

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**

**Faculté de Technologie**

**Département d'Hydraulique et de Génie Civil**



# Mémoire de master

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

**Option** : Matériaux en Génie Civil

## THÈME

**EFFET DES ADDITIONS MINÉRALES SUR  
LA DURABILITÉ ET LES CARACTÉRISTIQUES  
MÉCANIQUES DU MORTIER**

**Présenté par:**

**CHOUNGARA Toufik**

Soutenu le : 24/06/2020

**Devant le jury composé de :**

|            |   |                     |     |                      |
|------------|---|---------------------|-----|----------------------|
| Président  | : | Dr. MANI Mohamed    | MCB | Université d'El-Oued |
| Rapporteur | : | Dr. LOGBI Abdelaziz | MCB | Université d'El-Oued |
| Examineur  | : | Dr. DJEDID Tarek    | MCB | Université d'El-Oued |

**Promotion : Juin 2020**

# Dédicace

**Je dédie ce modeste travail à mes chers parents :  
ma mère et mon père.**

**À ma femme et mes enfants.**

**À mes sœurs et mes frères.**

**Je le dédie également à tous mes amis sans exception.**

CHOUNGARA Toufik .

# Remerciements

Je souhaite avant tout témoigner ma reconnaissance à Monsieur **Dr. LOGBI Abdelaziz**, qui m'a fait confiance en acceptant de m'encadrer sur ce sujet.

Je tiens à remercier Monsieur **Dr. MANI Mohamed**, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider ce jury. Mes remerciements également à Monsieur **Dr. Djedid Tarek**, d'avoir accepté d'examiner ce mémoire et pour leur bienveillante attention.

Je tiens à remercier mes collègues du travail, Ingénieurs et Techniciens, du Laboratoire et Bureau des Travaux Publics **LBTP/EL-OUED**, pour leurs aides, durant toute la période de la réalisation des essais expérimentaux.

Je remercie également l'ensemble des membres du laboratoire de la cimenterie **CILAS/BISKRA**.

## Résumé

Le sujet objet de notre étude, vise l'incorporation des ajouts minéraux dans la formulation des mortiers.

Nous avons choisis deux ajouts il s'agit du sable de dunes d'El-Oued et le calcaire d'Ain Touta. Ces deux ajouts sont broyés à des finesses élevées et même plus grande que celle du ciment utilisé, et ils sont incorporés à trois taux différents (10, 15, 20%) en substitution par rapport au poids du ciment.

L'objectif visé c'était économique et écologique à la fois.

Nous avons utilisé deux milieux de conservation, il s'agit de l'eau de robinet (douce) et l'eau remontée de la nappe phréatique de la région de Oued Souf (agressive), afin d'étudier l'effet de ces deux ajouts sur la résistance mécanique et la durabilité.

L'étude a montré que l'incorporation du sable de dunes broyé de la région d'El-Oued et les fillers calcaires d'Ain Touta, a un impact bénéfique sur la résistance mécanique et la durabilité vis-à-vis de l'agression de l'eau de la nappe, notamment à long terme (90 jours).

Nous avons constaté aussi que le sable de dune broyé peut présenter un bon alternatif comme ajout minéral à la place des fines calcaires couramment utilisées dans l'industrie cimentaire.

---

**Mots clés :** Ajouts minéraux, sable de dunes, fillers calcaires, mortier, résistance mécanique, durabilité, nappe phréatique.

## Abstract

The subject of our study is aimed to incorporate mineral additions into the formulation of mortars.

We have chosen two additions: the sand dune of El-Oued and the limestone of Ain Touta. These two additions are grinded to high fineness even better than the cement used, and they are incorporated at three different rates (10, 15, 20%) in substitution with respect to the weight of the cement.

The objective was economic and ecological at the same time.

We used two conservation way, the tap water (fresh) and water raised from the groundwater of Oued Souf (aggressive), in order to study the effect of these two additions on mechanical resistance and durability.

The study showed that the incorporation of grinded dune sand from El-Oued region and the limestone filler of Ain Touta, has a beneficial impact on the mechanical resistance and durability vis-à-vis the aggression of the water table, especially in long term (90 days).

We have also found that grinded dune sand can offer a good alternative as a mineral addition in place of the limestone filler commonly used in the cement industry.

---

**Key words:** Mineral additions, dune sand, limestone filler, mortar, mechanical resistance, durability, underground water table.

## ملخص

يهدف موضوع دراستنا إلى دمج الإضافات المعدنية في تركيبة الملاط.

لقد اخترنا إضافتين: رمل الكثبان من منطقة واد سوف ودقائق الكلس من منطقة عين توتة. هاتان الإضافتان مطحونتان لدقة عالية وحتى أكبر من الإسمنت المستخدم، وتم دمجهما بثلاثة قيم مختلفة، لكل واحد منهما، باستعمال النسب (10، 15، 20 %) كبديل لوزن الإسمنت.

هدف الدراسة، اقتصادي وبيئي في نفس الوقت.

استخدمنا بيئتان للحفظ، هما ماء الصنبور (مياه عذبة) والماء المرتفع من منسوب المياه في منطقة وادي سوف (مياه ضارة)، من أجل دراسة تأثير هاتاه الإضافات على المقاومة الميكانيكية والديمومة.

أوضحت الدراسة أن دمج رمل الكثبان المطحون (واد سوف) و دقائق الكلس المطحون (عين التوتة)، له تأثير ايجابي على المقاومة الميكانيكية والديمومة فيما يتعلق بعدوانية المياه الضارة، وخاصة على المدى الطويل (90 يوما).

لقد اتبنتنا أيضًا أن رمل الكثبان المطحون يمكن أن يكون بديلاً جيداً كإضافة معدنية عوضاً عن دقائق الكلس المستخدم بشكل شائع في صناعة الإسمنت.

---

**كلمات مفتاحية:** إضافات معدنية، رمل كثبان، دقائق كلس، ملاط، مقاومة ميكانيكية، ديمومة، منسوب مياه جوفية

## Table des matières

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| <b>Dédicace</b> .....              |     |
| <b>Remerciements</b> .....         |     |
| <b>Résumé</b> .....                |     |
| <b>Table des matières</b> .....    | I   |
| <b>Liste des tableaux</b> .....    | V   |
| <b>Liste des figures</b> .....     | IIV |
| <b>Introduction générale</b> ..... | 1   |

### Chapitre I : Synthèse bibliographique

|  |    |
|--|----|
| <b>I.1 Introduction</b> .....                            | 3  |
| <b>I.2 Ciment Portland</b> .....                         | 3  |
| I.2.1 Fabrication et composition .....                   | 3  |
| I.2.2 Hydratation du ciment Portland .....               | 5  |
| I.2.2.1 Mécanisme d'hydratation .....                    | 5  |
| I.2.3 Classification des ciments courants .....          | 8  |
| I.2.4 La production du ciment .....                      | 9  |
| I.2.4.1 Production mondiale .....                        | 9  |
| I.2.4.2 Production nationale .....                       | 9  |
| <b>I.3 Ajouts minéraux</b> .....                         | 10 |
| I.3.1 Généralités .....                                  | 10 |
| I.3.2 Aperçu sur l'utilisation des ajouts minéraux ..... | 11 |
| I.3.3 Classification des ajouts minéraux .....           | 12 |
| I.3.3.1 Principaux ajouts minéraux .....                 | 12 |
| a) Ajouts minéraux actif .....                           | 12 |
| b) Ajouts minéraux inertes .....                         | 14 |
| <b>I.4 Les Mortiers</b> .....                            | 18 |
| I.4.1 Définition du mortier .....                        | 18 |
| I.4.2 Caractérisation du mortier .....                   | 18 |
| I.4.2.1 La maniabilité de mortier .....                  | 18 |
| I.4.2.2 Prise .....                                      | 19 |
| I.4.2.3 Résistances mécaniques .....                     | 20 |

|  |           |
|--|-----------|
| I.4.2.4 Retraits et gonflements .....          | 21        |
| <b>I.5 Généralités sur la durabilité .....</b> | <b>22</b> |
| I.5.1 Notion de durabilité .....               | 22        |
| I.5.2 Indicateur de durabilité .....           | 22        |
| I.5.2.1 La résistance mécanique .....          | 23        |
| I.5.2.2 La porosité .....                      | 23        |
| I.5.2.3 La résistance à la carbonatation ..... | 23        |
| I.5.2.4 La résistance aux sulfates .....       | 23        |
| I.5.2.5 La résistance aux chlorures .....      | 24        |
| <b>I.6 Conclusion .....</b>                    | <b>24</b> |

## Chapitre II : Méthodes d'essais et caractérisation des matériaux

|   |           |
|---|-----------|
| <b>II.1 Introduction .....</b>  | <b>25</b> |
| <b>II.2 Caractéristiques des matériaux utilisés .....</b>                 | <b>25</b> |
| II.2.1 Ciment .....   | 25        |
| II.2.1.1 Caractéristiques techniques .....                                | 26        |
| II.2.1.2 Résultats des essais complémentaires sur ciment .....            | 29        |
| II.2.1.3 Résumé sur les résultats du ciment .....                         | 29        |
| II.2.2 Le sable alluvionnaire .....                                       | 30        |
| II.2.2.1 Prélèvement des échantillons .....                               | 30        |
| II.2.2.2 Essais de caractérisation des sables alluvionnaires .....        | 31        |
| II.2.2.3 Récapitulatifs des résultats des sables alluvionnaires .....     | 39        |
| II.2.2.4 Résumé sur les résultats des sables alluvionnaires .....         | 41        |
| II.2.3 Sable de dune broyé .....  | 41        |
| II.2.3.1 Essais réalisés sur le Sable de dune broyé .....                 | 43        |
| II.2.4 Filler de calcaire .....   | 46        |
| II.2.5 Résultats des fines (Sable de dune broyé et filler calcaire) ..... | 47        |
| II.2.5 L'Eau .....  | 47        |
| II.2.6.1 Eau de gachage .....   | 48        |
| II.2.6.2 Eau de cure .....  | 48        |
| II.2.6.3 Résultats d'analyses des eaux .....                              | 49        |
| II.2.6.4 Schéma explicatif d'utilisation des eaux .....                   | 50        |
| II.2.6.5 Résumé sur les analyses des eaux de la nappe .....               | 50        |

|  |    |
|--|----|
| <b>II.3 Formulation de mortier</b> .....                         | 51 |
| II.3.1 Confection du mortier .....                               | 51 |
| II.3.2 Programme des essais à réaliser sur le mortier .....      | 53 |
| II.3.3 Consistance du mortier frais à la table à secousses ..... | 53 |
| II.3.4 Confection des éprouvettes prismatiques .....             | 54 |
| II.3.5 Mesure de la masse volumique .....                        | 57 |
| II.3.6 Absorption d'eau par immersion totale .....               | 58 |
| II.3.7 Absorption d'eau par capillarité (Sorptivité) .....       | 59 |
| II.3.8 Essais de résistances mécaniques .....                    | 60 |
| II.3.8.1 Résistance à la flexion .....                           | 60 |
| II.3.8.2 Résistance à la compression .....                       | 61 |
| II.3.9 Auscultation microscopiques .....                         | 62 |
| II.3.10 Auscultation ultrasonique .....                          | 62 |
| <b>II.4 Conclusion</b> .....                                     | 64 |

### Chapitre III : Résultats et discussions

|   |    |
|---|----|
| <b>III.1 Introduction</b> .....   | 65 |
| <b>III.2 Abréviations de nominations utilisées</b> .....                    | 65 |
| <b>III.3 Relation finesse/ masse volumique apparente des fillers</b> .....  | 65 |
| <b>III.4 Caractérisation des mortiers</b> .....                             | 66 |
| III.4.1 Consistance des mortiers frais .....                                | 66 |
| III.4.2 Masse volumique des mortiers .....                                  | 68 |
| III.4.3 Absorption d'eau par immersion totale .....                         | 70 |
| III.4.4 Absorption d'eau par capillarité (Sorptivité) .....                 | 72 |
| III.4.4.1 Suivi de la masse absorbée durant les premières 4h .....          | 72 |
| III.4.4.2 Coefficient de sorptivité à 72h .....                             | 73 |
| III.4.4.3 Évolution du coefficient de sorptivité en fonction du temps ..... | 75 |
| III.4.5 Résultats des essais mécaniques .....                               | 76 |
| III.4.5.1 Résistance à la flexion .....                                     | 76 |
| a) Analyse des résultats de la résistance à la flexion .....                | 76 |
| b) Comparaison du mortier MC avec des mortiers MSDB et MFC en (ED)...       | 77 |
| c) Comparaison du mortier MC avec des mortiers MSDB et MFC en (EA)...       | 79 |
| III.4.5.2 Résistance à la compression .....                                 | 80 |

|  |           |
|--|-----------|
| a) Comparaison du mortier MC avec des mortiers MSDB et MFC en (ED) ..... | 81        |
| b) Comparaison du mortier MC avec des mortiers MSDB et MFC en (EA)...    | 83        |
| III.4.6 Résultats d'auscultation ultrasonique .....                      | 84        |
| <b>III.5 Conclusion .....</b>  | <b>86</b> |
| <b>Conclusion générale .....</b>   | <b>87</b> |
| <b>Références bibliographiques .....</b>                                 | <b>90</b> |

| <b>Liste des tableaux</b>   |   |             |
|---|---|-------------|
| <b>Chapitre I : Synthèse bibliographique</b>                            |   |             |
| <b>Numéro</b>   | <b>Titre</b>  | <b>Page</b> |
| Tableau I.1   | Teneurs massiques des composants du clinker                               | 3           |
| Tableau I.2   | Propriétés des quatre principaux constituants du ciment portland          | 4           |
| Tableau I.3   | Produits d'hydratation des composés anhydres du CEM I                     | 7           |
| Tableau I.4   | Différents types de ciment courants en fonction de leur composition       | 8           |
| Tableau I.5   | Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes                   | 11          |
| <b>Chapitre II : Méthodes d'essais et caractérisation des matériaux</b> |   |             |
| <b>Numéro</b>   | <b>Titre</b>  | <b>Page</b> |
| Tableau II.1  | Résumé de la composition chimique du ciment CEM I 42.5R                   | 26          |
| Tableau II.2  | Composition potentielle de clinker  | 26          |
| Tableau II.3  | Propriétés physico-mécaniques   | 26          |
| Tableau II.4  | Caractéristiques physiques du ciment utilisé                              | 29          |
| Tableau II.5  | Nature et qualité du sable en fonction de l'ES                            | 34          |
| Tableau II.6  | Caractéristiques physiques des sables alluvionnaires analysés             | 39          |
| Tableau II.7  | Analyse chimique des différents prélèvements des sables alluvionnaires    | 40          |
| Tableau II.8  | Analyse préliminaire du taux de carbonates des fines calcaire             | 46          |
| Tableau II.9  | Caractéristiques physiques des fines                                      | 47          |
| Tableau II.10   | Analyses chimiques des fines  | 48          |
| Tableau II.11   | Composition chimique de l'eau de gâchage et de la nappe                   | 50          |
| Tableau II.12   | Récapitulatif des opérations de malaxage du mortier                       | 52          |
| Tableau II.13   | Classes des consistances du mortier selon la valeur d'étalement           | 54          |
| Tableau II.14   | Résumé des quantités nécessaires à préparer pour gâchées de 6 éprouvettes | 55          |

| <b>Chapitre III : Résultats et discussions</b> |  |             |
|--|--|-------------|
| <b>Numéro</b>                                  | <b>Titre</b>   | <b>Page</b> |
| Tableau III.1                                  | Consistance des différentes formulations du mortier  | 67          |
| Tableau III.2                                  | Résultats de la masse volumique de différentes formulations du mortier                     | 68          |
| Tableau III.3                                  | Diminution de la masse volumique en (%), d'un état saturé à un état sec                    | 69          |
| Tableau III.4                                  | Résultats de l'absorption par immersion en fonction de la formulation du mortier           | 70          |
| Tableau III.5                                  | Récapitulatif des résultats des coefficients de sorptivité à 72h                           | 74          |
| Tableau III.6                                  | Récapitulatif des résultats de la résistance à la flexion des différentes formulations     | 76          |
| Tableau III.7                                  | Récapitulatif des résultats de la résistance à la compression des différentes formulations | 81          |
| Tableau III.8                                  | Récapitulatif des résultats de l'auscultation ultrasonique                                 | 85          |

| Liste des figures  |   |      |
|--|---|------|
| Chapitre I : Synthèse bibliographique                            |   |      |
| Numéro   | Titre   | Page |
| Figure I.1   | Diagramme de Keil (Système CaO-SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )                     | 3    |
| Figure I.2   | Image d'un clinker réalisée au Microscope Électronique à Balayage                                     | 4    |
| Figure I.3   | Le ciment Portland, du cru au ciment hydraté  | 7    |
| Figure I.4   | Cristaux de portlandite dans la matrice cimentaire sous MEB   | 8    |
| Figure I.5   | Production du ciment des dix principaux pays producteurs du monde en 2016 en comparant avec l'Algérie | 9    |
| Figure I.6   | Hydratation d'un ciment sans et avec ajout cimentaire   | 10   |
| Figure I.7   | Pouzzolane naturelle granulée   | 12   |
| Figure I.8   | Laitier cristallisé et laitier granulé de haut fourneau   | 13   |
| Figure I.9   | Fumée de silice   | 13   |
| Figure I.10  | Représentation schématique de la densité de compactage du ciment portland, sans et avec ajouts        | 15   |
| Figure I.11  | Types de dunes  | 16   |
| Figure I.12  | Les Siouf ou Sif (El-Oued / Algérie)  | 17   |
| Figure I.13  | Situation géographique des Ergs (sables de dunes) de l'Algérie  | 17   |
| Figure I.14  | Constituants des divers types de mortier  | 18   |
| Figure I.15  | Étapes de l'essai de maniabilité  | 19   |
| Figure I.16  | Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge   | 20   |
| Figure I.17  | Moule pour éprouvettes prismatiques de mortier  | 20   |
| Figure I.18  | Dispositifs des écrasements des essais mécaniques   | 21   |
| Figure I.19  | Dispositif de mesure du retrait   | 22   |
| Chapitre II : Méthodes d'essais et caractérisation des matériaux |   |      |
| Numéro   | Titre   | Page |
| Figure II.1  | Sac de ciment utilisé (CEM I 42.5R - Biskria)   | 25   |
| Figure II.2  | Étapes de la détermination de la masse volumique absolue du ciment au pycnomètre                      | 28   |
| Figure II.3  | Carrières du sable alluvionnaire (Gisement de Djamâa/El-Oued)   | 30   |
| Figure II.4  | Prélèvement du sable alluvionnaire sur site   | 31   |
| Figure II.5  | Situation géographique des carrières du sable alluvionnaire Djamâa/El-Oued (Google Earth 2020)        | 31   |

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Figure II.6  | Série des tamis d'analyse du sable  | 32 |
| Figure II.7  | Étapes de l'essai d'équivalent du sable   | 34 |
| Figure II.8  | Mesure de la masse volumique du sable jaune   | 35 |
| Figure II.9  | Étapes principales d'analyses chimiques   | 37 |
| Figure II.10 | Exécution de l'essai au Calcimètre Dietrich   | 37 |
| Figure II.11 | Courbes des sables alluvionnaires analysés  | 39 |
| Figure II.12 | Sable jaune et rouge de la carrière Djamâa/El.Oued (Images au microscope optique)               | 41 |
| Figure II.13 | Sable de dune prélevé près du complexe touristique la Gazelle d'Or/El-Oued                      | 42 |
| Figure II.14 | Prélèvement du sable de dune / El-Oued  | 42 |
| Figure II.15 | Illustration sur la phase préparatoire du sable de dune broyé                                   | 43 |
| Figure II.16 | Analyse granulométrique par sédimentométrie   | 44 |
| Figure II.17 | Appareil de Blaine de marque ACMEL/Laboratoire cimenterie CILAS/Biskra                          | 44 |
| Figure II.18 | Broyage du filler calcaire  | 46 |
| Figure II.19 | Courbes granulométriques des fines  | 48 |
| Figure II.20 | Zone de prélèvement des eaux agressives (Chott /El-Oued)  | 49 |
| Figure II.21 | Localisation du prélèvement des eaux agressives (Chott/El.Oued)                                 | 49 |
| Figure II.22 | Schéma explicatif d'utilisation des eaux  | 50 |
| Figure II.23 | Étapes de la préparation du mortier au laboratoire LBTP/El-Oued                                 | 52 |
| Figure II.24 | Étalement du mortier à la table à secousses   | 54 |
| Figure II.25 | Conservation des éprouvettes prismatiques du mortier  | 56 |
| Figure II.26 | Mesure de la masse volumique à la pesée hydrostatique   | 57 |
| Figure II.27 | Absorption d'eau par capillarité (Sorptivité) des mortiers éprouvette 40x40x160 mm <sup>3</sup> | 59 |
| Figure II.28 | Écrasement d'une éprouvette prismatique (40x40x160 mm <sup>3</sup> ) par flexion                | 60 |
| Figure II.29 | Écrasement d'un demi-prisme en compression  | 61 |
| Figure II.30 | Images microscopiques sur une coupe d'éprouvette du mortier de ciment                           | 62 |
| Figure II.31 | Calibrage de l'appareil Ultra-son   | 63 |
| Figure II.32 | Exécution d'une mesure ultra sonique (Ultra-son Controls)                                       | 63 |

| <b>Chapitre III : Résultats et discussions</b> |  |             |
|--|--|-------------|
| <b>Numéro</b>                                  | <b>Titre</b>   | <b>Page</b> |
| Figure III.1                                   | Variation de la masse volumique apparente en fonction de la finesse par SSB  | 66          |
| Figure III.2                                   | Évolution de la consistance en fonction de type du mortier   | 67          |
| Figure III.3                                   | Évolution de la masse volumique en fonction de la formulation du mortier, à l'âge de 28 jours  | 69          |
| Figure III.4                                   | Évolution de l'absorption par immersion en fonction de la formulation du mortier   | 71          |
| Figure III.5                                   | Évolution de la masse absorbée par unité de surface aux cours des premières 4h (ED)  | 72          |
| Figure III.6                                   | Évolution de la masse absorbée par unité de surface aux cours des premières 4h (EA)  | 73          |
| Figure III.7                                   | Variation du coefficient de sorptivité à 72 h, en fonction de la formulation du mortier (L'âge des éprouvettes soumises à l'essai, 28 jours) | 74          |
| Figure III.8                                   | Dégressivité du coefficient de sorptivité en fonction du temps (ED)  | 75          |
| Figure III.9                                   | Représentation de la méthode suivie en analyses des résultats des essais mécaniques  | 77          |
| Figure III.10                                  | Évolution de la résistance à la flexion, en fonction de l'âge du mortier en ED (Comparaison entre mortier MC et mortiers MSBD)               | 77          |
| Figure III.11                                  | Évolution de la résistance à la flexion, en fonction de l'âge du mortier en ED (Comparaison entre mortier MC et mortiers MFC)                | 78          |
| Figure III.12                                  | Évolution de la résistance à la flexion, en fonction de l'âge du mortier en EA (Comparaison entre mortier MC et mortiers MSBD)               | 79          |
| Figure III.13                                  | Évolution de la résistance à la flexion, en fonction de l'âge du mortier en EA (Comparaison entre mortier MC et mortiers MFC)                | 80          |
| Figure III.14                                  | Évolution de la résistance à la compression, en fonction de l'âge de mortier en ED (Comparaison entre mortier MC et mortiers MSBD)           | 81          |
| Figure III.15                                  | Évolution de la résistance à la compression, en fonction de l'âge de mortier en ED (Comparaison entre mortier MC et mortiers MFC)            | 82          |
| Figure III.16                                  | Évolution de la résistance à la compression, en fonction de l'âge de mortier en EA (Comparaison entre mortier MC et mortiers MSBD)           | 83          |
| Figure III.17                                  | Évolution de la résistance à la compression, en fonction de l'âge de mortier en EA (Comparaison entre mortier MC et mortiers MFC)            | 84          |
| Figure III.18                                  | Évolution de la vitesse des ondes ultrasoniques, en fonction de la formulation du mortier  | 85          |

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## Introduction générale

L'exploitation des ajouts minéraux, que ce soit dans la phase de la production des ciments, ou dans la phase de réalisation des projets, a résolu en grande partie le problème du manque enregistré dans la couverture du marché en ciment, et d'un côté économique permet de l'abaissement du coût énergétique, en effet l'incorporation des ajouts et exceptionnellement inertes, tels que les fillers calcaire comme alternatif est très connu dans le domaine de l'industrie des ciments, il permet de réduire considérablement le coût de production, qui est un facteur très important dans le marché du ciment.

D'autre part, l'utilisation des ajouts inertes ou actifs, dans le domaine des recherches expérimentales, avec des taux d'incorporation variables, nous a permis d'obtenir en fonction des objectifs recherchés, des solutions pour plusieurs problèmes; tels que les risques des agressions chimiques des eaux remontées de la nappe phréatique qui ont présentés un problème majeur pour la durabilité des infrastructures, de ce fait, l'utilisation des ajouts avec des taux incorporation optimisés, augmente la compacité des squelettes cimentaires et peut améliorer même le mécanisme d'hydratation et tout cela contribuent à l'amélioration des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques des bétons et des mortiers.

Les additions minérales, telles que le sable de dunes broyé rarement utilisé et les fillers calcaires couramment utilisés, présentent une bonne solution pour atteindre ces objectifs.

### **Objectif de l'étude :**

L'objectif de notre étude, est d'évaluer expérimentalement les effets des additions minérales, il s'agit du sable de dune broyé et les fillers calcaires, qui sont des additions inertes, avec des taux d'incorporation variables, sur les caractéristiques mécaniques du mortier ainsi que la durabilité des infrastructures.

### **Organisation du mémoire :**

Notre mémoire est structuré en une introduction générale, trois chapitres et une conclusion générale;

- **Introduction générale** : Est un préambule qui définit les principaux axes de notre étude.
- **Le premier chapitre** : Est consacré à la recherche bibliographique, qui comporte une synthèse bibliographique sur les matériaux à base du ciment en générale, et exceptionnellement sur les mortiers et les ajouts et leurs rôles dans une formulation du mortier.
- **Le deuxième chapitre** : Composé d'une première partie, qui traite l'ensemble des matériaux utilisés, avec les modes de réalisation des essais et la caractérisation des matériaux analysées;  
En deuxième partie de ce chapitre, l'élaboration de différentes formulations des mortiers, avec un descriptif sur les essais réalisés sur le mortier à l'état frais et durci.
- **Le troisième chapitre** : Est un résumé des résultats des essais réalisés sur les différentes formulations des mortiers étudiées, ainsi que l'analyse et l'interprétation de ces résultats.
- **Conclusion générale** : Ce mémoire est clôturé par une conclusion générale qui conclure tout le travail effectué, et la proposition des recommandations.

**CHAPITRE I :**

**SYNTHÈSE**

**BIBLIOGRAPHIQUE**

## I.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à un rappel général qui synthétise tous les sujets impressionnés par notre thème il s'agit des matériaux cimentaires processus de fabrication, composition, et leur processus d'hydratation tout en passant à une revue sur les additions minérales et l'effet des ajouts en substitution au ciment sur la durabilité en différents milieux. Et enfin de ce revue bibliographique on va passer à un aperçu sur les mortiers composition et classification.

## I.2 Ciment Portland

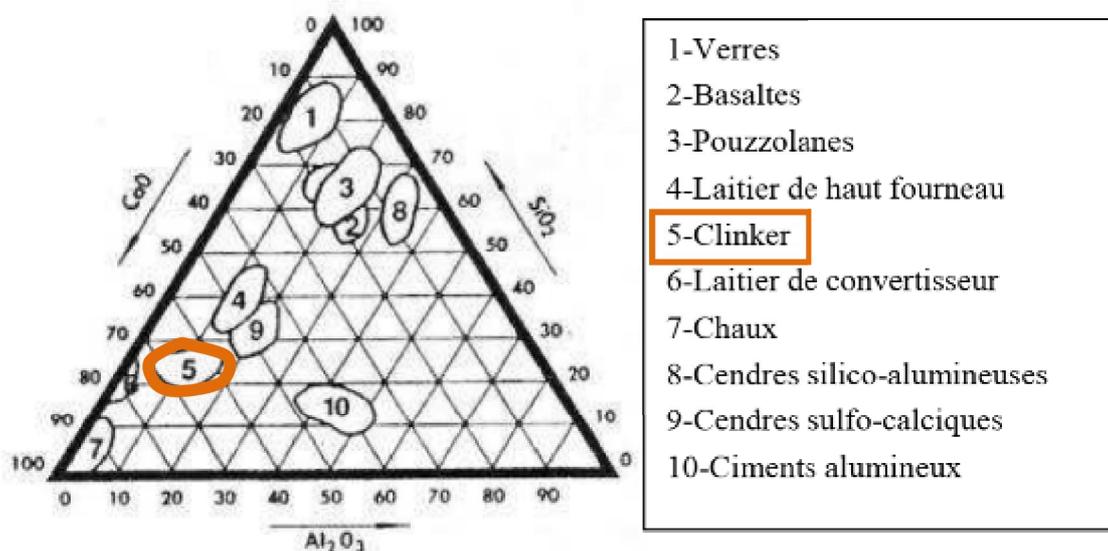
### I.2.1 Fabrication et composition

Le ciment Portland communément appelé CEM I est un mélange composé majoritairement par de clinker avec un pourcentage au voisinage de 95% et un faible pourcentage de gypse généralement inférieur à 5%. Ce matériau a été découvert par Louis Vicat en 1818 sur la base de ses travaux sur les chaux hydrauliques et a été breveté par Joseph Aspdin en 1824. Le nom « Portland » a été choisi pour bénéficier de la réputation qu'avait la pierre extraite des carrières de l'île Portland, située au sud-ouest de l'Angleterre.

Le clinker, le principal composant du ciment Portland, est fabriqué par cuisson dans un four rotatif à 1450 °C d'un mélange finement broyé et homogénéisé de calcaire et d'argile dans un rapport d'environ 80-20 %. À la sortie du four, et après refroidissement par une trempé à l'air, le mélange présente les compositions et proportions massiques résumées dans le tableau I.1 :

**Tableau I.1** : Teneurs massiques des composants du clinker [TAY 90]

| Éléments    | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO     | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO   | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O |
|-------------|------------------|--------------------------------|---------|--------------------------------|-------|-----------------|------------------|-------------------|
| % massiques | 19 - 25          | 2 - 9                          | 62 - 67 | 1 - 5                          | 0 - 3 | 1 - 3           | 0.6              | 0.3               |



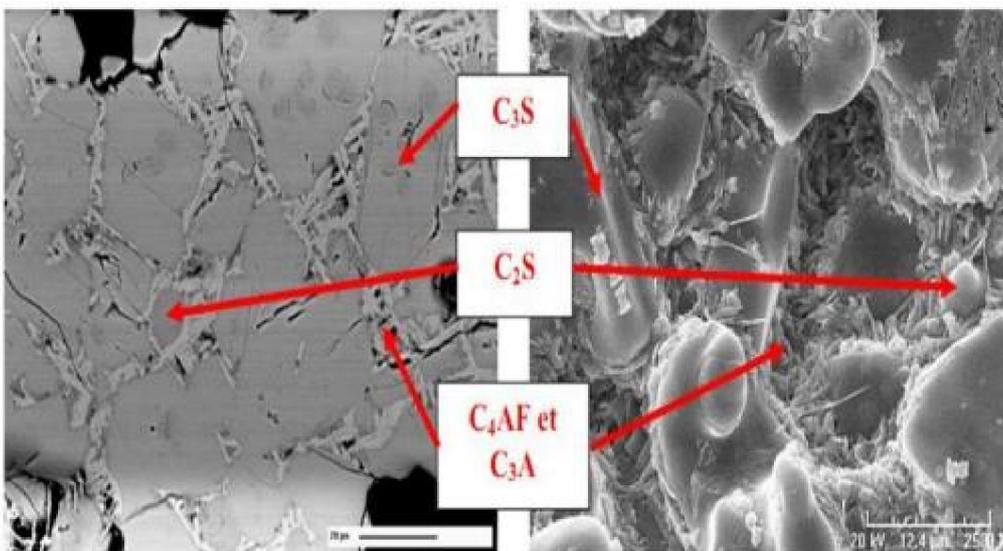
**Figure I.1** : Diagramme de Keil (Système CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [HOU 13]

Ces éléments sont combinés pour former les quatre principaux composants du ciment portland avec leurs propriétés qui sont regroupés dans le tableau I-2.

**Tableau I.2 :** Propriétés des quatre principaux constituants du ciment portland [TAG 04].

| Constituant                 | Silicate Tricalcique (Alite)                    | Silicate bicalcique Bélite                    | Aluminate tricalcique Phase aluminate                      | Aluminoferrite tétracalcique Célite   |
|-----------------------------|---|---|--|---|
| Composition chimique        | (C <sub>3</sub> S)<br>3CaO.SiO <sub>2</sub>     | (C <sub>2</sub> S)<br>2CaO.SiO <sub>2</sub>   | (C <sub>3</sub> A)<br>3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | (C <sub>4</sub> AF)<br>4CaO .Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| Proportions (%)             | 50 à 70   | 15 à 30                                       | 5 à 10   | 5 à 15  |
| Prise                       | Rapide (heures)                                 | Lente (jours)                                 | Instantanée  | Très rapide (minutes)   |
| Développement de résistance | Rapide (jours)                                  | Lent (semaines)                               | Très rapide (un jour)                                      | Très rapide (un jour)   |
| Résistance ultime           | Grande (élevée) : Dizaine de MPa                | Probablement Grande (élevée) : Dizaine de MPa | Faible : quelques MPa                                      | Faible : quelques MPa   |
| Chaleur d'hydratation       | Moyenne : ~500j/g                               | Faible : ~250j/g                              | Très élevée : ~850j/g                                      | Moyenne : ~420j/g   |
| Remarques                   | Le constituant caractérisant du ciment portland | /   | Instable dans l'eau ; vulnérable à l'attaque des sulfates. | caractérisant la couleur grise du ciment  |

Le caractère hydraulique du ciment est apporté par le clinker. Le gypse et/ou anhydrite (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O ou CSH<sub>2</sub> en notation cimentière) ajouté régule la prise du ciment notamment par une action sur l'hydratation des phases aluminates étant donné qu'elles sont beaucoup plus réactives à l'eau.



**Figure I.2 :** Image d'un clinker réalisée au Microscopie Électronique à Balayage [CYR 09]

## I.2.2 Hydratation du ciment Portland

L'« Hydratation » est un mot utilisé pour décrire de la manière la plus générale, l'ensemble des réactions chimiques qui interviennent dès que le ciment est mis en contact avec l'eau. Comme toutes les réactions chimiques, celles-ci obéissent à des lois thermodynamiques et cinétiques [NON 08].

Lorsque le ciment est placé au contact de l'eau, le mécanisme d'hydratation s'opère par une succession d'étapes décrites pour la première fois par Le Chatelier en 1904 [CHA 04]. En effet, les phases anhydres constituant le ciment (C3S, C2S, C3A, C4AF et le régulateur de prise) conduisent en se dissolvant à sursaturer la solution de gâchage en calcium, silicium, aluminium, alcalins, sulfates...

En présence de cette solution sursaturée, les phases hydratées très peu solubles vont se précipiter conférant ainsi au matériau sa résistance mécanique. La précipitation des hydrates va diminuer la concentration des ions en solution permettant ainsi à nouveau la dissolution des phases anhydres. Et ainsi de suite, ce processus de dissolution/précipitation se poursuit jusqu'à hydratation totale et épuisement de l'eau nécessaire à ce processus. L'avancement de l'hydratation d'une pâte de ciment (**pdC**) est caractérisé par le degré d'hydratation ( $\alpha_{hyd}$ ) défini comme étant le rapport entre la masse d'anhydres ayant réagi et la masse initiale d'anhydre.

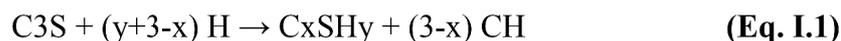
### I.2.2 .1 Mécanisme d'hydratation

On se propose désormais de présenter les principales réactions d'hydratation de chacun des composants anhydres du ciment.

#### ➤ Hydratation des silicates C3S et C2S

Le C3S se dissout rapidement lors du mélange du ciment Portland avec l'eau de gâchage. Sa dissolution aboutit à la précipitation de portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (CH selon la notation cimentière) et de silicates de calcium hydratés (C-S-H). Les C-S-H formés présentent un rapport  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  (C/S) variant entre 1,5 et 1,7.

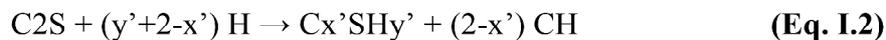
L'équation-bilan s'écrit:



L'hydratation du C3S a une importance particulière parce qu'il est le composant majoritaire des ciments Portland (tableau I-2) ; de plus, son produit d'hydratation (C-S-H) influence la plus grande partie des propriétés mécaniques de la pâte durcie.

Le C3S confère rapidement au ciment une résistance élevée, son hydratation n'évolue pratiquement plus après 28 jours.

Contrairement au C3S, le C2S possède une cinétique plus lente [EUR 01], et permet donc d'atteindre des résistances élevées à moyen et long terme. Les produits de son hydratation sont pourtant identiques :



### ➤ Hydratation des aluminates C3A et C4AF

Le C3A est le constituant le plus réactif du clinker. En absence de régulateur de prise, le C3A réagit très rapidement avec l'eau pour donner des hydrates métastables (C4AH13, C2AH8) qui se transforment en aluminat de calcium hydraté C3AH6. La précipitation rapide de ces hydroaluminates de calcium conduit à une rigidification précoce du matériau qui nuit à son ouvrabilité.

L'addition de gypse permet justement d'éviter ce phénomène de fausse prise due à la cristallisation quasi immédiate des aluminates hydratés. Cet ajout de gypse provoque en effet la formation autour des grains de C3A de l'ettringite (trisulfo-aluminat de calcium hydraté - C6AS3H32) relevant ainsi d'une réactivité plus lente qu'en absence de gypse. Une mole de C3A et 3 moles de gypse dissoutes aboutissent à la précipitation d'1 mole d'ettringite :



La teneur en gypse des ciments étant limitée, il y a donc en général excès de C3A par rapport au gypse. Lorsque le gypse est totalement consommé, la solution devient sous-saturée par rapport à l'ettringite. Celle-ci se dissout et devient la nouvelle source de sulfate pour former avec le C3A excédentaire un nouveau composé: le monosulfoaluminat de calcium hydraté (C4ASH12). Le processus peut être exprimé par l'équation bilan suivante :



L'hydratation du C4AF en présence de gypse, génère la précipitation d'hydrates semblables à ceux produits par le C3A. Le fer remplace l'aluminium dans l'ettringite pour former l'ettringite ferrière.

La vitesse de réaction est cependant beaucoup plus lente ; des cristaux de C4AF subsistent dans une pâte de ciment CEM I même après 5 ans d'hydratation.

Les produits d'hydratation des différentes phases du ciment Portland sont résumés dans le Tableau I-3.

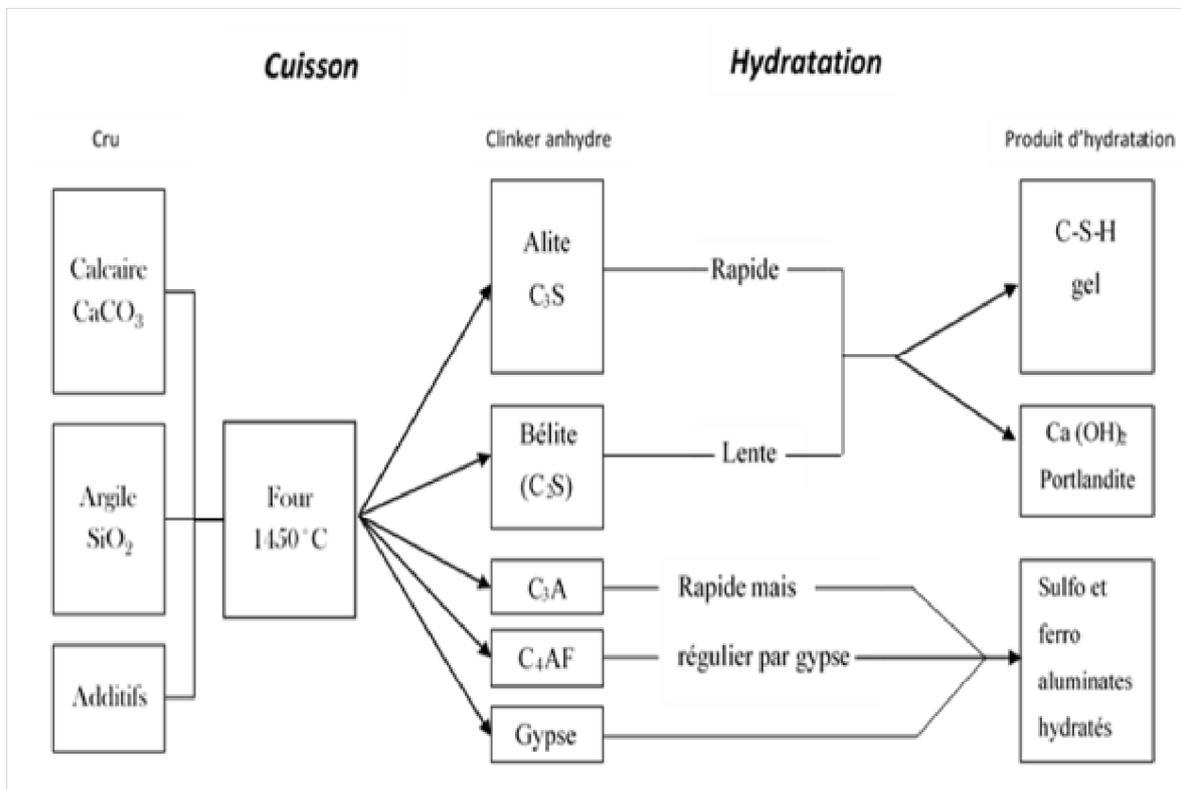
Au total, une pâte de ciment Portland hydratée contient, en termes de proportions massiques, approximativement 15 à 25 % de portlandite, 60 à 70 % de C-S-H et 5 à 15 % de phases aluminates.

**Tableau I.3 :** Produits d’hydratation des composés anhydres du CEM I [SOR 77]

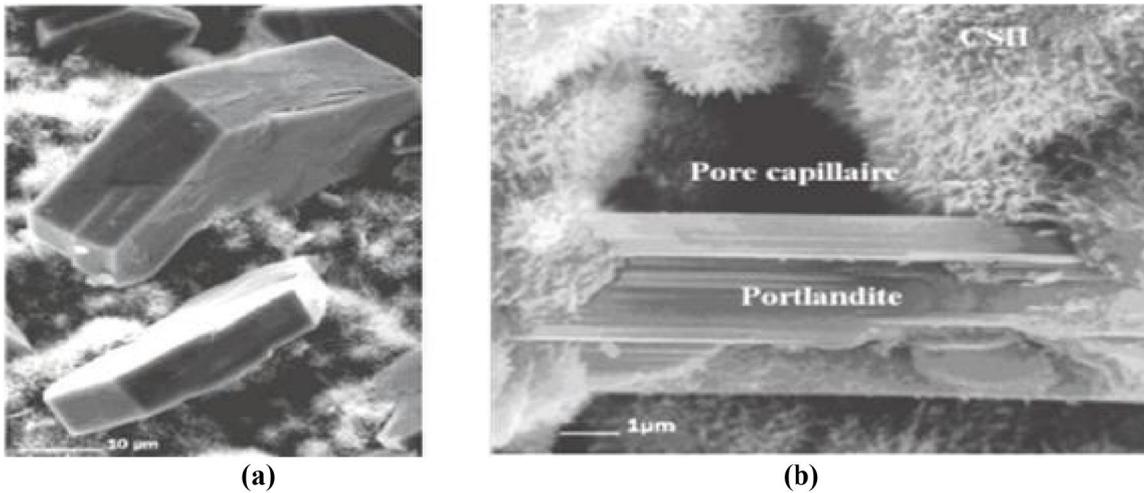
| Notation cimentière   | Formule Chimique en oxyde   | Dénomination                                   |
|---|---|--|
| C <sub>3</sub> S  | (CaO) <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>  | Silicate tricalcique                           |
| C <sub>2</sub> S  | (CaO) <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub>  | Silicate bicalcique                            |
| C <sub>3</sub> A  | (CaO) <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | Aluminate tricalcique                          |
| C <sub>4</sub> AF   | (CaO) <sub>4</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                    | Aluminoferrite tétracalcique                   |
| CH  | Ca(OH) <sub>2</sub>   | Portlandite                                    |
| C-S-H   | (CaO) <sub>x</sub> -SiO <sub>2</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>y</sub>   | Silicate de calcium hydraté                    |
| C <sub>3</sub> A.(C $\bar{S}$ ) <sub>3</sub> .H <sub>32</sub> | (CaO) <sub>6</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(SO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>32</sub> | Ettringite ou “Aft”                            |
| C <sub>3</sub> A.(C $\bar{S}$ ) <sub>1</sub> .H <sub>12</sub> | (CaO) <sub>6</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(SO <sub>3</sub> ) <sub>1</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>12</sub> | Monosulfoaluminate de calcium hydrate ou “Afm” |
| C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub>                                | (CaO) <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>8</sub>                                   | Aluminate dicalcique hydraté                   |
| C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub>                                | (CaO) <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>                                   | Aluminate tricalcique hydraté                  |
| C <sub>4</sub> AH <sub>13</sub>                               | (CaO) <sub>4</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>13</sub>                                  | Aluminate tétracalcique hydraté                |

➤ **Le ciment Portland, du cru au ciment hydraté :**

Les différentes phases de passage de l’état préparatoire(cru) puis ciment anhydre jusqu’à la phase ciment hydraté, sont représentées schématiquement à la figure I.3.



**Figure 1.3 :** Le ciment Portland, du cru au ciment hydraté [NOI 00]



(a) Cristaux de portlandite [DAM 95]

(b) La portlandite réalise un pont d'hydrates dans la matrice cimentaire [REG 75]

**Figure I.4** : Cristaux de portlandite dans la matrice cimentaire sous MEB

### I.2.3 - Classification des ciments courants :

Selon les constituants principaux ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme algérienne NA 442 conforme à la norme européenne NF EN 197 1. Le tableau (I.4) ci –dessous donne la liste des différents types des ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d'eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu'ils comportent.

**Tableau I.4** : Différents types de ciment courants en fonction de leur composition [DUP 09]

| Désignations     | Types de ciments                 | Teneur en clinker | Teneur en % de l'un des constituants suivants: laitier - pouzzolanes - cendres –calcaires – schistes – fumées de silice                          | Teneur en constituants secondaires |
|------------------|----------------------------------|-------------------|--|------------------------------------|
| <b>CEM I</b>     | Ciment portland                  | 95 à 100 %        |  | 0 à 5 %                            |
| <b>CEM II/A</b>  | Ciment portland composé          | 80 à 94 %         | De 6 à 20% d'un quelconque des constituants, sauf. FS, le % est limitée à 10% (*);<br>De 21 à 35% avec les mêmes restrictions que ci-dessus (*). | 0 à 5 %                            |
| <b>CEM II/B</b>  |                                  | 65 à 79 %         |  | 0 à 5 %                            |
| <b>CEM III/A</b> | Ciment de haut fourneau          | 35 à 64 %         | De 36 à 65 % de L.H.F.   | 0 à 5 %                            |
| <b>CEM III/B</b> |                                  | 20 à 34 %         | De 66 à 80 % de L.H.F.   | 0 à 5 %                            |
| <b>CEM III/C</b> |                                  | 5 à 19 %          | De 81 à 95 % de L.H.F.   | 0 à 5 %                            |
| <b>CEM IV/A</b>  | Ciment pouzzolanique             | 65 à 90 %         | De 10 à 35% de pouzzolanes, C.S ou F.S, ces dernières limitées à 10%,<br>De 36 à 50% comme ci-dessus   | 0 à 5 %                            |
| <b>CEM IV/B</b>  |                                  | 45 à 64 %         |  | 0 à 5 %                            |
| <b>CEM V/A</b>   | Ciment au laitier et aux cendres | 40 à 64 %         | De 18 à 30% de L.H.F. et 18 à 30 % de C.S. ou de pouzzolanes,<br>De 31 à 50% de chacun des deux constituants comme ci-dessus                     | 0 à 5 %                            |
| <b>CEM V/B</b>   |                                  | 20 à 39 %         |  | 0 à 5 %                            |

(\*)Le pourcentage des fillers est limité à 5%

## I.2.4 La production du ciment :

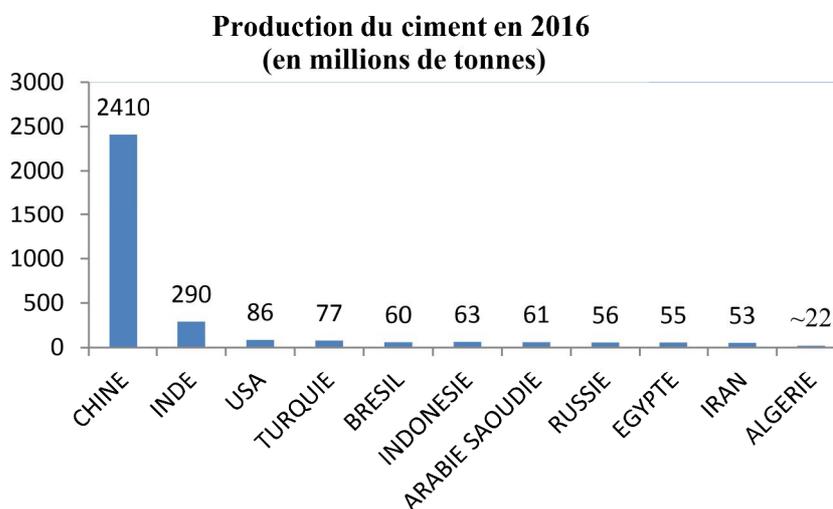
### I.2.4.1 Production mondiale:

L'industrie mondiale du ciment se développe en termes de production et de volume de consommation.

Au total, la production mondiale de ciment augmente régulièrement, grâce à la croissance de la production dans les Pays émergents : 1,370 milliard de tonnes en 1994, 2,55 milliards en 2006, 3,4 milliards de tonnes en 2011, 4 milliards de tonnes en 2013, et 4,6 milliards de tonnes en 2015. En moyenne, sur le plan mondial la production s'élève à presque 750 kilos de ciment par habitant et par an, en 2015.

Selon les dernières statistiques de l'organisme américain USGS (United States Geological Survey), Global Cement Report et de Cembureau, l'Association européenne du ciment. La Chine reste toujours le premier fabricant et consommateur de ciment. Les marchés émergents consomment aujourd'hui 57 % de la production de ciment, suivie par l'Inde; les USA et la Turquie [LOG 19].

Il est important de signaler, que vu le coût de transport élevé du ciment; la production cimentière reste toujours locale, et 95 % de la production du ciment en moyenne consommée dans le monde, sont exploités dans les pays de production. [LOG 19].



**Figure I.5** Production du ciment des dix principaux pays producteurs du monde en 2016 en comparant avec l'Algérie [LOG 19]

### I.2.4.2 Production nationale :

En Algérie, les cimenteries publiques et privées ont produit quelque 25 millions de tonnes de ciment en 2017, selon des statistiques économiques récentes publiées par le ministère de l'Industrie et des Mines. Cette production, est passée de 20 à 25 millions de tonnes entre de

2015 et 2017 grâce à la réception de plusieurs projets d'extension ou de nouvelles cimenteries [GIC 18].

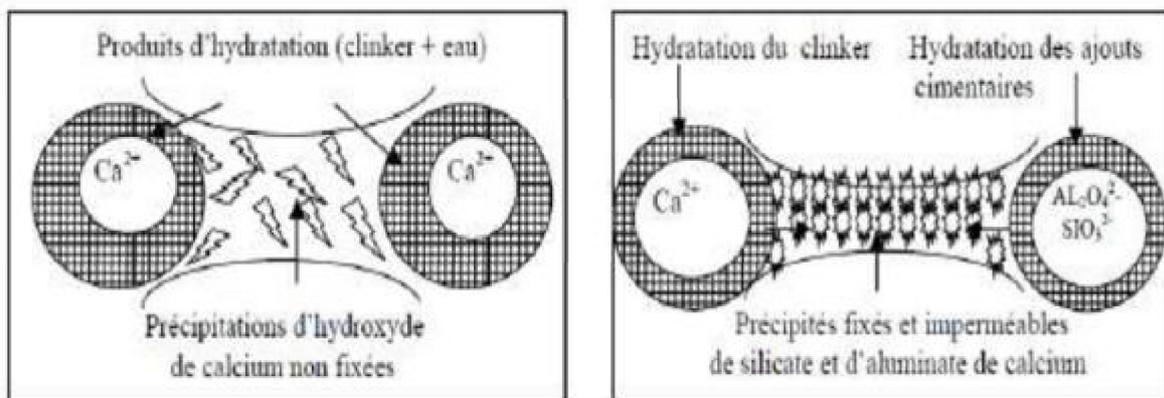
Selon les prévisions, en 2020, la capacité de production du pays doit augmenter à 40,6 millions de tonnes avec 20 millions de tonnes pour GICA, et 11,1 millions de tonnes pour LafargeHolcim Algérie, ainsi que 9,5 millions de tonnes pour les opérateurs privés. Et il va y avoir un excédent de 10 millions de tonnes/an de ciment à l'horizon 2020. Et on envisage, dans une première phase, d'exporter 50.000 tonnes de ciment algérien dès le premier trimestre 2018 vers les pays de l'Afrique de l'Ouest, et 45000 tonnes vers l'Europe. [APS 18].

### I.3 Ajouts minéraux :

#### I.3.1 Généralités :

Différents ajouts minéraux sont actuellement utilisés dans les matériaux à base du ciment. Ils sont utilisés en addition ou en substitution d'une partie du ciment comme matières cimentaires supplémentaires. Leur usage fournit au béton une matrice plus dense qui sera plus résistante aux produits agressifs tels que les sulfates, les chlorures et les autres agressifs. La finesse des ajouts minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur solubilité en milieu alcalin gouvernent leurs propriétés cimentaires dans le béton. Leur contenu en phase amorphe est un facteur clé dans la réactivité des ajouts minéraux.

Il a été prouvé que l'introduction des ajouts minéraux dans la pâte de ciment conduit à la segmentation des larges pores capillaires et offrent un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produits d'hydratation qui accélèrent l'hydratation du ciment et permettent de réduire les dimensions des cristaux de chaux (figure I-5) [CHA 06].



a) Hydratation d'un ciment sans ajout cimentaire

(b) Hydratation d'un ciment avec ajout cimentaire.

**Figure I.6 :** Hydratation d'un ciment sans et avec ajout cimentaire [CHA 06].

### I.3.2 Aperçu sur l'utilisation des ajouts minéraux :

L'utilisation des laitiers, des cendres (pouzzolaniques) des centrales thermiques et des fillers calcaires dans l'industrie de ciment, devient un moyen plus efficace pour atteindre les objectifs suivants :

- Abaissement de la consommation en énergie lors de la fabrication.
- Amélioration des caractéristiques chimiques, physiques, et mécaniques du ciment.
- Utilisation des coproduits industriels tels que le laitier, les cendres, les fillers de calcaire dans les carrières qui permettent de contourner un problème écologique majeur. [LOG 19]

Le tableau I.5, donne une idée sur les différents types des ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes:

**Tableau I.5:** Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [LOG 19]

| Groupe industriel  | Cimenterie                        | Ciment fabriqué (*)                            | Ajouts Utilisés                |
|--|-----------------------------------|--|--------------------------------|
| Secteur public :<br>Groupe Industriel<br>des Ciments<br>d'Algérie : (GICA) | Ain Touta –Batna- (SCIMAT)        | CEM II /A-P<br>CEM II /AM (L-P)<br>CEM II /A-L | Pouzzolane et<br>(ou) calcaire |
|  | Ain El Kebira –Sétif-             | CEM II /A-L                                    |                                |
|  | Hamma Bouziane –Constantine -     | CEM II /A                                      |                                |
|  | H'djar Essaoud –Skikda-<br>(SCHS) | CEM II /A-S                                    | Laitier                        |
|  | Tebessa (SCT)                     | CEM II /AM (P-L)<br>CEM II /BM (P-L)           | Pouzzolane et<br>calcaire      |
|  | Meftah (Alger)                    | CEM II   | Tuf / Calcaire                 |
|  | Sour EL Ghozlane (Bouira)         | CEM II   | Calcaire/Tuf                   |
|  | Chlef                             | CEM II /A-L                                    | Calcaire                       |
|  | Beni Saf (Ain Temouchent)         | CEMII  | Pouzzolane                     |
|  | Zahana -Mascara- (SCIZ)           | CEM II /A                                      |                                |
| Lafarge Holcim-<br>Algérie   | M'sila                            | CEM II /B-L                                    | Calcaire                       |
|  | Djemmoura (Biskra)                | CEM II /B-L                                    | Calcaire                       |
|  | Oggaz (Mascara)                   | CEM II /B-L                                    | Calcaire                       |
| Secteur privé  | BISKRIA (Biskra)                  | CEM II /A<br>CEMII /B<br>CEM IV /A-SR          | Calcaire /<br>pouzzolane       |

(\*) : Pour la désignation des ciments (II, IV, A et B) voir tableau I.1.  
L : calcaire / P : pouzzolane/ S : laitier /M : ciment contient plus qu'un ajout

### I.3.3 Classification des ajouts minéraux :

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centrales thermiques à charbon, de la nature; et sont classés selon la norme NF EN 197-1 en deux familles :

- Ajouts minéraux actifs.
- Ajouts minéraux inertes

#### I.3.3.1 Principaux ajouts minéraux :

Selon la classification qui précède, on peut diviser les ajouts minéraux en deux familles, active et inerte.

##### a) Ajouts minéraux actif :

- **Les pouzzolanes naturelles :**

Les pouzzolanes naturelles, substances finement broyées ont une finesse à peu près identique à celles du ciment, sont généralement d'origine volcanique ou des roches sédimentaires. Elles n'ont pas des propriétés hydrauliques intrinsèques mais, en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux libéré par le clinker au cours de son hydratation, elles forment, elles aussi des hydrates stables et peu solubles dans l'eau. Les constituants qui, par le même processus que les pouzzolanes, conduisent également à la formation d'hydrates stables sont réputés avoir des propriétés pouzzolanique. [DUP 95].

Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %), d'alumine et d'oxyde de fer [DRE 98].



**Figure I.7** Pouzzolane naturelle granulée

##### ❖ **Le laitier de haut fourneau:**

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau. Après le broyage, il se présente sous forme de nodules dont les diamètres sont compris entre 10 et 45  $\mu\text{m}$ . La composition chimique de laitier comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 et 35 %, de l'oxyde de fer entre 10 et 20 %, et de l'alumine entre 5 et 10 %.

de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker [DRE 98].

Le laitier granulé broyé est considéré comme un véritable ciment car il suffit d'ajouter un catalyseur activant pour amorcer la prise et le développement des résistances mécaniques.



**Laitier cristallisé**

**Laitier granulé**

**Figure 1.8** Laitier cristallisé et laitier granulé de haut fourneau

#### ❖ La fumée de silice:

La fumée de silice est un sous-produit de l'industrie des Alliages de silicium et notamment ferrosilicium récupérée dans les fumées émises par les fours électriques de fabrication de ces produits. Elle se présente sous forme de particules sphériques plus ou moins grisâtres et extrêmement fines dont le diamètre moyen est de l'ordre de 0.1  $\mu\text{m}$  (100 fois plus petits que ceux du ciment) [DRE 98].

Sa composition chimique doit contenir au moins 85 % de dioxyde de silicium  $\text{SiO}_2$ .

La fumée de silice possède des propriétés pouzzolaniques s'avérant plus élevées que celles des pouzzolanes naturelles en raison de sa forte teneur en silice amorphe.



**Figure 1.9** Fumée de silice

L'effet filler est aussi responsable de l'augmentation de la fluidité des bétons qui contiennent de la fumée de silice et qui ont de très faibles rapports eau/ciment. Par conséquent, à cause de leurs caractéristiques physiques uniques, la pâte de ciment durci qui contient du fumé de silice est dense.

#### ❖ Les cendres volantes:

Les cendres volantes, pouzzolanes d'origine industrielle, sont des produits pulvérulents qui proviennent du dépoussiérage des gaz de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. Elles apparaissent sous forme de particules sphériques vitreuses pleines ou creuses dont les diamètres sont compris entre 0.5 et 200  $\mu\text{m}$  (50 % des grains ont un diamètre environ de 30  $\mu\text{m}$ ).

Les cendres volantes peuvent être divisées en deux catégories suivant leur teneur en chaux [DRE 98].

- Les cendres volantes siliceuses (V): sont constituées de silice réactive, entre 40 et 55 %, proportion qui ne doit jamais être inférieure à 25 %, et d'alumine entre 20 et 30 % environ, la proportion de chaux réactive devant être inférieure à 5 %.

Ce type de cendres volantes présente des propriétés pouzzolaniques.

- Les cendres volantes calciques (W): moins utilisées, elles doivent contenir, quant à elles, une proportion de chaux réactive supérieure à 5 %.

Outre leurs propriétés pouzzolaniques, elles peuvent présenter des propriétés hydrauliques.

#### b) Ajouts minéraux inertes :

##### ❖ Fillers calcaires:

Communément le terme filler désigne des éléments inférieurs à 80  $\mu\text{m}$ . Pour pouvoir être considérés comme un constituant principal du liant Les fillers calcaires doivent présenter une proportion de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  supérieur à 75 % en masse. [DRE 98]. Ils sont généralement considérés comme une addition inerte, mais le fait qu'ils présentent certaines propriétés hydrauliques n'est pas en soi désavantageux, de même que s'ils présentent une réaction avec certains composés développés au cours de l'hydratation [NEV 00].

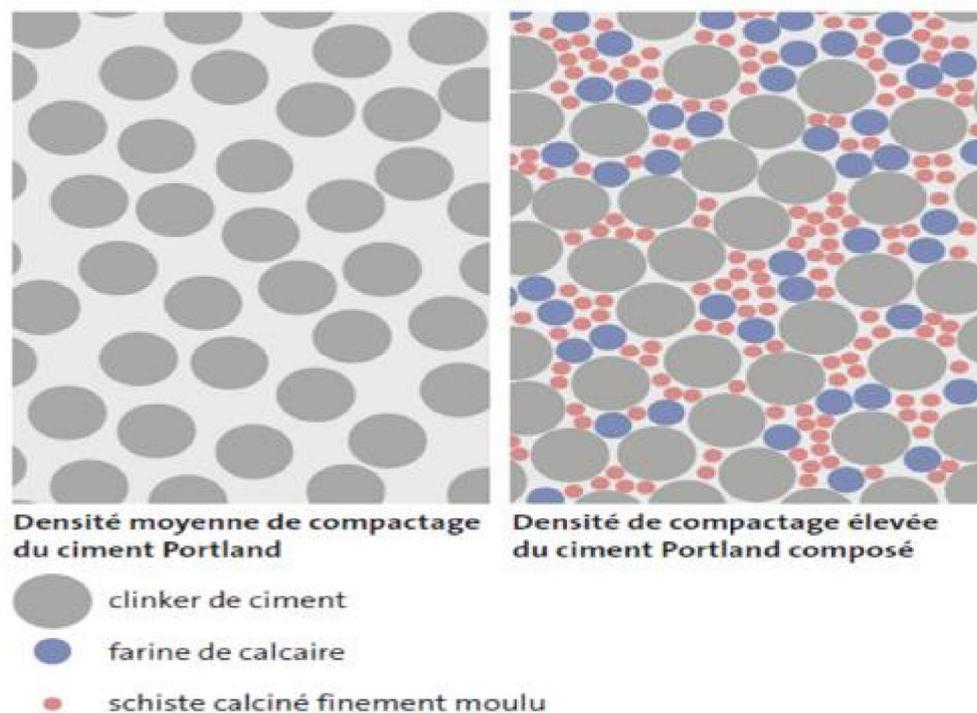
L'addition de fillers calcaire peut se faire à deux temps soit au moment de la fabrication du ciment lui-même, ou au moment de la réalisation du mélange cimentaire. L'exploitation de filler calcaire en substitution partielle soit avec du ciment ou du sable et l'étude de ces effets sur la durabilité est une autre sorte de développer l'utilisation de ce type de filler, d'un côté

économique la réduction du coût de production de ciment une des raisons qui motivent leur utilisation.

L'ajout de fillers permet souvent d'améliorer certaines propriétés du béton à l'état frais (accroissement de la maniabilité, réduction du ressuage . . .) et du béton durci (diminution de la perméabilité et de la capillarité, réduction des risques de fissuration...) [ESC 88].

L'addition de fillers calcaires peut avoir plusieurs fonctions, comme par exemple :

- Compléter la courbe granulométrique d'un ciment déficient en grains fins.
- Influencer à l'hydratation.
- Être présents dans les pores capillaires (ce qui rend plus difficile la percolation de l'eau).
- Influencer aussi sur les paramètres rhéologiques du béton [GUI 07].



**Figure I.10** - Représentation schématique de la densité de compactage du ciment portland, sans et avec ajouts

#### ❖ **Sable de dune :**

##### ➤ **Définition :**

Le sable de dunes est un sable fin d'origine éolienne, c'est un matériau naturel très abondant dans le sud algérien. Il est de nature siliceuse, constitué de petites particules provenant de la désagrégation lente d'autres roches sous l'action des agents d'érosion.

Ce sable est caractérisé par sa granulométrie très fine (sable très fin, naturellement inférieur à 0.5 mm, de granulométrie (0 /0 .63 mm)), de sa morphologie, de sa propreté et de sa dureté [LOG 19].

➤ **Raisons d'exploitation :**

Le sable de dunes est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter. L'introduction de ce nouveau matériau dans la construction, peut soulager davantage le domaine d'habitat, et contribuer au développement des régions du sud algérien, très riches en sable de dune.

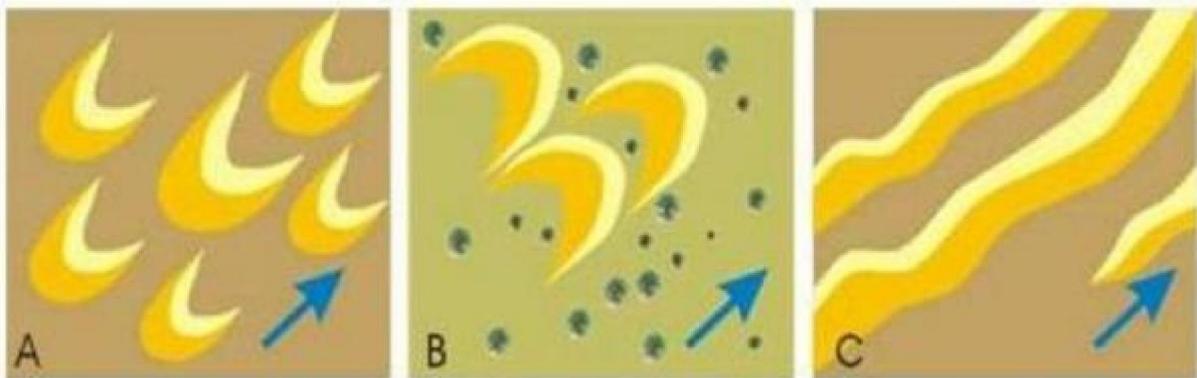
➤ **Différentes formes de dunes :**

Les dunes existent sous trois formes. [CHA 64]:

La barkhane est une dune en forme de croissant, à convexité au vent. Elle naît là où l'apport de sable est faible et sous des vents unidirectionnels (Figure I-11A) ;

- La dune parabolique est une dune dissymétrique en forme de fer à cheval à concavité au vent souvent plus ou moins fixée par la végétation (Figure I-11B). Sa disposition par rapport à la direction du vent est donc inverse de celle de la barkhane. La dune parabolique est peu mobile et généralement ne migre guère une fois qu'elle est formée ;

- Les Siouf ou Sif, dunes en forme de sabre, sont des ondulations longitudinales s'amincissant vers une extrémité (Figure I-11C).



**A:** barkhanes ; **B:** Dunes paraboliques ; **C:** Dunes longitudinales.

La flèche bleue indique la direction du vent dominant

**Figure I.11** Types de dunes [TAF 09]



Figure I. 12 Les Siouf ou Sif (El-Oued – Algérie)

### ➤ Localisation géographique du sable de dunes en Algérie

Le sable de dunes se trouve en grande quantité dans le sud de l'Algérie, vu que cette région fait partie géographiquement du grand Sahara de l'Afrique.

Ces localisations énormes de sables de dune s'appellent « Erg ». On distingue trois ergs en Algérie : Le Grand Erg Oriental, Le Grand Erg Occidental et Erg Chech ; ces trois Ergs sont tous de forme dunaire, (Figure I.13).

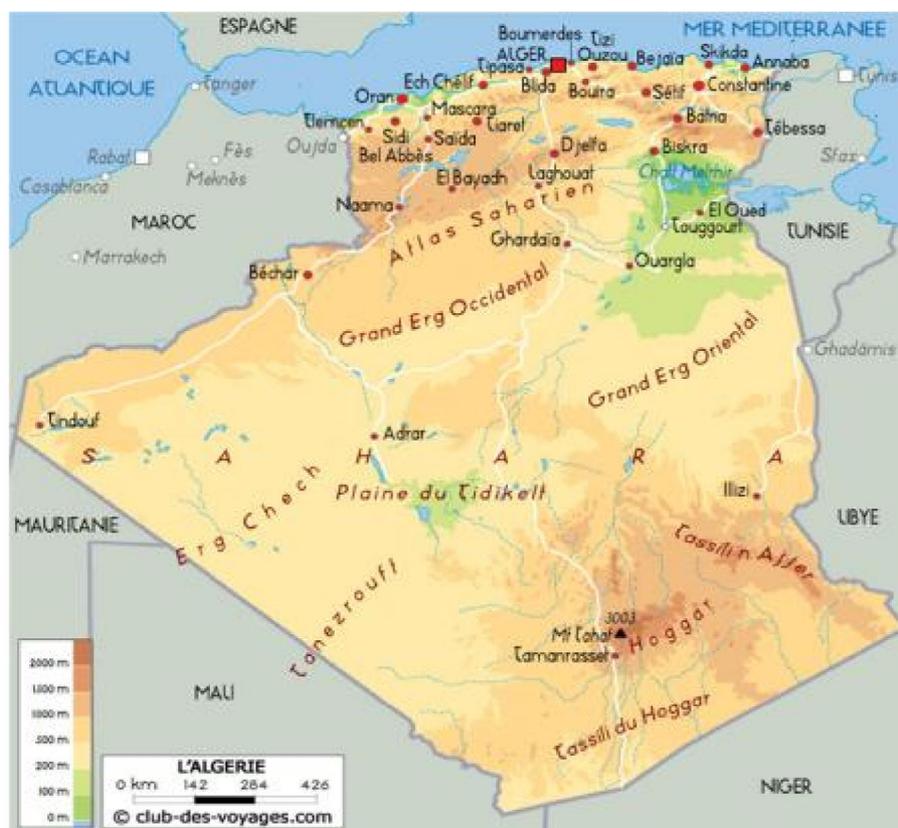


Figure I.13: Situation géographique des Ergs (sables de dunes) de l'Algérie [TAF 09]

## I.4 Les Mortiers :

### I.4.1 Définition du mortier

Les mortiers sont des mélanges constitués de sable, de liant et d'eau, avec ou sans adjuvant et additifs. On trouve différents types de mortiers selon leurs natures et pourcentage de constituants, malaxage, mise en œuvre et cure.

Les mortiers sont utilisés par les professionnels du bâtiment, Dans la plupart des travaux du revêtement des murs ou de la maçonnerie, carrelage. La fabrication des mortiers est facile sauf qu'il faut un certain savoir-faire et demande le bon dosage qui peut varier en fonction des besoins.

Un mortier n'est autre chose qu'un béton à grain fin, il est donc soumis aux mêmes lois que les bétons. [KED 17]

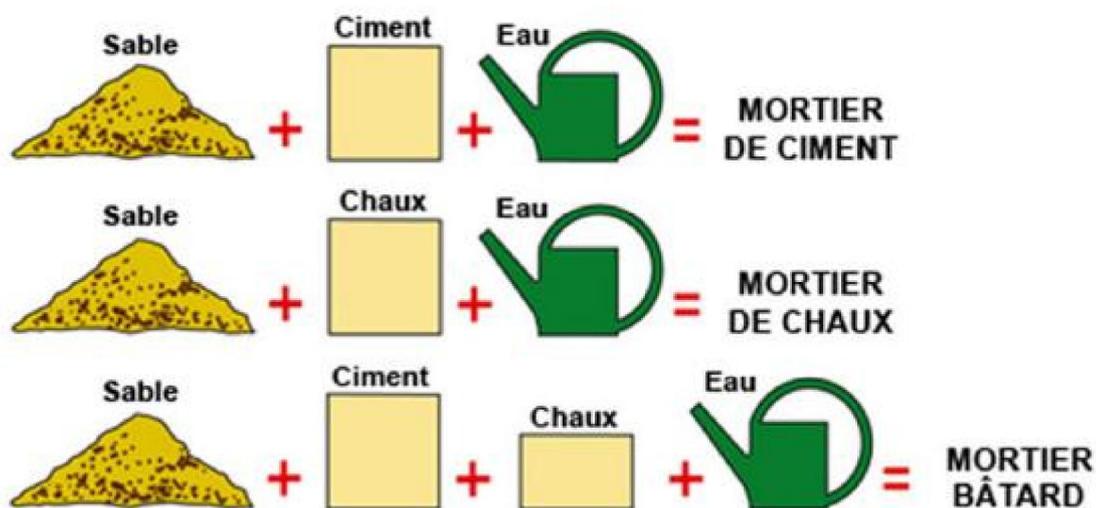


Figure I. 14 Constituants des divers types de mortier

### I.4.2 Caractérisation du mortier :

#### I.4.2.1 La maniabilité de mortier :

La maniabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont:

##### a) La table à secousses : [NBN EN 1015-3]

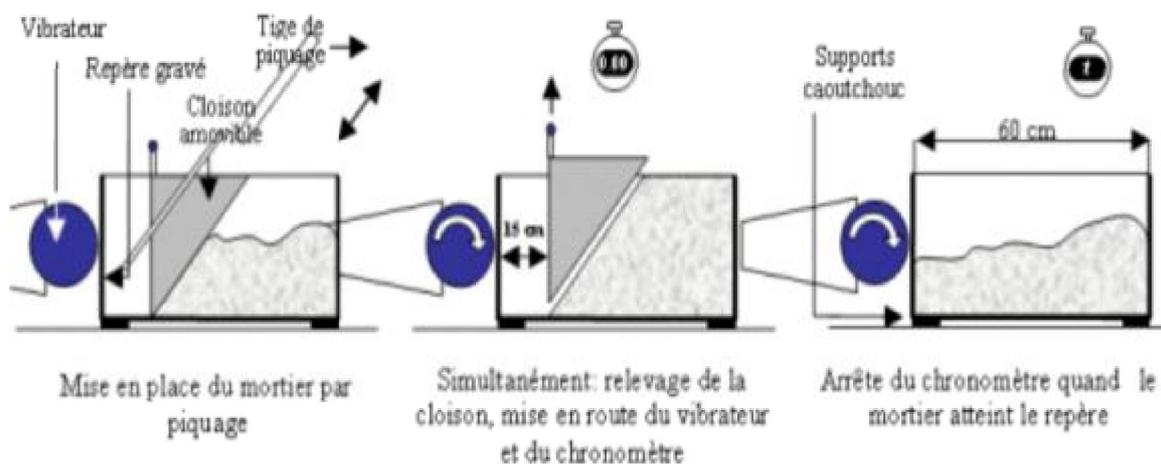
La valeur d'étalement est mesurée par le diamètre moyen d'un prélèvement de mortier frais, mis en place à l'aide d'un moule donné sur le plateau d'une table à secousses définie, et soumis à 15 secousses d'une fréquence constante d'environ 1 secousse par seconde, les secousses sont effectués d'une manière verticale en soulevant la table à secousses et en la laissant retomber librement d'une hauteur de chute de 10mm.

- L'essai a été effectué en deux prélèvements (répéter deux fois)

- Confection des mortiers selon la méthode du mortier normal, avec un volume minimal de 1,5 l
- Le diamètre dans deux directions perpendiculaires est mesuré et exprimé à 1 mm près.

**b) Le maniabilimètre du LCPC: [NF P18-452]**

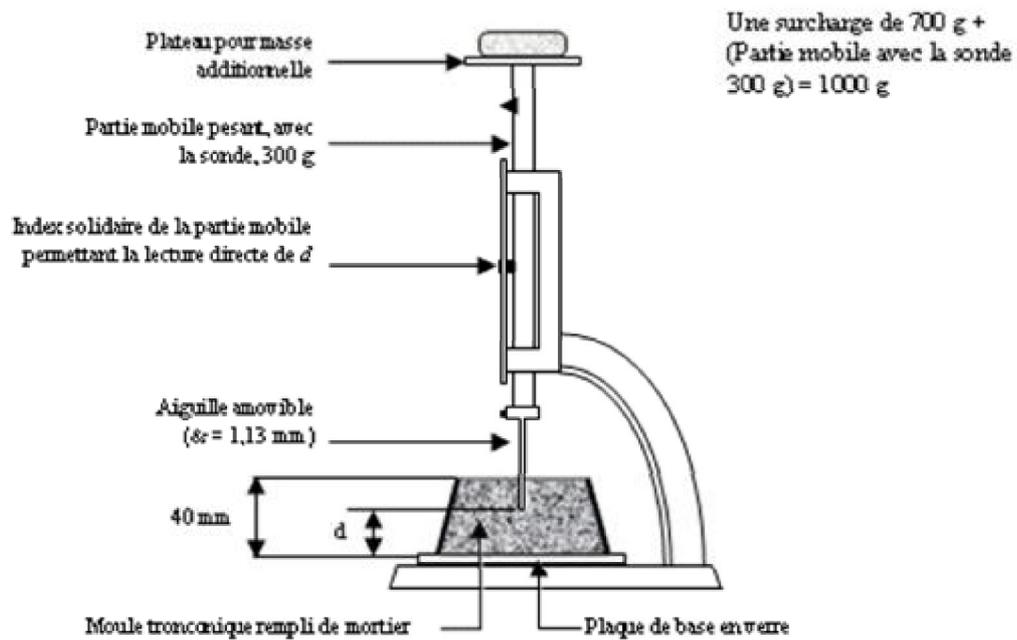
Il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.



**Figure. I.15** Étapes de l'essai de maniabilité

**I.4.2.2 Prise : [NF EN 196-3]**

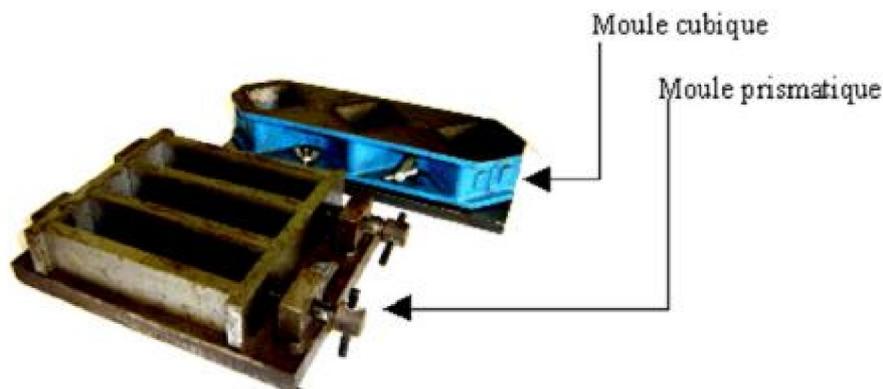
Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Il est possible d'obtenir (hors norme) le temps de prise d'un mortier avec le même appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes. Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur. Résistances mécaniques.



**Figure. I.16** Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge

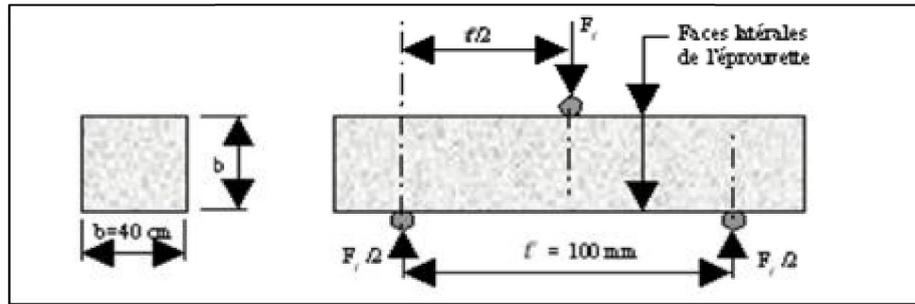
#### I.4.2.3 Résistances mécaniques : [NF EN 196-1]

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4 x 4 x 16 cm pour les mortiers.

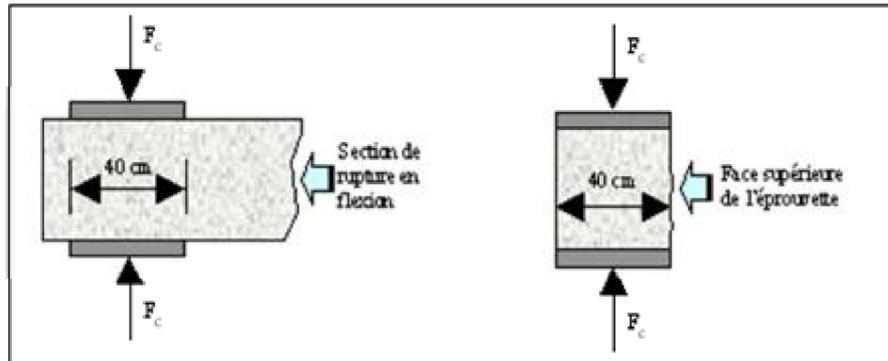


**Figure. I.17** Moule pour éprouvettes prismatiques de mortier

Les éprouvettes sont soumises à l'essai de la traction par flexion puis à la compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).



a) Dispositif pour l'essai de la traction par flexion.



b) Dispositif d'écrasement en compression

Figure I.18 Dispositifs des écrasements des essais mécaniques

#### I.4.2.4 Retraits et gonflements : [NF P15 - 433]

Les retraits se mesurent sur des prismes 4 x 4 x 16 cm en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20 °C et à 50 % d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours.

Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du retrait de la pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment).

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de 4 x 4 x 16 cm conservées dans l'eau à 20 °C. Ils sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Châtelier inférieure sur pâte pure à 10 mm)

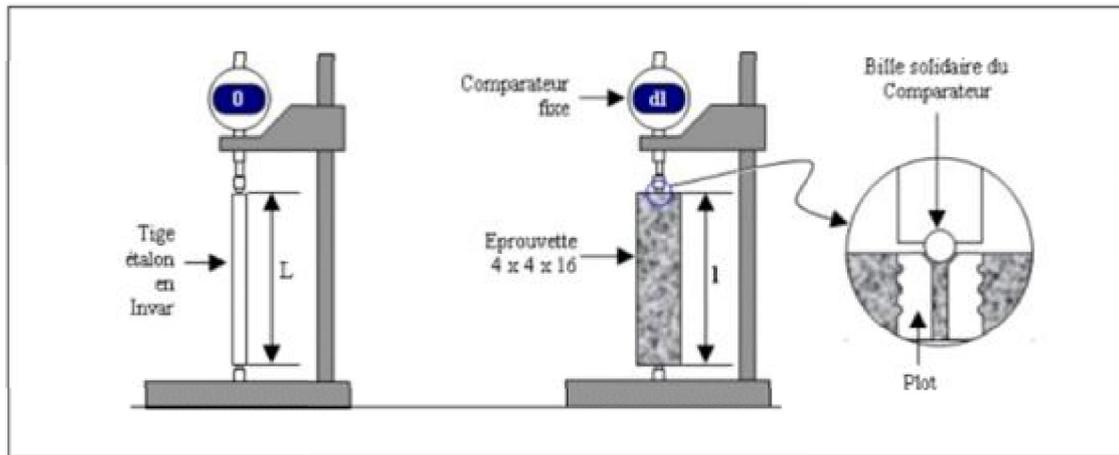


Figure. I.19 Dispositif de mesure du retrait

## I.5 Généralités sur la durabilité:

### I.5.1 Notion de durabilité :

La durée de vie d'un ouvrage en béton armé est fortement liée à la durabilité de l'association béton/armature: Autrement dit, la capacité de résister aux attaques chimique, physicochimiques et thermique, conduisant à la défaillance des matériaux et donc de la structure. Trois familles de mécanismes de dégradation des bétons peuvent être distinguées [NOU 95]

La première correspond à la corrosion des armatures induite par carbonatation et par pénétration des chlorures. L'expansion des produits de corrosion conduit à l'éclatement du béton d'enrobage.

La deuxième famille se rapporte au mécanisme de dissolution des hydrates laquelle conduit à la perte d'alcalinité et à la baisse de la résistance (lixiviation). Le phénomène concerne essentiellement les ouvrages en béton en contact avec l'eau douce. La troisième famille est associée aux phénomènes de gonflement, tels que les réactions alcali-granulat et des réactions sulfatées internes, lesquelles conduisent aussi à l'expansion et l'éclatement des bétons. Ces phénomènes sont rencontrés dans Les ouvrages d'art au cours des 20 dernières années.

### I.5.2 Indicateur de durabilité

Les indicateurs de durabilité correspondent à trois mécanismes bien distincts de transport de matière qui sont repartie comme suit :

- **La perméabilité** qui décrit un écoulement (d'eau ou de gaz par exemple) produit sous gradient de pression ; Elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquelles s'écoule le fluide ainsi que leur interconnexion.

➤ **La diffusivité** qui est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Elle ne dépend pas de la taille des pores mais de leurs interconnexions.

➤ **L'absorption** représente le résultat de la différence de tension de superficielle dans les capillaires. Elle dépend des pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant.

Plus la résistance du béton augmente, plus les phénomènes de transport, la durabilité augmente.

#### **I.5.2.1 La résistance mécanique :**

En vue de l'objectif de durabilité, le choix de la classe de résistance du béton est fonction de l'agressivité du milieu, elle est autant plus élevée que le milieu est plus agressif. Cela signifie que l'exigence de durabilité peut parfois déterminer la résistance à prendre afin qu'il soit adapté.

#### **I.5.2.2 La porosité :**

La porosité est aussi un indicateur de la qualité générale du matériau. Ce paramètre est plutôt bien corrélé avec la résistance à la compression ; quand la porosité diminue (du fait de la diminution du rapport Eau/Ciment) la résistance augmente ainsi que sa durabilité. Les caractéristiques du réseau poreux sont des paramètres de premier ordre vis-à-vis de la durabilité du béton [BAR 92].

#### **I.5.2.3 La résistance à la carbonatation :**

Le dioxyde de carbone est présent dans l'air et pénètre dans le béton par le réseau poreux et les fissures. Il se dissout alors dans l'eau présente dans le béton pour réagir avec la portlandite et les silicates de calcium hydratés (C-S-H), pour former du carbonate de calcium, et libérer de l'eau. Le volume molaire des produits de la carbonatation est plus important que celui des réactifs, d'où une diminution de la porosité.

La résistance à la carbonatation d'un béton dépend donc principalement de la porosité du béton d'enrobage. Dans l'hypothèse où l'hydratation de ce dernier ne se poursuit pas après la fin de la cure, la résistance à la compression du béton en fin de cure constitue un bon indicateur de sa résistance à la carbonatation.

#### **I.5.2.4 La résistance aux sulfates :**

Dans un milieu alcalin comme le béton, la présence de sulfates provoque la formation d'hydrates expansifs entraînant, à terme, la ruine du béton. Les sulfates sont apportés soit par l'eau de mer, soit par l'eau présente dans des sols riches en gypse, ou par le sel de déverglaçage utilisé en hiver, et pour remédier, la réduction de la perméabilité est un moyen d'améliorer la résistance aux sulfates.

**I.5.2.5 La résistance aux chlorures :**

Apportés essentiellement par l'eau de mer, et le sel de déverglaçage, les chlorures migrant dans le béton se transforment en acide chlorhydrique provoquant la corrosion des armatures.

**I.6 Conclusion :**

À la lumière de ce chapitre on peut conclure que l'achèvement du synthèse bibliographique, est très intéressant pour nous aider à l'exécution des phases ultérieures avec des données approuvées par des normes; Ce synthèse nous a permis de collecter le maximum des informations sur les différents types des matériaux de construction, et exceptionnellement, les matériaux entrant dans la composition du mortier; On a débuté par un rappel sur les ciments, fabrication et processus d'hydratation ainsi que les types des ciments fabriqués en Algérie, puis on a effectué un aperçu sur les ajouts avec des définition brèves sur les différents types des ajouts utilisés, et exceptionnellement les ajouts inertes tel que les fillers calcaires habituellement utilisés et le sable de dune rarement utilisé, après ça on a passé à un rappel sur les mortiers et les différents essais de caractérisation, et finalement on a accompli ce chapitre par des généralités sur la durabilité tout en appuyant sur les indicateurs de la durabilité.

# **CHAPITRE II :**

## **MÉTHODES D'ESSAIS ET CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX**

## II.1 Introduction

Ce chapitre définit d'une manière explicative les méthodes utilisées pour la réalisation des essais programmés sur tous les matériaux entrants dans la formulation du mortier avec les différents taux d'incorporation en substitution avec le ciment, il s'agit du ciment CEM I 42.5 R de l'usine de Biskria installé à Biskra, du sable alluvionnaire, du sable de dune broyé provenant de la région de El-Oued, des fines calcaire issues de broyage de la fraction fine de granulats de concassage de la carrière du gisement d'Ain Touta, l'eau utilisée pour le gâchage et l'eau destinée à la conservation des éprouvettes, eau potable et eau de la nappe ; cette phase préparatoire est dont le but de caractériser les matériaux et de vérifier leurs acceptabilités en vue des normes exigées, qui sera la base de réussite du volet expérimental.

## II.2 Caractéristiques des matériaux utilisés :

La caractérisation des matériaux utilisés est une opération indispensable avant d'entamer tout un travail de formulation; cette étape concerne tous les constituants du mortier entrants dans notre étude expérimentale il s'agit de :

- Ciment CEM I 42.5 R
- Sable alluvionnaire
- Sable de dune broyé
- Fillers de calcaire (Fraction de concassage broyée)
- Eau :
  - Eau de gâchage
  - Eau de conservation (Opération de cure)

### II.2.1 Ciment :

Le ciment utilisé dans notre sujet est un ciment portland CEM I 42.5R conforme à la norme NA442, de la cimenterie Biskria/ W. Biskra.



Figure II. 1: Sac de ciment utilisé (CEM I 42.5R - Biskria)

**II.2.1.1 Caractéristiques techniques:****a) Analyses chimiques :**

La composition chimique du ciment utilisé, fournie par l'usine de Biskria suivant la fiche technique, est résumée dans le tableau (II.1).

**Tableau II.1:** Résumé de la composition chimique du ciment CEM I 42.5R. [NA442-2013]

| Composants                         | Teneur %    |
|------------------------------------|-------------|
| Perte au feu                       | 2.6 à 3.7   |
| Teneur en sulfates SO <sub>3</sub> | 2.2 à 2.8   |
| Teneur en oxyde de magnésium MgO   | 1.7 à 2.8   |
| Teneur en chlorure Cl <sup>-</sup> | 0.03 à 0.07 |

Le résultat informé dans la fiche technique, est concentré sur les composants nuisibles du ciment portland.

**b) Composition potentielle de clinker (Selon Bogue) %:****Tableau II.2 :** Composition potentielle de clinker. [NA442-2013]

| Constituants     | Teneur %  |
|------------------|-----------|
| C <sub>3</sub> S | 56 à 66   |
| C <sub>3</sub> A | 5.1 à 7.2 |

**c) Propriétés physico-mécaniques:****Tableau II.3 :** Propriétés physico-mécaniques. [NA442-2013]

| Propriétés physiques        | Valeur      |
|-----------------------------|-------------|
| Consistance normale (%)     | 25.8 à 26.4 |
| Expansion à chaud (mm)      | 0.25 à 1.0  |
| Temps de prise              | Valeur      |
| Début de prise (min)        | 150 à 190   |
| Fin de prise (min)          | 2250 à 250  |
| Résistance à la compression | Valeur      |
| 2 jours (MPa)               | 20 à 29     |
| 28 jours (Mpa)              | 42.5 à 52.5 |

Un complément des essais sur le ciment utilisé a été effectué au sein du laboratoire LBTP / El-Oued, et le laboratoire de la cimenterie CILAS sis à Biskra ; il s'agit de la détermination de

la masse volumique du ciment apparente et absolue et la granulométrie par sédimentométrie ainsi que la surface spécifique de Blaine (SSB)

**d) La masse volumique apparente : [EN 1097-3]**

➔ **Définition :**

La masse volumique apparente d'un matériau est le rapport la masse de matériau soumis à l'essai sur son volume apparent, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

➔ **Matériel utilisé :**

- ❖ Récipient de volume connu.
- ❖ Balance de précision de 0.1g
- ❖ Un entonnoir de remplissage de forme adéquate

➔ **Mode opératoire :**

- Placer le récipient d'un volume connu (V), sur une balance de précision
- Tarer le récipient sur la balance
- Placer l'entonnoir au-dessus du récipient de mesure.
- Fermer l'opercule.
- Verser une quantité suffisante du ciment dans l'entonnoir à l'aide de la spatule.
- Ouvrir l'opercule, le ciment tombe dans le récipient.
- Refermer l'opercule.
- Recommencer avec de nouvelles quantités du ciment, jusqu'à ce que le récipient déborde.
- Araser à la règle et peser le contenu. Soit (M).

➔ **Expression des résultats :**

La masse volumique apparente en (g/cm<sup>3</sup>), est donnée par la formule :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V}$$

**e) La masse volumique absolue : [EN1097-7] (Méthode de pycnomètre)**

Pour l'obtention des résultats précisés, on a effectué l'essai avec un pycnomètre.

➔ **Définition :**

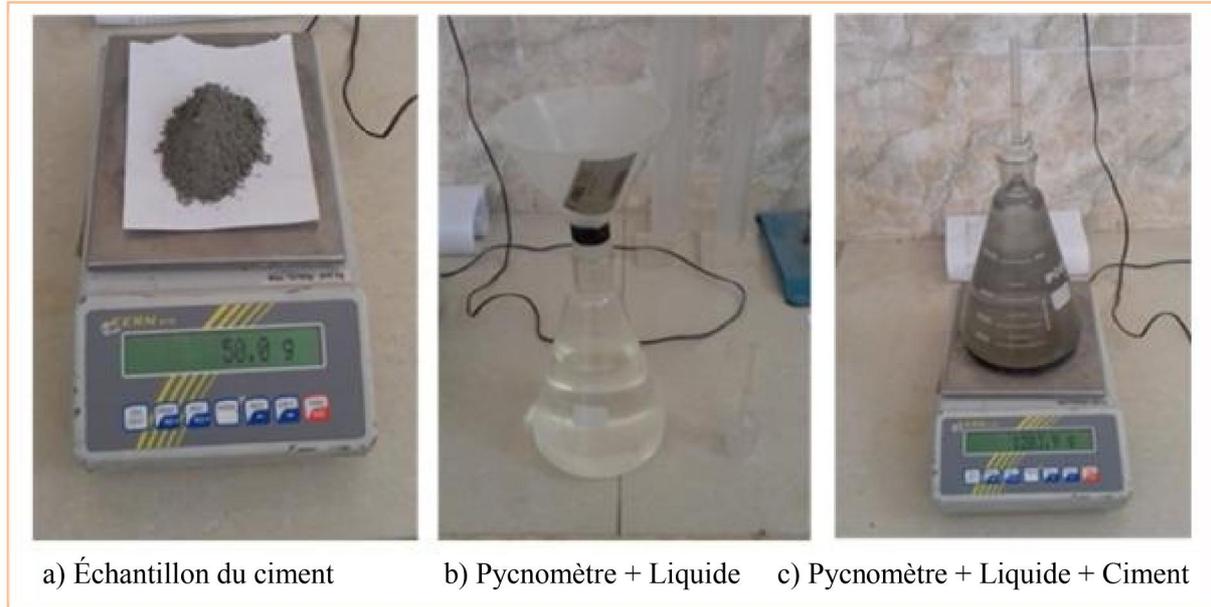
La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue la substance, sans tenir compte des vides, La masse volumique s'exprime en t/m<sup>3</sup> (g/cm<sup>3</sup>) ou Kg/m<sup>3</sup>.

➔ **Matériel :**

- Un Pycnomètre - Une balance de précision de 0.1g

➔ **Matériaux :**

- Échantillon du ciment.



**Figure II.2:** Étapes de la détermination de la masse volumique absolue du ciment au pycnomètre

➔ **Mode opératoire :**

- Peser le pycnomètre vide  $M_0$
- Peser le pycnomètre rempli de Toluène jusqu'au trait repère soit  $M_1$
- Peser la masse du ciment soit  $M_2$
- Introduire le corps dans le toluène après avoir vider le pycnomètre à moitié.
- Éliminer l'air et remplir de Toluène au trait repère peser  $M_3$

➔ **Expression des résultats :**

- Masse du liquide déplacé correspond au volume du corps :

$$M_L = M_1 + M_2 - M_3$$

- Volume du Liquide déplacé :

$$V_L = \frac{M_L}{\rho_L} \quad (\rho_L : \text{Masse spécifique du Liquide}).$$

- La masse volumique absolue est donnée par la formule :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M_2}{V_L}$$

**f) La surface spécifique de Blaine (SSB): [NF EN 196-6]**

Un échantillon de ciment, a été analysé au laboratoire de la cimenterie CILAS/ Biskra, pour déterminer la finesse du ciment utilisé.

La méthode utilisée pour mesurer la surface spécifique est la perméabilité à l'air « Méthode de Blaine ». Il s'agit de faire passer un volume d'air connu à travers une poudre de filler. Plus la surface spécifique de la poudre est importante et plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long. Dans les conditions normalisées, la surface spécifique est proportionnelle à  $\sqrt{t}$ . [BIT 16]

**➡ Expression des résultats :**

$$S = \frac{k \sqrt{e^3}}{\rho (1-e)} \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0.1\eta}}$$

S : Surface spécifique (cm<sup>2</sup>/g)

K : constante de l'appareil

e : porosité du lit

t : temps mesuré en secondes (s)

$\rho$  : masse volumique du ciment en g/cm<sup>3</sup>

$\eta$  : viscosité de l'air à la température de l'essai (Pa.s)

Avec la porosité  $e=0.500$  et la température d'essai de  $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$

$$S = \frac{524.2 k \sqrt{t}}{\rho}$$

**II.2.1.2 Résultats des essais complémentaires sur ciment :**

**Tableau II.4 :** Caractéristiques physiques du ciment utilisé.

| Caractéristique physique                       | Valeurs |
|--|---------|
| Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )   | 3.082   |
| Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.014   |
| SSB de Blaine (cm <sup>2</sup> /g)             | 3400    |

**II.2.1.3 Résumé sur les résultats du ciment :**

Les résultats trouvés lors des essais complémentaires réalisés au laboratoire LBTP/El-Oued et le laboratoire de la cimenterie CILAS/Biskra; Ont démontrés la conformité du ciment fabriqué par la cimenterie Biskria / Biskra, que ce soit finesse ou masse volumique apparente et absolue.

**II.2.2 Le sable alluvionnaire :**

Dans une première phase on a débuté notre travail sur les sables alluvionnaires de notre région par une intervention sur site pour faire des prélèvements représentatifs ainsi que la localisation géographique des points des prélèvements et de connaître les modalités du traitement du sable au niveau des carrières.

La visite a été effectuée sur presque la totalité des carrières de la région Djamaa.

Après cette auscultation visuelle on a constaté la grande hétérogénéité de ce gisement que ce soit en épaisseur des couches exploitables ou la couleur des grains.



a) Vue d'ensemble d'une carrière

b) L'épaisseur réelle de couche exploitable

**Figure II.3:** Carrières du sable alluvionnaire (gisement de Djamaâ/El-Oued)

Cette photo montre l'épaisseur de la couche du sable jaune de qualité, le reste de l'épaisseur présente un mélange du sable limoneux recouvert par une couche de sable dunaire éolien

**II.2.2.1 Prélèvement des échantillons :**

Après une sélection préliminaire sur site, on a effectué des prélèvements en milieu de la couche du sable jaune et sable rouge de la carrière d'EURL/GAID.TPS.

Les photos de la figure II.4, montrent l'épaisseur réelle, qui doit être exploitée comme un sable de construction.



a) Nomination de la carrière

b) Prélèvement du sable (carrière sable jaune)



c) Sélection du sable rouge par le chargeur

d) Prélèvement du sable (carrière sable rouge)

Figure II.4: Prélèvement du sable alluvionnaire sur site.

❖ Situation géographique des carrières du sable :

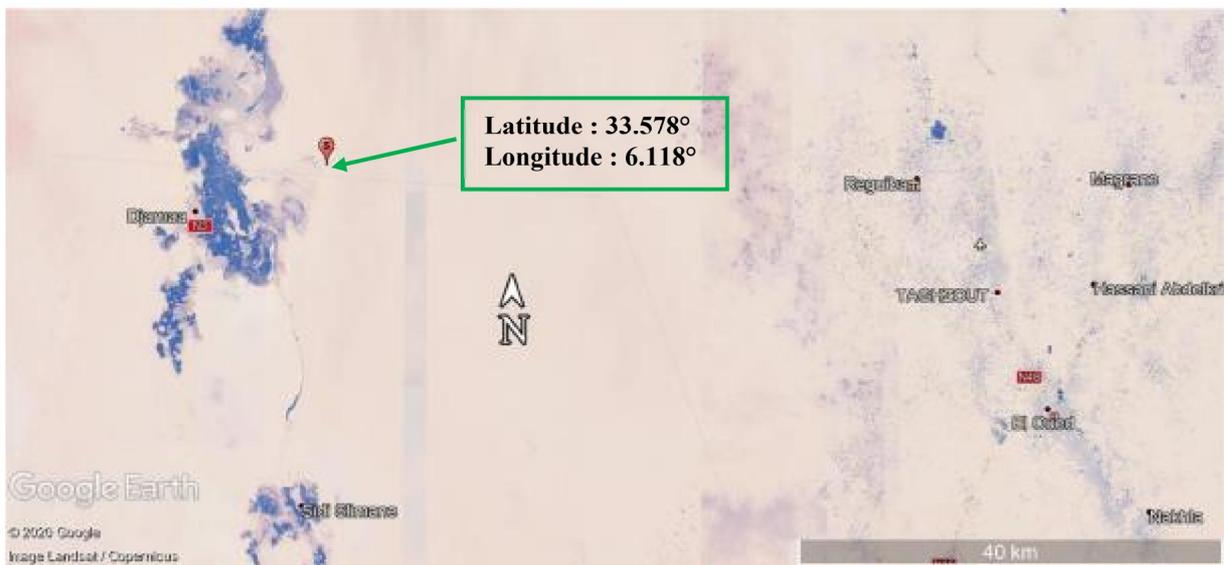


Figure II.5: Situation géographique des carrières du sable alluvionnaire - Djamâa/El-Oued

(Google Earth 2020)

**N.B :** Un troisième prélèvement du sable a été soumis aussi aux essais, il s'agit d'un sable alluvionnaire de la carrière d'Acila/El-Oued.

II.2.2.2 Essais de caractérisation des sables alluvionnaires :

a) Analyse granulométrique: [NF EN 933-1]

❖ Définition :

La granulométrie c'est la science qui s'intéresse à l'étude de la distribution dimensionnelle du granulat. En d'autre terme elle permet de déterminer les dimensions des grains en fraction élémentaire.

L'analyse granulométrique a pour objet :

- Déterminer les dimensions des granulats d'une classe granulaire.
- Déterminer les proportions de grains de même dimension (% Pondéral).
- En déduire pour les sables le Module de finesse (Mf).

❖ **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par tamisage sur une colonne des tamis

❖ **Matériel utilisé :**

- Une série des tamis : 0.08 - 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5 mm.
- Tamiseuse électrique - Une balance de précision



**Figure II.6:** Série des tamis d'analyse du sable

❖ **Expression des résultats :**

- Inscire les différentes masses sur une feuille d'essai.
- Calculer la masse de refus cumulé sur chaque tamis, exprimée en %, de la masse sèche.
- Calculer le pourcentage cumulé des différents tamisât de la masse sèche d'origine passant jusqu'à le tamis 0.08 mm.

**b) Module de finesse (Mf) :** [NFP 18-540]

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un sable. Le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis

$$0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5\text{mm.}$$

$$Mf = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis [0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5]}$$

❖ **Classement du sable selon la valeur de Mf :** [DRE 02]

- De 1,8 à 2.2 : Sable peu fin
- De 2.2 à 2.8 : Sable préférentiel
- De 2.8 à 3.2 : Sable peu grossier

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse  $M_f$  compris entre 2,2 et 2,8; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fillers et le béton y perd en ouvrabilité.

Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables destinés à utilisation en bétons [BEL 14]

### c) Équivalent de sable : [NF P18 -598]

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

#### ❖ But de l'essai :

L'essai a pour but d'évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans un échantillon du sable.

#### ❖ Principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'éléments fins.

On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- Hauteur  $h_1$  : hauteur totale = Partie sédimentée + flocculat,
- Hauteur  $h_2$  : Hauteur de la partie sédimentée seulement.

#### ❖ Mode opératoire :

- La solution lavante a été versée dans l'éprouvette, jusqu'au trait repère inférieur.
- Verser soigneusement, une masse sèche de  $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$  de matériau.
- Laisser reposer dix minutes
- Faire subir à l'éprouvette 90 cycles  $\pm 1$  cycle en  $30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$ . (à l'aide de l'agitateur)
- Rincer et compléter l'opération jusqu'à atteindre le trait repère supérieur,
- Laisser reposer pendant  $20 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$ .
- Au bout de ces 20 min, mesurer à l'aide du régleur la hauteur  $h_1$
- Mesurer également la hauteur  $h_2$  du niveau supérieur de la partie sédimentée.
- Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette.
- Lire la hauteur du sédiment  $h_2$  au niveau de la face supérieure du manchon.



a) Agitation de l'éprouvette à 90 cycles en 30s



b) Éprouvette au début de période de repos



c) Après 20 min de repos (à la fin de l'essai)

Figure II.7: Étapes de l'essai d'équivalent du sable

❖ Expression des résultats :

- La valeur de l'équivalent de sable, est donnée par la formule:

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

- L'équivalent de sable visuel est, dans les mêmes conditions, donné par la formule :

$$ES_v = \frac{h'_2}{h_1} \times 100$$

Tableau II.5 : Nature et qualité du sable en fonction de l'ES [DAD 19]

| ES à vue       | ES au piston   | Nature et qualité du sable   |
|----------------|----------------|--|
| ES < 65%       | ES < 60%       | Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité ou vérification plus précise de la nature des fines par un essai au bleu de Méthylène. |
| 65% ≤ ES < 75% | 60% ≤ ES < 70% | Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.                          |
| 75% ≤ ES < 85% | 70% ≤ ES < 80% | Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.  |
| ES ≥ 85%       | 70% ≤ ES < 80% | Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.      |

**d) Masse volumique apparente :**

Le détail du processus de l'essai a été décrit au-dessus dans la caractérisation du ciment; que ce soit matériel utilisé ou mode opératoire;

Les photos suivantes montre les étapes principales de la mesure masse volumique apparente.



Figure II.8: Mesure de la masse volumique du sable jaune

**❖ Expression des résultats :**

La masse volumique apparente est donnée par la simple formule :

$$\rho_{\text{app}} = \frac{M}{V}$$

Avec :

$\rho_{\text{app}}$  : La masse volumique apparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

**M** : La masse du sable contenu dans le récipient (g)

**V** : Le volume du récipient utilisé dans l'essai ( $\text{cm}^3$ )

**e) Masse volumique absolue :**

Le même processus qui a été suivi dans l'essai du ciment; seulement le liquide d'essai utilisé dans le cas du sable est l'eau;

**❖ Le matériel utilisé :**

- Un pycnomètre de volume connu (étalonné avec de l'eau distillée)
- Un entonnoir de remplissage
- Une balance de précision.

**❖ Mode opératoire :**

- Peser le pycnomètre vide  $M_0$

- Peser le pycnomètre rempli de l'eau distillé jusqu'au trait repère soit M1
- Peser la masse du sable soit M2
- Introduire le corps dans l'eau après avoir vider le pycnomètre à la moitié.
- Éliminer l'air et remplir de l'eau jusqu'au trait repère peser M3

❖ **Expression des résultats :**

- Masse de l'eau déplacé correspond au volume du corps :

$$M_E = M1 + M2 - M3$$

- Volume de l'eau déplacé :

$$V_E = \frac{M_E}{\rho_E} \quad (\rho_E : \text{Masse spécifique de l'eau}).$$

- La masse volumique absolue est donnée par la formule :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M_2}{V_E}$$

**f) Analyses chimiques :**

Les analyses chimiques réalisées sur les échantillons des sables, sont effectuées au sein de **LBTP /El-Oued**, par la méthode gravimétrique, dont le but de déterminer :

➡ **Les insolubles:** [NF P15 - 461]

Qui sont des silicates, corps insolubles dans l'acide chlorhydrique.

❖ **Matériels utilisés :**

- Balance analytique - Four à moufle
- Verreries : Fioles - éprouvette graduées
- Creusets en porcelaine - Consommables

❖ **Matériaux utilisés :**

- Échantillon du sable préparé et tamisé.

❖ **Mode opératoire :** [NF P15 - 461]

- Opérer sur un échantillon 2 g.
- Délayer la prise d'essai dans un mélange à volumes déterminés;
- Chauffer rapidement jusqu'à ce que le liquide soit juste jaune clair;
- Filtrer la liqueur chaude sur filtre sans cendres;
- Réserver le filtrat qui servira à la détermination de la teneur des ions  $\text{SO}_4^{2-}$ ;
- Mettre le filtre et son contenu dans une capsule;

- Faire bouillir pendant un quart d'heure puis filtrer;
- Filtrer à l'eau distillée;
- Calciner et peser.



a) Chauffage des fioles



b) Filtrage sur papier filtre



c) Calcination au four

**Figure II.9:** Étapes principales d'analyses chimiques

➔ **Les carbonates :** [NF P15 - 461]

Réalisé avec un calcimètre de Dietrich on cherche le taux de carbonates d'un sable dont le but de déterminer le taux de calcaire  $\text{CaCO}_3$ .

❖ **Principe :**

La méthode est basée sur le principe de la détermination du volume de  $\text{CO}_2$  dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique en excès

❖ **Matériels utilisés :**

- Calcimètre Dietrich - Balance analytique - Produits chimiques

**Figure II.10 :** Exécution de l'essai au Calcimètre Dietrich

**❖ Matériau utilisé :**

- Échantillon du sable préparé

**❖ Mode opératoire**

- Préparer un échantillon
- Tarer le flacon sur la balance analytique
- Mettre une masse de 0.500 g dans le flacon
- Remplir l'HCL dilué et mettre le tube d'essai dans le flacon
- Mettre le bouchon et fermer le flacon soigneusement
- Fermer le robinet de calcimètre
- Incliner et agiter le flacon avec précaution
- Après stabilisation, faire la lecture sur le tube gradué de calcimètre.

**➡ Les sulfates : [BS 1377]**

La détermination des sulfates est une opération indispensable pour un projet de construction, vue l'effet nocif des sulfates sur le béton que ce soit interne il s'agit de l'un des composants comme le sable ou externe il s'agit du sol de fondations; les sulfates solubles dans l'eau, trouvés dans le sable sous forme de sulfate de sodium  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , sulfate de magnésium  $\text{MgSO}_4$ , et sulfate de calcium  $\text{CaSO}_4$ , communément trouvé sous forme de gypse, est faiblement soluble dans l'eau ;

Le composant le plus agressif pour les  $\text{CaSO}_4$  sur le béton et le mortier sont les ions sulfates  $\text{SO}_4^{2-}$

**❖ Matériels utilisés :**

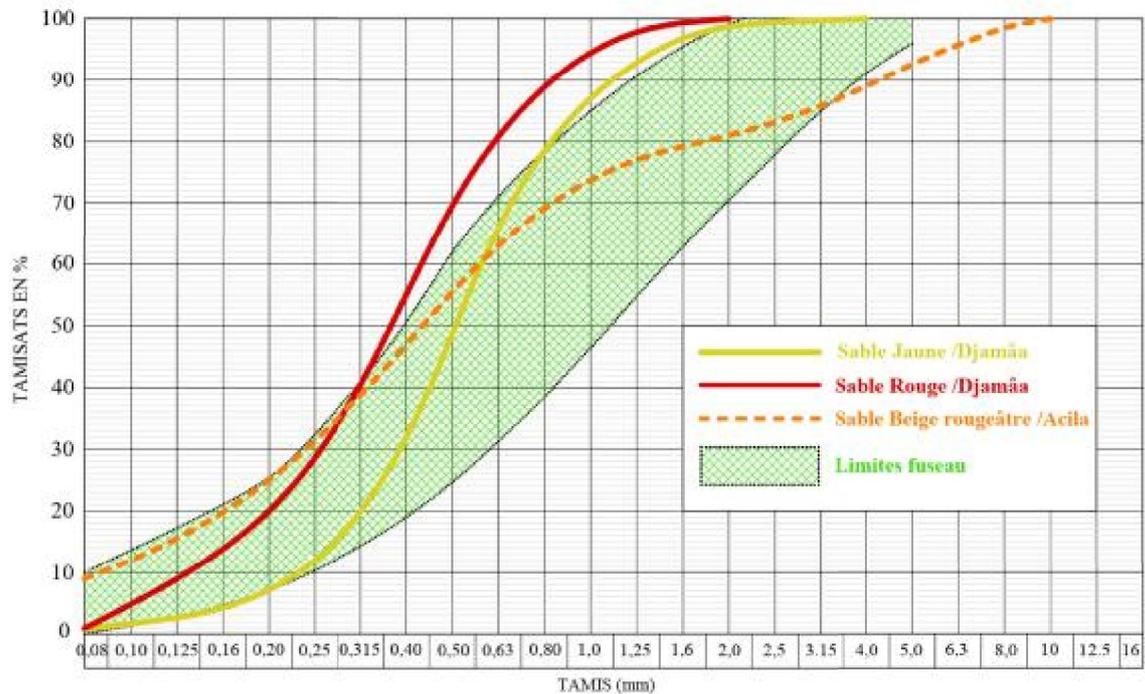
- Le même matériel utilisé pour la détermination des insolubles
- Produits chimiques (HCL et Chlorure de baryum)

**❖ Mode opératoire :**

- Opérer sur le filtrat issu de l'opération de la détermination des insolubles.
- Dans une fiole de 250 ml, on prend 100 ml de filtrat ;
- Porter le tout sur une plaque chauffante jusqu'au début ébullition
- Ajouter 25 ml de chlorure de baryum dilué à 10% avec de l'eau distillée
- Compléter le temps ébullition et filtrer la liqueur sur filtre sans cendres;
- Peser un creuset vide
- Mettre le papier filtre avec son contenu dans le creuset puis au four à moufle
- Après calcination, peser à nouveau le creuset.

### II.2.2.3 Récapitulatifs des résultats des sables alluvionnaires :

#### a) Courbes des sables analysés :



**Figure II.11:** Courbes des sables alluvionnaires analysés (Limites fuseau) [DRE 98]

#### b) Caractéristiques physiques :

Les essais de caractérisation physique des trois prélèvements du sable, il s'agit de la masse volumique absolue et apparente et l'équivalent du sable ainsi que le module de finesse ; sont récapitulés dans le tableau II.6.

**Tableau II.6 :** Caractéristiques physiques des sables alluvionnaires analysés.

| Caractéristiques physiques                     | Valeurs         |             |                   |
|--|-----------------|-------------|-------------------|
|  | Sablière Djamâa |             | Sablière Acila    |
|  | Sable jaune     | Sable rouge | Sable beige rouge |
| Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )   | 2.636           | 2.655       | 2.614             |
| Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.593           | 1.608       | 1.621             |
| Équivalent du sable ES (%)                     | 82.1            | 72.3        | 31.4              |
| Module de finesse (Mf)                         | 2.18            | 1.67        | 2.26              |

**c) Composition chimique des sables :**

Les trois prélèvements sont soumis à une analyse chimique, dont le but de déterminer sommairement la composition chimique des sables, les valeurs qui sont d'une grande importance à déterminer dans un sable de construction, sont les ions de sulfate.

**Tableau II.7:** Analyse chimique des différents prélèvements des sables alluvionnaires.

| Composants                 |   | Valeurs         |             |                   |
|----------------------------|---|-----------------|-------------|-------------------|
|                            |   | Sablière Djamâa |             | Sablière Acila    |
|                            |   | Sable jaune     | Sable rouge | Sable beige rouge |
| Insolubles<br>[NFP15-461]  | SiO <sub>2</sub> (%)                      | 95.5            | 94.1        | 90.2              |
| Sulfates<br>[BS 1377]      | CaSO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O (%) | 2.08            | 2.31        | 3.14              |
|                            | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (%)         | 1.16            | 1.28        | 1.75              |
| Carbonates<br>[NFP 15-461] | CaCO <sub>3</sub> (%)                     | 0.87            | 1.83        | 3.26              |

**d) Auscultation microscopiques :**

Une auscultation au microscope optique, a été effectuée sur les deux sables prélevés du gisement de Djamâa, pour démontrer d'une manière précise la forme et la composition minérales des grains.



a) Grains en condensation  
(Sable jaune)



b) Grains étalés  
(Sable jaune)



c) Grains en condensation  
(Sable rouge)



d) Grains étalés  
(Sable rouge)

**Figure II.12:** Sable jaune et rouge de la carrière Djamâa/El-Oued  
(Images au microscope optique)

D'après les captures des images au moyen d'un microscope optique, on remarque la confirmation de nos résultats d'analyses chimiques des deux sables analysés, la majorité des grains sont apparus sous une texture de quartz de teint jaune ou rouge selon le type de sable, ayant la composition essentielle de dioxyde de silicium; [TAF 09]

D'autre part et de point de vue forme, une dominance de la forme arrondie; confirme l'origine alluvionnaire des deux sables.

Il est aussi important de signaler au profit des images captées que la condensation des grains les uns sur les autres à une grande influence sur l'aspect couleur.

#### **II.2.2.4 Résumé sur les résultats des sables alluvionnaires :**

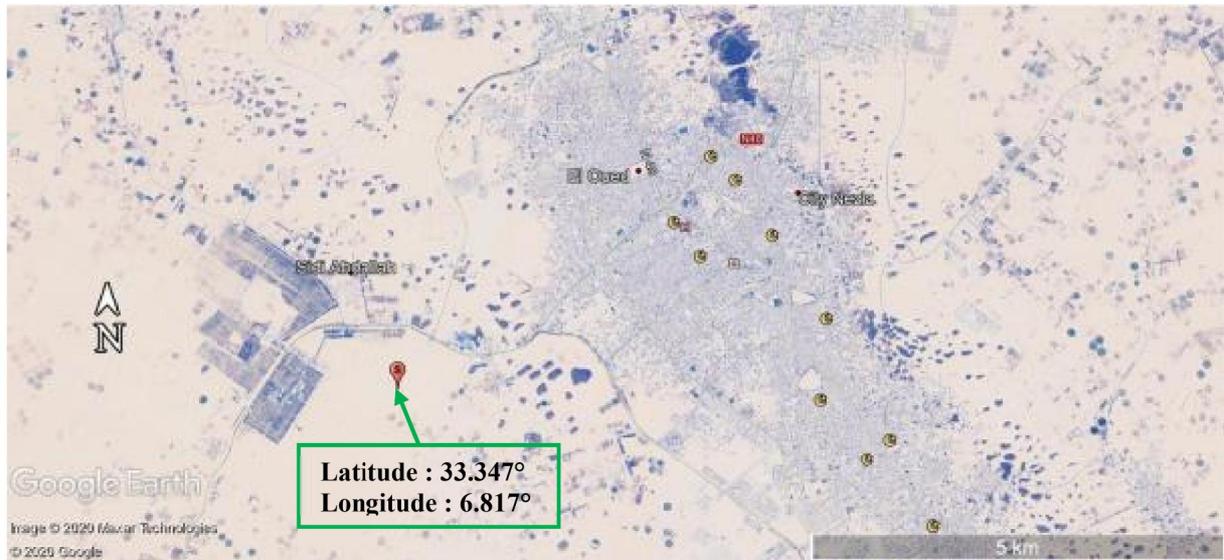
D'après ce résumé sur les résultats obtenus lors des analyses des trois prélèvements du sable ; on peut conclure que le sable jaune de la carrière de Djamâa, présente d'une manière générale les meilleures caractéristiques par rapport aux autres sables analysés.

Un sable qui est presque inséré totalement dans le fuseau [DRE 98], d'une nature chimique à dominance siliceuse, très propre dépourvu de toutes fines argileuses.

#### **II.2.3 Sable de dune broyé :**

Ces sont des fines préparées à partir de l'opération de broyage de sable de dune de la région d'Oued Souf, le sable utilisé est apporté aux dunes situés de côté Est du complexe touristique la Gazelle d'Or/El-Oued.

## ❖ Localisation du prélèvement de sable de dune :



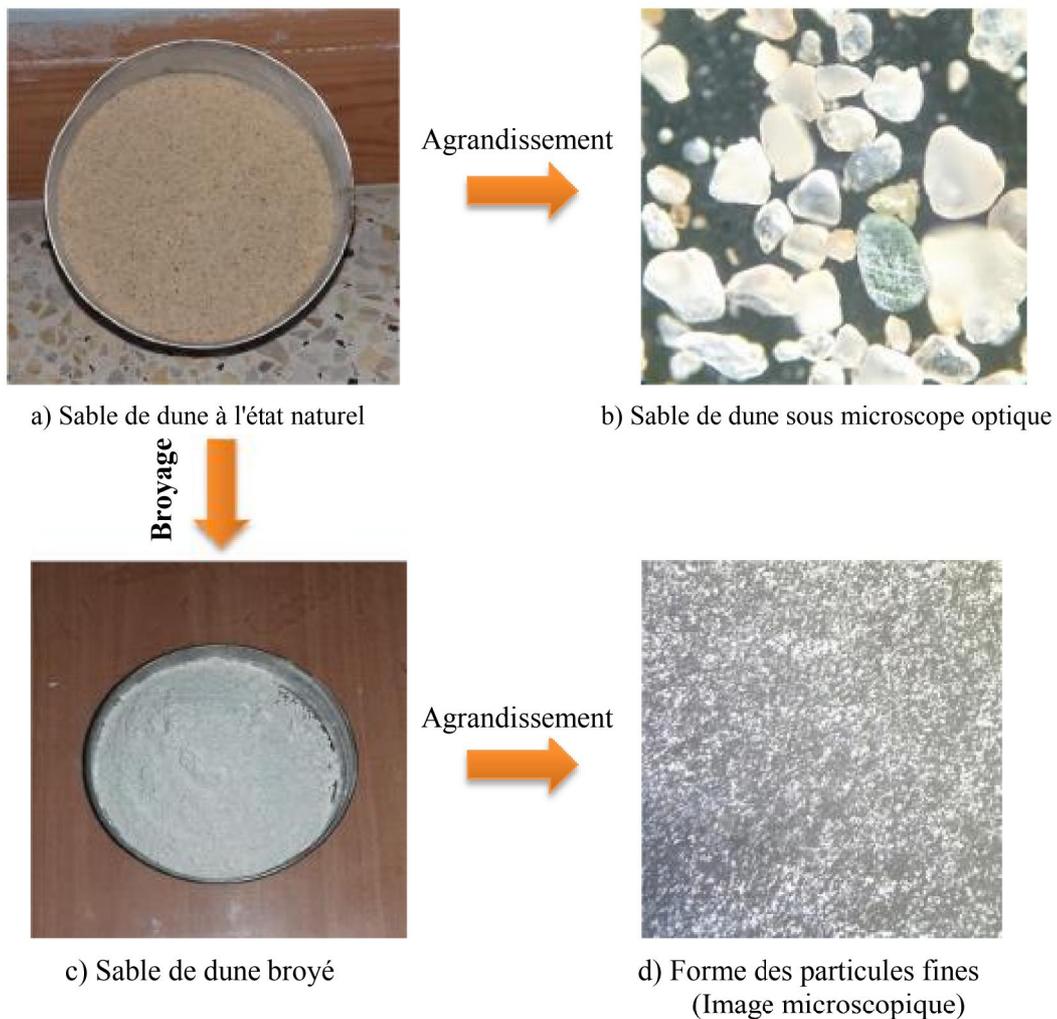
**Figure II.13:** Sable de dune prélevé près du complexe touristique la Gazelle d'Or/El-Oued.



**Figure II.14:** Prélèvement du sable de dune / El-Oued.

Avant d'entamer l'opération de broyage de sable de dune, est dont le but de confirmer la nature siliceuse du sable, une analyse chimique préliminaire a été effectuée donnant un taux de silice de 90.71%.

Après cette confirmation, on est passé à la phase de broyage, au moyen de l'appareil Micro-deval, à la fin de cette opération, et l'obtention d'une farine de silice, un autre travail complémentaire de tamisage des fines sur un tamis de 80  $\mu\text{m}$  a été effectué dont le but de l'obtention d'un mélange homogène de même finesse.



**Figure II.15:** Illustration sur la phase préparatoire du sable de dune broyé

### II.2.3.1 Essais réalisés sur le Sable de dune broyé :

- Analyse granulométrique par sédimentométrie
- Analyses de la composition chimiques
- Masse volumique apparente
- Masse volumique absolue
- Surface spécifique de Blaine.
- Auscultation microscopique

#### a) Analyse granulométrique par sédimentométrie : [NF P 94-057]

Un essai réalisé sur la fraction fine (éléments  $<0.08\text{mm}$ ), l'essai utilise le principe de la loi de Stokes, la vitesse de décantation des grains fins à très fins est fonction de leur dimension, dans le cas des grains sphériques de même masse volumique, cette loi est appliquée aux éléments fins des sols pour déterminer des diamètres équivalents des particules.

❖ **Matériels utilisés :**

- Balance de précision 0.1g Tamis 0.08mm
- Étuve pour séchage de l'échantillon
- Densimètre - Deux éprouvettes de 2l
- Agitateur mécanique - Agitateur manuel
- Thermomètre à mercure d'une précision de 0.2°



a) Densimètre



b) Éprouvettes au cours d'essai

**Figure II.16:** Analyse granulométrique par sédimentométrie❖ **Matériaux utilisés :**

Échantillon de sable de dune broyé <80µm

❖ **Préparation de l'essai :**

- Imbibé la prise d'essai (80 g), dans mélange de l'eau déminéralisée et défoulant composé à 5% d'hexamphosphate de sodium.
- Laisser imbibé pendant au moins 15 h
- Dispersé l'échantillon imbibé au moyen d'un agitateur mécanique

❖ **Mode opératoire :**

- Verser la suspension dispersée dans une éprouvette d'essai
- Compléter par de l'eau déminéralisée jusqu'à 2000 cm<sup>3</sup>
- Agiter vigoureusement verticalement la suspension
- Retirer l'agitateur manuel et déclencher au même moment le chronomètre
- Plonger le densimètre avec précaution immédiatement.
- Faire des lectures depuis le début de l'essai

❖ **Expression des résultats :**

$$p = \frac{V_s}{m} \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \rho_w \left[ \frac{\rho_t}{\rho_w} - 1 \right]$$

P : Le pourcentage de particules  $\leq$  à D (par rapport à la masse de la prise d'essai)

V<sub>s</sub> : volume de la suspension

m : masse de sol sec

$\rho_s$  : masse volumique des particules solides

$\rho_w$  : masse volumique de l'eau distillée

$\rho_t$  : masse volumique de la suspension au temps t

### b) Analyses chimiques du sable de dune broyé:

L'analyse chimique du sable de dune broyé a été réalisée à la cimenterie CILAS/Biskra

### c) Masse volumique apparente et absolue :

Le descriptif des essais, est le même descriptif appliqué sur le ciment décrit auparavant.

### d) Surface spécifique de Blaine : [NF EN 196-6]

La finesse de sable de dune broyé à une grande signification dans la phase de préparation des fines exceptionnellement le degré de broyabilité de fines, le sable de dune broyé est soumis à une détermination de la SBB au laboratoire de la cimenterie CILAS/Biskra.



**Figure II.17:** Appareil de Blaine de marque ACME/Laboratoire cimenterie CILAS/Biskra

### ❖ Expression des résultats :

La même formule, du paragraphe (II.2.1.1.e) ; finesse de ciment, sera appliquée pour la détermination de la finesse de sable de dune broyé.

### II.2.4 Filler de calcaire:

Trois prélèvements ont été apportés au laboratoire pour analyses, dont deux qui sont proviennent de la région de Hassi Messaoud, et le troisième prélèvement est apporté du concasseur de Ain Touta ;

Une détermination rapide de la teneur en carbonate ( $\text{Ca CO}_3$ ) au moyen d'un calcimètre Dietrich, à été effectuée pour faire le meilleur choix entre les trois prélèvements

Prélèvement N°01 : La fraction fine du concasseur Ben Brahim (H.M.D)

Prélèvement N°02 : La fraction fine du concasseur Amouri (H.M.D)

Prélèvement N°03 : La fraction fine du concasseur Cosider (Ain Touta)

**Tableau II.8:** Analyse préliminaire du taux de carbonates des fines calcaire

| Composants                           | Valeurs  |  |   |
|--------------------------------------|--|--|---|
|                                      | Fine brute<br>Concasseur Ben Brahim<br>(H.M.D) | Fine brute<br>Concasseur Amouri<br>(H.M.D) | Fine brute<br>Concasseur Cosider<br>(Ain Touta) |
| Carbonates<br>%CaCO <sub>3</sub> (%) | 64,35  | 70,43                                      | 99.21   |

Le taux de carbonate élevé du prélèvement d'Ain Touta qui est de 99.21%, nous menons sur le choix de ce type de matériau pour l'opération de broyage.

**N.B :** Le même programme des essais décrit au paragraphe (II.2.3) du sable de dune broyé, a été est appliqué sur les fillers calcaire



a) Tamis 0.08mm pour  
homogénéisation des fillers



b) Fillers de calcaire broyées

**Figure II.18:** Broyage du filler calcaire

## II.2.5 Résultats des fines (Sable de dune broyé et filler calcaire) :

### a) Granulométrie par sédimentométrie :

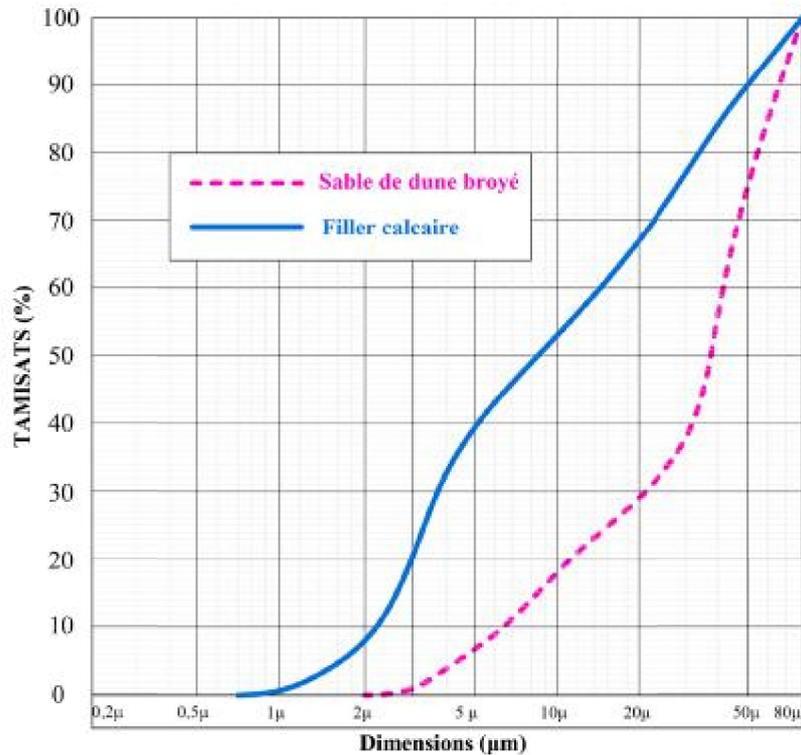


Figure II.19: Courbes granulométriques des fines

Les deux courbes de fines, démontrant qu'avec la même procédure suivie pour le broyage et le tamisage des deux fines, on obtient une distribution dimensionnelle différente, cela traduit par la spécificité de degré de broyabilité résultant principalement de la composition chimique différente.

On remarque qu'au niveau de 5µm, il ne reste que 6% de sable de dune broyé, tandis que pour les fillers calcaires il y a 40% de la masse totale sous cette dimension.

### b) Caractéristiques physiques des fines:

Tableau II.9 : Caractéristiques physiques des fines

| Caractéristiques physiques                        | Valeurs             |                 |
|---|---------------------|-----------------|
|   | Sable de dune broyé | Filler calcaire |
| Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )      | 2.71                | 2.74            |
| Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )    | 1.003               | 0.763           |
| Surface spécifique de Blaine (cm <sup>2</sup> /g) | 3508                | 7076            |

Les résultats de la SSB et la masse volumique apparente, démontrent l'existence d'une relation d'inverse, l'augmentation de la surface spécifique à diminuer la masse volumique apparente.

### c) Analyses chimiques des fines :

L'importance de cet analyse est confirmer le pourcentage de silice et calcaire des deux fines utilisé dans cette étude expérimentale.

**Tableau II.10:** Analyses chimiques des fines [NFP15-461]

| Composants                           | Valeurs             |                 |
|--------------------------------------|---------------------|-----------------|
|                                      | Sable de dune broyé | Filler calcaire |
| Insolubles<br>SiO <sub>2</sub> (%)   | 90.714              | -               |
| Carbonates<br>%CaCO <sub>3</sub> (%) | 5.628               | 99.214          |

## II.2.6 L' Eau :

### II.2.6.1 Eau de gachage :

L'eau de gâchage utilisée pour la totalité de nos essais avec les différentes formulations de mortier, est une eau courante de robinet, de la ville d'El-Oued, soumise à une analyse chimique au préalable dans le laboratoire spécialisé aux analyses des eaux **FATILAB** sis à El-oued.

### II.2.6.2 Eau de cure (Conservation):

Le thème de notre étude, comprend la conservation des éprouvettes préparées en deux milieux différents, il s'agit de l'eau douce (eau de robinet de la ville d'El-Oued), et l'eau agressive c'est l'eau de la remontée de la nappe en surface de sol, venue des différentes sources des eaux rejetées, mais les eaux usées chargées des sels et d'autres composants agressifs, reste la principale source qui présente un véritable danger sur nos constructions implantées aux voisinages des zones de dépression de la région de Soufi, le prélèvement de l'eau de la nappe a été prélevée de la zone de Chott/El-Oued,



**Figure II.20 :** Zone de prélèvement des eaux agressives  
(Derrière le jardin public Cité Chott /El-Oued)



**Figure II.21:** Localisation du prélèvement des eaux agressives – Chott/El-Oued

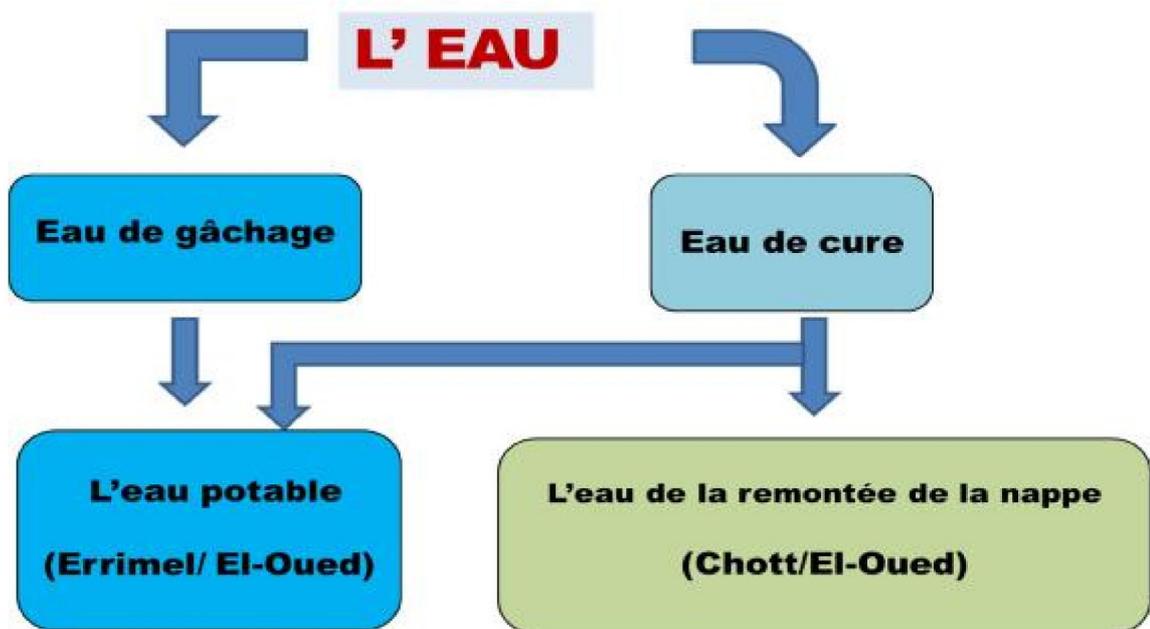
### II.2.6.3 Résultats d'analyses des eaux :

Les résultats des deux eaux, que ce soit l'eau de robinet (Douce) ou l'eau de la nappe (Agressive) sont récapitulés dans le tableau II.11, avec une concentration dans les analyses sur les composants nuisibles, principalement les sulfates et les chlorures

**Tableau II.11** : Composition chimique de l'eau douce (El-Oued), et l'eau agressive (Chott/El-Oued).

| Composants                                       | Unité | Valeurs                |  |
|--|-------|------------------------|--|
|  |       | Eau de robinet (Douce) | Eau de la remontée de la nappe (agressive) |
| PH [NA 751]                                      | -     | 7.40                   | 7.48                                       |
| Chlorures (Cl) [NA 6917]                         | mg/l  | 609.79                 | 5544.85                                    |
| NaCl [NA 6917]                                   | mg/l  | 1005.26                | 9140.87                                    |
| Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) [KERN] | mg/l  | 381.25                 | 1888.70                                    |
| TDS [NA 749]                                     | mg/l  | 2299,50                | 21535.00                                   |
| Conductivité [NA 749]                            | ms/cm | 3.15                   | 29,50                                      |

#### II.2.6.4 Schéma explicatif d'utilisation des eaux :

**Figure II.22** Schéma explicatif d'utilisation des eaux.

#### II.2.6.5 Résumé sur les analyses des eaux de la nappe:

Selon les résultats des analyses de l'eau de la nappe phréatique (Agressive) prélevée de la zone de Chott/El-Oued, et d'après les classifications de la norme [NF EN 206-1], on est dans un milieu moyennement agressif avec un taux des ions de sulfates de 1888.70 mg/l, appartient à la classe XA2.

### II.3 Formulation de mortier [NF EN 196-1]

Après l'exécution de tous les essais de caractérisation de matériaux qui sera exploités dans cette étape, on est passé à la formulation du mortier suivant le mode opératoire de la méthode normalisée.

Selon le plan de travail établi auparavant; les différentes formulations à réaliser seront comme suit :

**a) Mortier de ciment (témoin) :**

- Trois (3) parties de sable
- Une (1) partie de ciment
- Rapport E/C = 0.5.

**b) Mortier du même composants du mortier de ciment, avec l'addition des fillers de calcaire en substitution au poids du ciment, en utilisons trois formulations :**

- **F1** : Ajout de 10% de filler calcaire.
- **F2** : Ajout de 15% de filler calcaire.
- **F3** : Ajout de 20% de filler calcaire.

**c) Mortier du même composants du mortier ciment, avec l'addition du sable de dune broyé en substitution au poids du ciment, en utilisons trois formulations :**

- **F1**: Ajout de 10% de sable de dune broyé.
- **F2** : Ajout de 15% de sable de dune broyé.
- **F3** : Ajout de 20% de sable de dune broyé.

#### II.3 .1 Confection du mortier : [NF EN 196-1]

Dans toutes les phases de préparation du mortier, que ce soit pour les essais de mesure de consistance de mortier frais ou la confection des éprouvettes prismatiques des différents essais. On a suivi la méthode de préparation du mortier normal.

**a) Mode opératoire :**

- Verser l'eau dans le récipient et introduire le ciment ;
- Mettre alors immédiatement le malaxeur en marche à petite vitesse et après 30 s, introduire régulièrement tout le sable (pendant les 30 s suivantes).
- Mettre le malaxeur à sa vitesse la plus grande et continuer à mélanger pendant 30 s supplémentaires ;

- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes, enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci ;
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

Tableau II.12: Récapitulatif des opérations de malaxage du mortier

| Opérations       | Introduction de l'eau | Introduction du ciment |               | Introduction du sable |                | Raclage de la cuve |     |                |
|------------------|-----------------------|------------------------|---------------|-----------------------|----------------|--------------------|-----|----------------|
| Durée            |                       |                        | 30s           | 30s                   | 30s            | 15s                | 75s | 60s            |
| État du malaxeur | Arrêt                 |                        | Vitesse lente |                       | Vitesse rapide | Arrêt              |     | Vitesse rapide |



a) Pesage du ciment



b) Pesage du sable



c) Pesage de l'eau



d) Malaxage du mortier

Figure II.23: Étapes de la préparation du mortier au laboratoire LBTP/El-Oued

### II.3.2 Programme des essais à réaliser sur le mortier:

- Essai de consistance à la table à secousses
- Confection des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm
- Mesure de la masse volumique humide et sèche à 28j
- Essai d'absorption capillaire à 28j
- Auscultation ultrasonique à 28 – 90 – 360j
- Essai de la résistance à la traction par flexion 7- 28 – 90 – 360j
- Essai de la résistance à la compression 7 - 28 – 90 – 360j

**N.B :** Les éprouvettes de l'âge de 360j, sont préparées auparavant pour une ultérieure exploitation (suivi de l'effet de conservation en différents milieux sur la durabilité).

### II.3.3 Consistance du mortier frais à la table à secousses : [NBN EN 1015-3]

#### a) Principe :

La valeur d'étalement est mesurée par le diamètre moyen d'un prélèvement de mortier frais, mis en place à l'aide d'un moule donné sur le plateau d'une table à secousses définie, et soumis à un nombre donné de secousses verticales en soulevant la table à secousses et en la laissant retomber librement d'une hauteur donnée.

#### b) Particularités de l'essai :

- ❖ L'essai a été effectué en deux prélèvements (répéter deux fois)
- ❖ Confection des mortiers selon la méthode du mortier normal, avec un volume minimal de 1,5 l

#### c) Mode opératoire de l'essai :

- ❖ Le moule est rempli en deux couches compactées par 10 coups brefs de dame. La surface libre du disque doit être propre et sèche.
- ❖ Au bout de 15 s, le moule est soulevé lentement et verticalement.
- ❖ Imprimer 15 secousses à la table à une fréquence constante d'environ 1 secousse par seconde.
- ❖ Le diamètre dans deux directions perpendiculaires est mesuré et exprimé à 1 mm près.



a) Moule rempli et arasé



b) Mesure de l'étalement (Pied à coulisse digital 1/100 mm)

**Figure II.24:** Étalement du mortier à la table à secousses**d) Classification de mortier :** [NBN EN 1015-3]**Tableau II.13:** Classes des consistances du mortier selon la valeur d'étalement

| Consistance d'utilisation | Valeur d'étalement  |
|---------------------------|---------------------|
| Mortier raide             | < 140 mm            |
| Mortier plastique         | entre 140 et 200 mm |
| Mortier fluide            | > 200 mm            |

**II.3.4 Confection des éprouvettes prismatiques :** [NF EN 196-1]

Cette étape à une grande importance, influe sur tous les résultats des essais qui succèdent, donc la préparation des éprouvettes  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  suivant les normes prescrites, exceptionnellement le mode de malaxage est indispensable pour réussir à préparer un mortier homogène et par la suite des éprouvettes intactes.

Dans notre cas, on a des moules à six (6) compartiments, permettant la préparation simultanée de six éprouvettes prismatiques  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ , donc la préparation de chaque gâchées d'essai est calculée sur la base de volume total de six éprouvettes plus une quantité excédentaire. Le tableau II.12 suivant donne un résumé sur les quantités nécessaires à préparer pour une gâchée de six (6) éprouvettes.

**Tableau II.14:** Résumé des quantités nécessaires à préparer pour gâchées de 6 éprouvettes

| Constituants                  |                 | Mortier<br>(MC) | Mortier (MSDB) |      |      | Mortier (MFC) |      |      |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|------|------|---------------|------|------|
|                               |                 |                 | 10%            | 10%  | 15%  | 20%           | 15%  | 20%  |
| 3 parties                     | Sable (g)       | 3000            | 3000           | 3000 | 3000 | 3000          | 3000 | 3000 |
| 1 partie                      | Ciment (g)      | 1000            | 900            | 850  | 800  | 900           | 850  | 800  |
|                               | Addition<br>(g) | 0.0             | 100            | 150  | 200  | 100           | 150  | 200  |
| E/C=0.5                       | Eau (g)         | 500             | 500            | 500  | 500  | 500           | 500  | 500  |
| Masse de chaque<br>gâchée (g) |                 | 4500            | 4500           | 4500 | 4500 | 4500          | 4500 | 4500 |

**a) Nombre des éprouvettes à préparer:**

- 5 éprouvettes → Écrasement (traction et compression) à 7j  
 5 éprouvettes → Écrasement (traction et compression) à 28j  
 5 éprouvettes → Écrasement (traction et compression) à 90j  
 5 éprouvettes → Écrasement (traction et compression) à 360j  
 + Auscultation Ultrasonique 28j, 90j et 360j  
 4 éprouvettes → Masse volumique humide et sèche + Absorption d'eau +  
 Absorption capillaire (tous ces essais à 28j)

Soit un total de 24 éprouvettes pour chaque formulation x sept (7) variantes = 168 éprouvettes

On a deux milieux de conservation (Douce et agressif) = 168x2=336 éprouvettes

**Le nombre total à préparer = 336 éprouvettes**

**b) Matériels utilisés :**

- Malaxeur de type MOXER
- Balance d'une portée de 16 Kg (précision 0.1 g)
- Des récipients d'une capacité variable
- Quatre moules, de six (6) compartiments pour chacun

**c) Matériaux utilisés :**

- ❖ Sable - Ciment CEM I 42.5R
- ❖ Ajout FC - Ajout SDB
- ❖ Eau de gâchage

**d) Mode opératoire :**

- La confection du mortier a été effectuée, comme il a été décrit dans le paragraphe .....  
Confection du mortier normal.
- Le remplissage du moule a été effectué en deux couches
- Chaque couche est serrée par 60 chocs
- Après remplissage on a enlevé l'excès et lissé la surface des éprouvettes avec règle métallique plate
- Marquage des moules pour identifier les éprouvettes

**e) Conservation des éprouvettes :**

- Les moules sont protégés avant le démoulage par une plaque de verre
- Le démoulage des moules a été effectué après 24 heures,
- Les éprouvettes sont soumises à une opération de marquage et pesage.
- Immédiatement les éprouvettes ont été conservées dans l'eau (selon le milieu de conservation)
- Les sept variantes sont conservées d'une manière séparée pour les deux milieux de conservation.



a) Avant démoulage : Couverture des moules par une plaque de verre



b) Après démoulage : Marquage et conservation dans l'eau

**Figure II.25:** Conservation des éprouvettes prismatiques du mortier

### II.3.5 Mesure de la masse volumique: [NBN EN 1015-10]

Pour la mesure de la masse volumique humide et sèche des éprouvettes prismatique 40x40x160 mm<sup>3</sup> du mortier, on a utilisé la méthode de référence, il s'agit de la mesure de la masse volumique à la pesée hydrostatique.

Dans notre cas, les mesures de la masse volumique humide et sèche sont mesurées conjointement.

Pour chaque variante une série des éprouvettes qui ont été conservées dans l'eau, sont soumises à l'essai à l'âge de 28j (Eau douce et agressive).

#### ❖ Mode opératoire :

- Essuyer et peser l'éprouvette immédiatement à la sortie de l'eau, soit  $M_1$ .
- Sécher l'éprouvette à une température de  $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  jusqu'à masse constante, soit  $M_2$ .
- Paraffiner l'éprouvette, soit  $M_3$ .
- Dans un dispositif de pesée hydrostatique, peser l'éprouvette dans l'eau, soit  $M_4$ .



Éprouvettes paraffinées



Pesée hydrostatique

**Figure II.26:** Mesure de la masse volumique à la pesée hydrostatique

#### ❖ Expression des résultats :

- Masse volumique de mortier :

$$\rho_{\text{app.H}} = \frac{m_1}{(m_3 - m_4/\rho_w) - (m_3 - m_2/\rho_p)}$$

- Masse volumique apparente sèche :

$$\rho_{\text{app.S}} = \frac{m_2}{(m_3 - m_4/\rho_w) - (m_3 - m_2/\rho_p)}$$

Où :

$\rho_{\text{app.H}}$  : La masse volumique apparente de l'éprouvette humide ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_{\text{app.S}}$  : La masse volumique apparente de l'éprouvette sèche ( $\text{kg/m}^3$ )

$m_1$  : La masse de l'éprouvette humide

$m_2$  : La masse de l'éprouvette sèche

$m_3$  : La masse de l'éprouvette paraffinée

$m_4$  : La masse de l'éprouvette dans l'eau (pesée hydrostatique)

$\rho_w$  : La masse volumique de l'eau

$\rho_p$  : La masse volumique de la paraffine.

### II.3.6 Absorption d'eau par immersion totale: [NBN B 15-215]

Cet essai a été réalisé sur une série des éprouvettes, pour chaque variante, les éprouvettes soumises à l'essai, sont des éprouvettes qui ont déjà conservées dans l'eau pendant 28j; donc les éprouvettes sont saturées totalement d'eau ;

À la sortie d'eau, l'éprouvette a été essuyée et pesée immédiatement soit  $M_1$ ;

On sèche l'éprouvette à l'étuve à une température de  $70^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , jusqu'à une masse constante, soit  $M_2$ .

#### ❖ Expression des résultats :

L'absorption d'eau par immersion totale est exprimée en pourcentage de la masse sèche, est donné par la formule :

$$A_w = 100 \times \frac{M_1 - M_2}{M_2}$$

$A_w$  : L'absorption d'eau par immersion totale en (%)

$M_1$  : La masse de l'éprouvette dans l'air à l'état saturée en (g)

$M_2$  : La masse de l'éprouvette à l'état sec en (g).

### II.3.7 Absorption d'eau par capillarité (Sorptivité): [NF EN 13057]

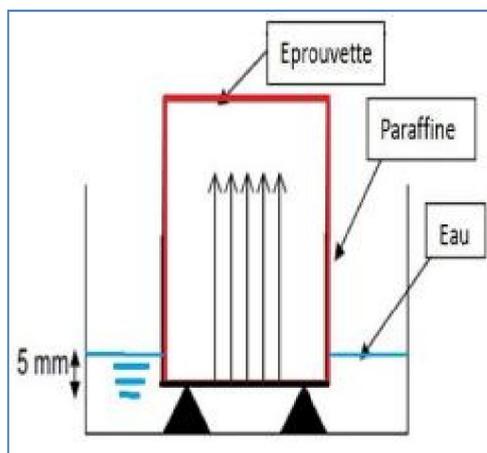
Les mêmes éprouvettes qui ont subies aux mesures des masses volumiques, sont séchées, entaillées d'un seul côté et paraffinées aux autres côtés, seront utilisées pour l'absorption par capillarité.

#### ❖ Principe

Le coefficient de sorptivité est mesuré sur des éprouvettes de mortier prismatiques, dans les conditions prescrites, à pression atmosphérique. Après séchage jusqu'à masse constante, la face clivée de l'éprouvette est immergée partiellement dans l'eau pendant une durée spécifique. On détermine alors l'augmentation de la masse.

#### ❖ Mode opératoire

- Entaillées les éprouvettes d'un seul côté.
- Sécher les éprouvettes jusqu'à masse constante.
- Peser les éprouvettes.
- Immerger partiellement les éprouvettes dans l'eau à un niveau de 5 à 10 mm, comme le montre schéma de principe de l'essai (figure II.26.a).
- Suivi l'augmentation de la masse, dans notre cas le relevé de l'augmentation de la masse a été effectué de la manière suivante : 0 min - 30 min - 60 min – 90 min – 120 min – 150 min – 180 min – 210 min – 240 min – 24h – 48h – 72h



a) Schéma de principe de l'essai



b) Éprouvettes imbibées partiellement selon le schéma de principe

**Figure II.27:** Absorption d'eau par capillarité (Sorptivité) des mortiers éprouvette 40x40x160mm<sup>3</sup>

#### ❖ Expression des résultats :

$$A_c = \frac{\Delta m}{S\sqrt{\Delta t}}$$

$A_c$  : Le coefficient de sorptivité en  $(\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$

$\Delta m$  : La masse d'eau absorbée en (Kg)

$\Delta t$  : Le temps à la minute de mesure en (min).

$S$  : Surface de la face sciée en  $(\text{m}^2)$ .

### II.3.8 Essais de résistances mécaniques : [NF EN 196-1]

La caractérisation du mortier de point de vue résistance de traction et exceptionnellement la résistance à la compression, occupe une grande importance dans tous les recherches, durabilité, valorisation, ... etc.

Dans notre volet expérimental, on va chercher d'adapter tous les moyens disponibles pour satisfaire toutes les conditions exigées par les normes en vigueur

#### II.3.8.1 Résistance à la flexion :

Dans cet essai on a utilisé une presse motorisé d'une marque **Controls** installée au laboratoire LBTP/EI-Oued; d'une vitesse d'avancement de plateau réglable selon la norme, permette d'appliquer des charges jusqu'à 50 KN, donc il est idéal pour l'utilisation en flexion qui nécessite l'application des forces relativement modérées, la vitesse moyenne enregistrée lors des opérations d'écrasement des éprouvettes prismatiques est de l'ordre de 55 N/s, donc il est dans la norme, qui exige un chargement à raison de  $50 \text{ N/s} \pm 10 \text{ N/s}$ .

La méthode utilisée en flexion, est le chargement concentrée à mi portée au moyen d'un dispositif de flexion normalisé, l'éprouvette a été placée sur la face latérale de moulage.

Les demi-prismes qui ont été obtenus lors de cet essai sont conservés pour l'essai de la résistance en compression.



**Figure II.28** : Écrasement d'une éprouvette prismatique ( $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ) par flexion

#### ❖ Expression de résultat :

$$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times l}{b^3}$$

Où :

$R_f$  : est la résistance à la flexion, en  $N/mm^2$ ;

$b$  : est le côté de la section carrée du prisme, en mm;

$F_f$  est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en N;

$l$  : est la distance entre les appuis, en mm.

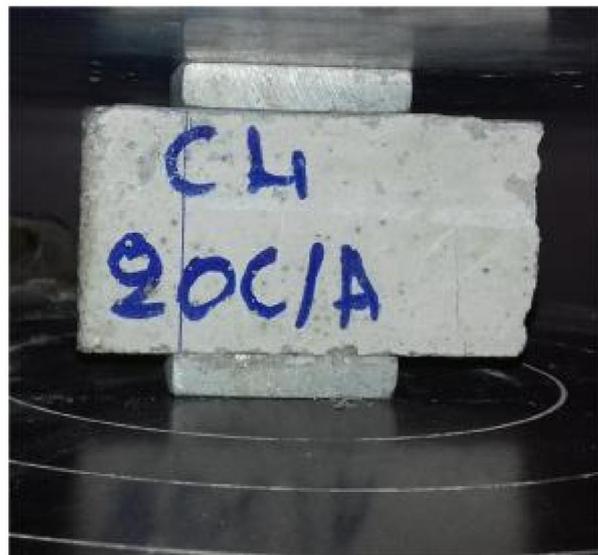
### II.3.8.2 Résistance à la compression :

L'appareil utilisé dans la détermination de la résistance à la compression est d'une marque **UTEST** appartient à l'INSFP Chott/El-Oued, permet de appliquer des charges jusqu'à 2000 KN; dans cet essai on utilise les deux demi-prismes, donc chaque demi-prisme a été centré latéralement par rapport aux plaques auxiliaires  $40 \times 40 \text{ mm}^2$ , positionner à  $\pm 0.5 \text{ mm}$  près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm.

On augmente la charge sans à-coups à la vitesse de  $2\ 400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$  durant toute la durée d'application.



a) Appareil d'écrasement



b) Demi-prisme entre deux plaques auxiliaires  $40 \times 40 \text{ mm}^2$

**Figure II.29** : Écrasement d'un demi-prisme en compression.

#### ❖ Expression des résultats :

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Où :

$R_c$  : est la résistance à la compression, en  $N/mm^2$ ;

$F_c$  : est la charge maximale à la rupture, en N;

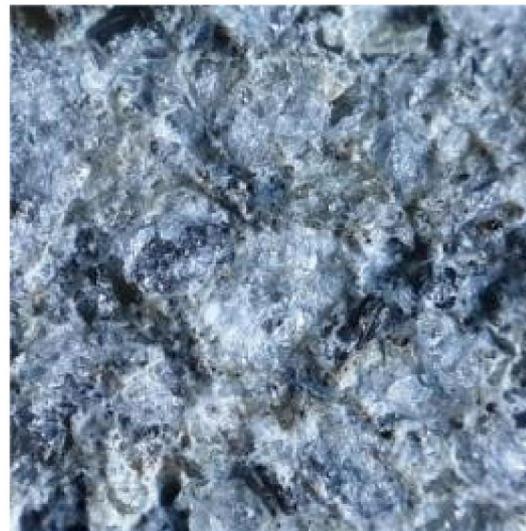
$1600 = 40 \times 40 \text{ mm}^2$ , est l'aire des plateaux ou des plaques auxiliaires, en  $mm^2$ .

### II.3.9 Auscultation microscopiques :

Des captures au moyen d'un microscope optique, ont été effectuées sur des échantillons cisailés à partir des éprouvettes préparées avec un mortier de ciment.



a) Éprouvette conservée en milieu douce



b) Éprouvette conservée en milieu agressif

**Figure II.30** : Images microscopiques sur une coupe d'éprouvette du mortier de ciment.

### II.3.10 Auscultation ultrasonique : [NF P 18-418]

Le test d'auscultation ultrasonique a été réalisé sur toutes les variantes de notre sujet à l'âge de 28 et 90j; l'appareil utilisé lors de cette opération est un appareil de marque **Controls**; les transducteurs de l'appareil est d'un diamètre de 30 mm, de forme adéquate pour le test des éprouvettes prismatiques de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ .

Est un essai non destructif très important qui permet d'évaluer plusieurs caractéristiques du béton durci telles que : le degré de compacité, de fissuration, l'uniformité de coulage ...etc. [TAL 15].

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. L'état du béton totalement inconnu peut se déterminer approximativement selon la vitesse mesurée [LES 49]

**a) Classe de l'appareil :**

La classe de l'appareil utilisé lors des mesures, est la classe 0.1 pour laquelle  $e=1/10\mu s$ .

**b) Étalonnage de l'appareil :**

Préalablement aux mesures, l'appareil a été calibré



Figure II.31 : Calibrage de l'appareil Ultra-son

**c) Disposition des transducteurs :**

Trois types de dispositions des transducteurs sont communément utilisés, dans notre cas, on a appliqué la méthode de transmission directe, parce qu'elle est plus fiable.



a) Mesure du temps en  $\mu s$



b) Mesure de la distance en mm

Figure II.32 : Exécution d'une mesure ultra sonique (Ultra-son Controls)

**d) Expression des résultats :**

La vitesse conventionnelle de propagation est calculée par la formule :

$$v = \frac{1}{t}$$

Où :

v : est la vitesse conventionnelle de propagation en m/s

l : est la distance entre les transducteurs en mètres;

t : est le temps de propagation en secondes.

**e) Classification :**

- $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$  : Béton de faible résistance,
- $3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$  : Béton de moyenne résistance,
- $3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$  : Béton à haute résistance,
- $V \geq 4200 \text{ m/s}$  : Béton à très haute résistance.

## **II.4 Conclusion :**

On conclure sur ce chapitre, que nous avons présenté en première partie, les méthodes expérimentales suivies et le matériel utilisé avec des commentaires sur les résultats obtenus de tous les composants entrant dans la formulation du mortier, il s'agit du ciment CEM I 42.5 R de la cimenterie de Biskria/Biskra qui est d'après les essais réalisés conforme aux normes en vigueur; et les sables alluvionnaires qui ont été soumis à une analyse détaillée, les résultats obtenus a montrés que le sable jaune de la carrière de Djamâa présente les meilleures caractéristiques par rapport aux autres sables analysés ; les fines issues de l'opération de broyage de sable de dune de la région d'El-Oued et les fillers calcaires de la région d'Ain Touta, sont aussi soumises à une analyse spécifique qui nous a donné une idée sur le degré de la broyabilité de deux fines préparées;

En deuxième partie de ce chapitre on a passé à la phase de la confection de diverses formulations programmées, avec la réalisation d'une série des essais dont le but de caractériser le mortier avec les différentes formulations à l'état frais et durci, tout en appuyant sur les références normatives qui sont la base de l'exécution de tout travail sérieux.

# **CHAPITRE III :**

## **RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

### III.1 Introduction:

Nous présentons dans ce chapitre les résultats obtenus lors de l'exécution des essais expérimentaux sur le mortier avec les différentes combinaisons, mortier de ciment, mortier de ciment avec ajouts du sable de dune broyé en substitution au poids du ciment à trois taux d'incorporation (10% - 15% et 20%), mortier de ciment avec ajouts de filler calcaire en substitution au poids du ciment à trois taux d'incorporation (10% - 15% et 20%), donc en tous on a sept (7) formulations.

La méthode de confection des éprouvettes pour les diverses formulations réalisées, est décrite avec détail au paragraphe (II.3.4)

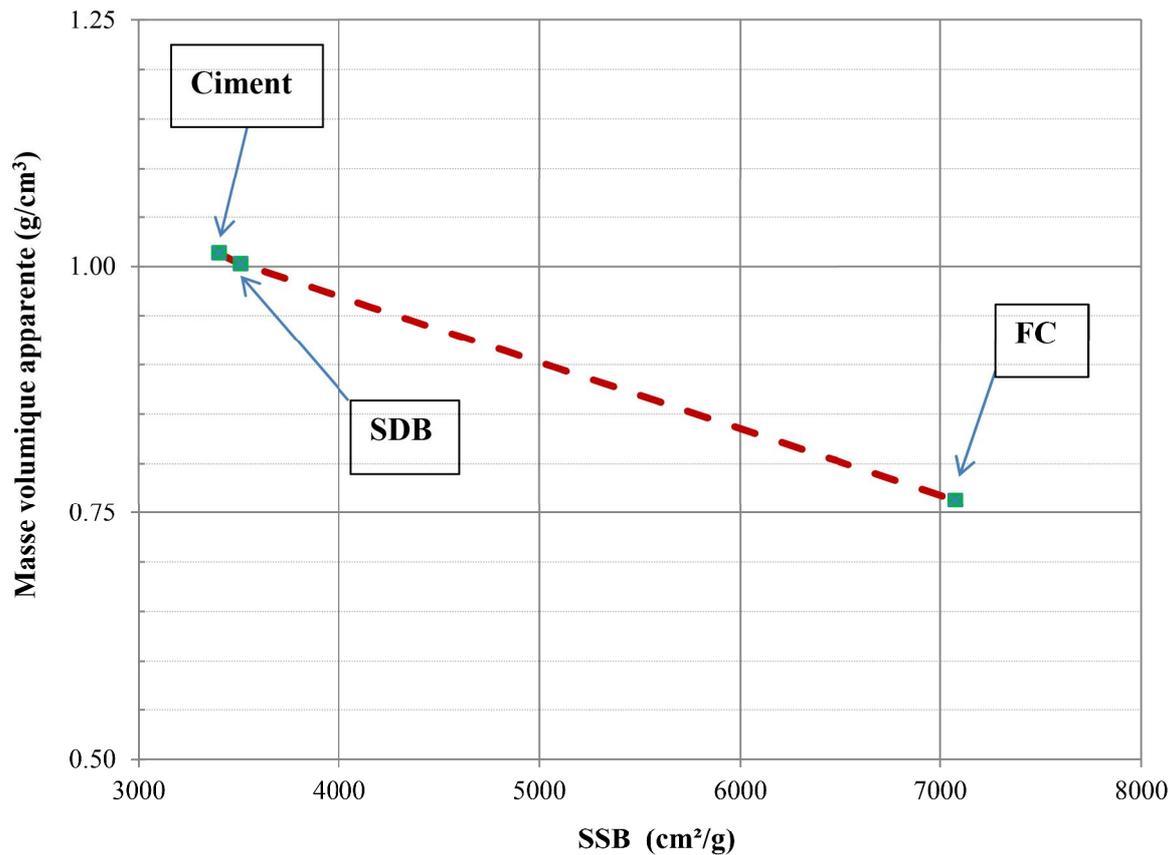
Les résultats qui seront mentionnés dans ce chapitre, font l'objet d'une analyse et discussion détaillée, afin d'établir des conclusions sur notre travail expérimental,

### III.2 Abréviations de nominations utilisées :

- **SD** : Sable de dune
- **FC** : Filler de calcaire
- **SDB** : Sable de dune broyé
- **ED** : Eau de robinet (Douce)
- **EA** : Eau de la nappe (Agressive)
- **MC** : Mortier de ciment, 100% CEM I (Témoin)
- **MSDB 10** : Mortier de ciment avec ajout de 10% de sable de dune broyé.
- **MSDB 15** : Mortier de ciment avec ajout de 15% de sable de dune broyé.
- **MSDB 20** : Mortier de ciment avec ajout de 20% de sable de dune broyé.
- **MFC 10** : Mortier de ciment avec ajout de 10% de filler calcaire.
- **MFC 15** : Mortier de ciment avec ajout de 15% de filler calcaire.
- **MFC 20** : Mortier de ciment avec ajout de 20% de filler calcaire.

### III.3 Relation finesse/ masse volumique apparente des fillers :

Suite à l'opération de broyage de diverses fines utilisées dans notre étude, et après la détermination de la masse volumique apparente (MVa), ainsi que la mesure de la surface spécifique de Blaine (SSB), du ciment, SDB et FC ; on a remarqué qu'il y a une relation de corrélation directe entre la MVa et la SSB, la figure III.1, explique cette relation.



**Figure III.1:** Variation de la masse volumique apparente en fonction de la finesse par SSB.

D'après l'allure de la polygone tracée en fonction des données trouvées lors des essais réalisés et décrits dans les paragraphes (II.2.1 et II.2.5), on remarque qu'à chaque fois la MVa diminue, la SSB augmente, sous forme d'une relation presque linéaire, la diminution de la MVa est le résultat logique de l'opération de broyage qui est en réalité est une opération de serrage de la distribution dimensionnelle des particules fines et par conséquent une augmentation de vides entre ces particules.

### III.4 Caractérisation des mortiers :

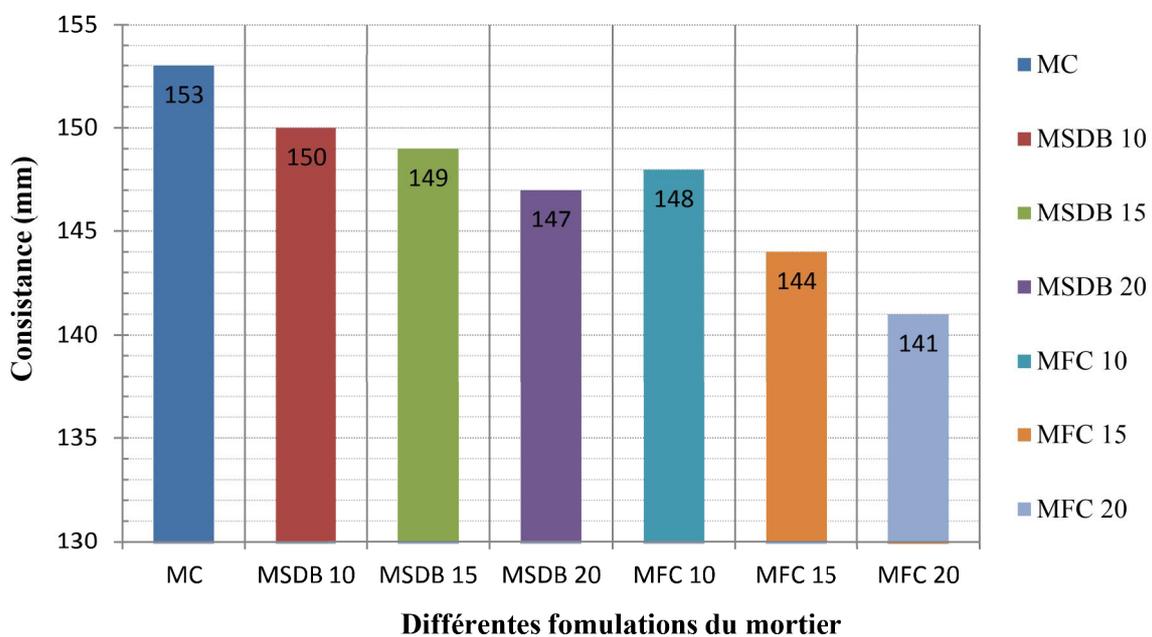
#### III.4.1 Consistance des mortiers frais :

La consistance des mortiers frais a été déterminée au moyen de la table à secousses [NBN EN 1015-3], la méthode et le tableau de classification de la consistance du mortier sont décrits dans le paragraphe (II.3.3).

**Tableau III. 1 :** Consistance des différentes formulations du mortier.

| Différentes formulations | E/C | Consistance obtenue (mm) | Classe de consistance [NBN EN 1015-3] |
|--------------------------|-----|--------------------------|---------------------------------------|
| MC                       | 0.5 | 153                      | Mortier plastique                     |
| MSDB 10                  | 0.5 | 150                      | Mortier plastique                     |
| MSDB 15                  | 0.5 | 149                      | Mortier plastique                     |
| MSDB 20                  | 0.5 | 147                      | Mortier plastique                     |
| MFC 10                   | 0.5 | 148                      | Mortier plastique                     |
| MFC 15                   | 0.5 | 144                      | Mortier plastique                     |
| MFC 20                   | 0.5 | 141                      | Mortier plastique                     |

Pour une meilleure interprétation des résultats trouvés, on a établi une représentation graphique, démontre l'évolution de la maniabilité du mortier en fonction de la formulation appliquée (figure III.2)

**Figure III.2:** Évolution de la consistance en fonction de type du mortier

Suite aux résultats représentés graphiquement, on remarque qu'avec un mortier témoin (MC), la valeur trouvée est maximale de l'ordre de 153 mm, tandis qu'à chaque fois on augmente le taux d'ajout des fines par rapport au poids de ciment, la maniabilité diminuée, cette réduction

est relative au type de fine utilisée, pour le SDB, la diminution est modérée d'un taux de 2.04% entre le MSDB 10 et le MSDB 20, et d'un taux 4.08% entre le MC et le MSDB 20, tandis que pour la FC d'une surface spécifique élevée de 7076 cm<sup>2</sup>/g, la diminution de la consistance est appréciable d'un taux de 4.96% entre le MFC 10 et le MFC 20, et atteignant un taux de 8.51% par rapport au MC. Ces résultats ont montrés l'influence des ajouts et exceptionnellement le type d'ajout utilisé, sur la maniabilité de divers formulations du mortier, on peut expliquer cette diminution par l'augmentation de la surface spécifique des fines utilisées ce qui conduit à une augmentation de la demande en eau lors de l'opération de gâchage [ROS 10]; en tenant compte du rapport (E/C) fixé dans notre cas, la chute en maniabilité de divers formulations du mortier, en fonction de type de fine utilisée, devra raisonnable.

#### III.4.2 Masse volumique de mortiers:

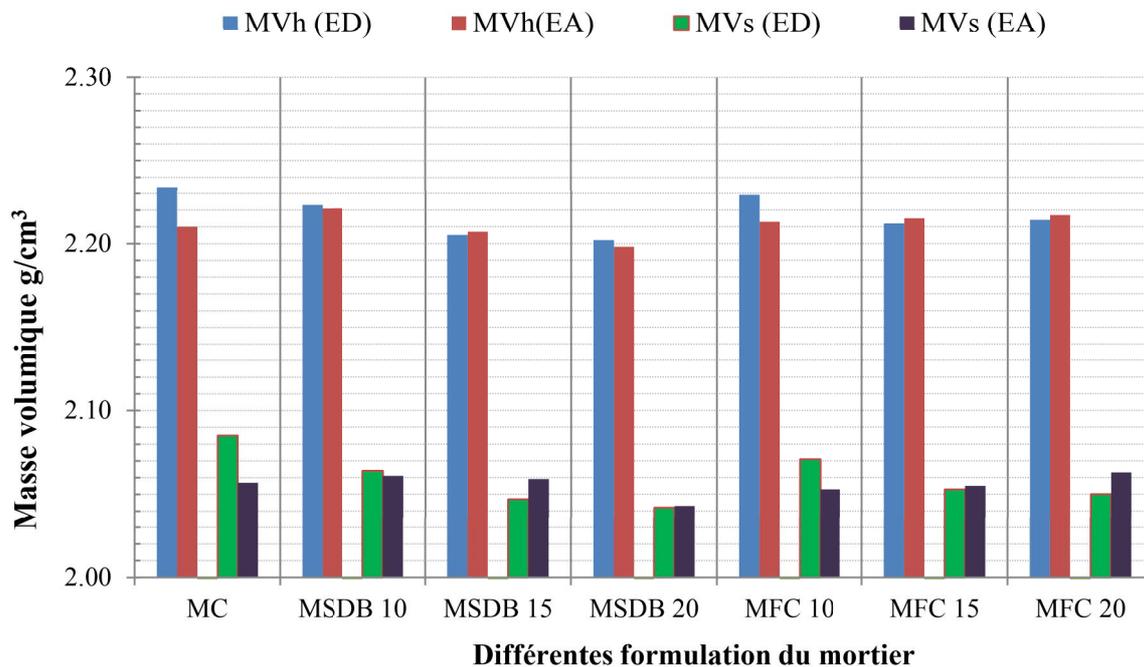
La masse volumique des différents types de mortier, a été effectuée au moyen de la méthode précisée, il s'agit de la méthode de détermination de la masse volumique à la pesée hydrostatique, décrite dans le paragraphe (II.3.5)

Les éprouvettes soumises à l'essai à l'âge de 28 jours.

**Tableau III.2:** Résultats de la masse volumique de différentes formulations du mortier.

| Différentes formulations | Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> ) |            |                        |            |
|--------------------------|--------------------------------------|------------|------------------------|------------|
|                          | Milieu (ED)                          |            | Milieu (EA)            |            |
|                          | Humide (Saturée) (MVh)               | Sèche (MV) | Humide (Saturée) (MVh) | Sèche (MV) |
| MC                       | 2.234                                | 2.085      | 2.210                  | 2.057      |
| MSDB 10                  | 2.223                                | 2.064      | 2.221                  | 2.061      |
| MSDB 15                  | 2.205                                | 2.047      | 2.207                  | 2.059      |
| MSDB 20                  | 2.202                                | 2.042      | 2.198                  | 2.043      |
| MFC 10                   | 2.229                                | 2.071      | 2.213                  | 2.053      |
| MFC 15                   | 2.212                                | 2.053      | 2.215                  | 2.055      |
| MFC 20                   | 2.214                                | 2.050      | 2.217                  | 2.063      |

L'évolution de la masse volumique à l'état saturé et sec, en fonction de la formulation du mortier appliquée, est représentée comme suit :



**Figure III.3:** Évolution de la masse volumique en fonction de la formulation du mortier, à l'âge de 28j  
 Pour un plus d'éclaircissement, on a établi un résumé, présentant le rapport de la diminution de la masse volumique en fonction de l'état hydrique des éprouvettes.

**Tableau III.3 :** Diminution de la masse volumique en (%), d'un état saturé à un état sec

| Différentes formulations | Diminution de la masse volumique (%) |             |
|--------------------------|--------------------------------------|-------------|
|                          | Milieu (ED)                          | Milieu (EA) |
| MC                       | 7.15                                 | 7.44        |
| MSDB 10                  | 7.70                                 | 7.76        |
| MSDB 15                  | 7.72                                 | 7.19        |
| MSDB 20                  | 7.84                                 | 7.59        |
| MFC 10                   | 7.63                                 | 7.79        |
| MFC 15                   | 7.74                                 | 7.79        |
| MFC 20                   | 8.00                                 | 7.46        |

Avant d'antamer la discussion de ces résultats, qui concerne la masse volumique des différentes formulations des mortiers étudiés, il est important de signaler que les mesures sont relevées à l'âge de 28 j, à cause des délais courts de la préparation de ce sujet, donc un vrai jugement de ce type de résultats nécessite généralement un délai plus étendu que ça.

Les valeurs obtenues à l'âge de 28 j, ont montrées que l'amélioration de la masse volumique par l'ajout des fines est marquée par une valeur optimale;

Selon les résultats enregistrés dans le tableau III.2; Le mortier témoin MC conjointement avec les mortiers MSDB10, MFC10, ont donnés les meilleures résultats de point de vue compacité; le mortier MC prend sa masse volumique relativement élevée par le processus d'hydratation rapide de clinker, tandis que pour les mortiers MSDB10, MFC10, grâce à un rôle physique qui se manifeste par l'effet de remplissage des pores par des fines; et par conséquent une réduction dans le nombre et le volume des pores, et l'obtention d'un squelette plus dense et plus résistant. Ce sont des constatations qui ont déjà approuvées par plusieurs études, telle que l'étude réalisée par Logbi.A (2019), qui a montré l'effet des fines calcaires et sableuses sur la densification de la matrice cimentaire [LOG 19].

La diminution en pourcentage, d'un état saturé à un état sec, nous a donné une idée très utile sur l'état de compacité de chaque formulation, particulièrement en milieu de l'eau douce, ou le jugement est plus judicieux, d'après le tableau comparatif, le mortier MC, à confirmer leur masse volumique relativement élevée par rapport aux autres formulations, par l'écart le plus minimum de 7.15% entre l'état saturé et l'état sec.

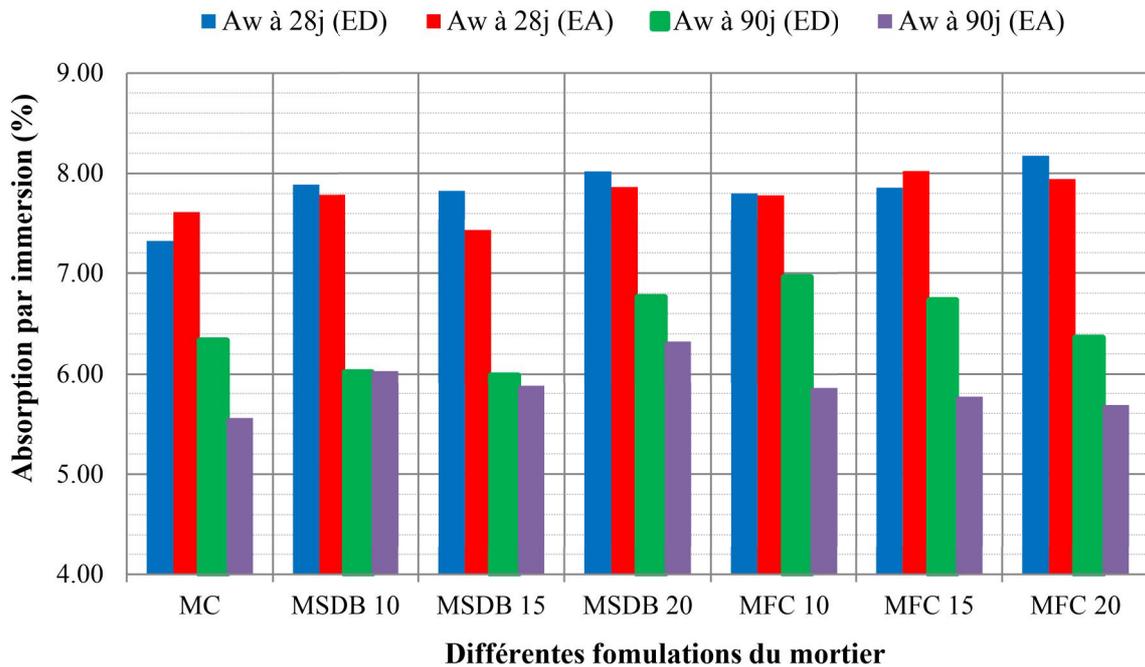
### III.4.3 Absorption d'eau par immersion totale ( $A_w$ ):

L'expression des résultats de l'absorption d'eau par immersion totale, a été décrit dans le paragraphe (II.3.6).

**Tableau III.4:** Résultats de l'absorption par immersion en fonction de la formulation du mortier.

| Différentes formulations | Absorption par immersion (%) |        |             |        |
|--------------------------|------------------------------|--------|-------------|--------|
|                          | Milieu (ED)                  |        | Milieu (EA) |        |
|                          | À 28 j                       | À 90 j | À 28 j      | À 90 j |
| MC                       | 7.318                        | 6.334  | 7.614       | 5.556  |
| MSDB 10                  | 7.890                        | 6.019  | 7.788       | 6.031  |
| MSDB 15                  | 7.825                        | 5.987  | 7.428       | 5.876  |
| MSDB 20                  | 8.018                        | 6.764  | 7.862       | 6.324  |
| MFC 10                   | 7.800                        | 6.960  | 7.779       | 5.854  |
| MFC 15                   | 7.857                        | 6.731  | 8.021       | 5.767  |
| MFC 20                   | 8.174                        | 6.359  | 7.942       | 5.683  |

L'illustration graphique de la figure III.4, démontre d'une manière simplifiée l'évolution du coefficient d'absorption par immersion en fonction de la formulation appliquée



**Figure III.4:** Évolution de l'absorption par immersion en fonction de la formulation du mortier

Les résultats de l'absorption par immersion à l'âge de 28j, ont confirmés par une autre méthode les résultats trouvés lors de la mesure de la masse volumique, donc toujours le mortier témoin MC, grâce à un processus d'hydratation rapide de clinker, diminue les tailles des pores dans la matrice cimentaire, et renfermé le meilleur coefficient d'absorption par immersion, cependant avec le temps à l'âge de 90j, les autres formulations qui contiennent des ajouts inertes tel que le SDB et le FC à un processus d'hydratation lent, ils ont aussi progressent leurs propriétés et diminuées leur coefficient d'absorption par l'effet de remplissage des pores capillaires et par conséquent la diminution de leur taille, à 90j on a un gain pour le coefficient d'absorption par immersion de 5.23% pour le mortier SDB10 par rapport au mortier MC;

En conclure que le gain en coefficient d'absorption par immersion entre l'âge de 28j et 90j ; soit dans l'eau douce (ED) ou agressive (EA), est le résultat de l'effet positif des additions minérales utilisées (SDB et FC), qui ont développées avec l'âge, des hydrates supplémentaires et par conséquent un mortier plus compact et plus étanche.

Il est important de signaler que la diminution (le gain) en coefficient d'absorption par immersion entre l'âge de 28j et 90j, est plus représentative dans l'eau douce, qu'à l'eau

agressive, l'existence des résidus secs dans l'eau agressive à influencer certainement sur les résultats de l'absorption par immersion.

Toutes fois il est à rappeler que l'effet des additions minérales sur l'absorption par immersion a été traité par plusieurs études de recherches afin d'apprécier le taux de compacité dans les structures cimentaires, et par conséquent leur résistance aux agressions chimiques. Guernouti (2002) ont confirmé que les additions minérales actifs et inertes ont un impact bénéfique sur l'absorption, ce qui confirme la tendance de nos résultats [GUE 02].

#### III.4.4 Absorption d'eau par capillarité (Sorptivité):

La méthode de réalisation de l'essai et les formules de calcul, sont décrites dans le paragraphe (II.3.7).

##### III.4.4.1 Suivi de la masse absorbée durant les premières 4h :

- **Cas N°01 :** Milieu de conservation, Eau douce (ED)

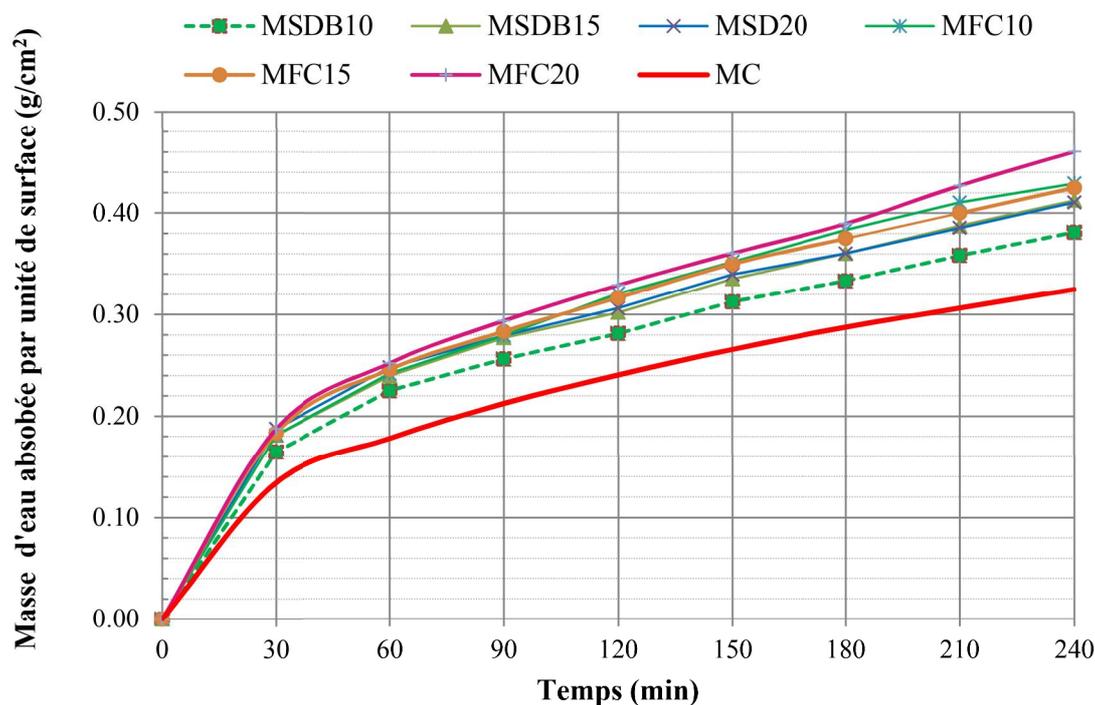
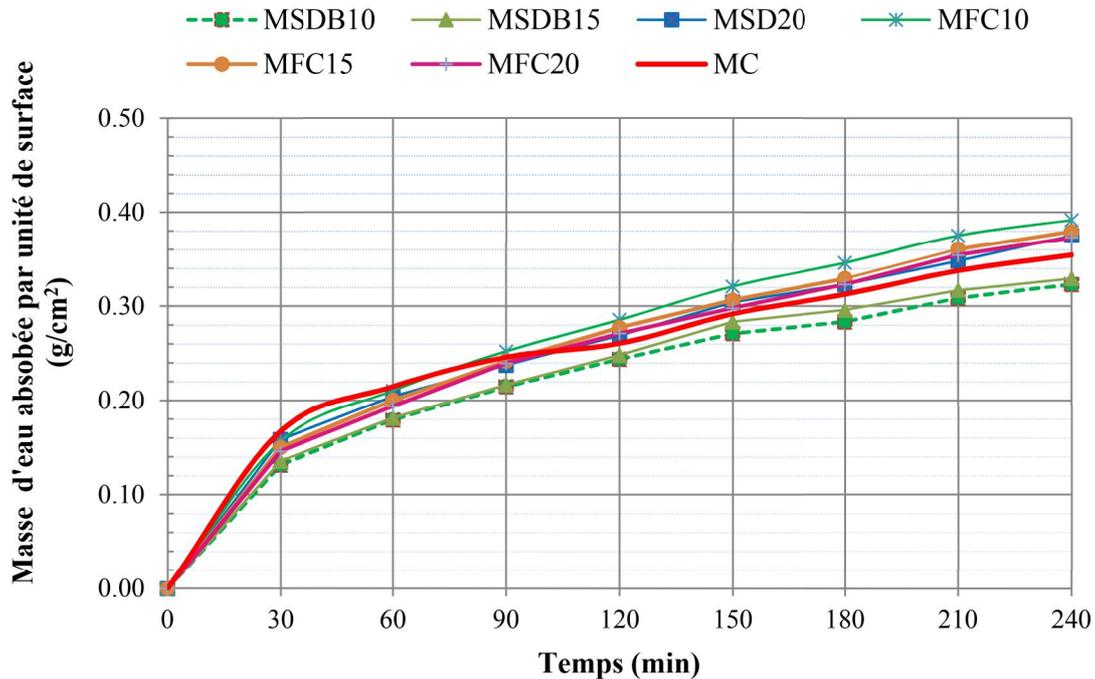


Figure III.5: Évolution de la masse absorbée par unité de surface aux cours des premières 4h (ED)

➤ **Cas N°02 :** Milieu de conservation, Eau agressive (EA)



**Figure III.6:** Évolution de la masse absorbée par unité de surface aux cours des premières 4h (EA)

D'après les deux figures des deux milieux, on remarque que l'évolution en masse absorbée est une fonction du temps, selon les courbes tracées des deux milieux de conservation, la progression en masse absorbée varie en fonction du temps à deux plages, la première plage est limitée de 0 à 30 min à une pente raide d'une progression rapide en masse absorbée, et la deuxième plage de 30 à 240 min, d'une pente douce avec une progression relativement modérée par rapport à la première;

La figure III.5, qui concerne le (ED), a démontré une faveur au profil du mortier témoin (MC) suivi directement par le MSDB10, la faiblesse dans la masse absorbée est un signe d'une structure cimentaire dense par rapport aux autres formulations.

La figure III.6, qui concerne le (EA), a démontré une faveur au profil du mortier MSDB10, sous l'effet bénéfique de l'ajout SDB, dans un milieu agressif.

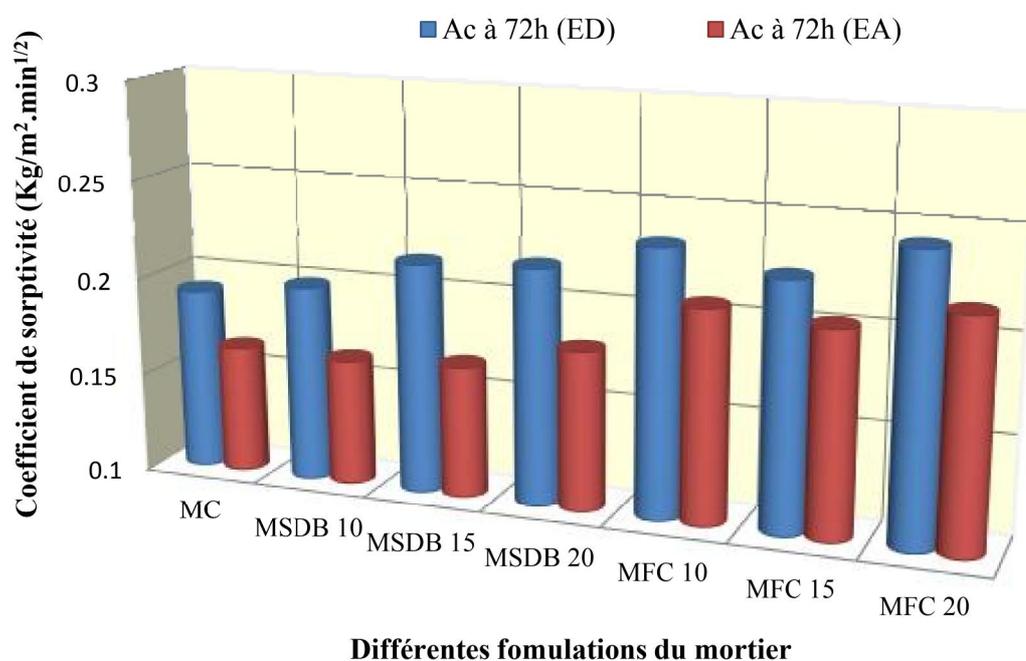
#### III.4.4.2 : Coefficient de sorptivité à 72h :

Le coefficient de sorptivité à 72h, a été effectué pour toutes les formulations du mortier réalisées, sur des éprouvettes d'un âge de 28 jours, et pour les deux milieux de conservation (eau douce et eau agressive).

**Tableau III.5 :** Récapitulatif des résultats des coefficients de sorptivité à 72h :

| Différentes formulations | Coefficient de sorptivité à 72h ( $\text{Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ ) |             |
|--------------------------|--|-------------|
|                          | Milieu (ED)  | Milieu (EA) |
| MC                       | 0.192  | 0.164       |
| MSDB 10                  | 0.199  | 0.163       |
| MSDB 15                  | 0.216  | 0.166       |
| MSDB 20                  | 0.219  | 0.180       |
| MFC 10                   | 0.234  | 0.207       |
| MFC 15                   | 0.224  | 0.203       |
| MFC 20                   | 0.243  | 0.215       |

La représentation graphique de la variation du coefficient de sorptivité en fonction de la formulation appliquée, est illustrée dans la figure III.7



**Figure III.7:** Variation du coefficient de sorptivité à 72 h, en fonction de la formulation du mortier (L'âge des éprouvettes soumises à l'essai, 28 jours)

Les résultats des mesures du coefficient de sorptivité qui sont représentés dans la figure III.7, montrent que le mortier MC, et le mortier MSDB 10, ont donné le meilleur coefficient de sorptivité à 72h;

On se basant sur l'historique des résultats des additions FC, on trouve que toutes les recherches expérimentales à annoncer l'importance de l'ajout de filler calcaire dans la diminution de la taille des pores dans la matrice cimentaire, cependant de l'effet tardif de ce type de filler inerte, on a obtenu dans notre cas un coefficient de sorptivité relativement élevé pour les mortiers MFC en comparaison avec le mortier MC et les mortiers MSDB [KHU 17].

Une comparaison globale entre les valeurs des deux milieux, montre que le coefficient de sorptivité dans l'eau agressive est davantage que dans l'eau douce, l'explication de ce phénomène, c'est que la saturation des éprouvettes conservées dans l'eau de la nappe trop chargée par des résidus secs, peut aider à remplir certains vides de ces éprouvettes, et par conséquent diminuer l'absorption capillaire (sorptivité).

#### III.4.4.3 : Évolution du coefficient de sorptivité en fonction du temps :

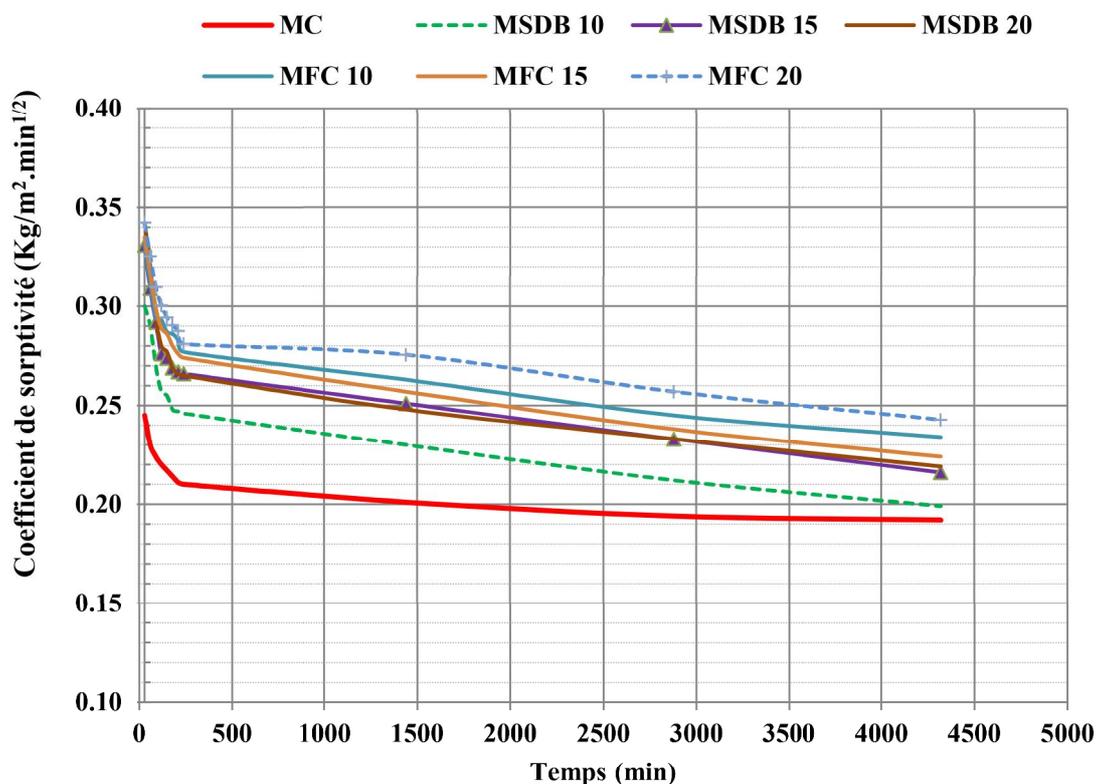


Figure III.8 : Dégressivité du coefficient de sorptivité en fonction du temps (ED)

La figure III.8, a montré la diminution du coefficient de sorptivité, en fonction du temps. Cette tendance existe quel que soit le type du mortier testé. [DEB 12]

Les sept (7) courbes représentées de toutes les formulations testées en (ED), ont montrées que la diminution en coefficient de sorptivité, est plus appréciable à une lape du temps limitée de 30 à 240 min, après cet intervalle du temps, la dégressivité en coefficient sorptivité est régulière et de faible pente.

### III.4.5 Résultats des essais mécaniques :

#### III.4.5.1 Résistance à la flexion:

**Tableau III.6:** Récapitulatif des résultats de la résistance à la flexion des différentes formulations.

| Différentes formulations | Résistance à la flexion (MPa) |      |      |             |      |      |
|--------------------------|-------------------------------|------|------|-------------|------|------|
|                          | Milieu (ED)                   |      |      | Milieu (EA) |      |      |
|                          | 7j                            | 28j  | 90j  | 7j          | 28j  | 90j  |
| MC                       | 5.34                          | 6.23 | 7.72 | 5.07        | 6.03 | 5.86 |
| MSDB 10                  | 5.41                          | 6.47 | 7.89 | 5.25        | 5.89 | 5.79 |
| MSDB 15                  | 5.18                          | 5.89 | 8.24 | 5.15        | 5.94 | 6.08 |
| MSDB 20                  | 4.95                          | 6.64 | 6.41 | 4.69        | 6.01 | 5.62 |
| MFC 10                   | 5.02                          | 6.73 | 7.24 | 4.76        | 6.13 | 6.02 |
| MFC 15                   | 5.19                          | 6.52 | 7.52 | 4.95        | 6.05 | 5.66 |
| MFC 20                   | 4.65                          | 5.93 | 6.88 | 4.47        | 5.73 | 5.34 |

#### a) Analyses des résultats de la résistance à la flexion :

Dans cette rubrique, on va analyser l'influence des ajouts utilisés, il s'agit du sable de dune broyé (SDB) et les fillers calcaire (FC) sur la résistance à flexion, en tenant compte des milieux de conservation, eau douce (ED) et eau agressive (EA), donc on a deux comparaisons, et chaque comparaison comprend aussi deux cas :

**1<sup>er</sup> cas :** Comparaison du mortier témoin MC avec les mortiers MSDB

**2<sup>ème</sup> cas :** Comparaison du mortier témoin MC avec les mortiers MFC.

Cette méthode a été suivie pour la simplification des lectures ainsi que d'éviter le chevauchement des courbes.

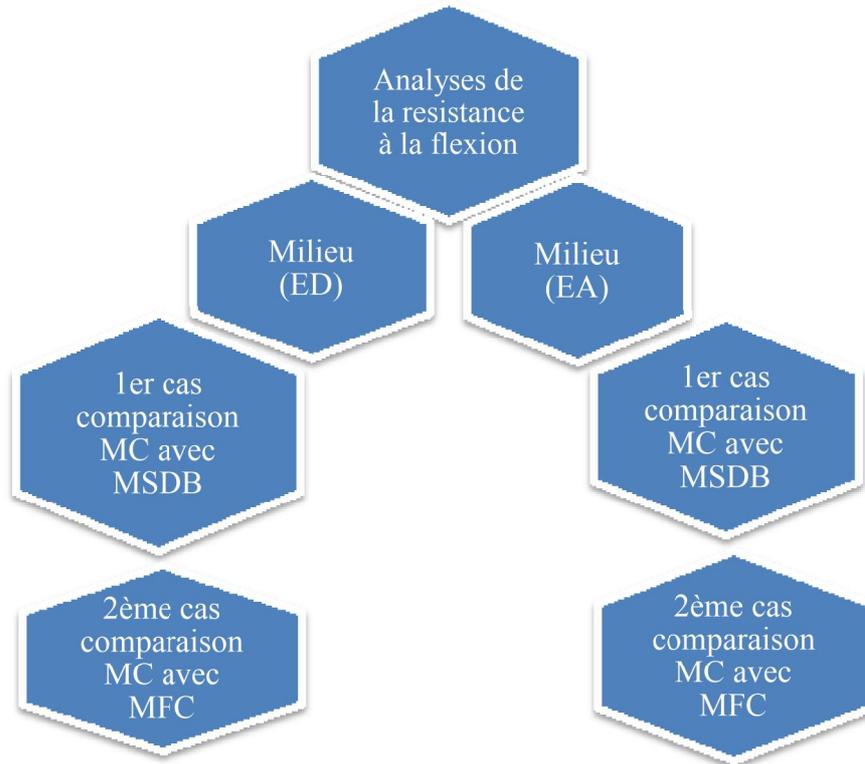


Figure III.9 : Représentation de la méthode suivie en analyses des résultats des essais mécaniques

**b) Comparaison du mortier MC avec des mortiers MSDB et MFC en (ED) :**

- Cas N°01 Mortier MC avec mortiers MSDB en (ED) :

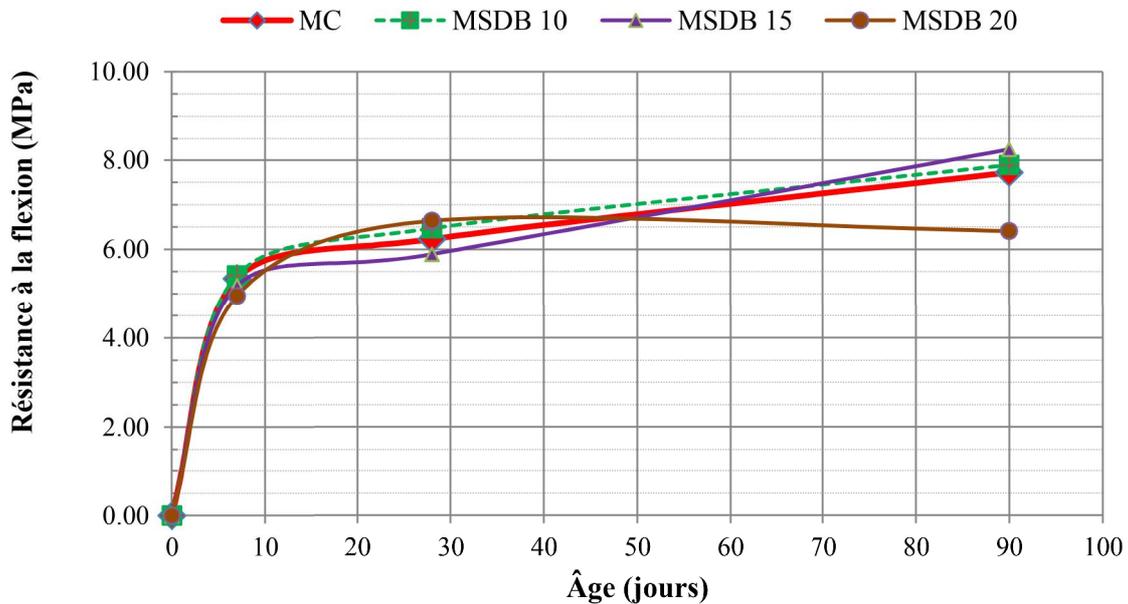


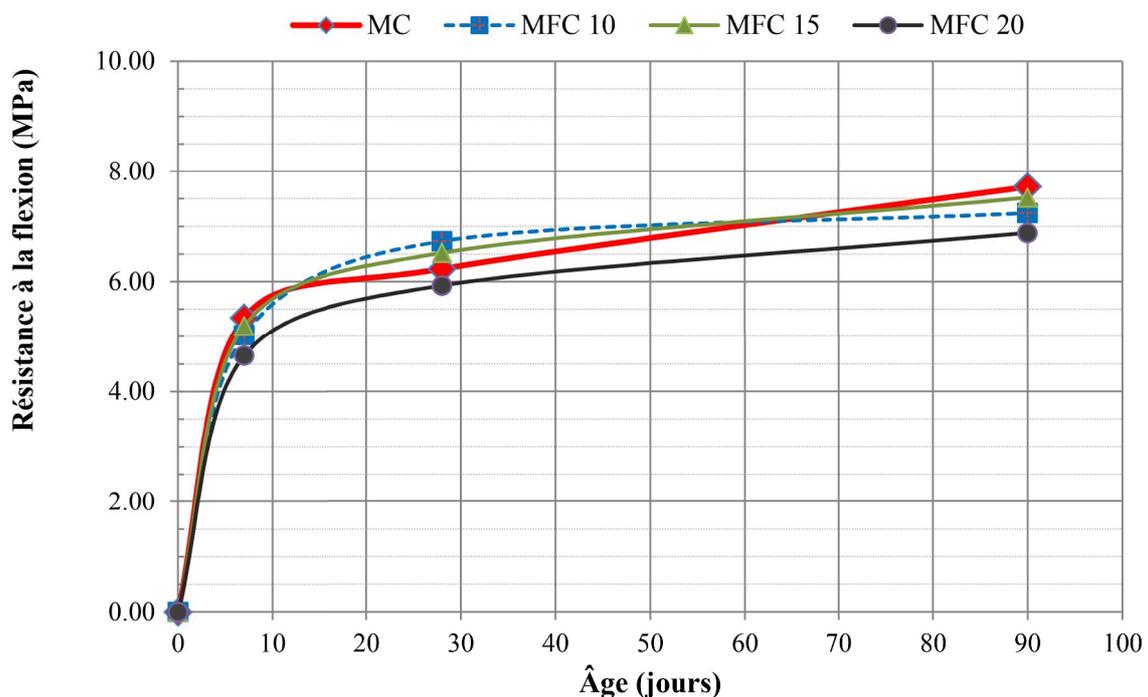
Figure III.10: Évolution de la résistance à la flexion, en fonction de l'âge du mortier en ED (Comparaison entre mortier témoin (MC) et mortiers MSBD)

Cette figure démontre, qu'à partir de l'âge de 7 jours jusqu'aux 90 jours, le mortier MC, développe conjointement avec le mortier MSDB10, une meilleure résistance à la flexion;

Ce qui a été confirmé par Mechti et al (2013) [MECH 13], dans leur étude sur l'effet du sable de dunes broyé sur la résistance mécanique. En effet, le gain en résistance à la flexion, pour le MSDB10 par rapport au mortier MC à l'âge de 7 jours est de l'ordre de 1.31%, et à 28 jours on atteignant un gain de 3.85% ;

À l'âge 90 jours, grâce au développement de certaines propriétés physico-chimique des fines SBD dans la matrice cimentaire, le MSDB15 prend un gain en résistance de 6.74% par rapport au MC.

- **Cas N°02 Mortier MC avec mortiers MFC en (ED):**



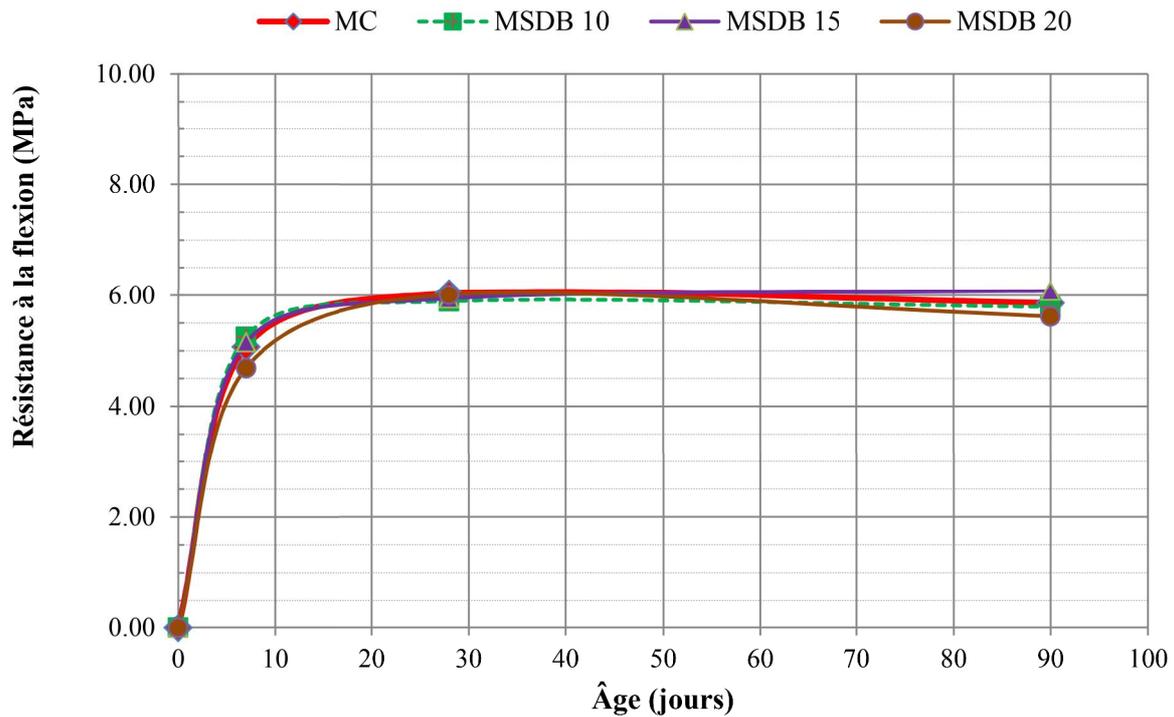
**Figure III.11:** Évolution de la résistance à la flexion, en fonction de l'âge du mortier en ED  
(Comparaison entre mortier témoin (MC) et mortiers MFC)

Selon les résultats récapitulés graphiquement (figure III.11), on remarque que le mortier MC, presque comme le cas précédent a développé rapidement sa résistance à la flexion à cause du processus rapide d'hydratation, au cours du temps et à l'âge de 28 jours, le mortier MFC à enregistrer une progression sous l'effet des ajouts FC, ce qui conduit à un gain en résistance à la flexion de 8.03% pour le MFC10, ces résultats sont en accord avec les études de Logbi (2019) [LOG 19] et Senhadji 2015 [SEN 15]. En continuant la conservation jusqu'à l'âge de 90 jours, le MFC15 atteint une résistance presque équivalente au mortier MC.

**c) Comparaison du mortier MC avec des mortiers MSDB et MFC en (EA) :**

Comme pour l'eau douce le même travail a été reproduit sur les éprouvettes conservées en eau agressive (EA). On a suit la même méthodologie, 1<sup>er</sup> cas MC/MSDB et 2<sup>ème</sup> cas MC/MFC, cette comparaison est dont l'objet d'apprécier l'effet des additions inertes sur la durabilité.

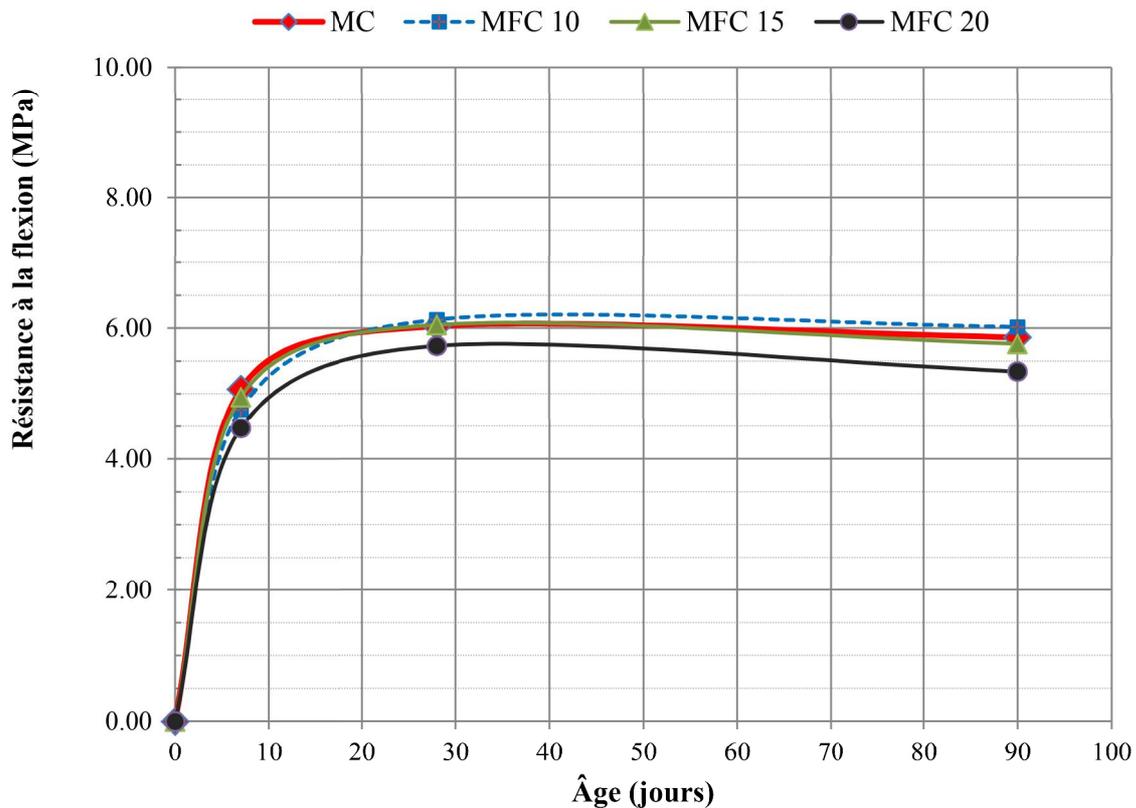
- **Cas N°01 Mortier MC avec mortiers MSDB en (EA):**



**Figure III.12:** Évolution de la résistance à la flexion, en fonction de l'âge du mortier en EA  
(Comparaison entre mortier témoin (MC) et mortiers MSBD)

Dans ce cas, il s'agit de la conservation en milieu de l'eau agressive (EA), à l'âge de 7 jours le mortier témoin (MC) a développé conjointement avec le mortier MSDB10 les meilleurs résultats, avec un gain de 3.55% pour le MSDB10, on continuant la conservation en (EA) jusqu'aux 90 jours, on constate qu'il y a une légère chute en résistance à la flexion sous l'effet de l'agressivité des eaux de la nappe, à l'exception de le MSDB15, qui progresse légèrement sa résistance avec un gain de 3.75%, par rapport au mortier MC, grâce à l'effet bénéfique de l'ajout SDB.

- Cas N°02 Mortier MC avec mortiers MFC en (EA):



**Figure III.13:** Évolution de la résistance à la flexion, en fonction de l'âge du mortier en EA  
(Comparaison entre mortier témoin (MC) et mortiers MFC)

Le deuxième cas qui concerne, un comparatif entre le mortier MC et les mortiers MFC en eau agressive (EA), on trouve qu'à l'âge de 7 jours, le mortier MC développe le meilleur résultat de la résistance à la flexion, et à l'âge de 28 jours le MFC10 prend un gain de 1.66%, grâce à l'effet des additions FC.

La continuité de la conservation jusqu'aux 90 jours a apporté un gain de 2.76% pour le MFC10, et influée négativement sur les mortiers MFC15 et MFC20 par une légère chute en résistance à la flexion.

### III.4.5.2 Résistance à la compression :

Tableau III.7: Récapitulatif des résultats de la résistance à la compression des différentes formulations.

| Différentes formulations | Résistance à la compression (MPa) |       |       |             |       |       |
|--------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
|                          | Milieu (ED)                       |       |       | Milieu (EA) |       |       |
|                          | 7j                                | 28j   | 90j   | 7j          | 28j   | 90j   |
| MC                       | 27.10                             | 37.25 | 42.06 | 26.11       | 35.42 | 31.27 |
| MSDB 10                  | 23.87                             | 33.22 | 44.31 | 22.72       | 31.56 | 32.76 |
| MSDB 15                  | 20.45                             | 30.76 | 35.94 | 18.87       | 29.24 | 29.54 |
| MSDB 20                  | 21.58                             | 29.14 | 33.88 | 20.29       | 28.16 | 25.41 |
| MFC 10                   | 24.59                             | 35.87 | 44.75 | 23.38       | 33.89 | 32.92 |
| MFC 15                   | 28.22                             | 35.39 | 39.13 | 25.73       | 32.64 | 31.21 |
| MFC 20                   | 22.29                             | 34.87 | 39.81 | 20.34       | 32.19 | 30.09 |

a) Comparaison du mortier (MC) avec des mortiers MSDB et MFC en (ED) :

- Cas N°01 Mortier MC avec des mortiers MSDB en (ED) :

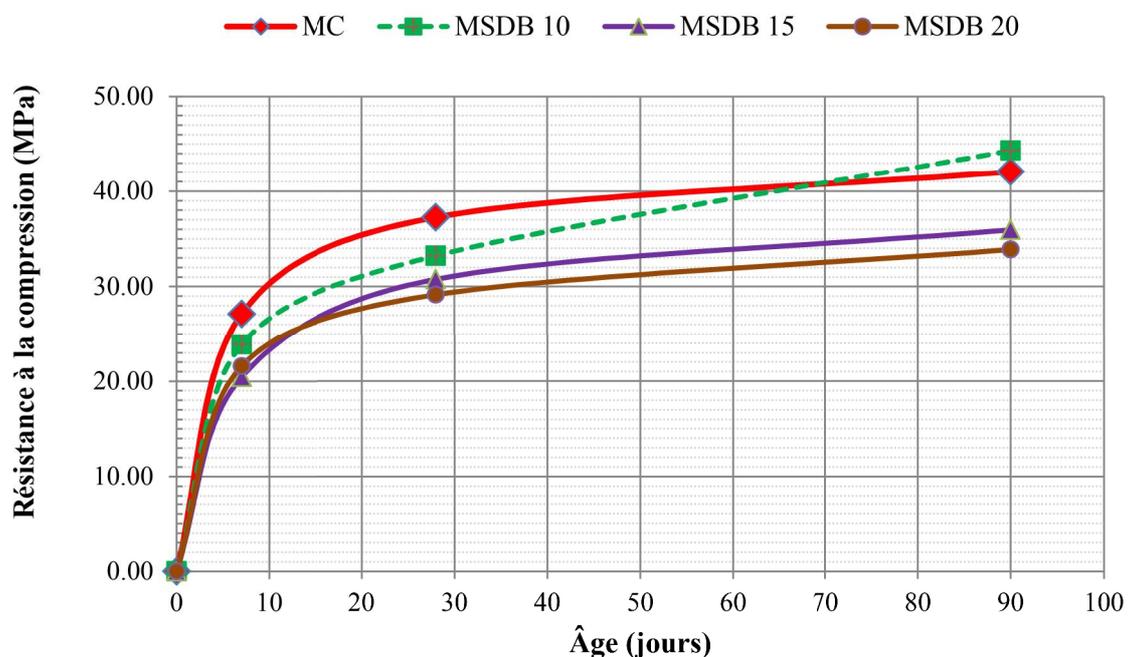


Figure III.14: Évolution de la résistance à la compression, en fonction de l'âge du mortier en ED (Comparaison entre mortier témoin (MC) et mortiers MSBD)

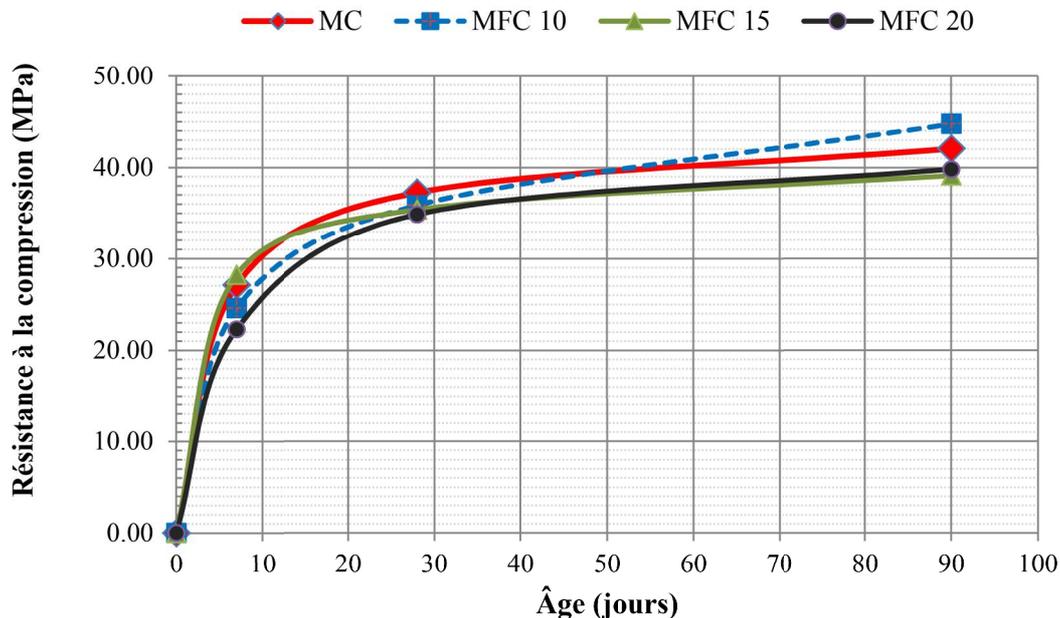
D'après la figure III.14, on remarque qu'il y a une progression de la résistance à la compression avec l'âge de conservation des mortiers, quel que soit le type de formulation appliquée.

Ceci peut s'expliquer par le développement du phénomène d'hydratation de la matrice cimentaire en fonction du temps en présence d'humidité suffisante.

On constate d'après ces résultats que le mortier témoin (MC) a développé la meilleure résistance au jeune âge de 7 jours jusqu'aux 28 jours, grâce un processus d'hydratation rapide de clinker, cet écart commence à se réduire au cours du temps par le MSDB10 sous l'effet chimique, particulièrement, pouzzolanique, du sable de dunes broyé, ensuite, la cinétique de la réaction d'hydratation du ciment et de la réaction du sable de dune broyé avec la portlandite en fonction du temps [GUT 11], et un rôle physique qui se manifeste par l'effet de remplissage des fines sableuses; par conséquent un squelette plus dense et plus résistant [LOG 19].

Ce qui apporté à l'âge de 90 jours, un gain en résistance à la compression de 5.35% par rapport au mortier témoin (MC).

- **Cas N°02 Mortier MC avec des mortiers MFC en (ED) :**



**Figure III.15** Évolution de la résistance à la compression, en fonction de l'âge du mortier en ED  
(Comparaison entre mortier témoin (MC) et mortiers MFC)

En plus de la progression de la résistance à la compression pour toutes les formulations testées, on note qu'il y a un gain apporté par le MFC10 à 7 jours de l'ordre de 4.13%, cela se traduit par l'accélération de l'hydratation des  $C_3S$  en présence des particules de calcaire

d'une part et à la réaction qui se produit entre les  $C_3A$  du ciment portland (CEMI) et les particules de calcaire formant ainsi des carboaluminates de calcium hydratés qui se précipitent dans les pores d'autre part [LOG 19].

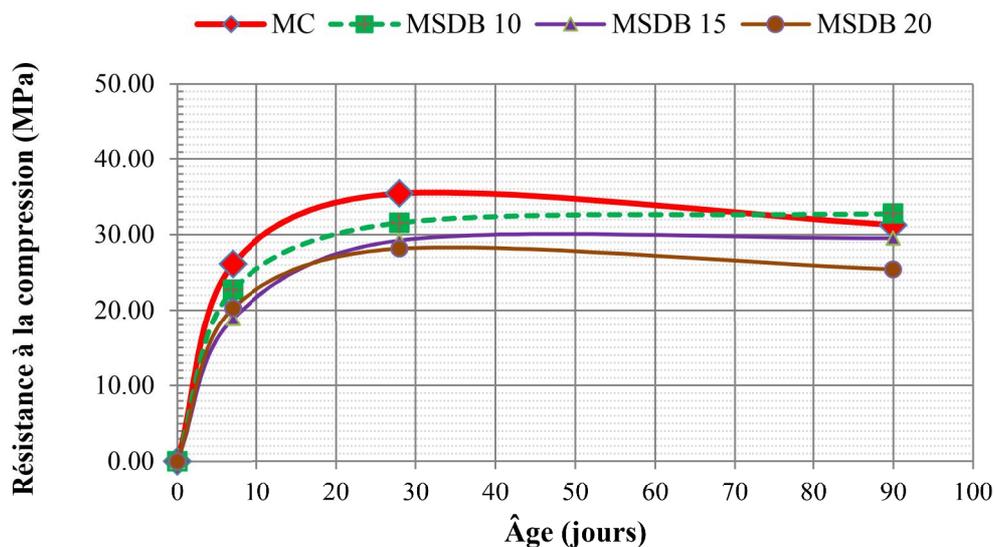
Ce gain a été accru à 6.40%, à l'âge de 90 jours, sous l'effet positif des FC, on comparant toujours avec le mortier témoin (MC).

Les résultats trouvés, ont montrés que la valeur optimale de l'ajout FC, est celle de 10%, avec des taux d'incorporations supérieurs à cette valeur, on remarque une légère chute en résistance à la compression par rapport au mortier témoin (MC)

#### b) Comparaison du mortier (MC) avec des mortiers MSDB et MFC en (EA) :

Afin de suivre le comportement mécanique et la durabilité des mortiers confectionnés, nous avons testé, les éprouvettes de diverses formulations réalisées et conservées dans l'eau de la nappe de la zone de Chott (EA), dont le but d'apprécier l'effet des additions minérales inertes SDB et FC sur le mortier en milieu agressif, tout en comparant avec un mortier témoin.

##### • Cas N°01 Mortier MC avec des mortiers MSDB en (EA) :

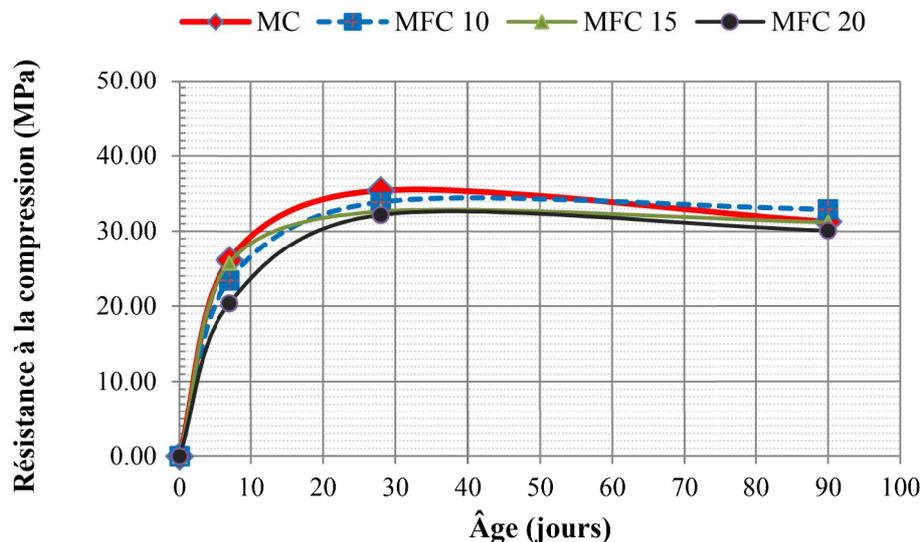


**Figure III.16:** Évolution de la résistance à la compression, en fonction de l'âge du mortier en EA  
(Comparaison entre mortier témoin (MC) et mortiers MSDB)

La figure III.16, montre que l'influence de l'eau agressive (EA) sur le mortier MC et les mortiers MSDB, a commencé d'apparaître après les premiers 28 jours, mais si on comparant avec le même cas de l'eau douce (ED) on trouve qu'il y a une légère diminution dans les résistances à la compression même dans la période de 7 à 28 jours, cela se traduit par le degré d'agressivité de l'eau de la nappe (EA) utilisée, qui est classée à un milieu moyennement agressif, selon les résultats d'analyses (Paragraphe II.2.5.e).

L'important à expliquer dans cette figure, est la stabilité de la courbe de mortier MSDB10, avec une légère progression en résistance grâce à l'effet positif des additions SDB, le gain apporté est de 4.76% par rapport au mortier témoin MC.

- **Cas N°02 Mortier MC avec des mortiers MFC en (EA) :**



**Figure III.17:** Évolution de la résistance à la compression, en fonction de l'âge du mortier en EA  
(Comparaison entre mortier témoin (MC) et mortiers MFC)

On comparant les résultats de la figure III.17, des mortiers MC et MFC, conservés dans l'eau agressive (EA), avec les mêmes formulations dans le cas de l'eau douce (ED), on trouve qu'il y a une diminution en résistance à la compression relative à l'âge du mortier, dans la plage d'âge de 7 à 28 jours, la diminution est limitée à un écart de 3.7 à 9.6%, et à partir de 90 jours l'écart de la diminution est accru à 21.7% par rapport aux résistances trouvées en milieu de l'eau douce (ED).

Toutes fois, il est à rappeler que malgré la diminution des résistances en milieu agressif, l'incorporation d'une valeur optimale de 10% de fine FC à un effet bénéfique sur la résistance, nous a permis d'apporter à l'âge de 90 jours, un gain de 5.28% pour le mortier MFC10, par rapport au mortier témoin MC du même milieu.

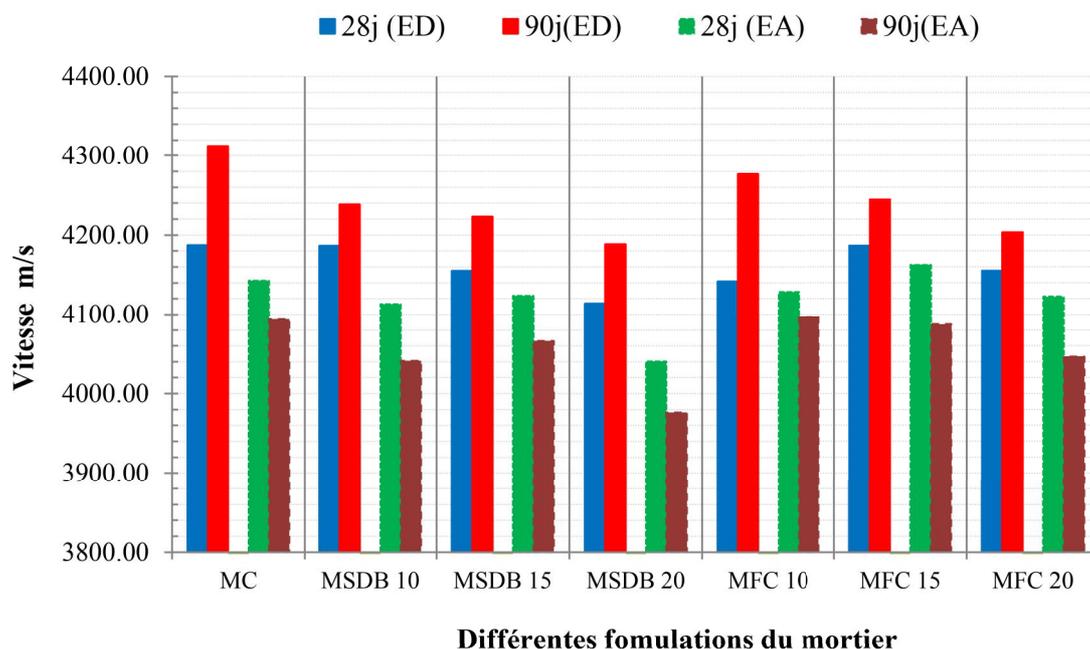
### III.4.6 Résultats d'auscultation ultrasonique :

La méthode de mesure et la formule de calcul de la vitesse conventionnelle de propagation des ondes ultrasoniques, ainsi les classifications qualitatives, sont décrites dans le paragraphe (II.3.10)

**Tableau III.8:** Récapitulatif des résultats de l'auscultation ultrasonique.

| Différentes formulations | Auscultation ultrasonique (m/s) |        |             |        |
|--------------------------|---------------------------------|--------|-------------|--------|
|                          | Milieu (ED)                     |        | Milieu (EA) |        |
|                          | 28j                             | 90j    | 28j         | 90j    |
| MC                       | 4187.3                          | 4312.7 | 4142.7      | 4093.4 |
| MSDB 10                  | 4186.7                          | 4238.7 | 4113.1      | 4041.2 |
| MSDB 15                  | 4155.1                          | 4223.1 | 4123.7      | 4066.1 |
| MSDB 20                  | 4114.2                          | 4188.5 | 4040.4      | 3976.1 |
| MFC 10                   | 4141.7                          | 4276.7 | 4128.4      | 4096.6 |
| MFC 15                   | 4186.5                          | 4244.5 | 4162.5      | 4086.9 |
| MFC 20                   | 4155.1                          | 4203.4 | 4122.5      | 4046.3 |

Les résultats de l'auscultation ultrasonique de diverses formulations, sont représentés d'une manière simplifiée à la figure III.18

**Figure III.18:** Évolution de la vitesse des ondes ultrasoniques, en fonction de la formulation du mortier

Les tests réalisés sur les différentes formulations, ont montrés qu'à l'âge de 28 jours en milieu (ED), le MSDB10 conjointement avec le MFC15, ont développés presque les mêmes résultats que le mortier MC; et à l'âge de 90 jours dans le même milieu (ED), le MSDB10 et le MFC15, ont développés des résultats très proches au mortier témoin MC; c'est une indication sur les valeurs optimisées des additions utilisées.

Pour les mortiers conservés dans l'eau douce (ED), les résultats sont très rapprochés de bonne appréciation de point de vue classification qualitative, d'une vitesse de propagation varie de 4155.1 à 4312.7 m/s, avec un taux d'amélioration à l'âge de 90 jours atteignant le 3.26% pour le MFC10 ; Cela est dû à l'effet performant des additions sur la compacité des mortiers.

Pour les mortiers conservés dans l'eau agressif (EA), les résultats sont aussi très rapprochés de bonne appréciation de point de vue classification qualitative, d'une vitesse de propagation varie de 3976.1 à 4162.5 m/s,

La diminution maximale entre les résultats des deux milieux à l'âge de 90 jours, coïncide avec le MC à un taux de 5.35%.

Le faible écart entre les résultats du milieu (ED) et le milieu (EA), est dû au degré d'agressivité de l'eau de la nappe de la zone de Chott/El-Oued, qui a été classée, moyennement agressif, selon les résultats d'analyses obtenus (Paragraphe II.2.5.e).

D'après les résultats obtenus de l'auscultation ultrasonique en deux milieux, et la classification qualitative, on peut classer les mortiers des différentes formulations préparées de la manière suivante:

Pour les résultats trouvés dans la fourchette de 3700 à 4200 m/s, béton à haute résistance.

Pour les résultats qui sont supérieurs ou égaux à 4200 m/s, béton à très haute résistance.

### III.5 Conclusion :

Enfin de ce chapitre, qui synthétise tous les résultats trouvés lors de la phase expérimentale, ainsi que leurs analyses et interprétations; il est très utile de signaler l'importance de ces analyses pour mieux comprendre notre sujet d'une manière approfondie; et exceptionnellement l'utilité et l'effet des additions minérales utilisées il s'agit du sable de dune broyé (SDB)/El-Oued, et les fillers calcaires (FC)/Ain Touta, sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers étudiés, ainsi que sur la durabilité vis-à-vis aux milieux agressifs;

On conclure sur ce chapitre, que l'incorporation des additions minérales, avec un taux optimisé à un effet bénéfique sur les caractéristiques mécaniques (résistance mécanique), et physique sous l'effet de remplissage (matrice dense) étanche contre les attaques chimiques; présentent aussi un bon alternatif économique et écologique.

D'après les résultats obtenus, on a remarqué que la valeur optimale en majorité des essais réalisés, est au voisinage de 10% que ce soit pour le sable de dune broyé (SDB) ou le filler calcaire (FC).

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**

## Conclusion générale

À la lumière de ce travail consacré à l'étude des effets des additions minérales, il s'agit du sable de dune broyé de la région d'El-Oued, et le filler calcaire de la région d'Ain Touta/Batna, sur les caractéristiques du mortier, on vu de l'augmentation de la compacité des squelettes cimentaires et l'amélioration des mécanismes d'hydratation contribuent à l'amélioration des performances mécaniques et chimiques des mortiers.

Les additions minérales utilisées sont incorporées en substitution au poids du ciment, avec un taux variable de 10% - 15% et 20%, ces taux sont appliqués pour les deux cas d'addition, en tenant compte aussi les deux milieux de cure il s'agit de l'eau de robinet (douce) et l'eau de la nappe de la zone de Chott/El-Oued (agressive)

À partir des résultats trouvés lors de cette étude on peut conclure ce que suit :

- L'influence directe de la finesse par SSB des fines sur la masse volumique, l'augmentation de la finesse diminuée la masse volumique apparente des fines, sous forme d'une relation presque linéaire.
- La maniabilité des mortiers frais, est influencée par la nature de fine utilisée et leur surface spécifique; selon les valeurs obtenues, l'augmentation de la SSB, diminue la consistance de toutes les gâchées testées des différentes formulations, à chaque fois qu'on utilise des fines à SSB élevée la consistance diminuée, à titre d'exemple le taux de diminution entre le MC et le MSDB20 est de l'ordre de 4.08%, cependant et avec l'augmentation de la SSB de FC, l'écart de la diminution entre le MC et le MFC20, atteint un taux de 8.51%.
- Les masses volumiques des mortiers testés, ont montrées que le passage de l'état saturé à l'état sec est d'un rapport varie de 7.15 à 8.00% en (ED) et 7.19 à 7.79% en (EA), avec un avantage en compacité pour le mortier témoin (MC) suivi par le mortier MFC10 puis le MSDB10, ces résultats montrent que la valeur optimale des deux ajouts est de l'ordre de 10%.
- Le rapport de la diminution de la masse volumique d'un état saturé à un état sec, donne une indication directe sur le taux saturation des éprouvettes, donc est une confirmation de plus de l'essai d'immersion totale.

- Les résultats des essais d'immersion totale, ont montrés clairement, qu'il y a une amélioration en compacité des mortiers préparés à base de SDB et FC, à l'âge de 90 jours; On remarque que malgré l'avantage enregistré au profil du mortier MC à l'âge de 28 jours, mais avec la conservation jusqu'à l'âge de 90 jours et grâce à l'effet chimique (pouzzolanique) et l'effet physique (remplissage), le MSDB10 conjointement avec le MSDB15, nous ont donnés les meilleurs résultats.
- L'absorption par sorptivité est un autre facteur, à l'indication de l'efficacité des ajouts pour l'amélioration des performances du mortier confectionné, à l'âge de 28 jours le MSDB10 a développé un coefficient très proche à celle du MC, signifiant que la valeur optimisé en SDB est de l'ordre de 10%.
- Les résultats de la résistance à la flexion, ont montrés l'effet positif des ajouts et exceptionnellement le SDB, à l'âge de 7 jours le mortier MC, développe conjointement avec le mortier MSDB10 des résistances variant de 5.34 à 5.41 MPa, avec un gain au profil de MSDB10 de 1.31%; au cours du temps et à l'âge de 90 jours, grâce au développement de certaines propriétés physico-chimique des ajouts utilisés, le MSDB15, prend un gain en résistance à la flexion de 6.74%, aussi une résistance équivalente au MC pour le MFC15.
- L'effet des ajouts, est bien apprécié aussi en termes de durabilité, à l'âge de 90 jours le mortier MSDB15, qui a été conservé en eau agressive (EA), a apporté un gain en résistance de 3.75%, aussi un gain de 2.76% pour le mortier MFC10, on comparaison avec le MC.
- En résistance à la compression, et dans l'intervalle d'âge de 7 à 28 jours, grâce un processus d'hydratation rapide de clinker, le MC développe une meilleure résistance avec un écart de 3.84 à 12.13%, cet écart commence à se réduire au cours du temps par le MSDB10 et le MFC10, sous l'effet physico-chimique des deux ajouts, ce qui apporté à l'âge de 90 jours, un gain en résistance à la compression de 5.35% pour le mortier MSDB10 et un gain de 6.40% pour le MFC10.
- En termes de durabilité, à l'âge de 90 jours, on note que malgré la diminution relative des résultats en milieu agressive (EA) par rapport aux résultats du milieu (ED), toutefois et grâce à l'effet bénéfique des ajouts utilisés, particulièrement physique, (remplissage) et par conséquent matrice compacte, ce qui apporté un gain pour les valeurs optimales qui concerne le MSDB10 avec un gain de 4.76%, et le MFC10 à un gain de 5.28%, par rapport au mortier MC du même milieu (EA).

- Les résultats de l'auscultation ultrasonique ont confirmés les autres résultats obtenus en différentes phases, le rapprochement des résultats est le signe le plus apprécié; Les résultats obtenus par l'auscultation ultrasonique sont généralement de bonne appréciation de point de vue classification, l'effet positif des ajouts est apparait à l'âge de 90 jours par une amélioration pour le MFC10 à un taux de 3.26%; D'un côté durabilité, à l'âge de 90 jours, la diminution des résultats en milieu (EA) par rapport au milieu (ED), est relativement faible, d'un taux maximum de 5.35%, enregistré pour le cas du MC; Le faible écart entre les résultats des deux milieux, est dû au degré d'agressivité de milieu de conservation, pour notre cas, on est dans un milieu moyennement agressif.

### **Perspectives et recommandations :**

À la lumière des conclusions rapportées, nous recommandons quelques perspectives :

- L'utilisation du sable de dune broyé (SBD), à un taux d'incorporation de 10% en substitution au poids ciment, est très bénéfique que ce soit de point de vue performances ou d'un côté économie écologique, c'est une valorisation des matériaux locaux, il peut présenter un bon alternatif comme ajout minéral à la place des fines calcaires.
- L'ajout des fillers calcaires (FC), à un taux optimisé de 10%, est très utile en question des matériaux durables.

**RÉFÉRENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [APS 18] APS, cite officiel de l'Algérie Presse Service « Ciment: le Groupe GICA réalise sa première opération d'exportation vers l'Europe », <http://www.aps.dz/economie>, 2018
- [BAR 92] BARON J. « Introduction à la durabilité des bétons » La durabilité des bétons, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1992.
- [BAJ 16] BAJJA Zineb «Influence de la microstructure sur le transport diffusif des pâtes, mortiers et bétons à base de CEM I avec ajout de fumée de silice», thèse de doctorat, école normale supérieure Paris-Saclay, 2016.
- [BIT 16] BITAR Zeyneb, « Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux (calcaire) sur le comportement mécanique du mortier » Université de M'SILA, 2016.
- [BEL 14] BELHOCINE Aida et NAGOUDI Nadjat «Étude expérimentale d'un mortier avec ajouts Minéraux» Mémoire de master Université KASDI Merbah – Ouargla, 2014.
- [BS 1377] Norme anglaise «essai de détermination des sulfates» 1975.
- [CHA 06] CHAID R., « Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux» Thèse de doctorat d'état en génie civil ENP décembre 2006
- [CHA 64] CHAVAILLON J., Étude stratigraphique des formations quaternaires du Sahara Nord Occidental (de Colomb-Béchar à Reggane). Edition du CNRS, Paris 1964
- [CYR 09] CYRIL Guérandel ; « Étude de la qualité du piégeage des matières organiques par la matrice cimentaire vis-à-vis de la lixiviation », THESE de Doctorat en Chimie analytique, l'Université Paul Verlaine – Metz, 2009
- [DAD 19] DAD Celia, «Étude comparative de l'utilisation du sable de dune en substitution du sable de rivière : cas des mortiers normalisés», Mémoire de master Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2019.
- [DAM 95] DAMIDOT D., GLASSER F.P., Investigation of the CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system at 25°C by thermodynamic calculations, Cem. and Conc. Res, (1995).

[DEB 12] DEBOUCHA Walid, BELAGRAA Larbi, BOUZID Aberrazak, OUDJIT Mohamed Nadjib L'effet des fillers de calcaire sur les propriétés physico-chimiques du mortier à base de CRS, Toulouse, France, 2012.

[DRE 98] DREUX .G & J. Festa: «Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8ème Edition.Eyrolles. Mai 1998.

[DUP 95] DUPAIN .R, R. Lanchon & J.C. Saint – Arroman : «Granulats, sols, ciments et Bétons: Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire». Edition Casteilla. 1995.

[DUP 09] DUPAIN R, Saint-Arroman J-C, Lanchon R , « Granulats, sols, ciments et bétons: Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire », Edition Casteilla, 4<sup>e</sup> édition, 2009.

[EUR 01] European Committee for Standardization, EN-197-1, Cement. Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements,2001

[ESC 88] ESCADEILLAS G, Les ciments aux filler calcaires: contribution à leur optimisation par l'étude des propriétés mécaniques et physiques des bétons fillérisés Thèse de doctorat Université Paul Sabatier de Toulouse, 1988.

[GIC 18] Le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie, revue 2018.

[GUE 02] GUERNOUTI Y, « Effet des ajouts cimentaires ultrafines sur la durabilité et les propriétés physico-mécaniques des bétons ». Thèse de magister université M'hammed Bouguerra, Boumerdes, 2002.

[GUI 07] GUIMER Tarek, Contribution de l'addition minérale sur les caractéristiques physico-mécaniques des liants et mortiers, mémoire de magister université Mohammed Kheider - Biskra, 2007

[GUT 11] Guettala S., Mezghiche B. «Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder» , Construction and Building Materials 25, (2011).

[HOU 13] HOUZE Clément « Étude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silico manganèse», Thèse de doctorat, École Doctorale: Sciences, Ingénierie et Environnement, Paris –Est, 2013

[KED 17] KEDDAM Lydia «Caractérisation expérimentale des mortiers à base de poudre de marbre» mémoire master, Tizi-Ouzou, université Mouloud Mammeri, 2017.

[KHU 17] KHUDHAIR M. H.R.1, 2, M. S. Elyoubi3, A. Elharfi1 « Formulation and characterization of a new ecological cementitious material at base of different percentage of limestone fillers: Study of physical-chemical and mechanical properties», Volume 8, JMES, 2017.

[LES 49] LESLIE, J.R. and Cheesman, W.J., An ultrasonic method of studying deterioration and cracking in concrete structures, 1949.

[LOG 19] LOGBI Abdelaziz, effet des ajouts minéraux actifs et inertes sur les propriétés physiques, mécaniques et chimiques du mortier, thèse de doctorat université Kasdi Merbah Ouargla, 2019

[MAL 17] MALDJI Sid Ali, «Effet du mode d'incorporation des fillers calcaires sur les propriétés des bétons» Mémoire de Master, Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2017

[NA 442] Norme algérienne, Ciments : composition, spécification et critères de conformité des ciments courant, 2013/Journal officiel de la république algérienne N° 27.2016

[NBN B 15-215] Normes belge « Essais des bétons: absorption d'eau par immersion». Janvier 1989.

[NBN EN 1015-3] Norme belge « Consistance du mortier frais à la table à secousses » 2007.

[NBN EN 1015-10] Norme belge, Masse volumique apparente sèche du mortier durci, 1999.

[NEV 00] A. M. NEVILLE « Propriétés des bétons », traduit par le CRIB, Edition Eyrolles, 2000.

[NF EN 196-1] Norme française Détermination des résistances mécaniques, 1995 - indice de classement P15-471

[NF EN 196-3] Méthodes d'essais des ciments – Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité.1995- indice de classement P15-473

[NF EN 196-6] Norme française, Détermination de la finesse des ciments, 1996, indice de classement P15-476.

[NF EN 197-1] Norme française « Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants», 2001, indice de classement P15-101-1

[NF EN 206-1] Norme française, Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité, 2004, indice de classement P 18-325-1.

[NF EN 933-1] Norme française, Essais pour déterminer les propriétés géométriques des granulats - Partie 1: Détermination de la granularité – Analyse granulométrique par tamisage, 1997.

[NF EN 1097-3] Norme française «Essai pour détermination des caractéristiques mécaniques» Partie 3 : Détermination de la masse volumique apparente des fillers, 1999, indice de classement P18-650-3.

[NF EN 1097-7] Norme française, Essai pour détermination des caractéristiques mécaniques, partie 7 : Détermination de la masse volumique des fillers, 1999, indice de classement P18-650-7.

[NF EN 13057] Norme française Absorption d'eau par capillarité, 2002, indice de classement P18-945

[NF P15 - 433] Norme française, Détermination du retrait et du gonflement, 1994.

[NF P15 - 461] Norme française analyses chimique. Détermination des insolubles et le dosage de gaz carbonique, 1964

[NF P18-452] Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètres, 1988

[NF P18 - 540] Norme française Granulats Définitions, conformité, spécifications 1997

[NF P18 - 598] Norme française, essai d'équivalent du sable, 1991

[NF P18-418] Norme française auscultation sonique, mesure du temps de propagation des ondes sonique, 1989.

[NF P94-057] Norme française Analyse granulométrique par sédimentométrie. 1992

[NOI 00] NOIRFONTAINE M.N., «Étude structurale et cristallographie du composé majoritaire du ciment anhydre: le silicate tricalcique» thèse de doctorat, école polytechniques, 2000.

[**NOU 95**] NOUMOWE, A., «Effet de hautes températures (20-600°C) sur le béton - Cas particulier du béton à hautes performances» Thèse de Génie Civil : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et Univ. Lyon 1, 1995.

[**REG 75**] Regourd M., Hornain H. Applications de la microscopie électronique à balayage, Revue Des Matériaux de Construction, 1975

[**ROS 10**] ROSSOMME Julien, Effets de l'interaction superplastifiant-ciment- fillers calcaires sur les propriétés rhéologiques des pâtes et des mortiers. Université de Liège. 2010

[**SOR 77**] SOROKA I, Setter, The effects of filler on strength of cement mortars,-Cement and Concrete Research, 1977.

[**TAG 04**] TAGNIT et P-C NKINAMUBANZIB, Les ajouts cimentaires et le développement durable. Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 2004

[**TAF 09**] TAFRAOUI Ahmed, Contribution à la valorisation du sable de dune de l'erg occidental (Algérie). Application aux nouveaux bétons, thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2009

[**TAL 15**] TALEB Karina « Étude à l'état frais et à l'état durci de l'influence des Fines de Mortiers de Démolition sur les propriétés des Mortiers » Mémoire de Master académique option Structure et Matériaux -Génie Civil-Université Mouloud MAMMERI, 2015.

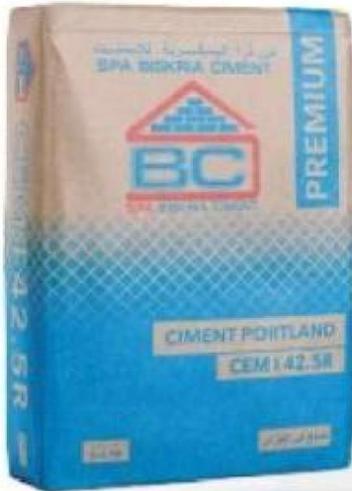
[**TAN 96**] TANG L. Chloride transport in concrete—Measurement and prediction, Diss.Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, Publication, 1996.

[**TAY 90**] TAYLOR H.F.W. Cement Chemistry, United States Edition, published by academic Press Inc., San Diego, CA 92101, 1990.

# ANNEXES



# SPA BISKRIA CIMENT



## FICHE TECHNIQUE

### CEM I 42.5R CIMENT PORTLAND

**CEM I 42.5R** Ciment portland, pour les bétons hautes performances et a une résistance rapide à court terme, destiné aux domaines où les délais de décoffrage sont courts, il est recommandé particulièrement pour le bétonnage par temps froid

#### **CEM I 42.5R :**

Conforme à la norme Algérienne (NA442-2013)

#### **👍 DOMAINES D'APPLICATION**

Un ciment pour tous vos travaux de constructions de haute résistance a jeune âge, il est aussi recommandé pour les utilisations suivantes :

- Produits en bétons qui demandent un durcissement rapide.
- Le bétonnage dans des coffrages coulissant, surtout en période hivernale.
- Béton résistant au gel en présence de sels de déverglaçage.
- Tabliers de ponts.
- Béton pompé.
- Béton projeté



## ✓ APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Béton armé à haute résistance.
- Béton autoplaçant.

## 🪣 FORMULATION CONSEILLÉE

|                       |  |   |   |   |
|-----------------------|--|---|---|---|
|                       | ciment  | Sable <br>(sec) 0/5        | Gravillons (sec) <br>0/15mm 15/25mm  | Eau <br>(litres) |
| Dosage pour béton     | 50k X1  | + X7                       | + X5  + X4  | + 25 L  |
|                       | ciment  | Sable <br>Correcteur 0/1mm | Sable (sec) <br>0/4mm  | Eau <br>(litres) |
| Mortier de briquetage | 50k X1  | + X6                       | + X9   | + 35 L  |
| Mortier de finitions  | 50k X1  | + X9                       | + X6   | + 35 L  |

## 🔍 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Remarque: un bidon = 10 litres

### Analyses chimiques (%)

|  | valeur      |
|--|-------------|
| Perte au feu                           | 2.6 - 3.7   |
| Teneur en sulfates (SO <sub>3</sub> )  | 2.2 - 2.8   |
| Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)     | 1.7 - 2.8   |
| Teneur en Chlorures (Cl <sup>-</sup> ) | 0.03 - 0.07 |

### Composition Potentielle du Clinker (Selon Bogue) (%)

|                  | valeur    |
|------------------|-----------|
| C <sub>3</sub> S | 56 - 66   |
| C <sub>2</sub> A | 5.1 - 7.2 |

### Propriétés physiques

|                         | valeur      |
|-------------------------|-------------|
| Consistance normale (%) | 25.8 - 76.4 |
| Expansion à chaud (mm)  | 0.25 - 1.0  |

### Temps de prise (min)

|                | valeur    |
|----------------|-----------|
| Début de prise | 150 - 190 |
| Fin de prise   | 220 - 250 |

### Résistance à la compression

|                | valeur      |
|----------------|-------------|
| 2 jours (MPa)  | 20 - 29     |
| 28 jours (MPa) | 42.5 - 52.5 |



SPA BISKRIA CIMENT  
Adresse : Djar Belahrache  
Branis, Biskra Algerie

Tel : +213 (0) 560 753 424  
Fax : +213 (0) 33 62 73 92  
contact@biskriaciment-dz.com  
www.biskriaciment-dz.com