

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département ; Génie Civil et Hydraulique  
Ref :.....

جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الهندسة المدنية و الري  
المرجع : .....



**Thèse**  
en vue de l'obtention du diplôme de  
**DOCTORAT EN SCIENCES**

Spécialité : **GÉNIE CIVIL**

Option : **MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION**

**DURABILITE DES BETONS A BASE DES  
GRANULATS DE LA REGION DE BISKRA**

Présentée par :

**LOUMACHI LAZHAR**

Soutenue publiquement le :  
**09/11/2023**

**Devant le jury composé de :**

Pr. TAALLAH Bachir  
Pr. GUETTALA Salim  
Dr. MEZGHICHE Bouzidi  
Dr. NECIRA Brahim

Prof  
Prof  
MCA  
MCA

Président  
Examineur  
Rapporteur  
Examineur

Université de Biskra  
Université de Djelfa  
Université de Biskra  
Université de Djelfa

# Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents, mon frère Majdi et mes soeurs Lynda et Loubna, dont le soutien et les encouragements ont permis à ce travail de voir le jour ; a mes filles Larine et Hanine, et aussi mon fils Anes.

À tous mes amis.

# Remerciements

Je tiens à remercier Pr TAALLAH Bachir, Professeur à l'université Mohamed Khider-BISKRA de m'avoir fait l'honneur de présider le Jury de soutenance. Je remercie également les membres du jury, Pr GUETTALA Salim et Dr NECIRA Brahim, Professeur et Maîtres de conférences à l'université Ziane Achour – Djelfa. Je voudrais leur exprimer tous, ma gratitude pour avoir accepté de juger ce travail.

Cette thèse est certes l'aboutissement d'un travail personnel mais c'est surtout le résultat du travail d'un groupe. Je tiens à remercier ici tous ceux qui ont contribué à sa réalisation.

Tout d'abord mon directeur de thèse Dr MEZGHICHE Bouzidi, et Dr BELKADI Ahmed Abderraouf, qui par leur expérience, leur compétences, leur rigueur scientifique, leurs critiques constructives, leurs conseils avisés, leurs remarques m'ont aidé à avoir un regard extérieur et du recul sur mon travail et m'ont transmis leur passion pour la recherche. Sans leur aide, ce document n'aurait pas vu le jour.

Je remercie les équipes des laboratoires L2MGC (Cergy) et LRGC (Biskra) qui m'ont aidé à réaliser mon travail de recherche.

En fin, je remercie les membres de l'administration de l'université Mohamed Khider-Biskra qui m'ont aidé pour toutes les démarches administratives.

# Table des matières

## Partie I : Revue bibliographique

### CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA MICROSTRUCTURE DU BETON ET LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION.....20

|   |    |
|---|----|
| 1.1 Introduction .....  | 21 |
| I.2 La microstructure du béton.....   | 22 |
| I.2.1 La pâte de ciment .....   | 23 |
| I.2.2 Le silicate de calcium hydrate ou C-S-H .....                           | 24 |
| I.2.3 Les pores de la pâte de ciment.....                                     | 25 |
| I.2.4 L'eau dans la pâte de ciment:.....                                      | 25 |
| I.2.5 L'eau dans les C-S-H: .....   | 26 |
| I.2.6 L'eau dans les zones d'adsorption empêchée.....                         | 26 |
| I.2.7 L'interface pâte de ciment/granulat.....                                | 27 |
| I.3 Les ajouts minéraux : .....   | 29 |
| I.3.1 Généralités : .....   | 29 |
| I.3.2 Les principaux ajouts : .....   | 29 |
| I.3.2.1 Laitier de haut fourneau : .....                                      | 30 |
| I.3.2.2 Pouzzolanes naturelles (Z) : .....                                    | 30 |
| I.3.2.3 Cendres volantes : .....  | 31 |
| I.3.2.4 Fumées de silice.....   | 31 |
| I.4 Les granulats : .....   | 32 |
| I.4.1 Introduction aux granulats employés dans la composition du béton: ..... | 32 |
| I.4.2 Variétés de granulats .....   | 33 |
| I.4.3 Les Caractéristiques de fabrications:.....                              | 34 |
| I.4.3.1 Dimensions des agrégats: .....  | 35 |
| I.5 Impact de la méthode de placement - Indice de compaction:.....            | 36 |
| I.5.1 Dimension des particules .....  | 37 |
| I.5.2 Zone d'interface de transition (ITZ) .....                              | 38 |
| I.5.3 Effet des propriétés des granulats : .....                              | 38 |

|  |    |
|--|----|
| I.5.4 Influence du niveau de compactage et de la durée de malaxage ..... | 39 |
| I.5.5 Impact de l'ouverture des fissures .....                           | 39 |
| I.5.6 Le Coefficient d'aplatissement "A": .....                          | 40 |
| I.5.7 Angularité: .....  | 40 |
| I.5.8 Caractéristiques intrinseques: .....                               | 40 |
| I.5.9 Caractéristique Physiques : .....                                  | 41 |
| I.5.10 Les masses volumiques: .....                                      | 41 |
| I.5.11 La porosité (P):.....   | 41 |
| I.5.12 Caractéristique chimiques:.....                                   | 42 |
| I.5.13 Caractéristique mécaniques : .....                                | 42 |
| I.6 Le sable: .....  | 42 |
| I.6.1 Equivalent de sable .....  | 43 |
| I.7 Conclusion .....   | 43 |

## **CHAPITRE II**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ATTAQUES SULFATIQUES ET LEUR INFLUENCE DES AGREGATS SUR LES PROPRIETES DE BETON.....</b> | <b>45</b> |
| II.1. Introduction .....  | 45        |
| II.1.1 Les transformations chimiques du béton.....  | 45        |
| II.1.2 Réaction chimique provoquée par les sulfates.....                                    | 45        |
| II.1.3 L'ettringite .....   | 46        |
| II.1.4 Le gypse .....   | 46        |
| II.1.5 Les processus de dégradation : .....   | 46        |
| II.1.6 Impact de Paramètres Environnementaux sur le Béton: .....                            | 51        |
| II.1.7 Le Cation Lié aux Ions Sulfates.....   | 51        |
| II.1.8 Le pH de la solution environnante .....  | 51        |
| II.1.9 La température .....   | 52        |
| II.1.10 Fluctuations du niveau d'humidité .....   | 53        |
| II.1.11 Impact des agrégats sur la facilité de manipulation .....                           | 53        |
| II.1.12 Influence de l'état de surface des granulats :.....                                 | 54        |
| II.1.13 Impact de la taille des particules de sable .....                                   | 56        |

|  |    |
|--|----|
| II.1.14 Influence des granulats sur le rapport E/C : ..... | 57 |
| II.1.15 Influence des adjuvants sur la durabilité: .....   | 57 |
| II.1.16 Influence de la température : .....                | 58 |
| II.1.17 Influence des additions minérales: .....           | 59 |
| II.1.17.1 Fumée de silice: .....                           | 59 |
| II.1.17.2 Cendres volantes et laitier:.....                | 60 |
| II.1.17.3 Fillers calcaires: .....                         | 61 |
| II.1.18 Conclusion .....                                   | 62 |

## **Partie II: Methodes experimentales et resultats**

### **CHAPITRE III :**

#### **PROPRIETES DES MATERIAUX EMPLOYES ET LES PROCEDURES**

|   |    |
|---|----|
| <b>D'EVALUATION</b> .....   | 64 |
| III.1. Introduction.....  | 65 |
| III.2 Matériaux utilisés : .....  | 65 |
| III.3 Caractéristiques des matériaux : .....                            | 65 |
| III.3.1 Les granulats.....  | 65 |
| III.4 Proportions de mélange .....                                      | 67 |
| III.5 Masses volumiques .....   | 69 |
| III.6 Absorption d'eau .....  | 69 |
| III.7 Résistance à l'abrasion ( Los – Angeles).....                     | 69 |
| III.8 Equivalent de sable.....  | 70 |
| III.9 Compacité et porosité des granulats.....                          | 70 |
| III.10 Analyse chimique des granulats utilisés .....                    | 71 |
| III.11 Ciment :.....  | 74 |
| III.11.1 Caractéristiques du ciment utilisé : .....                     | 74 |
| III.11.2 Caractéristiques de Ciment : .....                             | 74 |
| III.11.3 Masse volumique apparente:.....                                | 75 |
| III.12 Les ajouts minéraux actifs : pouzzolane, laitier, calcaire. .... | 76 |
| III.12.1 Pouzzolane :.....  | 76 |
| III.12.2 Laitier :.....   | 76 |

|   |    |
|---|----|
| III.12.3 Calcaire : .....   | 77 |
| III.13 L'eau de gâchage : .....   | 78 |
| III.14 Etude de la durabilité des bétons à base des matériaux locaux..... | 78 |
| III.14.1 Acide sulfurique H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....            | 79 |
| III.14.2 Acide chlorhydrique HCL .....                                    | 79 |
| III.15 Matériels et essais: .....   | 81 |
| III.15.1 Béton à l'état frais : .....                                     | 81 |
| III.15.2 Malaxage:.....   | 82 |
| III.15.3 Affaissement au cône d'Abrams : SLUMP TEST(B. EN, 2009) .....    | 82 |
| III.15.4 Masse volumique à l'état frais:.....                             | 83 |
| III.16 Béton à l'état durci : .....                                       | 83 |
| III.16.1 Durcissement du béton : .....                                    | 83 |
| III.16.2 Mode de conservation de béton : .....                            | 84 |
| III.16.3 Masse volumique à l'état durci: .....                            | 84 |
| III.17 Essai sur la durabilité: .....                                     | 84 |
| III.17.1 Procédure de l'essai: .....                                      | 84 |
| III.18 Conclusion .....   | 86 |

## **CHAPITRE IV**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RESULTATS ET DESCUSSIONS.....</b>  | <b>89</b> |
| IV.1 Introduction .....   | 88        |
| IV 2 Effet du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton a 28 jours: ..... | 89        |
| IV.3 Influence de la granularité sur la qualité du béton:.....                          | 91        |
| IV.4 Masse volumique apparente à l'état durci .....                                     | 93        |
| IV.4.1 Effet des fillers calcaires .....  | 93        |
| IV.4.2 Effet de laitier à haut fourneau .....   | 94        |
| IV.4.3 Effet de la pouzzolane naturel.....  | 96        |
| IV.5 Résistance à la compression .....  | 97        |
| IV.5.1 Effet de filler calcaire .....   | 97        |
| IV.5.2 Effet de Laitier.....  | 98        |
| IV.5.3 Effet de pouzzolane .....  | 99        |

|   |     |
|---|-----|
| IV.6 Modélisation de la résistance à la compression .....         | 100 |
| IV.6.1 Analyse de la variance du modèle .....                     | 100 |
| IV.6.2 Modèle mathématique.....                                   | 103 |
| IV.6.3 Discussion .....   | 104 |
| IV.6.4 Analyse microstructurale .....                             | 106 |
| IV.7 Durabilité des bétons vis-à-vis des attaques chimiques ..... | 108 |
| IV.7.1 Attaque chimique H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....      | 108 |
| IV.7.1.1 Résistance à la compression et perte en poids .....      | 108 |
| IV.7.1.2 Observation visuelle .....                               | 109 |
| IV.7.2 Attaque chimique HCL .....                                 | 110 |
| IV.7.2.1 Résistance à la compression et perte en poids .....      | 110 |
| IV.7.2.2 Observation visuelle .....                               | 111 |
| IV.8 Conclusion .....   | 112 |

## Liste des tableaux

|   |     |
|---|-----|
| Tableau I-1: ensemble de tamis utilisés pour calculer le module de finesse du sable. ....   | 35  |
| Tableau I-2 : influence qualitative des caractéristiques de l'état de surface sur la facilité de mise en place du béton et l'adhérence entre la pâte et les granulats[(r. Sauterey, bonnot, & baron, 1975)]...... | 56  |
| Tableau I-1: proportions des mélanges.....  | 68  |
| Tableau I-2 : densités des agrégats examinés .....  | 69  |
| Tableau I-3: les résultats d'absorption d'eau pour les granulats étudiés. ....  | 69  |
| Tableau I-4: résistance à l'abrasion ( los – angeles) .....   | 69  |
| Tableau I-5 : equivalent de sable.....  | 70  |
| Tableau I-6: densité et poreux des agrégats.....  | 70  |
| Tableau I-7: propriétés : et physiques des granulats. ....  | 71  |
| Tableau I-8: caractéristiques chimiques de ciment .....   | 74  |
| Tableau I-9 : masse volumique apparente du ciment crs.....  | 75  |
| Tableau I-10: l'analyse chimique et minéralogique de pouzzolane fiche technique (cimenterie).<br>.....  | 76  |
| Tableau I-11: l'analyse chimique et minéralogique de laitier fiche technique(cimenterie) .....  | 76  |
| Tableau I-12: l'analyse chimique et minéralogique de calcaire fiche technique (cimenterie). ..  | 77  |
| Tableau I-13: analyse chimique de l'eau utilisée pour le gâchage.....   | 78  |
| Tableau I-14: dépense en matériaux de classe 42.5 de béton à granularité continue pour 1m <sup>3</sup> . 80   |     |
| Tableau I-15: dépense en matériaux de classe 42.5 de béton à granularité continue pour<br>1m <sup>3</sup> (après majoration 20%)......  | 80  |
| Tableau I-16: dépense en matériaux de classe 42.5 de béton à granularité continue pour 1<br>éprouvette (10x10x10) cm <sup>3</sup> . ....  | 81  |
| Tableau II-1: résumé de l'ajustement.....   | 102 |
| Tableau II-2: analyse de la variance (anova) pour les modèles dérivés. ....   | 102 |
| Tableau II-3: test d'effet.....   | 103 |

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure 1-1: schématisation de la microstructure du gel de c-s-h [(feldman)].....   | 24 |
| Figure 1-2: la condition de l'eau au sein des c-s-h.((j. b. r. sauterey, paris : p.e.n.p.c.h, 1982),)  | 26 |
| Figure 1-3: l'eau dans les zones d'adsorption entravée, ainsi que de la transition vers les pores capillaires (pd : pression de disjonction, $\pi_a$ : tension superficielle capillaire, et $\pi_d'$ : tension superficielle de disjonction).[(najjar, ( 1972 ) )] ..... | 27 |
| Figure 1-4: modélisation de la morphologie de la zone de transition d'une auréole dans un béton conventionnel[diamond, 1986] .....   | 28 |
| Figure 1-5: la structure microscopique de la région de jonction entre la pâte et le granulat, selon les observations de stark et wicht, comme indiqué par[(de sá, 2007)].....  | 29 |
| Figure 1-6: hydratation d'un ciment sans et avec ajout cimentaire [(yankwa & noel, 2013)]. ..  | 29 |
| Figure 1-7: laitier de haut fourneau vu au microscope [(delort, 2001)]. .....  | 30 |
| Figure 1-8: examen microscopique d'une pouzzolane volcanique [(delort, 2001)]. .....   | 31 |
| Figure 1-9: observation microscopique de la cendre volante [(delort, 2001)].....   | 31 |
| Figure 1-10: examen microscopique de la fumée de silice(delort, 2001).....   | 32 |
| Figure 1-11: schéma d'une installation d'élaboration de granulats [(maillot, 2001)].....   | 34 |
| Figure 1-12: illustrations de courbes granulométriques pour les granulats utilisés dans le béton [(maillot, 2001)]. .....  | 34 |
| Figure 1-13: forme d'un granulat [(gabrysiak, 2000)].....  | 35 |
| Figure 1-14: indices de serrages correspondants aux grains roulés et concassés [(de larrard, 2000)].....   | 36 |
| Figure 1-15: expérimentations sur la densité des classes fondamentales en relation avec la dimension des particules(de larrard, 2000).....   | 36 |
| Figure 1-16: indices de compaction pour les diverses méthodes de placement des grains[(de larrard, ledee, sedran, brochu, & ducassou, 2003)] .....   | 36 |
| Figure 1-17: le volume de la pâte soumis à un processus de cure interne dans un béton où 30 % des granulats sont remplacés par des agrégats de tailles variées, incluant des petits et des gros calibres(calais, 2013) .....   | 37 |
| Figure 1-18: modèle de volume de diffusion suggéré(c. r. aoun, 2019).....  | 38 |
| Figure 1-19: distribution des dimensions des constituants d'une matrice cimentaire. [(mehta, 1986)].....   | 39 |
| Figure I1-2: illustration schématique de l'avancée de la réaction de sulfate externe dans une éprouvette de mortier plongée dans une solution de sulfate de sodium (irassar et al., 2003) ....   | 48 |
| Figure I1.7: une forme anguleuse nécessite une quantité d'eau plus élevée dans le mélange[(chanvillard & basuyaux, 1996)]. .....   | 55 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure II-12 : coefficient de perméabilité avec fumée de silice et un ajout de réducteur d'eau.(venuat, 1997).....                                  | 60  |
| Figure III -1: différentes formes de granulats grossiers utilisés.....  | 66  |
| Figure III -2: fenêtres principales de l'image j. ....  | 67  |
| Figure III -3: courbe granulométrique des différents granulats utilisés .....   | 68  |
| Figure IV -1: l'évolution de la résistance à la compression du béton ferme en fonction du rapport e/c des différents graviers. ....                 | 90  |
| Figure IV -2: les changements dans la résistance à la compression du béton plastique en relation avec le rapport e/c des différents granulats. .... | 90  |
| Figure IV -3: l'évolution de la résistance à la compression du béton ferme a 28 jours en fonction du rapport g/s des différents graviers.....       | 92  |
| Figure IV -4: l'évolution de la résistance à la compression du béton plastique a 28 jours en fonction du rapport g/s des différent graviers. ....   | 92  |
| Figure IV -5: variation de la masse volumique à l'état durci des différents mélanges formulés. ....   | 93  |
| Figure IV -6: présente la variation de la masse volumique à l'état durci des différents mélanges formulés. ....                                     | 94  |
| Figure IV -7 : montre la masse volumique à l'état durci des mélanges formulés. ....   | 96  |
| Figure IV -8: variation de résistance à la compression des différents mélanges formulés.....  | 97  |
| Figure IV -9: variation de résistance à la compression des différents mélanges formulés.....  | 98  |
| Figure IV -10: variation de résistance à la compression des différents mélanges formulés.....   | 99  |
| Figure IV -11: corrélation entre les réponses observées et prédites rc 28. ....   | 102 |
| Figure IV -12: courbes d'iso-réponse et surfaces d'iso-réponse des résistances à la compression à 28 jours.....                                     | 104 |
| Figure IV -13: courbe d'interaction des résistances à la compression à 28 jours.....  | 105 |
| Figure IV -14: des exemples d'images meb représentatives prises pour tous les types de composites analysés après 90 jours de durcissement .....     | 106 |
| Figure IV -15: montrent respectivement la perte de résistance à la compression et la perte en masse .....   | 108 |
| Figure IV -16: résistance à la compression et la perte en poids après l'immersion dans le hcl. ....   | 110 |

## LISTE DES ABREVIATIONS

MEB : Microscope électronique à balayage  
CEM I : (CRS) Ciment Portland.  
ASTM : American Society for Testing and Materials  
EN : Norme Européenne définitive  
NF : Norme Française  
GN : Gravier naturel  
SN : Sable naturel  
FS : Fumée de silice  
BTP : Bâtiment et travaux publics  
ZIT : Zone interfaciale  
BT : Béton témoin  
L : Laitier  
PZ : Pouzzolane  
C : Filler calcaire  
Rc : Résistance à la compression (MPa)  
M : Masse du récipient après rasage de la surface (g)  
M<sub>0</sub> : Masse du récipient à vide (g)  
V : Volume du récipient (cm<sup>3</sup>)  
 $\rho$  : Masse volumique réelle de l'échantillon (g/cm<sup>3</sup>)  
D : Diamètre du cylindre (cm)  
H : Hauteur de l'échantillon (cm)  
T : Température mesurée (°C)

# Résumé

Le nombre croissant de carrières produisant des granulats a conduit à une diversification des gisements, entraînant ainsi une variété de types de granulats. Dans ce contexte, la composition granulaire joue un rôle crucial dans les performances à court et à long terme des bétons.

Cette thèse doctorale se penche sur l'influence de divers gros granulats provenant de différentes carrières (Ain-Touta, El-hajeb et Ziani) et d'ajouts minéraux variés tels que le calcaire, la pouzzolane et le laitier, sur les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons ordinaires. L'objectif principal est d'analyser l'interaction entre la morphologie des gros granulats et le type d'ajout fin sur les propriétés mécaniques et de durabilité des bétons. Les taux d'ajouts minéraux varient de 10%, 15% à 20% par rapport à la masse de ciment. Par ailleurs, des essais chimiques de durabilité, impliquant l'immersion dans des solutions à 5 % d' $H_2SO_4$  et d' $HCl$ , ont été menés.

Les résultats de cette étude mettent en évidence l'influence des ajouts sur les propriétés des bétons, en relation avec la forme des granulats, en mettant particulièrement l'accent sur la zone interfaciale entre la pâte et les granulats. Parmi les différents ajouts étudiés, la pouzzolane se révèle être le plus efficace en termes d'amélioration des performances des bétons, comparativement au laitier et au filler calcaire. En particulier, l'incorporation de 20% de pouzzolane se traduit par une amélioration significative de la transition entre l'agrégat et la matrice, conduisant à une résistance à la compression maximale à 60 jours de 51 MPa. Ces conclusions fournissent des informations essentielles sur les interactions complexes entre les granulats et les ajouts, qui se reflètent dans les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons.

## Mots clés :

Béton, graviers, influence des granulats, résistance à la compression, durabilité, agressions chimiques,  $H_2SO_4$ ,  $HCl$ , degré de circularité.

# Abstract

The increasing number of quarries producing aggregates has led to a diversification of deposits, thus resulting in a variety of types of aggregates. In this context, the granular composition plays a crucial role in the short and long term performance of concretes.

This doctoral thesis focuses on the influence of various large aggregates from different quarries (Ain-Touta, El-hajeb and Ziani) and various mineral additions such as limestone, pozzolana and slag, on the mechanical properties and durability of ordinary concretes. The main objective is to analyze the interaction between the morphology of large aggregates and the type of fine addition on the mechanical properties and durability of concretes. The mineral addition rates vary from 10%, 15% to 20% relative to the mass of cement. In addition, chemical durability tests, involving immersion in 5% solutions of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and HCL, were carried out.

The results of this study highlight the influence of additions on the properties of concrete, in relation to the shape of the aggregates, with particular emphasis on the interfacial zone between the paste and the aggregates. Among the various additions studied, pozzolan turns out to be the most effective in terms of improving the performance of concrete, compared to slag and limestone filler. In particular, the incorporation of 20% pozzolan results in a significant improvement in the transition between aggregate and matrix, leading to a maximum compressive strength at 60 days of 51 MPa. These findings provide essential information on the complex interactions between aggregates and additives, which are reflected in the mechanical properties and durability of concretes.

## **Key words:**

Concrete, gravel, influence of aggregates, compressive strength, durability, chemical attacks, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCL, degree of circularity.

# ملخص

العدد المتزايد من المحاجر المنتجة للركام أدى إلى تنوع الرواسب، مما أدى إلى تنوع الركام. في هذا السياق، يلعب التركيب الحبيبي دورًا حاسمًا في أداء الخرسانة على المدى القصير والطويل.

تركز أطروحة الدكتوراه هذه على تأثير مختلف الركام الكبير من المحاجر المختلفة (عين التوتة والحاجب وزباني) والإضافات المعدنية المختلفة مثل الحجر الجيري والبوزولان والخبث على الخواص الميكانيكية ومتانة الخرسانة العادية. الهدف الرئيسي هو تحليل التفاعل بين شكل الركام الكبير ونوع الإضافة الدقيقة على الخواص الميكانيكية ومتانة الخرسانة. تتراوح معدلات إضافة المعادن من 10%، 15% إلى 20% بالنسبة إلى كتلة الأسمنت. بالإضافة إلى ذلك، تم إجراء اختبارات المتانة الكيميائية، والتي تتضمن الغمر في محاليل 5% من H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> و HCL.

تسلط نتائج هذه الدراسة الضوء على تأثير الإضافات على خواص الخرسانة فيما يتعلق بشكل الركام، مع التركيز بشكل خاص على المنطقة البينية بين العجينة والركام. من بين الإضافات المختلفة التي تمت دراستها، تبين أن البوزولان هو الأكثر فعالية من حيث تحسين أداء الخرسانة، مقارنة بالخبث وحشو الحجر الجيري. على وجه الخصوص، يؤدي دمج البوزولان بنسبة 20% إلى تحسن كبير في الانتقال بين الركام والمصفوفة، مما يؤدي إلى قوة ضغط قصوى تبلغ 51 ميجاباسكال عند 60 يومًا. توفر هذه النتائج معلومات أساسية عن التفاعلات المعقدة بين الركام والمواد المضافة، والتي تنعكس في الخواص الميكانيكية ومتانة الخرسانة.

## كلمات مفتاحية:

الخرسانة، الحصى، تأثير الركام، قوة الضغط، المتانة، الهجمات الكيميائية، H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>، HCL، درجة الاستدارة.

## **Introduction générale**

Le béton à l'échelle microscopique est un composite triphasé. Il contient une matrice de mortier, des granulats et une zone de transition interfaciale (ZIT) entre les deux.

Sa morphologie, sa composition, sa densité et d'autres caractéristiques sont différentes de celles de la matrice. La forme de la ZIT est influencée par les propriétés des constituants de le béton (granulats grossiers, ciment, ajouts cimentaires et adjuvants) et le rapport e/c du composite. Ainsi, la ZIT est considérée comme la zone de béton la plus faible. De plus, il joue un rôle important dans la résistance mécanique du béton.

En outre, les granulats sont un ingrédient important du béton, qui peut être considéré comme le squelette du béton. Ils occupent 70 à 80 % du volume total du béton. Ce qui influence fortement sa mécanique et son physique comportement.

Les granulats et les additions jouent un rôle crucial dans les performances et la durabilité à long terme des bétons. Comprendre comment ces matériaux influencent ces aspects clés du comportement des bétons est essentiel pour développer des mélanges de béton plus performants et durables.

Assurer la sécurité et la durabilité des structures de génie civil repose sur un critère essentiel : la résistance mécanique. Les propriétés des granulats, tels que leur taille, leur forme et leur texture, ont été identifiées comme des facteurs importants qui affectent la résistance des bétons. La compacité et l'interverrouillage entre les grains de granulats peuvent influencer la résistance à la compression, à la flexion et à la traction des bétons. La durabilité des bétons est également d'une importance capitale, notamment dans des environnements agressifs. Les facteurs environnementaux tels que l'exposition aux agents chimiques, aux cycles de gel/dégel, à l'attaque des sels et à la corrosion peuvent provoquer la détérioration des bétons et réduire leur durée de vie utile. Les granulats et les additions peuvent jouer un rôle crucial dans la résistance des bétons à ces agressions, en modifiant leur porosité, leur perméabilité et leur résistance aux réactions chimiques indésirables.

### **Problématiques et objectifs :**

L'augmentation constante du nombre de carrières produisant des granulats a entraîné une diversification croissante des gisements, ce qui a conduit à une variété de types de granulats sur le marché de la construction. Dans ce contexte, la composition granulaire des bétons joue un rôle crucial dans leurs performances à court et à long terme, notamment en ce qui concerne leur résistance mécanique et leur durabilité.

Cette thèse doctorale se penche sur l'influence de divers gros granulats provenant de différentes carrières notamment (Ain-Touta, El-hajeb et Ziani) et d'ajouts minéraux variés tels que le calcaire, la pouzzolane et le laitier, sur les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons

ordinaires. L'objectif principal est d'analyser l'interaction complexe entre la morphologie des gros granulats et le type d'ajout fin sur les propriétés mécaniques et de durabilité des bétons. Les taux d'ajouts minéraux varient de 10%, 15% à 20% par rapport à la masse de ciment, ce qui permet d'explorer diverses formulations de béton.

En outre, cette recherche comprend des essais de durabilité chimique, impliquant l'immersion des échantillons de béton dans des solutions à 5 % d' $H_2SO_4$  et d' $HCl$ , afin d'évaluer leur résistance à des environnements agressifs. Ces investigations visent à fournir des informations essentielles pour améliorer la formulation des bétons, optimiser leur performance et assurer leur longévité dans des conditions diverses, tout en prenant en compte la variabilité des matériaux disponibles sur le marché de la construction.

### **Structure de la thèse :**

La thèse examine donc en détail l'effet des granulats sur les propriétés mécanique et physique des bétons, ainsi que sur leur durabilité.

Cette thèse est divisée en deux parties une analyse bibliographique du comportement des bétons est proposée, est d'une partie méthodes expérimentales et résultats.

La première partie se divise en deux chapitres :

**-Chapitre 01 :** le comportement caractéristique des matériaux cimentaires est appréhendé en abordant la microstructure du béton et les matériaux de construction. Du point de vue physico-chimique et mécanique, les différentes phases présentes dans tout béton, à savoir la pâte de ciment, les granulats et l'auréole de transition (zone localisée à l'interface entre ces deux composantes)

**- Chapitre 02 :** ce document traite des attaques sulfatiques sur le béton. Le choix du pluriel pour le terme "attaques" reflète la diversité des mécanismes et des manifestations de ces attaques, dépendant de leur origine et des conditions environnementales.

La deuxième partie est divisée en deux chapitres :

**-Chapitre 03 :** cette thèse, nous abordons la présentation des matériaux et des méthodes d'essai qui ont été employés au cours de cette étude. Il abordera les différentes compositions de béton étudiées, les granulats et les additions utilisés, ainsi que les procédures expérimentales et les équipements de test employés pour évaluer les performances des bétons.

**- Chapitre 04 :** dernier chapitre présentera les résultats obtenus à partir des essais réalisés sur les bétons contenant différents types de granulats et d'additions. Les données expérimentales seront analysées et discutées en détail pour évaluer l'effet de ces matériaux sur les propriétés mécanique et la durabilité des bétons.

Les conclusions de cette étude fourniront des informations précises sur les relations entre les différents granulats, les additions et les propriétés des bétons, en termes de résistance mécanique et de durabilité. Ces connaissances seront essentielles pour les concepteurs et les ingénieurs du génie civil, Cela permet de prendre des décisions éclairées lors de la conception et de la construction de structures en béton, en tenant compte des différentes contraintes auxquelles elles seront soumises.

**Partie I :**  
**Revue bibliographique**

# **CHAPITRE I :**

## **GENERALITES SUR LA MICROSTRUCTURE DU BETON ET LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION**

## **1.1 Introduction**

Le comportement caractéristique des matériaux cimentaires est appréhendé en abordant la microstructure du béton et les matériaux de construction. Du point de vue physico-chimique et mécanique, les différentes phases présentes dans tout béton, à savoir la pâte de ciment, les granulats et l'auréole de transition (zone localisée à l'interface entre ces deux composantes), seront décrites. Notre étude se concentrera sur ces phases ainsi que sur l'incorporation de la pouzzolane, du laitier et du calcaire, qui sont des ajouts minéraux couramment utilisés pour atteindre des performances mécaniques élevées.

Ce document traite des attaques sulfatiques sur le béton. Le choix du pluriel pour le terme "attaques" reflète la diversité des mécanismes et des manifestations de ces attaques, dépendant de leur origine et des conditions environnementales.

Les attaques sulfatiques d'origine externe désignent celles provoquées par la présence de sulfates dans l'environnement. Les sources de sulfates sont multiples, incluant les eaux et sols riches en gypse, les produits industriels, les engrais, les substances organiques et l'eau de mer.

Les conditions environnementales dans lesquelles se produisent ces attaques sulfatiques exercent une influence significative sur leur mécanisme et leur type de détérioration. Des facteurs déterminants incluent le cation associé aux sulfates, la température, le pH et la concentration des sulfates.

L'évaluation des attaques sulfatiques se révèle complexe, car il est ardu de définir un test représentatif, un indicateur fiable, ou un critère pertinent pour évaluer ou garantir la résistance d'un liant ou d'un béton aux sulfates. Cette complexité résulte des mécanismes variables selon les conditions environnementales.

L'objectif de cette recherche est d'identifier les problématiques liées à l'étude des attaques sulfatiques sur le béton. À cet effet, une revue bibliographique a été entreprise pour synthétiser les résultats expérimentaux et théoriques, permettant ainsi d'appréhender les mécanismes de dégradation observés dans les essais existants.

## **I.2 La microstructure du béton**

La complexité de la microstructure du béton contribue en partie à son comportement mécanique unique lorsqu'il est soumis à différentes sollicitations (thermiques, hydriques, mécaniques, chimiques, etc.).

Une compréhension approfondie des propriétés des éléments constitutifs ainsi que de la structure du béton à différentes échelles est essentielle pour appréhender les mécanismes du retrait et du fluage du béton.

Le béton est constitué de trois phases distinctes : la pâte de ciment, les granulats et l'interface entre la pâte et les granulats, incluant la porosité de chaque phase. Chacune de ces phases, y compris la pâte de ciment, les granulats et leur interface avec la porosité associée, contribue à la composition du béton.

La composition fondamentale du béton se compose essentiellement de deux éléments majeurs : la matrice cimentaire et les granulats.

La matrice cimentaire, qui occupe généralement de 25 à 40 % du volume total du béton, est constituée principalement de ciment, d'eau et, parfois, d'additifs. Elle joue un rôle crucial en conférant au béton ses caractéristiques de rigidité et de résistance, agissant comme un liant essentiel entre les granulats.

Les granulats, quant à eux, représentent généralement de 60 à 75 % du volume total du béton et se composent de sable, de gravillons ou de pierres. Ils servent à atténuer les variations de volume du béton et contribuent de manière significative à sa résistance mécanique. En règle générale, les granulats présentent des performances en compression supérieures à celles de la matrice cimentaire, à moins qu'il ne s'agisse de granulats spécifiques.

L'auréole de transition, faisant référence à l'interface entre la pâte de ciment et les granulats [(JL Granju, 2003 ; Maso & Lerau, 1980)], correspond à une zone du béton qui présente une résistance réduite lorsqu'elle est soumise à des contraintes mécaniques.

Les comportements à long terme du béton sont étroitement liés aux caractéristiques de ces phases. Bien que les composants de base soient généralement similaires, différentes compositions de béton permettent d'obtenir différentes performances mécaniques. Par exemple, les Bétons Ordinaires (BO) sont distingués.

La composition du béton peut varier en fonction de nombreux facteurs, tels que le rapport E/L, les proportions et la nature des constituants. Ces facteurs influencent la composition, la structure et la morphologie des différentes phases du béton. Ce dernier est composé de trois phases principales : un squelette solide, de l'eau et un réseau poreux. Ces phases interagissent entre elles et jouent un rôle essentiel dans les comportements à long terme du béton.. (Makani, 2011).

### I.2.1 La pâte de ciment

La complexité de la pâte de ciment durcie est remarquable, car elle est composée de différentes familles d'hydrates à une échelle réduite :

- Le silicate de calcium hydraté (C-S-H), qui représente entre 50 et 70% de la pâte de ciment, est un composant essentiel. Les différentes formes et combinaisons variées de C-S-H entraînent des réactions mécaniques distinctes lorsqu'elles sont sollicitées.
- La portlandite, également connue sous le nom d'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), adopte une structure en plaquettes hexagonales d'environ cinquante micromètres de longueur et quelques micromètres d'épaisseur. Bien qu'elle constitue généralement environ 20% de la pâte de ciment, elle a un effet négligeable sur la résistance mécanique et peut affecter négativement la durabilité du béton en raison de sa solubilité dans l'eau. Différentes méthodes, telles que l'ajout de fumée de silice, sont utilisées pour limiter sa présence. La réaction pouzzolanique de la fumée de silice permet de convertir la portlandite en silicate de calcium hydraté.
- Les aluminates de calcium hydraté prennent différentes formes. Lorsqu'ils se présentent sous la forme d'ettringite ( $3\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-3\text{CaSO}_4-32\text{H}_2\text{O}$ ), ces composés apparaissent sous la forme d'aiguilles creuses. Leur développement peut altérer la structure de la pâte de ciment en agissant comme de petits vérins microscopiques, générant ainsi des pressions internes pouvant causer des fissures préjudiciables à la durabilité du matériau. Lorsqu'ils adoptent la forme de  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  ( $4\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-13\text{H}_2\text{O}$ ), ces composés forment des plaquettes arrangées en une structure semblable à une "rose des sables", sans présenter de caractéristiques spécifiques.

La pâte de ciment durcie est le liant du béton et lui confère sa rhéologie viscoélastique. Elle est composée d'hydrates qui évoluent avec le temps, mais elle est également responsable des défauts du béton, tels que la porosité, la diminution de la résistance mécanique, la présence d'agents agressifs, le transport d'eau et le retrait.

Pour mieux comprendre le comportement du béton, il est essentiel d'étudier la composition des hydrates, la répartition de l'eau et la microstructure de la pâte de ciment. Cette approche permettra de mieux comprendre le comportement macroscopique du béton.

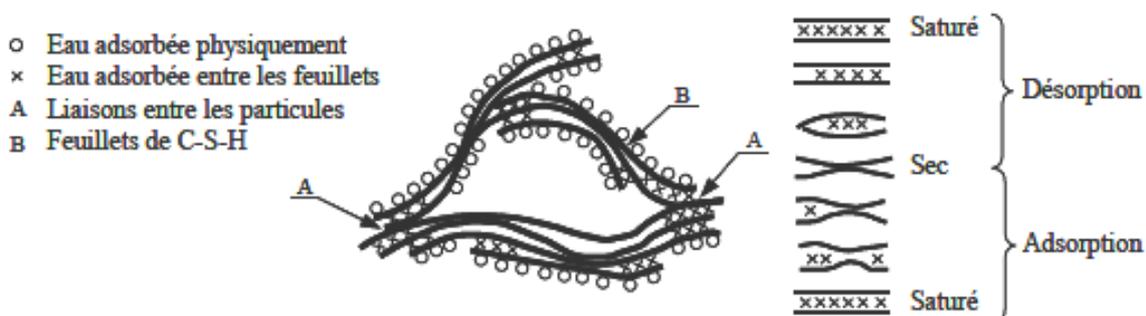
### 1.2.2 Le silicate de calcium hydrate ou C-S-H

Le composé non cristallin, de composition variable, connu sous le nom de silicate de calcium hydraté (C-S-H), est présenté sous la forme d'un gel et est le principal composant de la pâte de ciment durcie, avec la responsabilité de ses propriétés mécaniques.

La structure des C-S-H est constituée de lamelles enroulées, qui peuvent être déplacées les unes par rapport aux autres sous l'effet d'une charge, permettant ainsi à l'eau de pénétrer ou de quitter les espaces entre les lamelles et les feuillettes.

Une forte adhérence est présentée par les C-S-H, ce qui permet leur liaison entre elles et avec les autres composants du béton, jouant ainsi un rôle essentiel en tant qu'agent liant du ciment.

Les C-S-H sont des composés complexes dont la composition et la structure sont encore mal comprises. Cependant, leur rôle essentiel dans les propriétés mécaniques du béton peut être compris grâce aux connaissances actuelles.



**Figure I-1: Schématisation de la microstructure du gel de C-S-H [Feldman]**

Ce modèle fournit une perspective précieuse pour comprendre le comportement global des C-S-H lorsqu'ils sont soumis à des phénomènes différenciés. Les mouvements d'eau à l'intérieur des feuillettes (interfoliaires) sont les principaux mécanismes expliquant les variations dimensionnelles observées au fil du temps sous différentes sollicitations, comme l'ont démontré les travaux de Feldman et Sereda en 1968. Par exemple, lorsqu'une contrainte mécanique est appliquée, l'eau située entre les feuillettes peut être expulsée, entraînant des glissements des feuillettes de C-S-H et/ou des contractions de matière. De manière similaire, les déplacements d'eau à l'intérieur de la structure des C-S-H sont responsables des phénomènes de retrait et de gonflement. [(Hillemeier)].

### **1.2.3 Les pores de la pâte de ciment**

L'importance de la porosité de la pâte de ciment dans la détermination des propriétés globales du béton, telles que la résistance à la compression et les indicateurs de durabilité, est soulignée [(Ollivier, 1992)]. La porosité subit des variations considérables d'un béton à l'autre, tant en termes de quantité (moins de 10 % pour les bétons à très haute performance jusqu'à plus de 15 % pour les bétons ordinaires) que de qualité (dimensions et répartition des pores). La compréhension de la taille des pores revêt une importance cruciale. En effet, deux catégories distinctes de pores peuvent être identifiées :

- Les pores capillaires, qui présentent un diamètre supérieur à 0,02  $\mu\text{m}$ . Les variations de porosité capillaire semblent principalement résulter des différences structurelles observées entre les différentes pâtes de ciment, avec différents types ou rapports E/C [(Hansen, 1986)] [(Baroghel-Bouny, 1994)].
- Les micropores, également connus sous le nom de pores de gel, affichent un diamètre inférieur à 0,02  $\mu\text{m}$  et constituent une caractéristique inhérente à l'hydratation du ciment. Contrairement aux pores capillaires mentionnés précédemment, cette microporosité est peu influencée par le rapport E/C et est principalement attribuée aux C-S-H (Hansen, (1986)).

### **1.2.4 L'eau dans la pâte de ciment:**

L'eau, qui est l'un des constituants essentiels du béton, peut être classifiée en fonction de sa liaison avec la pâte de ciment hydratée. Nous allons maintenant décrire les différents types d'eau en nous appuyant sur des travaux antérieurs [Baron et Sauterey, 1982] [Guénot-Delahaie, 1997], en considérant la force de leur liaison :

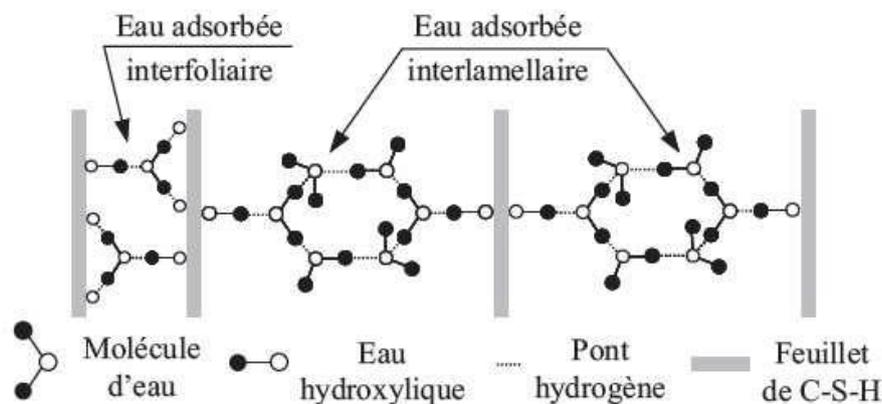
**L'eau libre et capillaire :** Elle ne subit pas les forces d'attraction des surfaces solides. Les pores capillaires de taille supérieure à 10  $\mu\text{m}$  (pores larges et fissures) sont principalement occupés par cette eau.

**L'eau adsorbée :** est liée aux particules de ciment par des forces d'attraction. Elle est confinée dans de petits pores et sa structure est modifiée par l'interaction avec la surface solide. L'eau chimiquement combinée réagit avec le ciment pour former des produits tels que le C-S-H ou l'ettringite. Les propriétés de l'eau dans les C-S-H et dans les zones d'adsorption restreinte affectent le comportement du béton à long terme. Voici les caractéristiques qui les définissent:

### **I.2.5 L'eau dans les C-S-H:**

La présence d'eau dans la structure des C-S-H a été détectée par Sierra grâce à différentes méthodes expérimentales, comme le mentionne Baron et Sauterey (J. B. R. Sauterey, Paris : P.E.N.P.C.H, 1982). Dans cette classification, l'eau est classée selon son niveau décroissant d'énergie de liaison avec le solide (voir Figure I.2) :

- L'eau hydroxyle : est un groupe d'atomes d'oxygène et d'hydrogène qui est lié aux atomes de silicium et de calcium à la surface des feuilletts.
- L'eau interfoliaire (ou interfeuillet) : Elle est reliée aux feuilletts grâce à des groupements hydroxyles et joue un rôle essentiel dans la cohésion intrinsèque de la lamelle.
- L'eau interlamellaire : Elle peut être attachée à la surface des lamelles par un groupe hydroxyle ou liée à d'autres molécules d'eau.



**Figure I- 2: La condition de l'eau au sein des C-S-H [J. B. R. Sauterey, Paris :  
P.E.N.P.C.H, 1982]**

### **I.2.6 L'eau dans les zones d'adsorption empêchée**

Dans ces zones (voir la Figure I.3), une pression de disjonction est exercée par l'eau fortement adsorbée, atteignant environ 130 MPa (Najjar, 1972). Cette pression s'oppose aux forces d'attraction entre les particules de C-S-H, qui contribuent à la stabilité de la structure du matériau. De plus, cette pression est également impliquée dans le retrait de dessiccation, et sa relaxation progressive au fil du temps semble être responsable de l'aspect de vieillissement à long terme du

fluage. Par conséquent, l'eau présente joue un rôle en tant qu'élément structurel intégré dans le matériau, permettant la transmission des contraintes au niveau local.

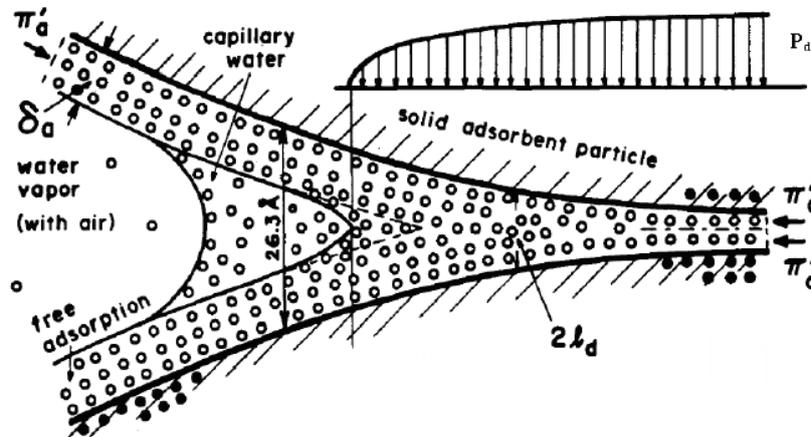
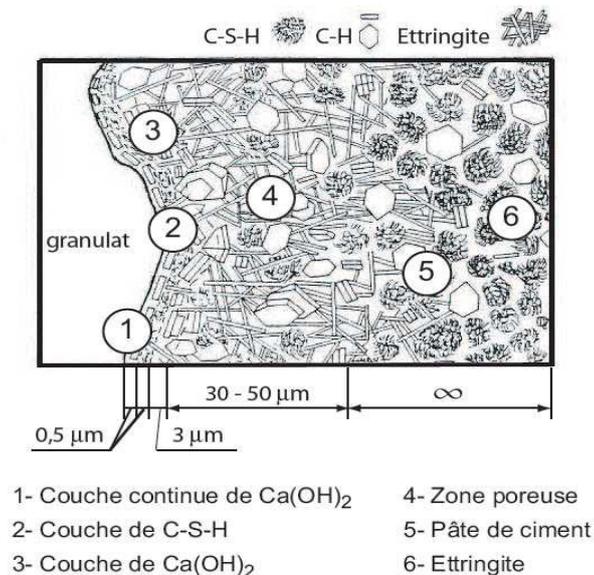


Figure I-3: l'eau dans les zones d'adsorption entravée, ainsi que de la transition vers les pores capillaires ( $P_d$  : pression de disjonction,  $\pi_a$  : tension superficielle capillaire, et  $\pi'_d$  : tension superficielle de disjonction).[Najjar ( 1972 ) ]

### I.2.7 L'interface pâte de ciment/granulat

Lors de l'hydratation, une zone distincte appelée "auréole de transition" ou interface pâte/granulats est créée par la formation d'une liaison entre la pâte de ciment et les granulats (Maso, 1980). L'épaisseur de cette zone de transition est augmentée proportionnellement à la taille des granulats, tout en demeurant constamment inférieure à 50  $\mu\text{m}$ . Une porosité d'environ 30% supérieure à celle de la pâte de ciment est observée dans cette zone, ainsi qu'une orientation préférentielle des hydrates. Plusieurs modèles ont été développés pour décrire cette zone de transition (Monteiro & Mehta, 1986), (Maso, 1996). Le modèle de Diamond (1986) pour un béton ordinaire est présenté dans la Figure I.4.



**Figure I-4: Modélisation de la morphologie de la zone de transition d'une auréole dans un béton conventionnel [Diamond, 1986]**

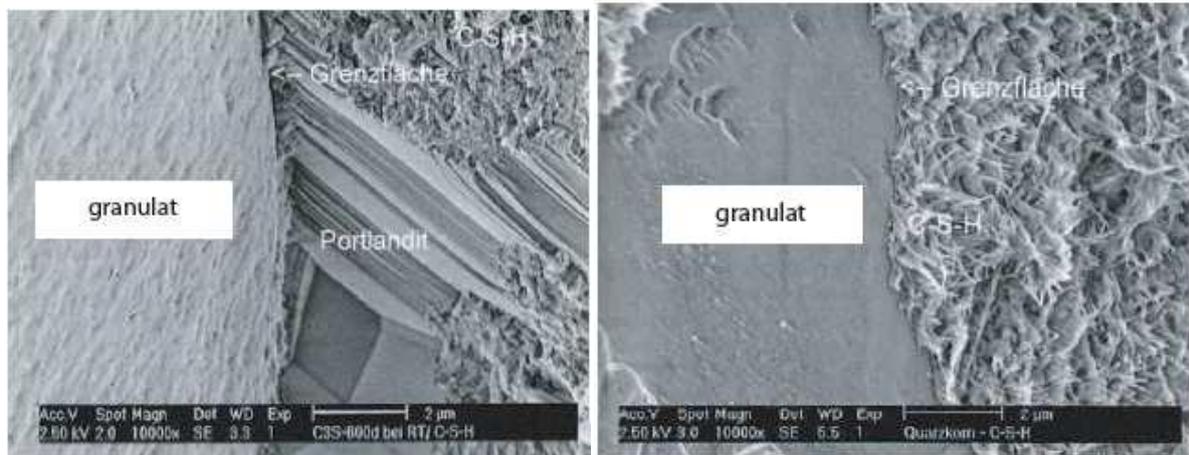
Lors de la prise du béton, une zone de pâte hydratée se forme autour des granulats, appelée "zone de transition". Cette zone se compose de trois couches :

- La couche la plus proche des granulats est dense et composée de cristaux de portlandite.
- La couche suivante est composée de C-S-H en feuillets.
- La couche la plus externe est poreuse et peu cohésive.

La qualité de la zone de transition dépend de la nature des granulats, du rapport eau/ciment et de la présence de fumée de silice.

- Les granulats calcaires réactifs forment des liaisons solides avec la pâte de ciment, ce qui renforce la résistance de la zone de transition.
- Les granulats de type quartz ne réagissent pas avec la pâte de ciment, ce qui rend la zone de transition plus poreuse et moins résistante.
- Un rapport eau/ciment élevé entraîne une zone de transition plus épaisse et plus poreuse.
- La fumée de silice réduit la porosité de la zone de transition, ce qui améliore ses propriétés mécaniques.

En conclusion, la zone de transition est une zone complexe qui a un impact important sur les propriétés mécaniques du béton. Comprendre et contrôler cette zone est essentiel pour garantir la durabilité et la résistance du matériau.



(a) Béton sans fumée de silice

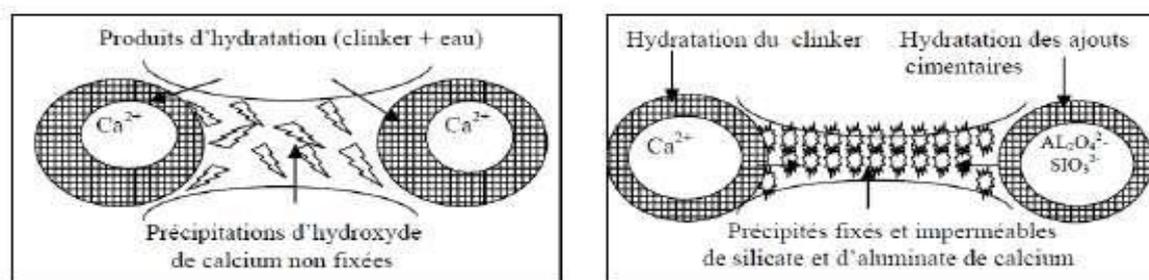
(b) Béton avec fumée de silice

**Figure I-5: La structure microscopique de la région de jonction entre la pâte et le granulats, selon les observations de Stark et Wicht, comme indiqué par [De Sá, 2007]**

### I.3 Les ajouts minéraux :

#### I.3.1 Généralités :

Les ajouts cimentaires, tels que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau et les fumées de silice, sont des substances minérales ajoutées au ciment Portland pour améliorer les propriétés du mortier ou du béton. Leur utilisation offre des avantages considérables sur les plans technique, économique et écologique, comme l'a souligné Kara-Ali (2002) dans ses travaux.



Hydratation d'un ciment sans ajout Hydratation d'un ciment avec ajout cimentaire.

**Figure I -6: Hydratation d'un ciment sans et avec ajout cimentaire [Yankwa & Noel, 2013].**

#### I.3.2 Les principaux ajouts :

Le ciment Portland est composé principalement de clinker moulu et de gypse, avec l'ajout d'autres composants pour modifier ses propriétés. Parmi ces composants, on trouve le laitier granulé de

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA MICROSTRUCTURE DU BETON ET LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

---

haut fourneau (S), les pouzzolanes naturelles (Z), les cendres volantes siliceuses (V), les cendres volantes calciques (W) et les schistes calcinés (T). Chaque matériau a des caractéristiques spécifiques et est soumis à des critères de qualité pour son utilisation dans le ciment. Ces ajouts cimentaires contribuent à améliorer les propriétés chimiques et physiques du béton, offrant ainsi des avantages importants dans les domaines technique, économique et écologique [Delort, 2001].

### I.3.2.1 Laitier de haut fourneau :

Le laitier de haut fourneau est un matériau inactif qui acquiert des propriétés hydrauliques lorsqu'il est activé correctement. Lorsqu'il est utilisé en quantité supérieure à 5 % dans le ciment, seuls les laitiers répondant à certaines spécifications doivent être utilisés. Ces spécifications incluent la présence d'au moins deux tiers de laitier vitreux en masse et d'au moins deux tiers de la somme des masses de (CaO), (MgO) et (SiO<sub>2</sub>). Le laitier contient également de l'(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et de faibles quantités d'autres oxydes. Le rapport (CaO + MgO)/(SiO<sub>2</sub>) doit être supérieur à 1,0. Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu en refroidissant rapidement la scorie fondue provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut-fourneau [Delort, 2001].

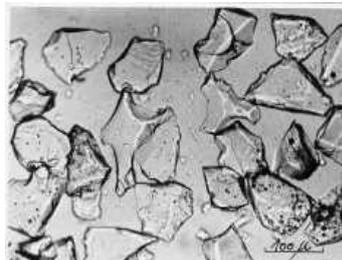


Figure I- 7:Laitier de haut fourneau vu au microscope [Delort, 2001].

### I.3.2.2 Pouzzolanes naturelles (Z) :

Les pouzzolanes naturelles, d'origine volcanique ou sédimentaire, ont une composition chimique et minéralogique adaptée. Contrairement aux pouzzolanes, elles ne durcissent pas seules au contact de l'eau, mais réagissent avec l'hydroxyde de calcium dissous pour former des composés qui développent des résistances similaires aux matériaux hydrauliques durcis. Lorsqu'elles sont utilisées en quantité supérieure à 5% dans le ciment, seules les pouzzolanes répondant à certaines spécifications sont autorisées, avec une composition principalement composée de (SiO<sub>2</sub>) réactif et de (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La proportion de (CaO) réactif est insignifiante et la teneur en (SiO<sub>2</sub>) réactif doit être d'au moins 25% en masse. Les pouzzolanes naturelles doivent être préparées adéquatement. [Delort, 2001].



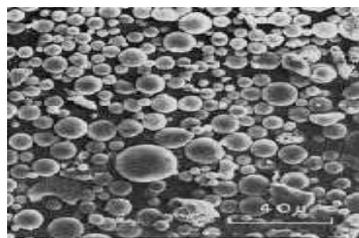
**Figure I - 8: Examen microscopique d'une pouzzolane volcanique [Delort, 2001].**

### **I.3.2.3 Cendres volantes :**

Les cendres volantes sont des sous-produits industriels qui sont utilisés dans la fabrication du béton. Elles sont classées en deux catégories : les cendres volantes siliceuses (V) et les cendres volantes calciques (W).

Les cendres volantes siliceuses (V) sont principalement composées de silice et d'alumine. Elles ont des propriétés pouzzolaniques, ce qui signifie qu'elles peuvent réagir avec la chaux du ciment pour former des composés solides. Les cendres volantes siliceuses doivent contenir au moins 25% de silice et moins de 5% de chaux.

Les cendres volantes calciques (W) sont principalement composées de chaux, de silice et d'alumine. Elles ont des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques. Les cendres volantes calciques doivent contenir au moins 5% de chaux. Si elles contiennent entre 5% et 15% de chaux, elles doivent également contenir plus de 25% de silice. Les cendres volantes calciques finement broyées contenant plus de 15% de chaux doivent présenter une résistance à la compression d'au moins 10 N/mm<sup>2</sup> à 28 jours et une expansion ne dépassant pas 10 mm lors des tests spécifiés. [(Delort, 2001)].



**Figure I-9: Observation microscopique de la cendre volante [Delort, 2001].**

### **I.3.2.4 Fumées de silice**

Les fumées de silice sont des particules extrêmement fines, sphériques et contenant une forte concentration de silice amorphe. Elles sont utilisées comme addition dans le béton pour améliorer ses propriétés mécaniques et durables.

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA MICROSTRUCTURE DU BETON ET LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

---

Les fumées de silice doivent répondre à certaines spécifications s'ils dépassent 3% en poids dans le béton. Ces spécifications comprennent :

- Une teneur en silice amorphe d'au moins 85%
- Une perte au feu inférieure à 4%
- Une aire massique d'au moins 15 m<sup>2</sup>/g
- Une teneur en silicium libre fournie par le fabricant de ciment sur demande

Les fumées de silice sont obtenues par la réduction de quartz pur avec du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium.

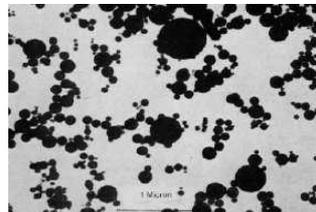


Figure I -10: Examen microscopique de la fumée de silice [Delort, 2001].

### I.4 Les granulats :

#### I.4.1 Introduction aux granulats employés dans la composition du béton:

La construction et l'aménagement de l'environnement impliquent trois principaux secteurs :

1. Les industries extractives et de matériaux de construction fournissent les matières premières, telles que les roches et les matériaux alluvionnaires.
2. Le secteur de la construction utilise ces matières premières pour la fabrication de structures, notamment des maisons et des bâtiments.
3. Le secteur des travaux publics emploie ces matières premières dans la construction d'infrastructures, telles que les routes et les ponts.

Les matières premières sont obtenues à partir de roches naturelles ou de déchets industriels, puis transformées en matériaux de construction tels que le béton, la brique et le bitume.

Les granulats sont des ensembles de grains de tailles variant de 0 à 125 mm et sont employés dans la fabrication de divers produits de construction, notamment le béton, la maçonnerie et les enduits [Charef, 2007].

### **I.4.2 Variétés de granulats**

Les granulats pour béton peuvent être d'origine naturelle, artificielle ou recyclée.

Les granulats naturels sont extraits de carrières ou de gisements alluvionnaires. Ils sont classés en trois types en fonction de leur origine géologique :

- Les granulats éruptifs proviennent de roches formées par le refroidissement rapide du magma. Ils sont généralement de couleur claire et présentent une bonne résistance.
- Les granulats sédimentaires proviennent de roches formées par l'accumulation de sédiments. Ils sont généralement de couleur foncée et présentent une moins bonne résistance.
- Les granulats métamorphiques proviennent de roches formées par la transformation de roches préexistantes sous l'effet de la pression et de la température. Ils présentent des propriétés intermédiaires entre les granulats éruptifs et sédimentaires.

Les granulats alluvionnaires sont obtenus par l'érosion et le transport de roches par les rivières. Ils sont généralement de bonne qualité et présentent une bonne résistance.

Les granulats de carrières sont obtenus par concassage et tamisage de roches massives. Ils présentent une excellente adhérence à la pâte de ciment mais nécessitent plus d'eau pour atteindre la maniabilité.

Les granulats artificiels sont produits par conversion thermique de roches, de minerais ou de sous-produits industriels. Ils présentent des propriétés similaires aux granulats naturels mais sont généralement moins chers.

Les granulats recyclés sont issus de matériaux de construction usagés, tels que des bétons, des briques ou des tuiles. Ils présentent des propriétés similaires aux granulats naturels mais peuvent présenter des impuretés.

### **I.4.2 Caractéristiques des agrégats**

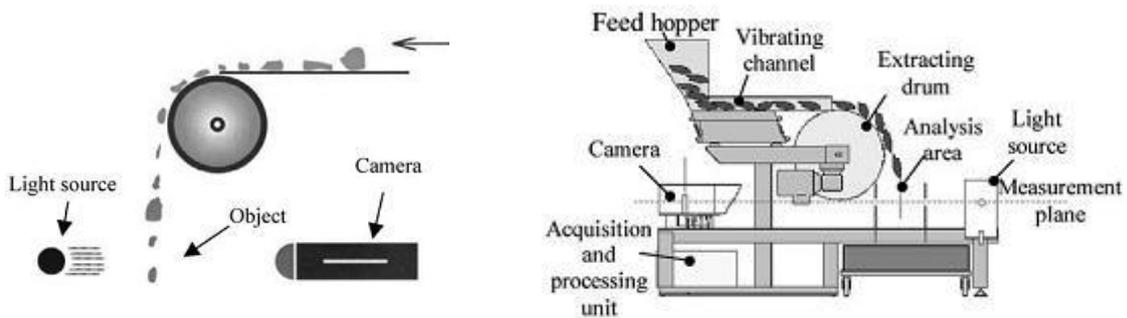
Les granulats utilisés dans les projets de construction et de génie civil doivent satisfaire à des exigences de qualité et à des spécifications spécifiques à chaque utilisation. Les propriétés des granulats sont influencées par les caractéristiques inhérentes des roches d'origine et par les processus de fabrication qui leur sont appliqués [Maillot, 2001].

Pour effectuer la caractérisation, l'échantillonnage doit être réalisé en accord avec les normes "NF P 18-553 et EN 932-1" qui définissent les méthodes de prélèvement à l'aide d'un "échantillonneur" ou par "quartage" [Crouzet, 2011, Guédon & Durville, 2020].

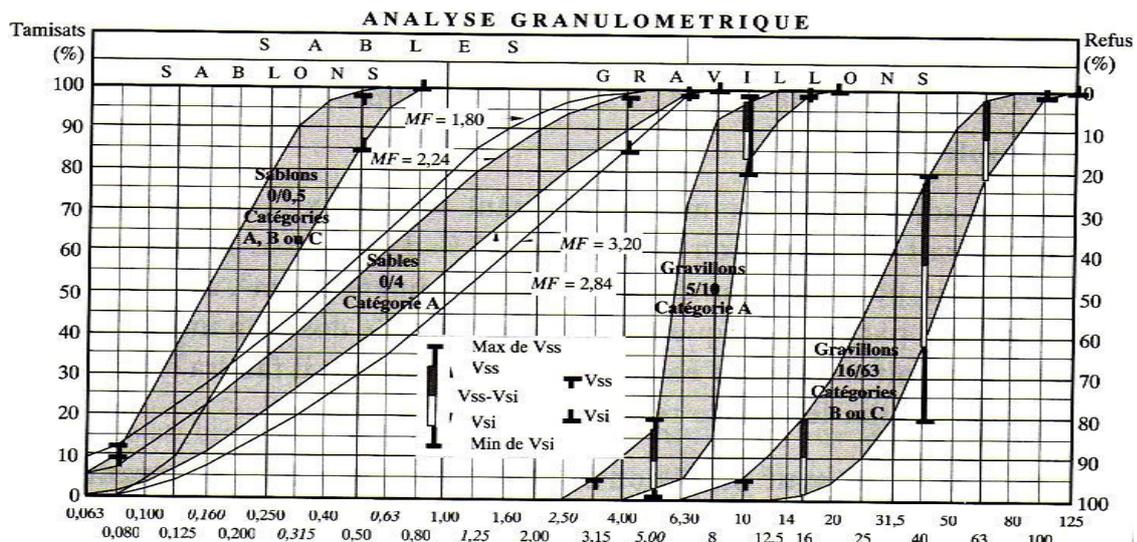
**I.4.3 Les Caractéristiques de fabrications:**

Les spécifications des granulats pour la fabrication des bétons hydrauliques sont définies par la norme expérimentale XP P 18-540. Cette norme classe les granulats en quatre catégories (fillers, sablons, sables et gravillons) et établit quatre familles de granulats naturels (A, B, C et D) ainsi que cinq catégories pour les granulats recyclés (A, B, C, D et E)[Baron et al]

L'analyse granulométrique est réalisée selon les normes EN 933-1 et EN 933-2, impliquant la séparation du matériau en fractions à l'aide de tamis. Une courbe granulométrique continue est essentielle pour obtenir un béton maniable, et une méthode basée sur le traitement d'image peut également être utilisée pour déterminer la granulométrie à l'aide du vidéogranulomètre VDG40, conforme à la norme XP P 18-566.[Maillot, 2001]



**Figure I -11: Schéma d'une installation d'élaboration de granulats [Maillot, 2001].**



**Figure I -12: Illustrations de courbes granulométriques pour les granulats utilisés dans le béton [Maillot, 2001].**

### **I.4.3.1 Dimensions des agrégats:**

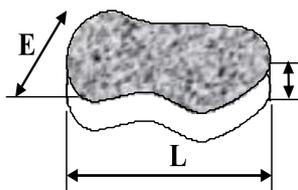
Les granulats peuvent avoir différentes formes (sphériques, cubiques, nodulaires, plates ou allongées) et des états de surface variés, ce qui affecte la facilité de mise en place du béton frais, ainsi que la résistance mécanique et la durabilité du béton durci.

Le module de finesse est un paramètre utilisé pour évaluer la quantité d'éléments fins présents dans un granulat. Il est calculé en cumulant les pourcentages de refus sur une série de tamis et en multipliant le résultat par 1/100. Le module de finesse est déterminé conformément à la norme en utilisant une liste spécifique de tamis [Maillot, 2001].

**Tableau I-I Ensemble de tamis utilisés pour calculer le module de finesse du sable.**

|    |  |  |
|----|--|--|
| 01 | Tamis: 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 et 5mm | "NF P 18-540"<br>[DUPONT &<br>TOURENQ, 1997] |
| 02 | Tamis: 0,125 - 0,25 - 0,5- 1- 2 et 4mm.        | "EN 12620"<br>[N. Afnor, 2008]               |

Un sable de béton de qualité satisfaisante a un module de finesse entre 2,2 et 2,8. En dehors de cette plage, un sable contient soit trop de fines, nécessitant plus d'eau, soit trop peu de fines, ce qui réduit l'ouvrabilité du béton. Il est important d'utiliser des granulats avec une bonne forme pour éviter une diminution de la résistance du béton due à la formation de plans de glissement. Une forme compacte des granulats est recommandée pour une utilisation optimale dans le béton. [Georges Dreux & Festa, 1976].



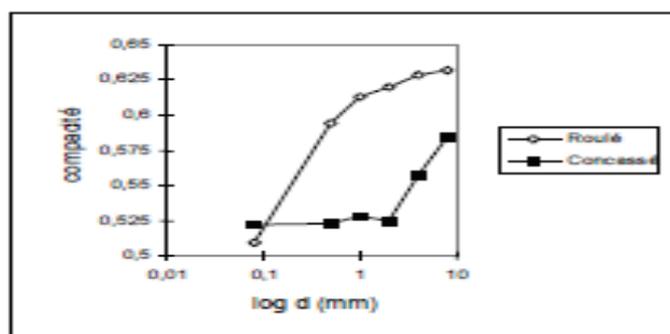
**Figure I-13: forme d'un granulat [Gabrysiak, 2000].**

Ils Les granulats roulés sont faciles à mettre en place, ne nécessitent pas de compaction importante, s'intègrent bien entre les armatures et conviennent particulièrement au béton armé. En revanche, les granulats concassés produisent des bétons rigides et plus difficiles à mettre en place. Cependant, ils offrent une bonne adhérence à la pâte de ciment et confèrent une résistance accrue au béton, notamment en termes de résistance à la traction. La compacité des mélanges de grains de taille similaire dépend de la forme et de la rugosité des grains. Les grains roulés ont un indice de serrage compris entre 0,6 et 0,64, tandis que pour les grains concassés, il est plus faible, variant entre 0,53 et 0,58.



**Figure I -14:Indices de serrages correspondants aux grains roulés et concassés [De Larrard, 2000]**

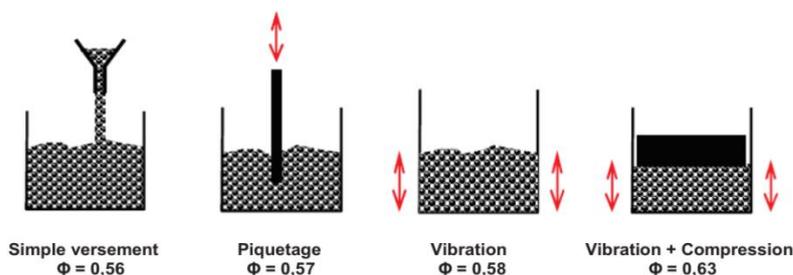
Selon la figure I.14 de DeLarrard, il est démontré que, pour une taille équivalente, les grains arrondis ont une compacité supérieure aux grains concassés. De plus, il semble qu'il n'existe pas de loi générale qui régit les relations entre la taille des granulats et leur compacité.



**Figure I -15: Expérimentations sur la densité des classes fondamentales en relation avec la dimension des particules[De Larrard, 2000]**

### **I.5 Impact de la méthode de placement - Indice de compaction:**

La compacité est étroitement associée à la méthode d'empilement employée. Une récente étude visant à mesurer la compacité a révélé les résultats suivants : lorsqu'un matériau est simplement versé, l'indice de densification est de 0,56 ; en utilisant des vibrations, cet indice atteint 0,58 ; lorsqu'il est soumis à une pression, il atteint 0,57 ; enfin, lorsque des vibrations et une compression sont appliquées simultanément, il atteint 0,63.

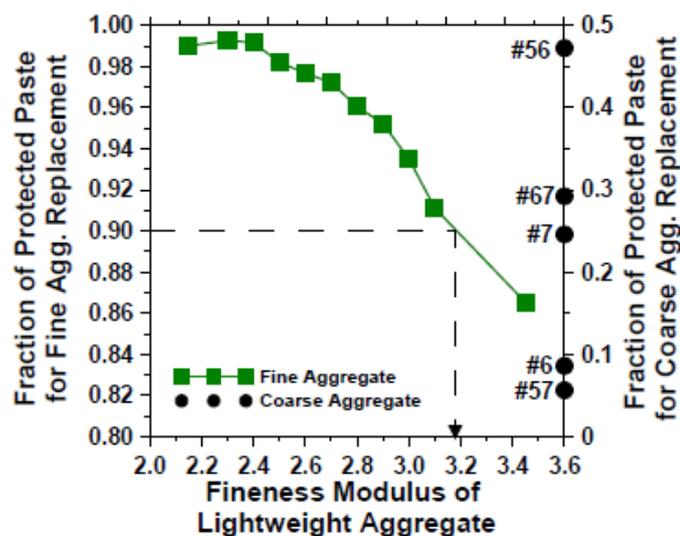


**Figure I -16:. Indices de compaction pour les diverses méthodes de placement des grains[de Larrard, Ledee, Sedran, Brochu, & Ducassou, 2003]**

### **I.5.1 Dimension des particules**

Dans la figure I.15, la compacité est représentée comme augmentant avec la taille des grains pour les deux familles. Cette observation peut être attribuée aux variations de forme en fonction de la taille des grains. Cependant, les vibrations sont le facteur déterminant, car il est probable que ces méthodes aient été plus efficaces sur les gros grains que sur les petits, malgré les efforts déployés. En effet, les petits grains ont tendance à avoir un plus grand nombre de points de contact par unité de volume, ce qui réduit l'efficacité des vibrations [Wang, David, Monckton, Battaglia, & Hen, 2008].

En ce qui concerne le choix de la taille des granulats, plusieurs auteurs ont démontré qu'il est préférable de remplacer les granulats fins pour obtenir une cure interne maximale. À l'aide d'un modèle de noyau dur/enveloppe souple, on a déterminé le volume de pâte entourant un granulat léger jusqu'à une distance maximale de 2 mm. Cette distance a été choisie en se basant sur des études démontrant qu'elle représente approximativement la distance que l'eau peut parcourir à un stade précoce avec de faibles rapports eau/ciment [Wang, David, Monckton, Battaglia, & Hen, 2008]. La figure 1-17 met en évidence que l'utilisation de gros granulats ne permet pas de protéger plus de 50 % de la pâte par une cure interne, en supposant que l'eau puisse se déplacer sur une distance de 2 mm. [A. Cohen, Ben-Abu, Hen, & Zilberberg, 2008].



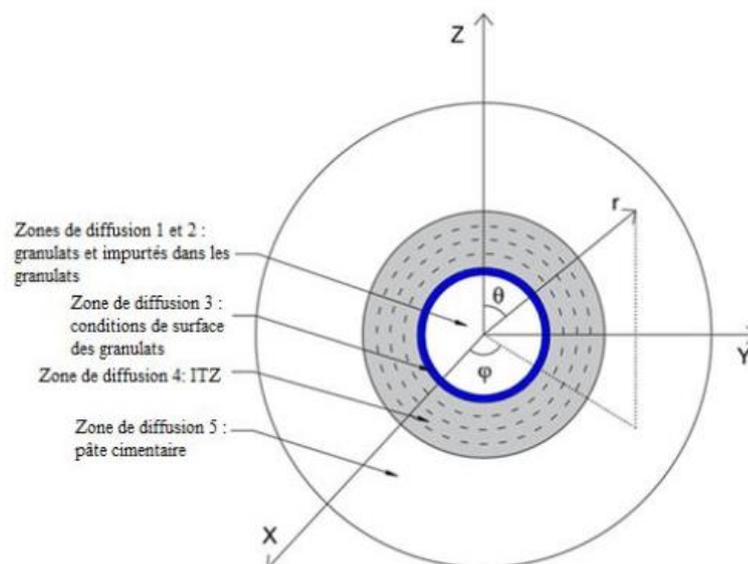
**Figure I-17: Le volume de la pâte soumis à un processus de cure interne dans un béton où 30 % des granulats sont remplacés par des agrégats de tailles variées, incluant des petits et des gros calibres [Calais, 2013]**

### **I.5.2 Zone d'interface de transition (ITZ)**

La présence d'une structure poreuse dans les granulats légers favorise une zone de transition interfaciale (ITZ) dense et uniforme, sans effet de paroi observé comme dans les bétons ordinaires. Cela réduit la largeur de l'ITZ (inférieure à  $10\ \mu\text{m}$ ) par rapport aux bétons ordinaires, tandis que l'humidification des granulats n'a pas d'impact significatif sur la microstructure de l'ITZ. [Lo, Cui, Memon, & Noguchi, 2016].

### **I.5.3 Effet des propriétés des granulats :**

La présence de granulats légers avec une structure poreuse favorise une zone de transition interfaciale (ITZ) dense et uniforme, réduisant la largeur de l'ITZ par rapport aux bétons ordinaires. Les granulats jouent un rôle important dans la diffusion des ions chlorure, en formant une ITZ qui constitue la voie principale de diffusion. Des études ont montré que la diffusion des chlorures dépend de la teneur en granulats, de la diffusivité apparente et de la composition des granulats. De plus, les propriétés des granulats, telles que leur type, leur état de surface et la présence d'impuretés, influencent la diffusion des chlorures. Il est donc nécessaire de considérer ces différents facteurs pour une meilleure compréhension de la diffusion des chlorures dans le béton. Des zones distinctes de diffusion des chlorures ont été définies pour prendre en compte ces paramètres. [C. R. AOUN, 2019].



**Figure I-18: Modèle de Volume de Diffusion suggéré [C. R. AOUN, 2019]**

### I.5.4 Influence du niveau de compactage et de la durée de malaxage

La performance et la durabilité du béton sont fortement influencées par la taille et la répartition des pores dans le matériau, notamment en ce qui concerne le coefficient de diffusion des chlorures. Différents facteurs ont été identifiés comme affectant ce coefficient en modifiant la distribution et la taille des pores. Les pores dans le béton peuvent être regroupés en quatre catégories principales : les pores capillaires, les pores d'air entraînés, les pores d'air emprisonnés et les pores d'eau. Chacune de ces catégories de pores a des caractéristiques spécifiques, et leur taille varie du submicron à plus d'un millimètre. Les codes et normes de construction soulignent l'importance d'obtenir un béton uniforme et bien compacté pour assurer sa durabilité. La figure fournie illustre la répartition des tailles de pores dans le béton.

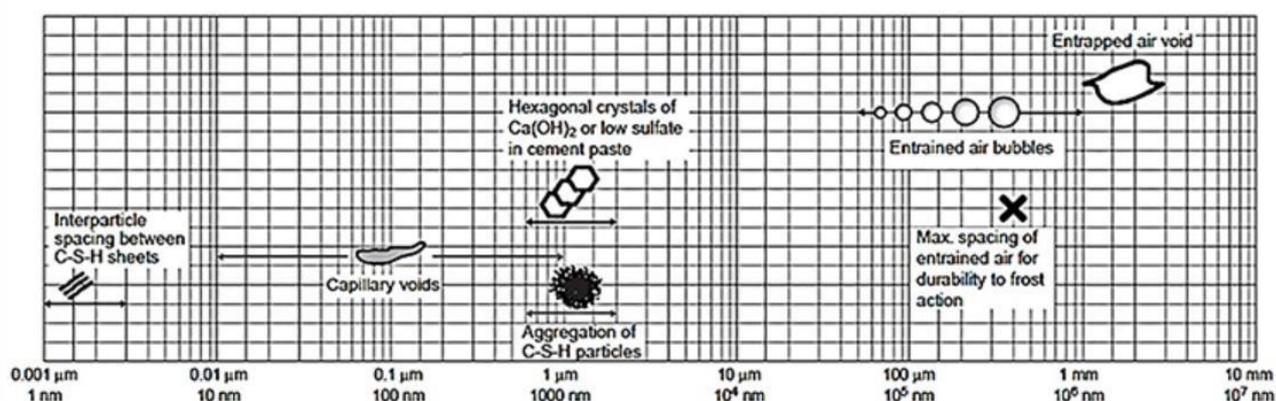


Figure I -19: Distribution des dimensions des constituants d'une matrice cimentaire.  
[Mehta, 1986]

### I.5.5 Impact de l'ouverture des fissures

La fissuration est un phénomène courant dans le béton, qui peut se produire à différents stades de sa formation et tout au long de sa durée de vie. Elle peut avoir un impact négatif sur la durabilité du béton, car elle permet le transport de substances nocives, telles que les chlorures. Des études ont été menées pour évaluer l'impact de la fissuration sur le transport des chlorures. Ces études ont utilisé des essais accélérés et des essais de longue durée, mais elles ne permettent pas une quantification précise de l'effet des fissures.

Pour améliorer la quantification de cet effet, il est nécessaire de prendre en compte plusieurs facteurs. Tout d'abord, la géométrie et les propriétés des fissures doivent être reproduites de manière fidèle. Les essais en laboratoire doivent également mieux reproduire la migration réelle des chlorures en utilisant des méthodes de longue durée. L'effet de la réparation autogène des fissures peut également être pris en compte.

De plus, la composition du béton, y compris le taux de chlorure et le rapport eau-ciment, doit être étudiée simultanément avec la géométrie des fissures. Enfin, il est crucial de choisir une taille

d'échantillon appropriée pour permettre une analyse précise du gradient de diffusion des chlorures.

En conclusion, une campagne expérimentale approfondie est nécessaire pour quantifier de manière précise l'effet de l'ouverture des fissures, en tenant compte de différents rapports eau-ciment et ouvertures de fissure. L'utilisation d'essais de longue durée est recommandée pour obtenir des résultats complets et précis.

### **I.5.6 Le Coefficient d'aplatissement "A":**

Le coefficient d'aplatissement est un indicateur de la forme des granulats dans une plage de dimensions de 4 à 80 mm. Il mesure le pourcentage d'éléments dont le rapport entre la longueur maximale et l'épaisseur maximale est supérieur à 1,58. Un coefficient d'aplatissement élevé (20 à 40 %) indique des granulats ayant une forme plate ou allongée, tandis qu'un coefficient d'aplatissement plus bas (5 à 20 %) correspond à des granulats ayant une forme sphérique, cubique ou nodulaire. La détermination de ce coefficient se fait conformément à la norme NF EN 933-3.[Dorion, 2001][Voit & Kuschel, 2020].

### **I.5.7 Angularité:**

L'évaluation de l'angularité des granulats peut traditionnellement se faire en utilisant des indices et des rapports de concassage. Une autre méthode consiste à mesurer le temps d'écoulement d'un volume spécifique de granulats à travers un orifice donné, ce qui permet de caractériser un coefficient d'écoulement des gravillons. Cette méthode peut également être appliquée aux sables, avec une méthodologie similaire mais une taille d'appareillage de mesure différente.[Maillot, 2001].

### **I.5.8 Caractéristiques intrinseques:**

La description pétrographique vise à caractériser les minéraux présents dans les échantillons de roches en identifiant leur nature, leur abondance, leur altération, leur taille, leur arrangement spatial et la présence éventuelle de pores. Elle utilise des méthodes de cristallographie pour déterminer l'état cristallin des substances et fournir une description complète des caractéristiques des roches. Les échantillons de roches peuvent être dans un état cristallin, avec une structure ordonnée, ou dans un état amorphe, avec une disposition désordonnée des molécules, comme dans le cas des verres volcaniques, de l'opale ou de la calcédoine.

### **I.5.9 Caractéristique Physiques :**

Les caractéristiques physiques des granulats peuvent être classées en deux groupes. Le premier groupe comprend les propriétés intrinsèques des granulats, tandis que le deuxième groupe concerne la présence de substances étrangères et nocives dans les granulats[GHERDAOUI, 2007]

### **I.5.10 Les masses volumiques:**

Les normes suivantes, notamment NF P 18-554, 18-555, 18-558, EN 1097-3 et EN 1097-6, définissent et établissent les masses volumiques des granulats. Deux types de masses volumiques sont utilisés pour caractériser les granulats : la masse volumique apparente (en vrac) qui inclut les pores inter-granulaires, et la masse volumique absolue qui exclut les pores. Trois méthodes couramment utilisées pour déterminer ces masses volumiques sont : la méthode de l'éprouvette graduée, la méthode du pycnomètre qui implique le pesage des particules solides et la mesure du volume à l'aide d'un pycnomètre, et la méthode de pesée hydrostatique, utilisée notamment après le paraffinage ou le graissage du matériau.

### **I.5.11 La porosité (P):**

Les granulats sont des matériaux constitués de vides, d'eau et de matière solide.

- La porosité est le rapport entre le volume des vides et le volume total des granulats. Elle est mesurée en pourcentage. Une porosité élevée peut entraîner une diminution de la résistance du béton.
- La teneur en eau est la quantité d'eau contenue dans les granulats. Elle est mesurée en pourcentage. Une teneur en eau élevée peut entraîner une diminution de la résistance du béton et une augmentation de sa sensibilité au gel.
- L'absorption d'eau est la quantité d'eau absorbée par les granulats lorsqu'ils sont immergés dans l'eau. Elle est mesurée en pourcentage. Une absorption d'eau élevée peut entraîner une diminution de la résistance du béton et une augmentation de sa sensibilité au gel.
- La propreté superficielle des gravillons est mesurée par la quantité de particules fines passant à travers un tamis. Une propreté superficielle élevée est importante pour garantir une bonne adhérence entre les granulats et la pâte de ciment.
- Les impuretés, telles que les matières organiques, les argiles et les matériaux fins, peuvent affecter la qualité du béton. Elles peuvent réduire la résistance du béton, augmenter sa sensibilité au gel et diminuer sa durabilité. Des seuils sont établis pour certaines impuretés afin de garantir la qualité du béton.

### **I.5.12 Caractéristique chimiques:**

La teneur en chlorures dans les granulats provenant des zones côtières ou des déserts peut être élevée en raison de la contamination par le sel. Des limites acceptables de teneur en ions chlorure sont définies pour différents types de béton, allant de 1 % pour les bétons non armés à 0,40 % pour les bétons armés. Les bétons recyclés peuvent présenter des teneurs en chlorures dépassant les limites recommandées en raison de la contamination des structures. De même, la teneur en sulfate des granulats est réglementée, avec une limite fixée à 1 %. La présence de sulfate peut être influencée par la quantité de pâte de ciment attachée aux granulats, et le plâtre peut réduire la résistance à la compression du béton. L'alcali-réaction est une réaction chimique qui peut se produire entre certains composants des granulats et les éléments alcalins présents dans la pâte de liant, ce qui peut entraîner la formation d'un gel expansif et la rupture du béton. Les granulats sont classifiés en fonction de leur réactivité aux alcalins, et une teneur en alcalins actifs supérieure à 0,01 % est spécifiée[**Hebhoub et al., 2011**]

### **I.5.13 Caractéristique mécaniques :**

Les caractéristiques mécaniques des granulats sont évaluées à travers différents tests. La résistance des granulats est mesurée à l'aide d'essais indirects, d'essais de résistance au choc et d'essais d'usure. La résistance à la fragmentation est évaluée par l'essai Los Angeles, qui mesure la résistance combinée à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottement. Les normes établissent des valeurs maximales pour le coefficient Los Angeles, variant selon le type de granulats. Les granulats recyclés peuvent présenter des variations de ce coefficient en fonction de divers facteurs. L'essai de fragmentation dynamique est également utilisé pour évaluer la résistance à la fragmentation par chocs des granulats, en obtenant un résultat similaire au coefficient Los Angeles. Ces essais visent à évaluer la résistance et l'élasticité des granulats, qui dépendent de leur composition minéralogique, de leur texture et de leur structure.[**Gabrysiak, 2000**].

## **I.6 Le sable:**

Le sable est un matériau issu de la désagrégation des roches, jouant un rôle crucial dans le béton et le mortier en termes de résistance et de cohésion. Il peut être classifié en fonction de son origine, comprenant le sable de rivière, le sable de mer et le sable de dune, ainsi que selon sa granulométrie, tel que le sable fin, moyen et gros. Chaque type de sable a ses propres caractéristiques et exigences de traitement avant utilisation. La qualité du sable a un impact

significatif sur la qualité du béton, car il remplit les espaces entre les grains de gravier, contribuant ainsi à la structure globale du béton..

### **I.6.1 Equivalent de sable**

L'indice d'équivalent de sable est une mesure conventionnelle exprimée en pourcentage, qui compare les éléments sableux aux éléments plus fins. Deux méthodes courantes sont utilisées pour effectuer cette mesure : l'essai visuel et l'essai au piston. Trois textes réglementaires décrivent ces essais : l'essai d'équivalent de sable (NFP 18-598), l'essai d'équivalent de sable avec 10% de fines (NFP 18-597) et l'évaluation des fines - équivalent de sable (EN 933-8).

Ces essais permettent de déterminer le pourcentage d'éléments très fins présents dans le sable, sans distinction de leur nature telle que l'argile, le limon, la vase ou les matières solubles. Ils fournissent une évaluation quantitative de la propreté des sables. Pour une évaluation plus précise, l'essai d'équivalent de sable peut être complété par l'essai au bleu de méthylène.

### **I.7 Conclusion**

Dans ce chapitre bibliographique, nous avons étudié les caractéristiques des matériaux utilisés pour construire un béton et leur influence sur les propriétés du béton.

Nous avons décrit les différentes phases présentes dans le béton, à savoir la pâte de ciment, les granulats et l'auréole de transition (ITZ). Nous nous sommes intéressés à l'influence des granulats sur les propriétés du béton.

**CHAPITRE II**

**ATTAQUES SULFATIQUES ET LEUR INFLUENCE DES**

**AGREGATS SUR LES PROPRIETES DE BETON**

## **II.1. Introduction**

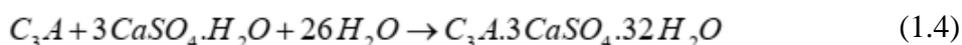
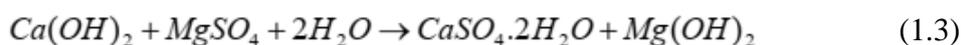
Des avancées significatives ont été réalisées grâce à la chimie minérale et aux techniques d'investigation, permettant d'identifier certains composés, d'expliquer leurs processus de formation et de proposer des scénarios cohérents avec les phénomènes de dégradation observés, dans la compréhension des mécanismes d'action des sulfates dans les bétons. Cependant, il reste encore beaucoup à découvrir sur les différents modes d'action des sulfates.

### **II.1.1 Les transformations chimiques du béton**

En présence de sulfates, trois composés spécifiques se forment et jouent un rôle crucial dans les processus d'attaque sulfatique externe, en plus des éléments constitutifs du béton tels que les produits d'hydratation comme le C-S-H et la portlandite. Ces composés comprennent le gypse, l'ettringite, et, dans certaines situations, la thaumasite.

### **II.1.2 Réaction chimique provoquée par les sulfates.**

Lorsque la concentration de sulfates dans l'environnement est élevée, les sulfates interagissent avec la matrice cimentaire du béton pour former du gypse (Ollivier, 1992). Le gypse est déjà présent dans le ciment en tant que régulateur de prise (Santhanam, Cohen, & Olek, 2001). Il se forme par substitution des ions hydroxyde par les ions sulfate au niveau de la portlandite, lorsque le cation associé est l'ion sodium. Le gypse ainsi produit peut ensuite réagir avec les aluminates de calcium pour former de l'ettringite. L'ettringite est un composé cristallin qui peut entraîner une expansion du béton, ce qui peut le fragiliser. Les sulfates de magnésium ont un mode d'action encore plus préjudiciable au béton. Ils peuvent également former de l'ettringite (1.3) et (1.4), mais ils peuvent également remplacer les ions calcium des silicates de calcium hydratés (C-S-H). Cela entraîne la perte des propriétés liantes des C-S-H, ce qui réduit la résistance mécanique du béton. Cependant, la brucite, un autre composé formé par les sulfates de magnésium, peut ralentir la pénétration des sulfates et former une couche protectrice. Cela peut expliquer le bon comportement de certains bétons dans l'eau de mer, malgré sa richesse en ions sulfate et magnésium. ((A. M. Neville, 1995)).



### II.1.3 L'ettringite

L'ettringite est un composé cristallin qui peut se former dans le béton exposé à des sulfates. Elle est causée par une réaction entre le C3A, un composant du ciment, et des sulfates.

Le mode d'action des sulfates dépend du cation associé. Le sulfate de sodium, qui est très soluble, entraîne la formation de gypse et d'ettringite expansive. Le sulfate de calcium, qui est peu soluble, provoque la dégradation du béton par formation d'ettringite expansive.

La solubilité des différents précipités joue un rôle important dans les processus de dégradation. Le précipité ayant la solubilité la plus faible se forme préférentiellement.

En résumé, dans les solutions contenant des concentrations élevées de sulfates, la présence de gypse est due à l'interaction entre les sulfates introduits et la matrice cimentaire. Ces sulfates peuvent également réagir avec le ciment pour former de l'ettringite. Les sulfates de magnésium ont un effet encore plus préjudiciable, car ils entraînent la perte de propriétés liantes des silicates de calcium hydratés et la diminution de la résistance mécanique du béton.

### II.1.4 Le gypse

Le gypse peut se former par réaction chimique ou par dissolution de l'ettringite en présence de faibles quantités d'hydroxyde de calcium. Son impact dans les attaques sulfatiques n'est pas complètement compris, mais il peut provoquer des problèmes tels que l'écaillage et le gonflement du béton. Des recherches ont démontré que la formation de gypse peut entraîner une perte de masse et des variations dimensionnelles significatives. La substitution du C3S par de la fumée de silice peut réduire la quantité de gypse produite. Cependant, les liens entre les dégradations physiques et la formation des différents produits lors des attaques sulfatiques sont encore peu explorés. Il est crucial d'améliorer notre compréhension de ces relations afin de mieux prévenir les risques lors de la formulation du béton, car l'absence d'ettringite ou de C3A ne garantit pas une protection complète contre les attaques sulfatiques. [Santhanam et al., 2001].

### II.1.5 Les processus de dégradation :

Des recherches en laboratoire et l'utilisation de techniques d'observation spécifiques ont permis de proposer des scénarios décrivant la progression des attaques sulfatiques externes dans le béton, en tenant compte des mécanismes et des produits mentionnés précédemment. Trois de ces scénarios sont présentés ci-dessous. Dans l'ensemble, ils sont cohérents, et les différences observées sont généralement attribuées aux variations des conditions d'exposition et des matériaux utilisés.

## CHAPITRE II : ATTAQUES SULFATIQUES ET LEUR INFLUENCE DES AGREGATS SUR LES PROPRIÉTÉS DE BÉTON

---

Le premier scénario proposé décrit la dégradation du béton par attaque sulfatique comme une série d'événements qui se produisent dans l'ordre suivant :

1. Pénétration des sulfates : Les anions sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) pénètrent par diffusion dans une zone superficielle du béton.
2. Formation de gypse : Les sulfates peuvent réagir avec le calcium du béton pour former du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).
3. Formation d'ettringite : Les sulfates peuvent également réagir avec les aluminates du béton pour former de l'ettringite ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ). L'ettringite est un composé cristallin qui peut gonfler, ce qui peut entraîner la fissuration du béton.
4. Progression de l'attaque sulfatique : Les fissures facilitent la pénétration des sulfates à travers le béton, ce qui permet à l'attaque sulfatique de progresser.

En résumé, ce scénario décrit une attaque sulfatique progressive qui se propage à partir de la surface du béton. L'attaque est causée par la formation d'ettringite expansive, qui entraîne la fissuration du béton. [BARON et al., 1992]

Irassar et ses collaborateurs (2003) ont avancé un modèle explicatif pour décrire le processus d'attaque sulfatique sur le béton. Leur modèle repose sur des analyses de diffraction des rayons X et des observations au microscope électronique à balayage [Irassar et al. 2003]

Les expériences ont été menées en utilisant des échantillons de mortier de dimensions 25x25x285 mm, soumis à des conditions d'essai similaires à celles décrites par Patzias et d'autres (1991). Les concentrations de gypse, d'ettringite, de portlandite et de  $\text{CaCO}_3$  ont été mesurées après une et deux années d'immersion dans une solution de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (0,352 mol/L).

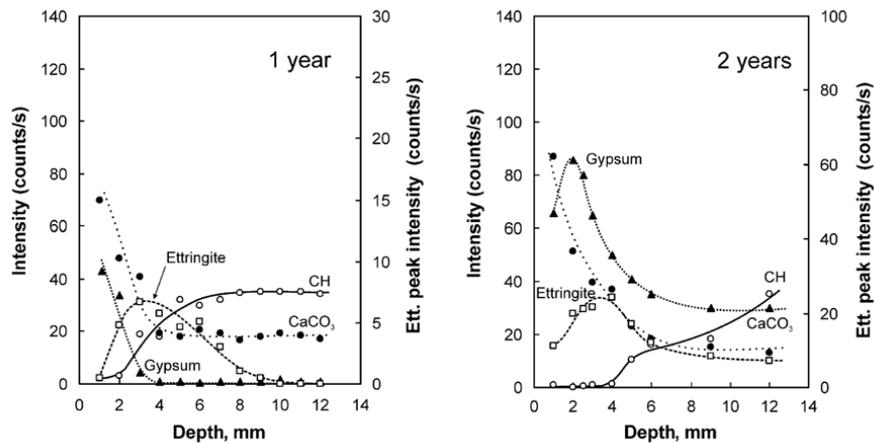
Le modèle proposé comporte les étapes suivantes :

1. Diffusion des ions sulfates  $\text{SO}_4^{2-}$  à travers la structure du béton.
2. Dissolution de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , formant des ions calcium  $\text{Ca}^{2+}$ .
3. Réaction entre les ions sulfates  $\text{SO}_4^{2-}$  et les ions calcium  $\text{Ca}^{2+}$  pour produire de l'ettringite  $3\text{Ca} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_3\text{O}-32$ .
4. Formation de gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  par la décomposition de l'ettringite.
5. Décalcification des C-S-H par le remplacement des ions calcium  $\text{Ca}^{2+}$  par des ions hydrogène  $\text{H}^+$ .
6. Formation de thaumasite  $\text{CaSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  par la réaction des ions sulfates  $\text{SO}_4^{2-}$  avec les ions calcium  $\text{Ca}^{2+}$  et les ions silicates  $\text{SiO}_3^{2-}$ .

Dans cette séquence, l'ettringite est le premier composé formé, suivi de sa décomposition en gypse, qui à son tour se décompose pour donner naissance à la thaumasite. Cette explication concorde

## CHAPITRE II : ATTAQUES SULFATIQUES ET LEUR INFLUENCE DES AGREGATS SUR LES PROPRIETES DE BETON

avec la distribution en courbe en cloche des concentrations d'ettringite et est en accord avec une autre étude menée en utilisant des solutions de sulfate de sodium maintenues à un pH inférieur à 10,5 [Maltais, 2007].



**Figure II-1 : Profils de concentration de gypse, d'ettringite, de portlandite et de  $\text{CaCO}_3$  obtenus grâce à des analyses de diffraction des rayons X [Irassar et al., 2003].**

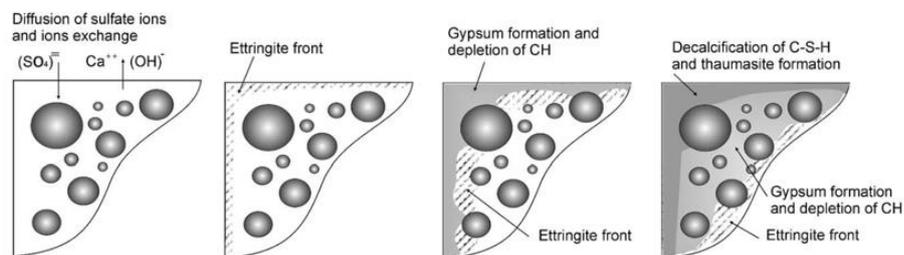


Fig. 8. Schematic representation of the sequence of sulfate attack in mortar.

**Figure II-2: Illustration schématique de l'avancée de la réaction de sulfate externe dans une éprouvette de mortier plongée dans une solution de sulfate de sodium [Irassar et al., 2003]**

La thaumasite est un minéral qui peut se former dans le béton exposé à des sulfates et à du carbonate de calcium. Elle est causée par une réaction entre ces deux composés en présence d'eau. La thaumasite est possible à température ambiante, mais elle est plus fréquente à des températures plus basses. Elle est également favorisée par les ciments riches en C3A, car ils génèrent plus d'ettringite, qui précède toujours la formation de thaumasite.

La thaumasite se distingue de l'ettringite par ses effets différents sur le béton. L'ettringite provoque un gonflement et une fissuration du béton, tandis que la thaumasite n'affecte pas sa résistance. En revanche, elle altère les C-S-H, ce qui se traduit par une perte de cohésion du matériau.

La formation de gypse peut également affecter la cohésion de la couche superficielle du béton, mais de manière différente et moins visible

## CHAPITRE II : ATTAQUES SULFATIQUES ET LEUR INFLUENCE DES AGREGATS SUR LES PROPRIETES DE BETON

Dans D. Planel a étudié les effets combinés de la lixiviation et de la pénétration des sulfates sur des pâtes de ciment. Il a utilisé une solution de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) avec une concentration de 15 mmol/L, soit 1,44 g/L en ions sulfate.

Les résultats ont montré que la lixiviation en milieu sulfaté ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) entraîne une perte de masse moindre que la lixiviation simple avec de l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Cela s'explique par la formation d'un nouveau produit dans le matériau, qui compenserait partiellement la décalcification de la pâte de ciment [Planel et al. 2006]

Les cinétiques de la lixiviation en milieu sulfaté montrent l'existence d'un phénomène de diffusion des ions sulfates en sens inverse de la diffusion des ions calcium.

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a permis de déterminer le profil minéralogique des échantillons exposés. Les résultats montrent que la lixiviation en milieu sulfaté entraîne la formation de gypse, ce qui contribue à la protection de la pâte de ciment (figure II.5).

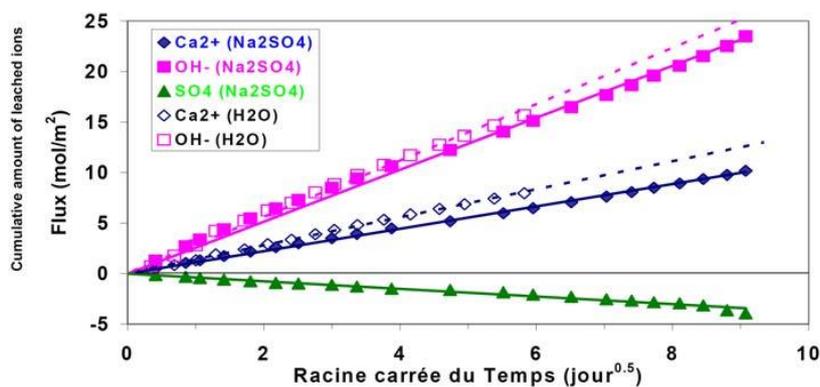


Figure II -3.: Débit d'ions émis par un échantillon de pâte de ciment exposé à une réaction de sulfate externe [D. Planel, dans C. Gallé et al., 2005].

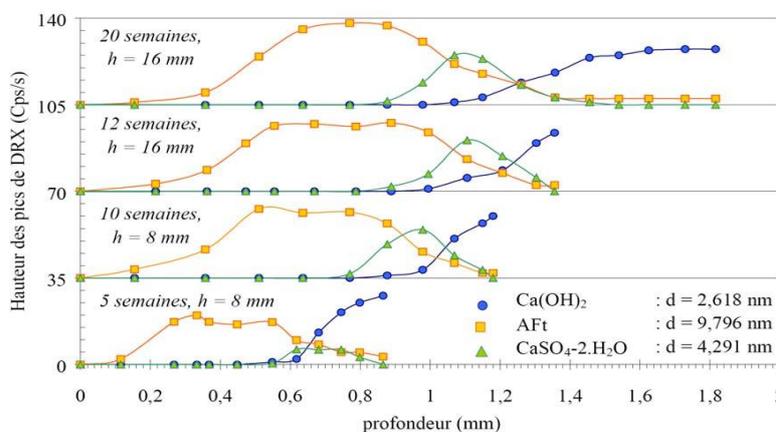
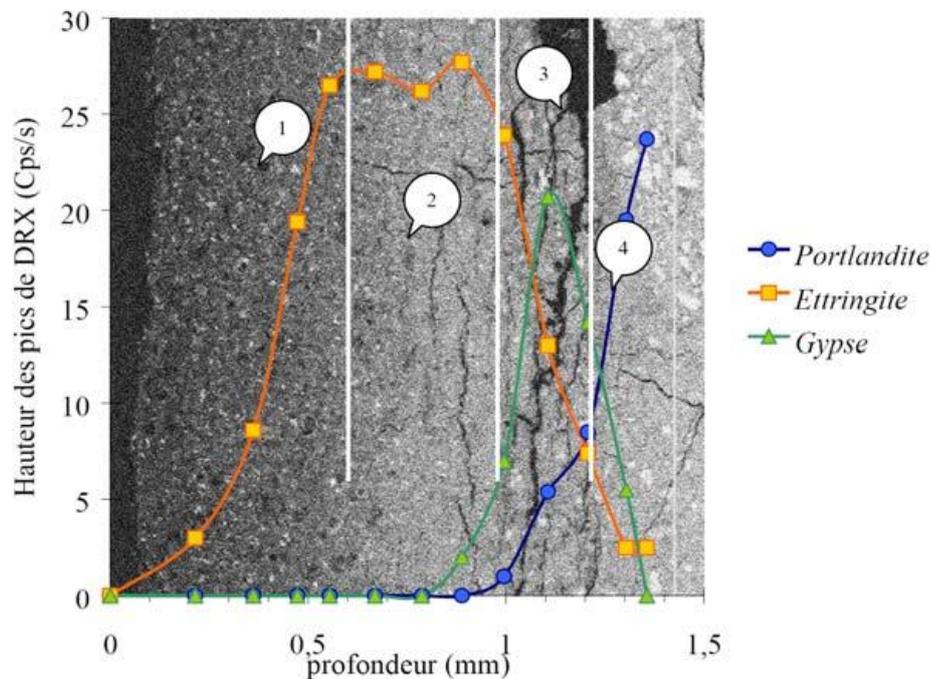


Figure II.4: Partition minéralogique déduite par diffraction des rayons X (DRX) de la pâte de ciment (rapport eau/ciment = 0,4) suite à la dégradation. [Planel et al., 2006].

## CHAPITRE II : ATTAQUES SULFATIQUES ET LEUR INFLUENCE DES AGREGATS SUR LES PROPRIETES DE BETON

La superposition des profils minéralogiques obtenus à partir de l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) et d'une photographie au microscope électronique à balayage (MEB) révèle plusieurs zones distinctes :

- La première zone, située en surface et en contact direct avec la solution d'attaque (représentée par le chiffre 1), présente une porosité élevée. Elle correspond à la région du matériau la plus décalcifiée.
- La deuxième zone, plus centrale et moins poreuse, correspond à la zone où l'ettringite se précipite (représentée par le chiffre 2).
- Une autre zone, caractérisée par une fissuration parallèle au front d'attaque, se situe au niveau du pic de gypse (représentée par le chiffre 3). Dans cette zone, l'ettringite coexiste avec la portlandite, même si elle est peu détectée par la DRX. La présence de portlandite favorise l'expansivité de l'ettringite (ettringite massive), ce qui entraîne des fissures dans cette région.
- Le cœur chimiquement sain du matériau présente des fissures perpendiculaires au front d'attaque (représentées par le chiffre 4)



**Figure II-5: La juxtaposition des profils minéralogiques résultant de l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) et d'une image au microscope électronique à balayage (MEB). [ Planel, dans C. Gallé et al., 2005]**

### II.1.6 Impact de Paramètres Environnementaux sur le Béton:

L'attaque sulfatique peut causer différents dommages au béton. Les mécanismes impliqués varient en fonction des conditions d'attaque. Les facteurs suivants ont été étudiés pour comprendre ces mécanismes :

- La nature du cation associé aux ions sulfates : les sulfates de sodium et de magnésium sont plus agressifs que les sulfates de calcium.
- La concentration en sulfates : une concentration plus élevée en sulfates augmente la probabilité d'attaque.
- Le pH de la solution d'immersion : un pH plus bas favorise l'attaque.
- La température : une température plus élevée accélère l'attaque.
- Les variations du taux d'humidité : les cycles d'humidification-séchage favorisent l'attaque.

Ces facteurs sont importants pour comprendre les mécanismes impliqués dans les essais accélérés d'attaque sulfatique.

### II.1.7 Le Cation Lié aux Ions Sulfates

La nature du cation associé aux ions sulfates influence à la fois la cinétique et le mode de dégradation du béton.

Le sulfate de sodium est le cation associé aux ions sulfates le plus courant dans les environnements naturels. Il est responsable de la formation de gypse et d'ettringite expansive. L'ettringite est un produit expansif qui peut provoquer des fissures et des dommages au béton. Dans des conditions environnementales favorables, la thaumasite peut se former en dernière étape de dégradation. La thaumasite est un autre produit expansif qui peut provoquer des dommages encore plus importants que l'ettringite.

Le sulfate de calcium provient de la dissolution de gypse ou d'anhydrite dans les milieux naturels. Il réagit principalement avec l'aluminate tricalcique C3A pour former de l'ettringite expansive.

Le sulfate de magnésium est le cation associé aux ions sulfates le plus agressif pour le béton. Il est responsable des attaques les plus sévères et les plus rapides sur le béton. Les dommages causés par le sulfate de magnésium comprennent l'écaillage, le délitage du béton et la perte de cohésion. ((Baron et al., 1997), (Neville, Editions Eyrollès, 2000)).

### II.1.8 Le pH de la solution environnante

Le pH joue un rôle essentiel dans le processus de dégradation, comme l'ont mis en évidence les travaux d'Irassar et al. (2003). Par exemple, l'ettringite perd sa stabilité lorsque le pH descend en

## **CHAPITRE II : ATTAQUES SULFATIQUES ET LEUR INFLUENCE DES AGREGATS SUR LES PROPRIÉTÉS DE BETON**

---

dessous de 10,7, ce qui entraîne sa transformation en gypse, comme le souligne Mehta (1986). Des expériences ont été menées en utilisant une solution de sulfate de sodium dont le pH a été maintenu à 6,2 grâce à l'ajout d'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Ces expériences ont révélé que dans de telles conditions, la formation de gypse était le principal processus de dégradation, indépendamment de la teneur en C3A du ciment.

Des essais similaires ont été conduits par Brown en variant les valeurs de pH (6,0, 10,0 et 11,5), ainsi qu'en utilisant une solution sans contrôle de pH. L'évaluation de la résistance aux attaques sulfatiques des mortiers testés a été réalisée en mesurant l'allongement des éprouvettes et leur résistance en compression. Les résultats ont clairement montré que la résistance aux sulfates diminuait à mesure que le pH diminuait (Brown, année inconnue).

L'étude d'Irassar et al. (2003) s'est basée sur des essais d'immersion de mortiers dans une solution de sulfate de sodium maintenue à un pH de  $7 \pm 1$ . Les profils de concentration obtenus ont révélé la dégradation de l'ettringite et la formation de gypse au fur et à mesure de l'avancement de l'attaque. Il est intéressant de noter que le maintien de la solution d'immersion à un pH d'environ 7 a accéléré la dégradation par les sulfates par rapport à une solution non renouvelée. Higgins & Crammond (2003) ont tenté de mettre en évidence ce paramètre en comparant la dégradation de bétons soumis à la même solution pendant six ans à celle de bétons soumis à une solution renouvelée tous les trois mois. Leur observation a révélé que l'attaque était plus rapide dans le dernier cas, mais qu'elle persistait tout au long de l'étude, même dans le premier cas. Ces conditions artificielles doivent être confrontées aux conditions réelles des structures exposées aux sulfates afin de mieux comprendre les dégradations observées et de développer des essais plus représentatifs (Higgins & Crammond, 2003).

### **II.1.9 La température**

La température influence la solubilité des composés impliqués dans les attaques sulfatiques, ce qui affecte le type de dégradation observé.

- La thaumasite est un produit de dégradation expansif qui peut provoquer des fissures et des dommages au béton. Elle se forme de manière préférentielle à des températures comprises entre 0 et 5 °C, mais peut également se former à des températures plus élevées.
- La formation de thaumasite est également favorisée par une humidité ambiante élevée, un pH bas et des concentrations élevées des composés impliqués dans sa formation.

- La température a un effet inverse sur la formation de thaumasite par rapport à d'autres types de dégradations.
- En dehors de la formation de thaumasite, les effets de la température sur les attaques sulfatiques sont encore mal compris.
- Des études supplémentaires sont nécessaires pour évaluer l'effet de la température sur les mécanismes et les réactions chimiques impliqués.

### II.1.10 Fluctuations du niveau d'humidité

Les variations d'humidité peuvent accélérer l'attaque sulfatique du béton.

Les cycles d'humidification-séchage favorisent la pénétration des ions sulfates dans le béton par absorption.

Une étude du US Bureau of Reclamation a montré qu'une année d'immersion alternée équivaldrait à huit ans d'immersion permanente.[Neville, Editions Eyrollès ,2000].

### II.1.11 Impact des agrégats sur la facilité de manipulation

La capacité à manipuler le béton est d'une importance cruciale lors de sa mise en place, généralement évaluée par le test d'affaissement au cône d'Abrams[Chakravarthi, Boyina, Singh, & Shankar, 2019].

La maniabilité d'un béton conventionnel est difficile à chiffrer précisément, car elle dépend d'une multitude de variables, notamment :

- La quantité d'eau utilisée : davantage d'eau rend le béton plus fluide.
- Le type de liant employé : les ciments à haute résistance ou à faible teneur en clinker exigent différentes quantités d'eau pour atteindre une maniabilité similaire.
- La forme et la texture des granulats : les granulats anguleux et rugueux nécessitent plus d'eau pour atteindre la même maniabilité que les granulats arrondis et lisses.
- La granulométrie : les bétons à granulométrie plus fine sont plus fluides.
- La taille maximale des granulats : un béton avec des granulats plus gros est moins fluide.

D'autres éléments peuvent aussi influencer la maniabilité, comme :

- Le processus de mélange : un mélange insuffisant peut réduire la maniabilité.
- Le transport du béton : un transport prolongé peut entraîner une perte de maniabilité.
- La température : le béton est plus fluide à haute température qu'à basse température.
- L'humidité : le béton humide est moins fluide que le béton sec[(Bethmont, 2005)].
- La finesse des sables : des sables plus fins augmentent la maniabilité.

- L'utilisation d'adjuvants : les adjuvants fluidifiants améliorent la maniabilité.

Pour conclure, la maniabilité du béton est une caractéristique essentielle à considérer lors de la conception et de la mise en place du matériau [Baron et al., 1997].

### II.1.12 Influence de l'état de surface des granulats :

La forme des granulats est un facteur important qui influence les propriétés du béton. Elle affecte la cohésion entre les granulats et la pâte de ciment, ce qui a un impact sur la résistance, la maniabilité et la durabilité du béton Hermite [Taqqu, 1979].

Les granulats sont généralement classés en fonction de leur forme en trois catégories :

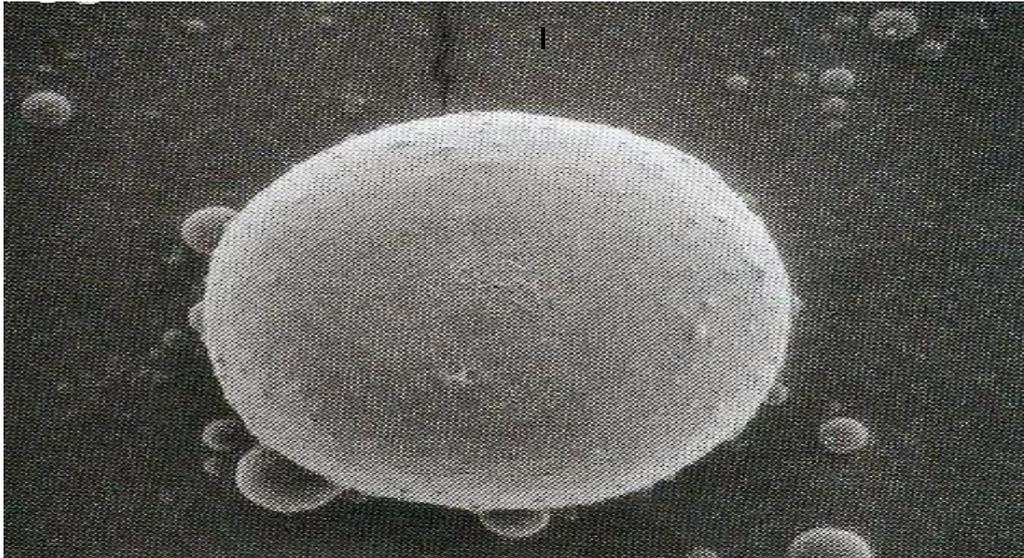
- Anguleux : les granulats anguleux ont des arêtes vives et des angles prononcés.
- Arrondis : les granulats arrondis ont des formes plus douces et des angles arrondis.
- Lamellaire : les granulats lamellaires ont des formes allongées et plates.

Les granulats anguleux offrent une meilleure cohésion avec la pâte de ciment que les granulats arrondis. Ils sont donc généralement associés à une résistance mécanique plus élevée. Cependant, ils peuvent également être plus difficiles à compacter, ce qui peut entraîner une diminution de la résistance [Birioukov & Remadnia, 2017] Hermite [Taqqu, 1979].

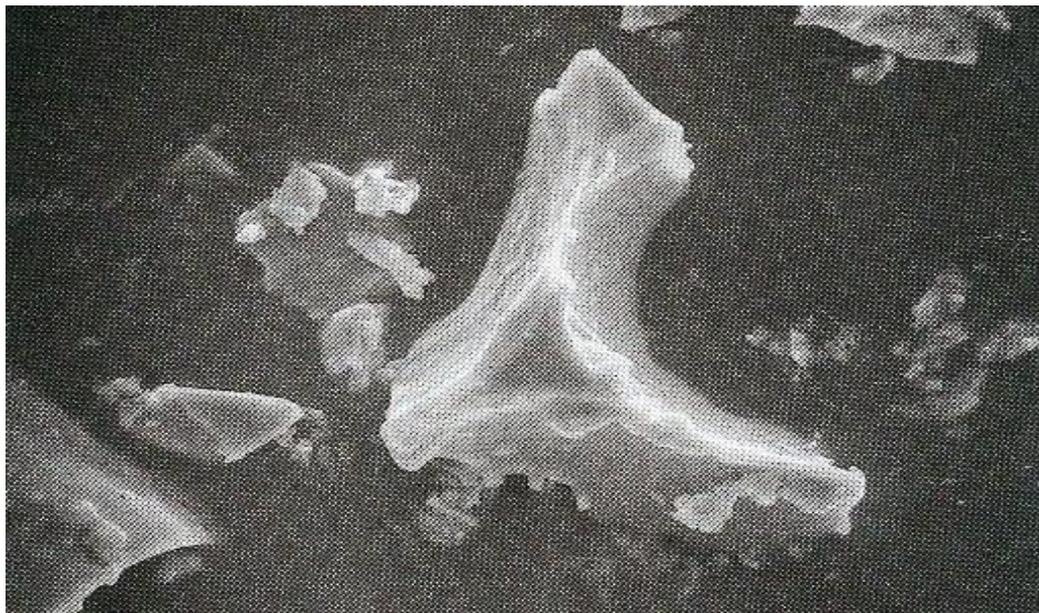
Les granulats lamellaires peuvent avoir un impact négatif sur la résistance mécanique du béton, car ils peuvent se coincer les uns dans les autres et empêcher la pâte de ciment de remplir les espaces entre les granulats. Cependant, ils peuvent également avoir un effet positif sur la résistance à la flexion et à la fissuration.

La quantité de granulats lamellaires dans le béton doit être limitée à 30 %. Une quantité excessive peut entraîner des difficultés de compactage et une diminution de la résistance mécanique.

En conclusion, la forme des granulats est un facteur important à prendre en compte lors de la conception d'un béton. La forme des granulats doit être adaptée aux exigences du béton en termes de résistance, de maniabilité et de durabilité [Birioukov & Remadnia, 2017].



**Figure II.6: La sphéricité entraîne une diminution de la quantité d'eau [Chanvillard & Basuyaux, 1996].**



**Figure II -7: Une forme anguleuse nécessite une quantité d'eau plus élevée dans le mélange [Chanvillard & Basuyaux, 1996].**

## CHAPITRE II : ATTAQUES SULFATIQUES ET LEUR INFLUENCE DES AGREGATS SUR LES PROPRIETES DE BETON

**Tableau II-1 Influence qualitative des caractéristiques de l'état de surface sur la facilité de mise en place du béton et l'adhérence entre la pâte et les granulats [R. SAUTEREY, BONNOT, & BARON, 1975].**

| Caractéristique des granulats   | Mise en œuvre | Adhérence   |
|---|---------------|-------------|
| Malpropreté du granulat<br>Granulat roulé<br>(angularité faible ou nulle) | Défavorable   | Très        |
| granulat concassé<br>(angularité maximale)                                | Favorable     | défavorable |
| forme mauvaise<br>(granulats roulés)                                      | Défavorable   | Défavorable |
| forme mauvaise  | Défavorable   | Favorable   |
|   |               | Défavorable |

### II.1.13 Impact de la taille des particules de sable

La granulométrie du sable est un facteur important qui influence la qualité du béton. Elle affecte la résistance, la maniabilité et la durabilité du béton.

La granulométrie idéale du sable doit assurer à la fois un volume minimal de vides entre les grains et une surface spécifique minimale.

Une granulométrie trop fine peut entraîner la formation de boules sableuses non imprégnées de pâte de ciment. Une granulométrie trop grossière peut entraîner une diminution de la résistance du béton.

Une étude réalisée par Georges Dreux et Festa (1976) a montré que la granulométrie du sable de 0,15 à 5 mm n'a pas d'impact sur la résistance du béton si sa composition est optimale.

Il est important de noter que la granulométrie n'est pas le seul facteur qui influence la résistance du béton. D'autres facteurs, tels que la composition du béton, son ouvrabilité, le coefficient de compactage du béton frais, la composition minéralogique et la forme des grains, ainsi que leur propreté, doivent également être pris en compte.

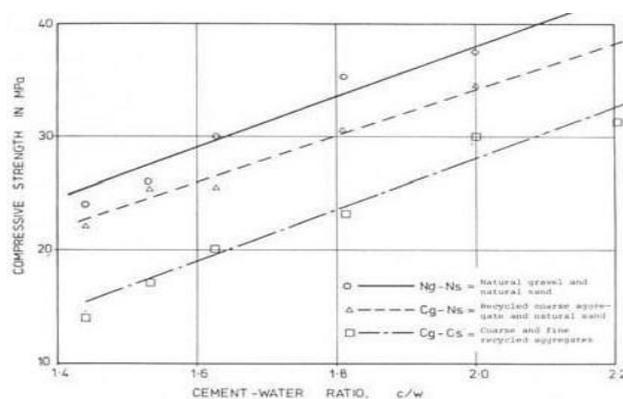
## CHAPITRE II : ATTAQUES SULFATIQUES ET LEUR INFLUENCE DES AGREGATS SUR LES PROPRIETES DE BETON

L'utilisation d'un sable de granulométrie moyenne permet de réduire la consommation de ciment. L'utilisation de sable fin entraîne une augmentation de la consommation en eau et en ciment, tandis que l'utilisation de sable grossier entraîne une légère augmentation des dépenses en ciment. Les études sur l'influence de la granulométrie du sable sur la résistance du béton doivent considérer la granulométrie comme une variable, mais également la variation de la composition **Gordon** [(Birioukov & Remadnia, 2017)].

### II.1.14 Influence des granulats sur le rapport E/C :

Les granulats concassés présentent une surface spécifique plus élevée que les granulats roulés. Cela signifie qu'ils ont plus de surface en contact avec la pâte de ciment. Cette augmentation de la surface spécifique nécessite une quantité d'eau plus élevée pour humidifier les granulats et former une pâte de ciment homogène.

Lorsque le rapport eau/ciment (E/C) est inférieur à 0,4, la résistance à la compression du béton est augmentée de 38 % lorsque des granulats concassés sont utilisés. Cependant, pour un rapport E/C de 0,65, il n'y a pas de variation significative de la résistance [(CALAIS, Thomas Calais, 2013)].



**Figure II -8: Corrélation entre le ratio E/C et la résistance à la compression [Birioukov & Remadnia, 2017].**

### II.1.15 Influence des adjuvants sur la durabilité:

Les adjuvants, tels que les super plastifiants et les accélérateurs, ont un impact sur la vitesse des réactions d'hydratation normales, comme illustré dans la figure "II.7". Les retardateurs, en ralentissant ces réactions chimiques, permettent de réduire la perte d'ouvrabilité à un rapport E/C constant, tandis que les accélérateurs ont l'effet inverse. En revanche, la réduction du rapport E/C,

## CHAPITRE II : ATTAQUES SULFATIQUES ET LEUR INFLUENCE DES AGREGATS SUR LES PROPRIETES DE BETON

recherchée notamment grâce à l'utilisation de réducteurs d'eau, a tendance à accentuer l'augmentation naturelle du seuil de cisaillement.

La principale fonction de ces adjuvants est précisément de réduire la quantité d'eau requise pour obtenir une consistance spécifique, comme illustré dans la figure. «II.10».

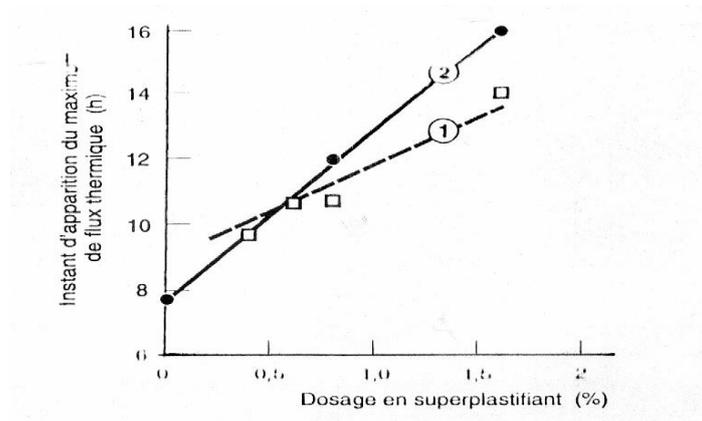


Figure II -9: Influence du dosage en superplastifiant sur la vitesse

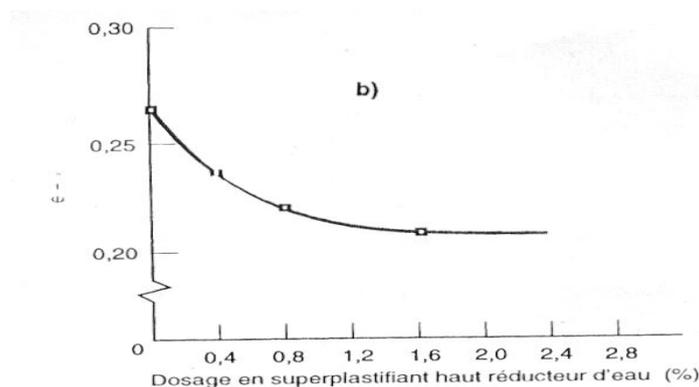


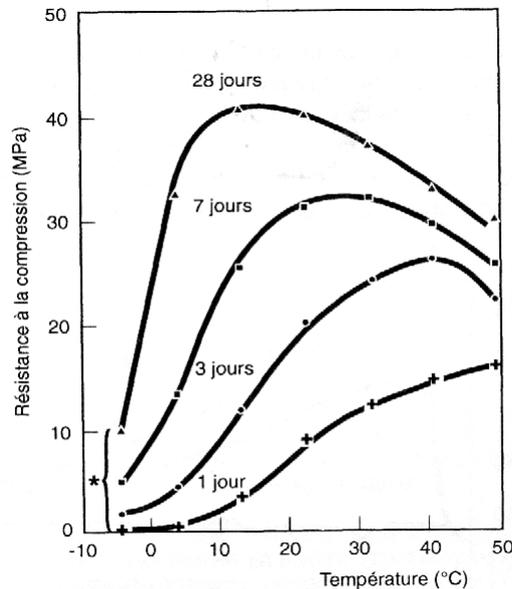
Figure II -10: Influence du dosage en super plastifiant haut réduction d'eau sur la demande en eau d'un mortier (a) et sur la porosité mesurée à l'état frais (b). [Sedran, 2014].

### II.1.16 Influence de la température :

Les essais de béton en laboratoire sont généralement effectués à une température constante, généralement comprise entre 18 et 20 °C. Cette température est choisie car elle correspond à celle des climats tempérés, où la plupart des essais ont été réalisés. Par conséquent, les connaissances de base sur les propriétés du béton frais et durci sont basées sur son comportement à ces températures. Leurs travaux ont révélé qu'un processus de maturation à 60°C entraîne la formation de pores d'un diamètre supérieur à 150 µm, bien plus nombreux que lors d'une maturation à 27°C. La porosité totale varie de manière inverse à cette température, mais ce sont les plus grands pores qui ont un impact sur la perméabilité du béton. Cette perméabilité revêt une grande importance en termes de durabilité.

## CHAPITRE II : ATTAQUES SULFATIQUES ET LEUR INFLUENCE DES AGREGATS SUR LES PROPRIETES DE BETON

La figure "I-31" montre l'influence de la température sur la résistance du béton à 1 jour et à 28 jours. La résistance à 1 jour augmente avec la température, tandis que l'influence de la température est moins marquée pour les âges compris entre trois et 28 jours.



\* Béton fabriqué à 4 °C et conservé immédiatement à - 4 °C.

Figure II -11:L'effet de la température sur la résistance à la compression

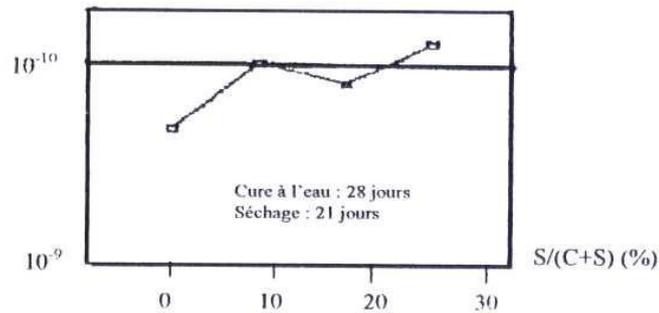
### II.1.17Influence des additions minérales:

#### II.1.17.1Fumée de silice:

Les fumées de silice sont des ajouts minéraux qui peuvent améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton[Sedran, 2014]. Elles sont composées principalement de silice, ce qui leur confère une finesse et une réactivité élevées[VENUAT, 1997].

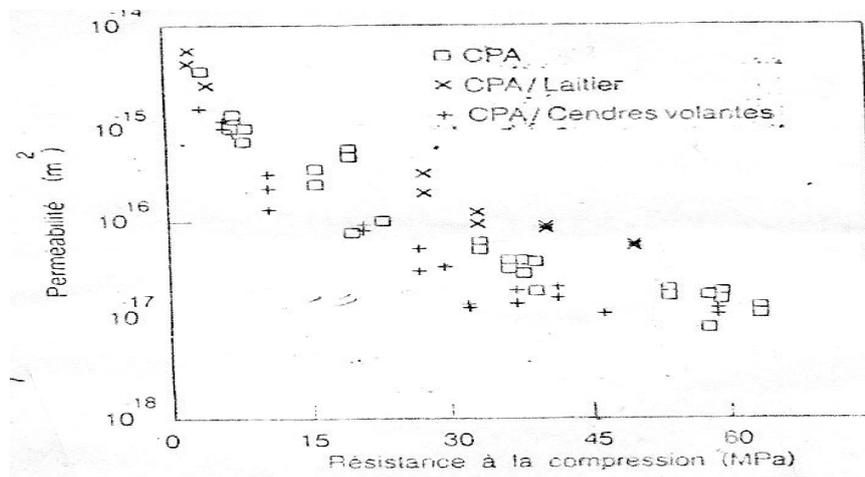
La présence de fumées de silice dans le béton accélère la réaction d'hydratation du ciment, ce qui peut entraîner une amélioration des résistances à court terme.

La finesse des fumées de silice permet également de réduire la perméabilité du béton, ce qui améliore sa durabilité.L'effet de la fumée de silice sur la perméabilité du béton est plus important que sur ses résistances mécaniques.L'ajout de fumées de silice est généralement associé à l'utilisation d'un superplastifiant pour améliorer la maniabilité du béton.La figure "II-9" montre que l'ajout de fumées de silice, associé à un superplastifiant, réduit la perméabilité du béton. En revanche, un effet inverse est observé lorsque le béton ne contient pas de superplastifiant.



**Figure II -12 Coefficient de perméabilité avec fumée de silice et un ajout de réducteur d'eau.[VENUAT, 1997]**

La fumée de silice a un impact significatif sur différents paramètres de la texture des bétons. Elle réduit considérablement la porosité, qui est un paramètre de premier ordre. De plus, elle diminue la taille des pores capillaires (figure "II-13") et densifie l'aurole de transition près des granulats. En plus de cet effet géométrique, les fumées de silice ont également un rôle chimique. Elles réagissent de manière pouzzolanique ou modifient les conditions de germination des hydrates, ce qui entraîne une modification de la structure du C-S-H. Les fumées de silice donnent une texture vitreuse aux hydrates et, à long terme, elles réduisent également la taille des pores du C-S-H en leur présence.



**Figure II -13: Courbe fréquence porosimétrique de pâtes de ciment influence des fumée de silice en présence de fluidifiant[VENUAT, 1997].**

### 11.1.17.2 Cendres volantes et laitier:

Les cendres volantes et le laitier sont des ajouts courants aux bétons. Ils peuvent améliorer la durabilité du béton, mais peuvent également avoir un impact négatif sur ses propriétés mécaniques à court terme.

## CHAPITRE II : ATTAQUES SULFATIQUES ET LEUR INFLUENCE DES AGREGATS SUR LES PROPRIETES DE BETON

Les cendres volantes, en particulier les cendres de houille, ont une activité pouzzolanique. Cela signifie qu'elles peuvent réagir avec la chaux du ciment pour former des produits supplémentaires qui améliorent la résistance du béton à long terme. Cependant, les cendres volantes peuvent également réduire la résistance à court terme du béton.

Le laitier est un sous-produit de la production de l'acier. Il a une activité hydraulique, ce qui signifie qu'il peut réagir avec l'eau pour former du ciment. Le laitier peut améliorer la résistance à court terme et à long terme du béton.

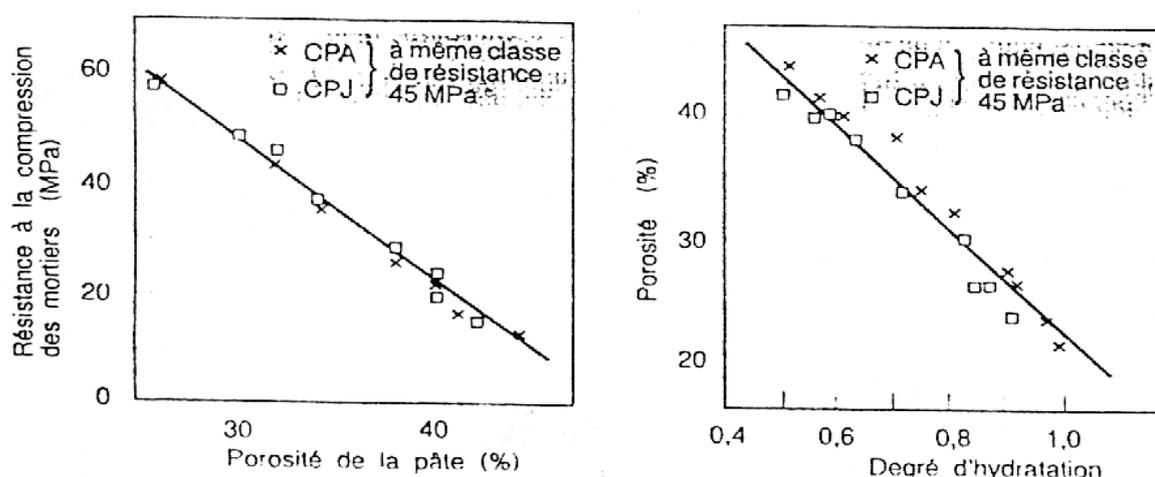
La quantité d'ajouts, la finesse des ajouts et le type de ciment utilisé influencent les propriétés du béton. En général, les bétons contenant des ajouts ont une perméabilité réduite.

### II.1.17.3 Fillers calcaires:

Dans ce chapitre, nous avons expliqué que la qualité du béton est essentielle à sa durabilité. Pour réaliser un béton durable, il est également important de choisir les bons constituants en fonction de l'environnement dans lequel le béton sera utilisé.

Les ciments aux fillers calcaires produisent des hydrates similaires à ceux de la CPA. Par conséquent, la quantité de ciment n'est pas le facteur le plus important pour la qualité du béton. L'important est la quantité d'hydrates, la porosité et la distribution de la taille des pores.

Des études ont montré que les caractéristiques du béton, pour une classe de résistance donnée, sont identiques pour un CPA et un CPJ aux fillers calcaires. La porosité et le degré d'hydratation sont corrélés de la même manière, et la résistance et la porosité sont également corrélées de la même manière pour les deux catégories de ciment. (figure «II-14»).



**Figure II -14: Les liens entre la porosité, le degré d'hydratation de la pâte pure et la résistance du mortier présentent des similitudes pour les ciments Portland ordinaires et les ciments Portland avec des charges calcaires de la même classe de résistance [Jacques Baron et al., 1992].**

### II.1.18 Conclusion

Dans ce chapitre bibliographique, nous avons étudié les caractéristiques des matériaux utilisés pour construire un béton et leur influence sur les propriétés du béton.

Nous avons décrit les différentes phases présentes dans le béton, à savoir la pâte de ciment, les granulats et l'auréole de transition (ITZ). , nous nous sommes intéressés aux attaques sulfatiques du béton et à l'influence des granulats sur les propriétés du béton.

L'agression chimique par les sulfates peut entraîner la dégradation du béton. Cette dégradation se déroule en deux étapes :

- La lixiviation des constituants calciques du ciment, qui entraîne une perte de résistance du béton.
- La précipitation de sels sulfatés, qui peut provoquer une expansion du béton.

L'expansion du béton est due à la formation de deux sels sulfatés : le gypse et l'ettringite.

- Le gypse est un sel non expansif. Il contribue à la fissuration du béton en raison de la lixiviation des constituants calciques.
- L'ettringite est un sel expansif. Elle est responsable des dommages les plus importants au béton.

La présence de granulats calcaires dans le béton peut aggraver l'attaque sulfatique.

En effet, les granulats calcaires peuvent réagir avec les sulfates pour former de l'ettringite.

Pour limiter l'attaque sulfatique du béton, il est important de choisir des granulats non calcaires et d'utiliser un ciment résistant aux sulfates.

**PARTIE II**  
**METHODES EXPERIMENTALES**  
**ET RESULTATS**

**CHAPITRE III :**

**PROPRIETES DES MATERIAUX EMPLOYES ET LES  
PROCEDURES D'EVALUATION**

### III.1. Introduction

Le travail présenté dans ce chapitre de thèse vise à caractériser les différents matériaux et composants utilisés, ainsi qu'à déterminer les caractéristiques qui nous permettront de procéder à la formulation du béton. Nous exposerons les calculs de formulation de notre béton, y compris l'ajout d'un minéral actif (pouzzolane), l'utilisation de trois types de graviers de la région de Biskra, du ciment CRS, ainsi que la préparation de deux milieux agressifs ( $H_2SO_4$ , HCL) utilisés dans cette étude.

Ce chapitre constitue un fondement essentiel pour l'analyse et l'évaluation ultérieures des performances du béton dans différentes conditions. En comprenant les propriétés et la composition des matériaux impliqués, nous pourrions identifier les forces et les faiblesses potentielles du béton formulé, ainsi que sa durabilité et sa résistance face à des environnements agressifs.

Les calculs de formulation du béton fourniront une compréhension globale des proportions et des ratios des différents composants, garantissant la résistance et la maniabilité souhaitées du produit final. De plus, l'ajout d'un minéral actif, tel que la pouzzolane, vise à améliorer les performances et la durabilité du béton.

Par ailleurs, le choix des graviers de la région de Biskra et l'utilisation de milieux agressifs spécifiques, tels que  $H_2SO_4$  et HCL, permettront d'étudier les réactions et les propriétés du béton dans des conditions environnementales variées et exigeantes.

### III.2 Matériaux utilisés :

Nous avons utilisé les matériaux locaux et les milieux agressifs, leurs caractéristiques sont étudiées et préparées expérimentalement.

### III.3 Caractéristiques des matériaux :

#### III.3.1 Les granulats

nous avons choisi trois sources de matériaux (granulats) de la région de Biskra et le sable naturel.

Pour les graviers, nous avons sélectionné :

- Le gravier de la carrière d'El-Hadjeb (C3)
- Le gravier de la carrière d'Ain-Touta (C2)
- Le gravier de la carrière de Ziani (C1)

## CHAPITRE III : PROPRIETES DES MATERIAUX EMPLOYES ET LES PROCEDURES D'EVALUATION

---

Le gravier de la carrière de Ziani (C1) est constitué de calcaires du crétacé supérieur (turonien, sénonien). Ces calcaires sont chimiquement purs et constituent un excellent matériau pour la fabrication de béton.

Le gravier de la carrière d'Ain-Touta (C2) est constitué de calcaires massifs et compacts de couleur grise. Il est également un bon matériau pour la fabrication de béton.

Le gravier de la carrière d'El-hadjeb (C3) est constitué de formations sédimentaires appartenant au quaternaire moyen. Il est moins résistant que les deux autres types de gravier, mais il est tout de même utilisable pour la fabrication de béton. Pour le sable, nous avons sélectionné du sable naturel (SN) 0/5.

L'analyse granulométrique est une méthode employée pour déterminer la taille et la répartition des particules dans un matériau. Cette méthode fait appel à une série de tamis avec des ouvertures de dimensions décroissantes de haut en bas. Le matériau est déposé sur le dessus des tamis, puis les particules sont triées en secouant les tamis.

Dans le cadre de ce projet, l'analyse granulométrique a été conduite en suivant la norme N.N. AFNOR. Les courbes granulométriques des granulats grossiers et fins utilisés sont illustrées dans la Figure III -3.

Le module de finesse du sable naturel utilisé s'élève à 2,64, ce qui est une valeur acceptable pour la préparation d'un béton hydraulique.

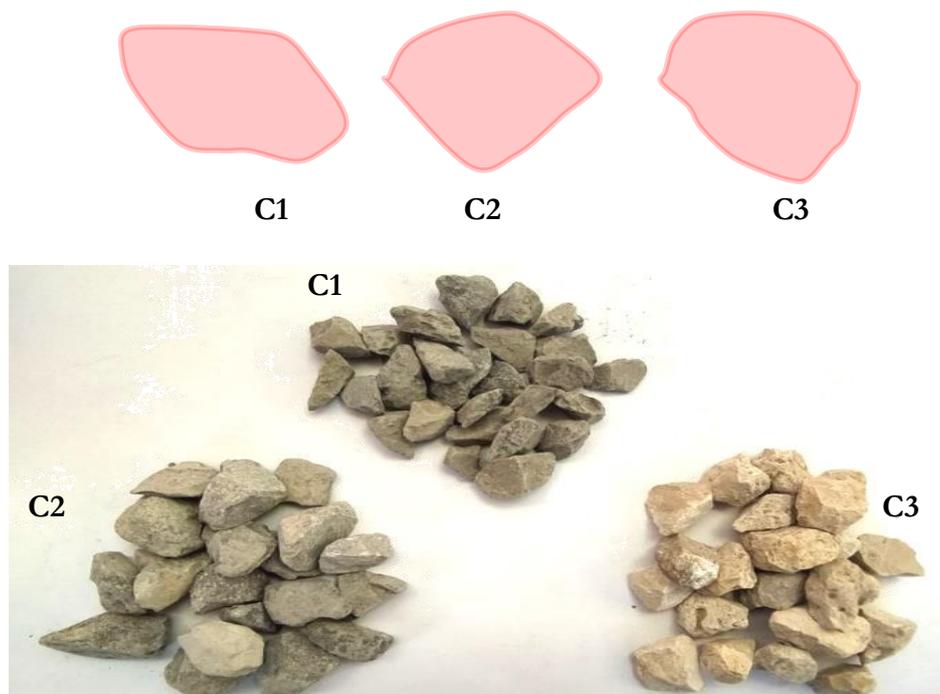


Figure III -1 : Différentes formes de granulats grossiers utilisés.

## CHAPITRE III : PROPRIETES DES MATERIAUX EMPLOYES ET LES PROCEDURES D'EVALUATION

---

Le degré de circularité (C) est l'écart par rapport à un cercle parfait est calculé à l'aide de l'équation suivante :  $C = (4\pi S/P^2)$ . Où P et S sont respectivement le périmètre et l'aire de la projection bidimensionnelle d'une particule. Un objet circulaire aura une valeur de circularité de  $C=1$  et les autres formes auront des valeurs de circularité inférieures à 1 ( $C<1$ ). Le paramètre morphologique (degré de circularité) des agrégats est caractérisé avec un logiciel spécialisé de traitement et d'analyse d'images appelé « Image J » ((Abràmoff, Magalhães, & Ram, 2004)) (figure III.-2). Ainsi, une moyenne des valeurs C de 20 grains de chaque type de gros granulat a été réalisée.

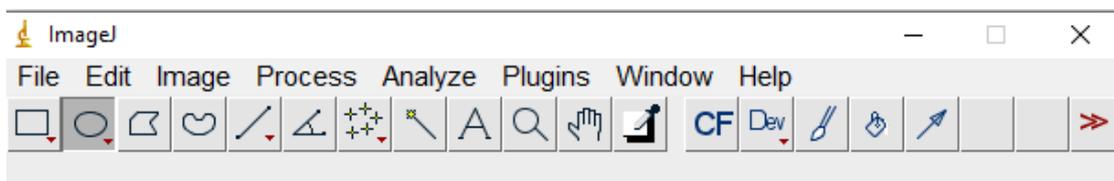


Figure III -2 : Fenêtres principales de l'image J.

### III.4 Proportions de mélange

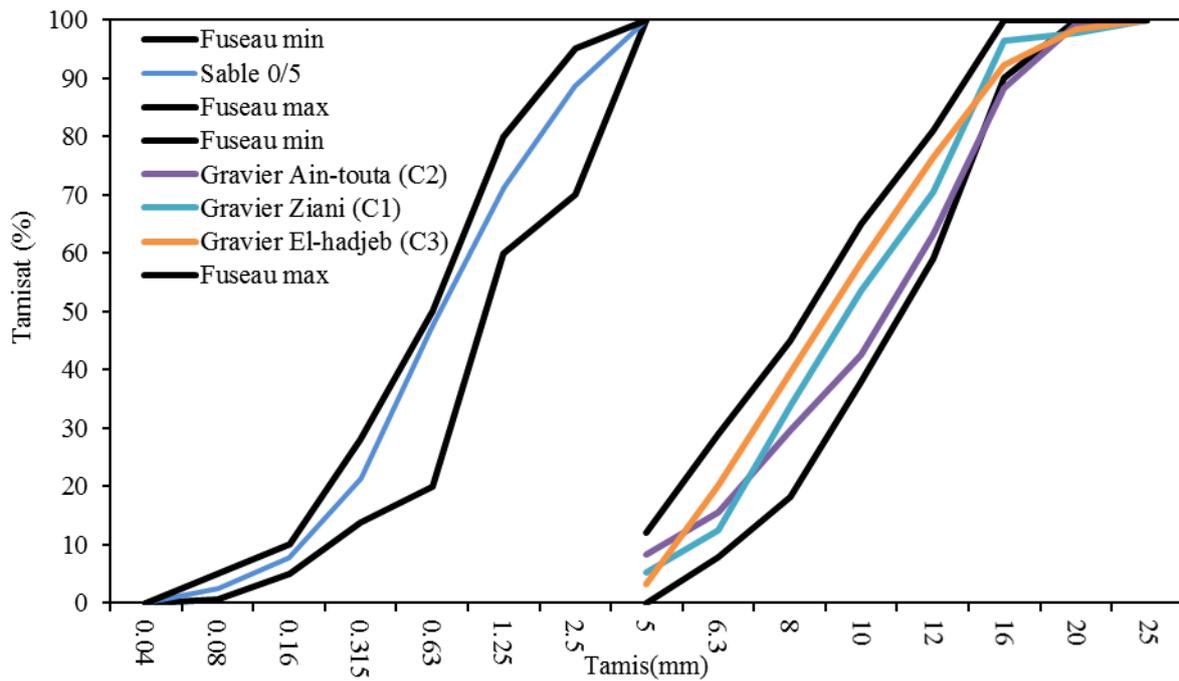
Une méthode Dreux Gorisse a été choisie pour formuler les différents mélanges de béton. la poudre de pouzzolane a été utilisée comme additif au ciment. Avec des teneurs de 10%, 15% et 20% en fonction du poids du ciment. De plus, un rapport fixe eau/liant est égal à 0,53. Les bétons produits ont été maintenus dans les moules pendant 24 h. Ensuite, tous les spécimens ont été placés dans de l'eau à  $23 \pm 2$  °C jusqu'au moment du test.

Le tableau III -1 montre la composition de tous les mélanges selon les différentes teneurs en pouzzolane et les trois degrés de circularité (C) des granulats grossiers.

## CHAPITRE III : PROPRIETES DES MATERIAUX EMPLOYES ET LES PROCEDURES D'EVALUATION

**Tableau III -1 : Proportions des mélanges.**

|    | Mélange<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | Ciment | Eau | sable<br>(0/5) | Gravier<br>(5/25) | PZ   |
|----|---------------------------------|--------|-----|----------------|-------------------|------|
| 1  | C1                              | 393    | 210 | 479            | 1208              |      |
| 2  | C2                              |        |     |                |                   |      |
| 3  | C3                              |        |     |                |                   |      |
| 4  | C1-10PZ                         |        |     |                |                   | 39.3 |
| 5  | C2-10PZ                         |        |     |                |                   |      |
| 6  | C3-10PZ                         |        |     |                |                   |      |
| 7  | C1-15PZ                         |        |     |                |                   | 58.9 |
| 8  | C2-15PZ                         |        |     |                |                   |      |
| 9  | C3-15PZ                         |        |     |                |                   |      |
| 10 | C1-20PZ                         |        |     |                |                   | 78.6 |
| 11 | C2-20PZ                         |        |     |                |                   |      |
| 12 | C3-20PZ                         |        |     |                |                   |      |



**Figure III -3 : Courbe granulométrique des différents granulats utilisés**

### **III.5 Masses volumiques**

Les densités apparentes et absolues des divers granulats analysés ont été déterminées conformément aux normes NF P 18-554 et 555, et les données sont synthétisées dans le tableau III -2.

**Tableau III -2 Densités des agrégats examinés**

|  | C1   | C2   | C3   | SN   |
|--|------|------|------|------|
| Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> ) | 1410 | 1380 | 1360 | 1600 |
| Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )   | 2610 | 2710 | 2570 | 2650 |

### **III.6 Absorption d'eau**

Le coefficient d'absorption est une mesure de la capacité d'un matériau à absorber l'eau. Il est déterminé en mesurant la masse d'un échantillon avant et après immersion dans l'eau pendant 24 heures à 22°C.

**Tableau III -3 : Les résultats d'absorption d'eau pour les granulats étudiés.**

| <b>Granulats</b> | <b>C1</b> | <b>C2</b>   | <b>C3</b>   | <b>SN</b> |
|------------------|-----------|-------------|-------------|-----------|
| <b>Abs %</b>     | <b>1</b>  | <b>0.48</b> | <b>1.02</b> | <b>12</b> |

Dans le cadre de ce projet, le coefficient d'absorption des granulats a été déterminé conformément à la norme NF P 18-555. Les résultats de l'essai sont présentés dans le tableau III -3

### **III.7 Résistance à l'abrasion (Los – Angeles)**

La dureté des granulats est un facteur important pour la durabilité du béton. Elle a été déterminée par l'essai de Los Angeles, conformément à la norme NF P 18-573.

Les résultats de l'essai sont présentés dans le tableau III -4.

**Tableau III -4 : Résistance à l'abrasion (Los – Angeles)**

|                 | C1    | C2    | C3    |
|-----------------|-------|-------|-------|
| Los Angeles (%) | 21.78 | 22.10 | 27.04 |

### **III.8 Equivalent de sable**

L'essai d'équivalent de sable est un essai courant pour évaluer la propreté du sable. Il consiste à séparer les particules fines, telles que les argiles et les limons, des éléments sableux plus grossiers.

L'essai a été réalisé conformément à la norme NF P18 – 598. Les résultats de l'essai sur le sable étudié sont présentés dans le tableau III -5.

**Tableau III -5 équivalent de sable**

| Type de sable          | ESV%  | ES%   | Nature et qualité du sable                                       |
|------------------------|-------|-------|--|
| Sable 0/5<br>« lioua » | 70.24 | 67.76 | Sable légèrement argileux, de propretés admissibles pour béton . |

### **III.9 Compacité et porosité des granulats**

La compacité est le rapport entre le volume de matière solide et le volume total du béton. La porosité, quant à elle, est définie comme étant la différence entre 1 et la compacité.

«  $P = 1 - C$  ». L'essai a été réalisé conformément à la norme NFP18-554. Les résultats sont présentés dans le tableau III -6.

**Tableau III -6 : Densité et poreux des agrégats**

|                                      | Gravier |    |    | Sable |
|--------------------------------------|---------|----|----|-------|
|                                      | C1      | C2 | C3 | SN    |
| Compacité (%) $C = MV_{App}/MV_{Ab}$ | 54      | 51 | 52 | 60    |
| Porosité (%) $P = 1 - C$             | 46      | 49 | 48 | 40    |

### **III.10 Analyse chimique des granulats utilisés**

L'examen des granulats est essentiel pour évaluer la présence éventuelle de substances nuisibles pouvant impacter la qualité du béton. Les données chimiques proviennent des rapports géologiques spécifiques à chaque zone géographique.

Le tableau III -7 résume la composition chimique des différents granulats utilisés

**Tableau III -7 :Propriétés chimiques et physiques des granulats.**

|  | C1    | C2    | C 3   | sable |
|--|-------|-------|-------|-------|
| CaO                                    | 47.43 | 40.10 | 43.26 | 1.63  |
| SiO <sub>2</sub>                       | 7.20  | 13.4  | 10.30 | 90.46 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 1.29  | 1.02  | 0.09  | 1.38  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 1.24  | 0.81  | 0.26  | 1.92  |
| MgO                                    | 1.73  | 3.4   | 4.21  | 0.39  |
| Na <sub>2</sub> O                      | 0.58  | 0.09  | 0.05  | -     |
| K <sub>2</sub> O                       | 0.23  | 0.1   | 0.07  | 0.22  |
| SO <sub>3</sub>                        | 1.01  | 0.09  | 1.12  | 0.2   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>          | 0.43  | -     | -     | -     |
| TiO <sub>2</sub>                       | 0.07  | -     | -     | -     |
| P.A.F                                  | 38.79 | 40.9  | 41.43 | 2.44  |
| Densité<br>absolue(kg/m <sup>3</sup> ) | 2610  | 2710  | 2570  | 2550  |
| Circularité (C)                        | 0.72  | 0.73  | 0.76  | -     |

# CHAPITRE III : PROPRIETES DES MATERIAUX EMPLOYES ET LES PROCEDURES D'EVALUATION

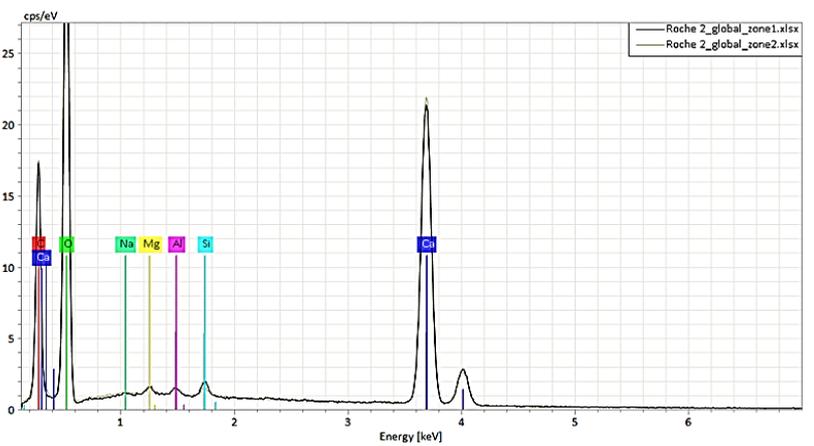
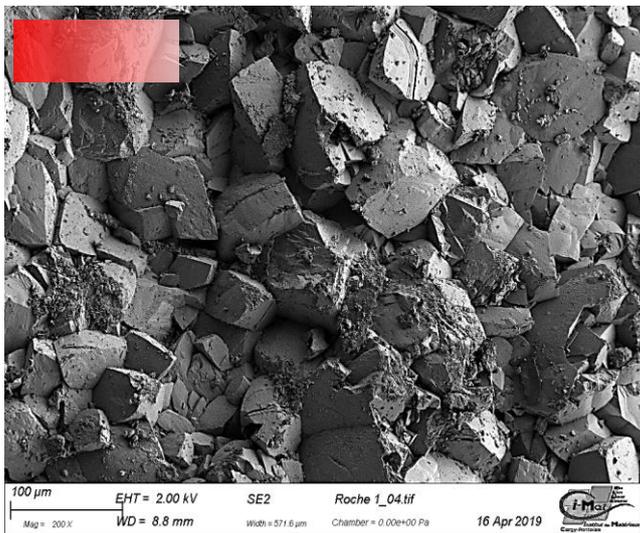
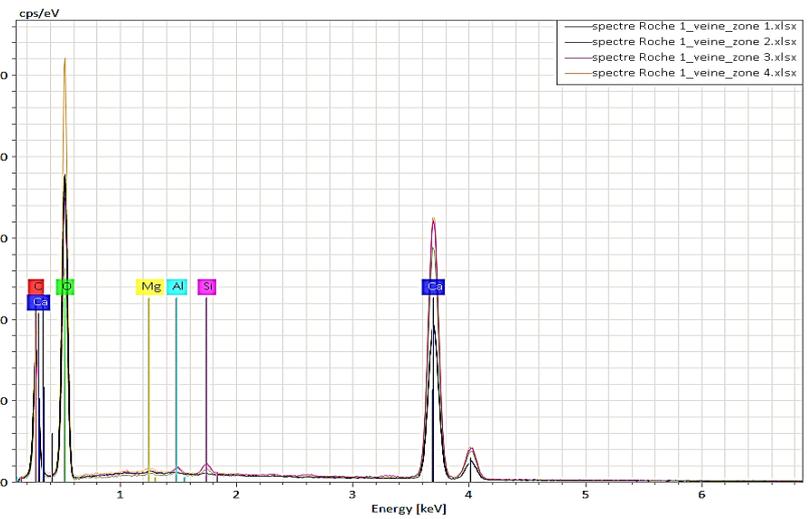
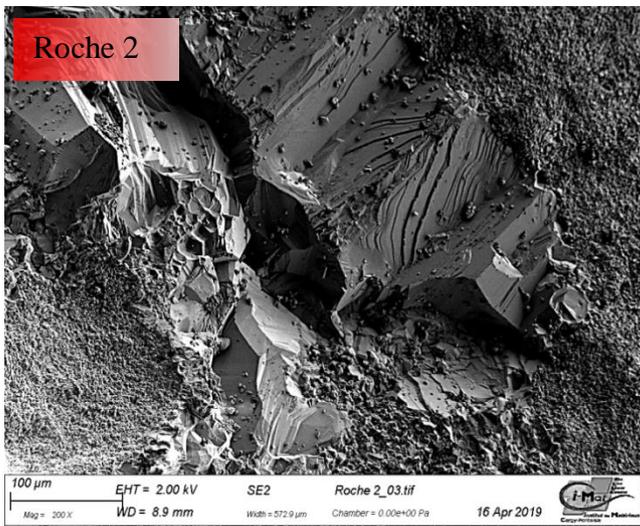
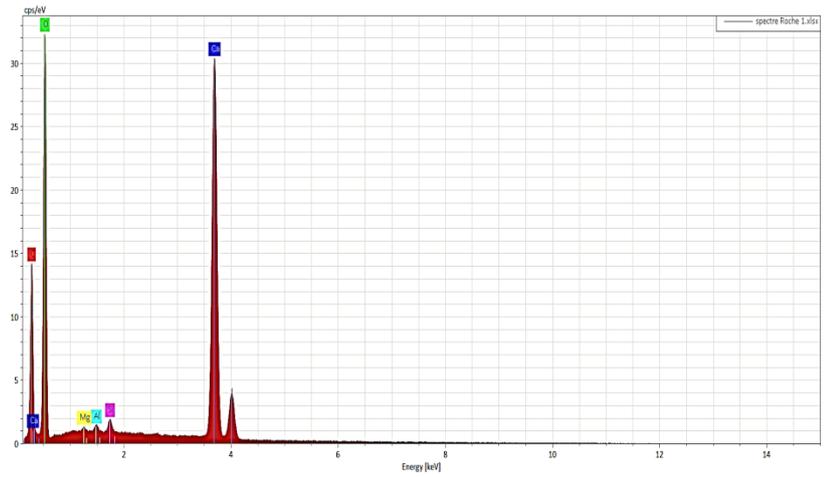
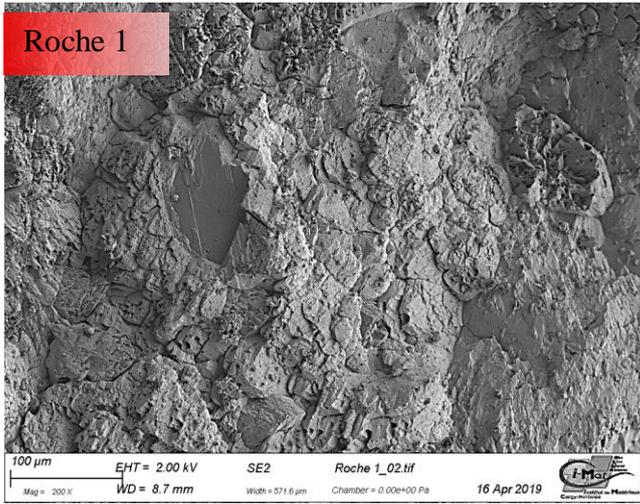


Photo III -I. Photo microstructurale des différentes roches utilisées("L2MGC (Laboratoire de Mécanique et de Matériaux du Génie Civil) à l'Université de Cergy-Pontoise,").

### **CHAPITRE III : PROPRIETES DES MATERIAUX EMPLOYES ET LES PROCEDURES D'EVALUATION**

---

Les photos III -I représentent une analyse microstructurale des différentes roches utilisées dans cette étude, réalisée à l'aide d'un microscope électronique à balayage. Cette technique permet d'observer les caractéristiques et les détails de la structure interne des échantillons de roches à une échelle microscopique.

En examinant attentivement les images, on peut observer divers aspects de la microstructure des roches. Les détails tels que la texture, la forme, la taille et la distribution des grains minéraux peuvent être discernés. De plus, les interactions entre les différents minéraux présents dans les échantillons de roches peuvent également être visualisées.

L'analyse microstructurale révèle des informations importantes sur la formation et l'évolution des roches, ainsi que sur leurs propriétés physiques et mécaniques. Par exemple, la présence de fissures, de pores ou d'autres caractéristiques de la microstructure peut indiquer la susceptibilité de la roche à la fracturation ou à la déformation.

En combinant ces observations microscopiques avec d'autres analyses et essais, il est possible de mieux comprendre les propriétés et le comportement des roches étudiées. Ces données peuvent servir à évaluer la résistance, la durabilité et d'autres caractéristiques pertinentes des matériaux rocheux dans le cadre spécifique de cette étude.

### III.11 Ciment :

#### III.11.1 Caractéristiques du ciment utilisé :

Présentation du ciment CRS pour milieu agressif (Mokaouem):

C'est un ciment de haut fourneau CEMI / 42.5N ES,



**Photo III.2 :** Ciment utilisé CEM I / 42,5.

#### III.11.2 Caractéristiques de Ciment :

**Tableau III -8 : Caractéristiques chimiques de Ciment**

|                                      | Ciment |
|--------------------------------------|--------|
| CaO                                  | 64.31  |
| SiO <sub>2</sub>                     | 21.57  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 4.37   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 5.27   |
| MgO                                  | 1.00   |
| Na <sub>2</sub> O                    | 0.24   |
| K <sub>2</sub> O                     | 0.38   |
| SO <sub>3</sub>                      | 1.62   |
| P.A.F                                | 0.98   |
| SSB (m <sup>2</sup> /kg)             | 367.0  |
| Densité absolue (kg/m <sup>3</sup> ) | 3160   |

**CHAPITRE III : PROPRIETES DES MATERIAUX EMPLOYES ET LES PROCEDURES D'EVALUATION**

**Tableau III -9 Propriétés physique et mécanique**

|   |             |
|---|-------------|
| Consistance normale de la pâte de ciment(%)       | 25-28.5     |
| Finesse de Blain                                  | 4150-5250   |
| Retrait à 28 jours en $\mu\text{m/n}$             | <1000       |
| Expansion en mm                                   | 0.3-2.5     |
| Régler l'heure de démarrage à 20°C (mn)           | 140-195     |
| Fin du temps de prise à 20° C (mn)                | 195-290     |
| La résistance à la compression en MPa de 02 jours | $\geq 10$   |
| Résistance à la compression MPa de 28 jours       | $\geq 42.5$ |

**Tableau III -10 Caractéristiques minéralogique**

|   |        |
|---|--------|
| La proportion de la magnésie ( MgO ) dans le ciment est inférieure ou égale à . | 5 %    |
| La teneur en sulfates (SO3) est inférieure ou égale à                           | 3,5 %. |
| La perte au feu est inférieure ou égale à                                       | 4%     |
| Le résidu insoluble est inférieur ou égal à                                     | 3%     |
| La teneur en C3S est inférieure ou égale à                                      | 50%    |
| La teneur en C3A est inférieure ou égale à                                      | 5%     |
| La somme de (C4AF+2C3A) est inférieure ou égale à                               | 22%    |

**III.11.3 Masse volumique apparente:**

**Tableau III -11 : Masse volumique apparente du ciment CRS.**

| Ciment | M <sub>2</sub> (kg) | M <sub>1</sub> (kg) | V (l) | $\gamma$ (kg/l) | $\gamma_{\text{moy}}$ (kg/l) |
|--------|---------------------|---------------------|-------|-----------------|------------------------------|
| 1      | 1,169               | /                   | 1     | 1,169           | 1,190                        |
| 2      | 1,213               |                     |       | 1,213           |                              |
| 3      | 1,188               |                     |       | 1,188           |                              |

**III.12 Les ajouts minéraux actifs : pouzzolane, laitier, calcaire.**

**III.12.1 Pouzzolane :**

La source de la wilaya d'Ain t'émouchent.

**Tableau III -12:L'analyse chimique et minéralogique de Pouzzolane fiche technique (cimenterie).**

| Composition          | Constituée                     | Pourcentage |
|----------------------|--------------------------------|-------------|
| <b>Chimique</b>      | SiO <sub>2</sub>               | 38.73 %     |
|                      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16.75%      |
|                      | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.21 %     |
|                      | CaO                            | 15.18 %     |
|                      | MgO                            | 3.24 %      |
|                      | SO <sub>3</sub>                | 0.39 %      |
|                      | K <sub>2</sub> O               | 1.60 %      |
|                      | Cl                             | 0.013 %     |
|                      | Paf                            | 11.87 %     |
| <b>Minéralogique</b> | LSF                            | 33.01       |
|                      | AF                             | 106.68      |
|                      | MS                             | 3.01        |

**III.12.2 Laitier :**

La source de la wilaya d'Annaba

**Tableau III -13 :L'analyse chimique et minéralogique de laitier fiche technique(cimenterie)**

| Composition     | Constituée                     | Pourcentage |
|-----------------|--------------------------------|-------------|
| <b>Chimique</b> | SiO <sub>2</sub>               | 30.62 %     |
|                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10.12 %     |
|                 | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.61 %      |
|                 | CaO                            | 30.68 %     |
|                 | MgO                            | 3.54 %      |
|                 | SO <sub>3</sub>                | 1.99 %      |

**CHAPITRE III : PROPRIETES DES MATERIAUX EMPLOYES ET LES PROCEDURES D'EVALUATION**

|                      |                  |         |
|----------------------|------------------|---------|
|                      | K <sub>2</sub> O | 0.62 %  |
|                      | Cl               | 0.018 % |
|                      | Paf              | 21.81 % |
| <b>Minéralogique</b> | LSF              | 33.01   |
|                      | AF               | 106.8   |
|                      | MS               | 3.01    |

**III.12.3 Calcaire :**

La source de la wilaya de Sétif (Ain kbira),

**Tableau III -14 :L'analyse chimique et minéralogique de Calcaire fiche technique (cimenterie).**

| <b>Composition</b>   | <b>Constituée</b>              | <b>Pourcentage</b> |
|----------------------|--------------------------------|--------------------|
| <b>Chimique</b>      | SiO <sub>2</sub>               | 11.29 %            |
|                      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.25 %             |
|                      | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.76 %             |
|                      | CaO                            | 47.25 %            |
|                      | MgO                            | 0.84 %             |
|                      | SO <sub>3</sub>                | 0.52 %             |
|                      | K <sub>2</sub> O               | 0.057 %            |
|                      | Cl                             | 0.002 %            |
|                      | Paf                            | 38.04 %            |
| <b>Minéralogique</b> | LSF                            | 165.30             |
|                      | AF                             | 1.96               |
|                      | MS                             | 7.12               |

### **III.13 L'eau de gâchage :**

Nous avons utilisés pour le gâchage de notre béton l'eau de robinet disponible au niveau de notre université, d'où ces caractéristiques physico-chimiques sont les suivants :

**Tableau III -15 :Analyse chimique de l'eau utilisée pour le gâchage.**

| <b>Paramètre</b>            | <b>Quantité</b>              | <b>Commentaire</b>                |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| pH                          | 8.18                         | Acceptable pour le gâchage.       |
| Conductivité                | 1250 $\mu\text{s}/\text{cm}$ | .....                             |
| Taux de ( $\text{Cl}^-$ )   | 0.24mg/l                     | 0.05 à 0.50                       |
| Taux de ( $\text{NO}_2^-$ ) | 0,15 mg/l                    | > à la concentration max<br>(0.1) |
| Taux de ( $\text{NO}_3^-$ ) | 1,8 mg/l                     | <à la concentration max<br>(50)   |
| Résidu sec                  | 100 mg/l                     | Traces non nuisible.              |

L'analyse chimique de l'eau de gâchage a été réalisée au laboratoire de la chimie Les résultats obtenus à montrer que l'eau testée est apte pour la confection du béton.

### **III.14 Etude de la durabilité des bétons à base des matériaux locaux**

Pour mieux analyser l'effet d'un milieu agressif sur la durabilité des bétons on a opté pour un milieu agressif constituée d'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , et d'acide chlorhydrique HCL avec une concentration de 5%.

## CHAPITRE III : PROPRIETES DES MATERIAUX EMPLOYES ET LES PROCEDURES D'EVALUATION

---

### III.14.1 Acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

√ Nom IUPAC : acide sulfurique 95%

√ Densité: 1,84 g/cm

√ Masse molaire : 98,079 g/mol

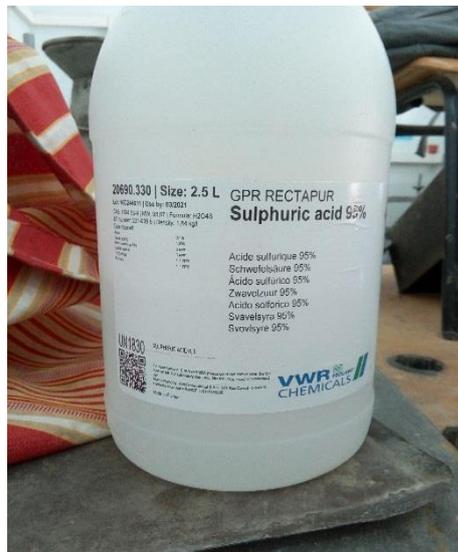


Photo III.3 : acide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

### III.14.2 Acide chlorhydrique HCL

√ Nom IUPAC: acide chlorhydrique 37%.

√ Densité: 1,18 g/cm

√ Masse molaire : 36,4609 g/mol

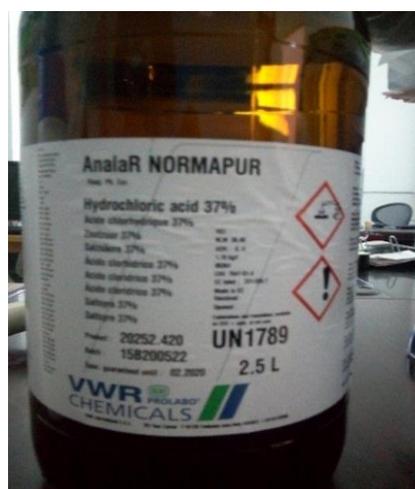


Photo III.4 : acide HCL

**CHAPITRE III : PROPRIETES DES MATERIAUX EMPLOYES ET LES PROCEDURES D'EVALUATION**

**Tableau III -16 : Dépense en matériaux de classe 42.5 de béton à granularité continue pour 1m3.**

| Région                                 |         | C1     | C2     | C 3    |
|--|---------|--------|--------|--------|
| matériau                               |         |        |        |        |
| Ciment (kg/m <sup>3</sup> )            |         | 350    | 350    | 350    |
| Eau(l/m <sup>3</sup> )                 |         | 201,25 | 201,25 | 201,25 |
| Sable (kg/m <sup>3</sup> )             |         | 655,56 | 652,97 | 634,87 |
| gravier<br>(kg/m <sup>3</sup> )        | (8/15)  | 400,28 | 398,08 | 410,3  |
|  | (15/25) | 744,38 | 739,29 | 761,99 |
| Pouzzolane 20%<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |         | 70     | 70     | 70     |

En a effectué une majoration en volume de 20% sur les dépenses des différents constituants, les résultats sont regroupés dans le tableau.

**Tableau III -17 : Dépense en matériaux de classe 42.5 de béton à granularité continue pour 1m3(après majoration 20%).**

| Région                      |  | C1     | C2     | C 3    |
|-----------------------------|--|--------|--------|--------|
| matériau                    |  |        |        |        |
| Ciment (kg/m <sup>3</sup> ) |  | 420    | 420    | 420    |
| Eau (l/m <sup>3</sup> )     |  | 241,5  | 241,5  | 241,5  |
| Sable (kg/m <sup>3</sup> )  |  | 786,67 | 783,56 | 761,84 |

**CHAPITRE III : PROPRIETES DES MATERIAUX EMPLOYES ET LES PROCEDURES D'EVALUATION**

|  |         |        |        |        |
|--|---------|--------|--------|--------|
| Gravier<br>(kg/m <sup>3</sup> )        | (8/15)  | 480,98 | 477,69 | 492,36 |
|  | (15/25) | 893,25 | 887,15 | 914,39 |
| Pouzzolane 20%<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |         | 84     | 84     | 84     |

**Tableau III -18 : Dépense en matériaux de classe 42.5 de béton à granularité continue pour 1 éprouvette (10X10X10) cm<sup>3</sup>.**

| Région                                 |         | C1     | C2     | C 3    |
|--|---------|--------|--------|--------|
| matériau                               |         |        |        |        |
| Ciment (kg/m <sup>3</sup> )            |         | 0,42   | 0,42   | 0,42   |
| Eau (l/m <sup>3</sup> )                |         | 0,2415 | 0,2415 | 0,2415 |
| Sable (kg/m <sup>3</sup> )             |         | 0,7866 | 0,7835 | 0,7618 |
| Gravier<br>(kg/m <sup>3</sup> )        | (8/15)  | 0,4809 | 0,4776 | 0,4923 |
|  | (15/25) | 0,8932 | 0,8871 | 0,9143 |
| Pouzzolane 20%<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |         | 0,084  | 0,084  | 0,084  |

**III.15 Matériels et essais:**

**III.15.1 Béton à l'état frais :**

Le béton est un matériau composite constitué de ciment, de sable et de graviers. Il existe trois types d'essais sur le béton : les essais d'études, les essais de conformité et les essais de contrôle.

Les essais d'études sont réalisés sur du béton fabriqué en laboratoire pour étudier ses propriétés. Les essais de conformité et de contrôle sont effectués sur du béton préparé sur chantier pour s'assurer qu'il répond aux exigences des normes.

### **III.15.2 Malaxage:**

Pour fabriquer du béton, les constituants sont introduits dans le malaxeur dans l'ordre suivant :

- Les gros éléments (graviers)
- Le liant (ciment)
- Le sable

Après un malaxage à sec d'une minute, l'eau de gâchage est ajoutée et le malaxage est poursuivi pendant deux minutes.

L'affaissement du béton est ensuite mesuré à chaque fois par un cône d'Abrams jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur souhaitée.

### **III.15.3 Affaissement au cône d'Abrams : SLUMP TEST**

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est la méthode la plus fréquemment employée pour évaluer la consistance du béton frais. Sa mise en œuvre est simple et il convient aux bétons dont la taille maximale des granulats n'excède pas 40 mm.

Le déroulement de l'essai est le suivant :

1. Le béton est versé dans un cône d'Abrams légèrement préalablement humidifié et huilé, en trois couches de même épaisseur.
2. Chaque couche est compactée en effectuant 25 piqûres avec une tige de piqûrage de 16 mm de diamètre.
3. La surface supérieure du béton est nivelée en faisant rouler la tige de piqûrage sur le bord supérieur du cône.
4. Le cône est retiré, et la mesure de l'affaissement est réalisée à l'aide d'un dispositif de mesure spécifique. Le résultat est ensuite arrondi au centimètre près.



**Photo III -5:** Mesure de l'affaissement.

#### **III.15.4 Masse volumique à l'état frais:**

Pour déterminer la masse volumique du béton frais, procédez comme suit :

1. Remplissez un récipient de volume connu de béton frais, en deux couches.
2. Araser le dessus du récipient.
3. Pesez le récipient rempli du béton. La masse volumique du béton frais est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{m_t - m}{v}$$

#### **III.16 Béton à l'état durci :**

Le béton, une fois qu'il a atteint son état de solidité monolithique suite à la prise, demeure en constante transformation. Cette transformation découle principalement de deux facteurs :

1. Les réactions d'hydratation du ciment, qui se prolongent sur plusieurs années. Ces réactions contribuent à renforcer la cohésion et à modifier les dimensions du matériau.
2. Les fluctuations de l'environnement environnant, qui induisent des changements progressifs dans la structure du béton durci.

##### **III.16.1 Durcissement du béton :**

Le durcissement du béton résulte de l'hydratation du ciment, un processus qui se déroule progressivement. La résistance mécanique du béton augmente avec le temps, mais cette augmentation devient de plus en plus lente en raison de la diminution de la vitesse d'hydratation du ciment.

### **III.16.2 Mode de conservation de béton :**

Le degré d'humide du milieu de conservation a une influence importante sur la résistance du béton.

Notre béton est conserve dans l'eau à une température de 20°C.



**Photo III -6 :** Bac de conservation.

### **III.16.3 Masse volumique à l'état durci:**

Cet essai consiste à mesuré le poids du l'éprouvette (m) sur le volume de cette (v).

$$\rho_{dur} = m / v$$

**m:** masse du l'éprouvette de béton.

**v:** le volume du l'éprouvette cubique.

### **III.17 Essai sur la durabilité:**

#### **III.17.1 Procédure de l'essai:**

Pour Pour évaluer la résistance chimique du béton, des échantillons de béton de 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup> ont été confectionnés conformément à la norme ENV 197-1.

Après avoir été démoulés à 24 heures, ces échantillons ont été immergés dans de l'eau à 20 °C ± 2 °C pendant une période de 28 jours.

À la fin de cette période de cure de 28 jours, les échantillons ont été pesés afin de déterminer leur masse avant d'être soumis à des attaques chimiques. Ils ont ensuite été plongés dans des solutions d'acide sulfurique (5 %), d'acide chlorhydrique (5 %).

### **CHAPITRE III : PROPRIETES DES MATERIAUX EMPLOYES ET LES PROCEDURES D'EVALUATION**

---

Le degré d'attaque est évalué en utilisant la formule suivante :

$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M_1 - M_2) / M_1] \times 100$$

Avec :  $M_1$  : masse des éprouvettes avant immersion.

$M_2$ : masse des éprouvettes après immersion.

### **III.18 Conclusion**

En conclusion de ce chapitre de thèse, Nous avons effectué une analyse détaillée des différentes composantes chimiques et physiques des matériaux utilisés dans cette étude. Les courbes granulométriques des différentes classes de granulats (gravier) et du sable ont été présentées, mettant en évidence leurs caractéristiques particulières. Nous avons également examiné les propriétés de l'ajout minéral actif, en l'occurrence la pouzzolane, ainsi que la préparation des milieux agressifs, à savoir l'HCL, l'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Une méthode de formulation spécifique a été développée, permettant de calculer la proportion des constituants nécessaires à la formulation du béton étudié. Nous avons utilisé l'essai au cône d'Abrams pour déterminer la consistance des différents bétons étudiés, fournissant ainsi des informations essentielles sur leur aptitude au moulage et à la mise en place.

Enfin, nous avons procédé aux essais de compression pour obtenir les valeurs des résistances à la compression de notre béton. Ces essais sont essentiels pour évaluer la performance mécanique du matériau et pour confirmer si les formulations élaborées répondent aux critères de résistance requis.

L'ensemble de ces analyses et essais constitue une base solide pour les prochaines étapes de cette recherche doctorale. Les résultats obtenus dans ce chapitre fournissent des informations cruciales sur les matériaux utilisés, la formulation du béton et sa consistance, ainsi que sur les résistances à la compression. Ces connaissances seront essentielles pour l'évaluation ultérieure des performances du béton dans des conditions spécifiques et pour la réalisation des objectifs fixés dans cette thèse de doctorat.

## **CHAPITRE IV**

### **RESULTATS ET DESCUSSIONS**

## IV.1 Introduction

Ce chapitre de la thèse de doctorat se penche sur l'effet du degré de circularité des granulats sur la résistance mécanique et la durabilité des bétons, en mettant particulièrement l'accent sur leur réaction face à l'attaque chimique. Les propriétés des granulats utilisés dans les bétons jouent un rôle crucial dans leurs performances et leur durabilité à long terme. Il est essentiel de comprendre comment la forme et la texture des granulats peuvent influencer ces aspects clés du comportement des bétons.

La résistance mécanique des bétons joue un rôle crucial dans la sécurité et la durabilité des structures de génie civil. Les propriétés des granulats, telles que leur degré de circularité, ont été identifiées comme des facteurs importants affectant la résistance des bétons. La forme des granulats peut influencer la compacité et l'interverrouillage entre les grains, ce qui à son tour affecte la résistance à la compression et la résistance à la flexion des bétons.

En outre, la durabilité des bétons est également un aspect crucial à considérer dans les environnements agressifs. L'attaque chimique, notamment par des acides, peut entraîner la détérioration des bétons et réduire leur durée de vie utile. Dans ce contexte, il est crucial de comprendre l'influence de la forme des granulats sur la résistance des bétons face à l'attaque chimique.

Des recherches antérieures ont mis en évidence l'importance des ajouts minéraux tels que la filler calcaire, la poudre de pouzzolane et le laitier pour améliorer les performances des bétons. L'utilisation de filler calcaire a été liée à une amélioration de la résistance à court terme des bétons, tandis que l'incorporation de poudre de pouzzolane et de laitier a démontré des avantages en termes de durabilité à long terme grâce à la réaction pouzzolanique.

Dans ce chapitre, nous nous pencherons en profondeur sur l'impact du degré de circularité des granulats sur la résistance mécanique et la durabilité des bétons, en mettant particulièrement en évidence les effets des ajouts minéraux mentionnés précédemment. Nous présenterons les résultats expérimentaux issus de tests de résistance à la compression et d'essais d'attaque chimique effectués sur des échantillons de bétons comportant diverses formes de granulats et des compositions spécifiques.

L'objectif principal de cette étude est de fournir des informations précieuses sur les relations entre la forme des granulats, la résistance mécanique et la durabilité des bétons, afin de contribuer au développement de mélanges de béton plus performants et durables. Les résultats obtenus aideront les concepteurs et les ingénieurs du génie civil à prendre des décisions éclairées lors de la conception et de la construction de structures exposées à des environnements agressifs.

Dans les sections suivantes, nous détaillerons la méthodologie expérimentale, les échantillons testés, les procédures de test et les analyses des résultats. Enfin, nous présenterons les conclusions de cette étude et discuterons

## **IV.2 Effet du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton a 28 jours:**

Les données des essais, illustrées dans les figures (IV -1) et (IV -2), révèlent que la résistance à la compression du béton est conditionnée par deux facteurs : le rapport E/C et le type de gravier employé.

Cependant, il est important de noter qu'un rapport E/C excessivement bas peut entraîner une diminution de la teneur en eau, ce qui peut avoir un impact négatif sur l'étanchéité et la durabilité du béton.

Les conclusions de cette étude mettent en lumière qu'un rapport E/C optimal de 0,54 pour un béton ferme et de 0,61 pour un béton plastique permet d'atteindre la meilleure résistance à la compression pour les trois types de gravier.

Selon M. Hassoune, F. Ghomari, A. Khelidj et A. Bezzar (2014), le rapport E/C exerce une influence sur la résistance à la compression du béton de la manière suivante :

- Un rapport E/C élevé entraîne une plus grande distance entre les grains de ciment, ce qui se traduit par une porosité capillaire accrue.
- Un rapport E/C bas se traduit par une réduction de la distance entre les grains de ciment, ce qui diminue la porosité capillaire.

En règle générale, une faible porosité capillaire est préférable, car elle limite la diffusion des ions chlorures et améliore la durabilité du béton, comme l'indique M. Hassoune, F. Ghomari, A. Khelidj et A. Bezzar (2014).

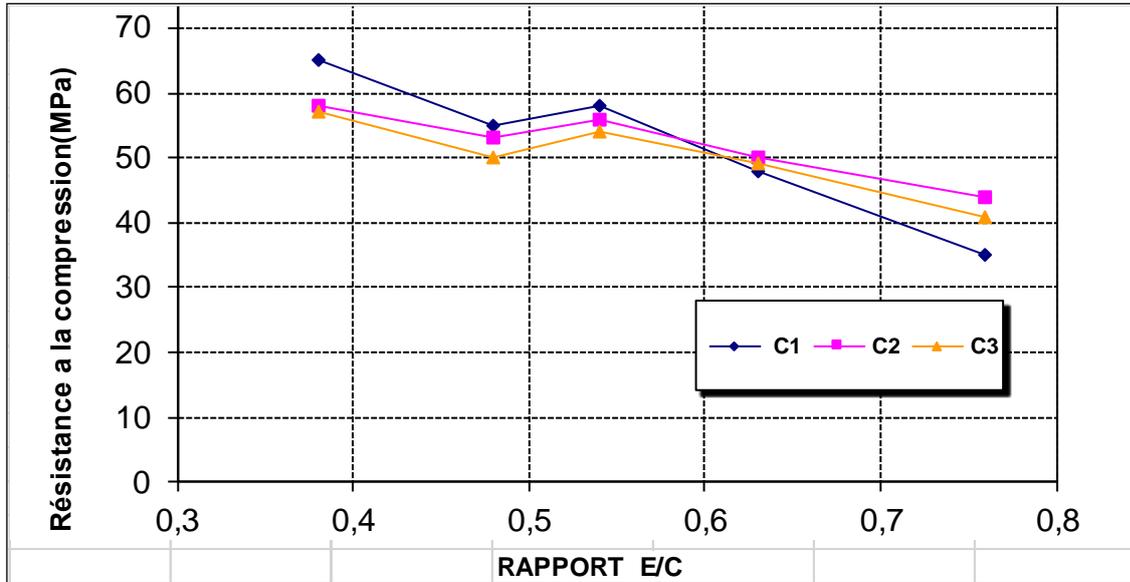


Figure IV -1 :L'évolution de la résistance à la compression du béton ferme en fonction du rapport E/C des différents graviers.

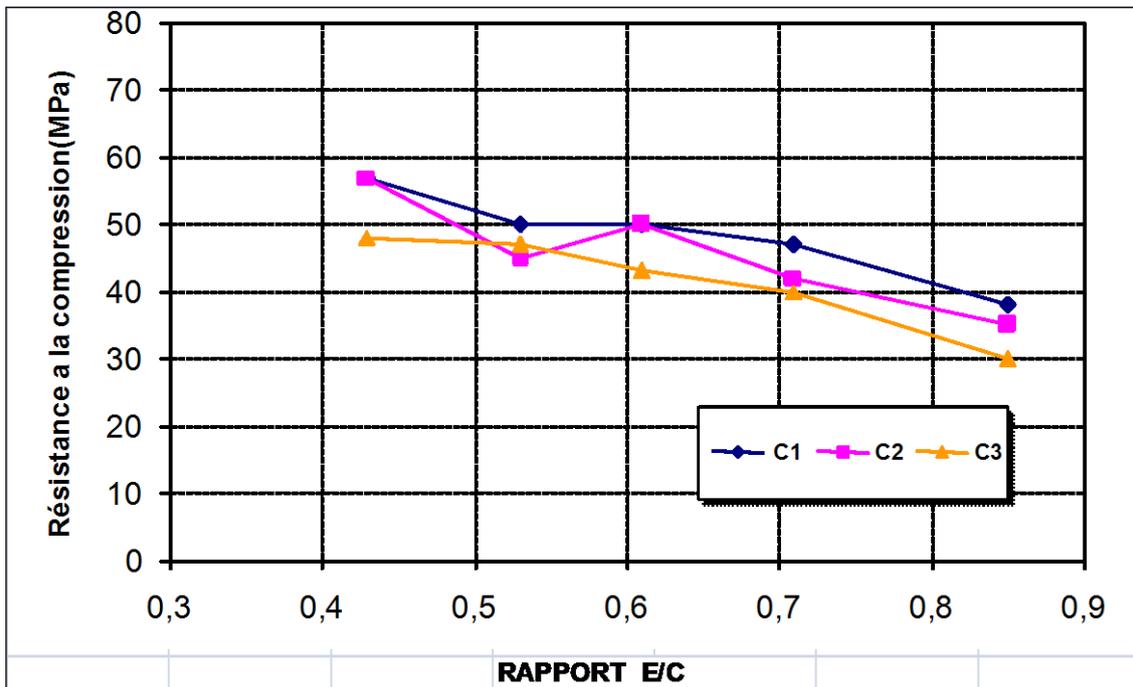


Figure IV -2 : Les changements dans la résistance à la compression du béton plastique en relation avec le rapport E/C des différents granulats.

### IV.3 Influence de la granularité sur la qualité du béton:

Le rapport entre le gravier et le sable, appelé G/S, joue un rôle essentiel pour garantir l'homogénéité du béton et prévenir tout risque de séparation. Cette étude sur le G/S a révélé les conclusions suivantes :

- Un G/S élevé conduit à un béton plus résistant, mais il se révèle plus difficile à mettre en œuvre.
- Pour un béton de type plastique, un G/S compris entre 1,7 et 1,8 offre un équilibre satisfaisant entre résistance et facilité de manipulation.
- Dans le cas d'un béton standard, un G/S entre 1,8 et 1,9 permet d'obtenir un béton à la fois résistant et facile à travailler.
- Pour un béton de forte densité, un G/S compris entre 2 et 2,2 assure une excellente résistance, mais il peut être sujet à la ségrégation.

En pratique, il est souvent recommandé de ne pas dépasser un G/S de 1,7 à 1,8, afin de sacrifier légèrement la résistance en faveur de la maniabilité.

De plus, les résultats des essais ont souligné les points suivants :

- La granulométrie du sable, déterminée par son module de finesse, joue un rôle significatif dans la qualité du béton.
- La quantité de ciment influe sur la résistance du béton, mais elle peut également augmenter sa porosité.
- La porosité du béton est associée à son absorption d'eau.
- L'utilisation des ultrasons s'avère utile pour caractériser les propriétés du béton, notamment sa résistance et sa porosité.

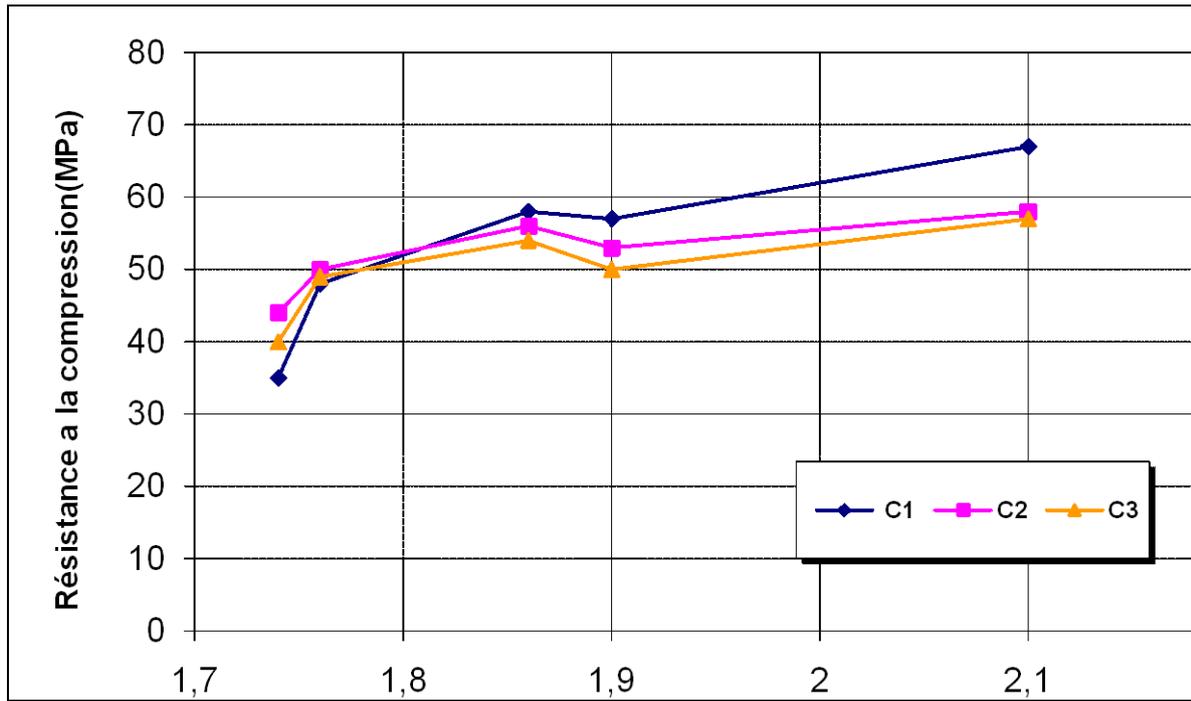


Figure IV -3 :L'évolution de la résistance à la compression du béton ferme a 28 jours en fonction du rapport G/S des différents graviers.

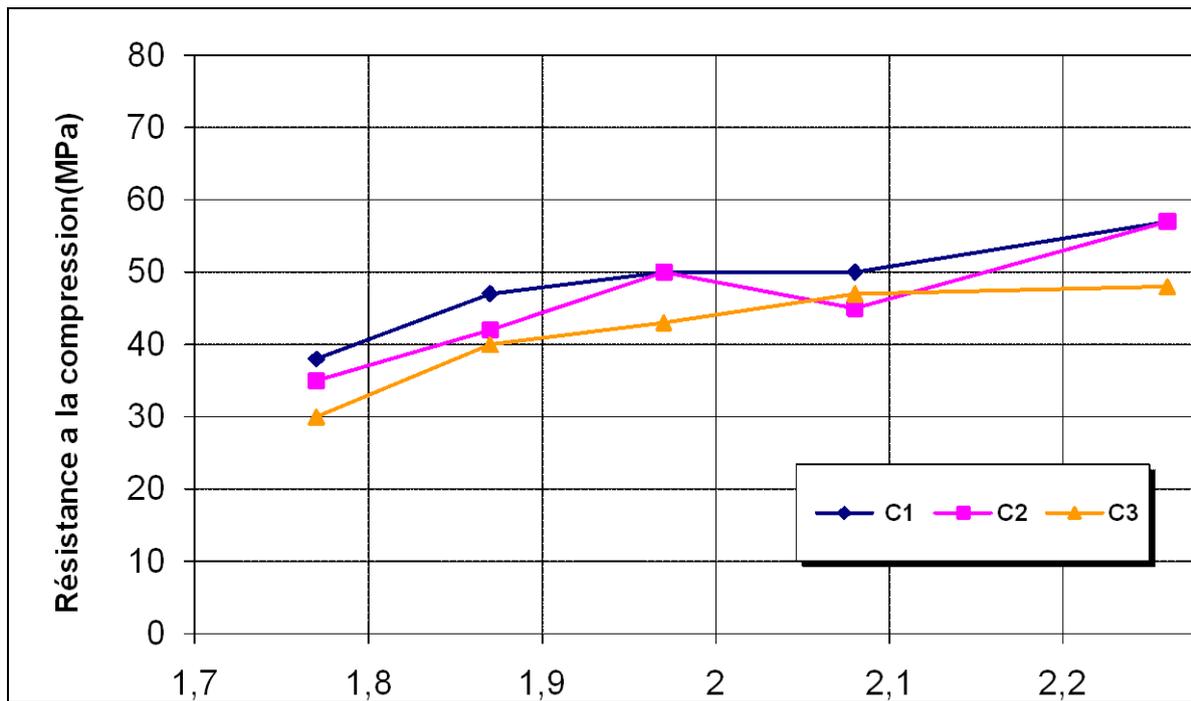
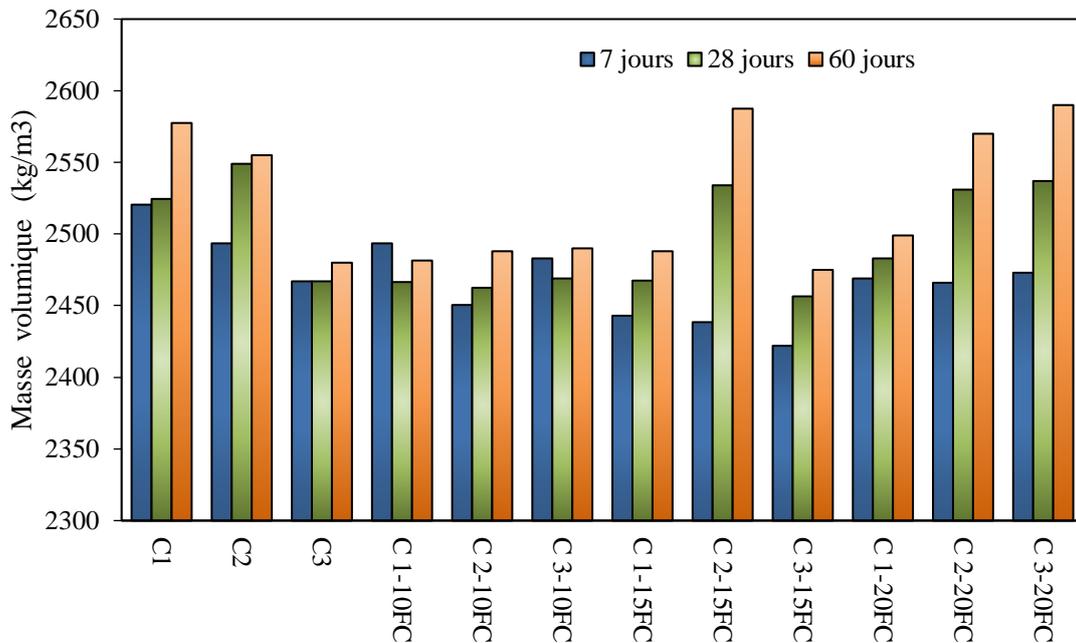


Figure IV -4 :L'évolution de la résistance à la compression du béton plastique a 28 jours en fonction du rapport G/S des different graviers.

## IV.4 Masse volumique apparente à l'état durci

### IV.4.1 Effet des fillers calcaires

La figure IV.5 illustre l'évolution de la densité des bétons fabriqués à partir de différentes combinaisons de granulats et de fillers calcaires à des âges variables de 7, 28 et 60 jours. En analysant la figure II.5, plusieurs observations importantes peuvent être faites.



**Figure IV -5 :Variation de la masse volumique à l'état durci des différents mélanges formulés.**

Tout d'abord, il est clair que la masse volumique des bétons à base de granulats C 1 est plus élevée que celle des autres bétons à base de granulats provenant des C 2 et C3. Cette constatation suggère une meilleure compacité et homogénéité du mélange dans les bétons utilisant les granulats C 1. La densité plus élevée peut être attribuée à la nature des granulats de cette région, qui peuvent avoir une forme plus angulaire et des caractéristiques granulométriques favorables à une meilleure compaction lors du processus de fabrication du béton.

De plus, l'introduction des fillers calcaires dans les mélanges de béton entraîne une diminution de la densité. Cette diminution peut s'expliquer par la faible densité des fillers calcaires eux-mêmes, qui est généralement d'environ 2,7 g/cm<sup>3</sup>. Lorsqu'ils sont ajoutés au mélange, les fillers calcaires occupent des espaces qui seraient normalement remplis par des particules de granulats plus denses, ce qui entraîne une réduction globale de la densité du béton.

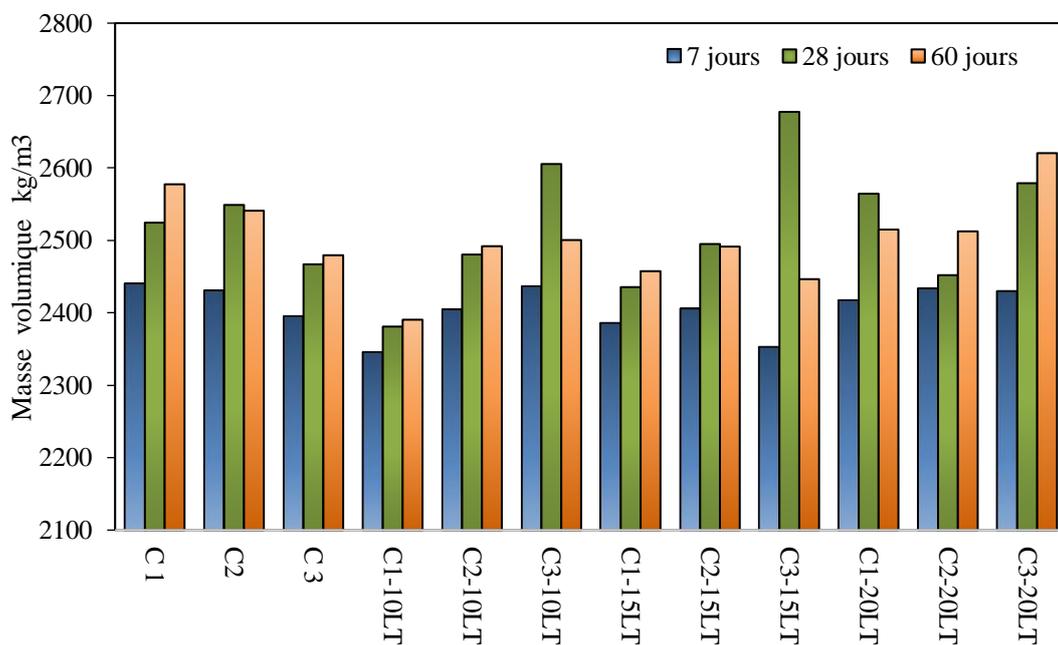
Il convient de noter que la diminution de la densité due à l'ajout de fillers calcaires peut avoir des implications sur les propriétés mécaniques du béton, telles que la résistance et la durabilité.

Cependant, d'autres facteurs tels que la composition globale du mélange, le dosage des matériaux et les méthodes de production doivent également être pris en compte pour évaluer pleinement l'effet des fillers calcaires sur les performances du béton.

En conclusion, la figure IV.5 met en évidence la densité des différents bétons à base de différents granulats et fillers calcaires à différents âges. Elle démontre que les bétons utilisant les granulats de granulat de la région C1 présentent une densité plus élevée, ce qui indique une meilleure compacité et homogénéité du mélange. De plus, l'introduction de fillers calcaires provoque une diminution de la densité en raison de la faible densité de ces matériaux. Ces observations fournissent des informations précieuses pour optimiser la formulation des bétons et adapter leur composition en fonction des exigences spécifiques de chaque projet de construction.

#### IV.4.2 Effet de laitier à haut fourneau

La figure IV.6 illustre la variation de la densité des bétons fabriqués à partir de différents granulats et de laitier à des âges différents de 7, 28 et 60 jours. L'analyse de cette figure permet de tirer plusieurs observations importantes.



**Figure IV -6 :présente la variation de la masse volumique à l'état durci des différents mélanges formulés.**

Premièrement, il est évident que les bétons utilisant les granulats provenant du granulat de la région C1, présentent une masse volumique plus élevée que ceux utilisant les granulats des régions C2 et C3. Cette constatation suggère une meilleure compacité et homogénéité du mélange dans les bétons utilisant les granulats de la région C1. La masse volumique plus élevée peut être attribuée

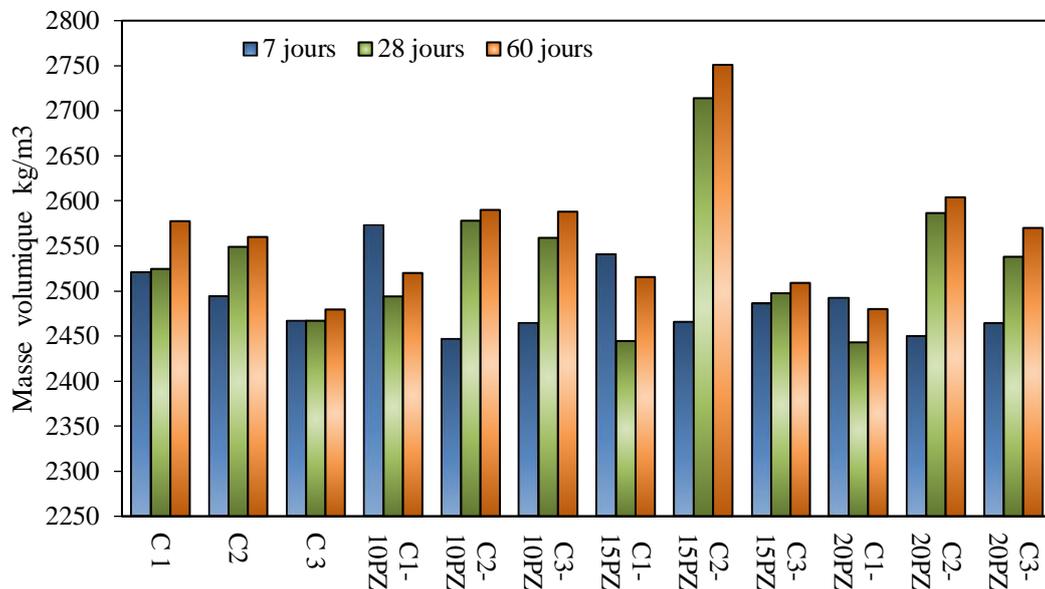
aux caractéristiques des granulats de cette carrière, qui ont une forme plus angulaire et des propriétés granulométriques favorables à une meilleure compaction lors de la fabrication du béton. De plus, l'ajout de laitier dans les mélanges de béton entraîne une diminution de la densité. Cette diminution peut être expliquée par la faible densité intrinsèque des fillers à base de laitier, qui est généralement d'environ  $2,4 \text{ g/cm}^3$ . Lorsqu'ils sont incorporés dans le mélange, ces fillers occupent l'espace normalement rempli par des particules de granulats plus denses, ce qui entraîne une réduction globale de la densité du béton.

Il convient de noter que la diminution de la densité due à l'ajout de laitier peut avoir des conséquences sur les propriétés mécaniques du béton, telles que la résistance et la durabilité. Cependant, d'autres facteurs tels que la composition globale du mélange, le dosage des matériaux et les méthodes de production doivent également être pris en compte pour évaluer pleinement l'impact des fillers à base de laitier sur les performances du béton.

En conclusion, la figure IV.6 met en évidence la variation de la masse volumique à l'état durci des différents mélanges formulés à base de divers granulats et de fillers à base de laitier, à différents stades de maturation. Les résultats démontrent que les bétons utilisant les granulats de la carrière de la région C1 présentent une densité plus élevée, témoignant ainsi d'une meilleure compacité et homogénéité du mélange. De plus, l'incorporation de laitier induit une diminution de la densité en raison de la faible densité de ces matériaux. Ces observations fournissent des informations précieuses pour optimiser la formulation des bétons et adapter leur composition en fonction des exigences spécifiques de chaque projet de construction.

### IV.4.3 Effet de la pouzzolane naturel

La figure IV.7 présente la densité des bétons à base de divers granulats et de pouzzolane à 7, 28 et 60 jours. L'analyse de cette figure révèle plusieurs observations clés.



**Figure IV -7 Montre la masse volumique à l'état durci des mélanges formulés.**

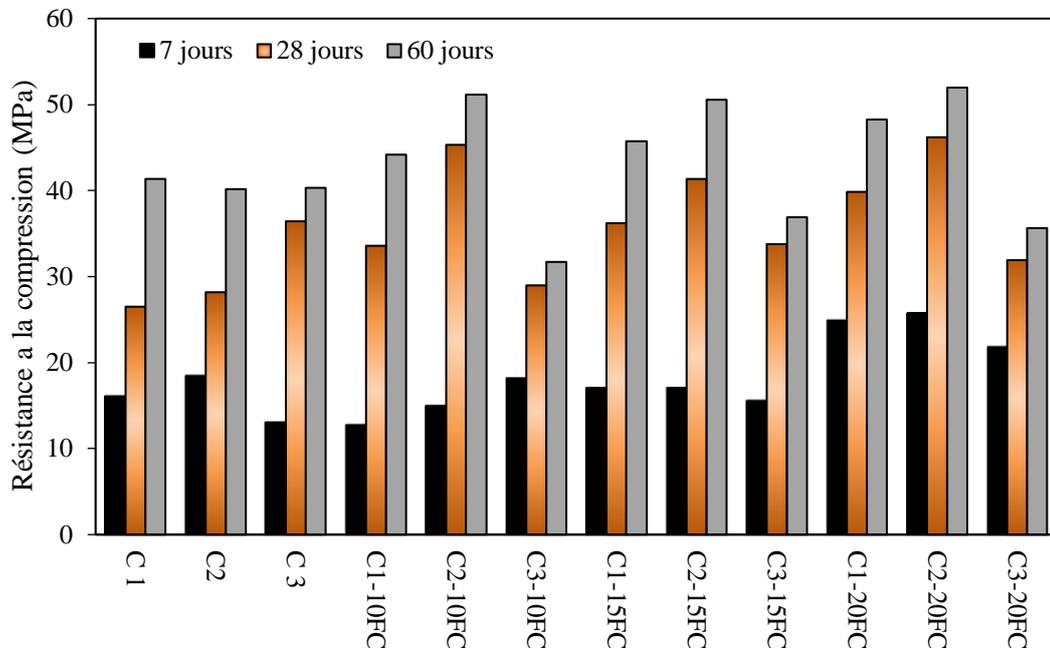
Les bétons utilisant les granulats de la région C1 ont une masse volumique supérieure à ceux utilisant les granulats des régions C2 et C3, ce qui suggère une meilleure compacité et homogénéité. Cette différence de masse volumique peut être attribuée aux caractéristiques des granulats de la région C1, qui ont une forme angulaire et une granulométrie favorable à une meilleure compaction. L'ajout de pouzzolane diminue la densité du béton en raison de sa faible densité intrinsèque, généralement d'environ  $2,6 \text{ g/cm}^3$ . La pouzzolane remplit l'espace normalement occupé par des particules de granulats plus denses, entraînant ainsi une réduction globale de la densité.

Il est important de noter que la diminution de densité due à l'ajout de pouzzolane peut influencer les propriétés mécaniques du béton, telles que la résistance et la durabilité. Cependant, d'autres facteurs tels que la composition globale du mélange, le dosage des matériaux et les méthodes de production doivent être pris en compte pour évaluer pleinement l'impact des fillers à base de pouzzolane sur les performances du béton.

## IV.5 Résistance à la compression

### IV.5.1 Effet de filler calcaire

La figure IV.8 représente la résistance à la compression des différents bétons confectionnés.



**Figure IV -8 : Variation de résistance à la compression des différents mélanges formulés.**

Au premier abord, il est observé que la résistance à la compression des bétons fabriqués à partir de différentes carrières est similaire. Par conséquent, l'effet des granulats provenant des différentes carrières est négligeable sur la résistance à la compression.

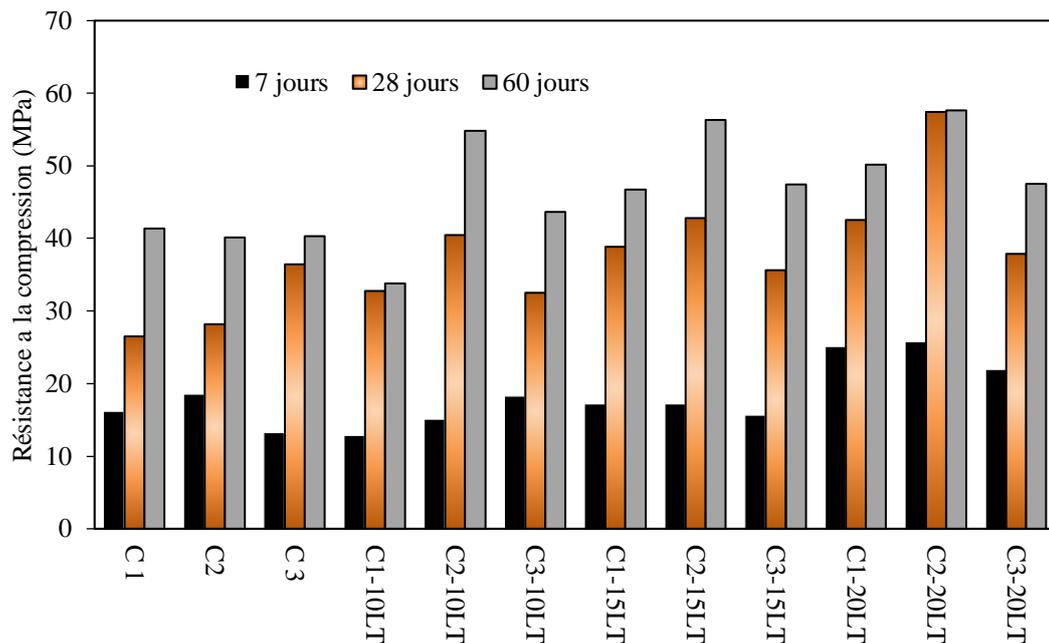
De plus, on constate que l'ajout de fillers de calcaire dans le béton augmente sa résistance, en particulier à un jeune âge. Cela s'explique par l'effet de remplissage des vides dans le mélange. Les fillers de calcaire occupent les espaces vides entre les grains de granulats, renforçant ainsi la structure du béton. Cette augmentation de la résistance à un jeune âge est bénéfique, car elle permet au béton de supporter des charges plus élevées dès les premiers stades de durcissement.

Cependant, il est important de noter qu'une diminution remarquable de la résistance à la compression est observée à des âges plus avancés. Cette diminution est attribuée à l'effet de dilution des hydrates. Au fil du temps, les hydrates présents dans le béton réagissent avec l'eau et se dissolvent partiellement, réduisant ainsi la densité des hydrates et affaiblissant la structure globale du béton. Cela conduit à une diminution de la résistance à la compression à des âges plus avancés.

En résumé, l'étude démontre que l'effet des granulats provenant de différentes carrières sur la résistance à la compression est négligeable. Cependant, l'ajout de fillers de calcaire dans le mélange augmente la résistance, en particulier à un jeune âge, grâce à l'effet de remplissage. Néanmoins, à des âges plus avancés, une diminution significative de la résistance à la compression est observée en raison de l'effet de dilution des hydrates.

#### IV.5.2 Effet de Laitier

La figure IV.9 représente la résistance à la compression des différents bétons confectionnés.



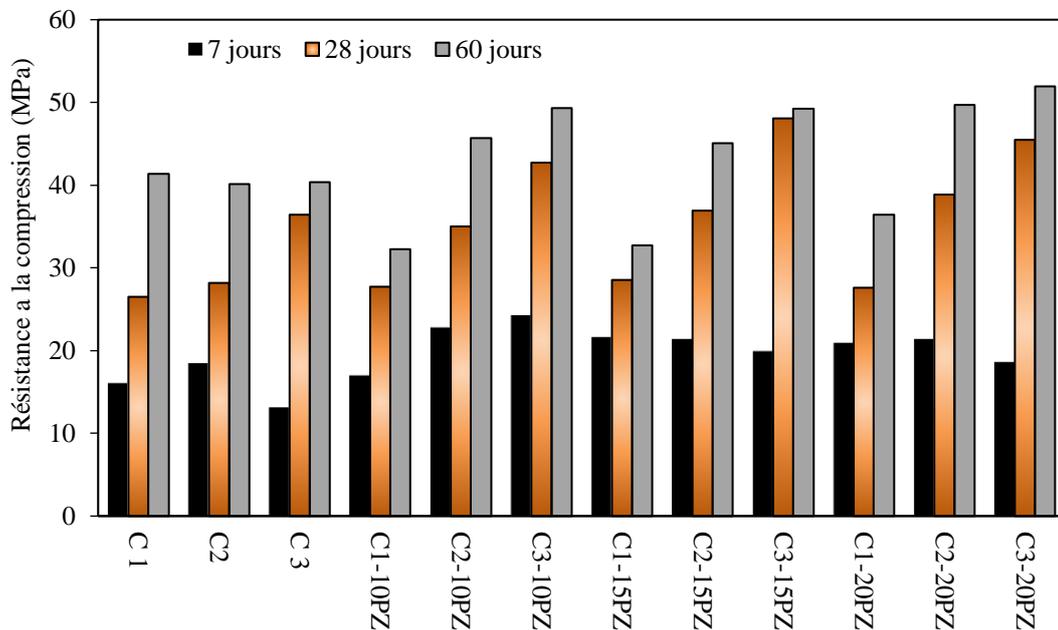
**Figure IV -9 : Variation de résistance à la compression des différents mélanges formulés.**

Dans un premier temps, il est remarqué que la résistance à la compression des bétons issus de différentes carrières est similaire, ce qui suggère que l'incidence des granulats provenant de différentes carrières sur cette résistance est négligeable.

De plus, l'ajout de laitier au béton augmente sa résistance, principalement à long terme, en raison de leur capacité à remplir les vides dans le mélange et la réaction pouzzolanique. Ces fillers occupent les espaces entre les grains de granulats, renforçant ainsi la structure du béton.

### IV.5.3 Effet de pouzzolane

La figure IV.10 représente la résistance à la compression des différents bétons confectionnés.



**Figure IV -10 : Variation de résistance à la compression des différents mélanges formulés.**

On constate que la présence de granulats de forme proche de la circularité confère une résistance à la compression plus élevée aux bétons par rapport à ceux contenant des granulats irréguliers. Cela s'explique par l'amélioration de la compacité des mélanges, réduisant ainsi les vides dans le mélange.

De plus, l'ajout de 10 % de pouzzolane entraîne une augmentation considérable de la résistance à la compression des mélanges contenant des graviers ayant un coefficient de circularité élevé. Par exemple, la résistance à la compression des mélanges provenant de la région 2 avec 10 % de pouzzolane (C2-10PZ) et de la région C3 avec 10 % de pouzzolane (C3-10PZ) augmente respectivement de 23,06 % et 85,10 % par rapport aux mélanges de la région (C2) et de la région (C3) à 7 jours. Cette augmentation est due à l'effet physique des ajouts qui comblent les vides entre les granulats et la pâte, améliorant ainsi les propriétés du matériau.

À 28 et 60 jours, l'incorporation de pouzzolane améliore la résistance des bétons par rapport aux bétons sans ajout. Cette amélioration peut être expliquée par la réaction pouzzolanique qui transforme la portlandite en C-S-H (**{Adjoudj, 2015 #186}**) et **{Belaribi, 2003 #187}**. Ce dernier comble les pores capillaires du béton. De plus, cette amélioration de la résistance est influencée par le degré de circularité des agrégats. Lorsque le coefficient de circularité est élevé, la zone de

transition interfaciale (ITZ) entre l'agrégat et la pâte est plus ferme et plus solide, ce qui entraîne une augmentation de la force du béton ({Nežerka, 2019 #188}).

#### IV.6 Modélisation de la résistance à la compression

Afin de modéliser la réponse en termes de résistance à la compression, les étapes suivantes doivent être réalisées :

La première étape consiste à identifier les facteurs influents et à déterminer le modèle permettant d'obtenir les valeurs expérimentales décrites ({{Belkadi, 2022 #189}}). Ainsi, une analyse de variance permettra de dissocier les différents effets étudiés à partir de la variance de la réponse obtenue ({{Kessal, 2022 #190}}). En outre, les résultats de cette étude seront exposés au moyen de modèles mathématiques.

Ces modèles seront utilisés pour tracer les courbes d'iso-réponse. Un modèle basé sur une équation du second ordre avec une interaction à deux facteurs a été utilisé, prenant la forme suivante :

$$Y = \beta_0 + \beta_1A + \beta_2B + \beta_{12}AB \dots\dots(1) \text{ où :}$$

Y : est la réponse prévue ;

$\beta_0$  : est la constante de coefficient pour le terme de décalage ;

A et B : sont des facteurs indépendants : (degré de circularité) et teneur en addition (%) respectivement ;

$\beta_1$  et  $\beta_2$  : sont les coefficients des effets linéaires des facteurs ;

$\beta_{12}$  : est le coefficient des effets d'interaction.

##### IV.6.1 Analyse de la variance du modèle

L'analyse de variance permet d'évaluer la contribution des facteurs à la réponse. Le modèle ajusté dans cette étude présente un coefficient de corrélation élevé de 0,94 (figure IV -11 et tableau IV -1), indiquant une bonne corrélation entre la réponse mesurée lors des tests et les valeurs prédites par le modèle. Ainsi, on peut s'attendre à ce que les modèles établis soient suffisamment précis pour prédire avec précision l'effet de la présence de poudre de pouzzolane (PZ%) et du degré de circularité (C) sur le comportement mécanique des bétons. Ce modèle nous permettra de tracer les courbes d'iso-réponse en fonction des différents facteurs étudiés.

L'analyse de variance (ANOVA) de la réponse modélisée est présentée dans le tableau IV -2, où les degrés de liberté totaux (DF), les sommes de carrés (SS) associées aux moyennes carrées, le rapport F et la probabilité sont résumés.

La signification des modèles établis dans cette étude peut être évaluée à l'aide du test de distribution de Fisher. Pour un intervalle de confiance de 90 %, le rapport F est de 45,6. Comme indiqué dans le tableau IV -2, le rapport F (Fisher) de la réponse est très élevé dans ce contexte. Les valeurs de probabilité (Prob. > F) pour tous les modèles sont inférieures à 5 %, confirmant ainsi la présence d'au moins un effet significatif d'un facteur dans le modèle.

Le tableau IV -3 présente la contribution de chaque facteur (C) et (PZ%) ainsi que leur interaction sur la réponse. Les critères  $P \leq 0.05$  ont été utilisés pour évaluer la significativité de chaque coefficient. On constate que l'effet des facteurs PZ%, C et leur interaction sur la réponse est légèrement significatif.

de variance permet d'évaluer la contribution des facteurs à la réponse.

Le modèle ajusté dans cette étude a un coefficient de corrélation relativement élevé de 0,94 (figure IV -11) et le tableau IV -1. Cela montre une bonne corrélation entre la réponse obtenue par les tests et les valeurs prédites par le modèle trouvé. Ainsi, il on peut s'attendre à ce que les modèles établis soient suffisamment précis pour prédire correctement l'effet de la présence de poudre de pouzzolane (PZ%) et le degré de circularité (C) sur le comportement mécanique des bétons. Le modèle adopté nous permettra de tracer la courbe d'iso-réponse en fonction de différents facteurs d'étude.

L'analyse de la variance (ANOVA) de la réponse modélisée est présentée dans le tableau IV -2. Le nombre total de degrés de liberté (DF), la somme des carrés (SS) associée signifie le carré, le rapport F, ainsi que la probabilité, sont résumés dans ANOVA.

La signification des modèles établis dans cette étude peut être évaluée à l'aide du test de distribution de Fisher. Pour un intervalle de confiance à 90 %, le rapport F est de 45,6. D'après le tableau IV -2, on peut voir que le rapport F (Fisher) de la réponse est d'ailleurs très élevée dans ce contexte. Les valeurs de probabilité (Prob. > F) pour tous les modèles sont inférieures à 5% (la valeur de p permet de confirmer qu'il y a au moins un effet significatif d'un facteur dans le modèle). Le tableau IV -3 montre la contribution de chaque facteur (C) et (PZ%) et leur interaction sur la réponse. Le  $P \leq 0.05$  Des critères ont été utilisés pour vérifier la signification de chaque coefficient. On voit que l'effet des facteurs PZ% et C et leur interaction sur la réponse est légèrement significative.

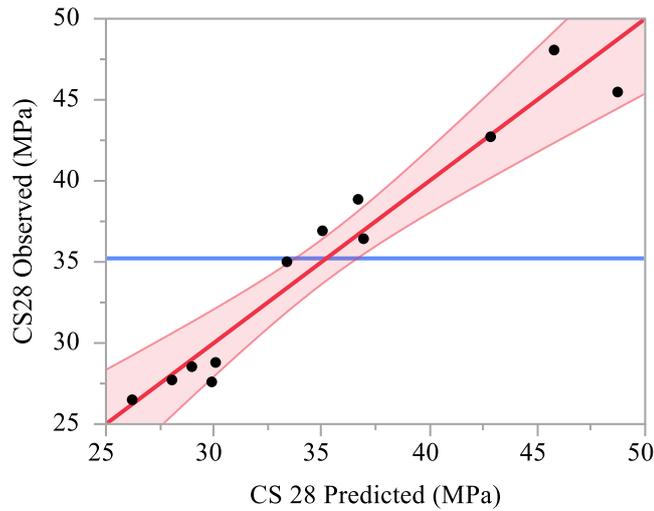


Figure IV -11 : Corrélation entre les réponses observées et prédites RC 28.

Tableau IV -1: Résumé de l'ajustement

|                       | RC <sub>28</sub> |
|-----------------------|------------------|
| R <sup>2</sup>        | 0.944751         |
| Ajusté R <sup>2</sup> | 0.924033         |
| RMSE                  | 2.070044         |
| Moyenne de réponse    | 35.22083         |

Tableau IV -2: Analyse de la variance (ANOVA) pour les modèles dérivés.

|                  | Source | Degré de liberté | Somme des carrés | Carré moyen | rapport F |
|------------------|--------|------------------|------------------|-------------|-----------|
| RC <sub>28</sub> | Model  | 3                | 586.19883        | 195.400     | 45.6000   |
|                  | Erreur | 8                | 34.28066         | 4.285       | Prob. > F |
|                  | Total  | 11               | 620.47949        |             | <.0001*   |

Tableau IV -3 :Test d'effet

| Model                       | Estimatio | Standard | trapport | Prob. >  t |
|-----------------------------|-----------|----------|----------|------------|
| terme                       | n         | Erreur   |          |            |
| RC <sub>28</sub> Intercepts | 35.44753  | 0.609863 | 58.12    | <.0001*    |
| C                           | 7.386715  | 0.732817 | 10.08    | <.0001*    |
| PZ (%)                      | 3.867071  | 0.81315  | 4.76     | 0.0014*    |
| C × PZ (%)                  | 2.022874  | 0.977089 | 2.07     | 0.0722     |

### IV.6.2 Modèle mathématique

Les variables indépendantes [C] et [PZ (%)] ainsi que la réponse [RC28] ont été intégrées dans le logiciel JMP 14 (Takahashi, 2010){Takahashi, 2010 #192} pour l'analyse. Le modèle développé repose sur une approche de conception factorielle complète, ce qui le rend applicable à une large gamme de mélanges présentant un degré de circularité (C) variant de 0,72 à 0,76 et un dosage de poudre de pouzzolane de 10 à 20 %. Ce modèle offre une méthode efficace pour calculer les réponses moyennes, évaluer l'effet des facteurs et de leurs interactions, ainsi que fournir une prédiction précise des résultats. Bien que les modèles développés reposent sur un nombre limité de données, ils peuvent néanmoins être utiles pour comprendre l'influence de chaque terme ((C) et (PZ%)) sur le comportement des bétons. Le modèle proposé pour la prédiction des réponses étudiées CS peut être exprimé comme suit :

$$RC\ 28 = 35.447 + 7.386 \left( \frac{C - 0.73}{0.02} \right) + 3.867 \left( \frac{PZ\ \% - 10}{10} \right) + 2.022 \left( \frac{C - 0.736}{0.02} \right) \left( \frac{PZ\ \% - 10}{10} \right)$$

Avec:

PZ (%) : teneur en pouzzolane

RC : résistance à la compression

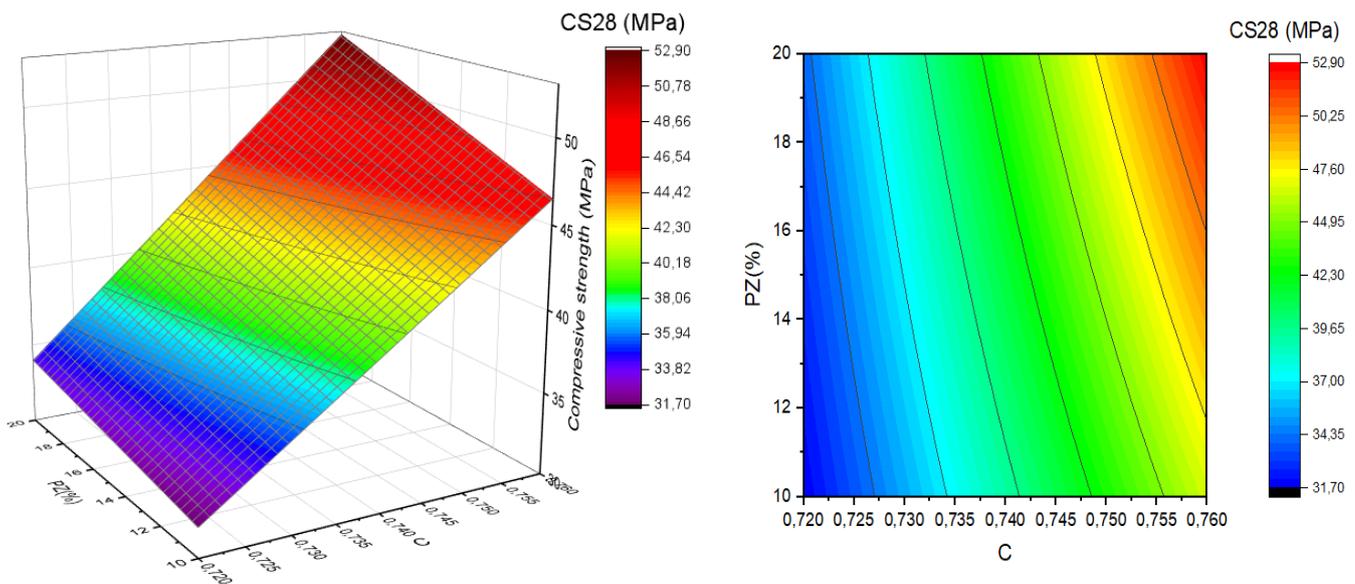
C : degré de circularité

### IV.6.3 Discussion

Les résultats de l'analyse de la résistance à la compression (RC) à 28 jours, en prenant en compte les facteurs de teneur en PZ (%) et de degré de circularité (C), sont illustrés à l'aide de différentes représentations graphiques dans la Figure IV -12.

Figure IV -12 présente la courbe iso-réponse de la résistance à la compression à 28 jours des bétons fabriqués avec différentes teneurs en PZ (%) et degrés de circularité (C).

On constate une augmentation de la résistance à la compression à 28 jours, passant de 40,1 à 51 MPa, lorsque la teneur en poudre de pouzzolane augmente de 10 % à 20 %. De plus, il est remarquable que l'augmentation du degré de circularité (C) entraîne une augmentation de la résistance des bétons contenant une teneur en PZ de 10 à 20 %. Ces résultats sont en accord avec les coefficients estimés (tableau IV -3) et l'équation (1), où les coefficients respectifs pour la teneur en C et en PZ sont de 7,38 et 3,86.



**Figure IV -12: Courbes d'iso-réponse et surfaces d'iso-réponse des résistances à la compression à 28 jours.**

Les diagrammes d'interaction de la réponse RC à 28 jours des mélanges, en prenant en compte les facteurs sélectionnés de la teneur en PZ et du degré de circularité des différents graviers (C), sont présentés dans la Figure Figure IV -13. Il est remarquable que les diagrammes d'interaction des deux facteurs se croisent, ce qui indique que les effets d'interaction des deux facteurs sur la réponse sont significatifs. En d'autres termes, l'effet du facteur C sur la réponse est modifié lorsque le niveau du facteur PZ% change.

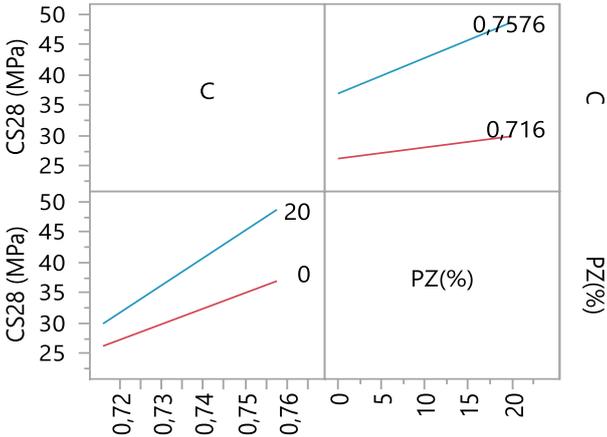
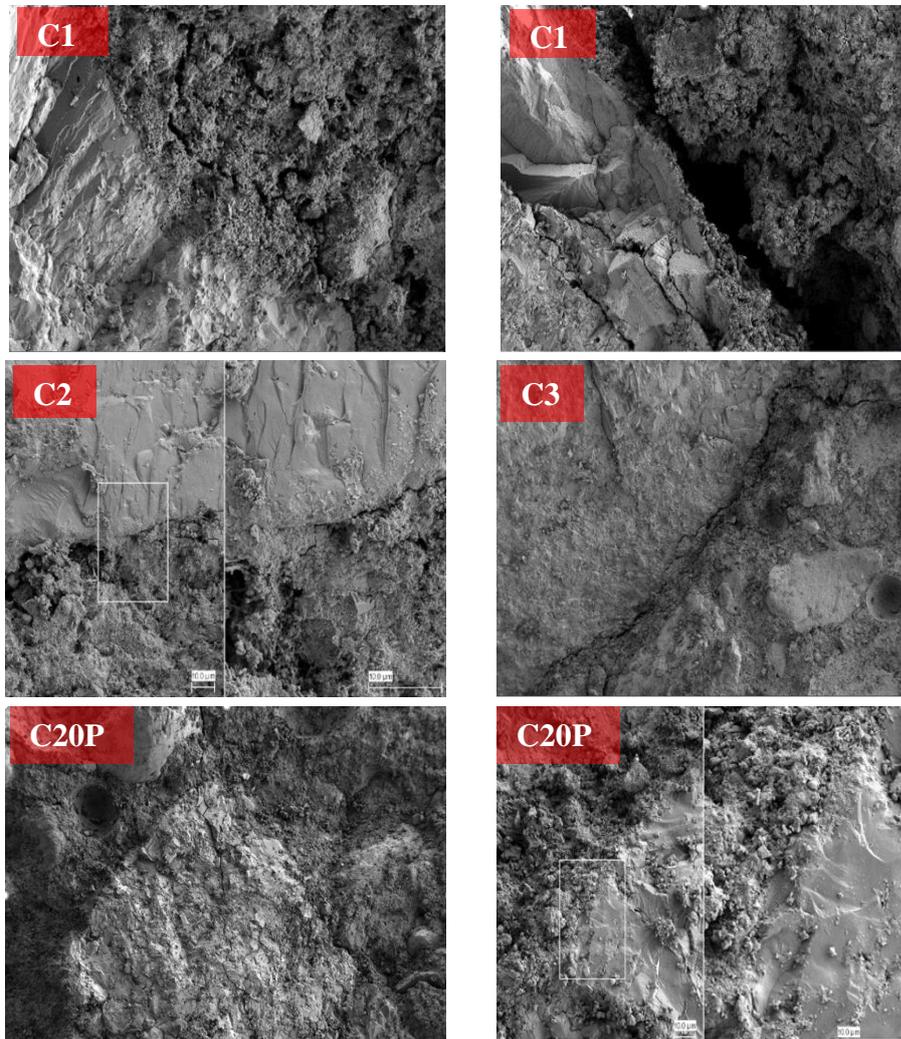


Figure IV -13 : Courbe d'interaction des résistances à la compression à 28 jours.

#### IV.6.4 Analyse microstructurale

Les images capturées présentent la morphologie ainsi que des fissures distinctes dans la zone ITZ.



**Figure IV -14: des exemples d'images MEB représentatives prises pour tous les types de composites analysés après 90 jours de durcissement**

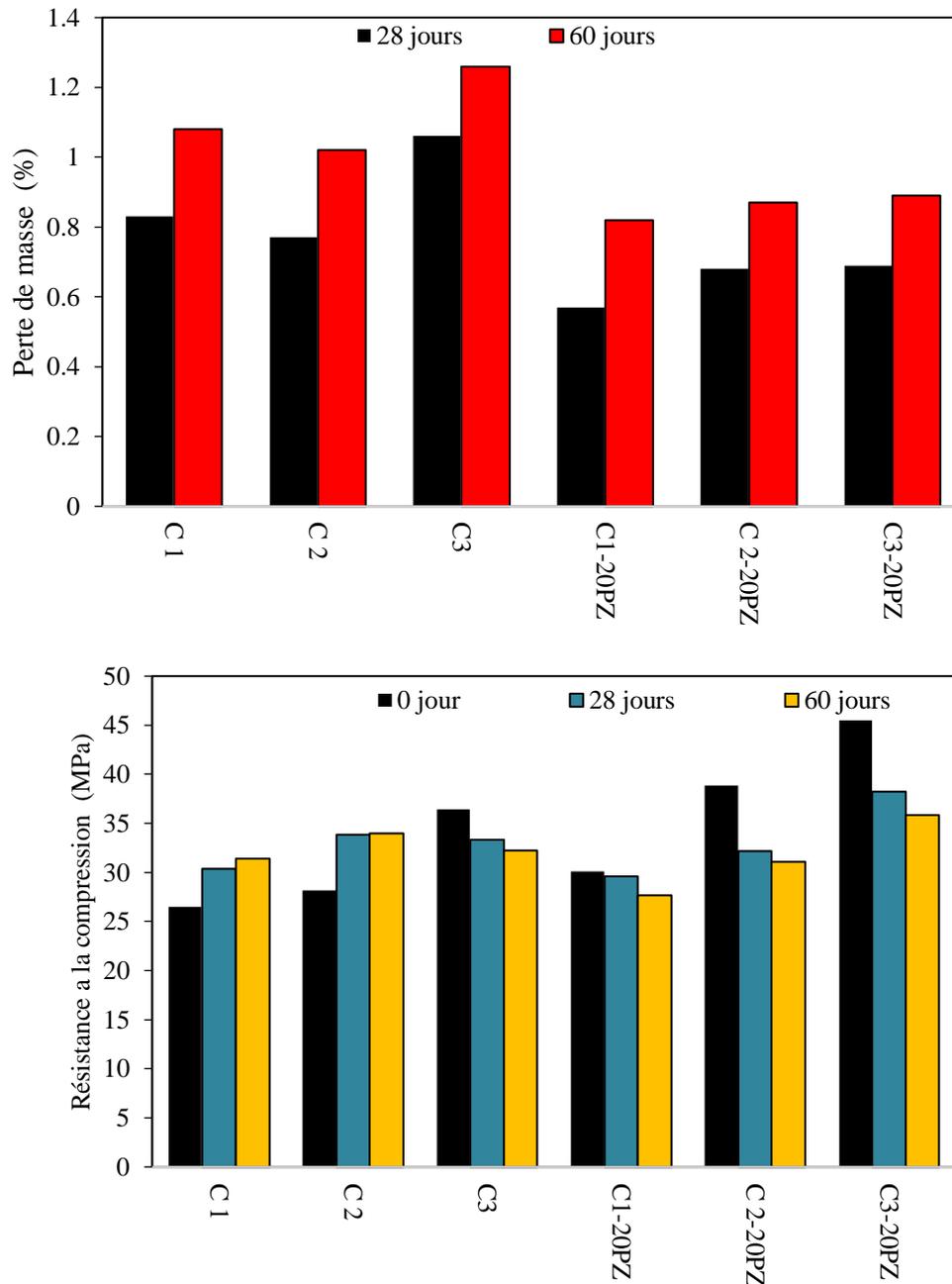
L'observation au MEB des fissures des échantillons testés a permis d'évaluer la largeur moyenne des fissures pour chaque type de béton. La Figure IV -14, illustre des exemples d'images MEB représentatives prises pour tous les types de composites analysés après 90 jours de durcissement. À cet âge, seul le béton C1 présente des zones ITZ hétérogènes. La durabilité du béton dépend directement du système de fissuration interne, qui détermine le moment où le matériau se détériore. Les fissures les plus importantes apparaissent au niveau du contact entre les gros granulats et la matrice cimentaire, car c'est dans cette zone du composite que les processus destructeurs commencent. Dans les essais réalisés, les fissures les plus importantes dans la zone ITZ ont été observées dans le béton C1, comme le montre la Figure IV -14. L'ajout de pouzzolane modifie la

composition de l'ITZ. Plus précisément, le produit d'hydratation C–S–H forme un gel et la teneur en  $\text{Ca(OH)}_2$  diminue en raison des réactions pouzzolaniques. De plus, les fines particules remplissent les espaces entre la matrice et les granulats, ce qui densifie l'ITZ et réduit progressivement les microfissures, améliorant ainsi la liaison entre la matrice et les granulats. Les structures poreuses (tortuosité, constriction ou déconnexion) ont été améliorées grâce au processus d'hydratation intégrant des ajouts pouzzolaniques. En outre, les bétons contenant des gros granulats ronds et 20 % de pouzzolane (C3-20PZ) présentent une microstructure et une zone de transition interfaciale (ITZ) plus uniformes et denses par rapport aux bétons utilisant des granulats irréguliers.

## IV.7 Durabilité des bétons vis-à-vis des attaques chimiques

### IV.7.1 Attaque chimique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

#### IV.7.1.1 Résistance à la compression et perte en poids



**Figure IV -15 : montrent respectivement la perte de résistance à la compression et la perte en masse**

Résistance à la compression et la perte en poids après l'immersion dans le H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. D'après la figure IV -15, on peut observer que le mélange C3 présente une bonne résistance aux attaques chimiques

( $H_2SO_4$ ) par rapport à C1 et C2. Ceci est probablement dû à la bonne compacité des bétons à base de granulats de forme ronde. De plus, la présence de pouzzolane entraîne une légère diminution de la résistance à la compression du béton soumis à une attaque chimique. Il convient de noter que l'effet de la pouzzolane est lié au degré de circularité (C). Les granulats ronds contenant 20 % de pouzzolane améliorent considérablement la résistance du béton au  $H_2SO_4$ . Ces observations sont confirmées par des tests microscopiques (Les figures IV-14). Selon {Giroudon, 2021 #193}, l'analyse microstructurale a démontré que les résidus riches en Si/Al, générés en surface par la réaction pouzzolanique du laitier, ont le potentiel d'inhiber la corrosion en agissant comme une barrière aux ions acides.

#### IV.7.1.2 Observation visuelle

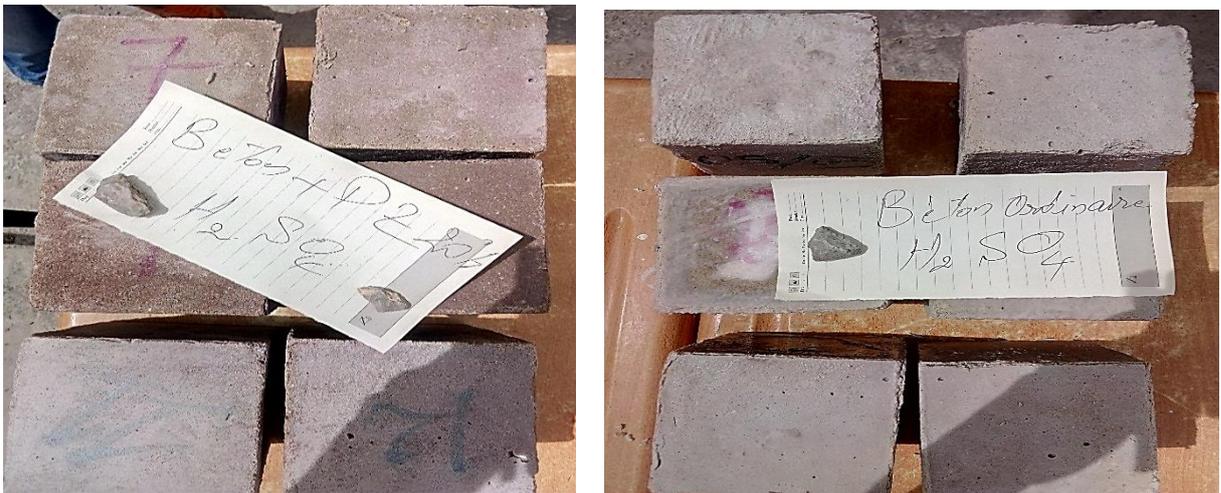


Photo IV.1 Observation visuelle

La photo IV -1représente l'observation visuelle des différents bétons après immersion dans l'acide.

En se référant à la figure, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Le mélange C3 présente une meilleure résistance à l'attaque chimique par rapport aux mélanges C1 et C2. Cela se manifeste par une détérioration moins prononcée du béton et moins de signes d'endommagement visuel après l'immersion dans l'acide.
- Les bétons à base de granulats de forme ronde semblent mieux résister à l'attaque chimique que les bétons à base de granulats irréguliers. Cette observation suggère que la compacité des bétons avec des granulats ronds offre une certaine protection contre les effets corrosifs de l'acide.

- La présence de pouzzolane dans les mélanges entraîne une légère diminution de la résistance à la compression des bétons après immersion dans l'acide. Cependant, il est important de noter que les bétons contenant des granulats ronds et 20 % de pouzzolane affichent une résistance améliorée à l'attaque chimique par rapport aux autres mélanges.

Ces observations suggèrent que l'utilisation de granulats ronds et l'incorporation de pouzzolane dans le béton peuvent contribuer à améliorer sa résistance à l'attaque chimique, offrant ainsi une meilleure durabilité dans des environnements corrosifs tels que ceux contenant de l'acide.

## IV.7.2 Attaque chimique HCL

### IV.7.2.1 Résistance à la compression et perte en poids

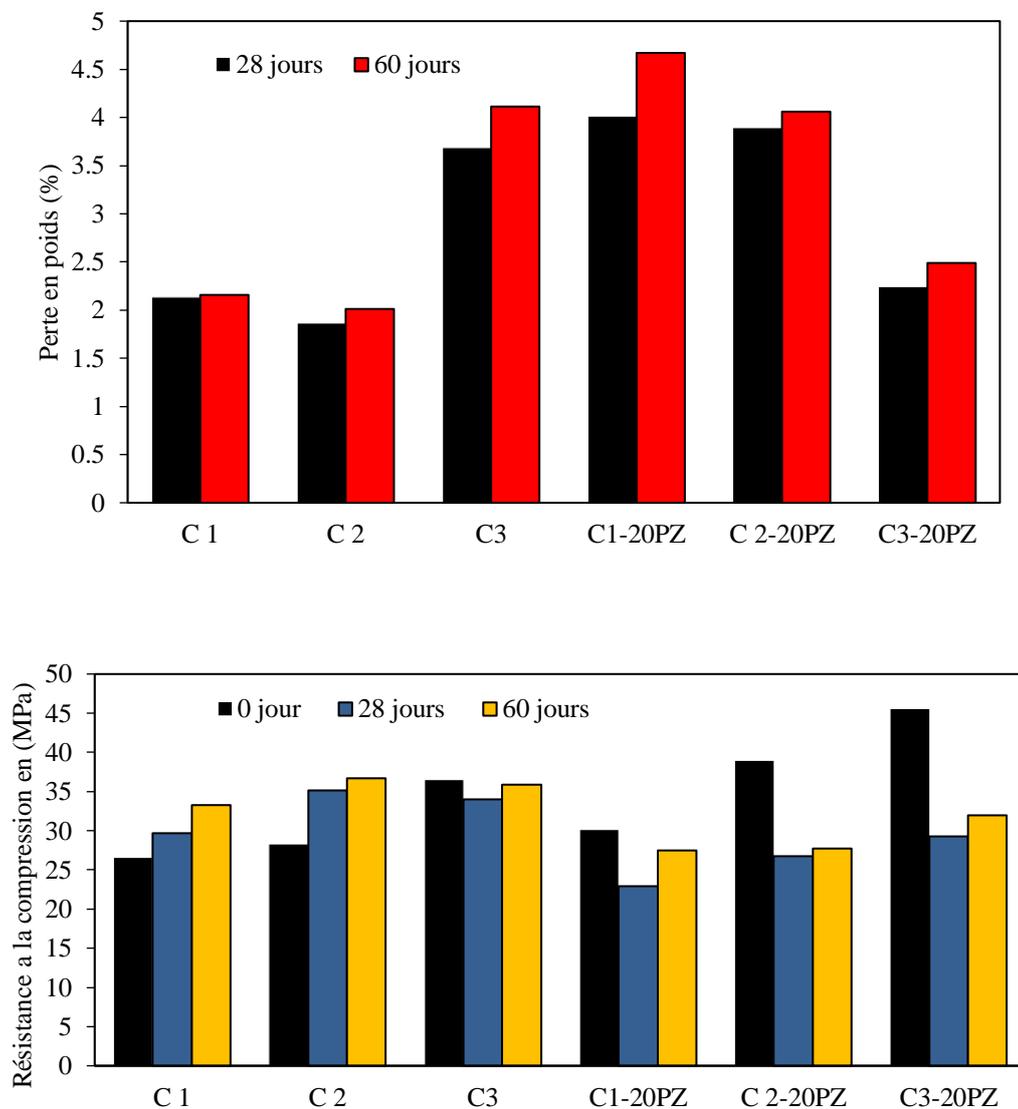


Figure IV -16 : Résistance à la compression et la perte en poids après l'immersion dans le HCl.

D'après l'analyse de la Figure IV.16, il est observé que le mélange C3 présente une résistance élevée aux attaques chimiques (HCl) par rapport aux mélanges C1 et C2. Cette amélioration est vraisemblablement due à la bonne compacité des bétons contenant des granulats de forme ronde. Cependant, l'incorporation de pouzzolane dans le béton entraîne une diminution significative de sa résistance à la compression lorsqu'il est soumis à une attaque chimique. Il convient de noter que l'impact de la pouzzolane est conditionné par le degré de circularité (C). Les mélanges avec des granulats ronds contenant 20 % de pouzzolane présentent une amélioration notable de leur résistance au HCl. Ces observations sont étayées par des tests microscopiques (Figure II-14).

#### IV.7.2.2 Observation visuelle



**Photo IV.2 Observation visuelle**

La photo IV -2 permet d'observer visuellement les différents bétons après immersion dans l'acide.

En analysant cette figure, les conclusions suivantes peuvent être tirées : • Le mélange C3 présente une résistance supérieure à l'attaque chimique par rapport aux mélanges C1 et C2. Cela se manifeste par une détérioration moins prononcée du béton et une réduction des signes visibles de dommages après l'immersion dans l'acide. • Les bétons composés de granulats de forme ronde semblent mieux résister à l'attaque chimique que ceux avec des granulats irréguliers. Cette observation suggère que la compacité des bétons contenant des granulats ronds offre une certaine protection contre les effets corrosifs de l'acide. • La présence de pouzzolane dans les mélanges entraîne une légère diminution de la résistance à la compression des bétons après immersion dans

l'acide. Cependant, il convient de noter que les bétons contenant des granulats ronds et 20 % de pouzzolane affichent une meilleure résistance à l'attaque chimique par rapport aux autres mélanges. Ces observations suggèrent que l'utilisation de granulats ronds et l'incorporation de pouzzolane dans le béton peuvent contribuer à améliorer sa résistance à l'attaque chimique, offrant ainsi une meilleure durabilité dans des environnements corrosifs tels que ceux contenant de l'acide.

#### **IV.8 Conclusion**

En résumé de ce chapitre de la thèse de doctorat, il est évident que le degré de circularité des granulats joue un rôle essentiel dans la résistance mécanique et la durabilité des bétons, en particulier en ce qui concerne leur résistance à l'attaque chimique. Les observations effectuées ont clairement démontré que plusieurs facteurs exercent une influence considérable sur les performances des bétons :

Les résultats ont montré une amélioration de la résistance mécanique, notamment en termes de résistance à la compression, grâce à l'utilisation de ce matériau supplémentaire.

En outre, l'ajout de poudre de pouzzolane s'est avéré bénéfique pour accroître la durabilité à long terme des bétons. Cette incorporation a renforcé la structure des bétons et réduit leur perméabilité, conférant ainsi une meilleure résistance aux attaques chimiques et aux agents agressifs au fil du temps.

En outre, l'ajout de laitier a également démontré des effets positifs sur la résistance à la compression à long terme des bétons, grâce à la réaction pouzzolanique qui se produit entre le laitier et la matrice cimentaire. Cette réaction a conduit à la formation de produits d'hydratation qui ont renforcé la structure du béton et augmenté sa résistance.

En conclusion, le degré de circularité des granulats a été identifié comme un paramètre clé influençant la résistance mécanique et la durabilité des bétons. De plus, l'ajout de filler calcaire, de poudre de pouzzolane et de laitier a été démontré comme des approches efficaces pour améliorer les performances des bétons. Ces résultats constituent une contribution importante à la compréhension des facteurs influençant la résistance et la durabilité des bétons, et peuvent être utilisés comme base pour le développement de mélanges plus performants dans le domaine de la construction.

## Conclusion générale

Le début c'était une vaste enquête, au cours de laquelle nous avons senti le besoin ou l'intérêt commun de constituer une sorte de banque de données sur les matériaux de la région et les constituants du béton.

Ceci afin de combler un manque quasi-total d'informations sur tous les aspects de la mécanique des bétons. A travers les résultats des d'essais portant sur une large variété de bétons (à base de granulats concassés de la région de Biskra, constitue une des réponses aux attentes des praticiens de la région. Les différents résultats concernant la maniabilité, le squelette granulaire optimum, la densité, de la variété des bétons, seront sans aucun doute d'un grand intérêt pour des prises de décision quant au choix des matériaux, des formulations, des propriétés des bétons attendues, etc...

En conclusion de cette thèse de doctorat, nous pouvons affirmer que le degré de circularité des granulats joue un rôle crucial dans la résistance mécanique et la durabilité des bétons, en particulier face à l'attaque chimique. Les observations et les résultats obtenus au cours de cette étude ont permis d'identifier plusieurs facteurs qui ont un impact significatif sur les performances des bétons.

Tout d'abord, l'ajout de filler calcaire s'est avéré être une approche efficace pour améliorer la résistance des bétons à court terme. Les analyses ont montré une augmentation notable de la résistance mécanique, en particulier en ce qui concerne la résistance à la compression, grâce à l'utilisation de ce matériau supplémentaire. Cette constatation ouvre des perspectives prometteuses pour l'optimisation des mélanges de béton destinés à des applications nécessitant une résistance initiale élevée.

De plus, l'incorporation de poudre de pouzzolane a été associée à une amélioration significative de la durabilité des bétons à long terme. La présence de pouzzolane a contribué à renforcer la structure des bétons, réduisant ainsi leur perméabilité. Cela a permis aux bétons de mieux résister aux attaques chimiques et aux agents agressifs au fil du temps. Ces résultats suggèrent que l'utilisation de la pouzzolane peut être une stratégie efficace pour accroître la durée de vie des structures en béton exposées à des environnements hostiles.

Par ailleurs, l'ajout de laitier a également démontré des effets positifs sur la résistance à la compression à long terme des bétons. La réaction pouzzolanique qui se produit entre le laitier et

la matrice cimentaire a favorisé la formation de produits d'hydratation qui ont renforcé la structure du béton et augmenté sa résistance. Cette constatation indique que l'incorporation de laitier peut être une stratégie judicieuse pour garantir la durabilité des bétons sur le long terme.

En conclusion, le degré de circularité des granulats a été identifié comme un paramètre clé influençant la résistance mécanique et la durabilité des bétons. De plus, l'ajout de filler calcaire, de poudre de pouzzolane et de laitier a été démontré comme des approches efficaces pour améliorer les performances des bétons. Ces résultats représentent une contribution significative à la compréhension des facteurs qui influencent la résistance et la durabilité des bétons, et ils offrent des pistes pour le développement de mélanges plus performants dans le domaine de la construction.

Nous avons tenté de découvrir et d'expliquer théoriquement puis expérimentalement, les liens existant entre les caractéristiques des granulats et les propriétés des bétons.

-Le choix des granulats donc, d'après cette étude, porte principalement sur la nature minéralogique, la masse volumique, la propreté, la dureté, la granulométrie, l'absorption d'eau, etc....

- Dans tous les cas, une grande importance est attachée au paramètre régularité qui va conditionner la constance de la maniabilité et du rapport e/c.

En effet, du fait de l'incidence des transports sur le coût des matériaux, l'utilisateur est en général tributaire des productions de proximité.

Donc, le choix des matériaux est restreint par ce facteur de coût.

Mais l'utilisateur doit connaître au moins les technologies mises en œuvre dans les exploitations de granulats. Ces technologies permettent aux producteurs de répondre aux exigences de qualité requises et donner l'assurance de fourniture de granulats conforme aux normes.

Le contrôle de conformité porte sur les granulats, soit avant leur expédition, soit après leur livraison sur l'aire du stockage du chantier. Ce contrôle consiste à effectuer des prélèvements et des analyses pour apprécier, avec suffisamment de précision la conformité des lots à utiliser.

En somme, cette thèse fournit des informations précieuses sur l'impact des granulats et des additions sur les propriétés mécanique et la durabilité des bétons ordinaires. Les résultats obtenus constituent une base solide pour les concepteurs et les ingénieurs du génie civil, leur permettant de prendre des décisions éclairées lors de la conception et de la construction de structures exposées à des environnements agressifs, tout en contribuant à l'effort global de développement de matériaux de construction durables et performants.

Il est à souligner que pour des raisons d'exploitation, les carrières exploitées sont sujettes à de nouveaux tests d'identification des matériaux produits.

Ce travail nous a permis de mieux comprendre les problèmes pratiques d'élaboration des bétons. L'importance des granulats sur le comportement des bétons n'est plus à souligner. La connaissance de leur nature minéralogique n'est pas toujours facile, car les études pétrographiques ne sont pas très courantes en Algérie.

Il est primordial de chercher des constituants présentant de la qualité requise pour avoir un béton de résistance élevée. Malheureusement ce point n'est pas suffisant car même avec des matériaux de qualités exceptionnelles on risque d'avoir un béton de mauvaise qualité du point de vue résistance et durabilité si sur chantier il n'y a aucune garantie du respect de la formulation trouvée lors de l'étude de la composition au laboratoire. Les conséquences du non-respect de la formulation sur la durabilité sont importantes, si le béton de la zone d'enrobage, par exemple, est trop perméable ou présente des fissures conséquence d'une mauvaise fabrication, la corrosion peut alors se développer, cette dernière représente le type de dégradation le plus fréquent.

Les ressources de granulats calcaires exploitables en Algérie sont réellement importantes .leur caractéristiques intrinsèques répondent aux spécifications exigées pour un béton hydraulique. Le taux de fillers est trop élevé (allant jusqu'à 30%) et le traitement de dépoussiérages inexistant dans toutes les carrières d'Algérie. toutefois, un lavage a font qui éliminera les fillers incluant dans les sables et les graviers donnera des bonnes résistances du béton.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 12390-3, E. (2009). Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens. In: CEN Brussels.
- 6, E. (2013). Tests for mechanical and physical properties of aggregates—Part 6: Determination of particle density and water absorption. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.
- Abràmoff, M. D., Magalhães, P. J., & Ram, S. J. (2004). Image processing with ImageJ. *Biophotonics international*, 11(7), 36-42.
- Adorno, T. W. (1999). *Sur Walter Benjamin* (Vol. 250): Editions Allia.
- Afnor, N. (2008). EN 12-620+ A1. Granulats pour bétons.
- AFNOR, N. N. EN 933-1, «. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, Partie, 1.
- Aïtcin. (2003). Les caractéristiques de durabilité du béton à hautes performances. Composites de ciment et de béton.
- Aoun, C. (2019). Evaluation de la durée de vie des structures en béton armé soumises à la diffusion des ions chlorure. Université Clermont Auvergne [2017-2020],
- AOUN, C. R. (2019). EVALUATION DE LA DUREE DE VIE DES STRUCTURES EN BETON ARME
- SOUMISES A LA DIFFUSION DES IONS CHLORUR.
- Baroghel-Bouny, V. (1994). Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances.
- Baron, J., Desdevises, A., Buil, M., Detriche, C., Vernet, C., Duval, R., . . . Capmas, A. (1992). La durabilité des bétons.
- Baron, J., Olivier, J., & Weiss, J. (1997). Les ciments courants. Les bétons, bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, 806.
- BARON, J., OLLIVIER, J.-., DESDEVISES, A., Buil, M., Detriche, C. H., VERNET, C., . . . LETOURNEUX, J.-. (1992). LA DURABILITE DES BETONS.
- Bethmont, S. (2005). Mécanismes de segregation dans les betons autoplacants (BAP): Etude expérimentale des interactions granulaires. THESE DE DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES, SPECIALITE: STRUCTURES ET MATERIAUX.
- Birioukov, A., & Remadnia, A. (2017). Etude de l'influence de la qualité des granulats locaux sur les propriétés des mélanges de béton et des bétons durée dans les conditions des entreprises de préfabrication de la région de Annaba.
- BOUKLI HACENE, S., & MAHI, Z. ETUDE DES CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES ET PHYSICO-MECANIQUE D'UN GISEMENT DE GRANULATS: EXEMPLE DE LA CARRIERE DE CHABET EL LAHM (WILAYA DE AÏN TEMOUCHENT).
- Brandt1, E. H. (1995). The flux-line lattice in superconductors. IOPscience.
- Calais, T. (2013). Propriétés mécaniques et durabilité d'un béton léger: application en régions froides. Université Laval,
- CALAIS, T. (Thomas Calais, 2013). PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET DURABILITÉ
- D'UN BÉTON LÉGER
- Application en régions froides.
- Chakravarthi, S., Boyina, A., Singh, A. K., & Shankar, S. (2019). Evaluation of cement treated reclaimed asphalt pavement and recycled concrete pavement bases. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12, 581-588.

- Chanvillard, G., & Basuyaux, O. (1996). Une methode de formulation des betons de sable maniabilite et resistance fixees. BULLETIN-LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES, 49-64.
- Charef, A. (2007). La problématique des granulats au Maroc. Push-Button Publishing. cimenterie, f. t. fiche technique des ajouts minéraux actifs In.
- Cohen, A., Ben-Abu, Y., Hen, S., & Zilberberg, N. (2008). A novel mechanism for human K2P2. 1 channel gating: facilitation of C-type gating by protonation of extracellular histidine residues. Journal of Biological Chemistry, 283(28), 19448-19455.
- Cohen, H. P., Hachaichi, S., Bodenmueller, W., Kvien, T. K., Danese, S., & Blauvelt, A. (2022). Switching from One Biosimilar to Another Biosimilar of the Same Reference Biologic: A Systematic Review of Studies. BioDrugs, 36(5), 625-637.
- Crouzet, M. (2011). Stendhal et le désenchantement du monde. Stendhal et l'Amérique II-Sens et non-sens de l'Économie.
- DAOUDI, D., & FATMI, B. (2021). Caractérisation des granulats pour la formulation d'un béton. FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL,
- De Larrard, F. (2000). Structures granulaires et formulation des bétons.
- de Larrard, F., Ledee, V., Sedran, T., Brochu, F., & Ducassou, J.-B. (2003). Nouvel essai de mesure de compacité des fractions granulaires à la table à chocs. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 1(246-47), 101-115.
- De Sá, J. P. M. (2007). Applied statistics using SPSS, Statistica, MatLab and R: Springer Science & Business Media.
- Delort, M. (2001). NORMALISATION DES CIMENTS COURANTS: UNE NORME POUR LE MARCHE INTERIEUR EUROPEEN. REVUE GENERALE DES ROUTES (RGRA)(798).
- Dorion, J.-F. (2001). Distribution des ions alcalins et chlore dans le béton: influence sur la réaction alcalis-granulats: National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada, Ottawa.
- Dreux, G., & Festa, J. (1976). Nouveau guide du béton: Eyrolles.
- Dreux, G., & Festa, J. (1998). Nouveaux Guide De Béton et De Ses Constituants, editions eyrolles. In: Paris.
- Dreux, G., Gorisse, F., & Simonnet, J. (1983). COMPOSITION DES BETONS: METHODE DREUX-GORISSE-BILAN DE CINQ ANNEES D'APPLICATION EN COTE D'IVOIRE. ANN ITBTP(414 (BETON-214)).
- Dupain, R. (1981). Effets de l'endiguement de la rive nord de l'estuaire de la Loire. Revue Française de Géotechnique(14 bis), 28-33.
- Dupain, R., Lanchon, R., & Saint-Arroman, J.-C. (2000). Granulats, sols, ciments et bétons: caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire: terminale STI, Génie civil, BTS Bâtiment, BTS Travaux publics, DUT Génie civil, MST Génie civil, Ecoles d'ingénieurs: Casteilla.
- DUPONT, P., & TOURENQ, C. (1997). LA NOUVELLE NORME SUR LES GRANULATS, XP P15-540. Revue générale des routes et des aérodromes(756).
- DURVILLE, J.-L., & HERAUD, H. (1995). Description des roches et des massifs rocheux. Techniques de l'ingénieur. Construction, 1(C352), C352. 351-C352. 312.
- Ehlen, M. A., & Kojundic, A. N. (2014). Life-365™ v2. 2. Concrete international, 36(5), 41-44.
- EN, B. (1998). 1097-3. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of loose bulk density and voids," British Standards Institution.
- EN, B. (2009). 12350-2. Testing fresh concrete. Slump-test. London: British Standards Institution.
- EN, N. (2014). 206/CN Béton-Spécification, performance, production et conformité- Complément national à la norme NF EN 206. AFNOR, La Plaine St-Denis.

- Feldman, R. F. a. S., P.J. (1968). A Model for Hydrated Portland Cement Paste as Deduced from Sorption-Length Change. *Materiaux et Constructions*, 1, 509-520.
- FRAHTIA, S. Influence de l'additions (oxydes) sur le fuitage et les proprietes physique des materiaux à base  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ . Université de M'Sila-Mohamed Boudiaf,
- Gabrysiak, F. (2000). *Matériaux-Les Granulats-Chapitre 2*. Academie de Nancy-Metz. Tiré de <https://www.yumpu.com/fr/document/view/17207769/materiaux-les-granulats-academie-denancy-metz/7>.
- Gaweska-Hager, I. (2004). Comportementa haute température des bétonsa haute performance- évolution des principales propriétés mécaniques. These de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- GHERDAOUI, C. (2007). Influence des fines minérales sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton à base de sable de carrières de la région de Guelma. Mémoire de Magister, Université Badji M.-Annaba.
- Gorella, B., & Kober, C. (2005). A Toolbox for China—Lessons from the China Experience of Degussa Construction Chemicals. In *The Chemical and Pharmaceutical Industry in China: Opportunities and Threats for Foreign Companies* (pp. 221-245): Springer.
- Guédon, J.-S., & Durville, J.-L. (2020). L'analyse pétrographique: un outil de la géologie de l'ingénieur. In: EDP Sciences.
- Guénot-Delahaie, I. Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton.
- Hansen, T. C. ((1986)). Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete Second State-of-the-Art Report Developments 1945-1985. *Materials and Structures*, 19, 201-246.
- Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., & Ghorbel, E. (2011). Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1167-1171.
- Higgins, D. D., & Crammond, N. J. (2003). Resistance of concrete containing ggbs to the thaumasite form of sulfate attack. *Cement and concrete composites*, 25(8), 921-929. doi:[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00149-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00149-5)
- Hillemeier, B. Fracture mechanics studies on concrete compounds.
- Irassar, E. F., Bonavetti, V. L., & González, M. (2003). Microstructural study of sulfate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature. *Cement and Concrete Research*, 33(1), 31-41. doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00914-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00914-6)
- JL Granju, J. M. (2003). Loi de resistance en compression simple des pates pures de ciment portland conservees dans l'eau. *Recherche sur le ciment et le béton*, pages 611-621.
- Kara-Ali, R. (2002). Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires. Cergy-Pontoise, L2MGC (Laboratoire de Mécanique et de Matériaux du Génie Civil) à l'Université de Cergy-Pontoise. Retrieved from <https://l2mgc.cyu.fr/laboratoire>
- L'ECOULEMENT, D. B. A. (2005). Maher EL BARRAK. Université d'Artois,
- Larrañaga, M. E. (2004). Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete.
- Lo, T. Y., Cui, H., Memon, S. A., & Noguchi, T. (2016). Manufacturing of sintered lightweight aggregate using high-carbon fly ash and its effect on the mechanical properties and microstructure of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 753-762.
- Maillot, R. (2001). *Mémento technique des granulats*: Presses des MINES.
- Makani, A. (2011). Influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique différé des bétons. Toulouse, INSA,
- Malier, Y. (1992). *LES BETONS A HAUTES PERFORMANCES-CARACTERISATION, DURABILITE, APPLICATIONS-COMPTRE RENDU DES TRAVAUX*

SCIENTIFIQUES DU PROJET NATIONAL VOIES NOUVELLES DU MATERIAU  
BETON.

- Maltais, Y. (2007). Contribution à l'étude des mécanismes de transport ionique et de dégradation chimique dans les matériaux cimentaires partiellement ou complètement saturés.
- Maso, J.-C., & Lerau, J. (1980). Mechanical behaviour of Darney sandstone (Vosges, France) in biaxial compression. Paper presented at the International Journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts.
- Mehta, P. K. (1986). Concrete. Structure, properties and materials.
- Messad, S. (2009). Mise au point d'un essai de vieillissement accéléré de l'attaque sulfatique externe pour l'application du concept de performance équivalente de la norme NF EN 206-1. In Toulouse: Thèse de doctorat de l' Université Paul Sabatier Toulouse III.
- Monteiro, P., & Mehta, P. K. (1986). Interaction between carbonate rock and cement paste. *Cement and Concrete Research*, 16(2), 127-134.
- Müller, C. (2012). Use of cement in concrete according to European standard EN 206-1. *HBRC Journal*, 8(1), 1-7.
- Najjar, Z. B. L. ( ( 1972 ) ). Diffusion non linéaire de l'eau dans le béton non saturé.
- Neville. (Editions Eyrollès ,2000). Propriétés des bétons.
- Neville, A. M. (1995). Properties of concrete (Vol. 4): Longman London.
- NF, P. P 18-555-Décembre 1990 Granulats-Mesure des Masses Volumiques, coefficient d'absorption et de la teneur en eau de sables. In.
- NF, P. (1979). P 18-554: Granulats-Mesure des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux. AFNOR, Paris.
- Ollivier, J. B. e. J.-P. (1992). Jacques Baron et Jean-Pierre Ollivier (Vol. 1 vol. ).
- Patzias, T. A. S. f. T. a. M. A., 100 Barr Harbor Drive, P. O. B. C., & West Conshohocken, P. U. S.-. (1991). THE DEVELOPMENT OF ASTM METHOD C 1012 WITH RECOMMENDED ACCEPTANCE LIMITS FOR SULFATE RESISTANCE OF HYDRAULIC CEMENTSPatzias, T. 13(1), p. 50-57.
- PHOUMMAVONG, V. (2009). Matériaux de construction; Cours en ligne; Université Nationale du Laos. In.
- Planel, D., Sercombe, J., Le Bescop, P., Adenot, F., & Torrenti, J. M. (2006). Long-term performance of cement paste during combined calcium leaching-sulfate attack: kinetics and size effect. *Cement and Concrete Research*, 36(1), 137-143.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.039>
- Planete, T. (2014). Nouvelle norme NF EN 206 et son complément national. Agenda.
- RS Ravindraraj, M. S., D Greco ( 2000). Variability of recycled concrete aggregate and its effect on concrete properties: A case study in Australia.
- Sagoe-Crentsil, K. K., Brown, T., & Taylor, A. H. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 31(5), 707-712. doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00476-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00476-2)
- Sahmaran, M., Li, M., & Li, V. C. (2007). Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure. *ACI Materials Journal*, 104(6), 604-611.
- Santhanam, M., Cohen, M. D., & Olek, J. (2001). Sulfate attack research — whither now? *Cement and Concrete Research*, 31(6), 845-851. doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00510-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00510-5)
- Sauterey, J. B. R. ( Paris : P.E.N.P.C.H, 1982). Le Béton hydraulique.
- SAUTEREY, R., BONNOT, J., & BARON, J. (1975). COURS DE MATERIAUX DE CONSTRUCTION.
- Sedran, T. (2014). Propriétés des bétons In: Le grand livre des bétons: partie 3: Formulation des bétons. In: EDITIONS LE MONITEUR.

- Taqqu, M. S. (1979). Convergence of integrated processes of arbitrary Hermite rank. *Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und verwandte Gebiete*, 50(1), 53-83.
- Titi, H. H., & Tabatabai, H. (2018). Effect of coarse aggregate type on chloride ion penetration in concrete. *Construction and Building Materials*, 162, 871-880.
- VENUAT, M. (1997). *XVIIÈME SIÈCLE ET LES PROPHECIES BIBLIQUES*. Rencontre, assimiler, copier: études rassemblées, 179.
- Viallis-Terrisse. Interaction des silicates de calcium hydratés (C-S-H), principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argiles.
- Voit, K., & Kuschel, E. (2020). Rock material recycling in tunnel engineering. *Applied Sciences*, 10(8), 2722.
- Wang, J.-W., David, D. J., Monckton, J. E., Battaglia, F., & Hen, R. (2008). Chronic fluoxetine stimulates maturation and synaptic plasticity of adult-born hippocampal granule cells. *Journal of Neuroscience*, 28(6), 1374-1384.
- Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J., & Forssberg, E. (2008). Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement and concrete composites*, 30(4), 274-282.
- Yankwa, D., & Noel, J. (2013). effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments géopolymères à base de scories volcaniques. Université de Yaoundé 1,