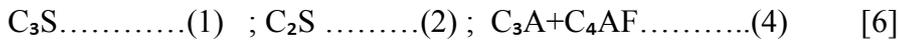
**I.3. Clinker**

Le clinker se présente sous forme de nodules durs et cristallisés de teinte grise foncée. Sous microscopie optique il apparaît sous forme de grains poly cristallins de quelques dizaines de microns. (Figure I.1) [6]



**Figure I.1.** Grains polycristallins d’un clinker Portland anhydre.

(Image obtenue par microscopie optique en lumière réfléchiée sur section polie légèrement attaquée par HNO<sub>3</sub>):



**I.3.1. Composition chimique du clinker**

La composition chimique du clinker garantit les qualités du ciment à terme, c’est-à-dire pendant sa fabrication, et également des mois, voire des années, après sa commercialisation. Des analyses sont donc effectuées sur des échantillons prélevés régulièrement tout au long du processus de la fabrication.

**Tableau I.1.** Composition chimique du clinker Portland. [7]

Elément	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Ti <sub>2</sub> O
<b>Fourchette %</b>	62 à 68	18 à 24	4 à 8	2 à 5	0 à 5	0 à 5	0 à 2	0 à 2	0 à 2
<b>Moyenne %</b>	66,6	21,9	6,3	2,5	1,0	0,8	0,2	0,2	0,2

On constate que les quatre oxydes CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interviennent pour plus de 95% de la composition chimique du clinker. On les appelle les oxydes majeurs. Ainsi les oxydes mineurs les plus importants dans le ciment sont:

- la magnésie (MgO) : provient de la dolomite qui est souvent présente avec le calcaire,
- les oxydes alcalins  $K_2O$ ,  $Na_2O$  : proviennent en général, de l'argile et des feldspaths,
- l'anhydride sulfurique ( $SO_3$ ) : provient des matières, telles que la pyrite ( $FeS_2$ ), mais aussi du calcaire ou de l'argile et surtout des combustibles utilisés tels que le charbon, le fuel ou le gaz naturel.

Pour contrôler la qualité et la régularité de la fabrication du clinker à partir des oxydes dans les cimenteries, certains modules chimiques sont nécessaires à calculer. [8] On définit par exemple:

Module hydraulique:  $MH = \frac{CaO}{SiO_2} + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  compris entre 1,7 et 2,2

Module silicique:  $MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} + Fe_2O_3$  compris entre 2,4 et 2,7

Module alumino-ferreux :  $MF = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$  compris entre 1,5 et 2,5

### I.3.2. Composition minéralogique du clinker

Les compositions minéralogiques des ciments Portland est une fonction du mélange de clinker et 5% de gypse), mais aussi de la température de cuisson du clinker et des conditions de refroidissement (trempé à l'air). [9-10] Il contient quatre principaux composants (Tableau I.2).

**Tableau I.2 .**Composition minéralogique du clinker.

Notation symbolique	Nom	Formule chimique	% en poids
<b>C<sub>3</sub>S</b>	Silicate tricalcique (Alite)	$3CaO.SiO_2$	50 à 70
<b>C<sub>2</sub>S</b>	Silicate bicalcique (Bélite)	$2CaO.SiO_2$	10 à 30
<b>C<sub>3</sub>A</b>	Aluminate tricalcique (Célite)	$3CaO.Al_2O_3$	2 à 15
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	Alumino-ferrite tétracalcique (Célite II)	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	5 à 15

### I.3.2.1. Silicate tricalcique ( $C_3S$ ou Alite)

L'alite est le minérale le plus important et le plus actif du ciment Portland. Sous microscope il se présente en gros cristaux pseudo hexagonaux jointifs ou maclés, la taille varie suivant la cuisson de 10 à 50  $\mu\text{m}$  (Figure 1.3). [11] En réalité, c'est une solution solide contenant des ions étrangers tel que Al, Mg, Fe, Na, K, etc.

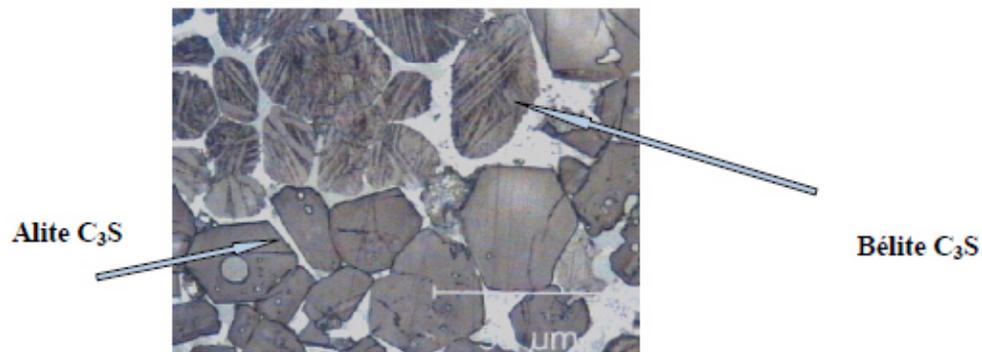
Le  $C_3S$  présente sept formes allotropiques depuis la température ambiante jusqu'à 1070°C : [12,13] trois phase tricliniques TI, TII, TIII, trois phase monocliniques MI, MII, MIII et une phase rhomboédrique R.

### I.3.2.2. Silicate bicalcique ( $C_2S$ ou bélite)

La bélite est définie comme une solution solide du silicate bicalcique renfermant des ions étrangers. C'est le minéral qui contribue à augmenter les résistances à long terme (résistances finales). Le silicate bicalcique ( $C_2S$ ) existe sous différentes formes polymorphiques, qui sont stables dans des domaines de températures différents. [14]

- $\alpha$ - $C_2S$  : Hexagonale  $\rightarrow$  plus de 1470°C, de densité 2,94
- $\alpha_H$ - $C_2S$  : Orthorhombique  $\rightarrow$  1160 à 1470°C, de densité 3,11
- $\alpha_L$ - $C_2S$ : Orthorhombique  $\rightarrow$  630 à 1160, de densité 3,14
- $\beta$ - $C_2S$ : Monoclinique  $\rightarrow$  < 675°C de densité 3,20
- $\gamma$ - $C_2S$ : Orthorhombique  $\rightarrow$  < 820°C de densité 2,94

La forme de  $C_2S$  souvent rencontrée dans le clinker industriel est la forme  $\beta$  qui possède des propriétés hydrauliques. Les cristaux ont souvent des formes arrondies de taille de 300  $\mu\text{m}$ , à surface striée ou lisse (Figure I.2). Les stries proviennent du passage de la forme  $\alpha$  à la forme  $\beta$ . [15]



**Figure I.2.** Minéraux de clinker sous microscope optique (section polie). [11]

### I.3.2.3. Aluminates tricalciques ( $C_3A$ )

L'aluminate tricalcique est une solution solide, qui ne présente aucune transformation allotropique, dont le réseau est cubique. Il contribue à la prise du ciment mais assez peu à la résistance finale.  $C_3A$  a une densité proche de 3,04. Ces cristaux ont un aspect variable suivant le mode de refroidissement du clinker, ils sont petits et mal formés si le refroidissement est rapide, et grands de forme rectangulaire dans le cas inverse. [8]

### I.3.2.4. Alumino -ferrite tétracalcique ( $C_4AF$ )

L'Aluminoferrite tétracalcique ( $C_4AF$ ) est une solution solide, de structure cristalline orthorhombique. Il forme une série de solide entre  $C_2A$  et  $C_2F$  [16] qui donne la couleur au ciment. L'ensemble de  $C_3A$  et  $C_4AF$  constitue la phase interstitielle du clinker.

### I.3.2.5. Oxyde de calcium ( $CaO$ )

La chaux libre sous forme vive ( $CaO$ ) ou éteinte ( $Ca(OH)_2$ ), se trouve dans le clinker en très faible quantité avec la magnésie ( $MgO$ ). La chaux vive et la magnésie sont cristallisées dans le système cubique, par contre la chaux éteinte est hexagonale. Suivant la norme, la teneur de  $CaO$  libre dans le clinker doit être inférieure à 2% et la teneur de  $MgO$  libre inférieure à 5%.

### I.3.2.6. Gypse ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )

Le gypse pur est blanc, opaque ; les cristaux sont incolores, mais il est souvent coloré par des impuretés en jaune, en gris ou en brun (trace d'argile, silice, oxyde de fer,...). Le gypse  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  cristallise dans le système monoclinique. Le gypse peut également présenter une structure fibreuse, lamellaire ou terreuse. [8]

Il s'ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydroaluminates de calcium en d'autres composés. Ce rôle peut bien être joué par le gypse qui réagit énergiquement avec l'hydroaluminate tricalcique et produit un sel insoluble d'hydrosulfoaluminate de calcium ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ).

La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en  $\text{C}_3\text{A}$  dans le liant et lorsque cette teneur en gypse est respectée, l'action des hydroaluminates de calcium se trouve paralysée au moment initial.

#### **I.4. Classification des ciments**

Dans les normes actuelles [17], les ciments Portlands sont classifiés doublement, en fonction de leurs compositions (présence ou non d'ajouts) et de leurs résistances à la compression au jeune âge et à 28 jours.

##### **I.4.1. Classification des ciments en fonction de leur composition**

Les ciments constitués de clinker et d'ajouts cimentaires sont classés en fonction de leur composition, selon les normes Européenne ENV 197-1 et Algérienne NA 442, qui les divisent en cinq classes et notés « CEM » suivi d'un chiffre romain de 1 à 5 :

- CEM I: Ciment Portland,
- CEM II: Ciment Portland composé,
- CEM III: Ciment de haut fourneau,
- CEM IV: Ciment pouzzolanique,
- CEM V: Ciment composé.

Pour les ciments II, III, IV et V, une lettre A, B ou C est ajoutée pour indiquer la proportion des constituants.

Tous les ciments peuvent contenir entre 0 et 5 % de constituants secondaires, filler ou bien un ou plusieurs constituants principaux, sauf lorsque ceux-ci sont déjà présents dans le ciment en tant que constituants principaux.

### I.4.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance mécanique

Les normes Algériennes NA 234 et européennes EN 196–1 classent les ciments suivant leur résistance normale à 2, 7 et 28 jours. La résistance normale du ciment est la résistance à la compression mesurée sur mortier normalisé conformément à la norme, elle s'exprime couramment en MPa. Les classes de résistance sont notées : classe 32,5 ; classe 42,5 et classe 52,5. Il à noter aussi que pour chaque classe de résistance, on défini 2 sous-classes de résistance au jeune âge selon

sa vitesse de développement : développement normale de la résistance indiquée par «N» et rapide indiquée par « R » (Tableau I.3). Cette dernière se caractérise par des résistances initiales plus élevées, appréciées pour les opérations de décoffrage, démoulage, mise en précontrainte et manutention précoce. Ces deux sous-classes sont distinguées par la finesse du ciment qui est plus élevée dans le cas de « R ».

**Tableau I.3.** Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques des ciments suivant leur classe. [24]

Classe du ciment	Résistance à la compression (MPa)				Temps de Début de prise (min)	Stabilité (Expansion) (mm)
	Résistance au jeune âge		Résistance normale à 28 jours			
	2 jours	7 jours	mini	maxi		
32.5 N	–	≥16,0	≥32,5	≤52,5	≥75	≤10
32.5 R	≥10,0	–				
42.5 N	≥10,0	–	≥42,5	≤62,5	≥60	
42.5 R	≥20	–				
52.5 N	≥20	–	≥52,5	–	≥ 45	
52.5 R	≥30	–				

### I.5. Hydratation du ciment Portland

En chimie du ciment, on entend par hydratation toute forme d'action de l'eau intervenant dans le mécanisme de prise et de durcissement du ciment. La poudre de ciment n'est pas une matière liante, ce n'est que par ses produits d'hydratation que cette substance le

devient. Ses caractéristiques dépendent essentiellement de la nature des composants et de leurs quantités respectives.

D'après la théorie cristalloïde de Henry LE CHATELIER (1887), le liant mis en présence d'eau donnerait naissance à une solution sursaturée. Les composés anhydres se dissoudraient puis les hydrates formés, peu solubles, précipiteraient sous forme de microcristaux, ce qui permettrait une nouvelle dissolution d'éléments anhydres. Les réactions se poursuivraient jusqu'à la mise en solution de la totalité du liant. Le durcissement serait dû à la multiplication et à l'adhérence des cristaux formés. Le ciment durci est une véritable roche artificielle mais qui évolue dans le temps et suivant les conditions extérieures. [8]

### I.5.1. Evolution de l'hydratation

L'hydratation des ciments Portland est un phénomène complexe mettant en jeu des réactions chimiques entre les composants du ciment et l'eau de gâchage. Ce processus physico-chimique est à l'origine de la prise et du durcissement de la matrice cimentaire. Les réactions d'hydratation s'accompagnent d'un dégagement de chaleur qui peut être mesuré par calorimétrie. La chaleur dégagée donne alors une indication sur l'avancement du processus d'hydratation. Le (Tableau I.4) récapitule les valeurs de dégagement de chaleur moyen (en J/mol) de chaque phase du ciment portland.

**Tableau I.4.** Chaleur d'hydratation du ciment et de ses minéraux. [7]

Constituants du ciment Portland	Chaleur d'hydratation (J/mol)		
	7 jours	28 jours	6 mois
<b>C<sub>3</sub>S</b>	460	502	502
<b>C<sub>2</sub>S</b>	84	189	251
<b>C<sub>3</sub>A</b>	773	857	865
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	168	209	293

### I.5.2. Mécanisme d'hydratation

Lorsqu'elles sont mises au contact de l'eau, les différentes phases pures du ciment s'hydratent suivant un processus exothermique de dissolution-précipitation pour former un matériau cohésif [19-20]. L'hydratation du ciment se fait en 5 étapes (Figure I.3).

Pendant la première étape qui dure une quinzaine de minutes l'hydratation initiale a lieu. Elle consiste en la dissolution des composés les plus solubles ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ). Parallèlement, l'hydrolyse des silicates les plus réactifs, par dissolution complète (congruente) ou sélective (incongruente), produit des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$  [21]. Il en résulte une forte augmentation du pH et de la proportion des silicates et des aluminates en solution. Ces phases sont, en effet, très solubles dans les solutions très alcalines. La dissolution de ces produits s'accompagne de la formation d'une couche mince de produits intermédiaires amorphes. Le premier gel qui se forme est composé majoritairement d'aluminates. Il se forme également rapidement du gel de C-S-H sur le  $\text{C}_3\text{S}$ . La précipitation des premiers hydrates par nucléation hétérogène (à l'interface solide/solution) s'accompagne d'un ralentissement brutal des réactions d'hydratation. C'est pourquoi il apparaît une nouvelle période appelée période d'induction ou période dormante. Ce ralentissement est dû à la formation d'une couche d'hydrates peu perméables autour des grains anhydres. La réaction de dissolution est alors limitée par la diffusion des ions à travers cette couche. Au bout de quatre heures environ la concentration de la solution devient sursaturée par rapport à la portlandite (CH) issu du ciment. La précipitation de la portlandite qui se produit à ce moment consomme une quantité importante de calcium. On parle ainsi d'un effet de « pompe à calcium » à la surface des grains en cours de réaction. L'apparition de l'accélération est due notamment à une rupture de la couche protectrice d'hydrates par des effets osmotiques [21]. Les phénomènes de cristallisation reprennent à partir de la solution saturée, par un processus de nucléation homogène. Le déclenchement de cette cristallisation et l'accélération de la réaction accompagnent la structuration de la pâte pendant environ quatre heures. L'épuisement progressif des anhydres entraîne la décélération de l'hydratation. Le durcissement de la pâte se produit alors pendant les seize heures qui suivent. Le renforcement des propriétés mécaniques, appelé cure du matériau, dure plusieurs dizaines de jours. [21]

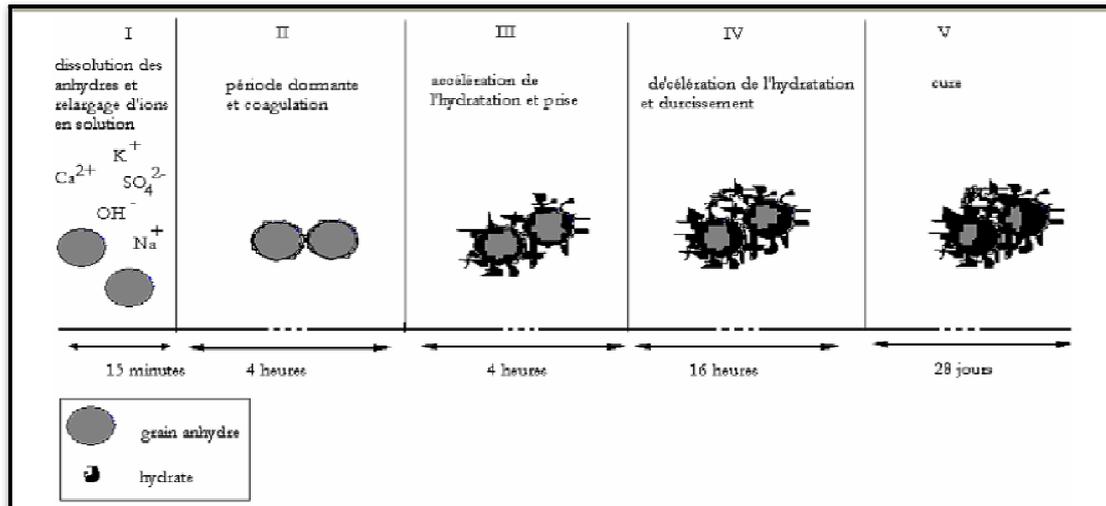


Figure I.3. Schéma récapitulatif de l'hydratation de deux grains de ciment. [22]

### I.6. Hydratation des phases du ciment Portland

Les quatre phases majoritaires du ciment peuvent être divisées en deux familles: les aluminates ( $C_3A$  et  $C_4AF$ ) et les silicates ( $C_3S$  et  $C_2S$ ). Dans une même famille, l'hydratation des constituants conduit à des produits identiques, seules les cinétiques des réactions diffèrent. Ce sont ces différentes cinétiques qui sont à l'origine de l'évolution des propriétés mécaniques d'une pâte de ciment à l'échelle macroscopique. Elles permettent le maintien de la maniabilité, la prise puis le durcissement de cette pâte. Le développement et la cinétique de l'hydratation sont représentés dans la Figure I.4.

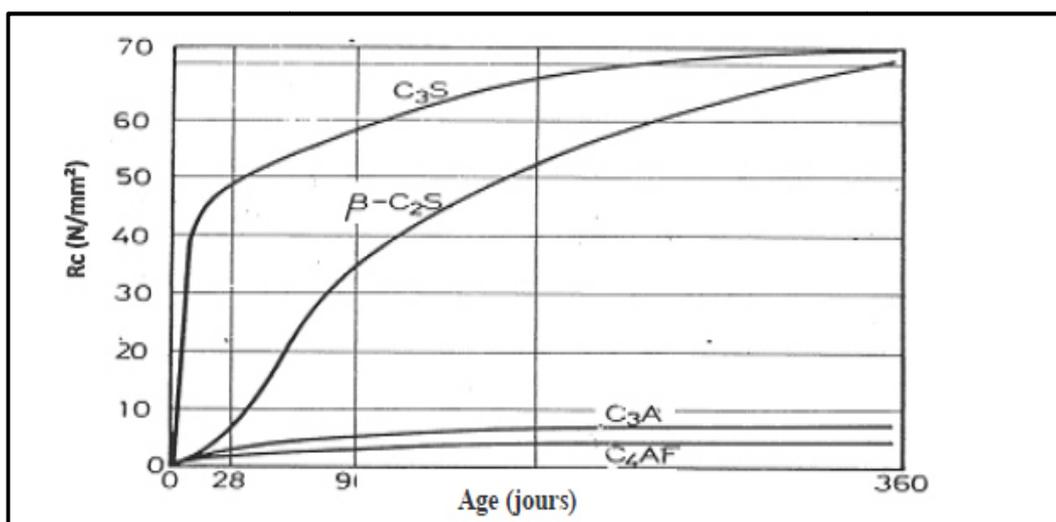


Figure I.4. Résistance des différents constituants du clinker [11].



monosulfoaluminate cristallise sous la forme de plaquettes hexagonales. Sa structure est constituée d'une double couche d'hydroxyde avec une couche d'hydroxyde de calcium dans laquelle le tiers des ions calcium est remplacé par des ions  $Al^{3+}$  ou  $Fe^{3+}$  et des contre-ions sulfates entourés de molécules d'eau dans l'espace interfeuillet. L'ettringite et les monosulfates représentent 20 à 30% du ciment hydraté. La vitesse de recristallisation de l'ettringite est très faible. Cette particularité joue un rôle très important dans l'hydratation du ciment puisqu'elle permet de garder la maniabilité de la pâte dans les premières heures.

En outre, plus le  $C_3A$  est réactif, plus la vitesse de mise en solution et la solubilité du sulfate de calcium doivent être élevée pour que la réaction (1) soit favorisée. Dans le cas contraire, la réaction (3) prédomine. C'est pourquoi, le  $C_3A$  est très important dans l'hydratation du ciment puisque sa réactivité et le type de sulfate de calcium utilisé auront un effet direct sur la prise de la pâte de ciment. En effet, dans un ciment à fort taux de  $C_3A$ , l'enchevêtrement des aiguilles entraîne un raidissement de la pâte qui conduit à un temps de prise plus court que dans un ciment à faible taux de  $C_3A$ .

### **I.6.2. Hydratation du silicate calcique**

L'hydratation du silicate tricalcique procède selon une succession de trois réactions qui deviennent rapidement simultanées : la dissolution du silicate anhydre, la précipitation de l'hydrosilicate (C-S-H) et la précipitation de l'hydroxyde de calcium sous forme de portlandite.

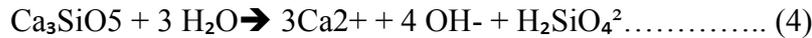
L'hydratation du silicate bicalcique est approximativement la même que celle de  $C_3S$ , mais le silicate bicalcique s'hydrate plus lentement suivant l'équation ci-dessous



#### **I.6.2.1. Dissolution du silicate tricalcique**

Lors de la mise en contact du  $C_3S$  avec l'eau, intervient d'abord la protonation des ions  $SiO_4^{4-}$  sur la surface des particules de silicate [25-26] et la formation des ions solubles  $H_2SiO_4^{2-}$  ou  $H_3SiO_4^-$  suivant le pH [27]. Pourtant l'espèce  $H_2SiO_4^{2-}$  est la forme prépondérante dans les conditions d'hydratation d'une pâte de  $C_3S$  seul. Après cette

première interaction, le  $C_3S$  superficiellement hydroxylé se dissout et la solution devient riche en ions silicates, calcium et hydroxydes.



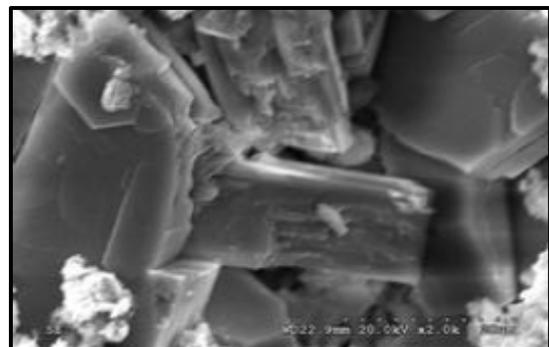
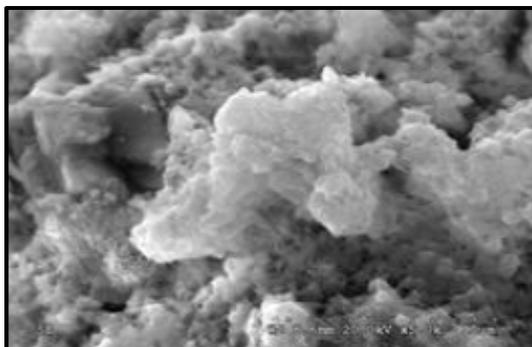
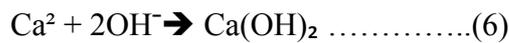
### I.6.2.2. Précipitation des hydrosilicates de calcium (C-S-H)

Au fur et à mesure que la dissolution du silicate tricalcique se poursuit, la solution interstitielle de la pâte de ciment s'enrichit en ions calcium, hydroxyde et silicate. Lorsque celle-ci atteint la sursaturation maximale par rapport aux hydrosilicates de calcium, il y a alors formation de germes de C-S-H selon la réaction :



### I.6.2.3. Précipitation de la portlandite

La différence de stœchiométrie entre le  $C_3S$  et le C-S-H conduit à l'accumulation d'ions calcium et hydroxydes en solution et la phase liquide peut atteindre la sursaturation maximale par rapport à la portlandite ( $[Ca(OH)_2] = 36 \text{ mmol/l}$  à  $25^\circ C$ ). Celle-ci précipite selon la réaction suivante :

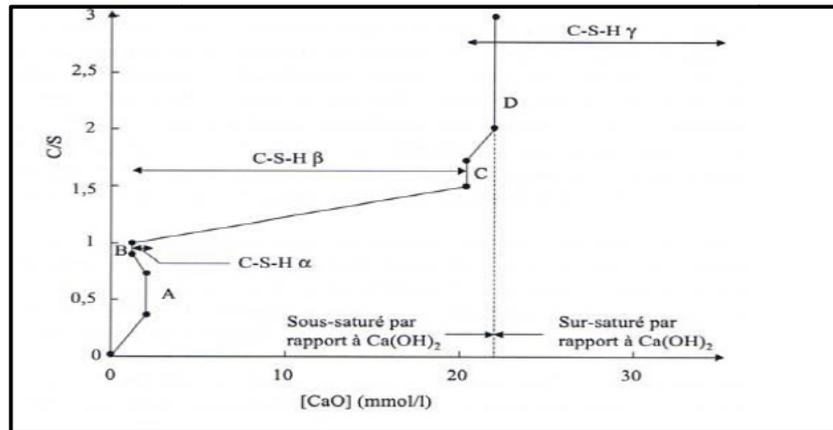


**Figure I.7.** Cristaux de Portlandite (10 $\mu$ m). [23] **Figure I.8.** Gel de C-S-H (10 $\mu$ m). [23]

## I.7. Rôle des C-S-H dans l'hydratation du ciment Portland

De nombreuses études ont été menées sur la structure du  $C_3S$  et son hydratation [30-31]. Elles ont montré que la stoechiométrie du C-S-H (rapport Ca/Si) dépend de la concentration en hydroxyde de calcium présente dans la solution interstitielle du ciment (Figure I.9). Ainsi, Nonat et Lecoq [32] ont proposé un modèle faisant intervenir trois phases de C-S-H distinctes, chacune correspondant à une gamme de concentration en hydroxyde de calcium dans la solution d'équilibre. Le C-S-H $\alpha$  est en équilibre avec une solution d'hydroxyde de calcium de concentration inférieure à 2 mmol/l et de la silice

hydratée. Il possède un rapport  $\frac{Ca}{Si}$  variant de 0,66 à 1. Le deuxième type C-S-H $\beta$  apparaît pour des concentrations en hydroxyde de calcium comprises entre 2 et 20 mmol/l. Il possède un  $\frac{Ca}{Si}$  allant de 1 à 1,5. Enfin, le C-S-H $\gamma$  en équilibre avec la portlandite apparaît pour un rapport  $\frac{Ca}{Si}$  compris entre 1,7 et 2. La concentration en hydroxyde de calcium est alors supérieure à 20 mmol/l.



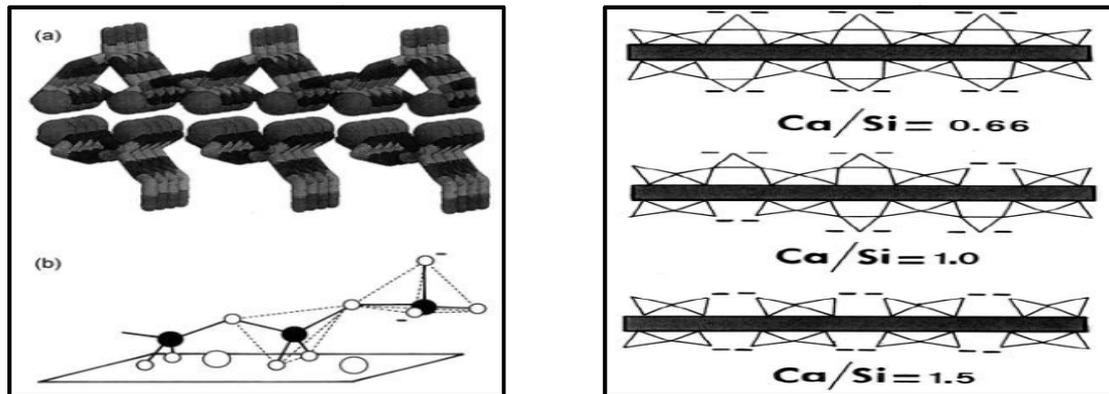
**Figure I.9.** Différentes phases de C-S-H. Le point invariant

**A** correspond à la coexistence de la silice et de la phase  $\alpha$ , le point **B** à la coexistence des phases  $\alpha$  et  $\beta$ , le point **C** à la coexistence des phases  $\beta$  et  $\gamma$ , et le point **D** à la coexistence de la portlandite avec la phase  $\gamma$ . Les positions respectives des points invariants **C** et **D** est à l'heure actuelle encore l'objet d'investigations, et il est probable que le point **C** se trouve en fait au-delà de la saturation de la portlandite à 25°. [33]

Le C-S-H présente une structure cristalline en feuillets, apparentée à celle de la tobermorite ou de la jennite (Figure I.10) [19-34-35]. Son squelette bidimensionnel est constitué d'un double plan d'ions  $Ca^{2+}$  auquel sont greffées des chaînes de silicate désordonnées. Jusqu'à  $\frac{Ca}{Si} = 1,5$ , la structure des C-S-H peut être assimilée à une structure tobermoritique présentant des défauts. Les principaux défauts sont dus à des lacunes en tétraèdres pontants.

Lorsque la concentration en hydroxyde de calcium augmente, l'évolution structurale consiste en un remplacement progressif des protons des tétraèdres pontants, initialement doublement protonés, par des ions  $Ca^{2+}$  (Figure I.11). Pour un rapport  $\frac{Ca}{Si} = 1$ , une première phase de transition semble se produire, conduisant à l'apparition d'un nouveau type de C-S-H avec un degré de polymérisation des chaînes plus faible. Plus le rapport  $\frac{Ca}{Si}$

est élevé, plus le nombre de tétraèdres pontants manquants est grand et plus la longueur moyenne de chaîne est faible. L'ionisation des groupements hydroxyles des liaisons pendantes qui résulte de ce raccourcissement des chaînes maintient la charge négative des feuillets et le nombre d'ions  $\text{Ca}^{2+}$  dans l'espace inter-feuillet [30]. Pour un rapport  $\frac{\text{Ca}}{\text{Si}} = 1,5$ , une seconde transition semble se produire. La structure des C-S-H pour les rapports  $\frac{\text{Ca}}{\text{Si}}$  élevés, c'est à dire supérieurs à 1,5, est le point le plus controversé. [36]



**Figure I.10.** Structure de la tobermorite. [34] **Figure I.11.** Evolution de la structure du C-S-H.

Le rapport  $\frac{\text{Ca}}{\text{Si}}$  moyen dans une pâte de ciment durcie est aux alentours de 1,7 mais il peut descendre localement à des valeurs beaucoup plus faibles. Des valeurs locales, mesurées par microscopie électronique à transmission, fluctuent ainsi entre 0,6 et 2 [37-28]. Cette brève description donne une idée de la forte hétérogénéité des propriétés de surface des particules de ciment dans l'eau et de la complexité de leurs éventuelles interactions avec les molécules organiques. Compte tenu de leur structure, les couches de C-S-H doivent porter un mélange de groupements  $\equiv\text{Si-OH}$  et  $\equiv\text{Si-O}^-$ , avec une proportion croissante de ces derniers au fur et à mesure que le rapport  $\frac{\text{Ca}}{\text{Si}}$  et le pH augmentent. Les feuillets de C-S-H sont donc intrinsèquement des colloïdes chargés négativement.

## I.8. Facteurs influençant la cinétique de l'hydratation

**I.8.1. Classe du ciment :** Elle caractérise la résistance à la compression à 28 jours. Elle dépend de la rapidité de l'hydratation et de la structuration de la pâte de ciment donc de sa composition minéralogique, la finesse de broyage et le gypsage [13]. Un ciment riche en

C<sub>3</sub>S présente à court terme une résistance à la compression supérieure à celui d'un ciment riche en C<sub>2</sub>S parce que son hydratation est plus rapide.

### **I.8.2. Granulométrie du ciment**

Un ciment broyé à 5000 cm<sup>2</sup>/g offre une résistance à la compression plus grande qu'un ciment identique broyé à 3500 cm<sup>2</sup>/g (50 Mpa et 40 Mpa à 28 jours). Son hydratation est plus rapide parce qu'il présente une grande surface libre à l'action de l'eau. Les grains de taille supérieure à 30µm ne s'hydratent jamais complètement.

### **I.8.3. Température d'hydratation**

Dans l'hydratation du ciment Portland, la température joue un rôle à la fois thermodynamique et cinétique : thermodynamique parce qu'elle change la nature et la stabilité des hydrates, et cinétique car elle accélère ou retarde les réactions chimiques entre l'eau et les constituants anhydres.

### **I.8.4. Eau de gâchage**

Plus le rapport eau/ciment ( $\frac{E}{C}$ ) est faible, plus les temps de prise et de durcissement sont courts. Les sels contenus dans l'eau de gâchage et l'eau de conservation, en réagissant avec les différents constituants du ciment, peuvent améliorer ou altérer ses qualités.

### **I.8.5. Composés solubles dans le ciment**

Ils peuvent accélérer ou retarder la prise et le durcissement (adjuvants accélérateurs ou retardateurs).

## **I.9. Ajouts cimentaires**

Les ajouts cimentaires sont des matériaux naturels ou artificiels. L'utilisation accrue d'ajouts cimentaires s'avère une méthode éprouvée pour lutter contre les changements climatiques et améliorer la qualité de l'air. Les ajouts cimentaires sont incorporés au clinker afin de produire un ciment mélangé ou incorporées au béton comme agent complémentaire.. Les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, la fumée de silice et les pouzzolanes sont parmi les matières les plus couramment utilisées comme ajouts cimentaires. [13]

### **I.9.1. Classification des ajouts**

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs. Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous

forme de fillers. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le Tableau I.5 ci dessous.

**Tableau I.5.** Classification des ajouts selon leur réactivité. [38]

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

## I.10. LES MATERIAUX CIMENTAIRES

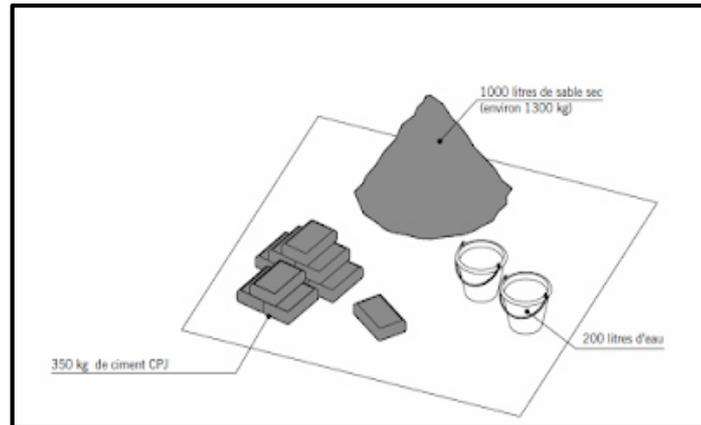
### I.10.1. Le Mortier

#### I.10.1.1.Introduction

Dans toute construction, il est indispensable de réunir entre eux les différents éléments (blocs de béton, briques, éléments en béton préfabriqué, etc.) au moyen d'un mortier de ciment ou d'autre liant qui a pour but de:

- solidariser les éléments entre eux;
- assurer la stabilité de l'ouvrage;
- combler les interstices entre les blocs de construction.

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'additions. Des compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres: liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement



**Figure I.12.** Les composants d'un mortier.

- Les mortiers peuvent être préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants y compris les adjuvants.
- préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs prédosés et avant l'utilisation, il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire.
- livrés par une centrale: ce sont des mortiers prêts à l'emploi.
- 

Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années; permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers.

### **I.10.1.2.Composition**

Le mortier est un des matériaux de construction, qui contient du ciment; de l'eau; du sable; des adjuvants et éventuellement des additions. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure.

Les mortiers sont constitués par des mélanges de:

- liant (ciment ou chaux)
- eau
- sable
- adjuvants

✚ **Les liants:** Généralement, on peut utiliser:

- les ciments normalisés (gris ou blanc);
- les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ..);

- les liants à maçonner;
- les chaux hydrauliques naturelles;
- les chaux éteintes

#### **Les sables:**

Normalement, les sables utilisés sont les sables appelés “sable normalisé”. Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu’en volume comme c’est souvent le cas, afin d’éviter les erreurs de dosage, par suite de l’augmentation de volume de sable humide.

Ils peuvent être:

- naturels et roulés (de rivières, de sablières, ..), de nature siliceuse ou silico-calcaire.
- naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.
- spéciaux (lourds, réfractaires, légers):
  - sable de laitier.
  - sable d’oxydes de fer, de chromite.
  - Corindon.
  - sable de briques concassées.
  - liège torréfié.
  - polystyrène expansé.
  - vermiculite, perlite.

Certains sables sont à éviter, notamment les “sables à lapin”, généralement très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est:

- extra-fins: jusqu’à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire).
- fins: jusqu’à 1,6 mm.
- moyens: jusqu’à 3,15 mm.
- gros: jusqu’à 5 mm.

### Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants:

- les plastifiants (réducteurs d'eau);
- les entraîneurs d'air;
- les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs);
- les hydrofuges.

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre.

### Les ajouts

Les ajouts que l'on utilise dans les mortiers sont:

- poudres fines pouzzolaniques (cendres, fumée de silice..);
- fibres de différentes natures;
- colorants (naturels ou synthétiques);
- polymères.

#### **I.10.1.3. Les différents mortiers**

Dans les travaux publics on utilise différents types de mortier:

##### **❖ Les mortiers des ciments**

Les mortiers de ciments sont très résistants, prennent et durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1:3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables.

##### **❖ Les mortiers de chaux**

Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment (gras et onctueux). La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments.

##### **❖ Les mortiers bâtards**

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais des fois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

### ❖ Mortiers fabriqués sur chantier

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu.

On emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner. Le sable est le plus souvent roulé (nature silico-calcaires) parfois concassé et le gâchage s'effectue à la pelle ou à l'aide d'une petite bétonnière. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les sables peuvent être différents d'une livraison à l'autre, mais de toutes façons ils doivent être propre et de bonne granulométrie.

Le sable est généralement dosé en poids (ce qui est préférable), soit en volume (cas des petits chantiers). Dans ce dernier cas, il est très important de tenir compte du phénomène de foisonnement des sables.

### ❖ Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.

Les mortiers peuvent contenir des liants et des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants.

Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins :

- mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié,
- mortiers d'imperméabilisation,
- mortier d'isolation thermique,
- mortier de jointoiement,
- mortier de ragréage,
- mortier de scellement, mortier pour chapes,
- mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment, etc.,
- mortier de réparation.

### **I.10.2. Caractéristiques principales**

Les caractéristiques principales des mortiers sont:

- ouvrabilité.
- prise.

- résistances mécaniques.
- retraits et gonflements, etc.

Pour pouvoir évaluer les caractéristiques des mortiers on prend souvent comme référence le mortier 1/3 composé en poids de: une partie de ciment et de 3 parties de sable normalisé dont les grains s'échelonnent de 80 microns à 2 mm et passent dans un fuseau bien déterminé et 0,45 partie d'eau.

Ce mortier est malaxé et mis en place dans des moules métalliques suivant des méthodes normalisées. On fait sur ce mortier des essais rhéologiques et éventuellement la prise et la chaleur d'hydratation. Beaucoup d'essais de laboratoires se font sur les prismes de 4 x 4 x 16 cm (résistances mécaniques, retrait, gonflement, absorption capillaire, résistances au gel et aux eaux agressives).

### I.11.Généralités sur les bétons



Figure I.13. Les composants d'un béton.

#### I.11.1.Introduction

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collés entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment, généralement un ciment portland. Les composants sont très différents: leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m<sup>3</sup>. Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, selon le liant utilisé, de béton de résine, de béton d'hydrocarboné, de béton d'argile, etc.

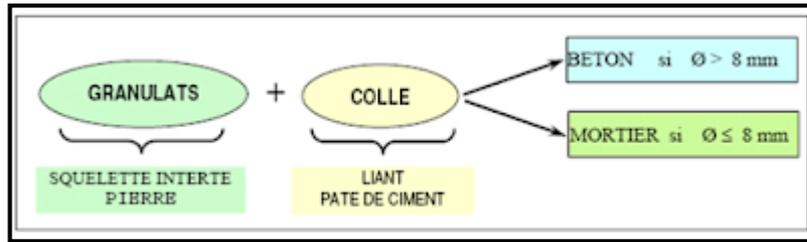


Figure I.14. La différence entre le béton et le mortier.

Les différents granulats forment le squelette granulaire du mortier ou du béton. Le ciment, l'eau et les adjuvants forment la pâte liante. Lorsqu'il n'y a pas de squelette granulaire, on parle de "pâte de ciment". La pâte est un élément unique et actif du béton enrobant les granulats. L'objectif est de remplir les vides existants entre les grains. La pâte joue le rôle de lubrifiant et de colle.

Dans le béton où une très grande compacité est recherchée (béton HP par exemple), la dimension des éléments les plus fins peut descendre en dessous de 0,1 mm (fillers, fumée de silice)

De même les granulats très légers ont des masses volumiques inférieures à 100 kg/m<sup>3</sup>.

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
▪ Volume (%)	14-22	1-6	7-14	60-78
▪ Poids (%)	5-9		9-18	63-85

Figure I.15. La composition des constituants de béton en poids et en volume.

Les divers stades de fabrication et le cycle de vie du béton

I.11.2. Constituants d'un béton

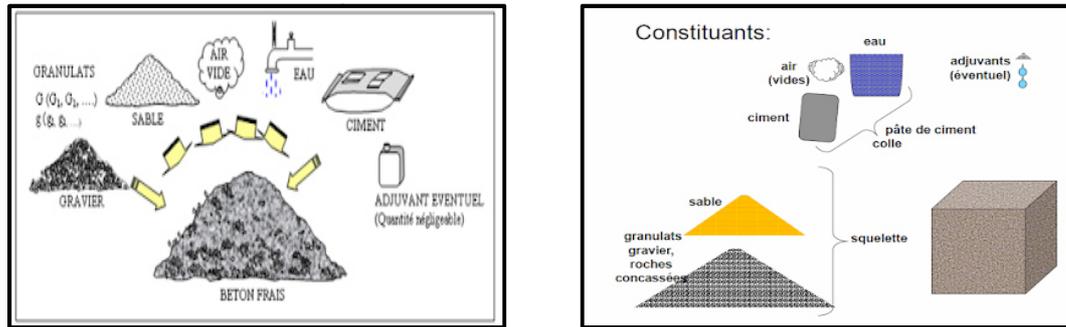


Figure I.16. Les constituants du béton (fabrication du béton frais).

I.11.3. Mise en œuvre

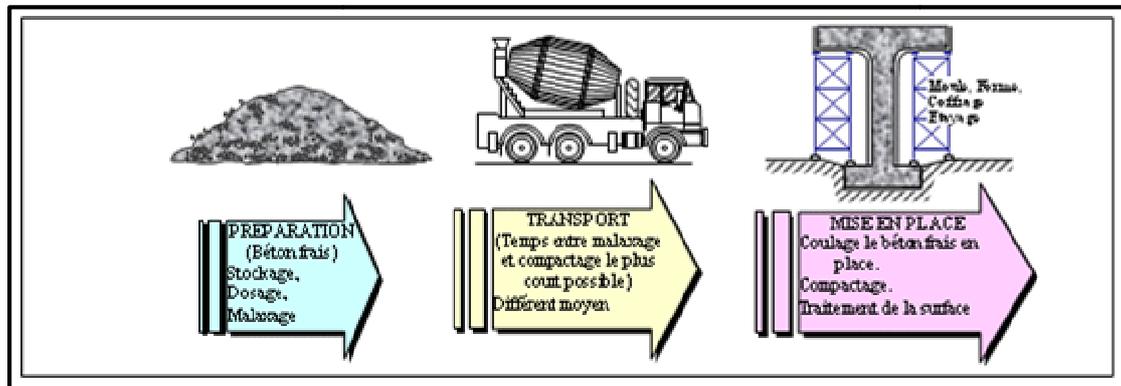


Figure I.17. Transport et mise en place du béton frais.

Toutes les opérations de mise en œuvre sont importantes si l'on veut obtenir un béton dense de qualité homogène.

I.11.4. Durcissement

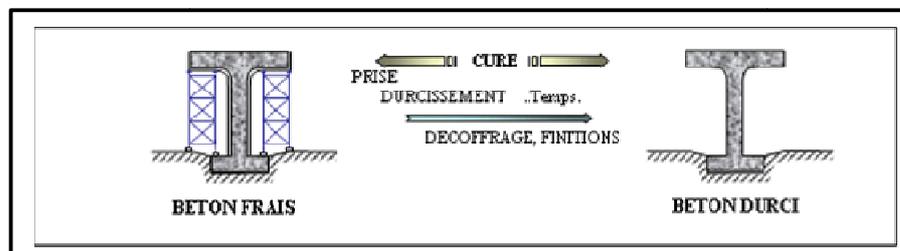


Figure I.18. Durcissement d'un béton

La condition favorable pour le durcissement d'un béton:

- l'humidité
- la température supérieure à 50 °C.

- le calme pendant la période de cure (absence de sollicitation d'ordre mécanique ou physique).

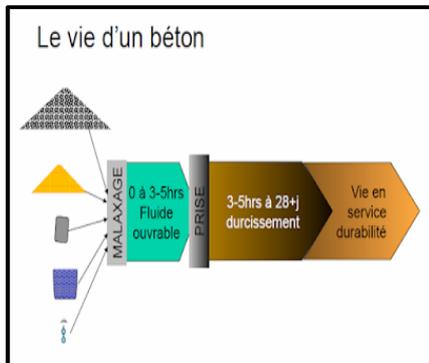


Figure I.19. La vie d'un béton

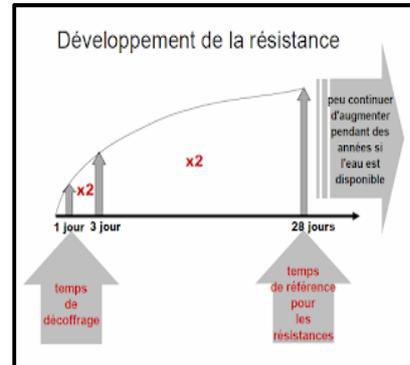


Figure I.20. Développement de la résistance

### I.11.5. Vieillesse

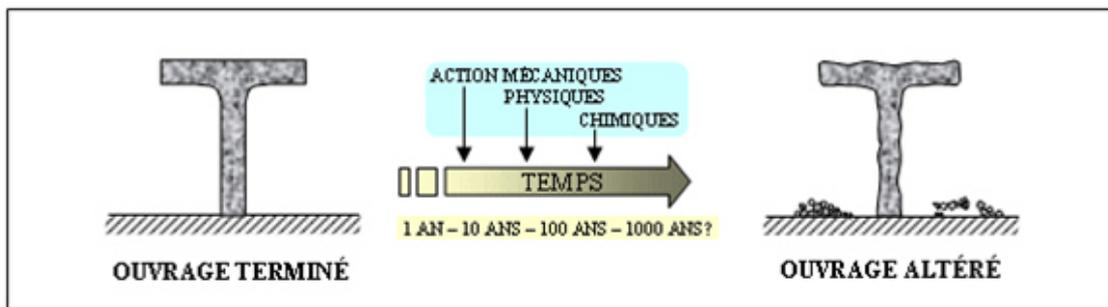


Figure I.21. Vieillesse

Pour être durable, un béton doit:

- être bien composé.
- correctement mis en œuvre.
- protégé des causes possibles d'altération par des dispositions constructives adéquates.

### I.10.6. Classification du béton

Le béton fait partie de notre cadre de vie. il a mérité sa place par sa caractéristique de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories.

En général le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique:

- Béton très lourd:  $> 2500 \text{ kg/m}^3$ .
- Béton lourd (béton courant):  $1800 - 2500 \text{ kg/m}^3$ .
- Béton léger:  $500 - 1800 \text{ kg/m}^3$ .
- Béton très léger:  $< 500 \text{ kg/m}^3$ .

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants:

- Béton de ciment (le ciment),
- Béton silicate (la chaux),
- Béton de gypse (le gypse) et
- Béton asphalte.

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface et peuvent ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

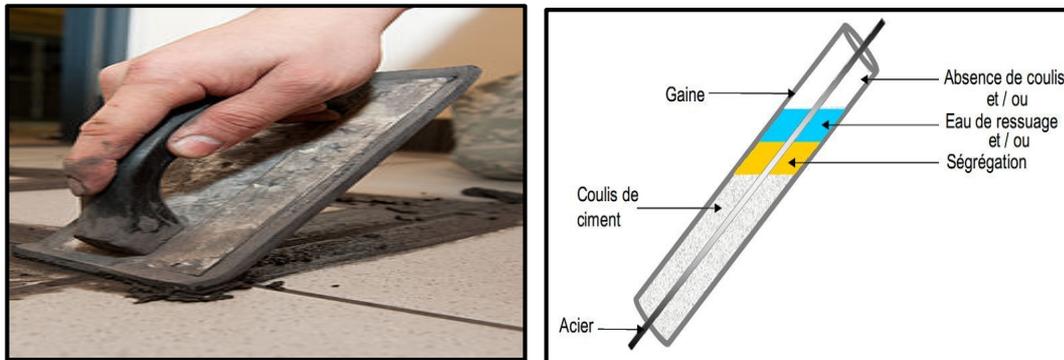
- a) Les bétons courants :** sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils présentent une masse volumique de  $2003 \text{ kg/m}^3$  environ. Ils peuvent être armés ou non, et lorsqu'ils sont très sollicités en flexion, précontraints.
- b) Les bétons lourds :** dont les masses volumiques peuvent atteindre  $6000 \text{ kg/m}^3$  servent, entre autres, pour la protection contre les rayons radioactifs.
- c) Les bétons de granulats légers :** dont la résistance peut être élevée, sont employés dans le bâtiment, pour les plates-formes offshore ou les ponts.
- d) Les bétons cellulaires :** (bétons très légers) dont les masses volumiques sont inférieures de  $500 \text{ kg/m}^3$ . Ils sont utilisés dans le bâtiment, pour répondre aux problèmes d'isolation.
- e) Les bétons de fibres:** plus récents, correspondent à des usages très variés: dallages, éléments décoratifs, mobilier urbain.

### I.12. Coulis de ciment :

Le coulis est un mélange très fluide de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvants. Il est utilisé pour renforcer des fondations, réparer des fissures dans des structures ou renforcer une maçonnerie de pierre dont les joints sont endommagés.

En restauration de peinture murale, la technique d'injection de coulis a été adaptée pour consolider les enduits peints en les refixant sur la maçonnerie [39]. Il existe différents types de coulis. Ils peuvent être préparés par le restaurateur à partir de différents liants inorganiques (chaux hydraulique, chaux aérienne, terre crue) en mélange avec des charges

fines (pouzzolane, sable fin, poudre de pierre ponce, silice micronisée, etc.) et parfois avec des liants organiques naturels ou synthétiques. Ou bien, le restaurateur achète des coulis prêts à l'emploi chez des fournisseurs spécialisés. Les coulis sont injectés généralement avec des seringues et des aiguilles.



**Figure I.22.** Application et conduite d'injecté de coulis de ciment.

### I.13. Conclusion

La réaction d'hydratation du ciment combine les réactions d'hydratation des principaux composants du clinker et éventuellement, celles de ses composants secondaires. Cependant, les réactions sont plus complexes du fait des interactions chimiques et thermiques qui se produisent au cours du processus d'hydratation et du fait des impuretés présentes dans la solution solide qui influencent beaucoup l'hydratation de chaque phase.

Le mortier est un matériau de constructions qui composés de deux constituants, le liant (ciment) et le sable a l'eau. Il assure également un rôle de colle, et lorsqu'il comble chacun des espaces entre les pierres à bâti, le mortier et le béton ont des résistances a la compression, et la traction à flexion a long terme.

Dans le cas de pise ou de la bauge, le mortier devient le matériau principal et il ne sent qu'à s'agglomérer à lui même.

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, granulats et, le plus souvent, adjuvants qui constituent un ensemble homogène.

### II.1. Introduction

Les matériaux pouzzolaniques sont employés d'une manière globale comme additifs ou comme des matériaux de remplacement (les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, fumée de silice, le calcaire et les pouzzolanes naturelles ou les géoressources) avec les liants aériens et hydrauliques dans le but d'améliorer certaines caractéristiques des matériaux cimentaires ou les matériaux à base de ciment. Seul des ajouts bien définis permettent d'exploiter au mieux leurs propriétés et avantages. [40]

Différents ajouts minéraux sont actuellement utilisés dans les matériaux cimentaires. Ils sont utilisés en addition ou en substitution d'une partie du ciment comme matières cimentaires supplémentaires MCS. Leur usage fournit comme une matrice plus dense qui sera plus résistante. La finesse des ajouts minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur solubilité en milieu alcalin gouvernent leurs propriétés cimentaires dans le mortier et béton. Leur contenu en phase amorphe est un facteur clé dans la réactivité des ajouts minéraux Il a été prouvé que l'introduction des ajouts minéraux dans la pâte de ciment conduit à la segmentation des larges pores capillaires et offrent un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produits d'hydratation qui accélèrent l'hydratation du ciment et permettent de réduire les dimensions des cristaux de chaux. [41]

### II.2. La pouzzolane

#### II.2.1. Histoire de pouzzolane

Les Romains de l'Antiquité fabriquaient du ciment pouzzolane en brûlant de la lime et des cendres volcaniques. Ces cendres venaient de Pozzuoli, en Italie, près du Mont Vésuse, dont elles tiennent leur nom maintenant (Hart, 2001). Aujourd'hui, le nom pouzzolane fait référence aux composés inorganiques, comme des cendres volantes ou matériaux géoressources, utilisées comme matériaux de substitut cimentaires au ciment Portland. Il est possible d'inclure dans le mortier ou béton des matériaux naturels comme des bentonites, métakaolin, biomasse, des cendres volcaniques, de la terre etc. Les matériaux artificiels et naturels qui contiennent de l'alumine ou de la silice soit amorphe ou cristallin s'appellent des pouzzolanes. Ces ajouts cimentaires peuvent remplacer entre 15 % et 40% Ciment Portland Sans réduire significativement la résistance et la durabilité ou bien les propriétés à long terme du Matériau cimentaire (Agustín et al. 1990).

Il est donc avantageux d'utiliser les cendres d'écorce de riz, comme pouzzolane, pour augmenter la résistance du béton (réduction des pores capillaires) et réduire ainsi les coûts du béton. [42]

### II.2.2. Définition

Les pouzzolanes sont composées essentiellement de la silice ( $\text{SiO}_2$ ) et d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). La partie restante contient de l'oxyde de fer et d'autres oxydes ainsi qu'un pourcentage de chaux ( $\text{CaO}$ ). Elles sont généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise. Les pouzzolanes les plus acides, contenant de silice et peu de chaux ( $\text{CaO}$ ) sont en général la plus vitreuses. La différence  $\text{SiO}_2$ - $\text{CaO}$  doit être supérieure à 34% pour que la teneur en verre soit appréciable. Définit les pouzzolanes comme des matériaux n'ayant pas de propriétés liantes entre eux-mêmes, mais qui en se combinant avec de la chaux à température ordinaire et en présence d'eau, forment des composés insolubles stables possédant des propriétés liantes. Selon la norme **ASTM** sur les ciments (**désignation C 340-58 T**), la définition est pratiquement similaire : La pouzzolane se définit comme étant un matériau siliceux ou silico-alumineux, qui ne possède pas de propriétés liantes, mais qui sous forme de poudre très fine et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes. Les deux dernières définitions attirent l'attention sur le fait que la pouzzolane est définie en fonction de son emploi comme matériau liant et non sur la nature du matériau lui-même, Puisque, les phénomènes responsables du durcissement du mélange pouzzolane plus chaux du point de vue physico-chimiques ne sont pas considérés. [40]

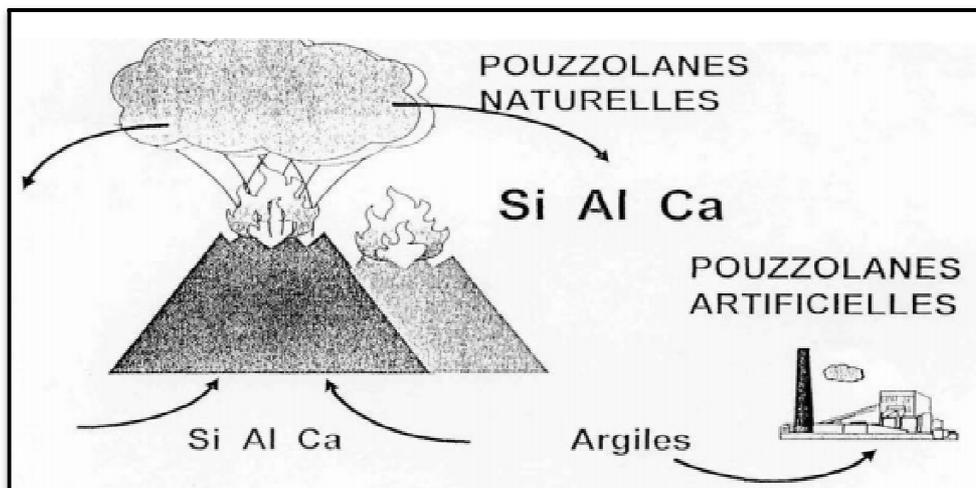


Figure II.1 : Origines des pouzzolanes. [43]

### II.3. L'activité pouzzolanique

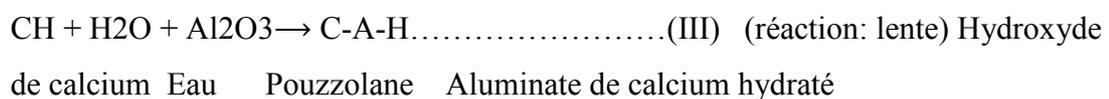
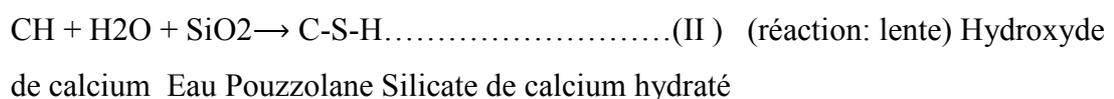
L'activité pouzzolanique c'est l'aptitude d'un matériau à fixer l'hydroxyde de calcium et durcir sous l'eau à des températures ordinaire et en un temps raisonnable. Cette propriété se constate à des degrés variables pour des matériaux riches en silice libre, qu'ils soient d'origine naturelles ou géoressources (diatomites, bentonites, cendres volcaniques...) ou artificielles (Cendres volantes, fumée de silice, argile calcinée...). L'activité pouzzolanique se caractérise par deux aspects distincts :

- La quantité totale d'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer.
- La rapidité de fixation de l'hydroxyde de calcium par la pouzzolane.

Les différents matériaux pouzzolanique décrits ci-dessus possèdent tous les propriétés, selon la définition, de réagir avec l'hydroxyde de calcium, en présence d'humidité, pour former des composés possédant des propriétés liantes. L'influence de la silice et de l'alumine ne peut pas être négligée, la silice participe dans le mélange par la fixation de la chaux et l'alumine augmente la résistance mécanique du matériau à court terme. [44]

### II.4.Réaction pouzzolanique

La réaction pouzzolanique se produit en solution (dissolution / précipitation) entre la silice et l'alumine provenant de la dissolution de la pouzzolane, et l'hydroxyde de calcium ou la portlandite CH issu de l'hydratation du ciment, en formant des silicates calciques hydratés (C-S-H) et aluminates calciques hydratés (C-A-H) qui précipitent sous forme de gel durcissant en une structure amorphe. [45-46-47].



### II.5. Evaluation de l'activité pouzzolanique

Plusieurs méthodes ont été avancées pour expliquer les propriétés des pouzzolanes comme étant un matériau naturel ou artificiel riche en silice et l'alumine capable de :

- Réagir avec la chaux en présence d'eau
- Former par cette réaction des produits aux propriétés liantes. A partir de cette définition, on distingue deux catégories d'essais qui, en premier lieu caractérisent

l'existence de la réaction pouzzolanique, et en second lieu, mettre en évidence les produits d'hydratation aux propriétés liantes et leur influence sur les caractéristiques mécaniques.

La première catégorie se base essentiellement sur les déterminations chimiques, tandis que la seconde s'appuie sur les méthodes physiques et plus particulièrement les essais mécaniques.

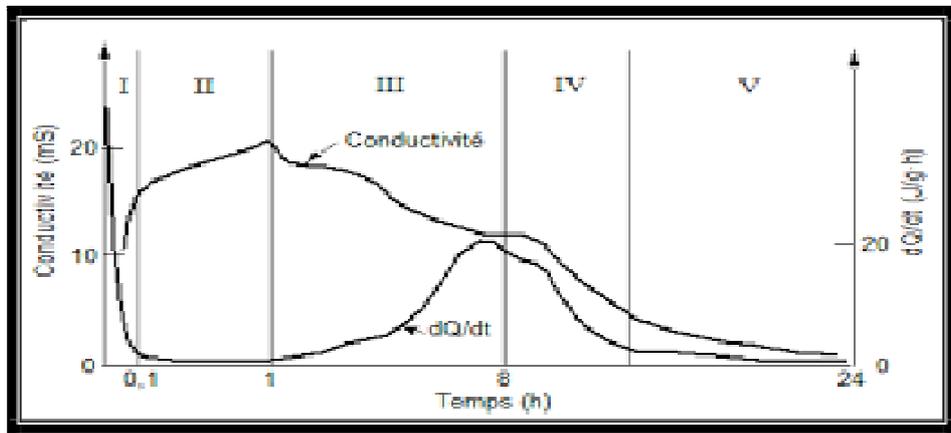
### II.5.1. La détermination chimique (test chapelle)

Le matériau à propriétés pouzzolaniques sera mis en contact avec une solution bien connue de la chaux à une température de 90 °C. Après une durée de 24 heures, on estime la quantité d'hydroxyde de calcium fixée par la pouzzolane et la quantité de la chaux résiduelle. Cette méthode peut être utile que pour un suivi du taux de fixation de l'hydroxyde de calcium à atteindre pour un matériau donné afin d'évaluer son activité pouzzolanique. Par contre, elle est insuffisante pour prévoir avec certitude la résistance mécanique espérée. De plus les études menées sur le test chapelle ont montrées qu'il n'existait pas une relation entre l'indice élevé de l'activité pouzzolanique et une résistance de compression élevée sur pâtes pures à 3 jours. D'autres voix chimiques qui emploient l'acide chlorhydrique, peuvent fournir une indication quantitative des phases actives telles que la silice et l'alumine comme fraction pouzzolanique et qui est par nature acide. Une méthode d'essai accéléré, basée sur la réduction de la chaux, à été proposée par Fratini en 1950, cette étude consiste à laisser réagir pendant 8 jours une certaine quantité de ciment en contact avec de l'eau (le liant hydraté), avec la quantité d'hydroxyde de calcium pouvant saturer un milieu de même alcalinité. Les ciments donnent toujours des solutions sous-saturées en chaux. L'essai à était effectuer sur deux ciments avec un pourcentage d'ajout bien connu d'où le chemin suivi est différent de la position des points représentatifs de l'évolution de l'alcalinité totale et du calcium total au dessus ou au dessous de la courbe théorique de solubilité de l'hydroxyde de calcium. La réaction pouzzolanique sera effective pour les points au dessous de la courbe de saturation.

### II.5.2. Méthode physique

Calorimétrie conduit à analyser à travers l'évolution de la chaleur et de la conduction électrique l'activité L'hydratation du ciment est un phénomène complexe au cours duquel les différentes phases du matériau s'hydratent selon des cinétiques très différentes. Au contact de l'eau, les silicates et les aluminates se dissolvent sous forme d'ions qui présentent une phase de diffusion. La mesure de la chaleur d'hydratation suivant **les normes britannique BS 4550**

et Américaine ASTM C 186-94, consiste à mesurer la chaleur de solution du ciment hydraté et non hydraté dans un mélange d'acide nitrique et fluorhydrique. La différence entre les deux valeurs correspond à la chaleur d'hydratation. Dans La figure I.6, les mesures de conductivité et de pouzzolanique du matériau



**Figure II.2.** Évolution du dégagement de chaleur et de la conductivité électrique lors de l'hydratation d'une pâte de  $C_3S$ . [48]

La progression de la réaction d'hydratation peut être suivie par des mesures de calorimétrie et de conductivité. Comme on peut le voir, l'hydratation des silicates peut être séparée en cinq périodes distinctes. Dans la Période 1, la présence des ions fait alors augmenter la conductivité du milieu. Durant la période 2 il y a un faible dégagement de chaleur. La conductivité augmente toujours. Ce qui correspond à une faible activité chimique. Par contre la période 3 est marquée par un fort dégagement de chaleur ce qui se traduit par une activité chimique intense et une baisse de la conductivité électrique. En général, c'est durant cette période que survient la prise. A travers la période 4, on constate un ralentissement cinétique d'hydratation, qui correspond sur la courbe à une diminution de la chaleur dégagée. Les hydrates se forment, moins il y a d'ions dans la solution, ce qui entraîne une diminution de la conductivité, ce phénomène se traduit aussi par un appauvrissement de la solution en chaux. En fin, la période 5, l'activité chimique diminue considérablement, dans cette période le ralentissement de la réaction d'hydratation, peut s'étaler sur des mois ou des années.

### II.5.3. Essais mécaniques

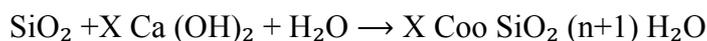
Pour déterminer l'efficacité d'un matériau pouzzolane, on peut simplement comparer la résistance mécanique de deux séries d'éprouvettes de matériau cimentaire, en remplace dans la première série une partie du ciment (exemple 30%) par de la pouzzolane et dans l'autre par une poudre inerte.

Les résultats des essais (par exemple de compression) effectués à 14, 20 et 90 jours sur les éprouvettes et si les mélanges ciment plus pouzzolane donnent des résistances supérieures, alors la pouzzolane est active. [44]

### II.6. Les réactions physico-chimiques de la pouzzolane

Si on considère que notre pâte est constituée de clinker et de pouzzolane, le processus de durcissement de devise en deux étapes :

- Hydrolyse et hydratation des matériaux du clinker, on obtient les mêmes composés que le CEM I
- Synthèse des composés nouveaux selon les réactions suivant :



Donc la présence de la pouzzolane accélère l'hydrolyse et l'hydratation de la partie clinker. puis elle réagit avec les produits d'hydratation  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , la diminution de la concertation  $\text{Ca}(\text{HO})_2$  et la présence de  $\text{SiO}_2$  active accélère le phénomène de destruction de  $\text{C}_2\text{SH}_2$  selon la réaction :

$\text{C}_2\text{SH}_2$  + En même temps le CSA  $6\text{H}_2\text{O}$  réagit avec  $\text{SiO}_2$  suivant la réaction :

Cette réaction peut s'écrire aussi: [42]

$\text{C}_3\text{A}6\text{H}_2\text{O} + X \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_3\text{A} X \text{SiO}_2 (6-2X) \text{H}_2\text{O} + 2X \text{H}_2\text{O}$  Hydrosalin silicate de calcium Lorsque  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  est faible on aura la réaction de  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  comme suivant :

$\text{C}_4\text{AH}_{13} \text{C}_3\text{AH}_6 + \text{Ca}(\text{OH})_2 + 6\text{H}_2\text{O}$  Donc l'absence de  $\text{C}_2\text{S}_2$  et  $\text{C}_3\text{AH}_6$  dans le ciment pouzzolanique durci améliore la stabilité de ce  $\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 (\text{CSH})$

### II.7. Ajouts cimentaires

L'utilisation accrue des ajouts cimentaires s'avère une méthode éprouvée pour lutter contre les changements climatiques et améliorer la qualité de l'air. Les ajouts cimentaires sont ajoutés au mélange de béton comme agent complémentaire. [49]

#### II.7.1. Définition des ajouts cimentaires

Ce sont des matières premières naturelles, artificielles, sous produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluant matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker po après le broyage, leur pourcentage dans la masse varie suivant le but de l'addition et le rôle qu'ils peuvent jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs. On distingue deux types d'ajouts: inertes et Actifs. [50]

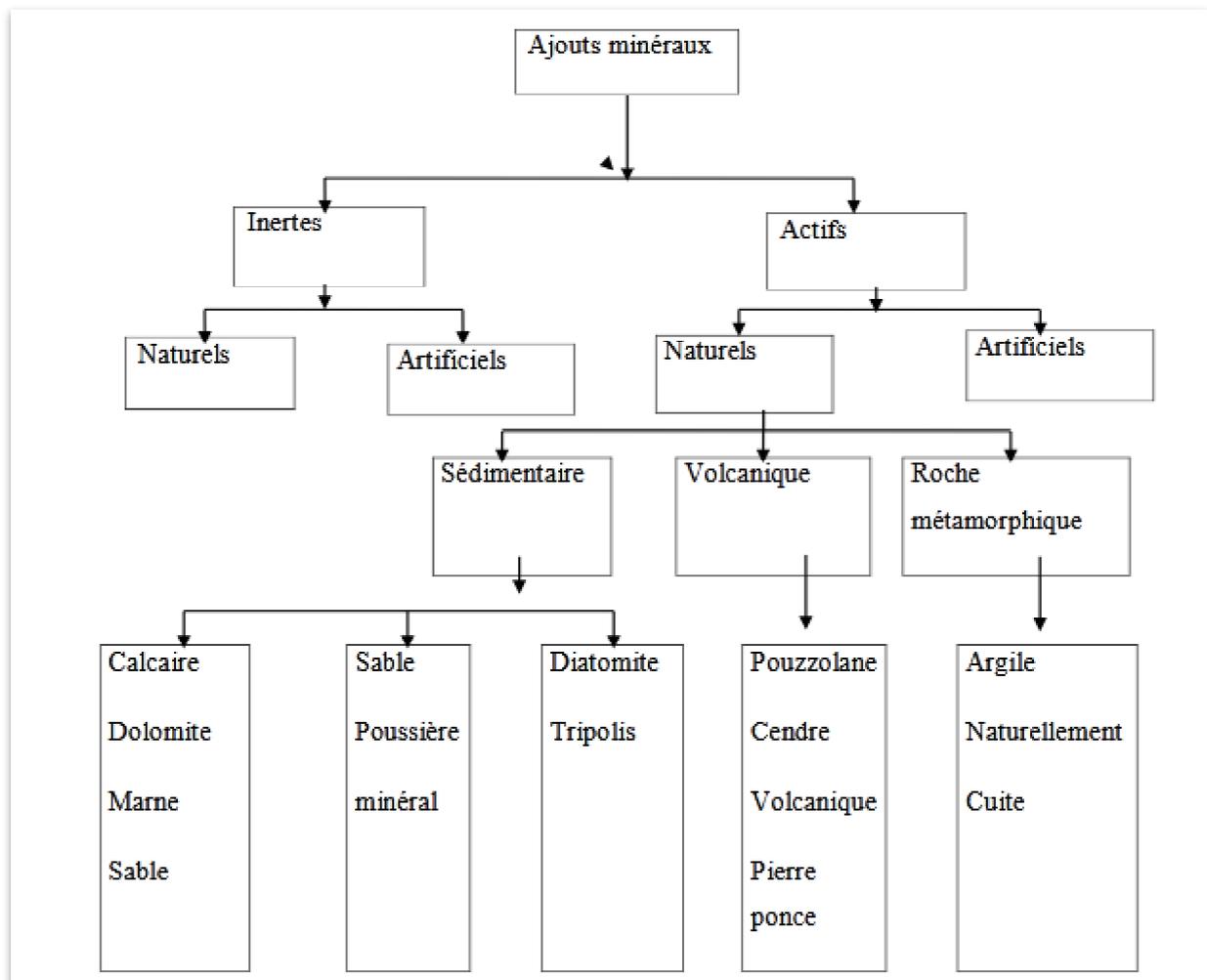


Figure II.3. Différents types d'ajouts cimentaires [49]

### II.7.2. Rôle de l'ajout cimentaire

#### II.7.2.1. Rôle de la granulométrie de l'ajout

Les ajouts cimentaires finement broyés combler les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau. [42]

#### II.7.2.2. Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaire

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux à la suite de la réaction de l'hydratation du  $C_3S$  et  $C_2S$  (30% de la masse du ciment). Cette chaux contribue peu où la résistance de la pâte cimentaire hydratée. Elle peut même être responsable de problème de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau ; ce lessivage augmente alors la porosité dans le bétonné qui augmente la perméabilité de lessivage. Les ajouts cimentaires (actifs) réagissent avec cette chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des C-S-H, véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau. L'idéal est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique. [51]

Les réactions pouzzolaniques sont les suivantes :



#### II.7.2.3. Classification des ajouts minéraux

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centrales thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon la norme NF EN 197 1 en ajouts minéraux inertes et actifs Ils se divisent selon leur réactivité. [52]

#### II.7.2.4. Principaux ajouts minéraux inertes

Ce sont des matériaux quasiment inertes, naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment Portland ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau. Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et les Schistes calcinés.

### a) Fillers calcaires

Les fillers calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles (calcaires, basalte, bentonite, etc.) présentant une teneur en carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  supérieure à 75%. Ces produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométries contrôlées et dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 micron. Les fillers se différencient les uns des autres par :

- Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent
- Leur finesse, la forme des grains, leur état de surface
- Leur dureté, leur porosité. Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

### b) Sable de dune

Le sable est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie...etc. ce matériau se trouve en grande quantité dans les régions sahariennes. Le sable de dune était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblais, de fondations et les travaux routiers. Le sable de dunes est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter. L'introduction de ce nouveau matériau dans la construction, peut soulager davantage le domaine d'habitat, et contribuer au développement des régions du sud algérien, très riches en sable de dune. [41]

## II.8. Types des Matériaux pouzzolaniques

Les matériaux pouzzolaniques sont divisés en deux grandes catégories : les matériaux naturels et les artificiels. [40]

### II.8.1 La pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes. Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments: [53]

### II.8.1.1. Pouzzolane naturelle

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolanique .Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.



Figure II.4. Pouzzolane naturelle.

Tableau II.1. Caractéristique physique de la pouzzolane naturelle. [54]

Caractéristique physique	Valeurs
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	0.98
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.75.
Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> )	3560
Pouzzolanité (%)	85
Porosité (%)	58.70
Absorption (%)	57.10
Perte au feu	5.60

Tableau II.2. Caractéristique chimique de la pouzzolane naturelle. [54]

Les Composante	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	So <sub>4</sub>	Cl	PF	T
Les teneurs (%)	74.48	12.83	1.51	3.92	0.34	Nul	Nul	0.21	100.29

#### a) Verre volcanique

Il y a lieu de citer les pouzzolanes des roches pyroclastiques meubles ou à faible cohésion provenant des éruptions volcaniques. Ce type de roche se trouve dans un état vitreux ou du moins sous une forme d'instabilité ou de réactivité qui les rend sensibles à l'attaque par

l'hydroxyde de calcium. On mentionne à titre d'exemples : pouzzolane de SANTORIN, de BALCOL en Italie et de SHIRASHU au Japon.

### b) Tufts volcaniques compacts

Elles sont différentes des pouzzolanes de type verre volcanique. Ce sont les mêmes roches, mais ayant subi des transformations chimiques. L'altération du verre volcanique dans des conditions hydrothermiques se traduit par la formation de minérales de décomposition chimiques variables. Ce genre de pouzzolanes se distingue par une texture dure et compacte.



Figure II.5. Lapillis et tufts.

### II.8.1.2. Pouzzolane artificielle

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite.

#### a) La fumée de silice

Les fumées de silice sont des particules très fines (taille moyenne des grains environ 1  $\mu\text{m}$ ) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans les fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliage Ferro silicium.

**Tableau II.3.** Composition chimiques de la fumée de silice. [41]

Composés	Silicium (grise)	Ferro silicium (grise)	Blanche
SiO <sub>2</sub>	93.7	87.3	90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6	1.0	1.0
CaO	0.2	0.4	0.1
FeO <sub>3</sub>	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2
Na <sub>2</sub> O	0.2	0.2	0.9
k <sub>2</sub> O	0.5	0.6	1.3
Pertes au feu	2.9	0.6	1.2

### b) Le laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker. D'un point de vue chimique tableau (3.5), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte. Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au-dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparés.

**Tableau II.4.**Composition chimique type de laitiers de haut fourneau. [55]

OXYDES	Laitier français	Laitier Nord USA	Laitier algérien
SiO <sub>2</sub>	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4 %	0.3 à 20	0.2
Mgo	6%	3 à 12	4.7
S	1.5%	-	0.15

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été mélangé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons : [41]

- Broyage poussé
- Chaleur (étuvage, autoclavage)
- Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude.

### ✓ **L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil**

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

#### ✓ **Intérêt du point de vue technique**

L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration [56].

#### ✓ **Intérêt du point de vue économique**

Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, puis qu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessite

relativement moins d'énergie, si non aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland. [56]

### ✓ Intérêt du point de vue environnemental

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO<sub>2</sub>. Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO<sub>2</sub>. [57]

### ✚ Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux

- Retard de prise.
- Résistance à la compression à jeune âge plus faible
- Mûrissement plus long
- Résistance à l'écaillage controversée
- Le broyage et le transport plus cher

## II.9. Effets des ajouts sur les propriétés des bétons

### II.9.1. Amélioration de l'ouvrabilité

Si nous ajoutons une quantité d'une fine poudre à un béton, nous diminuons le ressuage et la ségrégation dans ce béton, en diminuant le volume des vides. L'utilisation des cendres volantes ou du laitier diminue le besoin en eau d'un béton pour obtenir une certaine consistance. Pour cette même consistance l'utilisation de poudres ayant une très grande surface spécifique, comme les fumées de silice, tend à augmenter la quantité d'eau nécessaire. La demande en eau et la maniabilité d'un béton contenant des ajouts minéraux dépend de leur forme et de la granulométrie des particules. La norme **ASTM C 618** limite la quantité des particules > 45 µm à un maximum de 34 %.

### II.9.2. Chaleur d'hydratation

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, et par conséquent la fissuration d'origine thermique du béton. La chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolaniques est égale à environ la moitié de celle du ciment Portland.

### II.10. Durabilité

#### II.10.1.Introduction

La durabilité est l'un des facteurs les plus importants dans le développement durable. [58]  
Par rapport au ciment Portland, les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates. Cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure Imperméabilité pour un même rapport E/L, et à une diminution de la quantité de CH. Les sulfates peuvent détruire le béton en se combinant avec les aluminates du ciment pour former de l'ettringite expansive. Les conditions pour que cette réaction se passe sont. La perméabilité du béton, la quantité de CH et la quantité d'aluminate dans le mélange à cause de leur bonne imperméabilité et surtout d'une faible quantité de CH, des bétons faits à partir de ciment au laitier résistent très bien à l'attaque des sulfates, malgré une quantité importante de C3A dans le ciment. Les ajouts pouzzolaniques tels que le laitier, diminuent l'expansion des bétons qui se produit par réactions entre les alcalis du ciment et les granulats réactifs. Les alcalis sont piégés dans le C-S-H formé par l'ajout. [41]

#### II.10.2.Définition

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver dans le condition prévues les fonction d'usage pour lesquelles il a été conçu ( fonctionnement structurel ,sécurité , confort des usagers ...etc.) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect, dans son environnement , avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible .La durabilité est définie par la norme **NF X 50 -501** comme « l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint ». [58]

#### II.10.3. Les facteurs influent sur la durabilité

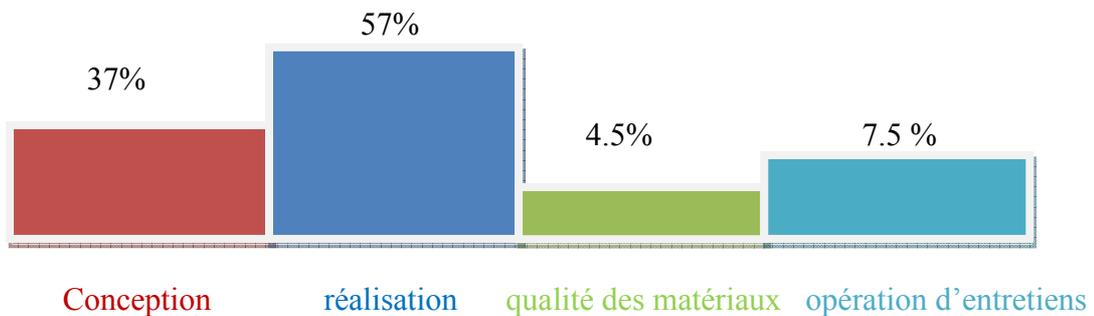
Plusieurs facteurs peuvent affecter la durabilité des ouvrages, qu'on peut classés on quatre familles :

- ❖ Facteurs physiques
- ❖ Facteurs chimiques
- ❖ Facteurs mécaniques
- ❖ Facteurs environnementaux

Ces facteurs peuvent agir indépendamment ou en interaction, aussi la durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont :

- ✓ La qualité de sa conception.

- ✓ La qualité des matériaux et des produits utilisés (notre cas)
- ✓ La qualité des dispositions constructives
- ✓ La réalisation de l'ouvrage et sa mise en œuvre des produits ainsi que des diverses conditions d'usage.
- ✓ D'exploitation et de maintenance.



**Figure II.5.** Principale causes des problèmes de durabilité des structures de béton. [59]

### II.11. La résistance

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton, mais nous avons suffisamment insisté sur la qualité d'ouvrabilité et son importance primordiale pour pouvoir dire que la résistance est une qualité également importante, ouvrabilité et résistance sont d'ailleurs à étudier de paire car sont étroitement dépendant l'une de l'autre et d'autant plus duelles varient en sens inverse en fonction de certains facteurs essentiels de la composition du béton.[42]

#### II.11.1. Développement des résistances

Bien que le développement des résistances soit lent, les résistances à long terme dépassent quelques fois celles du ciment Portland sans ajouts, à condition d'optimiser la quantité d'ajout. Cette augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains ainsi qu'à l'augmentation de la quantité de C-S-H.

L'utilisation des ajouts, pour des raisons d'ordre économique ainsi que pour améliorer la durabilité des bétons, en remplacement d'une partie du ciment, tend à diminuer les résistances initiales et à augmenter les résistances finales. Les pouzzolanes très réactives, comme les fumées de silice, sont capables de donner des bétons à haute résistance, tant à jeune âge d'eau. Tous les ajouts utilisés qu'à long terme, surtout si la quantité d'eau est diminuée par l'addition d'un agent réducteur en remplacement partiel des granulats fins augmentent les résistances à

tous les âges. Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment, tandis que celles à long terme se développent grâce à la réaction pouzzolanique qui cause l'affinage des pores et le remplacement du CH par du C-S-H. [41]

### II.12. L'utilisation des ajouts en Algérie

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El – Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni -Saf. [60]

**Tableau II.5.**Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes. [41]

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisés
ERCE	Ain Tauta	Pouzzolane
	Ain El kibira	
	Hamma Bouziane	
	H'djar Essaoud	Laitier
	Tebessa	
ERCC	Meftah	Tuf / Calcaire
	Raïss Hamidou	Poussiere
ECDE	Sour ElGhozlane	Calcaire
ERCO	Béni Saf	Pouzzolane
	Zahna	
	Saida	

### II.13. utilisations de la pouzzolane Dans l'industrie

Les pouzzolanes présentent diverses possibilités d'utilisation (L'agriculture et Applications routières et Dans l'industrie) le domaine principal Dans l'industrie :

La pouzzolane est utilisée dans la fabrication de ciment, de béton léger et les parpaings comme constituant secondaire (la structure alvéolaire de la pouzzolane confère une faible densité au béton pour une qualité mécanique donnée), les boisseaux de cheminées, les filtres divers et fosses septiques, sert aussi, comme éléments de décoration (actuellement les exploitants mettent l'accent sur cet aspect en mettant en avant la touche de couleur qu'apporte la pouzzolane). [40]

### II.14. Conclusion

Vu que l'effet pouzzolanique pouvait être obtenu non seulement à partir de matériaux naturels notamment d'origine volcanique et d'origine sédimentaire mais aussi à partir de matériaux calcinés tels que : Métakaolin, bentonites calcinées, Diatomites calcinées et autres, la pouzzolane en générale, se définit comme étant un ajout minéral actif d'origine naturelle ou artificielle [61,62] riche en silice et en alumine.

Les pouzzolanes naturelles sont des produits émis essentiellement par une lave vitreuse, On peut citer comme produit provenant généralement d'une lave vitreuse, les formations volcaniques. [41]

Selon beaucoup de chercheur, la réaction pouzzolanique est liée à certaines exigences chimiques et physiques. En effet l'activité pouzzolanique est vérifiée la résistance à long terme (matériaux durable).

### III.1 Introduction

Ce chapitre est étudier l'ensemble des matériaux utilisés pour l'élaboration des mortiers, leur mise en œuvre, ainsi que les techniques expérimentales structurales et microstructurales permettant leur caractérisation physico-chimiques et physico-mécaniques.

Le but de notre travail consiste à étudier des mortiers substitué par type d'argile **bentonite calciné**.

Pour cela, nous avons préparé des éprouvettes prismatiques 4x4x16 comme témoins, et substituées avec différente teneur en bentonite calcinée.

Les éprouvettes ont été confectionnées selon la modalité de la norme EN 196-1 qui explique le mode opératoire correspond à la préparation du mortier normal.

Le travail est divisé en trois étapes :

**Etape 1 :** Caractérisation des matériaux utilisés.

- La caractérisation des matières premières sont effectuées au niveau du laboratoire Matériaux de l'université de Bouira.

**Etape 2 :** Préparation des mélanges et confection des éprouvettes prismatiques des Mortiers argileux.

**Etape 3 :** Résultats et discussion.

- Les essais physico-chimiques effectués au niveau de l'université de Bouira et Boumerdès.
- Les tests structuraux et microstructurales ont été effectués au sein de laboratoire matériaux.

**Tableau III.1.** Codification des échantillons.

Code	% de BC	Matériaux cimentaires (mortier)
Ech 1	TC 0%	Mortier sans substitution
Ech 2	BC 8%	Mortier substitué par 8% de bentonite calcinée
Ech 3	BC 10%	Mortier substitué par 10% de bentonite calcinée
Ech 4	BC 12%	Mortier substitué par 12% de bentonite calcinée
Ech 5	BC 14%	Mortier substitué par 14% de bentonite calcinée
Ech 6	BC 16%	Mortier substitué par 16% de bentonite calcinée

### III.2 Caractéristiques des matériaux

Les mortiers sont des matériaux de construction qui contiennent du ciment, de l'eau, du sable, d'argile et éventuellement des adjuvants.

Les travaux de formulation du béton commencent par les études sur les mortiers, dans ce cadre, notre travail s'oriente vers la recherche d'une formulation optimale des mortiers argileux de haute performance durable en commençant par l'étude de l'influence de teneur des argiles sur les propriétés des mortiers à long terme durable.

#### III.2.1. Le sable

Le sable que nous avons utilisé pour notre mortier provient de carriere ,est un sable concassé , avec distribution granulometrique varie entre 0.080 et 4 mm.

##### III.2.1.1. Propreté

L'essai d'équivalent de sable, permet seulement de mesurer la propreté d'un sable, la valeur de l'équivalent de sable ES est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée par la hauteur totale du flocculat et de la partie sableuse sédimentée. L'essai à été réalisé selon les modalités de la norme NFP-18-598.



**Figure III.1.** L'essai d'équivalent de sable.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.2. :

**Tableau III.2.** Valeur de la propreté du sable

Code échantillon	Sable			
	ESV		ESP	
Fraction granulaire	0/4			
	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 1	Echantillon 2
Masse (g)	120	120	120	120
	13.1	14.4	-	-
H2 (centimètre)	8.8	9.6	34.6	33.8
100x (H2 / H1)	67.17	66.66	64.12	63.8
Moyenne	66.91		63.96	
Valeur spécifiée	ESV > 65		ESP > 60	

### III.2.1.2. L'essai au bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène a été réalisé selon les modalités de la norme NF P 18-592. Cet essai permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse contenant dans le sable.

**Figure III.2.** L'essai de bleu méthylène.

**Tableau III.3.** Résultat d'essai au bleu de méthyle.

Code échantillon	Sable
	Echantillon
Masse sèche de la prise d'essai de la fraction granulométrique 0/2 mm en gr	<b>M1=30,0</b>
Quantité totale de solution de colorant ajoutée en ml	<b>V1=21</b>
Valeur MB, exprimée en gramme de colorant par Kg de grains de fraction 0/2 mm	<b>VB= 0,7</b>
Valeur spécifiée	< 1

☞ **Commentaire :**

Cet essai confirme que les impuretés contenues dans le sable ne sont pas d'une nature argileuse.

### III.2.1.3. La composition chimique

La composition chimique en oxyde du sable utilisé, est déterminée par technique de fluorescence X, le tableau ci-dessous présente les valeurs obtenues.

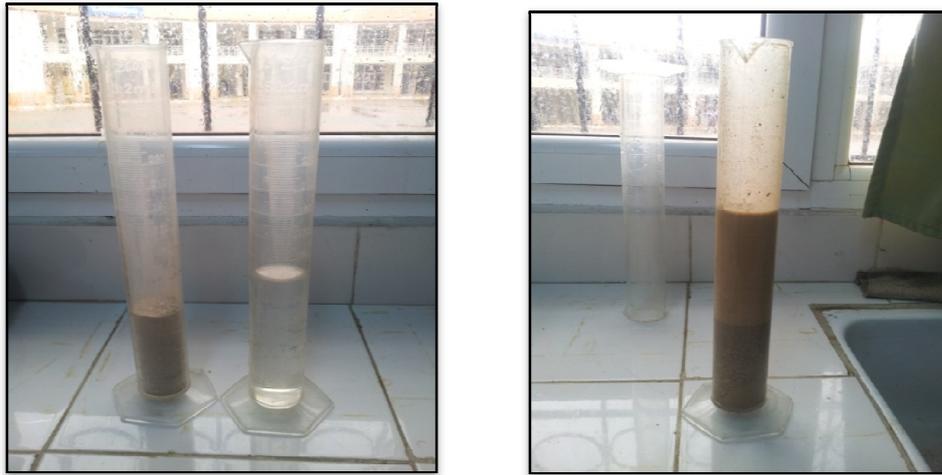
**Tableau III.4.** La composition chimique **norme NF P 18-467**

Composition chimique	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	PAF
Teneur(%)	<b>94,4</b>	<b>2,23</b>	<b>0,33</b>	<b>0,45</b>	<b>0,06</b>	<b>1,13</b>	<b>0,36</b>	<b>0,17</b>	<b>0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>0,82</b>

### III.2.1.4. La masse volumique

La masse volumique absolue (masse spécifique) est définie comme étant le quotient de la masse sèche de l'échantillon sur le volume occupé par la matière solide, sans tenir compte des pores et des capillaires.

Quant à la masse volumique apparente, elle est définie comme le rapport de la masse sèche de l'échantillon sur le volume occupé par la matière solide en tenant compte des pores et des capillaires.



**Figure III.3.** L'essai de masse volumique

Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau III.5.** Valeur des masses volumiques norme NF P 18-554.

Classe granulaire	Masse vol. absolue ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Masse vol. apparent ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
0/ 4 de carrière	<b>2.59</b>	<b>1.47</b>

### III.2.1.5. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique traduit la distribution pondérale des grains par classe granulaire définit deux dimension d'ouverture de mailles carrées avec des teneurs déterminées de tamisât et de refus.



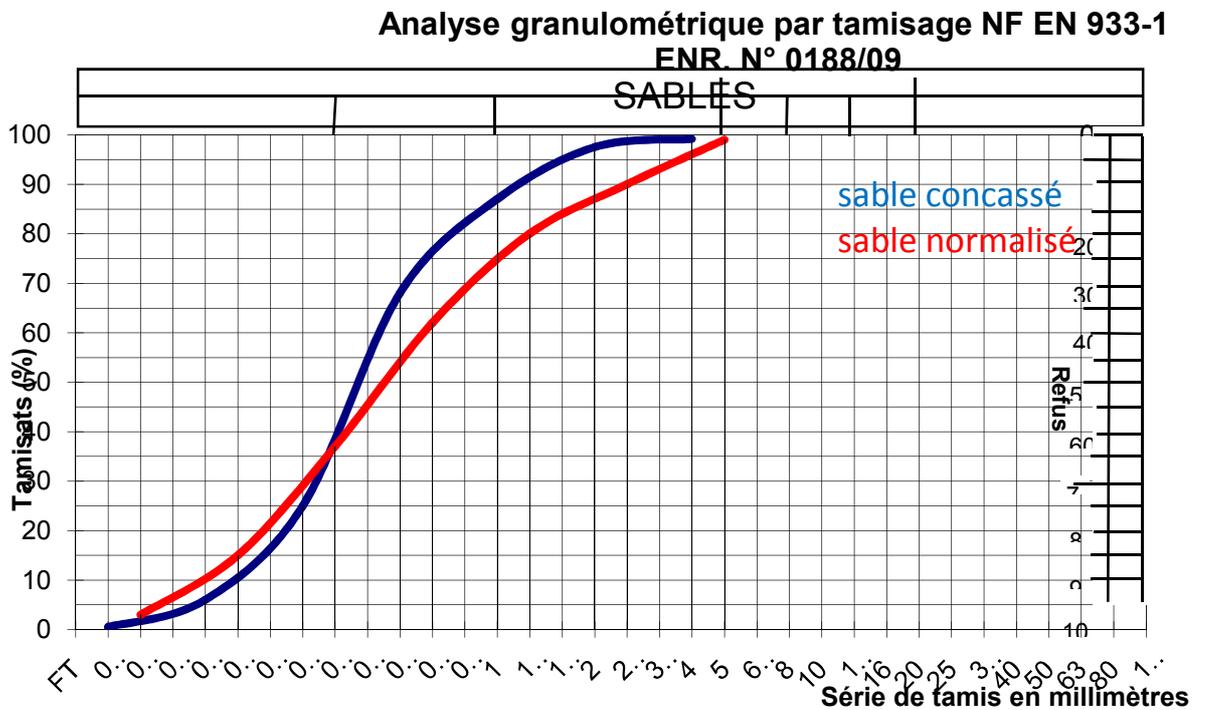
**Figure III.4.** L'essai d'analyse granulométrique.

L'essai a été réalisé selon les modalités de la norme NFP-18-560 , les résultats d'analyse granulométrique de sable sont récapitulés dans le tableau III.6.

**Tableau III.6.** Analyse granulométrique du sable de carrière 0/4.

Ouvertures		Refus partielles (g)	Refus cumulés (g)
modules	Tamis(mm)		
38	4	23	23
35	3.15	52	75
32	2	214	289
29	1	275	564
26	0.5	183	747
23	0.250	93	840
20	0.150	94	934
20	0.08	41	975
20	Fond	16	991

Il ressort de ces analyses que la classe granulaire réelle de ce sable est 0/4, on trace la courbe granulométrique sur un canevas normalisé selon la norme NF-EN 933-1 comportant en ordonnée les pourcentages des tamisât dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique voir la figure III.5.



**Figure III.5.** Analyse granulométrique par tamisage

### III.2.1.6. Module de finesse

Le module de finesse MF est défini comme étant la somme des pourcentages ramenés à l'unité des refus cumulés sur les tamis suivants : 0.08, 0.15, 0.250, 0.5, 1, 2,3.15 et 4 mm.

L'essai a été réalisé selon les modalités de la norme NFP18-560.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.7.

**Tableau III.7.** Valeur du module de finesse.

Classe granulaire	Module de finesse	Valeur spécifiée
0/ 4 de carrière	<b>2.5</b>	<b>2.2 &lt; MF &gt; 2.8</b>

### III.2.2 Liant

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous forme de poudre minérale pulvérisées, s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte qui fait prise et qui durcit progressivement dans le temps sous l'eau et à l'air libre. C'est le constituant fondamental du mortier puisque c'est lui qui joue le rôle de cohésion des différents constituants.

Le ciment utilisé pour la préparation du mortier est commercialisé par la cimenterie de Lafarge M'sila.CEM II 42.5

#### III.2.2.1. Les essais physiques

Les caractéristiques physiques de ce ciment sont présentées dans le tableau ci-après

**Tableau III.8.** Caractéristiques physiques

Caractéristiques	Détaille	Résultats	Unités	normes
Consistance normale	<b>27</b>		%	
Délai de prise	<b>Début de prise</b>	<b>117</b>	<b>Min</b>	<b>NA 230</b>
	<b>Fin de prise</b>	<b>212</b>	<b>Min</b>	<b>NA 230</b>
Surface spécifique (SSB)		<b>3530</b>	<b>Cm<sup>2</sup>/g</b>	<b>NA 230</b>
Masse volumique		<b>3.13</b>	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	



**Figure III.6.** Appareil de Vicat.

### III.2.2.2. Les essais mécaniques

Le tableau suivant représente la résistance mécanique à la flexion et à la compression d'un mortier normalisé conformément à la norme EN P 196-1.

**Tableau III.9.** Caractéristiques mécaniques.

Resistance (Mpa)	Age (jours)			Normes
	2j	7j	28j	
Compression	27.2	42.4	52.7	EN P 196-1
Flexion	7.80	8.35	9.40	

### III.2.2.3. Les essais chimiques

L'analyse thermique gravimétrique permet de déterminer qualitativement et quantitativement les compositions des oxydes contentent dans le ciment y compris la fraction des partes au feu, comme indique le tableau suivant :

**Tableau III.10.** Composition chimique du ciment.

Composition chimique	Teneur	Unité	Normes
CaO	64.68	%	NA442
SiO <sub>2</sub>	21.29	%	NA442
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.72	%	NA442
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.49	%	NA442
MgO	0.44	%	NA2185
CaOl	0.84	%	NA5042
Perte au feu	1.92	%	NA5042

### III.2.2.4. Les essais minéralogiques

A partir de microscope optique polarisé, la détermination des différentes phases minéralogiques s'effectue par la différence de coloration entre les composants de clinker, à partir des calculs de surface de chaque phase cristalline, on peut déterminer la teneur de chacun de ces derniers, comme indique le tableau III.11.

**Tableau III.11.** La composition minéralogique de ciment.

<b>Phase</b>	<b>Constituants minéraux du Clinker</b>	<b>Teneur rapportée au clinker (%)</b>
<b>Clinker</b>	<b>C<sub>3</sub>S</b>	<b>60.61</b>
	<b>C<sub>2</sub>S</b>	<b>15.36</b>
	<b>C<sub>3</sub>A</b>	<b>6.60</b>
	<b>C<sub>4</sub>AF</b>	<b>10</b>
	<b>C<sub>a</sub>O<sub>1</sub></b>	<b>02</b>
<b>Régulateur de prise</b>	<b>Gypse</b>	<b>05</b>

### III.2.3. L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage, c'est l'eau de robinet de provenance de Bouira.

### III.2.4. L'adjuvant

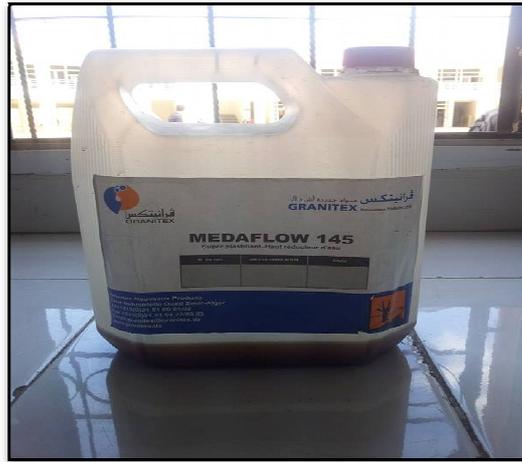
Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au mortier frais en faible quantité (inférieur à 5 %). Ils améliorent les propriétés physico-mécaniques des mortiers auxquels ils sont ajoutés.

Au cours de la préparation de notre mortier, on a incorporé un Superplastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération dit «MEDAFLOW 145 », conforme à la norme **NF EN 934-2**, fabriqué par GRANITEX, Il est conçu à base de poly carboxylate d'éther modifiés, et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un long maintien d'ouvrabilité.

Le MEDAFLOW 145 permet d'obtenir des béton et mortiers de très haute qualité

La fiche technique de ce produit, fourni par le fabricant, donne les caractéristiques générales suivantes :

- Forme ..... Liquide
- Couleur ..... brai clair
- pH ..... 5-6
- Densité .....  $1,065 \pm 0,015$
- Teneur en chlore .....  $\leq 1\text{g/l}$ .
- Extrait sec .....  $30 \pm 1.5\%$



**Figure III.7.** Superplastifiant MEDAFLOW 145.

La fourchette de dosage recommandée est de 0,2 à 3,0 % du poids de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé par (UR-MPE) en fonction du type de ciment et des effets recherchés.

### III.2.5 Argile

L'argile utilisée est de type bentonite calcinée, leur caractérisation a été effectuée au niveau d'unité de recherche matériaux-procédé et environnement (UR-MPE).

#### III.2.5.1. La composition chimique des argiles (bentonite calcinée)

**Tableau III.12.** Composition chimique de bentonite calcinée.

Composition Chimique	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
Teneur(%)	55.5	19.2	8.4	7.2	4.00	3.98	1.3	-	1.109	.95

### III.2.5.2. propriétés physiques

**Tableau III.13.** Les propriétés physiques de bentonite calcinée.

	<b>Bentonite calciné</b>
<b>Surface spécifique (cm<sup>2</sup>/g)</b>	9480
<b>Masse volumique (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.43

## III.3. Résultats et discussions

### III.3.1. Essais physico-chimiques

#### III.3.1.1. Essai de la fluorescence X (FRX)

La fluorescence X est une méthode d'émission atomique, similaire à la spectroscopie d'émission optique (OES), à la spectrométrie d'émission plasma (ICP) et à l'analyse par activation neutronique (spectroscopie gamma). Ces méthodes mesurent la longueur d'onde et l'intensité de la « lumière » (les rayons X dans ce cas) émise par les atomes énergisés de l'échantillon. En fluorescence X, l'irradiation par un faisceau de rayons X primaire depuis un tube à rayons X provoque l'émission de rayons X fluorescents dotés d'énergies discrètes caractéristiques des éléments présents dans l'échantillon. FRX est la méthode plus couramment utilisée pour la détermination qualitative et quantitative de la composition chimique d'un échantillon sous forme massif poudre ou liquide. Les résultats de quelques échantillons sont illustrés dans le tableau III.14.

**Tableau III.14.** Propriétés chimiques des variantes

Oxide/matériaux(%) ASTM C150-07	Composition chimiques (%)					ASTM C618
	ECH 1	ECH 2	ECH 3	ECH 4	ECH 5	
SiO <sub>2</sub>	28.42	58.91	64.56	90.65	78.69	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.94	17.43	18.94	3.05	2.88	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.92	6.51	7.16	2.30	1.90	
MgO	3.46	1.52	1.44	1.03	1.06	5 max.
CaO	48.61	2.29	2.85	1.50	1.39	
Na <sub>2</sub> O	0.25	0.74	0.55	0.44	0.51	
K <sub>2</sub> O	0.48	3.20	3.13	0.52	0.70	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.11	0.07	0.01	0.03	
SO <sub>3</sub>	1.31	0.28	0.15	0.12	0.17	
TiO <sub>2</sub>	1.42	0.75	0.43	0.04	0.10	
L.O.I	3.15	8.26	6.23	1.12	12.55	10max.
Réactive SiO <sub>2</sub>	22.51	46.68	53.56	71.83	62.36	
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40.28	82.85	90.66	96.00	83.47	70 min.

### III.3.1.2. Essai diffraction aux rayons X (DRX)

#### III.3.1.2.1. Principe de la diffraction aux rayons X sur poudre

La diffraction aux rayons X est la méthode la plus couramment utilisée pour se renseigner sur la structure cristalline. Dans le cas d'échantillons en poudres formées de très petits cristaux orientés aléatoirement, toutes les orientations possibles sont représentées, ce qui permet de faire une moyenne statistique.

Le dispositif expérimental utilisé est un diffractomètre de poudre à compteur courbe. Il fonctionne avec la raie k1 du Cuivre :  $\lambda = 1,54056$  angström.

L'identification est réalisée en comparant le diffractogramme obtenu avec une base de données internationale (JCPDS) contenant les diffractogrammes de référence de plus de 80000 phases. Cette méthode permet l'identification des différentes phases cristallines constitutives de l'échantillon et aussi d'estimer les proportions relatives de ces différentes phases.

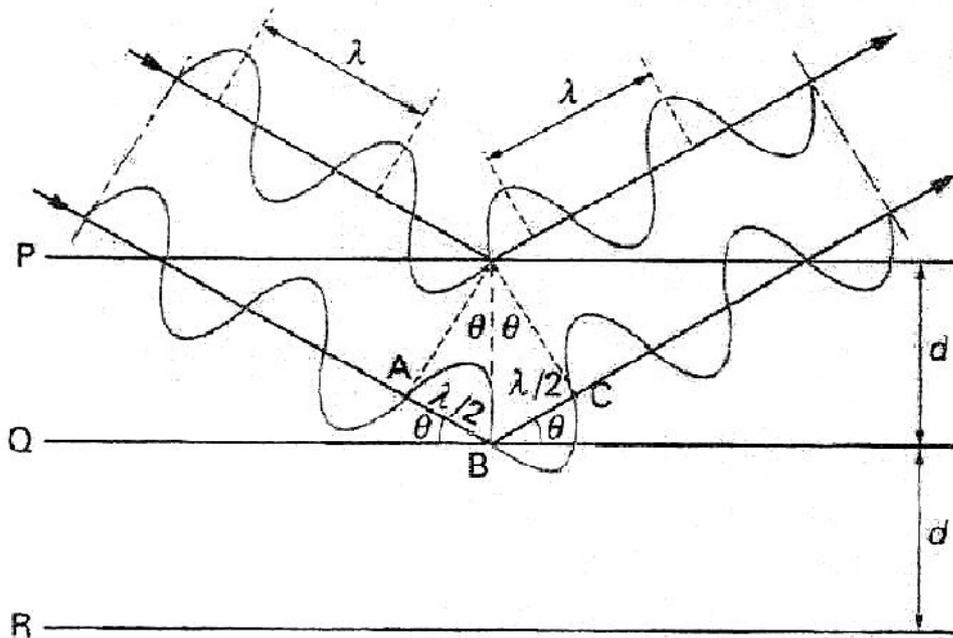
Le réseau du cristal est une distribution régulière en trois dimensions des atomes dans l'espace. Ils sont arrangés pour former une série de plans parallèles, séparés par une distance  $d$ , qui varie selon la nature du matériau. L'interaction d'un faisceau de rayons X (longueur d'onde très courte) avec la matière donne naissance à une émission dans toutes les directions d'un rayonnement de même longueur d'onde et de phase cohérente. Ce phénomène de diffusion conduit à des ondes d'amplitude très faibles dans le cas d'un atome. En revanche, la diffusion par la matière sur un ensemble d'atomes, entraîne une interférence des ondes

cohérentes diffusées par chaque atome. Cette onde, dite diffractée, dépend de la structure atomique de la matière.

Lorsqu'un rayon X monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$  est incident aux plans du réseau d'un cristal avec un angle  $\theta$ , la diffraction a lieu seulement lorsque la distance parcourue par les rayons réfléchis de plans successifs, diffèrent d'un nombre entier de longueur d'onde. C'est la loi de Bragg. (Figure 8)

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \dots\dots\dots [\text{Eq},8]$$

Où  $d$  est la distance inter réticulaire séparant deux plans de même famille ( $h, k, l$ ),  $n$  est l'ordre de diffraction.



**Figure III.8.** Géométrie expliquant la loi de Bragg par analogie à la réflexion.

En changeant l'angle  $\theta$ , les conditions de la loi de Bragg sont satisfaites pour différentes distances  $d$ . En traçant les positions angulaires et les intensités des pics résultants de la diffraction, on obtient un diagramme qui est caractéristique de l'échantillon. Le diffractogramme est formé de l'addition des diagrammes individuels car il peut présenter un mélange de différentes phases.

### III.3.1.2.3. Résultats de l'analyse à la DRX des échantillons

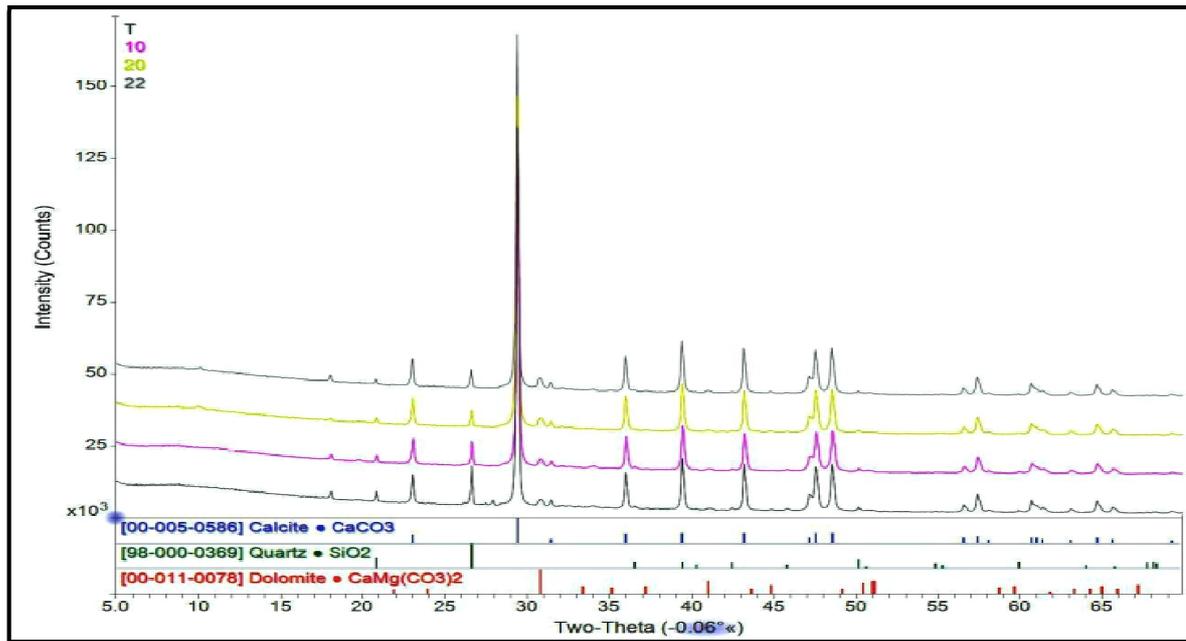


Figure III.9. Résultats de l'analyse à la DRX des échantillons.

#### Discussion de résultat

Dans la figure III.9 les résultats de diffraction aux rayons X (DRX) :

L'intensité (counts) en fonction de 2θ sur l'abscisse on remarque trois éléments minéralogique essentiel tel que :

- Calcite Ca CO<sub>3</sub>
- Quartz SiO<sub>2</sub>
- Dolomite Ca Mg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

### III.3.1.3. Essai infrarouge

#### III.3.1.3.1. Principe de l'essai

L'analyse s'effectue à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier, qui envoie un rayonnement infrarouge sur l'échantillon et mesure les longueurs d'ondes absorbées ainsi que les intensités de l'absorption. Le faisceau infrarouge provenant de la source est dirigé vers l'interféromètre de Michelson, qui va moduler chaque longueur d'onde de faisceau à une fréquence différente, dans l'interféromètre le faisceau lumineux arrive sur la séparatrice là où la moitié de faisceau est dirigé sur le miroir fixe, le reste passe à travers la séparatrice puis dirigé le miroir mobile. Quand les deux faisceaux se recombinaient, des interférences destructives ou constructives apparaissent en fonction de la position du miroir mobile. Le faisceau modulé est alors réfléchi sur les deux miroirs vers l'échantillon, où des absorptions interviennent, ensuite le faisceau arrive sur le détecteur pour être transformé en signal

éclectique. Le signal de détecteur apparaît comme inter-férogramme, c'est-à-dire une signature de l'intensité en fonction de la position du miroir. L'inter-férogramme est la somme de toutes les fréquences du faisceau. Cet inter-férogramme est ensuite converti en un spectre infrarouge par une opération mathématique appelée transformée de Fourier.

### III.3.1.3.2. Préparation des échantillons

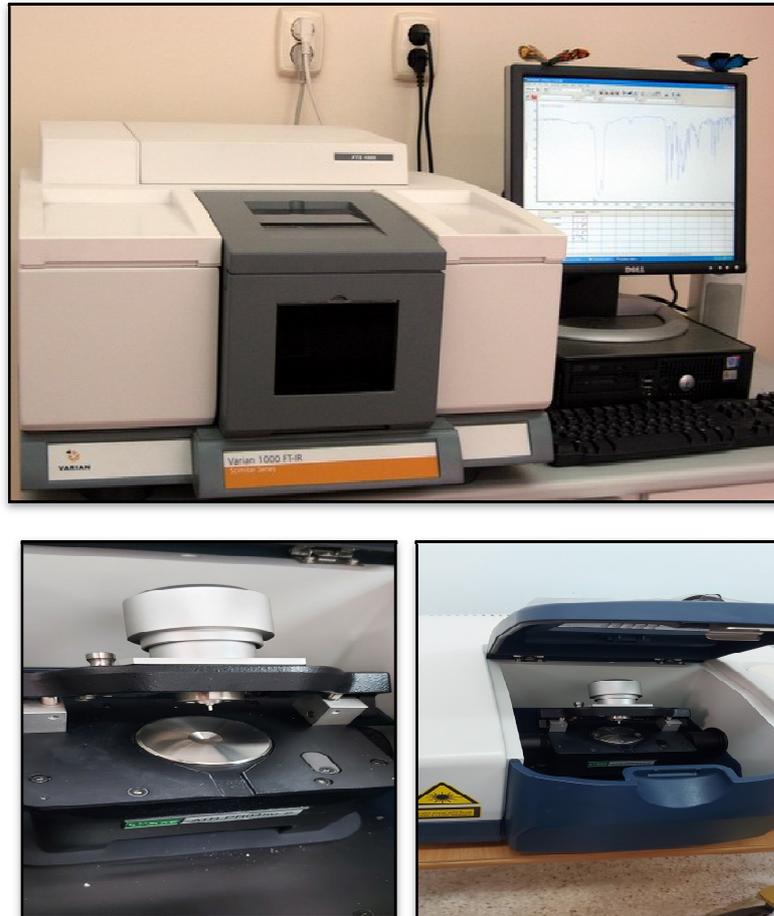
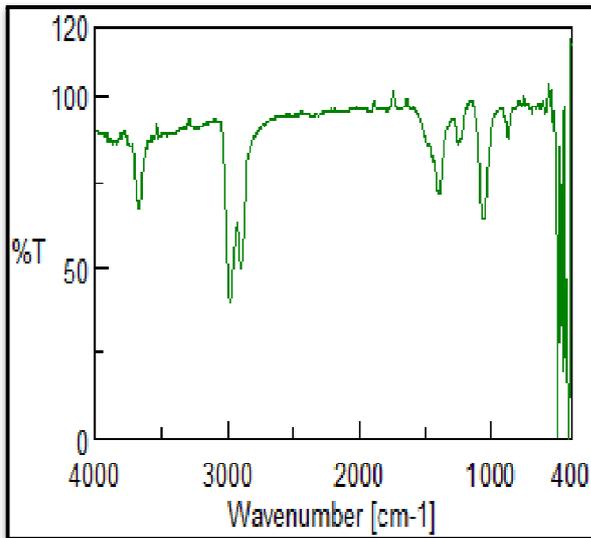
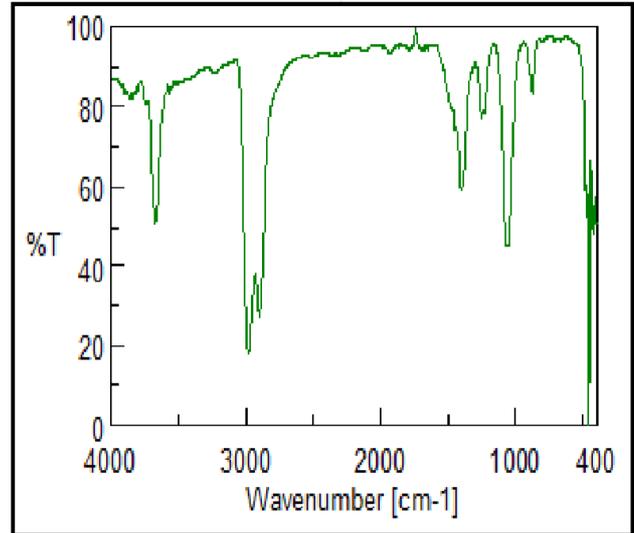


Figure III.10. Appareil de «IFTR » spectromètre

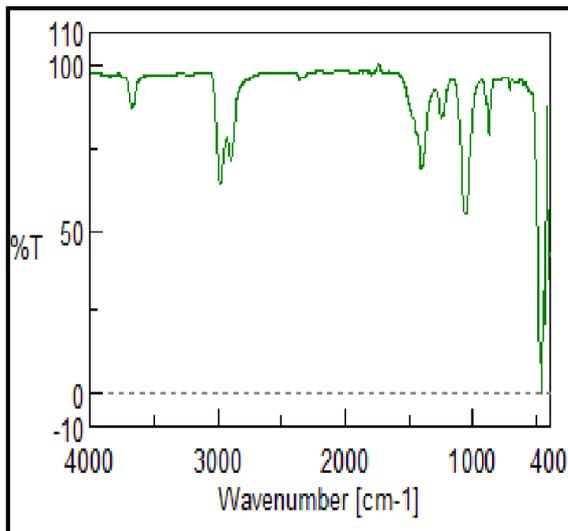
## III.3.1.3.3. Résultats de l'analyse



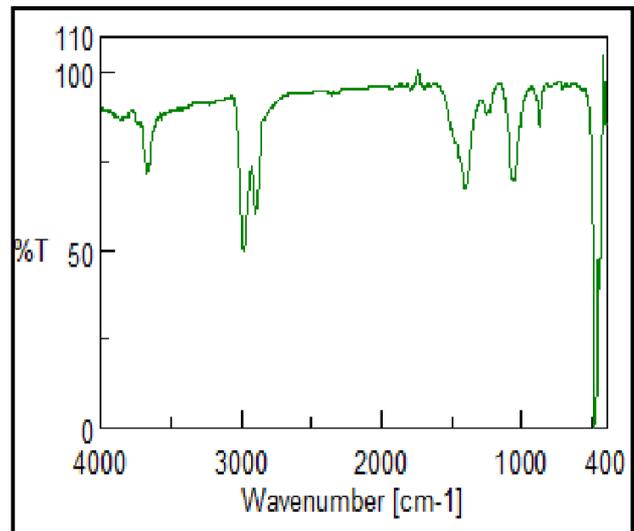
**Figure III.11.** Résultats de l'analyse IR de l'éprouvette 1.



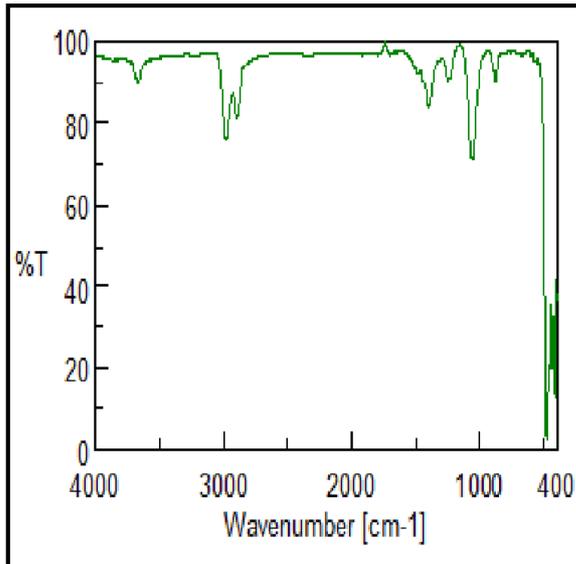
**Figure III.12.** Résultats de l'analyse IR de l'éprouvette 2.



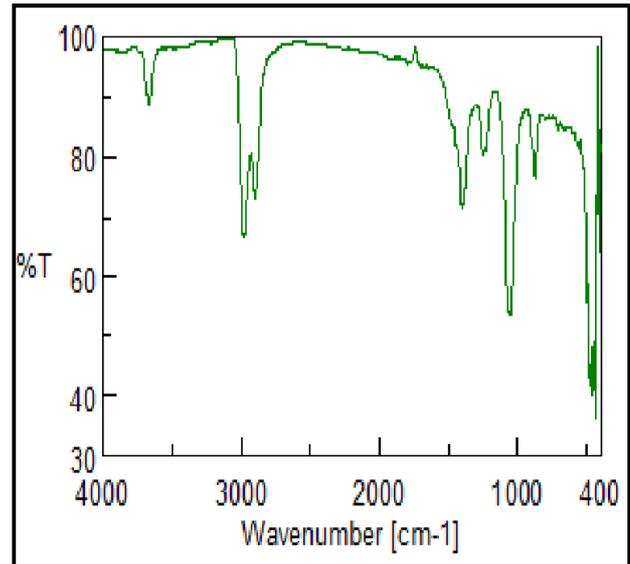
**Figure III.13.** Résultats de l'analyse IR de l'éprouvette 3.



**Figure III.14.** Résultats de l'analyse IR de l'éprouvette 4.



**Figure III.15.** Résultats de l'analyse IR de l'éprouvette 5.



**Figure III.16.** Résultats de l'analyse IR de l'éprouvette 6.

### Discussions des résultats

Dans les figures précédentes les résultats de l'infrarouge :

Montre des pics chaque pic identifié une liaison chimique de l'ensemble des liaisons de notre matériau (mortier).

### III.3.2.Essais non destructifs

#### III.3.2.1.Essai ultrason

L'auscultation par ultrason est une méthode non destructive destinée entre autres à tester l'homogénéité du mortier, elle consiste à déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (décompression) à travers un élément en mortier. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.

La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques et la résistance à la Compression est affectée par un nombre de variables tels que l'âge du mortier, les conditions d'humidités, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et des fissures. Le contrôle par ultrasons permet, sans nuire à l'intégrité d'une structure, de caractériser les défauts qu'elle contient et de porter ainsi un jugement sur l'acceptation des pièces réalisées.

#### III.3.2.1.1.Description de l'appareil

Dans notre essai, nous avons utilisé l'appareil de test ultrasonique Pundit Lab (Figure III.12.), ce dernier est constitué de : Un testeur ultrasonique, Deux transducteurs (émetteur et

récepteur) , Barre de calibration, Deux câbles de connexions de 1.5m, Un gel de contact, Une centrale d'acquisition des données.

### III.3.2.1.2.Principe de mesure

L'appareil ultra-sonique génère des ondes ou des impulsions "ultra-soniques" qui sont transmises au mortier par un transducteur mis au contact avec la zone à évaluer. Le temps de propagations des ondes à travers le mortier est visualisé sur un afficheur digital de l'appareil.



Figure III.17. Appareil de test ultrasonique Pundit-Lab.

#### a) Etalonnage de l'appareil :

Avant de commencer, l'essai il faut régler l'appareil de mesure. Cela se fait comme suit : Remise à zéro du Pundit Lab en utilisant la barre de calibration (elle doit se faire régulièrement si la fréquence du transducteur est modifiée ou si les câbles sont changés).

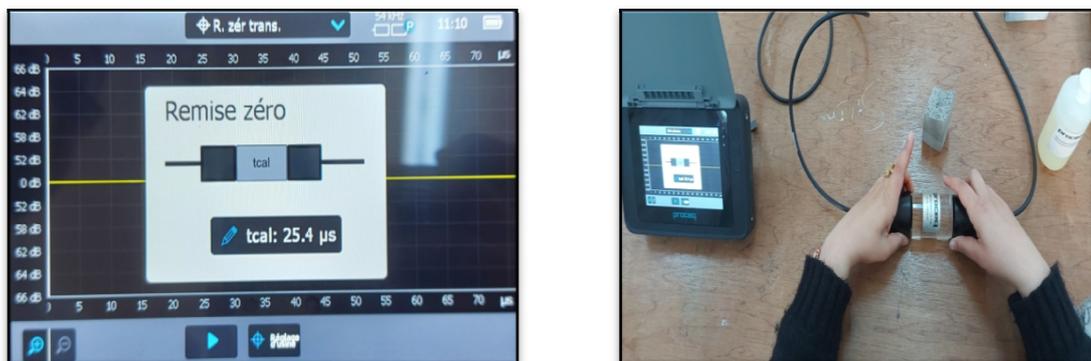


Figure III.18. Remise à zéro du Pundit Lab avec la barre de calibration.

La valeur de calibration (s) est celle marquée sur la barre de calibration, elle est de 25,4s. Il faudra donc coupler les transducteurs avec la barre de calibration en appliquant le couplant sur les transducteurs et les deux extrémités de la barre et en appuyant fermement comme illustrés ci- dessous. (Figure III.19).



**Figure III.19.** Remise à zéro du Pundit Lab avec la barre de calibration.

Finalement, il faudra régler :

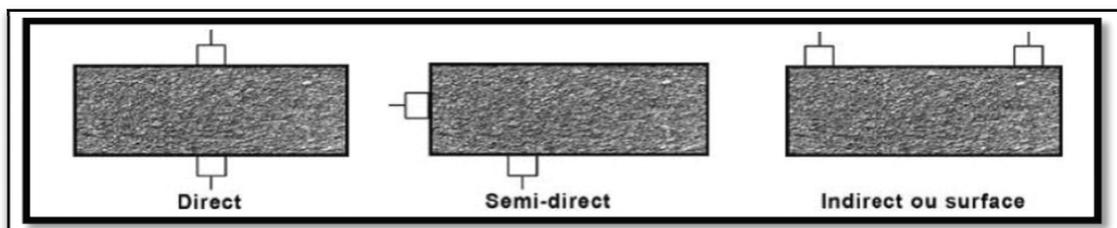
- ✓ la fréquence du transducteur à 25,4µs.
- ✓ la largeur d'impulsion.
- ✓ les paramètres de calibrage.

Après tous ces ajustements il faut préparer les éprouvettes comme suit :

- ✓ Poncer et égaliser la partie de la surface des éprouvettes à ausculter où le transducteur sera fixée, cette étape est très importante pour que les transducteurs soient en contact avec le mortier.
- ✓ Préparer les point de mesures, cette opération consiste à marquer les points d'essai afin de centrer les transducteurs dessus.
- ✓ Employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de Vérifier que l'appareil est bien applique contre la surface à tester à l'aide d'un matériau d'interposition comme du gel. . .

#### ☞ Disposition des transducteurs

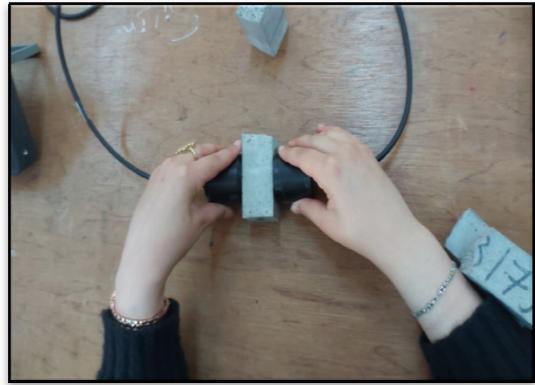
Trois types de dispositions des transducteurs sont communément utilisés.



**Figure III.20.** Différents types de dispositions des transducteurs.

Dans notre cas, nous avons utilisé la disposition directe car cela permet une transmission maximale du signal entre les transducteurs. Nous avons placé les transducteurs (émetteur et récepteur) sur deux faces opposées, au même niveau (Figure III.22). La longueur de trajet est

la distance entre le centre des deux faces opposées, dans notre cas elle correspond à la longueur de l'éprouvette qui est de 40mm de l'éprouvette qui est de 40mm. Ainsi, on lit le temps de passage sur l'écran, qui est donné sous forme d'onde.

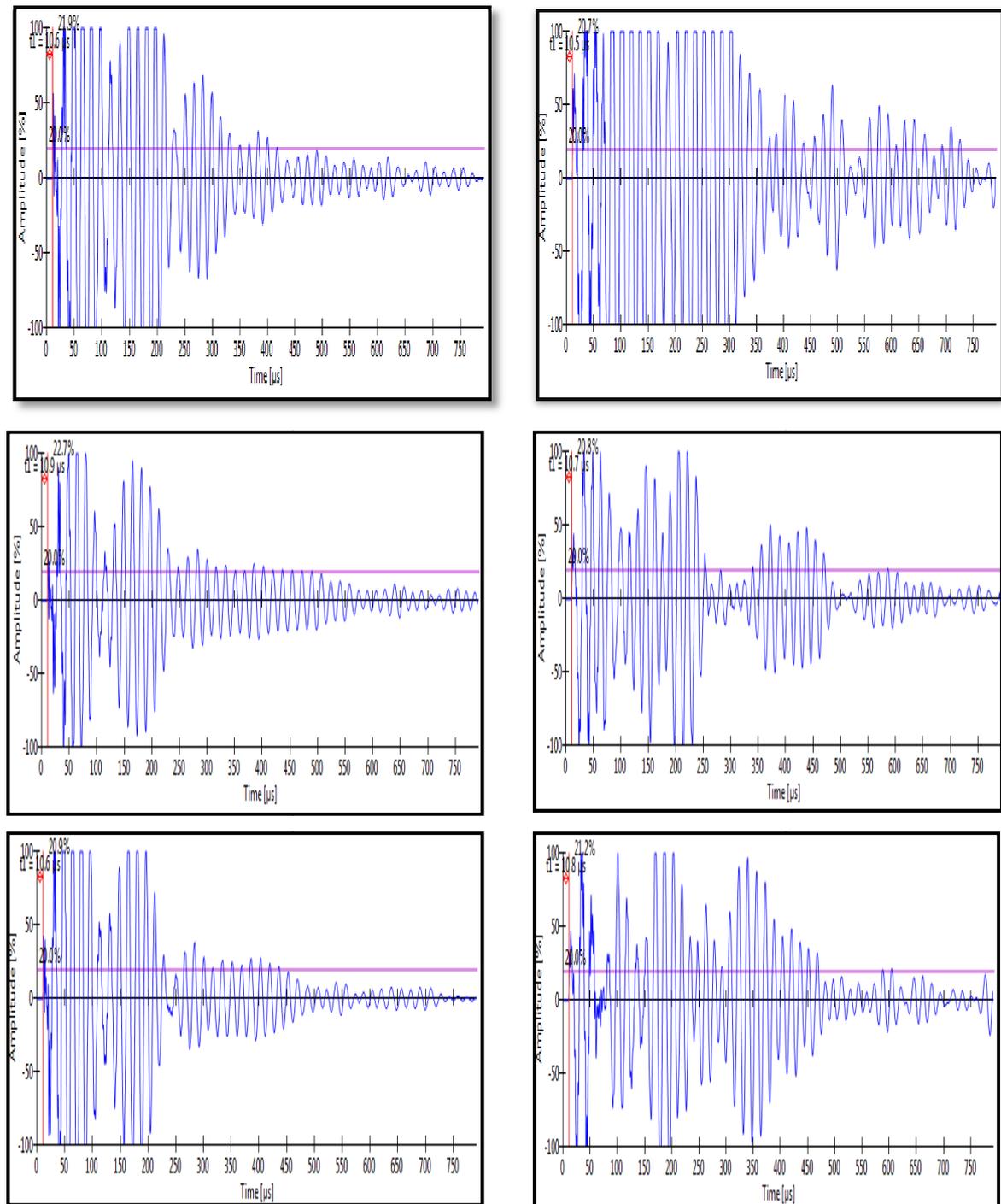


**Figure III.21.** Position des transducteurs **figure III.22.** centrale d'acquisition des données.

#### III.3.2.1.4. Résultats et discussion de l'analyse

**Tableau III.15.** Résultats obtenus de l'essai ultrason.

Code	Volume	Façade 1(m /s)			Façade 2(m /s)			Moyenne (m /s)		Moyenne totale (m /s)
		F 1	F 2	F 3	F 1	F 2	F 3	F 1	F 2	
ECH 1	4*4*4 cm <sup>3</sup>	3774	3670	3774	3810	3738	3704	3739.33	3750.67	3745.00
ECH 2		3922	4000	3922	3810	3810	3846	3948.00	3822.00	3885.00
ECH 3		3883	3774	3846	3960	3883	4000	3834.33	3947.67	3891.00
ECH 4		3883	3846	3922	3738	3670	3846	3883.67	3751.33	3817.50
ECH 5		3960	3922	3960	3846	3810	3883	3947.00	3846.00	3896.50
ECH 6		3670	3704	3774	3960	3960	4000	3716.00	3973.33	3844.65



Façade1

Façade2

Figure III.23. Signal de l'essai ultrason pour l'éprouvette 1 (Façade 1 et 2).

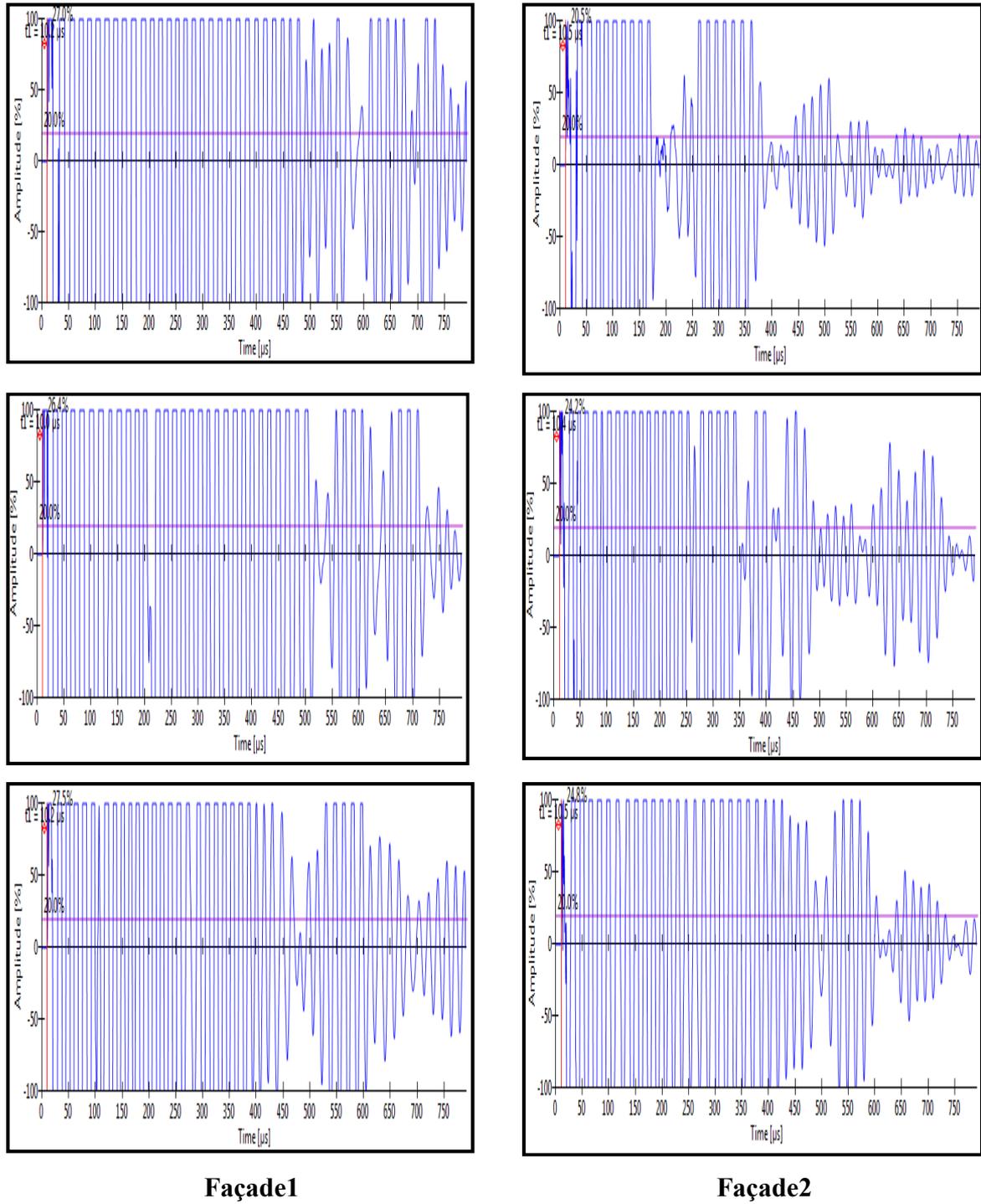
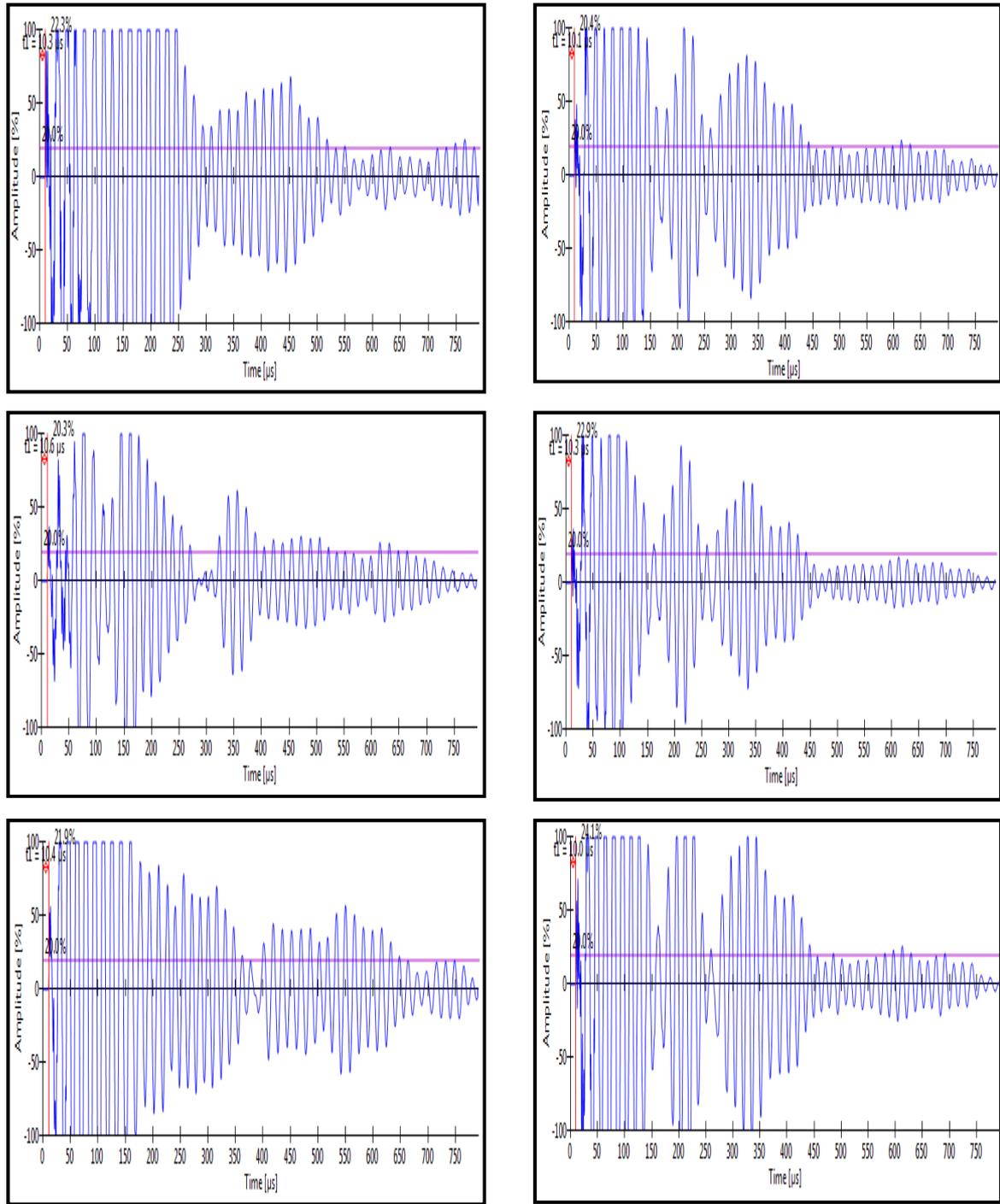


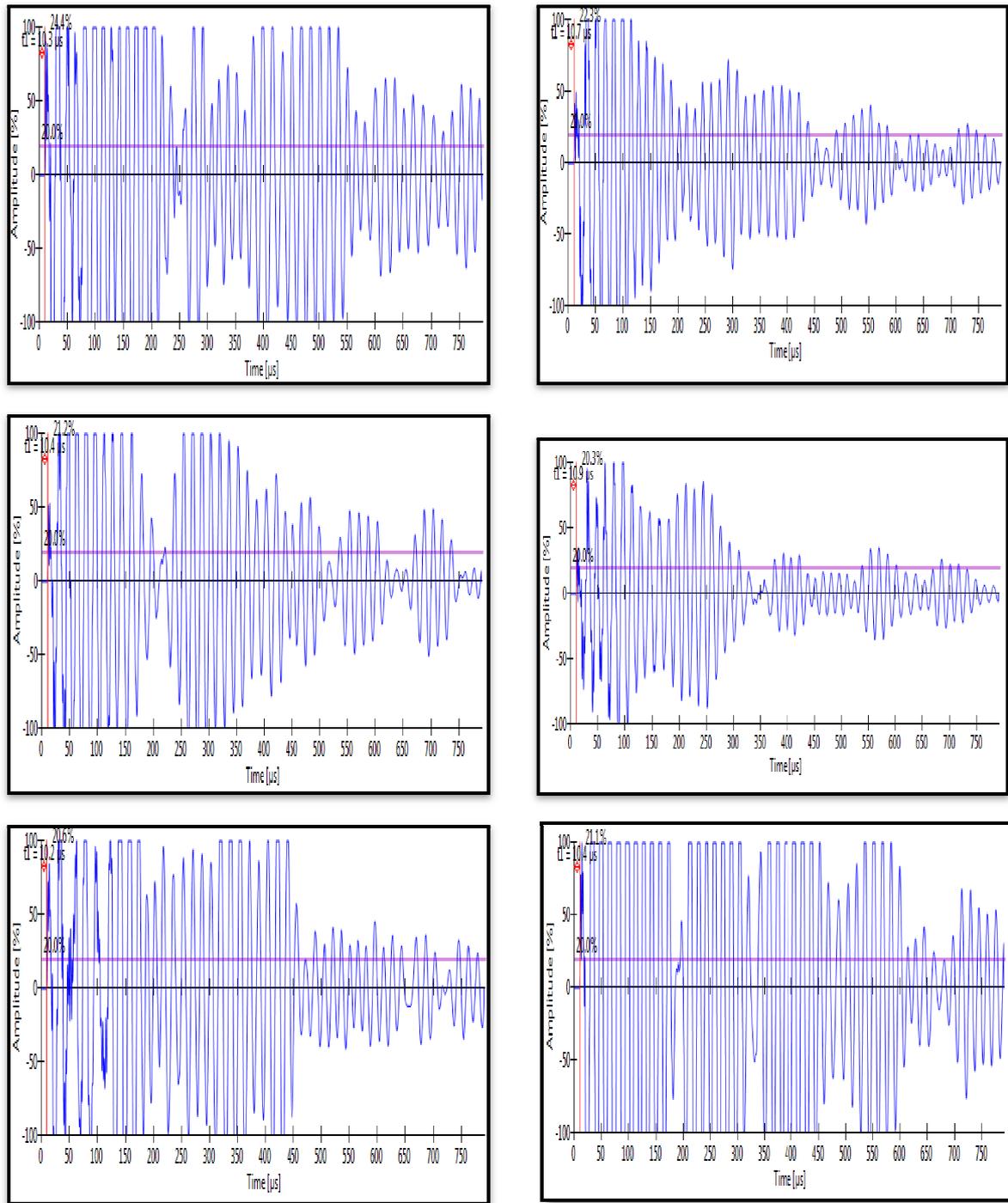
Figure III.24. Signal de l'essai ultrason pour l'éprouvette 2 (Façade 1 et 2).



Façade1

Façade2

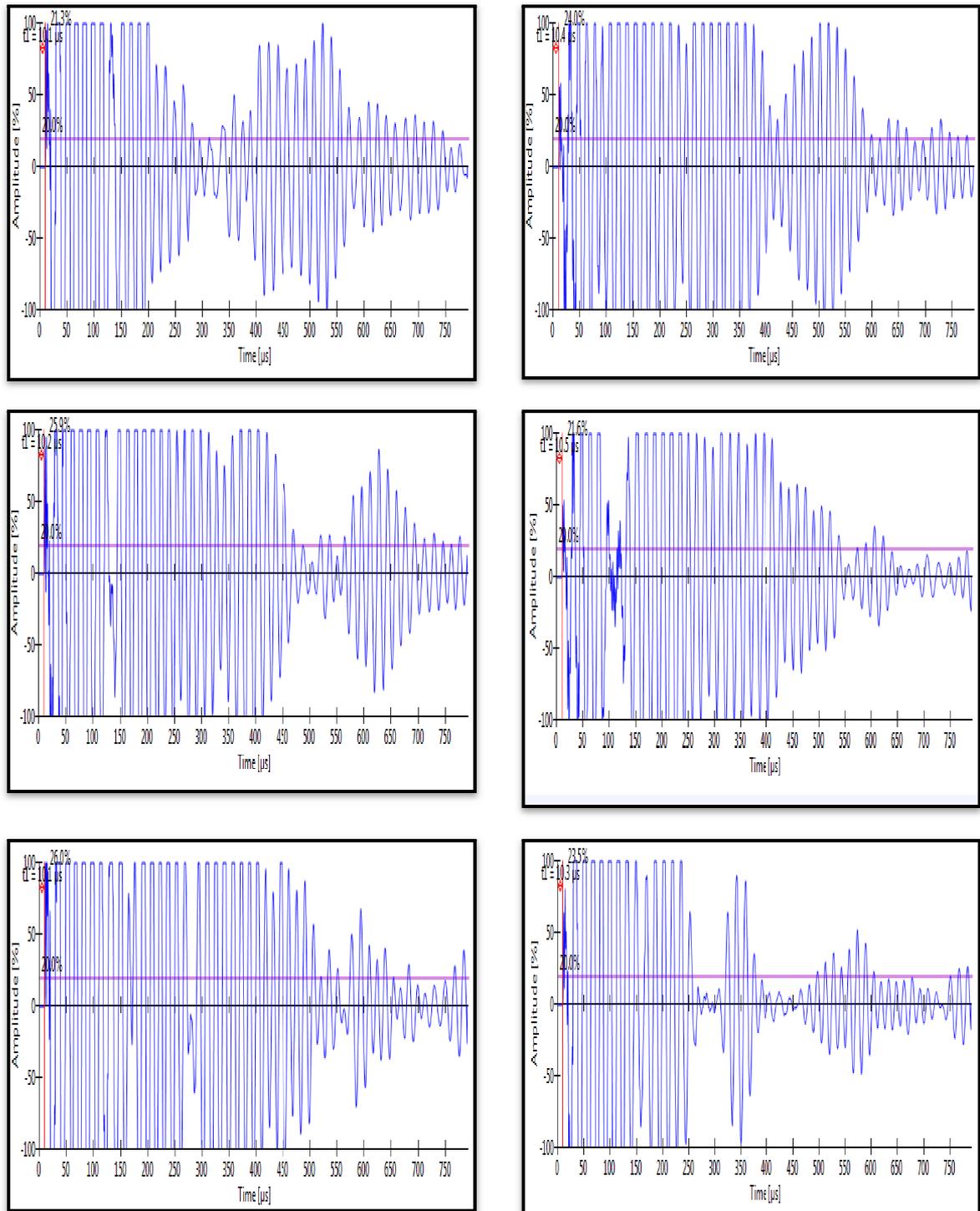
Figure III.25. Signal de l'essai ultrason pour l'éprouvette 3 (Façade 1 et 2).



Façade1

Façade2

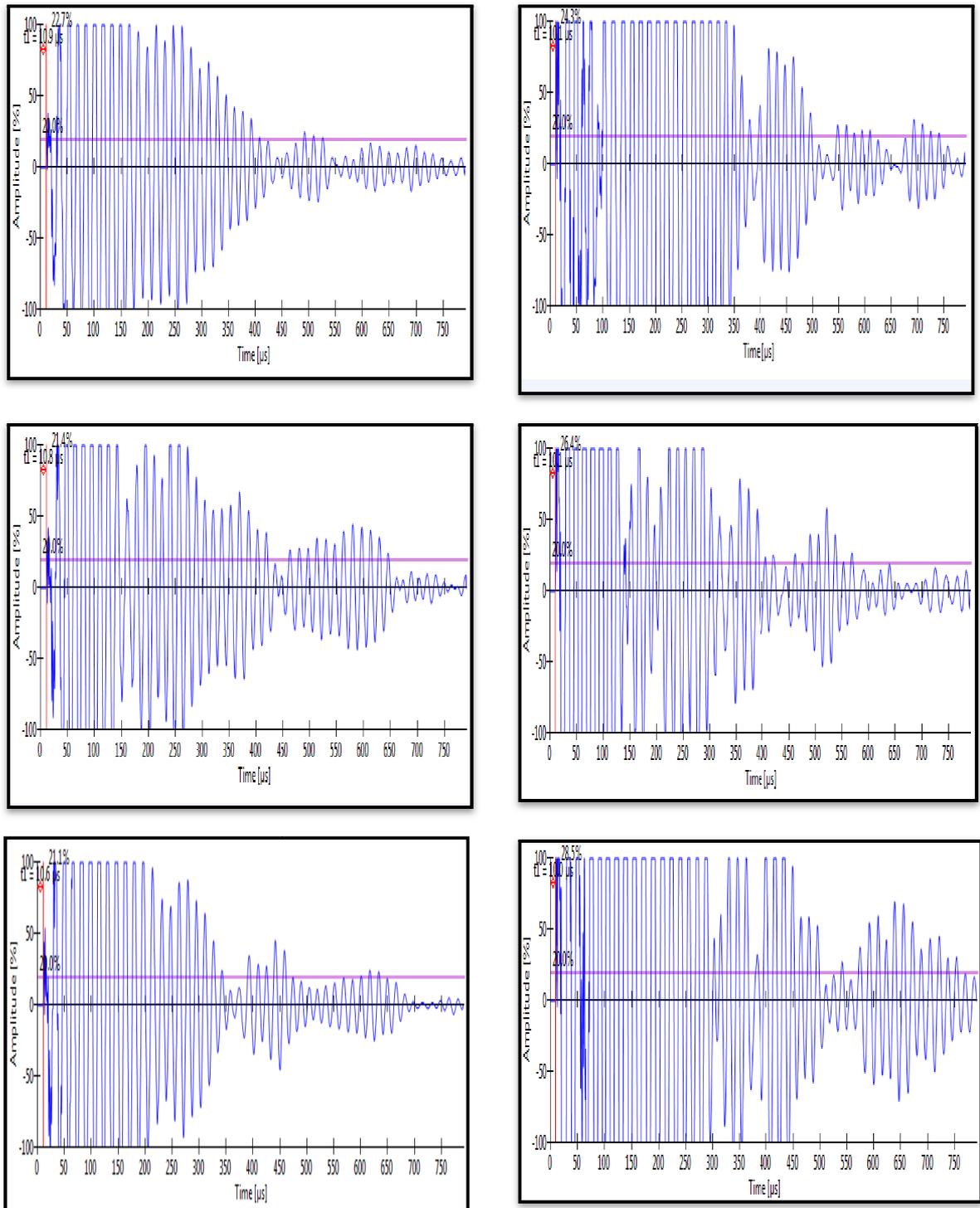
Figure III.26. Signal de l'essai ultrason pour l'éprouvette 4 (Façade 1 et 2).



Façade1

Façade2

Figure III.27. Signal de l'essai ultrason pour l'éprouvette 5 (Façade 1 et 2).



Façade1

Façade2

Figure III.28. Signal de l'essai ultrason pour l'éprouvette 6 (Façade 1 et 2).

### Discussion des résultats

Les résultats de la figure III.28 montrent que les vitesses à l'ultrason pour ces mortiers baissent avec nombre des vides dans les mortiers. Lorsque le nombre des vides est élevé les ondes vont vite, et vis versa.

Pour chaque mortier correspond une résistance mécanique caractéristique qui correspond à une vitesse à l'ultrason bien définie.

Plus le mortier contient beaucoup des vides les ondes vont pas vite la propagation de vitesse diminue aussi la résistance mécanique démunie.

### III.3.3.Essai conductivité et capacité électrique

#### III.3.3.1.Principe de l'essai

Pour mesurer la conductivité électrique d'un matériau cimentaire (mortier), il existe deux types de mesures.

- ❖ Mesure de la conductivité du béton d'enrobage.
- ❖ Mesure de la conductivité du mortier de la surface (notre cas).

Un appareil de mesure **LCRmeter** porte électrode est plaqué sur le parement, puis un courant d'intensité **I** est envoyer au volume de l'échantillon à partir des 2 électrodes de courant. La différence de potentiel **V** créée et mesurée entre les 2 électrodes de potentiel.

La conductivité est déduite du rapport  $\frac{V}{I}$ , de la section entres 2 électrodes voisine, et de la géométrie du dispositif utilisé.

Les résultats obtenus de la résistivité et la capacité électrique sont représentés dans les courbes suivantes :



Figure III.29. Appareil LCRmètre

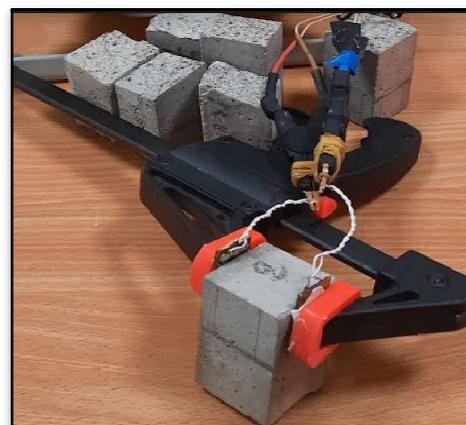
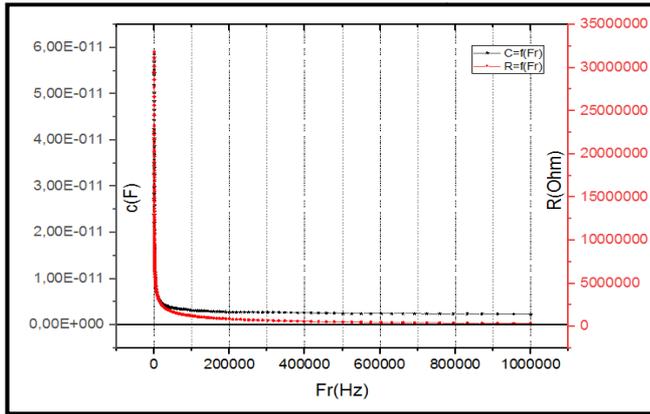
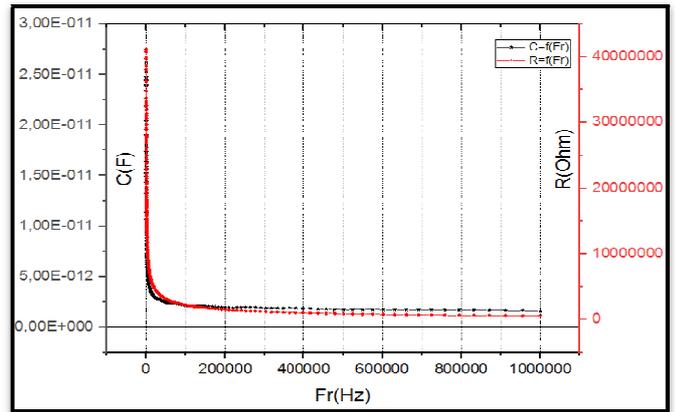


Figure III.30. Essai de la conductivité électrique.

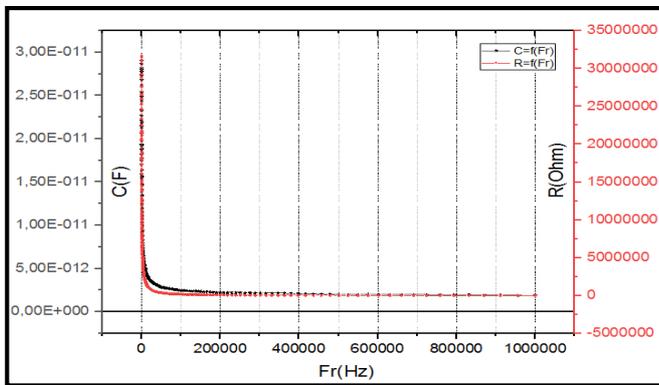
III.3.3.2. Résultats de l'analyse



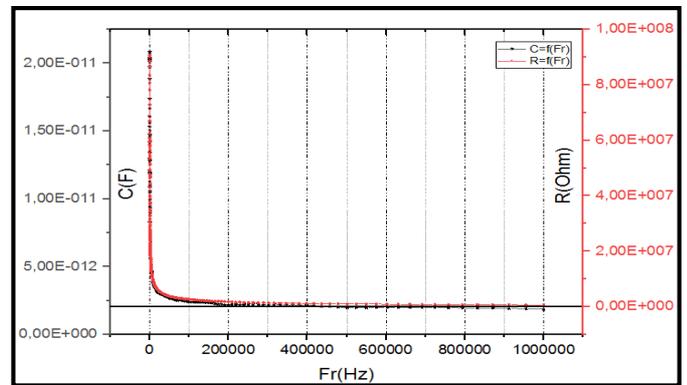
Eprouvette 1



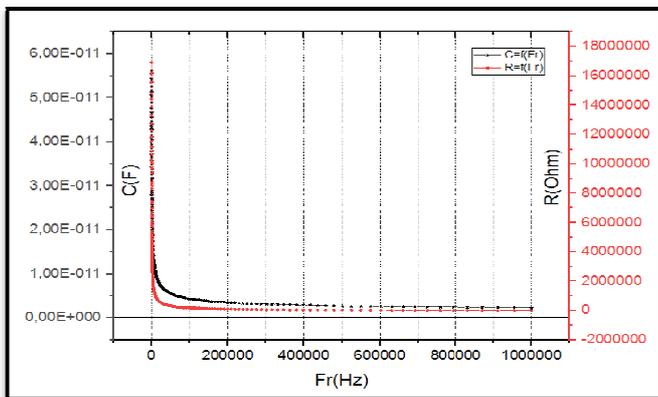
Eprouvette 2



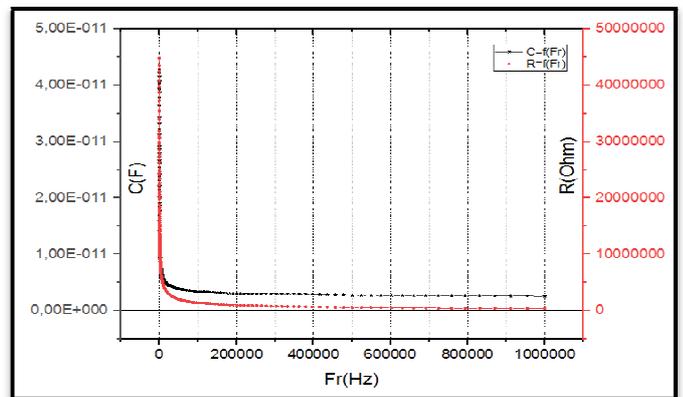
Eprouvette 3



Eprouvette 4



Eprouvette 5



Eprouvette 6

Figure III.31. Résultat de l'essai de la conductivité et la résistance électrique.

Discussion de résultat

La résistivité et conductivité (capacité) du mortier est une grandeur intensive pouvant varier d'un point à un autre qui exprime sa capacité à s'opposer au passage d'un courant électrique.

Cette propriété intrinsèque dépend :

- de la formulation des mortiers (propriétés microstructurale),

- de son âge (5 ans),
- et de son état (hydrique et thermique).

En effet, si le mortier substitué était parfaitement homogène, cette observable serait égale à la résistivité du mortier. Mais, en pratique, ce dernier est hétérogène et la mesure intègre la distribution de résistivité dans un certain volume. Ce volume d'investigation dépend du quadripôle d'électrodes (disposition, espacements) et des propriétés électriques du mortier ausculté.

### III.3.4. Essai microstructural (Microscope Electronique à Balayage MEB ou SEM)

#### III.3.4.1. Principe de l'essai

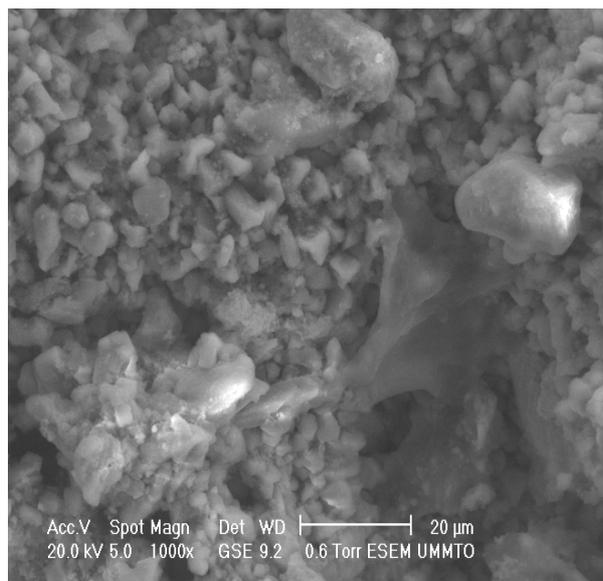
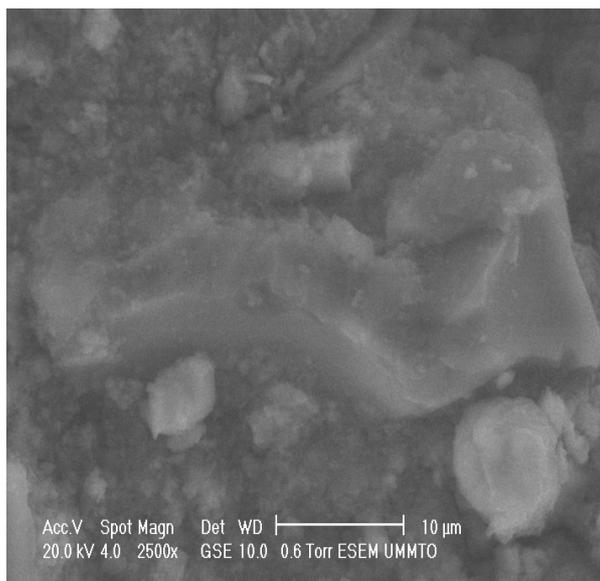
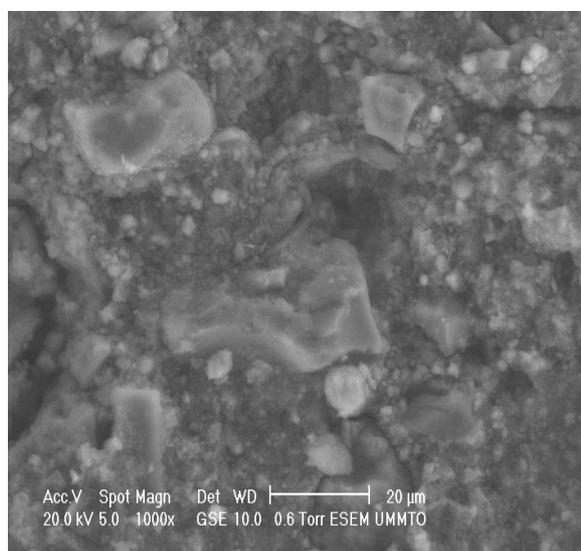
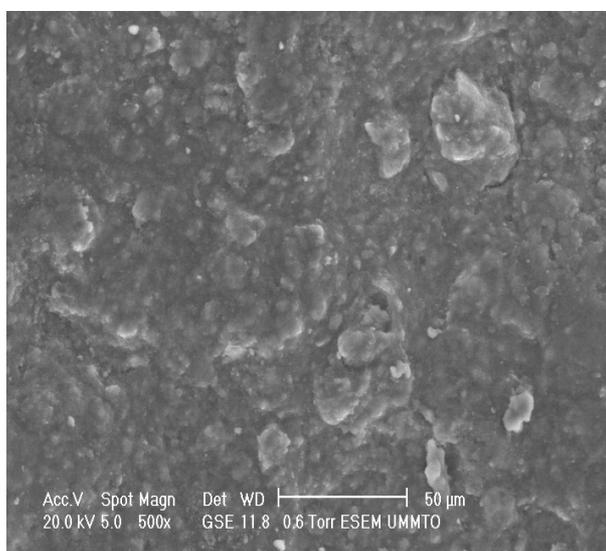
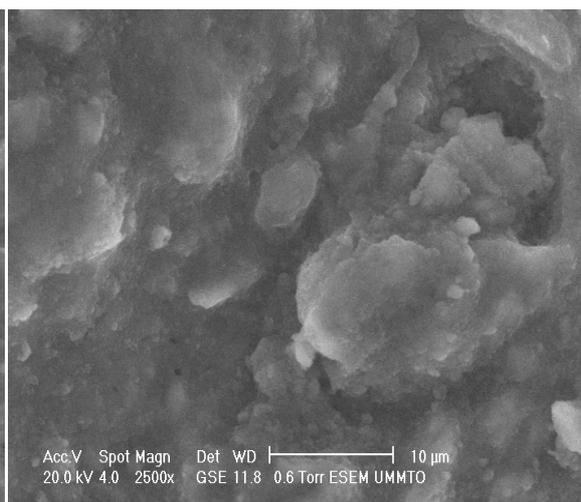
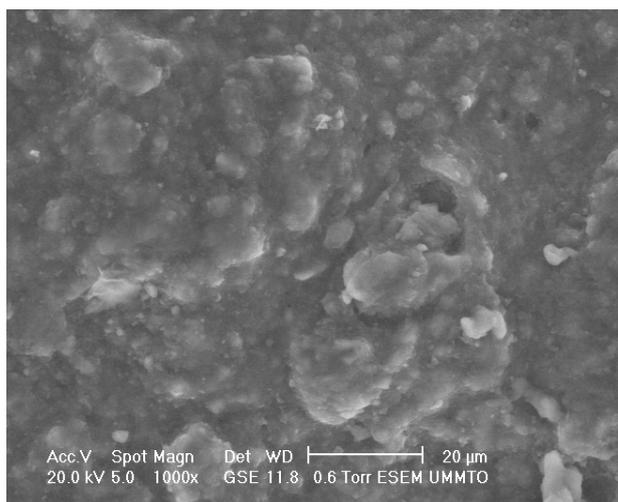
Le microscope électronique à balayage (MEB) utilisé pour ce travail est un Hitachi S.4500 à effet de champ. Le détecteur des électrons rétrodiffusés est de type Multi channel Plate permettant de travailler à basse tension (1 kV) et à haute tension (36 kV), sa résolution est de quelques nanomètres.

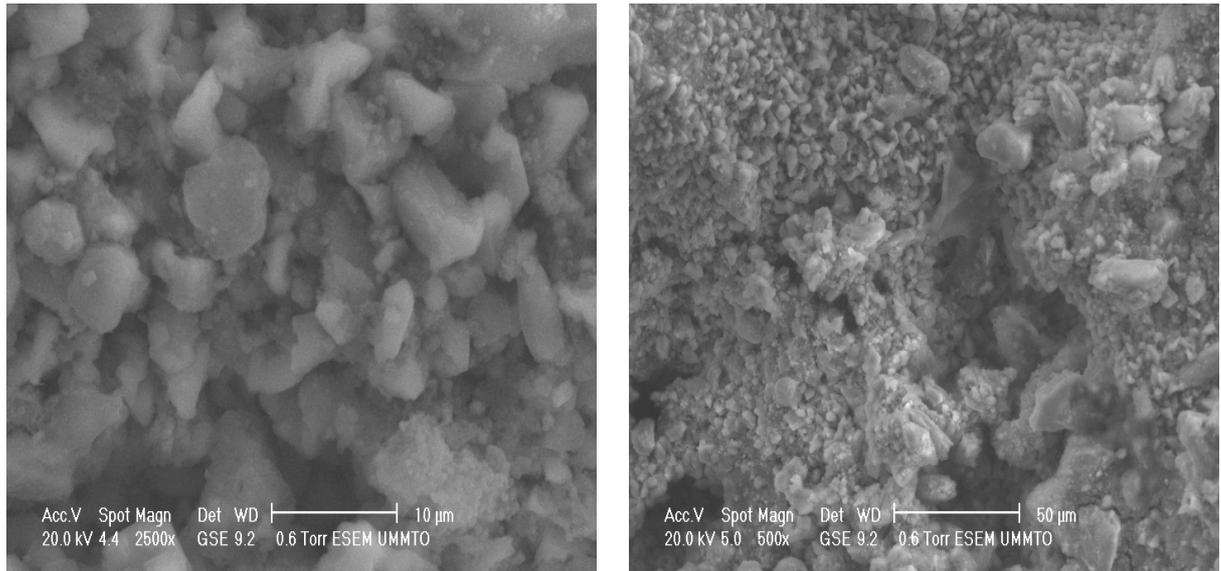
L'identification de la microstructure du matériau cimentaire peut être réalisée au MEB à partir de fractures ou de surfaces polies.



**Figure III.32.** Microscope électronique à balayage.

III.3.4.3. Résultats de l'analyse





**Figure III.33.** Résultats de l'analyse Microscope Electronique à Balayage MEB.

### Discussions des Photo

Les observations faites sur la surface du matériau cimentaire (mortier) de référence et substitué par la bentonite calcinée non conservé dans l'eau pendant une durée de 5 ans et non altérée. On observe un important dépôt de la montmorillonitique et de gypse qui couvre pratiquement toute la surface. Pour toutes les éprouvettes de mortier aux fines de la bentonite calcinée la surface est recouverte de la calcite suite à la carbonatation de la portlandite. Ce qui explique peut être, la faible dégradation de la peau du mortier valorisé par la bentonite calcinée exposé à l'air libre.

Les échantillons de mortier avec ajout de fines d'argile bentonite au bout d'une durée de 5 ans de durcissement présentent une microstructure relativement dense. Cependant, le mortier de référence (sans ajout), la présence d'ettringite sous forme de baguette et de la portlandite est plus marquée.

### Conclusion générale

La présente étude expérimentale a pour objectif et a partir d'une étude sur l'activité pouzzolanique et la possibilité de substitution partielle d'une partie ciment par un matériau pouzzolanique est la bentonite calcinée avec différents taux (0% et 8% et 10% et 12 et 14% et 16 %) sur les propriétés structurales et microstructurales des mortiers, Les principales conclusions auxquelles nous sommes parvenues sont :

- Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des matériaux géoressources minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physico-chimiques à l'état frais et contribuent positivement aux propriétés mécaniques des mortiers à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments.
- Réduction de la consommation du clinker en contribuant de manière simple et économique à la réduction de la consommation énergétique d'où un bas prix de revient de la tonne de ciment.
- Un mortier confectionné à partir d'un ciment composé de pouzzolane peut atteindre des résistances à la compression satisfaisant les normes.
- L'activité pouzzolanique (à l'air libre, la pouzzolane se comporte comme un liant hydraulique) et l'augmentation de la surface spécifique Blaine sont les facteurs principaux de la durabilité des mortiers et bétons.
- Les mortiers à base de la bentonite calcinée sont la possibilité d'utiliser comme un matériau de remplacement dans les mortiers.
- Dans le chapitre 3, les variantes de mortier ont été validées par les résultats des essais entre eux.
- Pour chaque mortier correspond une résistance mécanique caractéristique qui correspond à une vitesse à l'ultrason bien définie.

## Conclusion générale

---

- Le différent résultat issu de l'analyse microscopique (MEB) confirme bien que les mortiers formulés à partir de ciment substitué par la bentonite calcinée restent insensibles aux attaques existant à l'air libre.
- Les mortiers à base de CEM II/BC sont bien ceux qui présentent les signes microscopiques les plus nets de composition minéralogique.
- On observe un important dépôt de la montmorillonite et de gypse qui couvre pratiquement toute la surface.
- D'après les résultats on montre que les résistances augmentent légèrement à long terme et ceux pour les mortiers à base de 12% de bentonite calcinée, puisque c'est le taux moyen qui a satisfait les critères d'amélioration de la relation résistance-propriétés liantes et pour améliorer aussi la durabilité et le cycle de vie des mortiers.

Enfin, ce travail de projet de fin d'étude nous a donc permis de étudier l'influence de la substitution d'une partie de ciment sur l'activité pouzzolanique et durabilité du mortier formulé à base des liants ciment - bentonite calcinée avec un taux allant de 0 à 16 % qui ont tout de même l'avantage d'atteindre des performances acceptables du point de vue de la durabilité à long terme.

Les ajouts cimentaires pouzzolaniques sont caractérisés par une teneur élevée en dioxyde de silicium seul ou, en dioxyde de silicium et en oxyde d'aluminium combiné. Ils peuvent réagir avec la chaux hydratée (portlandite), libérée lors de l'hydratation du ciment portland pour former des composés ayant des propriétés liantes. Ces hydrates, se nomment en tant que produits de la Réaction pouzzolanique et sont très semblables aux produits issus de l'hydratation du ciment Portland.

## Bibliographie

- [1] Khélifa R., «Influence des ciments à base d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons, Thèse de Magistère en Génie Civil, Université Mentouri de Constantine, le 11 Juillet 2001.
- [2] Khelifa R., «L'impact des cimenteries sur l'environnement – Cas de la cimenterie de Ain-Touta», Mémoire de DEA en Aménagement, Développement et Environnement, Université d'Orléans, le 18 Septembre 2002.
- [3] Rapport d'essais préliminaires, «Etude de ciments aux ajouts», Entreprise Régionale des Cimenterie de l'Est ERCE, Cimenterie de Ain-Touta, 2005. [15] NF P 15-010, Octobre 1997.
- [4] Bernard P., Influence des fortes concentrations en phosphate sur la réactivité et les propriétés mécaniques et physiques des pâtes de ciment.
- [5] Bessa A., Bigas JP., Gallias JL., (2003) Influence des additions minérales naturelles et industrielles sur les principaux paramètres de formulation de mortiers, XXI èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil.
- [6] Richet C., Galle C., Bescop P., Peycelon, Bejaoui S., Toventa I., Pointeau I., L'hostis V., Lovera P., (2004) «Synthèse des connaissances sur le comportement à long terme des bétons application au colis cimentes», Rapport CEA-R-6050, commissariat à l'énergie atomique.
- [7] Barron J., Sauterey R. Le béton hydraulique .Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées Paris.p559.
- [8] Paradakis M., Venuant M., (1970) Industrie de la chaux du ciment et du plâtre. Dunod-Paris.
- [9] Freddy houst Y., (1992) Diffusion de gaz, carbonique et retrait de la pâte de ciment durcit. Thèse N°1108.
- [10] Pliskin L., (1993) La fabrication du ciment, éditions Eyrolles
- [11] Defosse C., Chimie du ciment, valorisation des déchets en cimenterie, Université libre de Bruvelles, site "CHIM 315 Partie 32004.
- [12] Chromy S., (1974) High-temperature microphotometry and microdilometry, Silikaty 18 pp-105–123.

- [13] Maki I., Chromy S., (1978) Characterization of the alite phase in Portland clinker by microscopy, *Il Cemento* 75 pp-247–252.
- [14] Chatterjee A.K., (1996) Future technological options: Part II. *Cement and Concrete Research*, 26[8], 1227–1237.
- [15] Dowty E., (1998) *Atoms for windows and Macintosh, Shape software*, Kingsport, Vol. 4, 1, pp.
- [16] Newkirk T.F. and Twaite R.D., (1958) *Journal Res. Nat. Bur. Stand* 61 233
- [17] NF P 15-301. Liants hydrauliques. Ciments courants: Composition, spécifications et critères de conformité. Juin 1994.
- [18] NA 442., (2006) *Ciment composition, spécifications et critères et conformité des ciments courants*. Institut Algérien de normalisation, 3ème édition. F.ROUESSAC & A.ROUESSAC, « analyse chimique : méthodes et techniques instrumentales modernes », 4ème Edition, Dunod, Paris, 1998
- [19] Taylor H.F.W., (1998) *Cement chemistry*, ed. n. edition. Thomas telford publishing.
- [20] Tzschichholz G.V., Herrmann F., Zanni H., (1996) Reaction-diffusion model for the hydration and setting of cement. *The american physical society-Physical review E*. 53(3): p. 2629-2637.
- [21] Jolicoeur C., Simard M.A., (1998) Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physicochemical concepts. *Cement and concrete composites*. 20: p. 87-101
- [22] Rixom R., Mailvaganam N., (1999) *Chemical admixtures for concrete*. 3rd ed. E et FN Spon. 322.
- [23] Goto T., (2006) *Influence des paramètres moléculaires du latex sur l'hydratation, la rhéologie et les propriétés mécaniques des composites ciment/latex (Thèse de doctorat)*.
- [24] Vernet C., Cadoret G., (1992) *Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des BHP pendant les premiers jours dans Les bétons à hautes performances Vol. chap. 6.: Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*.

- [25] Barret P., Menetrier D., Bertrandie D., (1983) Mechanism of C3S dissolution and problem of the congruency in the very initial period and later on”, Cement and Concrete Research, ,13, 725-738.
- [26] Barret P., Bertrandie D., (1986) Fundamental hydration kinetic features of the major cement constituents:  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$  and  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ”, Journal de Chimie Physique, p.83, 765- 775.
- [27] Greenberg S.A., (1958) The nature of silicate species in sodium silicates solutions“, Journal o
- [28] Zhang X et al., (2000) Nanostructure of Calcium Silicate Hydrate Gels in Cement Paste. J. Am. Ceram. Soc. 83: p. 2600-2604.f American Chemical Society, 80, 6508-6511.
- [29] Pascal S., (2002) Etude du comportement thermomécanique de composites mortierpolymère. Ecole centrale Paris.
- [30] Merlin F., et al., (2005) Adsorption and heterocoagulation of nonionic surfactant and latex particles on cement hydrates. J. Colloid Interface Sci.,p. 281.
- [31] Nachbaur L., et al., (2001) Dynamic mode rheology of cement and tricalcium silicate pastes from mixing to setting.cement and concrete research, p. 183-192.
- [32] Lecoq X., (1993) Etude de l'hydratation à concentration contrôlée du silicate tricalcique  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$  et des caractéristiques de ses produits de réaction. Université de Bourgogne: Dijon.
- [33] Viallis-Terrisse H., (2000) Interaction des Silicates de Calcium Hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Université de Bourgogne: Dijon.
- [34] Henderson E., J.E. Bailey., (1988) Sheet-like structure of calcium silicate hydrates. J. Mater. Sci,23. p. 501-508.
- [35] Richardson I., Groves W., (1992) cement and concrete research. 22: p. 1001-1010.
- [36] Colombet P., et al., Nuclear magnetic resonance spectroscopy of cement-based materials, part II. Nord.concr. res., ed. Springer-Verlag. Vol. 154., Berlin. 1998. pp. 189-198.
- [37] Viehland D., (1996),Mesostructure of calcium silicate hydrate(CSH) gels in Portland cement paste: Shortrange ordering, Nanocrystallinity, and Local Compositional Order”. J. Am. Ceram. Soc. 79: p. 1731-1744.

- [38] Zurich., (1978) Liant minéraux. Société Suisse des Ingénieurs et Architect. Norme SIA 215.
- [39] Elisabeth Evangelisti, Étude sur les matériaux de restauration en peintures murales. Les produits d'injection pour les supports, Strasbourg, CRITT (Centre d'innovation et de transfert de technologie), 1999, page 26.
- [40].Bessenouci Mohammed Zakaria, <<impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolanique dans l'habitat>>, mémoire de magister, université Abou Bakr Belkaid Tlemcen,année 2009/2010.
- [41].Belhocine Aida, Nagoudi Nadjat, << Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux >>, mémoire master en génie civil, université Kasdi Merbah-Ouargla,année 2013/2014.
- [42].Benaissa Rahel asmaa,Bouhania Imen,<< durabilité d'un mortier léger (Granulat pouzzolanique)>>,mémoire de master ,Centre université d'Ain témouchent Belhadj Bouchaib,année 2015.
- [43] Abdélaziz S., (2006) Valorisation des sédiments de dragage. Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug, Université de Reims Champagne-Ardenne.
- [44]. Neville, A.M. Propriétés du béton. Paris: Editions Eyrolles (traduction du CRIB), 2000,806 p
- [45] Cabrera J., Rojas M.F., (2000) Mechanism of hydration of metakaolin-lime-water system CCR (31- 4) pp177-182.
- [46] Rojas M.F., Cabrera J., (2001) Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and water-blended cement systems at 20°C » CCR (31-4) pp519-527.
- [47] Sabir B.B., Wild S., Bai J., (2001) Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review » CCC (23-6), pp441-454.
- [48]. Vernet, C.et Cadoret, G. (1991), Compte- rendus du Colloque «Voies Nouvelles du Béton», Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des bétons à hautes performances pendant les premiers jours, Cachan, France,pp.p. 17.

- [49]. Bouali khaled, << Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires >>, mémoire de magister, université M'hamed Bougera Boumerdes, année 2013/2014
- [50]. Georges Dreux, Jean Festa, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Paris, Edition Eyrolles, 2009
- [51]. ROGER L, ALBERT. f et HENRI T « traite de béton » BOULEVARD SAINT GERMAIN 75005 paris 1982.
- [52]. Nabil Bouzoubaâ et Simon Foo, << utilisation de cendres volantes et de laitier dans le béton guide des règles de l'art >>, laboratoire de la technologie des matériaux, Canada, 2005.
- [53]. A. K. Ramezani pour, « Engineering properties and morphology of pouzzolanic cement concrete », PhD Thesis, University of Leeds, 310 pages-April 1987.
- [54]. Mokhtaria Benkaddour<sup>1</sup>, Fatiha Kazi Aoual<sup>1</sup>, Abdelaziz Semcha<sup>1</sup>, << durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle >> (1) laboratoire << LABMAT >> Département Génie Civil, Ecole Normale supérieure d'Enseignement Technique (ENST Oran). B.P. 1523 Oran El M'Nouer 31000, Algérie.
- [55]. P.C. AITCIN. « les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de fontaine et leur utilisation dans les mortiers en béton ». Revue des matériaux de construction. Mai 1968.
- [56] GAGNÉ, R. GCI 714 - Durabilité et réparations du béton. Université de Sherbrooke, Centre de Longueuil. Québec. 2000. 338 p.
- [57]. DJOBO YANKWA Jean Noël, << effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments géopolymériques à bas
- [58] Rowell, R. M. 1988. Can the Cell Wall be Stabilized, Dans Suchsland, O. (ed.). Wood Science Seminar. Stabilization of the Cell Wall. East Lansing, Mich.: Michigan State University. p. 53-63. e scories volcanique >>.
- [59] Bledzki, A. K. et Gassan, J. 1999. Composites Reinforced with Cellulose Based Fibers. Prog. Polym. Sci. 24: 221-274.
- [60]. A Kerbouche, M. Mouli, L. Laoufi, Y. Senhadji, S. Benosmane ( Faculté des sciences, Laboratoire de Chimie des Polymères, Université d'Oran, Es-sénia, Oran) ( Influence des

ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers).

[61]. A.Komar, « Matériaux et éléments de construction » 3ème édition MIR 1976.

[62]. CANMET, 1987, centre canadien de la technologie, des matériaux et de l'énergie  
«Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton.