

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique



UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie civil et d'Hydraulique



N° d'enregistrement : ...../...../...../.....

## THESE

En vue de l'obtention du Diplôme de

**DOCTORAT** ès sciences

Spécialité : **Génie Civil**

Sujet de thèse :

**Contribution à l'étude de la durabilité des  
bétons gâchés par des eaux épurées**

Présentée par : **DEHANE Sarra**

Soutenue publiquement par : le 02/ 12/ 2023.

Devant le jury composé de :

<b>Dr. ABANI Said</b>	Maître de Conférence A	<b>Président</b>	U.K.M. Ouargla
<b>Pr. KRIKER Abdelouahed</b>	Professeur	<b>Directeur de thèse</b>	U.K.M. Ouargla
<b>Dr. BELFERRAG Allaoua</b>	Maître de Conférence A	<b>Examineur</b>	U.K.M. Ouargla
<b>Dr. LOGBI Abdelaziz</b>	Maître de Conférence A	<b>Examineur</b>	U.E.H.L. El-Oued
<b>Dr. MILOUDI Abdelmonem</b>	Maître de Conférence A	<b>Examineur</b>	U.E.H.L. El-Oued
<b>Dr. TIOUA Tahar</b>	Maître de Conférence A	<b>Examineur</b>	C.U. Mila

# Remerciements

Tout d'abord, louanges à **Allah**, Seigneur des mondes, le Généreux, le Pourvoyeur de toutes choses, le Sage et le plus savant. Et que la prière et la paix soient sur notre maître Muhammad, le sceau des prophètes.

Je voudrais exprimer ma sincère reconnaissance envers mon directeur de thèse, le Professeur *KRIKER Abdelouahed*, de m'avoir offert l'opportunité de mener à bien ce travail de recherche, ainsi que pour ses conseils avisés et son soutien constant.

Je tiens à remercier les membres de mon jury : à Docteur *ABANI Said* d'avoir accepté de présider le jury de soutenance, ainsi qu'à Docteur *BELFERRAG Allaoua*, à Docteur *LOGBI Abdelaziz*, à Docteur *MILOUDI Abdelmonem* et à Docteur *TIOUA Tahar* qui ont bien voulu être examinateurs de ce modeste travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je souhaite aussi remercier chaleureusement tous les enseignants qui ont marqué mon parcours scolaire et universitaire, et qui ont tous, à leur manière, fait preuve de patience, de rigueur scientifique et m'ont transmis une précieuse formation.

Je tiens également à remercier les membres du laboratoire "Exploitation et Valorisation des Ressources Naturelles en Zones Arides" pour tout le soutien reçu. Mes remerciements s'adressent également à tous le personnel ingénieur et technicien du LTPS-Ghardaïa, et plus particulièrement à Monsieur *Amieur Djamel Abdenacer*, pour leur accueil au sein du laboratoire, ainsi que pour leur assistance dans le travail expérimental.

J'aimerais aussi remercier le Professeur *BELFAR Mohamed Lakhdar*, directeur de laboratoire "Valorisation et Promotion des Ressources Sahariennes, ainsi que son équipe pour le soutien reçu, et plus particulièrement à Docteur *CHELGHAM Fatiha*.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers les membres du CRAPC pour leur collaboration à la réalisation de cette thèse et plus particulièrement à Docteur *TERBOUCHE Achour* et Docteur *BELKHALFA Hakim*.

Enfin, je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, que ce soit par leurs efforts ou leurs prières : mes parents, ma famille et mes amis. Un merci particulier à ma mère, *SEBTI Sadia*, qui est toujours là lorsque j'en ai besoin, et à qui je dédie cette thèse.

*DEHANE Sarra*

# Contribution à l'étude de la durabilité des bétons gâchés par des eaux épurées

## Résumé

L'augmentation de la production du béton concomitante à la croissance rapide de la population a contribué de manière importante à la contrainte hydrique qui frappe notre pays. L'utilisation des eaux non potables pour le gâchage des bétons et mortiers est potentiellement avantageuse en matière de développement durable du béton.

L'objectif principal de cette étude est donc d'évaluer la valorisation des eaux usées épurées par la station d'épuration de Saïd-Otba de la ville d'Ouargla dans l'industrie du béton. Les résultats de plusieurs études ont trouvé que les effluents issus de cette station se caractérisent par une minéralisation excessive. Pour cela, un programme expérimental a été établi pour comparer les différentes propriétés des bétons gâchés avec l'eau épurée (EP) à celui des bétons gâchés avec l'eau distillée (ED), notamment en termes de résistances mécaniques, de perméabilité, microstructure et de résistances à la corrosion.

Les résultats ont montré que le principal inconvénient de l'utilisation des eaux épurées salines est le risque plus élevé de corrosion de l'acier. Cela indique que l'applicabilité de l'utilisation de cet effluent comme eau de gâchage de béton armé nécessite des matériaux et des techniques spécifiques. Cependant, on peut s'attendre à de nombreuses améliorations de la qualité du béton à travers son utilisation, notamment une meilleure résistance mécanique initiale, une pénétrabilité faible, une bonne résistance aux agressions extérieures et une meilleure considération de l'environnement.

**Mots-clés :** Béton, eau épurée, eau de gâchage, résistance à la compression, perméabilité, chlorure, sulfate, corrosion.

# **Contribution to the study of the durability of concrete mixed with treated wastewater**

## **Abstract**

The expending population and the corresponding rise in concrete production have notably contributed to the water stress affecting our country. The use of non-potable water for mixing concrete and mortar is potentially advantageous in terms of the sustainable development of concrete.

Therefore, the main objective of this study is to evaluate the valorization of treated wastewater obtained from the Saïd-Otba treatment plant in Ouargla city for concrete mixing. The results of several studies have shown that effluent from this plant is characterized by excessive mineralization. For this reason, an experimental program was conducted to compare the various properties of treated wastewater- and distilled-water concretes, notably in terms of their mechanical strength, permeability and pore structure, and corrosion resistance.

The results showed that the main disadvantage of using saline treated wastewater is the high risk of steel corrosion. This indicates that the applicability of utilising this effluent as mixing water of reinforced concrete requires special materials and techniques. However, many improvements in concrete quality can be expected through its use, including better initial strength, lower penetrability, good resistance to external attack and environmentally considerate.

**Keywords :** concrete, treated wastewater, mixing water, compressing strength, chloride, sulphate, corrosion.

## المساهمة في دراسة ديمومة الخرسانة المخلوطة بالمياه المعالجة

### ملخص

ساهمت الزيادة الكبيرة في إنتاج الخرسانة المصاحبة للنمو السكاني السريع بشكل ملحوظ في الإجهاد المائي الذي يؤثر على بلدنا. وبالمقابل فإن استخدام المياه الغير صالحة للشرب كمياه لخلط الخرسانة والملاط يمكن أن يكون إيجابيا لتحقيق التنمية المستدامة للخرسانة.

لذلك فإن الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو تقييم صلاحية استخدام مياه الصرف المعالجة التي تم الحصول عليها من محطة معالجة مياه الصرف الصحي "سعيد عتبة" لمدينة ورقلة لخلط الخرسانة. أظهرت نتائج العديد من الدراسات أن المياه المعالجة في هذه المحطة عالية الملوحة ومن ثم فإن البرنامج التجريبي لهذه الدراسة يركز بشكل أساسي على مقارنة الخصائص الميكانيكية والنفاذية ومقاومة التآكل للخرسانة المحضرة باستخدام المياه المعالجة وتلك المحضرة بإستعمال الماء المقطر.

أظهرت نتائج هذه الدراسة أن العائق الرئيسي لتثمين هذه المياه المعالجة زائدة الملوحة في إنتاج الخرسانة هو إرتفاع مخاطر تآكل حديد التسليح. يشير هذا الى أن إمكانية استخدام هذه المياه كمياه خلط للخرسانة المسلحة تتطلب مواد وتقنيات خاصة. ومع ذلك يمكن الحصول على العديد من التحسينات على جودة الخرسانة من خلال إستخدامها، على وجه الخصوص مقاومة أولية أفضل للضغط ونفاذية أقل ومقاومة جيدة للعوامل العدوانية وإعتبارات بيئية أعلى.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، المياه المعالجة، ماء الخلط، مقاومة الضغط، نفاذية، كلوريد، كبريت، تآكل.

# ommaire

<b>Remerciement</b>	
<b>Résumé</b>	
<b>Liste des figures</b>	
<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Notations</b>	
<b>Introduction Générale</b>	<b>2</b>
<b>i. Éléments bibliographiques</b>	<b>7</b>
<b>I. Relations Eau-Béton</b>	<b>8</b>
<b>I.1. Introduction</b>	<b>9</b>
<b>I.2. Relations entre l'eau et le béton en cours de fabrication</b>	<b>9</b>
<b>I.2.1 Eau de gâchage</b>	<b>9</b>
<b>I.2.2 Eau dans la pâte de ciment hydraté</b>	<b>9</b>
<b>I.2.3 Eau ressuée</b>	<b>11</b>
<b>I.2.4 Cure à l'eau du béton</b>	<b>12</b>
<b>I.3. Relations entre l'eau et le béton en service</b>	<b>13</b>
<b>I.3.1 Retrait de séchage du béton</b>	<b>13</b>
<b>I.3.2 Fluage du béton</b>	<b>13</b>
<b>I.3.3 Séchage-mouillage du béton</b>	<b>14</b>
<b>I.3.4 Relation Eau-béton à hautes performances (BHP)</b>	<b>14</b>
<b>I.3.5 Auto-cicatrisation du béton</b>	<b>15</b>
<b>I.3.6 Eaux agressives</b>	<b>15</b>
<b>I.3.7 Corrosion des armatures</b>	<b>17</b>
<b>I.3.8 Carbonatation</b>	<b>19</b>
<b>I.3.9 Gel et dégel</b>	<b>19</b>
<b>I.3.10 Alkali-granulats</b>	<b>20</b>
<b>I.3.11 Érosion et cavitation</b>	<b>20</b>
<b>I.4. Relations entre l'eau et les propriétés intrinsèques du béton</b>	<b>21</b>
<b>I.4.1 Conductivité thermique</b>	<b>21</b>
<b>I.4.2 Résistivité électrique</b>	<b>21</b>
<b>I.5. Conclusion</b>	<b>22</b>
<b>II. Qualité de l'eau de gâchage</b>	<b>24</b>
<b>II.1. Introduction</b>	<b>25</b>
<b>II.2. Exigences normatives concernant l'eau de gâchage</b>	<b>26</b>
<b>II.3. Effets des substances contenues dans l'eau de gâchage sur les propriétés du béton</b>	<b>29</b>
<b>II.3.1 Chlorures (<math>\text{Cl}^-</math>)</b>	<b>30</b>
<b>II.3.2 Sulfates (<math>\text{SO}_4^{2-}</math>)</b>	<b>31</b>
<b>II.3.3 Carbonates et bicarbonates</b>	<b>33</b>

II.3.4 Sels inorganiques	33
II.3.5 Sels ferreux	34
II.3.6 Eaux alcalines	34
II.3.7 Eaux acides	34
II.3.8 Huile	35
II.3.9 Sucre	35
II.3.10 Matière en suspension	36
II.4. Effets de la provenance de l'eau de gâchage sur la qualité du béton	37
II.4.1 Eaux naturelles	38
II.4.2 Eaux récupérées de l'industrie du béton	40
II.4.3 Eaux usées domestiques et industrielles	42
II.5. Conclusion	48
ii. Méthodes expérimentales	49
III. Méthodes et procédures Expérimentales	50
III.1. Introduction	51
III.2. Caractérisation des matériaux de base	51
III.3. Étude de l'influence de l'eau épurée sur les propriétés du béton	55
III.3.1 Formulation des bétons étudiés	55
III.3.2 Confection et conservation des éprouvettes de béton	55
III.3.3 Mesure de la résistance mécanique à la compression du béton	56
III.3.4 Mesure des temps de prise des pâtes de ciment	57
III.3.5 Caractérisation de la microstructure du béton	57
III.4. Étude de l'influence de l'eau épurée sur le comportement à la corrosion des armatures en acier	59
III.4.1 Mesure de la vitesse de corrosion de l'acier enrobé de mortier	59
III.4.2 Évaluation de comportement actif-passif de l'acier dans des extraits des aqueux des poudres des bétons	62
III.5. Étude des propriétés du mortier en présence des ions sulfate et chlorure dans l'eau de gâchage	65
III.5.1 Formulation des mortiers étudiés	65
III.5.2 Confection et conservation des éprouvettes de mortier	66
III.5.3 Mesure de la Résistance mécanique de mortier et des temps de prise de ciment	66
III.6. Conclusion	67
IV. Résultats et Discussions	68
IV.1. Introduction	69
IV.2. Étude de l'influence de l'eau épurée sur les propriétés du béton et sur le comportement à la corrosion des armatures en acier enrobées de béton	69
IV.2.1 Caractéristiques des eaux épurées utilisées	69
IV.2.2 Effet des eaux épurées sur l'hydratation du ciment et sur l'affaissement de béton	71

<b>IV.2.3 Effet des eaux épurées sur la Résistance mécanique à la compression du béton</b>	<b>73</b>
<b>IV.2.4 Effet des eaux épurées sur la microstructure du béton</b>	<b>75</b>
<b>IV.2.5 Effet des eaux épurées sur le comportement à la corrosion des armatures en acier enrobées de béton</b>	<b>79</b>
<b>IV.2.5.1 Étude de la vitesse de corrosion de l'acier enrobé de mortier</b>	<b>79</b>
<b>IV.2.5.2 Étude de comportement actif-passif de l'acier dans des extraits des aqueux des poudres de béton</b>	<b>86</b>
<b>IV.3. Étude de l'influence des ions sulfate et chlorure sur l'hydratation et la résistance mécanique du mortier</b>	<b>89</b>
<b>IV.3.1 Étude des temps de prise du ciment CRS en fonction des différentes concentrations en sulfate et chlorure</b>	<b>89</b>
<b>IV.3.2 Étude de la résistance mécanique du mortier de ciment CRS en fonction des différentes concentrations en sulfate et chlorure</b>	<b>91</b>
<b>IV.4. Conclusion</b>	<b>96</b>
<b>Conclusion Générale et Perspectives</b>	<b>98</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>102</b>

# Liste des Figures

<b>Figure 1</b> Représentation de la demande en eau et des flux d'énergie associés aux différentes étapes de la production du béton	3
<b>Figure 2</b> Contribution du béton aux prélèvements d'eau destinée à des usages industriels	4
<b>Figure I.1</b> Modèle simplifié des types d'eau associée aux particules de CSH	10
<b>Figure I.2</b> Schématique représentation de l'eau ressuée dans le béton frais	12
<b>Figure I.3</b> Représentation des principales attaques du béton exposé à l'environnement marin	17
<b>Figure I.4</b> Détérioration de béton par réactions chimiques	18
<b>Figure I.5</b> Formation de la cavitation et mécanisme de dommage sur la surface d'un déversoir	21
<b>Figure II.1</b> Effet de différents sulfates sur le temps de début de prise du ciment	32
<b>Figure II.2</b> Résistance à la compression de différentes pâtes de ciment contenant l'eau de mer à 3 jours d'hydratation	39
<b>Figure II.3</b> Résistance à la compression du béton contenant différents pourcentages d'eau recyclée (ER)	42
<b>Figure II.4</b> Temps de prise de ciment hydraté avec et sans l'eau épurée	44
<b>Figure II.5</b> Affaissement du béton on fonction du type d'eau de gâchage	44
<b>Figure II.6</b> Résistance à la compression du béton contenant différents pourcentages d'eau épurée (EP)	47
<b>Figure II.7</b> Porosité du béton contenant différents pourcentages d'eau épurée (EP)	47
<b>Figure II.8</b> Probabilité de corrosion on fonction du type d'eau de gâchage	47
<b>Figure III.1</b> Analyse granulométrique des granulats	52
<b>Figure III.2</b> Dispositif de mesure de la résistance à la compression du béton; (a) rectifieuse et (b) presse hydraulique	56
<b>Figure III.3</b> Perméabilimètre à béton	58
<b>Figure III.4</b> Représentation schématique de l'éprouvette de mortier armé	60
<b>Figure III.5</b> Représentation schématique de la cellule électrochimique utilisée pour l'étude sur les éprouvettes de mortier armé	61
<b>Figure III.6</b> Représentation schématique de la préparation de l'extrait de la poudre de béton	63
<b>Figure III.7</b> Photo de l'Extrait de la poudre de béton EP100	63
<b>Figure III.8</b> Représentation schématique de l'électrode de travail	64
<b>Figure III.9</b> Représentation schématique de la cellule électrochimique utilisée pour l'étude sur les extraits aqueux des poudres de bétons	64
<b>Figure III.10</b> Équipement utilisée pour les essais mécaniques sur les mortiers; (a) vue d'ensemble, (b) partie destinée à l'essai de flexion et (c) partie destinée l'essai de compression	66
<b>Figure IV.1</b> Temps de prise des différentes pâtes de ciment	71
<b>Figure IV.2</b> Evolution de la résistance à la compression des bétons contenant de l'ED et 25,50 et 100% EP	71

<b>Figure IV.3</b> Effet du type de l'eau de gâchage sur la résistance du béton	75
<b>Figure IV.4</b> Images MEB de béton témoins ED	77
<b>Figure IV.5</b> Images MEB de béton EP100	77
<b>Figure IV.6</b> Diagrammes DRX des bétons ED et EP100 ; (a) Analyses DRX entre 10° et 60° et (b) Analyses DRX entre 10° et 15	78
<b>Figure IV.7</b> Courbe de Tafel	80
<b>Figure IV.8</b> Courbes de Tafel de l'acier enrobé dans les mortiers ED, EP50 et EP100	81
<b>Figure IV.9</b> Courbe de polarisation linéaire	82
<b>Figure IV.10</b> Représentation schématique de mécanisme de corrosion par piqûres induite par les ions chlorure	83
<b>Figure IV.11</b> Vitesse de corrosion et densité de courant des aciers enrobés dans les mortiers étudiés	85
<b>Figure IV.12</b> Courbes de polarisation de l'acier dans les extraits aqueux des bétons ED et EP100	86
<b>Figure IV.13</b> Diagramme de Pedferri : potentiel de piqûre de l'acier dans le béton contaminé par les chlorures	88
<b>Figure IV.14</b> Vitesse de corrosion et densité de courant des aciers dans les extraits aqueux des bétons ED et EP100	88
<b>Figure IV.15</b> Évolution des temps de prise du ciment CRS en fonction de la concentration en sulfate de sodium	89
<b>Figure IV.16</b> Évolution des temps de début de prise du ciment CRS hydratés avec des solutions de différentes concentrations en sulfate et chlorure de sodium	91
<b>Figure IV.17</b> Évolution des temps de fin de prise du ciment CRS hydratés avec des solutions de différentes concentrations en sulfate et chlorure de sodium	91
<b>Figure IV.18</b> Évolution des résistances à la compression des mortiers de ciment CRS hydratés avec des solutions de différentes concentrations en sulfate de sodium	92
<b>Figure IV.19</b> Évolution des résistances à la compression des mortiers de ciment CRS hydratés avec des solutions de différentes concentrations en sulfate et chlorure de sodium	94

# Table des Tableaux

<b>Tableau II.1.</b> Critères de l'évaluation de la qualité de l'eau de gâchage selon les normes EN 1008-2002 et ASTM C1602	<b>28</b>
<b>Tableau II.2.</b> Effet des eaux usées domestiques traitées sur les temps de prise des pâtes de ciment et sur les propriétés physiques du béton	<b>41</b>
<b>Tableau II.3.</b> Effet des eaux usées domestiques traitées sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton	<b>43</b>
<b>Tableau III.1.</b> Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats	<b>52</b>
<b>Tableau III.2.</b> Caractéristiques chimiques des granulats	<b>53</b>
<b>Tableau III.3.</b> Caractéristiques mécaniques et physiques du ciment	<b>53</b>
<b>Tableau III.4.</b> Caractéristiques chimiques du ciment	<b>54</b>
<b>Tableau III.5.</b> Formulations des bétons étudiés	<b>55</b>
<b>Tableau III.6.</b> Désignations des différentes formulations des mortiers étudiés	<b>65</b>
<b>Tableau IV.1.</b> Résultats des analyses de l'EP comparés aux exigences des normes et à l'eau de mer utilisée par Younis et al	<b>70</b>
<b>Tableau IV.2.</b> Résultats de la résistance à la compression des différents bétons	<b>73</b>
<b>Tableau IV.3.</b> Résultats de la perméabilité à l'eau des différents bétons	<b>76</b>
<b>Tableau IV.4.</b> Valeurs des coefficients de Tafel et de la constante de Stern-Geary	<b>81</b>
<b>Tableau IV.5.</b> Relation entre l'activité de corrosion et la résistance de polarisation	<b>82</b>
<b>Tableau IV.6.</b> Caractéristiques électrochimiques de l'acier enrobé dans les mortiers étudiés	<b>82</b>
<b>Tableau IV.7.</b> Relation entre la vitesse de corrosion et la densité de courant avec l'état de corrosion	<b>84</b>
<b>Tableau IV.8.</b> Réduction de la résistance à la compression des mortiers de ciment CRS en fonction des concentrations en sulfate et chlorure introduits dans l'eau de gâchage	<b>94</b>

# Notation

$\rho_s$  : Masse volumique absolue  
 $\rho_d$  : Masse volumique apparente  
 $K_p$  : coefficient de perméabilité  
 $R_p$  : Résistance de polarisation  
 $I_{\text{corr}}$  : Densité de courant de corrosion  
 $V_{\text{corr}}$  : Vitesse de corrosion  
 $i_{\text{corr}}$  : Courant de corrosion  
 $\log i$  : Logarithme de la densité de courant  
 $E$  : Potentiel de l'électrode  
 $E_{\text{corr}}$  : Potentiel de corrosion  
 $E_{\text{passive}}$  : Potentiel passif  
 $B$  : Constante de Stern-Geary  
 $\beta_a$  : Coefficient de Tafel anodique  
 $\beta_c$  : Coefficient de Tafel cathodique  
 $A$  : surface de la zone d'acier polarisé

ED : Eau distillée  
EP : Eau épurée  
E/C : Rapport eau/ciment  
ES : Équivalent de sable  
CRS : Ciment résistant aux sulfates  
C-S-H : Silicate de calcium hydraté  
CH : hydroxyde de calcium (Portlandite)  
CaO : Chaux  
Ca(OH)<sub>2</sub> : hydroxyde de calcium (Portlandite)  
C3S : Silicate tricalcique  
C3A : Aluminate tricalcique  
C4AF : Alumino-ferrite tétracalcique  
C<sub>6</sub>A $\bar{S}$ <sub>3</sub>H<sub>32</sub> : Ettringite  
C $\bar{S}$ H<sub>2</sub> : Gyp

NS : Sulfate de sodium

NC : Chlorure de sodium

NH : Hydroxyde de sodium

SF : Sel de Friedel

ppm : Partie par million

BHP : Béton à haute performances

MEB : Microscopie électronique à balayage

DRX : Diffraction des rayons X

SE : Technique des électrons secondaires

ATG : Analyse thermogravimétrique

DBO<sub>5</sub> : Demande biochimique en oxygène pendant 5 jours

DCO : Demande chimique en oxygène

ONU-Eau : Organisation des nations unies pour l'éducation, la science et la culture-eau

LTPS : Laboratoire des travaux publics du sud

CRAPC : Centre de recherche scientifique et technique en analyses physico-chimique

LPCMA : Laboratoire de physique des couches minces et application

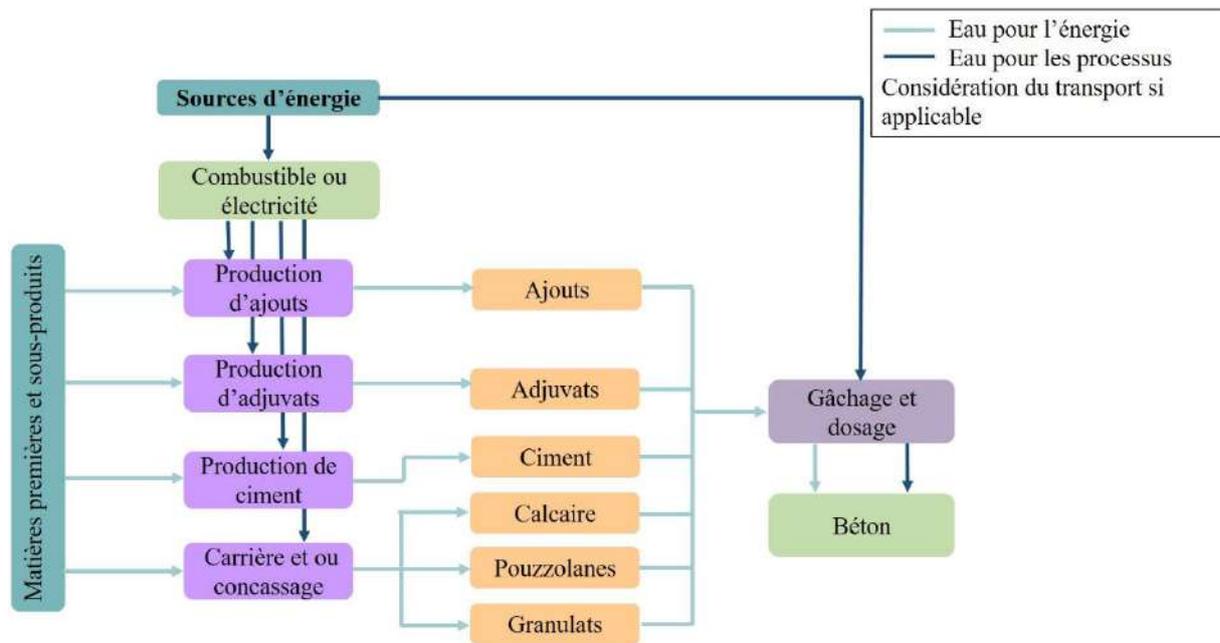
# ntroduction générale

Maniable à l'état frais, rigide à l'état durci et durable dans le temps, le béton est un matériau de construction exceptionnel. C'est aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé au monde : sa production est estimée à plus de 30 milliards de tonnes par an [1]. En Algérie, la majorité des immeubles et des infrastructures sont construits en béton. Il est le matériau de construction fondamental qui a largement été utilisé dans la construction des infrastructures nécessaires pour faire face à l'urbanisation et l'industrialisation rapide que notre pays a connu au cours des 25 dernières années. Il permet la réalisation de nombreux ouvrages d'art et travaux publics, ouvrages hydrauliques, ouvrages souterrains et plusieurs bâtiments à usage d'habitation et industriels. Mais comme toute bonne chose en excès, l'utilisation généralisée du béton n'est pas sans conséquence sur l'environnement.

L'industrie du béton est l'un des plus gros consommateurs de ressources naturelles et d'énergie. La production du ciment, ingrédient essentiel du béton, est le responsable de 8.6% des émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère [2]. Par conséquent, les recherches portant sur le développement durable de l'industrie du béton sont aujourd'hui nécessaires pour la rendre plus respectueuse de l'environnement. L'intégration du développement durable dans l'industrie du béton ne peut être assurée que par la prise en compte de ce mode de développement pour tous les ingrédients du béton [3]. Dans ce contexte, de nombreuses recherches ont été déployées pour étudier la possibilité d'utilisation de différents déchets industriels pour remplacer, partiellement ou totalement, le ciment et les granulats dans le béton ordinaire. Il s'agit notamment de la fumée de silice, de cendre volante, de laitier de haut fourneau, des granulats recyclés, des déchets de verre, etc. Cependant, moins d'attention a été accordée à la réduction de la consommation d'eau dans le béton.

L'eau est l'un des principaux ingrédients indispensables à la fabrication du béton hydraulique et occupe 14 à 21% de son volume total. Elle est l'ingrédient clé pour déclencher la réaction d'hydratation du ciment qui provoque la prise et le durcissement du béton. La présence d'eau dans le mélange est aussi nécessaire pour assurer au béton frais la plasticité convenable pour sa mise en place. En plus, une quantité d'eau est parfois nécessaire pour la cure du béton afin d'assurer l'hydratation continue et le durcissement correct du béton sans développement d'un retrait important. Le lavage des granulats et des matériels utilisés à la fabrication du béton consomme aussi une quantité importante d'eau. Globalement, la consommation d'eau dans différentes étapes et dans divers composants du béton, comme

indiqué dans la Figure 1, est estimée à environ 16,6 milliards de mètres cubes d'eau par an, un volume équivalent à environ 18 % de la consommation annuelle mondiale d'eau industrielle (selon les valeurs de consommation de béton de l'année 2012) [2]. Cette demande en eau va engendrer, ou engendre déjà, des défis additionnels en matière de la gestion des ressources en eau dans les régions du monde qui souffrent déjà, ou va souffrir d'une pénurie d'eau.



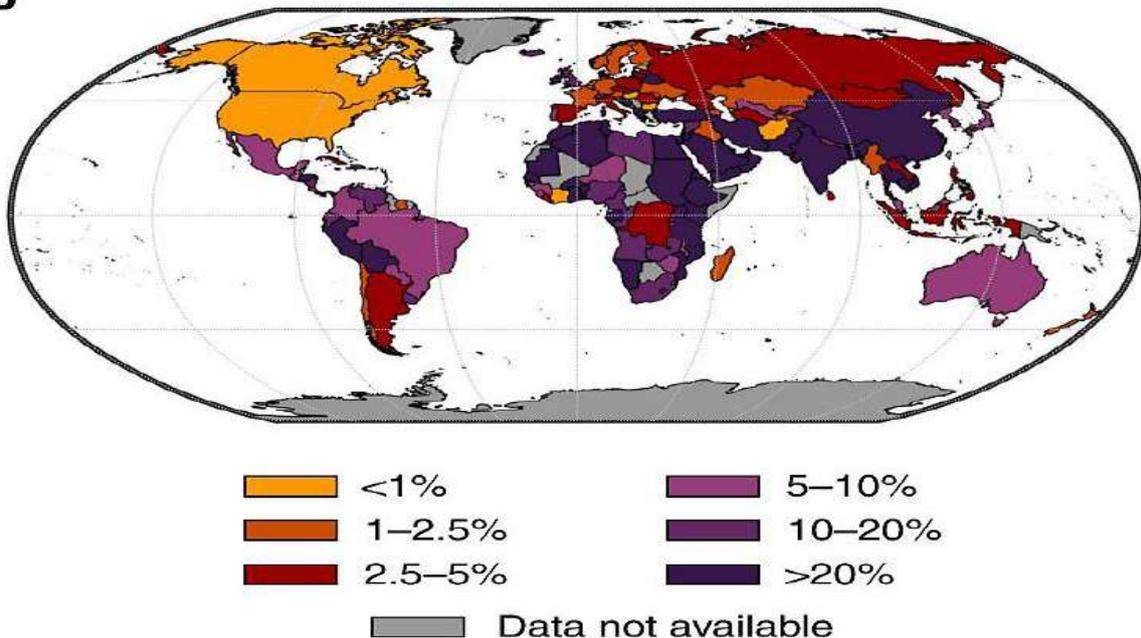
**Figure 1** Représentation de la demande en eau et des flux d'énergie associés aux différentes étapes de la production du béton [2]

Selon le dernier rapport publié par l'ONU-Eau [4], l'Algérie prélève plus de 100% de ses ressources renouvelables en eau douce, et par conséquent comprise parmi les pays où le niveau de stress hydrique est "critique". Sachant que la majeure partie du pays est classé comme zones semi-aride ou aride, la surexploitation des ressources en eau en Algérie a entraîné des conséquences négatives sur l'environnement, en particulier dans les régions arides du sud, où l'approvisionnement en eau potable est assuré uniquement par la désaliénation des eaux souterraines saumâtres. L'augmentation de la production du béton concomitante à la croissance rapide de la population a contribué de manière importante à la contrainte hydrique qui frappe le pays. Comme illustré dans la Figure 2 présenté ci-dessous, plus de 20% des prélèvements d'eau destinée à des usages industriels en Algérie sont consommés dans la fabrication du béton [2].

Par conséquent, l'élaboration de mesures visant à réduire la consommation d'eau dans l'industrie du béton devrait donc être considérée comme une priorité pour contribuer à réduire

le stress hydrique en Algérie et accroître le développement durable de l'industrie du béton. Il est rapporté que la meilleure stratégie pour réduire la consommation d'eau dans l'industrie du béton est la réduction de l'eau de gâchage [2] parce que, d'une part, l'eau potable est couramment employée sans contrôle dans l'opération de malaxage du béton afin d'éviter l'introduction de substances indésirables dans le mélange et parce que, d'autre part, les ressources en eau potables sont limitées. Il existe alors de nombreuses sources d'eau impropres à la consommation humaine, telles que l'eau de mer, les eaux usées domestiques et industrielles, et les eaux grises des centrales à béton, qui peuvent, dans certains cas, convenir comme eau de gâchage pour béton [5]. Dans ce contexte, ce travail de recherche est consacré à l'étude de la

**b**



faisabilité de remplacement de l'eau potable par les eaux usées traitées par la station d'épuration de la ville d'Ouargla pour la fabrication du béton.

**Figure 1** Contribution du béton aux prélèvements d'eau destinée à des usages industriels [2]

La région de Ouargla fait partie du Sahara septentrional algérien, son climat est désertique chaud caractérisé par une très faible pluviométrie, des températures très chaudes, un très faible taux d'humidité relative accompagné à une très forte évaporation, et par l'action des vents de sable. Durant l'été, les températures dans la région peuvent atteindre 50 °C [6] et la durée d'ensoleillement peut dépasser 14 heures par jour [7]. Il est à noter que la température de la surface du béton réchauffée par le rayonnement solaire peut atteindre jusqu'à 70 °C [8]. Les conditions climatiques chaudes et sèches ne sont pas donc sans conséquences sur le béton, surtout à l'état frais. Le temps chaud provoque généralement l'accroissement de la demande en eau, la perte d'affaissement et l'accélération du temps de prise, ce qui se traduit souvent sur le

béton par des joints froids, un serrage insuffisant, une résistance à la compression faible et une augmentation du potentiel de fissuration par retrait plastique et retrait de séchage [8]. Le résultat est un béton de mauvaise qualité incapable de résister aux agressions extérieures.

L'environnement de la région de Ouargla est considéré comme agressif aussi bien pour l'infrastructure des ouvrages que pour la qualité du béton armé. L'agressivité résulte principalement de la présence de : (1) des eaux phréatiques salées dont le niveau est parfois très élevé, et (2) des sols salés riches en sulfates et en chlorure. Les principales formes de détérioration du béton sont alors la fissuration et le décollement du béton d'enrobage dus à la corrosion des armatures, la fissuration et l'éclatement superficiel dus à l'attaque sulfatique et la fissuration due aux actions climatiques. La détérioration précoce des structures en béton armé dans cette région a et va entraîner la consommation des ressources considérables pour la réparation et la réhabilitation de ces structures.

D'autre part, à cause de la croissance remarquable de la population et le programme de développement prometteur, la région de Ouargla a connu ces dernières années une croissance continue dans le secteur de génie civil. Cette augmentation de demande a exercé une forte pression sur les ressources naturelles et notamment sur les ressources hydriques. On rappelle que les ressources en eau conventionnelle de la région de Ouargla comprennent, en plus des eaux phréatiques salées, les eaux souterraines légèrement à fortement salées provenant des nappes profondes (la nappe du complexe terminal et la nappe du continental intercalaire). En conséquence, le principal challenge pour les chercheurs et les ingénieurs de génie civil est donc de développer des structures durables en béton, conçues et construites pour économiser les ressources naturelles, minimiser l'énergie consommée, réduire et recycler les déchets, réduire la pollution de l'environnement, et avoir une durée de service élevée sans maintenance excessive. Nous essayerons donc de participer à ce challenge tout à travers cette étude.

Alors, l'objectif principal de cette étude est d'évaluer la valorisation des eaux usées traitées par la principale station d'épuration de la ville d'Ouargla (Saïd-Otba) dans l'industrie du béton. Il a été rapporté que, à cause de la salinisation excessive, l'irrigation avec les eaux usées épurées provenant de cette station augmente la salinité des sols et par conséquent sa valorisation au secteur agricole doit être pratiquée avec précaution [9]. Notre étude antérieure [10] nous a permis aussi de détecter la salinité de ces eaux épurées et d'interroger sur ses éventuels effets sur les propriétés du béton et surtout sur les armatures enrobées de béton.

En plus, au cours de cette étude, nous nous sommes aussi intéressés à comprendre l'interaction entre le ciment et les deux ions majoritaires dans les eaux épurées : le chlorure et le sulfate. Le deuxième objectif de cette recherche est donc d'évaluer les conséquences que les variables concentrations en sulfate et chlorure présents dans l'eau de gâchage sont susceptibles d'engendrer sur les propriétés du matériau cimentaire. Généralement, les recherches expérimentales concentrent principalement sur les actions séparées de chacun des ions sulfate ou chlorure sur les propriétés du béton. Mais les recherches concernant l'interaction de ces deux espèces chimiques sur la qualité du matériau cimentaire, surtout lorsqu'elles sont présentes conjointement à l'intérieur du béton, restent très limitées. Nous essayerons donc de combler au moins partiellement ce manque de résultats.

Cette thèse de doctorat est divisée en quatre chapitres :

Le premier chapitre décrit certaines relations qui pouvaient exister entre le béton et l'eau.

Le deuxième chapitre présente une synthèse bibliographique relative à la qualité de l'eau utilisable pour le gâchage du béton. Il comporte la présentation des exigences normatives encadrant la convenance et le choix d'une eau de gâchage, les effets de différentes substances susceptibles d'être présentes dans l'eau de gâchage et leurs éventuels effets sur la qualité du béton, et une synthèse des études antérieures portées sur l'utilisation des eaux non potables dans les mélanges de béton.

Le troisième chapitre décrit le programme expérimental et les procédures expérimentales de cette recherche. Il présente notamment les caractéristiques des matériaux utilisés, la formulation de béton, les procédures de confection et de conservation des éprouvettes ainsi que les techniques des essais réalisés.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation et l'analyse des résultats du premier programme expérimental réservé à l'étude de l'influence de de l'eau épurée (EP) sur les caractéristiques du béton et sur le comportement à la corrosion des armatures enrobées de béton. Il aussi réservé à la présentation et l'analyse des résultats du deuxième programme expérimental consacré à l'étude de la cinétique de l'hydratation et le développement de la résistance mécanique des éprouvettes de pâtes de ciment et de mortiers gâchées avec des solutions de différentes concentrations en ions sulfate et chlorure.

Enfin, cette thèse est clôturée par un résumé des principales conclusions tirées à partir des résultats de cette étude et des recommandations pour les futures recherches.

**Première partie :**

# **Éléments bibliographiques**

**Chapitre I :**

** Relations eau-béton**

## **I.1. Introduction**

L'eau de gâchage est la source de vie de béton hydraulique. Elle est indispensable pour la dissolution des particules de ciment et par la suite la cristallisation des nouveaux composés (hydrates) relativement insolubles qui provoquent la prise et le durcissement de la pâte de ciment. L'eau est aussi nécessaire pour assurer au béton frais la plasticité souhaitée. Contrairement aux idées reçues, le rôle de l'eau de gâchage ne se limite pas seulement au stade de malaxage et de mise en œuvre du béton frais, mais elle intervient à tous les stades de la vie du béton [11]. En fait, il existe de nombreuses relations entre le béton et l'eau d'où l'eau agit parfois comme l'ami du béton et parfois comme son ennemi.

Tout d'abord, il semble très clair qu'il est impossible d'obtenir un béton hydraulique sans ajouter de l'eau aux ingrédients secs du béton lors de son mélange. De plus, dans certaines conditions, la mise en contact de la surface extérieure du béton avec l'eau pour procéder à une cure humide ou à un refroidissement est très utile pour assurer l'hydratation continue et le durcissement correct du béton sans développement d'un retrait important. C'est ce que représente l'une des relations bénéfiques entre le béton et l'eau. D'autre part, un nombre important de processus de dégradation du béton nécessitent l'eau [12] qui est considérée comme l'ennemi du béton dans ce cas.

En effet, les relations eau-béton sont totalement inévitables. Les interactions eau-béton sont susceptibles d'exister dès la première étape de l'hydratation du ciment et poursuivre pendant toute la durée de vie du béton [11]. L'objectif de ce chapitre est donc d'essayer de discuter certaines relations qui pouvaient exister entre l'eau et le béton.

## **I.2. Relations entre l'eau et le béton en cours de fabrication**

### **I.2.1 Eau de gâchage**

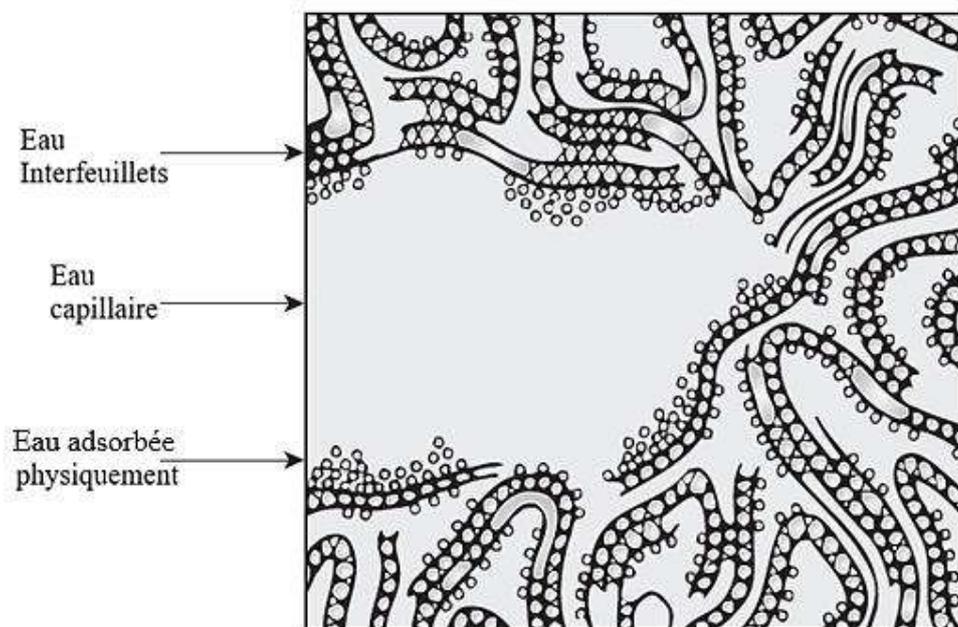
Concernant la relation eau de gâchage-béton, l'influence de rapport E/C sur la résistance mécanique et la porosité du béton a suscité le plus dans les études. L'influence de la qualité de l'eau de gâchage sur la qualité a fait malheureusement l'objet de très peu d'études. Ce sujet est discuté au chapitre suivant.

### **I.2.2 Eau dans la pâte de ciment hydraté**

La microstructure de la pâte de ciment hydratée se développe suite à la réaction du ciment avec l'eau. Par conséquent, l'eau est considérée un composant à part entière de la microstructure

du ciment hydraté. De façon générale, l'eau qui existe dans la pâte de ciment hydratée peut être classée en quatre groupes [13] :

- **L'eau liée chimiquement** : est celle qui a servi à l'hydratation et qui fait désormais une partie intégrante de tous les produits d'hydratation du ciment, telle que le C-S-H et le CH. Elle n'est pas perdue par séchage et ne contribue à aucun processus de transport dans la pâte de ciment. Elle ne peut être perdue que lors de la décomposition des hydrates suite à un échauffement du béton jusqu'à 1 000 °C. La Figure (I.1) présente les différents types d'eau associés à la structure C-S-H selon le modèle proposé par Feldman-Sereda.



**Figure I.1** Modèle simplifié des types d'eau associée aux particules de CSH [13]

- **L'eau adsorbée** : elle est adsorbée physiquement à la surface des produits d'hydratation du ciment. Sous l'influence de forces d'attraction moléculaire, jusqu'à 6 couches moléculaires d'eau (15 Å) peuvent être liées physiquement à la surface de solide. Les forces d'attraction moléculaire décroissent graduellement avec l'éloignement de la surface de solide. Pour cela, l'eau adsorbée est susceptible d'être facilement perdue par séchage de béton à une humidité relative de 30%. Le retrait du béton dépend fortement de la perte d'eau adsorbée.
- **Eau capillaire** : Elle peut être définie comme la forme condensée d'eau contenue dans les pores de taille supérieure à 5 nm et qui n'est pas sous l'influence des forces

d'attraction moléculaire. L'eau capillaire qui remplit les pores de taille supérieure à 50 nm est appelée eau libre parce que sa perte par séchage ne contribue pas à la réduction de volume de la pâte de ciment hydratée. L'ampleur du retrait est plus influencée par la perte d'eau retenue par capillarité dans les pores de tailles inférieures à 50 nm de la pâte.

- **Eau interfeuillet** : elle s'agit d'une couche monomoléculaire d'eau adsorbée entre les feuillets de C-S-H. Elle ne peut être perdue que si l'humidité relative est inférieure à 11%. La perte de cette eau entraîne une réduction volumique de la structure de C-S-H.

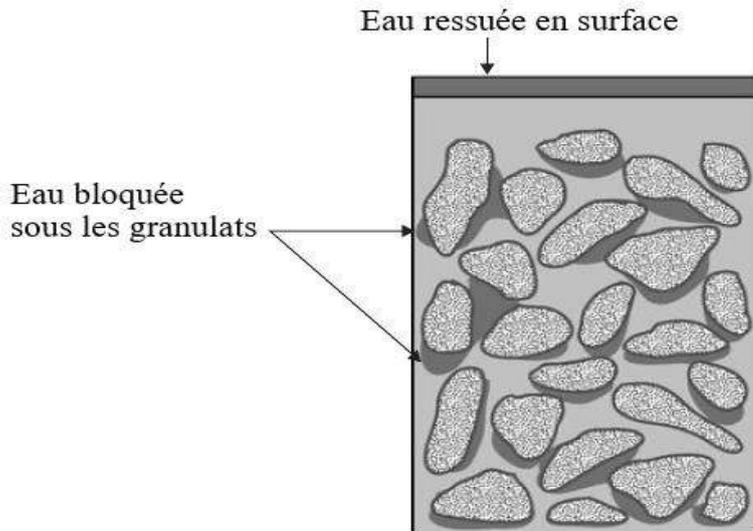
De point de vue pratique, il est préférable de classer les types d'eau présents dans la pâte de ciment hydratée selon la possibilité d'évaporation en : eaux évaporables (toute la quantité de l'eau capillaire et la partie de l'eau adsorbée faiblement liée) et eaux non évaporables (eau liée chimiquement, l'eau interfeuillet et la partie de l'eau adsorbée fortement liée).

### **I.2.3 Eau ressuée**

L'eau ressuée est l'eau qui remonte par ressuage à travers la masse du béton. En fait, ce sont les particules solides en suspension qui sont réellement déplacées vers le bas par sédimentation sous l'effet de la gravité, car ce sont elles qui sont les plus lourdes que l'eau [14]. Lorsque l'eau ressuée remonte à la surface du béton, elle risque de s'évaporer.

L'amplitude du retrait plastique du béton dépend fortement de la différence entre la vitesse d'évaporation d'eau en surface et celle de l'apparition d'eau provenant du ressuage [11]. Généralement, la majeure partie de l'eau ressuée est bloquée avant d'atteindre la surface du béton sous les particules des granulats (Figure (I.2)) [13]. Par conséquent, la pâte de ciment entourant les granulats, dite zone de transition, sera plus poreuse et cela va se traduire par une faible adhérence entre les granulats et la matrice cimentaire [13]. La zone interfaciale entre les armatures et la matrice peut aussi être affaiblie si l'eau ressuée est accumulée sous les armatures. Il est à noter que la sévérité du ressuage dépend de nombreux paramètres de formulation du béton, parmi lesquels, la taille, la densité et la forme des particules de granulat [15]. Il a été rapporté que l'eau ressuée est plus susceptible d'être piégée par les particules de granulat de forme plate et allongée que par les particules équidimensionnelles [13].

Par ailleurs, la migration de l'eau ressuée vers la surface peut éventuellement transporter le ciment et les particules plus fines de sable et d'argile (contaminant les granulats). Ainsi, une couche de laitance est apparue à la surface du béton. À cause de son rapport E/C très élevé, la couche de laitance est effectivement une couche faible et poreuse de béton qui rend la surface de béton moue et poussiéreuse après durcissement [13].



**Figure I.2** Schématique représentation de l'eau ressuée dans le béton frais [13]

Il est à noter que le ressuage n'est pas nécessairement nuisible [12]. Par exemple, si la surface extérieure d'un élément en béton est suffisamment chauffée pour que l'évaporation d'eau ait lieu, l'eau ressuée à la surface du béton présente certainement un effet bénéfique en termes de la diminution continue de la température de la couche du béton proche de la surface, ce qui garantit une "auto-cure" de béton souhaitable lors du bétonnage par temps chaud. Étant donné que la température du béton au cours de son durcissement a une influence importante sur le développement de sa résistance [16].

#### **I.2.4 Cure à l'eau du béton**

La mise en contact du béton avec un apport d'eau extérieure durant son durcissement, dite cure à l'eau, est fortement responsable de la modification de sa température près de la surface. La cure à l'eau est nécessaire pour empêcher l'évaporation rapide de l'eau de gâchage à la surface du béton et pour garantir le refroidissement continu du béton par évaporation jusqu'à ce que l'hydratation suffisante du béton soit bien atteinte [17]. Il est à noter qu'un rapport E/C de gâchage inférieur à 0.42 est généralement considéré comme critique pour assurer une hydratation adéquate du ciment [18]. Alors, la cure à l'eau est nécessaire comme un apport en eau supplémentaire pour poursuivre l'hydratation. En revanche, lorsque le rapport E/C est élevé, la cure à l'eau reste nécessaire que pour la modification de la température du béton par temps chaud [12]. Il est intéressant de noter que la cure à l'eau doit être appliquée dès que la surface du béton commence à sécher et doit être continue pendant une période suffisante pour atteindre les caractéristiques recherchées du béton durci [17].

L'eau utilisée pour la cure ne doit pas contenir des substances agressives qui attaquent le béton durci [5]. L'attaque du béton par les eaux agressives est discutée au paragraphe I.3.6. L'eau de mer ne convient pas pour le gâchage et la cure du béton armé ou précontraint. Cependant, il faut bien distinguer la convenance d'une eau de gâchage de l'agressivité de l'eau utilisée pour la cure qui agisse de l'extérieur sur le béton durci. Il est tout à fait possible qu'une eau qui est considérée comme agressive sur le béton durci puisse convenir bien au gâchage du béton [11]. À titre d'exemple, l'eau distillée est une excellente eau de gâchage, mais elle est considérée agressive vis-à-vis du béton durci [5]. Par contre, les eaux polluées par un certain nombre de substances organiques peuvent altérer l'hydratation du ciment et le développement de la résistance du béton, mais elles ne semblent pas agressives lorsqu'elles sont utilisées pour la cure du béton, à l'exception de la décoloration susceptible de la surface extérieure du béton [11].

### **I.3. Relations entre l'eau et le béton en service**

#### **I.3.1 Retrait de séchage du béton**

L'évaporation de l'eau de gâchage du béton joue un rôle principal dans le risque de fissuration du béton liée au phénomène de retrait. On peut principalement distinguer deux types de retrait du point de vue déformabilité du béton : le retrait plastique et le retrait de séchage. Le retrait plastique est provoqué par le départ d'eau en surface du béton frais. Le retrait de séchage se déroule dans le béton qui perd une quantité d'eau lorsqu'il est durci [18]. Comme mentionné précédemment, le retrait du béton ne concerne que les eaux évaporables après la migration de l'eau libre du béton. Il se manifeste seulement dans les éléments en béton conservés à l'air sec et pas dans les éléments coulés sous l'eau ou enrobés dans un sol humide [11].

Les déformations de retrait dans les éléments en béton ont une influence considérable sur le potentiel de fissuration du matériau, compromettant ainsi sa durabilité [19]. Les fissurations dans ce cas sont dues à la contraction de béton qui entraîne des tensions internes capables, dans certaines mesures, de dépasser la résistance en traction du béton [12].

#### **I.3.2 Fluage du béton**

Le fluage du béton peut être défini comme une déformation différée du béton soumis à une charge constante. On peut principalement distinguer deux types de fluage selon la présence ou non de dessiccation : le fluage de dessiccation et le fluage propre [13]. Comme le retrait, le fluage de dessiccation est initialement lié à la perte des eaux évaporables de la pâte de ciment [13]. La différence réside dans l'effet que la charge constante appliquée est l'origine

d'apparition de fluage de dessiccation. Le fluage propre est la part de fluage qui se déroule lorsque le béton chargé ne perd pas de l'eau. Ce dernier est beaucoup plus grand de fluage de dessiccation que la distinction de l'importance de chacun de deux types de fluage est souvent ignorée [13]. Les déformations de fluage peuvent entraîner l'apparition des fissurations et des flèches, particulièrement dans le cas des structures isostatiques, affectant ainsi négativement le bon comportement en service des ouvrages [12,20].

### **I.3.3 Séchage-mouillage du béton**

Si la surface d'un élément du béton déjà séché est mise en contact avec l'eau salée, l'eau va pénétrer progressivement dans les pores du matériau par absorption capillaire [21]. L'eau peut aussi pénétrer dans les pores du béton par condensation de l'humidité de l'air ambiant [12]. Au cours du temps, le degré de saturation en eau de réseaux poreux augmente et la saturation complète du béton peut parfois être atteinte [11]. Si cet élément est exposé à une période de temps sec et chaud, la couche d'eau pénétrée, qui contient certains sels, va s'évaporer lentement de la surface du béton, sans aucun départ des sels [21]. Ainsi, le départ de l'eau par évaporation s'accompagne avec l'augmentation de la concentration des sels dans les pores qui se déplacent progressivement vers le cœur du béton et cela vaut dire l'accélération de la dégradation du béton [12].

### **I.3.4 Relation Eau-béton à hautes performances (BHP)**

Les bétons BHP ayant un faible rapport E/C, et donc un plus faible pourcentage d'eau libre, sont beaucoup plus sensibles au retrait d'auto-dessiccation que les bétons courants [18]. Par opposition au retrait de séchage, le retrait d'auto-dessiccation (aussi appelé retrait endogène) est causé par la perte d'eau sans échange avec le milieu extérieur [22]. Il s'agit donc d'une contraction du béton due à l'autodessiccation lors de l'hydratation continue des grains de ciment. Les tensions internes qui s'apparaissent sont capables, dans certaines mesures, de provoquer des microfissurations préjudiciables à la durabilité du béton dans les mesures où elles parviennent d'augmenter le processus de transfert de béton avec le milieu extérieur agressif [12].

D'autre part, la faible perméabilité de béton BHP ralentit la mobilité de l'eau liquide encore présente dans la pâte de ciment durcie à travers le béton ce qui influence considérablement le comportement au feu du matériau [23]. Au sein de béton exposé à un incendie, l'élévation de la température à la surface du béton génère la vaporisation de l'eau qui se déplace avec la phase d'eau liquide vers la face extérieure chauffée et vers le cœur du béton

[12]. Si la mobilité de l'eau au sein du béton est faible, comme le cas des BHP, la pression forte de vapeur et la pression générée par la dilatation de la phase liquide peut provoquer l'éclatement de la surface chauffée du béton [24].

Lors et après l'extinction de l'incendie, le refroidissement rapide de surface surchauffée du béton à l'eau froide peut avoir des conséquences graves sur le béton [11]. L'humidification de la surface du béton, résultant de l'arrosage d'eau ou à l'exposition à l'air humide, favorise la réhydrations des constituants du béton décomposés suite à l'élévation de température lors de l'incendie [25]. C'est le cas par exemple de la portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) qui se déshydrate vers 450 °C et se transforme en chaux ( $\text{CaO}$ ) [12]. La réhydratation de ce dernier s'accompagne avec un gonflement du béton, car le volume de ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) est 44% plus élevé que celui de la ( $\text{CaO}$ ) [26]. Cette expansion se traduit par une augmentation de la porosité et une amplification de la taille ainsi que du nombre des fissures existantes à la fin de l'incendie, diminuant ainsi davantage les performances de béton [25,26].

### **I.3.5 Auto-cicatrisation du béton**

L'auto-cicatrisation dans le béton consiste à l'accumulation des nouveaux cristaux, issus de certaines réactions chimiques qui peuvent se dérouler entre les deux surfaces opposées des fissures, qui permet la cicatrisation de la fissure et de rétablir la continuité du béton [27]. La présence d'eau au sein du béton est essentielle pour le déroulement de ce phénomène qui s'est révélé favorable à la durabilité du béton [11]. En fait, l'auto-cicatrisation de la fissure se produise soit par l'hydratation des grains de ciment encore anhydres soit par de la carbonatation de la portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) [28]. Le premier mécanisme nécessite seulement la présence d'eau, tandis que le deuxième est conditionné également à la présence de  $\text{CO}_2$  [29].

### **I.3.6 Eaux agressives**

Le béton est soumis pendant sa durée de service aux attaques de nombreuses espèces chimiques agressives, dans lesquelles l'eau joue un rôle prépondérant [30]. L'ouvrage ou une partie de l'ouvrage en béton est peut être exposé durant sa durée de vie prévue à la pluie, à la neige, à l'eau de mer, aux eaux souterraines, aux eaux saumâtres, aux eaux usées, et aux différentes eaux contiennent naturellement, ou à la suite d'une contamination, des sels dissous ou du gaz dissous [31]. L'agressivité d'un type d'eau est fonction de l'interaction entre les espèces chimiques qu'elle contient avec les constituants de la pâte de ciment hydratée. En fait, les sels solides ne sont pas généralement, en soi, agressifs pour le béton, mais plutôt leur

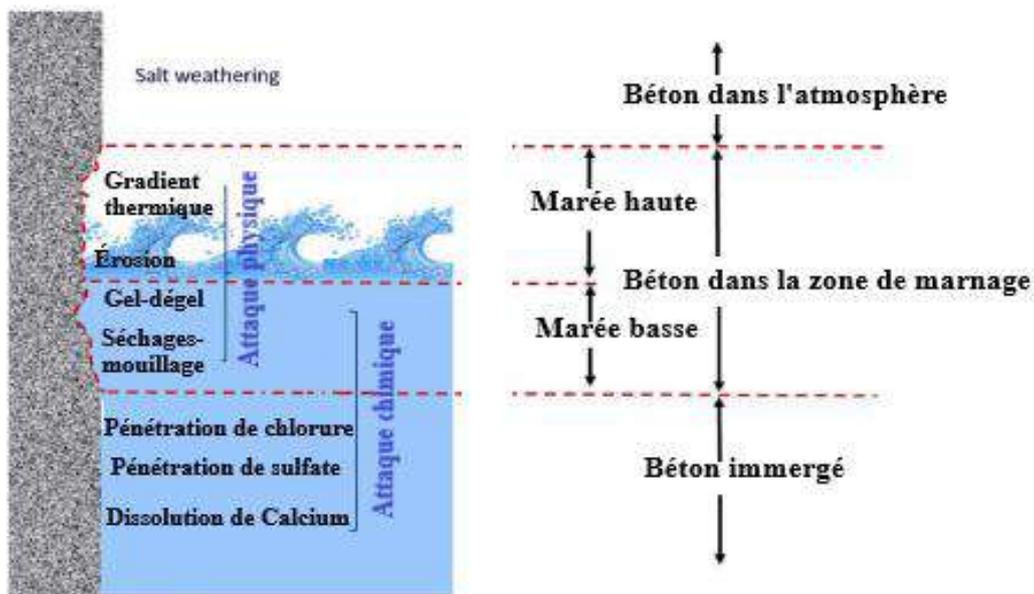
capacité de passage en solution, soit dans l'eau avec lesquelles ils entrent en contact [30], soit en absorbant l'humidité de l'air [11] (comme le cas de chlorure de sodium par exemple).

Les ions sulfate représentent le facteur majeur de risque d'agression chimique pour les ouvrages en béton [13]. Les eaux souterraines peuvent renfermer naturellement des concentrations élevées en ions  $\text{SO}_4^{2-}$  dues principalement aux sulfates alcalins et au sulfate de magnésium [32]. Les eaux d'infiltrations sont également susceptibles d'être chargées en sulfates en traversant des sols sulfatiques (gypseux, riches en pyrites) ou les sols agricoles contaminés par des substances organiques [31]. Les principales détériorations causées par l'attaque sulfatique comprennent l'expansion conduisant à l'apparition éventuelle des fissures et/ou d'écaillage, ainsi que la perte de résistance et la durabilité de la structure en béton [33]. Le degré de l'attaque sulfatique dépend fortement du cation ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ...) associé à l'anion  $\text{SO}_4^{2-}$  [32,34]. L'attaque par sulfate de magnésium est considérée le plus sévère vis-à-vis du béton en raison de sa capacité à provoquer la décalcification du C-S-H pour former du MSH, qui est un produit non cimentaire [35].

L'eau de mer chargée d'ions agressifs, associée aux conditions environnementales, peut provoquer un ensemble de détériorations chimiques et physiques au sein des structures en béton [36]. Les ions prédominant dans l'eau de mer, tels que le chlorure, le sulfate et le magnésium, ont le potentiel de déclencher des réactions chimiques complexes avec le béton durci [37]. Ces actions chimiques ne sont pas forcément cumulatives [31] et c'est pour cela que l'eau de mer est considérée un milieu chimique moyennement agressif pour le béton non armé [12,13], mais le milieu marin, en lui-même, est considéré comme fortement agressif [31]. Cependant, pour le béton armé et précontraint, la corrosion des armatures liée à la pénétration des ions chlorure et à la carbonatation du béton est le risque majeur de l'eau de mer [13,31]. En effet, le mécanisme de détérioration du béton varie en fonction de sa position par rapport à différents niveaux d'exposition à l'environnement marin. Comme illustré dans la Figure (I.3), le béton situé dans la zone de marnage, par exemple, est soumis non seulement aux attaques chimiques de l'eau de mer, mais aussi les attaques physiques telles que les cycles de gel-dégel, les cycles de séchages-mouillage, ainsi que l'érosion due à l'action des vagues et des objets solides qu'elles transportent [36].

Les eaux de pluies dites 'acides', qui renferment principalement les acides sulfuriques et nitriques et qui ont un pH qui peut descendre jusqu'à 4, sont aussi agressives [11]. Le principe de l'attaque consiste en une dissolution de des différents produits d'hydratation du ciment,

provoquant ainsi la perte de masse, l'apparition de fissurations, la dégradation progressive de la résistance mécanique, et finalement, une durabilité réduite du matériau [38,39].



**Figure I.3** Représentation des principales attaques du béton exposé à l'environnement marin [36]

En résumé, il est intéressant de noter que l'agressivité des eaux vis-à-vis du béton durci dépend principalement de leur pH et aussi de la perméabilité du béton [31]. Le mécanisme fondamental par lequel les eaux agressives parviennent à altérer le béton est résumé dans la Figure (I.4).

### **I.3.7 Corrosion des armatures**

La corrosion des aciers dans le béton est un phénomène qui ne peut se produire que si le béton d'enrobage est suffisamment humide, pour que la solution interstitielle du béton devienne l'électrolyte du processus électrochimique [11]. De même, la teneur en eau du béton joue un rôle significatif sur la vitesse de corrosion de l'acier enrobé de béton [40]. Le degré de saturation du béton est le facteur le plus influant sur la diffusion de l'oxygène dans le béton [41]. Lorsque le béton est sec, la vitesse de corrosion est fortement baissée et ne peut pas donc avoir des effets très significatifs sur la durabilité du matériau [12,40]. L'augmentation de la teneur en eau du béton se traduit par une augmentation de la conductivité électrique, et par conséquent, l'intensité de la réaction de corrosion [40,42]. Au-delà d'un certain seuil de saturation en eau de béton, l'oxygène devient très mal à diffuser dans l'eau et le risque de corrosion devient très faible [12,40].



### **I.3.8 Carbonatation**

Le calcium des hydrates de la pâte de ciment durcie peut réagir avec le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) pénétré sous forme gazeuse dans les pores du matériau [11,43]. En fait, si seulement en contact avec l'eau que le  $\text{CO}_2$  va alors se dissout pour réagir avec les hydrates et la teneur en eau du béton influe énormément sur la vitesse de carbonatation [12]. Si les pores sont complètement remplis d'eau, la diffusion du  $\text{CO}_2$  est faible et par conséquent la carbonatation est fortement ralentie [12,44]. Par contre, la carbonatation est maximale lorsque les pores sont partiellement remplis d'eau [44].

En fait, la carbonatation du béton n'a pas d'effets négatifs sur la microstructure de la pâte de ciment [12,45]. Elle induit la densification du béton qui s'accompagne avec l'augmentation de la résistance mécanique et de la résistivité électrique [46]. Cependant, elle entraîne l'abaissement de l'alcalinité de la solution interstitielle jusqu'à des valeurs déclenchant la corrosion des armatures [12].

### **I.3.9 Gel et dégel**

C'est la transformation de l'eau libre, contenue dans les pores capillaires de la pâte de ciment durcie, en glace qui est à l'origine de l'attaque du béton par le gel [13,47]. L'augmentation du volume d'eau entraîne alors une pression hydrostatique qui peut causer la fissuration interne de la pâte de ciment lorsque cette pression surpasse la résistance à la traction de cette dernière et peut aussi l'écaillage de la surface externe de béton [12,47]. Dans le béton durci, le degré de saturation du réseau poreux en eau est donc un facteur prédominant dans la résistance au gel [12,48]. En pratique, le degré de saturation est principalement lié à la quantité d'eau initialement présente dans le matériau et à l'absorption susceptible d'eau externe. Il convient de rappeler que ces deux derniers paramètres sont largement influencés par le rapport E/C de mélange.

L'action des cycles de gel-dégel sur le béton durci est très différente de l'action du gel sur le béton frais ou très jeune [11]. En plus de retarder ou même arrêter l'hydratation de ciment, l'expansion de la glace dans le béton plastique perturbe la cohésion de mélange et entraîne des dommages physiques irréparables, ce qui influence négativement sur le développement de la résistance mécanique et la durabilité du matériau [48,49].

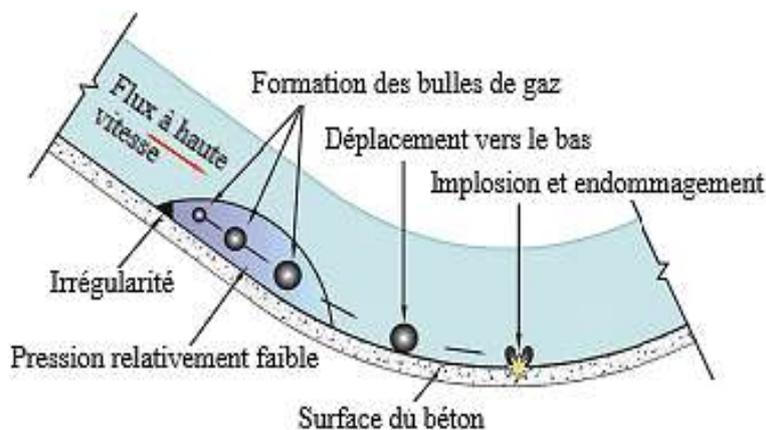
### **I.3.10 Alkali-granulats**

L'alkali-granulat est une réaction chimique interne qui se produit entre les alcalins du ciment et certains composants actifs présents dans certains types de granulats [50]. Selon la nature des granulats impliqués, on peut distinguer deux formes principales de l'alkali-granulats : réaction alkali-silice, réaction alkali-carbonate [48]. La réaction conduit à la formation d'un gel gonflant qui peut exercer des contraintes internes de traction qui favorisent la formation de microfissures dans le béton [50]. En fait, le processus de l'alkali-réaction ne se déclenche dans un béton qu'en présence simultanée des granulats réactifs, des teneurs élevées en alcalins et de l'eau [12]. Alors, si on peut garantir que le béton est, et reste, totalement assécher, on peut presque obtenir un béton sans dommages, même s'il renferme des granulats réactifs et des alcalins [13,51].

### **I.3.11 Érosion et cavitation**

L'érosion et la cavitation sont des modes de dégradation qui se produisent dans les ouvrages hydrauliques en béton tels que les déversoirs, les conduites d'eau et d'égout, dans lequel l'eau est chargée en matières solides [13,52]. L'écoulement d'eau chargée en particules solides en suspension à la surface du béton peut conduire à des pertes de masse progressive dues à l'érosion. En fait, ce n'est pas l'eau, en soi, qui est responsable des dommages dus à l'érosion, mais c'est le résultat de mouvement de sédiments solides qui frotte la surface du béton et entraîne [11,53] et peut dans certains cas altérer l'intégrité mécanique et le fonctionnement correct de la structure du béton [54].

Les ouvrages hydrauliques peuvent également être endommagés par la cavitation, un phénomène qui se produisant lorsque l'eau qui s'écoule sur la surface du béton subit une chute de pression en un endroit donné, atteignant ainsi la pression de vapeur saturante de l'eau correspondante à la température ambiante [13]. Dans ces conditions, une fraction d'eau se vaporise formant des bulles de gaz dans le liquide [55]. Lorsque ces bulles de gaz qui s'écoule en aval entrent avec l'eau dans une zone à forte pression, elles implosent [11,54]. Comme illustré dans la Figure (I.5), l'implosion de ces bulles à la surface du béton provoque l'injection de l'eau à grande vitesse dans l'espace précédemment occupé par la bulle, exerçant ainsi une grande pression sur une surface limitée du béton [13,56]. Par conséquent, des piqûres locales apparaissent à la surface de béton, rendant celle-ci très inégale et raboteuse, ce qui risque d'aggraver encore les dommages [11,54].



**Figure I.5** Formation de la cavitation et mécanisme de dommage sur la surface d'un déversoir [57]

## I.4. Relations entre l'eau et les propriétés intrinsèques du béton

### I.4.1 Conductivité thermique

Le béton peut se révéler être un mauvais conducteur thermique [11,58]. La connaissance de la conductivité thermique du béton permet d'évaluer son pouvoir de transmission des flux de chaleur ou d'isolation thermique [12,59]. Puisque la conductivité de l'air est jusqu'à vingt fois plus faible que celle de l'eau, le degré de saturation en eau du réseau poreux est l'un des principaux paramètres influençant la conductivité thermique du béton [11,60]. L'effet de ce paramètre est particulièrement important sur la conductivité des bétons de granulats légers qui se caractérisent par une porosité relativement élevée par rapport à celle des bétons ordinaires [12]. Par exemple, une augmentation de 10% du taux d'humidité du béton est suffisante pour augmenter sa conductivité thermique par 50% [11].

### I.4.2 Résistivité électrique

La résistivité électrique du béton a une importance dans certaines applications, particulièrement dans le processus de corrosion des armatures [13,61]. La résistivité électrique du béton est influencée grandement par le degré de saturation en eau du béton, et également par la concentration des sels dans la solution interstitielle et la structure poreuse du béton [12,62]. Des études ont démontré que la résistivité du béton sécher à l'air est d'environ  $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$  [62] et cette valeur augmente à environ  $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$  pour le béton sécher au four (à  $105^\circ \text{C}$ ) [63]. La résistivité élevée associée au faible degré de saturation en eau peut être expliquée par le fait que, dans ce cas, le passage du courant électrique est effectué à travers l'eau du gel, qui est moins conductrice électriquement en raison du lien chimique fort avec la surface interne des pores et

de leur distribution discontinue [5,61]. En revanche, dans le cas de béton humide, le courant électrique est essentiellement conduit à travers les ions présents dans l'eau évaporable [5].

## **I.5. Conclusion**

L'eau est peut-être décrite comme l'accompagnement permanent du béton. En pratique, la quantité d'eau utilisée pour obtenir la maniabilité convenable de béton frais est toujours supérieure à celle réellement nécessaire à l'hydratation du ciment. Par conséquent, une partie de l'eau sera liée chimiquement aux hydrates du ciment et un surplus d'eau demeure présent dans les pores capillaires du béton et continue de modifier sa microstructure. En outre, le béton dans son environnement entre couramment en contact avec l'eau pure ou contenant des sels dissous. L'eau peut agir à l'intérieur du réseau poreux des bétons ou à l'extérieur, peut l'attaquer physiquement ou chimiquement, peut agir sous forme liquide, vapeur ou même glacé. Il existe donc de nombreuses relations entre l'eau et le béton dans lesquelles l'eau peut considérer parfois comme l'ami du béton et parfois comme l'ennemi :

- La dissolution des phases anhydre du ciment puis leur évolution en phases hydratées ne peut être effectué qu'en présence d'eau. Après l'hydratation, il y a une coexistence permanente d'eau dans les pores de la pâte de ciment hydraté.
- Il existe une interaction réelle entre la cure à l'eau et la qualité du béton.
- Le phénomène de retrait de séchage confirme l'existence d'une relation particulière entre l'eau présente dans les pores du béton durci et sa déformation.
- L'eau joue aussi un rôle important dans la déformation différée en fluage du béton.
- Les cycles séchage-mouillage du béton sont le synonyme de la pénétration des sels agressifs contenus dans l'eau au sein du béton.
- Les bétons BHP qui ont des rapports E/C faibles, auront une sensibilité particulière à l'eau à haute température.
- En tant que pont pour le transport d'ions agressifs à l'intérieur du béton, l'eau peut également être une source de plusieurs types de dégradations chimiques du béton.
- L'eau est le moteur de la réaction de corrosion des armatures enrobées de béton.
- L'eau est le responsable des dégradations du béton associées aux cycles gel-dégel.
- L'eau est le paramètre essentiel qui gère la réaction de carbonatation du béton.

- L'eau est un paramètre essentiel dans les dégradations du béton dues à l'alcali-réaction.
- L'érosion et la cavitation du béton sont des phénomènes liés à la circulation d'eau à la surface du béton.
- La teneur en eau du béton est un facteur important de son comportement thermique.
- La teneur en eau du béton conditionne énormément sa résistivité électrique.

## **Chapitre 2 :**

# **Qualité de l'eau de gâchage**

## II.1. Introduction

Comme illustré précédemment, l'eau de gâchage est un ingrédient clé dans l'opération de l'hydratation du ciment et le processus de développement de la résistance mécanique du béton.

L'eau de gâchage est généralement la quantité d'eau introduite lors de malaxage du béton au mélange de ciment et granulats. Il est pratiquement admis que l'effet de l'eau de gâchage sur le béton frais et durci est envisagé selon trois aspects essentiels [11] :

1. La quantité de l'eau de gâchage exprimée par le rapport Eau/Ciment. Toute augmentation de rapport E/C rend le béton poreux, moins résistant et par conséquent vulnérable aux attaques chimiques.
2. La quantité de l'eau de gâchage par mètre cube du béton : c'est le paramètre qui influence largement la maniabilité du béton frais.
3. La qualité de l'eau de gâchage : la qualité de l'eau de gâchage est un paramètre très important dans le mélange de béton.

Les substances présentes dans l'eau de gâchage peuvent avoir des influences défavorables sur certaines propriétés du béton frais comme l'ouvrabilité et le temps de prise du ciment, sur le développement de la résistance et la durabilité du béton durci et aussi sur la résistance des armatures à la corrosion [5]. En plus, l'effet de la qualité de l'eau de gâchage sur le béton peut être superficiel par la modification des propriétés esthétiques du matériau (taches et efflorescences). Pour ces raisons, il est très important que la qualité d'eau de gâchage doive être bien contrôlée, avant d'être utilisée pour le malaxage de béton. Malheureusement, le contrôle de la qualité de l'eau de gâchage attire généralement moins d'attention que le contrôle de la qualité des autres constituants du béton (sable, gravier, ciment, adjuvant).

Le présent chapitre présente une synthèse bibliographique relative à la qualité de l'eau de gâchage. Dans un premier temps, les exigences normatives encadrant la convenance et le choix d'une eau de gâchage sont abordées. Dans un second temps, les effets de différentes substances susceptibles d'être présentes dans l'eau de gâchage sont détaillés. Dans un dernier temps, une synthèse des études antérieures portées sur l'utilisation des eaux non potables dans les mélanges de béton est présentée.

## **II.2. Exigences normatives concernant l'eau de gâchage**

La norme européenne EN 1008-2002 [64] et la norme ASTM C1602 [65] ont spécifié les exigences concernant l'eau de gâchage et les méthodes permettant d'apprécier l'aptitude de son l'emploi. Selon la norme américaine ASTM C1602 [65], la teneur en eau totale du béton considéré lors de l'évaluation de la qualité de l'eau doit être composé de :

- L'eau de gâchage.
- L'eau adsorbée à la surface des granulats (humidité superficielle des granulats).
- L'eau apportée par les adjuvants employés sous forme de liquide qui doit être prise en compte si la teneur en eau de l'adjuvant est suffisante pour augmenter le rapport E/C de 0.01 ou plus.
- La glace utilisée pour remplacer une partie de l'eau de gâchage lors d'un bétonnage par temps chaud.

Selon les deux normes, le premier critère de l'évaluation de la convenance d'un type d'eau pour la production de béton est son origine. Les sources d'eau suivantes peuvent alors être distinguées [64,65] :

- 1.** Eau potable : l'eau propre à la consommation humaine.
- 2.** Eau récupérée de la fabrication du béton : l'eau de lavage des camions-malaxeurs, des bétonnières et des pompes à béton, récupérée dans les bassins de décantation de la centrale à béton.
- 3.** Eau de mer et eaux saumâtres : l'eau salée provenant des océans et des mers et aussi des rivières et des lacs saumâtres.
- 4.** Eau non potable : toutes les autres sources d'eau qui ne sont pas propres à la consommation humaine ou qui contiennent des substances en quantité suffisante pour influencer sur sa couleur, son odeur et son goût. Il peut s'agir des eaux d'origine souterraine et les eaux superficielles naturelles.
- 5.** Eau combinée : une combinaison d'une ou plusieurs sources d'eau définies ci-dessus, mélangées avant ou pendant le malaxage du béton.
- 6.** Eaux usées : les eaux chargées de polluants provenant de l'activité humaine.

Selon les deux normes, l'eau potable est considérée convenable à la fabrication du béton et ne nécessite aucun essai. L'eau non potable et l'eau récupérée de la fabrication de bétons peuvent être appropriées à la fabrication du béton sous réserve qu'elles répondent aux exigences de performance énoncées dans les normes (Tableau (II.1)). Ces exigences sont données sous forme de pourcentage de variation de la résistance à la compression et des temps de prise initial et final des éprouvettes préparées avec l'eau testée par rapport à ceux obtenus avec l'eau potable (ou distillée). Pour être admissible, l'eau testée ne doit pas diminuer la résistance à la compression à 7 jours à plus de 10% et provoquer un écart de plus de 25% dans le temps de prise du ciment.

L'eau de mer et les eaux saumâtres ne sont pas adaptées à la production du béton armé ou précontraint, mais elles peuvent être utilisées pour le malaxage de béton non armé [64,65]. Les eaux usées sont interdites pour le malaxage de tous les types de bétons [64].

L'eau combinée peut être utilisée avec les pourcentages qui répondent aux exigences de performances spécifiées dans les normes (Tableau (II.1)) [66]. Par exemple, si l'eau testée est utilisée à un pourcentage de 70% comme eau de gâchage et les résultats obtenus sont satisfaisants, toutes les autres dilutions inférieures à ce pourcentage sont autorisées.

En plus, comme indique le Tableau (II.1), les deux normes ont spécifié des exigences chimiques qui ne devraient pas être dépassées dans l'eau de gâchage. La norme européenne EN1008-2002 [64] a fourni en plus des prescriptions pour le contrôle préliminaire de l'eau de gâchage tel que : la couleur, l'odeur, les détergents, les huiles et graisses, les acides, les matières en suspension et les matières humiques. La norme stipule que l'eau qui ne conforme pas à au moins une de ces prescriptions ne peut être utilisée que si elle satisfait aux exigences de performance. De son côté, la norme ASTM C1602 [65] a fourni les cadences des analyses pour tester la conformité d'une nouvelle source d'eau.

Comme mentionné précédemment, les deux normes ont spécifié que l'eau potable est toujours convenable au malaxage du béton et ne nécessite aucun essai. Néanmoins, la potabilité de l'eau de gâchage n'est pas toujours le meilleur critère pour déterminer sa convenance. Certaines eaux potables naturelles, qui ont des effets bénéfiques sur la santé, peuvent être néfastes pour le béton. C'est le cas par exemple des eaux alcalines riches en carbonate et bicarbonate qui peuvent aggraver la réaction d'alcali-granulats dans le béton lorsque des granulats réactifs sont utilisés dans le mélange [5]. De même, l'eau qui contient une petite quantité de sucre peut être potable, mais cette teneur de sucre peut retarder considérablement la

**Tableau II.1.** Critères de l'évaluation de la qualité de l'eau de gâchage selon les normes EN 1008-2002 [64] et ASTM C1602 [65]

Normes	Exigences Chimiques	Exigences de Performances	
		Résistance à la compression	Temps de prise
<b>ASMT C1602</b>	Alcalin ( $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$ ) $\leq 600$ ppm Sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) $\leq 3\ 000$ ppm Chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) $\leq 500$ ppm pour le béton précontraint, les tabliers de ponts, ou les pour d'autre usage Chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) $\leq 1\ 000$ ppm pour le béton armé Solides totaux par masse : $\leq 50\ 000$ ppm	La résistance moyenne à la compression à 7 jours des éprouvettes de béton ou de mortier doit atteindre au moins 90% de la résistance moyenne des éprouvettes de contrôle (préparées avec de l'eau potable ou distillée).	Le temps de début de prise ne doit pas s'écarter de la valeur obtenue avec les éprouvettes de contrôle de plus de 1 heure. Le temps de fin de prise ne doit pas s'écarter de la valeur obtenue avec les éprouvettes de contrôle de plus de 1 heure :30 minutes.
<b>EN 1008:2002</b>	pH $\geq 4$ Alcalin $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 1\ 500$ mg/l Sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) $\leq 2\ 000$ mg/l Chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) $\leq 500$ mg/l pour le béton précontraint ou coulis Chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) $\leq 1\ 000$ mg/l pour le béton armé ou avec insert Chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) $\leq 4\ 500$ mg/l pour le béton non armé et sans insert Zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ ) $\leq 100$ mg/l Plomb ( $\text{Pb}^{2+}$ ) $\leq 100$ mg/l Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) $\leq 500$ mg/l Sucre $\leq 100$ mg/l Phosphate ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) $\leq 100$ mg/l	La résistance à la compression à 7 jours et des éprouvettes de béton (ou de mortier) doit atteindre au moins 90% de la résistance moyenne des éprouvettes de contrôle (préparées avec de l'eau distillée ou dé-ionisée).	Le temps de début de prise ne doit pas être inférieur à 1 heure et ne doit pas s'écarter de plus de 25% du temps de début de prise obtenu avec les éprouvettes de contrôle. Le temps de fin de prise ne doit pas être supérieur à 12 heures et ne doit pas s'écarter de plus de 25% du temps de prise obtenu avec les éprouvettes de contrôle.

prise du ciment [67,68]. Par contre, plusieurs types d'eaux non potables peuvent convenir, dans certains cas, au gâchage du béton [67].

D'autre part, l'évaluation de la convenance de l'eau testée en se basant seulement sur le temps de prise et la résistance à la compression à 7 jours ne semble pas suffisante dans tous les cas. À titre d'exemple, le principal effet de l'utilisation des eaux qui contiennent une forte concentration de chlorure est d'accélérer le développement de la résistance du béton au jeune âge. Toutefois, l'emploi de ces eaux dans le béton armé doit être limité en raison de la corrosion des armatures. Il est évident alors que la comparaison de temps de prise et de la résistance à 7 jours semble facile à effectuer, mais l'inaltérabilité possible du béton à long terme par la qualité de l'eau de gâchage testée n'est pas aisée à déterminer [67].

Par ailleurs, les exigences de contrôles préliminaires qui font référence à la sensation (l'odeur et le mauvais goût de l'eau) sont également révélées insuffisantes pour qualifier la conformité d'une source d'eau. Les études montrent que certains types d'eau qui ont des mauvais goûts, couleurs ou odeurs sont convenables à la production de béton dans certains cas, mais entraînent des effets négatifs sur les propriétés du béton dans d'autres [5]. Il semble alors que les essais de performances sont toujours indispensables.

### **II.3. Effets des substances contenues dans l'eau de gâchage sur les propriétés du béton**

Presque toutes les eaux, qu'elles soient d'origine souterraine ou superficielle, contiennent des substances minérales ou organiques, sous forme dissoute ou en suspension. La composition chimique de l'eau dépend de l'atmosphère d'où elle provient, les sols qu'elle contacte, la nature des couches géologiques qu'elle traverse, et les réactions biologiques dont elle est le siège [69].

La présence des substances dans l'eau de gâchage peut affecter les propriétés du béton (ou du mortier) à l'état frais et durci, sachant que les effets sont variables en fonction de la concentration et la nature des substances en cause. Il est alors important de préciser pour chaque type de substance contenue dans l'eau de gâchage la quantité maximale admissible. Généralement, l'eau contenant moins de 2 000 mg/l de solides dissous convient bien à la fabrication de béton [5,70]. En d'autres termes, l'eau avec un pH se situant entre 6.0 et 8.0 et qui n'est pas saline ou saumâtre et exempte de matière organique convient toujours au gâchage de béton [66]. Dans le cas contraire, l'eau en question doit obligatoirement subir des analyses qui permettent d'évaluer son effet sur les temps de prise du ciment et sur la résistance mécanique du béton.

Les deux principaux points qui doivent être clarifiés concernant la qualité de l'eau de gâchage sont : la manière dont les substances présentes dans l'eau de peuvent affecter la qualité du béton et les limites admissibles de ces substances. Les paragraphes suivants présentent les informations disponibles sur ces deux points pour certaines substances contenues dans l'eau de gâchage.

### **II.3.1 Chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) :**

La teneur élevée de chlorure dans le béton est une des causes principales de dégradations des structures en béton armé (et précontraint) dues à la corrosion des armatures. Lorsque les chlorures atteignant des concentrations critiques, ils attaquent d'une façon localisée la couche de passivation initialement formée sur la surface des armatures par le pH élevé de la solution interstitielle du béton. Cette attaque peut provoquer la formation des foyers très locaux de corrosion, appelés piqûres de corrosion (pitting), qui peut conduire rapidement à une perte locale de la section des armatures. Il est considéré que la concentration de chlorure (soluble dans l'acide) à partir de laquelle commence la dépassivation des armatures est située entre 0.2 et 0.4% de la masse du ciment [66].

Il est intéressant de noter que les chlorures peuvent être incorporés dans le mélange du béton au moment de malaxage avec les constituants du béton (granulats, adjuvants, matériaux cimentaires, eau de gâchage) ou pénétrer dans le béton au fil du temps, notamment dans les structures en zones marines ou celles exposées aux sels de déverglaçages. Comme il est essentiel de prendre en compte la teneur totale d'ions chlorure dans le mélange de béton, la difficulté réside donc dans la détermination de la teneur maximale en ions de chlorures pour chaque composant du béton séparément.

La teneur totale de chlorure dans le béton ne doit pas dépasser certaines limites, en fonction de type d'ouvrage réalisé et de l'environnement auquel il est exposé. Il serait logique d'exprimer cette teneur en concentration de chlorures libres dissous dans la solution interstitielle du béton, car ce sont eux qui sont les seuls responsables de la corrosion des armatures. Il est estimé qu'entre 50 et 85% de la teneur totale en chlorures dans le béton sera soluble dans l'eau [66], donc libre, et le reste sera lié, soit chimiquement ou physiquement, à la pâte de ciment hydratée. Les normes EN 1008-2002 [64] et ASTM C1602 [65] limitent la teneur en ions de chlorure dans l'eau de gâchage à 1 000 mg/l dans le béton armé, à 500 mg/l dans le béton précontraint et à 4 500 mg/l dans le béton non armé. Les apports de chlorure par les autres constituants du béton doivent aussi être considérés. Concernant la confection du béton neuf, la

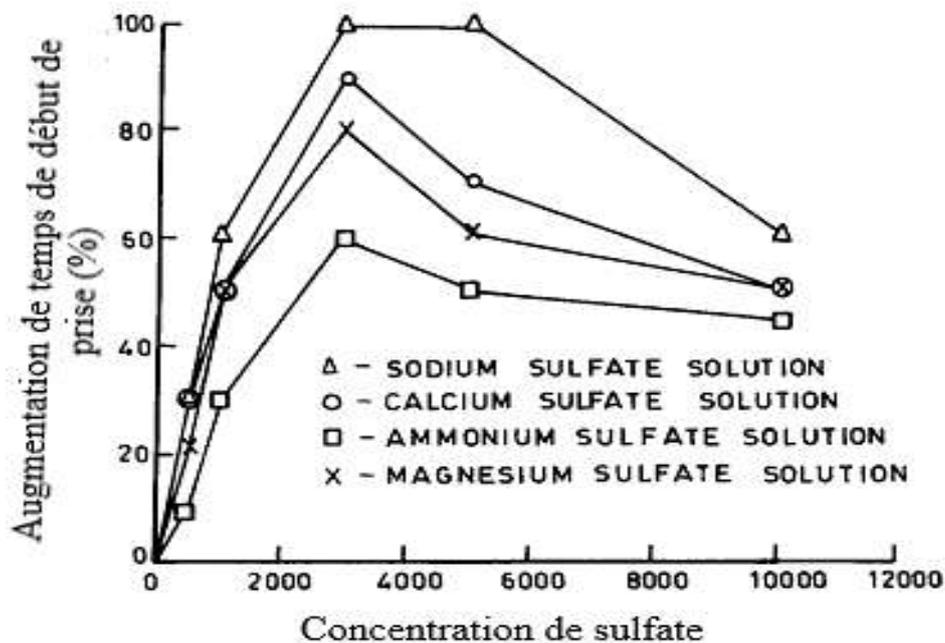
norme EN 206-1 [71] précise les limites de pourcentage total d'ions chlorure (en % de la masse du ciment) admissible dans le mélange de béton selon l'utilisation du béton et la classe de chlorures.

La présence des chlorures dans les sources d'eau peut avoir plusieurs sources. Généralement, les ions de chlorures identifiés dans les ressources d'eau peuvent être sous forme de chlorure de sodium, chlorure de calcium ou chlorure de magnésium. Il a été rapporté que l'influence des ions chlorure sur le développement de la résistance du béton et sur le comportement à la corrosion des armatures enrobées de béton dépend du cation associé [72]. Das et Pradhan [73] ont confirmé que l'addition de chlorure de calcium à l'eau de gâchage a provoqué une accélération plus importante au développement de la résistance du béton, et conduit à une plus grande fixation des chlorures (par la formation de chloroaluminates) que le chlorure de sodium et le chlorure de magnésium. Ces trois dernières formes de chlorures peuvent être tolérées en grandes quantités dans l'eau de gâchage lorsque le béton est placé dans un environnement sec et quand des précautions spéciales sont prises pour minimiser le risque de corrosion des armatures [66]. Dans ces conditions, la concentration autorisée peut atteindre 10 000 ppm pour le chlorure de sodium, 50 000 ppm pour le chlorure de calcium et 40 000 ppm pour le chlorure de magnésium [66].

### **II.3.2 Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) :**

La teneur élevée des ions de sulfate dans l'eau de gâchage peut altérer les propriétés mécaniques du béton suite à l'expansion engendrée par la précipitation de nouveaux hydrates dans la matrice du ciment hydraté [74,75]. Kumar et Kameswara Rao [34] ont observé que, pour tous les cations de sulfate testés, la présence des ions de sulfate dans l'eau de gâchage entraîne d'abord une augmentation de temps de prise du ciment lorsque la concentration croît de 0 à 3 000 ppm, puis une diminution au-delà (Figure (II.1)). Un résultat similaire a été rapporté par Abdel Gawwad et al. [74], où ils remarquent une augmentation dans la cinétique d'hydratation lorsque la concentration de  $\text{MgSO}_4$  croît de 0 à 12% de la masse de l'eau, puis une diminution pour la concentration de 20%. Les auteurs expliquent que la présence des anions forts ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) dans la solution interstitielle permet de diminuer la solubilité des autres anions du ciment (silicate et aluminate), par conséquent entraîne l'augmentation des temps de prise. En plus, ils lient la diminution de temps de prise enregistré par la suite à l'augmentation de la solubilité des aluminates en présence de forte quantité de sulfates.

Les sulfates sont présents en diverses formes dans les ressources d'eau. Les concentrations de sulfate les plus élevées dans les eaux sont généralement d'origine naturelle qui comprend le sulfate de calcium, le sulfate de magnésium et le sulfate de sodium. Les résultats des essais de laboratoire montrent que l'effet des ions sulfate sur la dégradation du béton est fortement lié à la nature de cation associé [75,76]. Kumar et Kameswara Rao [34] ont observé que, pour toutes les concentrations testées, le pourcentage d'augmentation maximale de temps de prise est obtenu lorsque le sodium ( $\text{Na}^+$ ) est le cation associé au sulfate (Figure II.1).



**Figure II.1** Effet de différents sulfates sur le temps de début de prise du ciment [34]

La comparaison des exigences des normes EN 1008-2002 [64] et ASTM C1602 [65] montre qu'il existe une disparité entre les valeurs limites des ions de sulfate autorisées dans l'eau de gâchage. La norme EN 1008-2002 [64] limite la teneur en ions de sulfate à 2 000 mg/l et la norme ASTM C1602 [65] limite cette teneur à 3 000 mg/l. En outre, en cas d'utilisation d'un ciment résistant aux sulfates, il a été rapporté que les concentrations de sulfate autorisées dans l'eau de gâchage peuvent atteindre jusqu'à 10 000 mg/l pour le sulfate de sodium et 25 000 mg/l pour le sulfate de magnésium [66].

### **II.3.3 Carbonates et bicarbonates :**

Les alcalins forts comme le carbonate/bicarbonate de sodium et le carbonate/bicarbonate de potassium, peuvent provoquer une prise du ciment très rapide ou trop lente, tout dépend de la concentration à laquelle sont ajoutés et le type de ciment utilisé [72]. Venkateswara Reddy et al. [77] ont examiné le temps de prise du béton malaxé avec des concentrations variables en carbonate et bicarbonate de sodium allant de 0 à 15 g/l. Ils rapportent qu'avec l'augmentation de la teneur de carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) dans l'eau de gâchage, les temps de prise initial et final sont accélérés et que l'addition de 4 g/l de carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) conduit à une diminution considérable de temps de fin de prise. Par contre, bicarbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{HCO}_3$ ) provoque un effet inverse (effet retardateur). L'étude montre aussi que l'addition des concentrations fortes en carbonate et bicarbonate de sodium (supérieur à 6 g/l pour le  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  et supérieur à 10 g/l pour  $\text{Na}_2\text{HCO}_3$ ) altère considérablement la résistance à la compression et à la traction du béton à 28 et à 90 jours [77]. Il est alors déconseillé d'utiliser l'eau de gâchage qui contient une teneur supérieure à 1 000 mg/l de carbonate et bicarbonate alcalin sans de le tester pour avoir son effet susceptible sur la résistance mécanique du béton et de tenir compte l'endommagement du béton par l'alcali-réaction [5,66].

Le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) et le carbonate de magnésium ( $\text{MgCO}_3$ ) sont très peu solubles dans l'eau, ils se trouvent donc rarement en concentration suffisante pour affecter la résistance du béton. Le bicarbonate de calcium ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ) et le bicarbonate de magnésium ( $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ ) ne portent pas préjudice à la résistance du béton lorsque ces concentrations ne dépassent pas 400 mg/l dans l'eau de gâchage [66].

### **II.3.4 Sels inorganiques :**

La présence des sels inorganiques (manganèse, étain, zinc, cuivre, plomb) dans l'eau de gâchage peut retarder l'hydratation du ciment et le développement de la résistance mécanique du béton [72]. Les sels de zinc, de cuivre et de plomb sont de puissants retardateurs [66,78]. Madhusudana Reddy et Ramana Reddy [79] ont constaté une augmentation significative de temps d'hydratation accompagner par une diminution importante de la résistance à la compression lorsque des concentrations élevées en plomb ( $\geq 3000$  mg/l) sont ajoutées à l'eau de gâchage.

D'autres sels comme l'iodate de sodium, le phosphate de sodium, l'arséniate de sodium et le borate de sodium, lorsqu'ils sont présents à quelques dixièmes de points de % en masse du ciment, retardent considérablement le temps de prise et inhibent fortement le développement

de la résistance du béton [66,72]. En général, des concentrations jusqu'à 500 mg/l de ces sels peuvent être tolérées dans l'eau de gâchage [66]. Le sulfure de sodium est un autre sel qui peut affecter la résistance du béton. Les eaux qu'elles contiennent une teneur de 100 mg/l en sulfure de sodium doivent être testées avant d'être utilisées comme eau de gâchage pour béton [66].

### **II.3.5 Sels ferreux :**

Les eaux souterraines naturelles contiennent rarement plus de 20 à 30 mg/l de fer [66]. Toutefois, les eaux acides rejetées par les mines peuvent contenir des concentrations élevées en fer. Il a été rapporté que des concentrations allant jusqu'à 40 000 mg/l des sels ferreux ne sont pas considérées comme préjudiciables sur la résistance du béton [66,70].

### **II.3.6 Eaux alcalines :**

Il est rapporté que la présence des concentrations élevées en alcalin dans le mélange de béton peut conduire à l'accélération de la réaction de l'hydratation du ciment ou à une expansion importante qui se traduit par une réduction considérable de la résistance finale de béton [80]. Il est à noter que l'addition d'une teneur de 0.5% de la masse du ciment d'hydroxyde de sodium dans l'eau de gâchage ne porte aucun effet préjudiciable sur le développement de la résistance du béton si cette teneur ne pouvait pas conduire à une prise rapide [66]. Cependant, plus la teneur en alcali est élevée, plus la résistance de béton est faible [80]. En outre, des concentrations allant jusqu'à 1.2 % de la masse du ciment en hydroxyde de potassium n'entraînent pas une influence marquée sur la résistance du béton confectionné par certains types des ciments, mais les mêmes concentrations peut réduire considérablement la résistance à 28 jours avec d'autres types de ciment [66]. Lorsqu'il est prévu d'utiliser des granulats réactifs, il est aussi indispensable de limiter la teneur en alcalin dans le béton. Dans ce cas, les pourcentages en alcalins cités ci-dessus doivent donc être strictement contrôlés pour réduire le risque d'alcali-réaction dans le béton.

### **II.3.7 Eaux acides :**

Les effets des eaux acides utilisées comme eaux de gâchage sur les propriétés de béton dépendent de la concentration de l'acide dans l'eau, généralement donnée à travers de la valeur de pH. Il a été rapporté que les acides inorganiques, tels que l'acide chlorhydrique HCl et sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, présents à des concentrations allant jusqu'à 10 000 mg/l dans l'eau de gâchage n'entraînent pas une influence marquée sur la résistance du béton [66,70]. Cependant, il faut tenir compte l'effet des ions de chlorure dans l'acide chlorhydrique (HCl) qui catalyse le processus de corrosion des armatures d'acier enrobées dans le béton. De façon générale,

l'utilisation des eaux acides avec des valeurs de pH inférieurs à 3.00 pour le gâchage de béton doit être évitée [66,81]. La présence des acides organiques, tels que l'acide tannique et humique, en fortes concentrations dans l'eau de gâchage peut retarder la prise du ciment et par conséquent réduire la résistance du béton [66,70]. Abrams a rapporté qu'avec l'augmentation de l'acide tannique dans l'eau de gâchage, la résistance mécanique du béton diminue progressivement et que l'addition d'une concentration en acide tannique égale à 3% de la masse de l'eau de gâchage conduit à une réduction de plus de 40% à la résistance du béton [66].

### **II.3.8 Huile :**

Différents types d'huile sont parfois présents dans l'eau de gâchage. L'effet d'huile sur le béton dépend fortement de sa nature. L'huile minérale (à base de produits pétroliers), à l'exclusion de tout mélange avec des huiles animales ou végétales, peut avoir moins d'influence sur le développement de la résistance du béton que les deux autres types d'huiles [66,78]. Cependant, l'huile minérale, à des concentrations supérieures à 2% de la masse du ciment, peut entraîner plus de 20% de réduction à la résistance du béton [66,70].

### **II.3.9 Sucre :**

Les sucres sont considérés comme des puissants retardateurs de prise pour les ciments Portland [82]. L'effet retardateur du sucre dépend fortement de la quantité présente dans le mélange de béton. Il est rapporté qu'une petite quantité de sucre (environ 0.05% de la masse du ciment) provoquent un retardateur de prise acceptable ; le retard de prise est d'environ 4 heures [5]. Une quantité plus grande de sucre (0.25% de la masse du ciment ou plus) peut provoquer un temps de prise accéléré et une réduction à la résistance du béton à 28 jours [66,70,72]. Il est généralement admis que l'action retardatrice du sucre est dû à l'adsorption des molécules de sucre, soit à la surface des particules du ciment anhydre, soit à la surface des hydrates, soit des deux, format ainsi une barrière à l'hydratation du ciment [72]. Lorsque le sucre est utilisé comme retardateur de prise contrôlé, la résistance du béton à 7 jours est sérieusement réduite, mais à 28 jours la résistance peut être améliorée par rapport à celle d'un béton sans sucre [5,72]. Selon Neville [5], ce phénomène est probablement dû au fait que le retardateur de prise forme un gel d'hydrates du ciment plus dense. En général, chaque type de sucre influe de façon différente sur le temps de prise et sur la résistance mécanique du béton [70].

Il est aussi intéressant de noter que les effets du sucre dépendent beaucoup de son type, de la composition chimique de ciment utilisé et des conditions ambiantes [72]. Généralement, le temps initial de prise augmente avec la teneur en sucre et diminue avec la température et la

teneur en ciment. Dans un cas typique, une concentration de 0.1% de la masse du ciment de saccharose permet d'augmenter le temps initial de prise de 4 à 14 heures, tandis qu'une concentration de 0.25% permet de le retarder à 6 jours [83]. Il est généralement admis qu'une concentration de 500 mg/l de sucre dans l'eau de gâchage ne provoque pas un effet préjudiciable sur le développement de la résistance mécanique du béton [66]. L'eau qui contient des quantités de sucre qui dépassent cette limite doit être testée avant son utilisation pour le malaxage du béton [70].

### **II.3.10 Matière en suspension :**

La turbidité de l'eau est généralement due à la présence de matière en suspension telles que les argiles, les limons, les grains de silice et les micro-organismes. Il a été rapporté que les teneurs élevées en particules fines en suspension dans l'eau de gâchage ne provoquent pas une grande influence défavorable sur le développement de la résistance mécanique du béton, mais elles peuvent nuire aux autres propriétés du béton telles que la demande en eau et le retrait [5,66]. Une teneur d'environ 2 000 mg/l de particules minérales terreuses (argile, limon, sable fin) est tolérée dans l'eau de gâchage [5,66,78]. Il est déconseillé d'utiliser les eaux contiennent des concentrations plus élevées en solide qu'après passage dans des bassins de décantation afin de réduire la quantité des solides qui peut être introduite au mélange du béton. Lorsque les éléments fins proviennent des matériaux entrant dans la confection de béton (fines de ciment, fines de sables...) sont retournés dans l'eau récupérée de processus de fabrication du béton (appelée eau recyclée), la teneur admissible en solide dans l'eau est beaucoup plus élevée. La norme EN 1008-2002 [64] a exigé que la teneur supplémentaire de matériaux solides dans l'eau recyclée doive être inférieure à 1% de la masse du granulat et la norme ASTM C1602 [65] a limité cette teneur à 50 000 mg/l.

Il a été rapporté que les algues présentes dans l'eau de gâchage réduisent la liaison entre la pâte de ciment et les granulats [5,70]. Les algues entraînent aussi la réduction de la résistance à la compression du béton, soit par un effet d'entraînement d'air diminuant ainsi la résistance à la compression du béton, soit par l'influence sur le processus d'hydratation du ciment [5,66]. Il a été démontré que la présence d'un teneur en algues égale à 0.1% de la masse d'eau de gâchage engendre un pourcentage d'air occlus de l'ordre de 6 à 7% du volume de béton, provoquant ainsi plus de 15% de réduction à la résistance du béton [70]. Il est recommandé alors que l'eau de gâchage ne doit pas contenir une concentration en algues supérieure à 1 000 mg/l [66].

## **II.4. Effets de la provenance de l'eau de gâchage sur la qualité du béton**

Depuis l'invention de béton, l'eau potable a été utilisée, et l'est toujours, pour son malaxage. La pénurie croissante et la mauvaise gestion de ressources d'eau potable dans de nombreuses régions de monde, les zones arides en particulier, ont orienté l'industrie du béton vers la recherche des nouveaux types d'eaux impures pour remplacer l'eau potable. L'idée d'utiliser d'autres types d'eaux impures à la place de l'eau potable dans le béton remonte à 1924, où Abrams [84] avait effectué des essais sur environ 6 000 échantillons de mortier et de béton confectionnés par 68 échantillons d'eau d'origine différents pour juger leurs aptitudes à être utilisées comme eaux de gâchage. Pour cela, les résultats des essais de prise et de la résistance à la compression (d'une période allant de 3 jours à 2.33 ans) des éprouvettes préparées avec des eaux fraîches (dans la plupart des cas eau potable) ont été comparés avec celles des éprouvettes préparées avec des eaux impures. Les principales conclusions de cette étude sont [84] :

**1-**Dans la plupart des cas, les temps de prise des pâtes de ciment préparées avec des eaux impures étaient à peu près les mêmes que ceux obtenus avec les eaux fraîches. D'une manière générale, les résultats des essais ont montré que le temps de prise n'est pas un indicateur fiable pour évaluer l'aptitude d'une source d'eau à être utilisée comme eau de gâchage pour béton.

**2-**Malgré la grande variabilité du type et d'origine d'eaux testées, la plupart des échantillons d'eaux impures n'ont montré aucune influence significative sur les propriétés du béton en raison de la faible quantité des substances chimiques présentes dedans.

**3-**Pour l'évaluation d'une qualité d'eau impure, la comparaison de la résistance des éprouvettes de béton ou mortier fabriquées avec ce type d'eau avec celles fabriquées avec l'eau fraîche a été beaucoup plus significative.

**4-**La couleur et l'odeur de l'eau ne sont pas révélées adéquates comme critères d'évaluation de la qualité d'eau de gâchage.

**5-**L'eau distillée a donné des résistances du béton comparables à celle obtenue avec les autres types d'eaux fraîches.

**6-**Dans cette étude, il a été classé comme inappropriées les eaux avec lesquelles, après 28 jours, la résistance à la compression est inférieure à 85% de la résistance des éprouvettes de référence. Sur cette base, les eaux suivantes ont été jugées appropriées pour le gâchage du béton : l'eau des tourbières et des marais; les eaux ayant une concentration maximale de 1% de

$\text{SO}_4^{2-}$ ; l'eau de mer (mais pas pour le béton armé); l'eau alcaline ayant une concentration maximale de 0.15% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ou  $\text{NaCl}$ ; l'eau de pompage des mines de charbon et de gypse; et les eaux usées des abattoirs, des brasseries, de raffineries de pétrole, des usines de gaz et des usines de peinture et de savon.

7-Sur la base de la résistance minimale de 85%, les eaux suivantes ont été jugées inappropriées pour le gâchage du béton : l'eau acide ; l'eau de trempage à la chaux provenant de tannerie ; l'eau fortement carbonatée ; l'eau contenant plus de 5% de chlorure de sodium ; et l'eau contenant de sucre ou des composés similaires.

Après l'étude d'Abrams, d'autres recherches ont été élaborées pour évaluer la possibilité de l'utilisation de diverses sources d'eaux non potables pour le malaxage de béton. Les paragraphes suivants présentent quelques études ayant abordé cette thématique.

#### **II.4.1 Eaux naturelles**

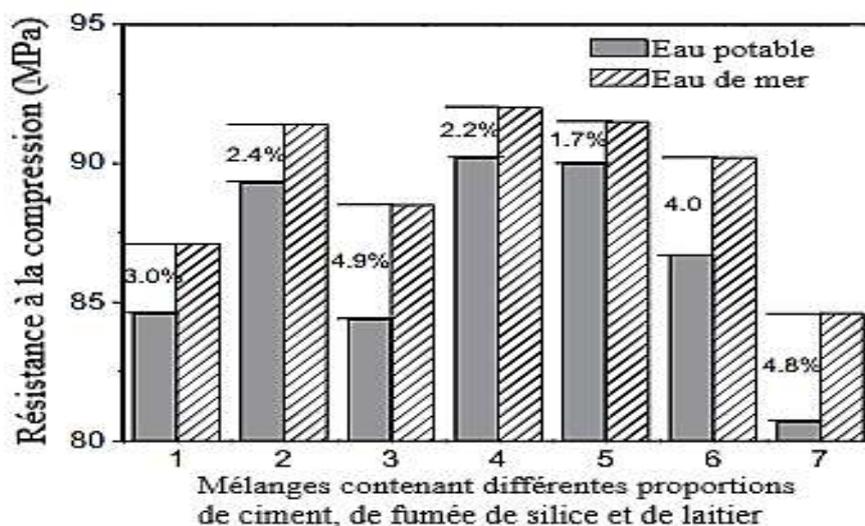
Plusieurs chantiers de construction, en particulier ceux qui sont éloignés et dépourvus de réseau d'eau, utilisent l'eau disponible sur le site du chantier pour le malaxage de béton, en raison des coûts supplémentaires liés à l'approvisionnement en eau par les camions-citernes ou pour d'autres raisons. Dans ce cas, les eaux de surface (de rivières, étangs, lacs, mer) et les eaux souterraines (nappes phréatiques, nappes profondes) peuvent être exploitées. L'usage des eaux profondes pour le malaxage de béton dépend beaucoup de type et de concentration des substances qu'elles contiennent [85,86]. Ghorab et al. [87] ont rapporté que l'utilisation des eaux du Nil (de l'Égypte) a entraîné une accélération de prise de ciment Portland par 4% et une augmentation de la résistance à la compression de béton. En général, les eaux qui proviennent d'étangs, de lacs et de rivières et qui ont de faibles teneurs en limon, algues et composés organiques et qui ne sont pas salées ou polluées par des eaux usées sont révélées convenables à la confection de béton [88].

- **Eaux de mer et eaux saumâtres**

La caractéristique la plus importante de l'eau de mer et l'eau saumâtre est la salinité. L'eau de mer standard contient en moyenne 35 grammes de sel par kilogramme d'eau (g/kg) [89]. Les constituants chimiques majeurs de l'eau de mer sont : les ions de chlorure ( $\text{Cl}^-$ , ~19g/kg), de sodium ( $\text{Na}^+$ , ~11g/kg), de sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ , ~2.65g/kg), de magnésium, de calcium et de potassium [89]. Chlorure de sodium est le sel majoritaire dissous dans l'eau de mer (environ 78% en masse de sa salinité). La salinité des eaux saumâtres est inférieure à celle de

l'eau de mer. Outre le chlorure de sodium, les eaux saumâtres ont une composition chimique très diverse qui dépend beaucoup de la région et de type de la source.

Les résultats de la revue de la littérature concernant l'influence de l'eau de mer sur les propriétés du béton frais et durci sont souvent contradictoires [90]. Il est toutefois admis que l'effet exact de l'eau de mer sur les propriétés du béton dépend d'un certain nombre de facteurs : la composition chimique de l'eau de mer, le type du ciment, le rapport E/C et les conditions de cure [91]. En ce qui concerne les propriétés du béton frais, il a été montré que les ions de chlorure contenus dans l'eau de mer ont conduit à une augmentation de la vitesse de réaction d'hydratation du ciment, ce qui entraîne la diminution de temps de prise et le développement rapide de la résistance mécanique [91]. En outre, un grand nombre d'études affirment que la présence de l'eau de mer dans la pâte de béton frais n'a pas un effet significatif sur l'ouvrabilité de béton [91]. Li et al. [90] relie l'augmentation de la vitesse de réaction d'hydratation à l'augmentation de la concentration de chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) dans la solution interstitielle du béton. Le chlorure de calcium est formé par la réaction entre le chlorure de sodium  $\text{NaCl}$  présent dans l'eau de mer et la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) formée par l'hydratation du ciment. Chlorure de calcium est largement considéré comme l'accélérateur d'hydratation du ciment le plus efficace et qui augmente le développement de la résistance du béton à jeune âge. Par conséquent, il a été constaté que le béton gâché avec l'eau de mer durcit plus vite et présente des résistances élevées aux jeunes âges (3 et 7 jours) (Figure (II.2)), mais au-delà de 7 jours les résistances obtenues sont souvent un peu plus inférieures à celles obtenues avec le béton de référence [90,91].



**Figure II.2** Résistance à la compression de différentes pâtes de ciment contenant l'eau de mer à 3 jours d'hydratation [90]

D'autre part, l'augmentation de la quantité de chlorure libre dans la solution interstitielle entourant les armatures induite par l'utilisation de l'eau de mer comme eau de gâchage entraîne l'augmentation de risque de corrosion des armatures. Mohammed et al [92], qui ont placé des éprouvettes en béton armé dans un environnement marin pendant 15 ans, ont constaté que les barres enrobées dans le béton malaxé avec l'eau de mer ont développé des piqûres plus profondes et d'un nombre plus important que celles développées sur les barres de référence. Otsuki [93] a trouvé que l'influence négative de chlorure contenu dans l'eau de mer est relativement décroissante avec l'âge du béton. D'autre part, plusieurs études trouvent que le remplacement d'une partie de ciment Portland par des additions minérales, telles que le laitier de haut fourneau [90,94,95], et le métakaolin [96,97], améliore la durabilité de béton mélangé avec l'eau de mer. Nishida et al. [94] ont montré que l'utilisation de laitier avec l'eau de mer pour le malaxage du béton améliore la capacité de fixation des ions de chlorure et diminue le taux d'oxygène dissous autour des barres d'acier ce qui va améliorer considérablement la résistance à la corrosion des armatures.

#### **II.4.2 Eaux récupérées de l'industrie du béton**

Dans les dernières décennies, l'augmentation des activités de construction surtout dans les pays en développement a augmenté la demande du béton prêt à l'emploi en raison de sa haute qualité et de sa facilité d'utilisation. La production de béton prêt à l'emploi dans les centrales à béton génère à son tour une grande quantité d'effluents proviennent essentiellement de lavages en cours et en fin de journée des équipements et matériels destinés à la fabrication et la livraison de béton frais (camions tapis, pompes à béton, malaxeurs...etc.) et aussi de délavage des retours éventuels de béton frais (livraison de béton incomplète ou refusée, restes de béton retournés dans le camion-malaxeur...etc.) [98]. Ces eaux de lavage sont des mélanges très fluides constitués d'eau, des substances dissoutes et des particules en suspension. Les matières dissoutes et en suspension proviennent principalement des matériaux constituant le béton frais (grains de sable ou de gravier très fins, des particules de ciment hydratées et non hydratées, des restes de minéraux et de faibles quantités d'adjuvants) [99]. Les eaux de lavage sont alors susceptibles de présenter un pH élevé (de l'ordre de 10 à 13.5) et peuvent contenir des traces de métaux lourds en fonction des ciments et des adjuvants utilisés [100]. C'est pour cela que le rejet de ces effluents sans traitement adéquat dans les égouts municipaux ou dans les cours d'eau peut engendrer la détérioration du système, allant même jusqu'à la contamination de la nappe souterraine [101].

Les centrales à béton sont aujourd'hui équipées par des systèmes de recyclage et de traitement des restes de béton et des eaux de lavage. Le système de recyclage consiste à séparer les eaux chargées en fines et les résidus de sable et de graviers contenus dans le béton résiduel. Les eaux chargées sont ensuite clarifiées par sédimentation dans des bassins de décantation successifs ou acheminées dans un bassin d'homogénéisation afin de contrôler et d'uniformiser ces caractéristiques physico-chimiques. Cette solution permet la réutilisation des résidus de sable et de graviers contenus dans le béton en tant que granulats dans un nouveau mélange. Elle permet aussi le recyclage des eaux claires (appelée eaux recyclées) dans la production de nouveaux mélanges de béton, si elles respectent les critères des normes de l'eau de gâchage, ou utilisées pour le lavage des équipements de béton [98].

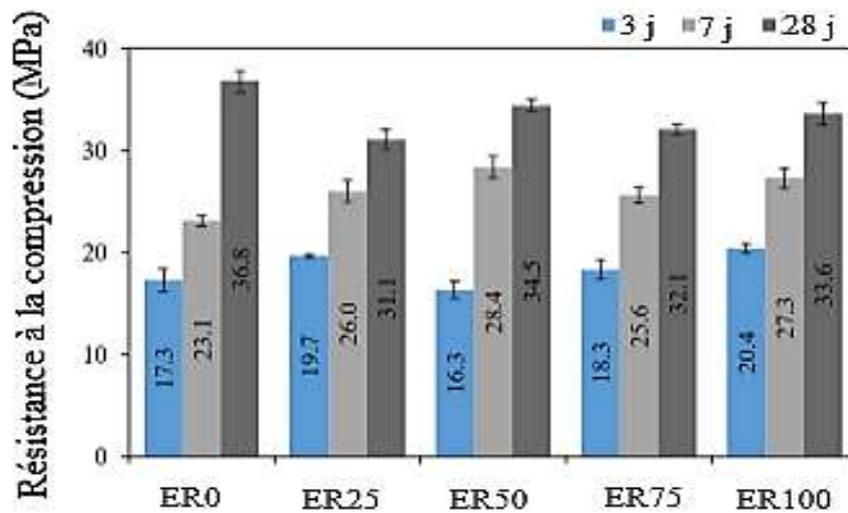
Généralement, les propriétés de l'eau recyclée varient principalement en fonction de la taille de la centrale à béton, de processus de traitement utilisé, de l'âge de l'eau et en fonction des caractéristiques des bétons résiduels lavés (teneur et type d'adjuvant, type de ciment, nature des granulats) [102]. De nombreuses recherches ont été réalisées afin de comprendre et quantifier l'influence de l'eau recyclée sur les propriétés du béton frais et durci. Les résultats de ces recherches ont permis de tirer les conclusions suivantes :

**1-**Pour une teneur en eau identique, l'utilisation de l'eau recyclée engendre une légère réduction de l'ouvrabilité du béton [103,104]. Cette diminution de l'affaissement est proportionnelle au volume et à la teneur en matières solides de l'eau recyclée utilisée à la place de l'eau potable [105]. Cette perte de l'affaissement est due aux résidus poreux absorbants et des particules de ciment continuent dans l'eau recyclée qui tend à accroître la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation en diminuant par conséquent l'affaissement du béton [99,104].

**2-**Bien que des résultats contradictoires avaient été obtenus [104,106], il a été trouvé que l'eau recyclée a un effet accélérateur de prise du béton et mortier frais [102,107]. La diminution de temps de prise est due principalement à la présence des alcalis en solution ( $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{NaOH}$ ) dans l'eau recyclée [107].

**3-**L'utilisation de l'eau recyclée n'a pas effet négatif majeur sur la résistance mécanique du béton lorsque la concentration des matières solides en suspension est inférieure à 50 000 mg/l [108]. Pour ces concentrations, comme indiqué dans la Figure (II.3), la résistance à la compression à 7 jours est généralement similaire ou légèrement supérieure (de 1 à 23%) à la résistance des bétons hydratés sans eau recyclée [106,108,109]. Cependant, la résistance à la

compression à 28 jours obtenue en utilisant l'eau recyclée est équivalente ou légèrement faible que celle obtenue avec le béton témoin [105,107,109].



**Figure II.3** Résistance à la compression du béton contenant différents pourcentages d'eau recyclée (ER) [109]

4-Les solides fins présents dans l'eau recyclée entraînent la réduction de la perméabilité et la porosité du béton [103,110], ce qui agit positivement sur la durabilité du béton.

De façon générale, l'eau recyclée peut être utilisée pour le gâchage du béton sous réserve qu'elle soit contrôlée régulièrement, conformément aux normes de l'eau de gâchage EN 1008-2002 [64] et ASTM C1602 [65]. L'annexe A de la norme EN 1008-2002 [64] précise les prescriptions relatives à l'utilisation de l'eau recyclée. La densité de l'eau recyclée doit être testée conformément à la méthode d'essai ASTM C1602 [65]. Cette dernière norme a aussi fourni les cadences des analyses pour tester la conformité de l'eau recyclée suivant sa densité. Une eau chargée non conforme aux prescriptions pourrait être rendue conforme en ajoutant de l'eau fraîche dans le bassin de stockage de l'eau recyclée.

### II.4.3 Eaux usées domestiques et industrielles

Les eaux usées domestiques regroupent toutes les eaux usées qui sont rejetées par les zones résidentielles, commerciales, institutionnelles et d'autres installations similaires [111], qui comprennent essentiellement les eaux ménagères et les eaux-vannes. Les eaux usées industrielles sont générées par les secteurs industriels où les déchets et les effluents industriels prédominent [111]. Avant d'être rejetées dans l'environnement, plusieurs technologies de traitement (physique, chimique et biologique) peuvent être utilisées pour éliminer les contaminations et rendre les eaux usées aptes à être réutilisées. Les principaux projets de

réutilisation des eaux usées traitées sont consacrés à l'irrigation agricole, l'arrosage des espaces verts et des terrains de golf, le lavage des voiries, la lutte contre les incendies, la recharge des aquifères et à la restauration des zones humides et des eaux de surface. Dans le domaine du bâtiment et des travaux publics, les eaux usées traitées peuvent être utilisées pour le compactage des couches de base et de fondation des assises des chaussées, l'arrosage pour éliminer les poussières pendant le terrassement, compactages des remblais, lavage des granulats, et aussi si possible pour le malaxage du béton.

Au cours de dernières années, de nombreuses études ont été effectuées pour évaluer l'effet de différents effluents industriels utilisés comme eaux de gâchage sur la qualité du béton. Cela comprend notamment les effluents déversés par : station de lavage de voitures [112], industrie de textile [113], industrie de résine [114], industrie lourde et usine d'huile de palme [114], usine de sucre [115] et raffinerie de pétrole [116,117]. Le remplacement de l'eau potable par les usées domestiques traitées a été aussi étudié par un certain nombre de recherches. Une revue de littérature qui s'appuie sur l'analyse de 13 publications portant sur les propriétés du béton mélangé avec des eaux usées domestiques traitées est compilée et les principaux résultats de ces publications sont résumés dans les Tableaux (II.2) et (II.3).

D'après ces études et d'une manière générale, l'effet des effluents industriels ou domestiques sur les propriétés de béton dépend essentiellement de la qualité et de la quantité des constituants chimiques et biologiques qu'elle contient, qui eux-mêmes dépendent de la nature et de niveau du traitement de cet effluent. Les différents constituants chimiques et biologiques présents dans ces effluents réagissent différemment avec le béton, ce qui entraîne des effets positifs ou négatifs sur les propriétés finales du béton [118].

**Tableau II.2.** Effet des eaux usées domestiques traitées sur les temps de prise des pâtes de ciment et sur les propriétés physiques du béton

Propriétés	Résultats
<p><b>Temps de prise du ciment</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'utilisation de l'eau épurée pour l'hydratation des ciments peut avoir un effet retardateur de prise faible [118,119] ou modéré [120-122], comme montré dans la Figure (II.4). Cependant, le temps de retard obtenu reste conforme aux exigences de la norme ASTM C1602 [65].</li> <li>▪ D'autres études montrent que le temps de prise de ciment augmente considérablement lorsque l'eau épurée est incorporée dans la pâte de</li> </ul>

	ciment [10,123], spécialement avec les eaux usées ayant subi un traitement préliminaire et secondaire [120,124,125].
<b>Ouvrabilité et Densité du béton</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'utilisation des eaux épurées pour le malaxage de béton n'a pas d'effet significatif sur l'affaissement du béton frais [120-122,124,125].</li> <li>▪ Certaines études pointent que l'utilisation des eaux usées ayant subi un traitement secondaire diminue remarquablement l'affaissement (Figure (II.5)) [120,126].</li> <li>▪ Aucun changement majeur n'a été observé sur la densité de béton contenant de l'eau épurée par rapport à celle de béton témoin [122,124].</li> </ul>

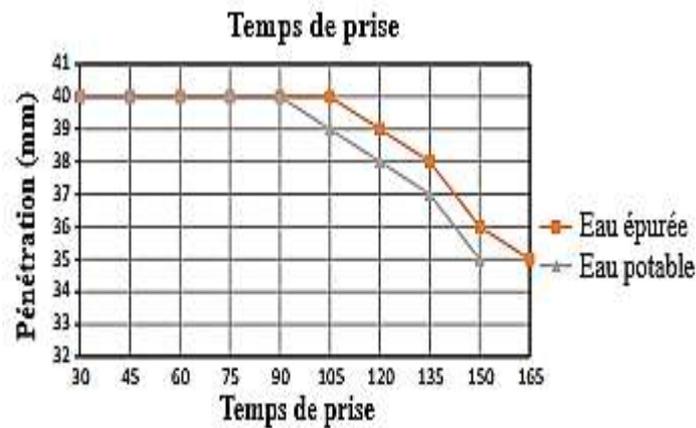


Figure II.4 Temps de prise de ciment hydraté avec et sans l'eau épurée [121]

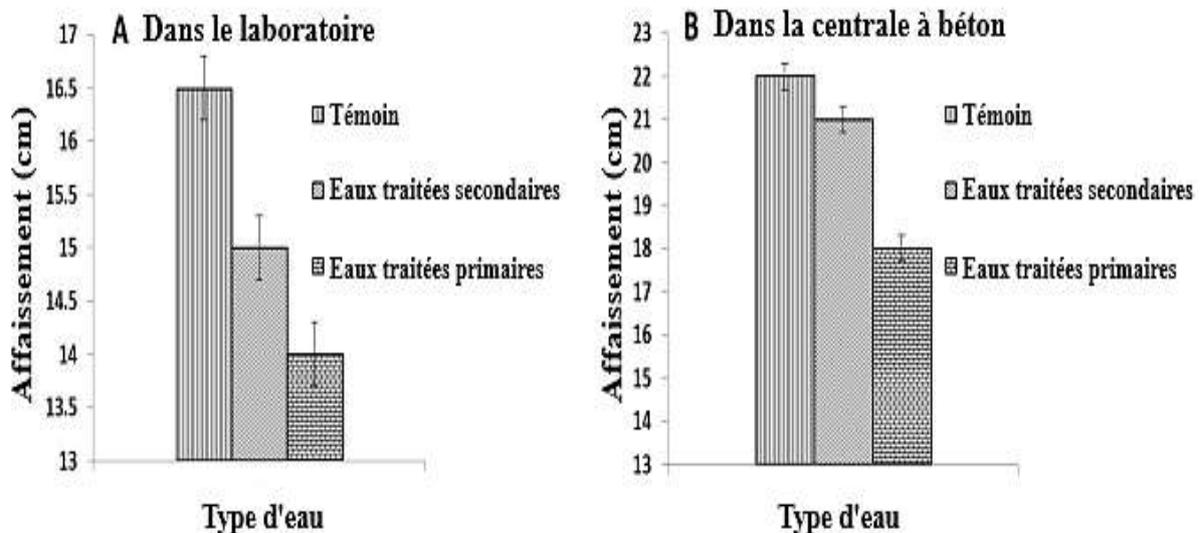


Figure II.5 Affaissement du béton on fonction du type d'eau de gâchage [120]

**Tableau II.3.** Effet des eaux usées domestiques traitées sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton

Propriété	Résultats
<p><b>Résistance mécanique</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'utilisation des eaux usées traitées pour le malaxage de béton entraîne l'augmentation de la vitesse de développement de la résistance à la compression du béton au jeune âge (à 3 et 7 jours) [119,120,10,127].</li> <li>▪ La résistance à la compression du béton augmente proportionnellement avec l'augmentation de pourcentage de l'eau épurée dans l'eau de gâchage ou l'utilisation des eaux usées ayant subi un traitement tertiaire [10,124,125,127].</li> <li>▪ Les résistances à la compression des bétons mélangés avec des eaux usées ayant subi un traitement préliminaire et secondaire sont inférieures (1% à 15%) à la résistance des bétons témoins [120,124,125,128].</li> <li>▪ Selon certains auteurs, comme présenté dans la Figure (II.6), la résistance à la compression est légèrement plus faible (entre 88% et 99%) que celle de béton témoin quand de l'eau épurée est utilisée [118,120-122,129].</li> <li>▪ Les bétons hydratés avec des eaux épurées ont des résistances à la traction comparables [121] ou légèrement inférieures à celles des bétons témoins [122,129].</li> <li>▪ La résistance à la flexion diminue proportionnellement avec l'augmentation de pourcentage de l'eau épurée dans l'eau de gâchage [122,128].</li> </ul>
<p><b>Absorption d'eau et Porosité</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'influence de l'eau épurée sur l'absorption d'eau du béton est négligeable [120,121]</li> <li>▪ À 28 jours de cure, les taux d'absorption d'eau du béton autoplaçant préparée avec de l'eau épurée sont relativement proches (entre 0.4% à 1%) à ceux du béton témoin contenant de l'eau de robinet [129].</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Comme indique la Figure (II.7), certains chercheurs trouvent que la porosité du béton augmente proportionnellement (de 23% à 40%) avec l'augmentation de pourcentage de l'eau épurée dans l'eau de gâchage [122].</li> </ul>
<b>Microstructure</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'utilisation des eaux épurées comme eau de gâchage conduit à la formation des mêmes phases minérales dans le béton [121,122].</li> </ul>
<b>Potentiel de corrosion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La probabilité de corrosion des aciers dans le béton contenant de l'eau épurée est plus élevée que celle du béton témoin, en particulier avec les eaux usées ayant subi un traitement primaire et secondaire Figure (II.8) [118,124].</li> </ul>
<b>Perméabilité aux ions chlorures</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'augmentation de pourcentage de l'eau épurée dans l'eau de gâchage engendre une augmentation (de 18 à 42%) de la perméabilité aux chlorures des bétons [122].</li> <li>▪ La perméabilité aux ions chlorure des bétons contenant de l'eau épurée est «faible » selon la norme ASTM 1202 [118].</li> </ul>
<b>Résistivité électrique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'utilisation de l'eau épurée n'a pas un effet significatif sur la résistivité électrique du béton [121,122].</li> <li>▪ Les bétons ordinaires et autoplaçant contenant de l'eau épurée sont classés dans la catégorie des bétons de « très faible » perméabilité aux ions chlorure selon la norme AASHTO TP 95 [130].</li> </ul>
<b>Résistance aux cycles de gel-dégel et l'abrasion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le béton fabriqué avec l'eau épurée démontre une durabilité au gel inférieure (11%) de celle de béton contenant l'eau potable [121].</li> <li>▪ L'utilisation des eaux usées traitées pour le malaxage de béton entraîne l'augmentation de la résistance du béton à l'érosion [126].</li> </ul>

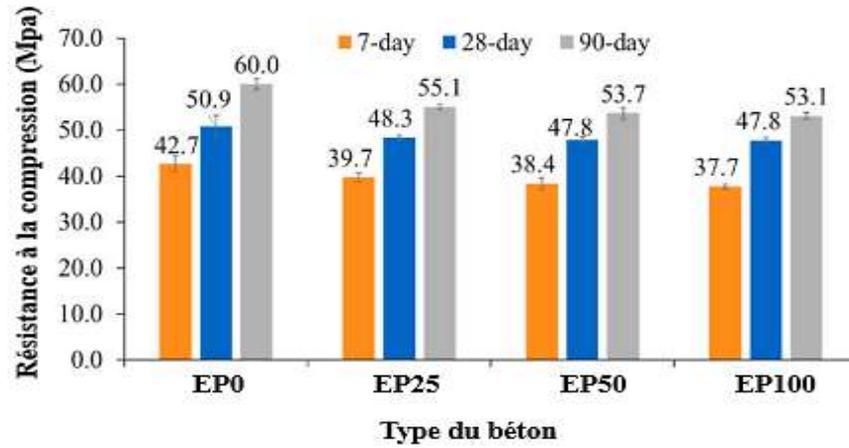


Figure II.6 Résistance à la compression du béton contenant différents pourcentages d'eau épurée (EP) [122]

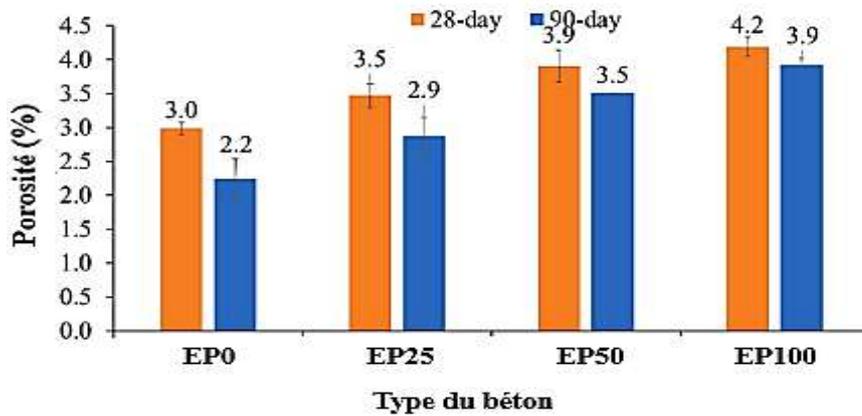


Figure II.7 Porosité du béton contenant différents pourcentages d'eau épurée (EP) [122]

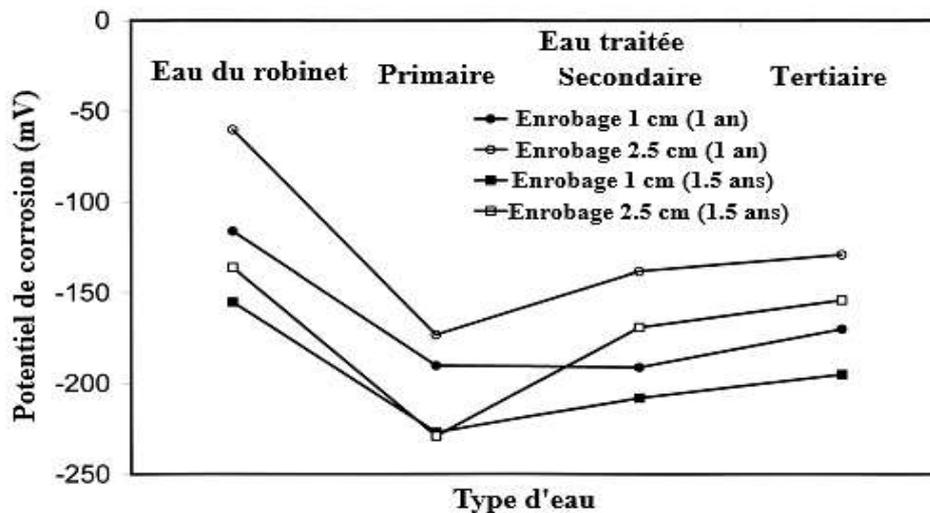


Figure II.8 Probabilité de corrosion on fonction du type d'eau de gâchage [124]

## II.5. Conclusion

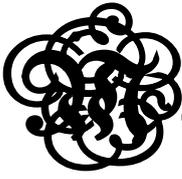
La qualité de l'eau de gâchage et sa composition chimique sont des facteurs qui ne doivent pas être sous-estimés parce qu'elles peuvent affecter plusieurs propriétés à l'état frais et durci du béton et du mortier. La qualité de l'eau de gâchage se rapporte principalement à la composition physico-chimique de l'eau, ou plus précisément à sa composition minérale et aux substances solides ou organiques qu'elle contient. Malheureusement, très peu d'études ont effectué concernant les effets d'impuretés qui peuvent exister dans l'eau de gâchage sur les propriétés du béton et du mortier. En fait, la plupart de ces études sont dépassées, mais qui restent toujours utilisées pour établir les limites admissibles des substances dans l'eau de gâchage utilisée pour hydrater les mélanges de béton moderne qui contiennent des ajouts cimentaires et aussi des adjuvants.

D'autre part, les normes et plusieurs références relatives à l'eau de gâchage admettent comme principe que l'eau potable est toujours convenable sans contrôle particulier à la confection de béton. Mais la pénurie croissante et la mauvaise gestion de ressources d'eau potable dans de nombreuses régions de monde, les zones arides en particulier, ont orienté l'industrie du béton vers la recherche des nouvelles sources d'eau pour remplacer l'eau potable utilisée pour le malaxage de béton. Les recherches antérieures ont montré que l'aptitude d'une eau non potable à être utilisée comme eau de gâchage ne dépend pas uniquement de sa nature, mais essentiellement du type et de la quantité des substances chimiques et biologiques qu'elle contient.

Concernant les études menées sur l'utilisation des effluents domestiques traités pour la fabrication de béton, il est difficile de tirer une conclusion globale en raison de la diversité des constituants chimiques des différents effluents testés dans ces études. Dès lors, de nombreuses études sont encore nécessaires pour améliorer les connaissances et l'attitude envers l'utilisation des effluents domestiques traités pour le malaxage de béton.

À cet égard, ce travail de recherche est destiné à l'évaluation de l'effet des eaux épurées contenant une concentration élevée de sels dissous sur les propriétés du béton frais et durci et sur sa durabilité vis-à-vis la corrosion des armatures.

Deuxième partie :

 méthodes  expérimentales

**Chapitre 3 :**

**M**atériaux et **P**rocédures

**expérimentales**

### **III.1. Introduction**

L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer la faisabilité de l'utilisation de l'eau épurée issue de la station d'épuration Saïd Otba de la ville de Ouargla comme eau de gâchage pour le béton en étudiant ses effets sur les propriétés du béton et sur la corrosion des armatures en acier enrobées de béton. Pour cela, le premier programme expérimental de cette étude s'articulera autour d'une étude comparative des comportements des bétons et mortiers de mêmes formulations et se différencie par le type de l'eau de gâchage utilisée.

D'autre part, les résultats de plusieurs études réalisées sur les eaux usées épurées par la station Saïd Otba ont trouvé que les effluents issus de cette station se caractérisent par une minéralisation excessive et que le chlorure et le sulfate sont majoritaires dans ces effluents [10]. Pour cela et parce que les concentrations en ions sulfates et chlorures dans les eaux épurées étudiées sont très variables, le deuxième programme expérimental adopté dans cette étude a pour objectif d'évaluer les conséquences que les variables concentrations en sulfate et chlorure dans l'eau de gâchage sont susceptibles d'engendrer sur les propriétés du matériau cimentaire. Nous nous concentrons dans un premier temps sur l'influence des ions sulfate sur l'hydratation du ciment et sur l'évolution de la résistance mécanique du mortier lorsque ces ions sont introduits sous forme dissoute dans l'eau de gâchage. Ensuite, nous nous focaliserons sur l'influence que les ions sulfate et chlorure peuvent avoir lorsqu'ils sont introduits conjointement dans l'eau de gâchage. Ce mélange de sulfate et chlorure nous a permis de simuler partiellement l'éventuelle salinité des eaux épurées étudiées et de déterminer ses effets sur la qualité du matériau cimentaire.

Ce chapitre présente les matériaux de l'étude, les procédures de fabrication et de conservation des éprouvettes ainsi que les techniques des essais réalisés.

### **III.2. Caractérisation des matériaux de base**

#### **A. Granulats**

Les granulats choisis pour mener cette étude sont de sable et gravier d'origine naturelle, de dimension de 0 à 5 mm pour le sable, et de : 3/8 mm, 8/15 mm et 15/25 mm pour le gravier. Le sable est de type siliceux provenant de la vallée d'Oued M'Zi de la région de Laghouat. Les graviers sont de nature calcaire concassée, fournis par la carrière ALCOGAZ-Metlili de la région de Ghardaïa. Les résultats des analyses granulométriques pour les granulats utilisés sont résumés dans la Figure (III.1). Les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques de ces

granulats, mesurées au laboratoire LTPS (Ghardaïa), sont présentées respectivement dans les Tableaux (III.1) et (III.2).

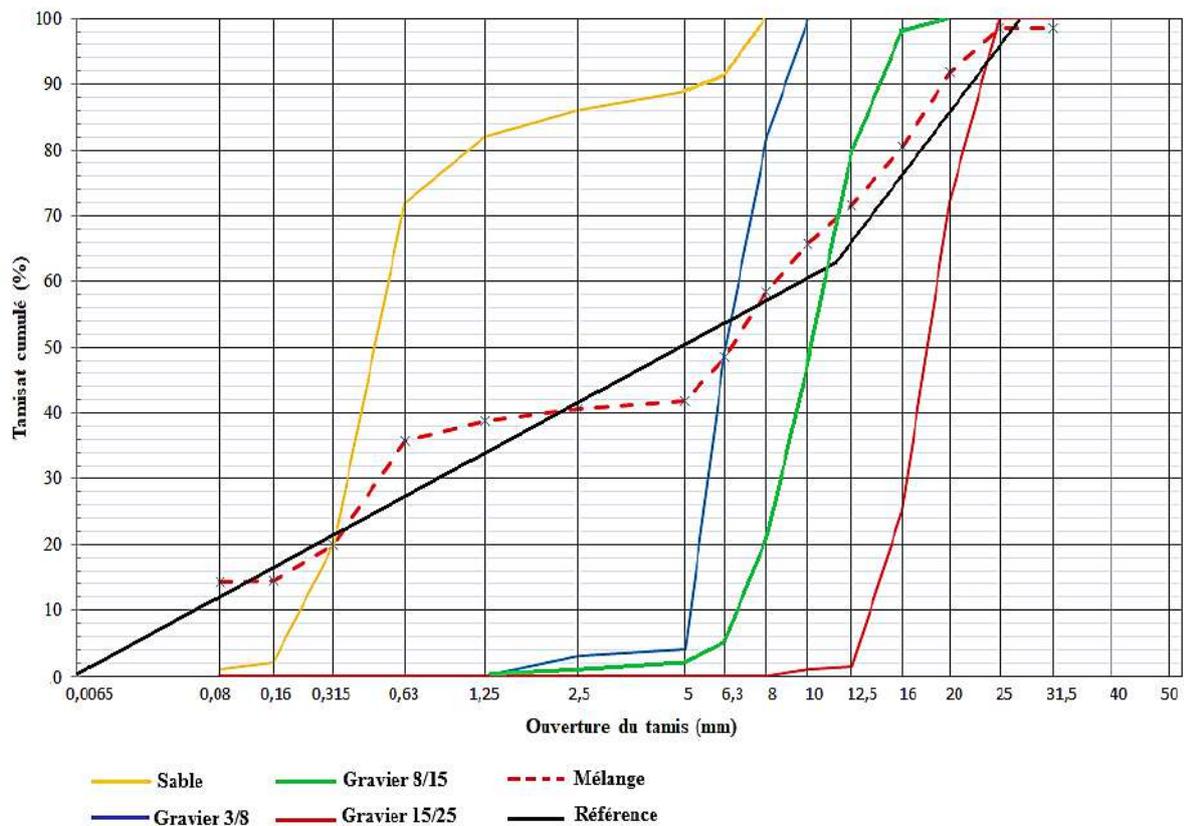


Figure III.1 Analyse granulométrique des granulats

Tableau III.1. Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats

Caractéristique	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)	Gravier (15/25)	Sable
Masse volumique absolue $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.62	2.63	2.62	2.61
Masse volumique apparente $\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.08	1.13	1.22	1.64
Coefficient d'absorption (%)	5.87	2.57	3.47	0.39
Équivalent de sable ES (%)		-		74.5
Valeur au bleu de méthylène		-		0.15
Propreté (%)	0.548	0.659	0.448	-
Los Angeles (%)	44.84	43.68	33.5	
Micro Deval (%)	21.4	26	24.8	

**Tableau III.2.** Caractéristiques chimiques des granulats

Composition (%)	Granulat	
	Gravier	Sable
<b>Insoluble</b>	5.5	93.1
<b>Trioxyde de Soufre SO<sub>3</sub></b>	0.0	0.00
<b>Carbonates CaCO<sub>3</sub></b>	88	05
<b>Chlorure Cl<sup>-</sup></b>	0.005	0.003

## B. Ciment

Un ciment résistant aux sulfates CRS fourni par la société Lafarge (Mokaouem) a été utilisé pour la confection de toutes les éprouvettes de béton et de mortier étudiés. La désignation commerciale du ciment est : NA 442-CEM I 42.5 N-SR3. La caractéristique de base de ce ciment est de contenir un pourcentage réduit en phase aluminatée (C<sub>3</sub>A et C<sub>4</sub>AF) et par conséquent un pourcentage élevé en phase silicatée. Ce type de ciment est recommandé dans les régions où l'infrastructure du bâtiment est soumise à l'attaque sulfatique. Les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques du ciment sont présentées respectivement dans les Tableaux (III.3) et (III.4). La composition minéralogique du ciment calculée par la méthode de Bogue est résumée dans le tableau (III.4).

**Tableau III.3.** Caractéristiques mécaniques et physiques du ciment.

Caractéristique	Valeur
<b>Résistance en compression à 2 j (MPa)</b>	24.40
<b>Résistance en compression à 28 j (MPa)</b>	49.10
<b>Expansion "Le Chatelier" (mm)</b>	1.00
<b>Chaleur d'hydratation (à 41 heures) (j/g)</b>	207
<b>Début du Temps de prise (min)</b>	175
<b>Fin du Temps de prise (min)</b>	240

**Tableau III.4.** Caractéristiques chimiques du ciment

<b>Composition chimique</b>	<b>Valeur (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	16.74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.88
CaO	63.35
MgO	1.68
K <sub>2</sub> O	0.54
Na <sub>2</sub> O	0.07
SO <sub>3</sub>	2.16
Cl	0.02
Pertes au feu	0.81
<b>Composition minéralogique</b>	<b>Valeur (%)</b>
C <sub>3</sub> S	63.61
C <sub>2</sub> A	5.75
C <sub>4</sub> AF	12.23

### C. Eau de gâchage

Pour atteindre l'objectif de notre étude, deux types d'eau ont été utilisés : l'eau distillée (ED) et l'eau épurée (EP). L'eau distillée (ED) a été utilisée pour préparer les éprouvettes de référence de notre étude. Les eaux épurées sont issues de la station d'épuration de la ville de Ouargla. La station se situe dans la région de Saïd Otba au nord de la RN 49. La station a été mise en service en 2009 avec une capacité initiale de 40 000 m<sup>3</sup>/jour. Elle fonctionne sur la base du procédé biologique par lagunage aéré. Cette technique de traitement consiste en deux lagunes aérées mécaniquement suivies d'un bassin de sédimentation. Les échantillons des eaux épurées utilisées dans cette étude ont été prélevés à partir de l'effluent du bassin de sédimentation. Les quantités des eaux épurées nécessaires à la confection de béton ont été stockées dans des barils en plastiques lavés au préalable par ces eaux. Avant être utiliser, nous avons soumis un échantillon d'eau épurée à des analyses physico-chimiques selon les méthodes normalisées. Les résultats sont ensuite comparés aux exigences compositionnelles spécifiées par les normes EN 1008-2002 [64] et ASTM C1602 [65] présentées dans le Tableau (II.1).

### III.3. Étude de l'influence de l'eau épurée sur les propriétés du béton

Dans le but d'identifier l'influence de l'eau épurée sur les propriétés du béton, quatre mélanges de béton ont été étudiés. Le béton de référence est malaxé avec de l'eau distillée (ED). Ensuite l'eau distillée a été remplacée par l'eau épurée (EP) avec des pourcentages variant de 25, 50 et 100% de la masse totale de l'eau de gâchage.

#### III.3.1 Formulation des bétons étudiés :

Dans cette étude, le béton a été formulé en s'appuyant sur la méthode de Faury [130] pour obtenir une résistance à la compression à 28 jours égale à 25 MPa et un affaissement de  $75 \pm 10$  mm. Les compositions pour un mètre cube de béton pour tous les mélanges étudiés au cours de cette recherche sont présentées dans le Tableau (III.5).

**Tableau III.5.** Formulations des bétons étudiés

Type de béton	Quantité (Kg /m <sup>3</sup> )						
	Ciment	Sable	Gravier			Eau	
			3/8	8/15	15/25	ED	EP
ED	350	630	265	375	495	210	-
EP25						157.5	52.5
EP50						105	105
EP100						-	210

#### III.3.2 Confection et conservation des éprouvettes de béton :

La mise en œuvre du béton a été établie en respectant la norme EN 12390-2 [131]. Pour cela, les constituants sont introduits dans l'ordre suivant : gravier (15/25, 8/15, 3/8), ciment, sable, eau, dans un malaxeur. Le malaxeur et les ustensiles à utiliser ont été humidifiés avant tout usage. Le malaxage dure 1 minute 30 secondes à sec et prolonge de 2 minutes 30 secondes après l'ajout de l'eau. Pour mesurer l'ouvrabilité du béton, des essais d'affaissement au cône d'Abrams ont été effectués durant l'opération de malaxage selon la norme EN 12350-2. Les bétons préparés ont été mis en place dans des moules cylindriques de 15 x 30 cm par vibration à la table vibrante en trois couches. Les éprouvettes de béton, démoulées à 24h après le coulage, ont été ensuite conservées dans une chambre humide à  $20 \pm 1$  °C et  $95 \pm 1\%$  d'humidité relative jusqu'à le jour d'écrasement.

### III.3.3 Mesure de la résistance mécanique à la compression du béton :

Dans le but d'identifier l'influence de l'eau épurée sur l'évolution de la résistance mécanique au cours du temps, les variations de la résistance à la compression sont suivies en comparant les contraintes à la rupture des éprouvettes des bétons contenant de l'eau épurée (**EP**) avec les éprouvettes de béton de référence (**ED**). La mesure de la résistance en compression du béton a été effectuée pour chaque composition testée suivant la norme EN 12390-3 [132]. Avant l'essai, les bases des éprouvettes ont été surfacées à l'aide d'une rectifieuse afin d'assurer la planéité et le parallélisme des surfaces (Figure (III.2)). La charge a été appliquée par une presse hydraulique asservie en force par un système automatique qui permet de contrôler la vitesse de chargement à 0.5 MPa/s (Figure (III.2)). Pour chaque composition et échéance, les essais ont été réalisés sur trois éprouvettes cylindriques et les valeurs moyennes sont retenues. Les résultats de la résistance à 7 jours obtenus sur les éprouvettes de béton contenant de l'EP ont été comparés aux exigences des normes EN 1008-2002 [64] et ASTM C1602 [65] relatifs à la résistance à la compression résumées dans le Tableau (II.1).



(a)



(b)

**Figure III.2** Dispositif de mesure de la résistance à la compression du béton; (a) rectifieuse et (b) presse hydraulique

### **III.3.4 Mesure des temps de prise des pâtes de ciment :**

Les impuretés contenues dans l'eau de gâchage interfèrent souvent avec les réactions d'hydratation normale du ciment et également la cinétique de durcissement du béton, et peuvent par conséquent améliorer ou altérer les propriétés du béton. Pour cela, nous avons étudié l'influence de l'EP sur l'hydratation des pâtes de ciment en utilisant l'essai de prise conformément à la norme européenne EN 196-3 [133]. L'essai de prise est une méthode importante qui permet de fournir une estimation normalisée à l'échelle macroscopique de l'avancement de la réaction d'hydratation du ciment, durant une période où des transformations dramatiques de la pâte de ciment se produisent. Le principe de l'essai consiste à laisser pénétrer une aiguille métallique (aiguille de Vicat) de dimension et de masse fixée dans une pâte de ciment à consistance normalisée. Le début et la fin de prise sont déterminés par profondeurs de pénétration de l'aiguille. La teneur en eau idéale pour obtenir la pâte de ciment normalisée est obtenue conformément à la norme EN 196-3 [133] par l'essai de consistance. Pour notre étude, les temps de prise obtenus avec les pâtes de ciment hydratées avec 25, 50 et 100% de l'EP sont comparés aux temps obtenus avec l'ED et aux exigences des normes EN 1008-2002 [64] et ASTM C1602 [65] relatifs au temps de prise initial et final énumérés dans le Tableau (II.1).

### **III.3.5 Caractérisation de la microstructure du béton :**

#### **a) Mesure de la perméabilité à l'eau**

Dans le cadre de notre travail, des essais de perméabilité à l'eau ont été effectués suivant la norme EN 12390-8 [134] pour caractériser les bétons hydratés avec ou sans de l'eau EP. L'essai consiste à appliquer une pression d'eau de  $5 \pm 0.5$  bars sur une seule face plane d'une éprouvette cylindrique (ou cubique) pendant une période de 72 heures et après la rupture de l'éprouvette par fendage, on mesure la profondeur de pénétration de l'eau à l'aide d'une règle. Dans notre étude, les essais de la perméabilité ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques obtenues par sciage des éprouvettes (15cm x 30cm) par deux. La perméabilité a été mesurée après 6 mois de cure humide des éprouvettes à l'aide d'un perméabilimètre à trois têtes (Figure (III.3)).



**Figure III.3** Perméabilimètre à béton

#### **b) Analyse au microscope à balayage (MEB)**

La microscopie électronique à balayage (MEB) est la méthode la plus utilisée couramment pour observer l'état de la microstructure et le réseau poreux du béton. Le principe de la MEB consiste à balayer la surface d'un échantillon par un faisceau d'électrons finement localisé. Les électrons incidents subissent une série de chocs élastiques et inélastiques avec les atomes du matériau. Ces chocs génèrent des signaux qui sont détectés dans le microscope par des capteurs spécifiques pour former une image.

Dans le cadre de notre recherche, les analyses MEB sont réalisées pour objectif d'évaluer la variation de la microstructure du béton par l'utilisation de l'EP comme eau de gâchage. Les analyses ont été effectuées sur des fractures obtenues en brisant une partie des éprouvettes de béton ayant servi à la mesure de la résistance à la compression à l'âge de 12 mois. La surface fracturée obtenue a été fixée sur un plot à l'aide d'une colle conductrice puis métallisée pour les rendre conducteurs. Les échantillons sont ensuite observés au MEB en utilisant la technique des électrons secondaires (SE) aux laboratoires CRAPC-Ouargla et LPCMA-Biskra.

#### **c) Diffraction des rayons X (DRX)**

La DRX est la méthode la plus couramment utilisée pour caractériser et quantifier les phases cristallisées présentes dans un échantillon. L'exposition d'un matériau cristallin à un faisceau de rayons X produit un diagramme DRX constitué de pics d'intensités variables à des angles de diffraction bien spécifiques. L'angle de diffraction ou la position des pics de diffraction est déterminé par la symétrie et la taille de la cellule unitaire selon la loi de Bragg,

alors que les intensités des pics sont liées à la nature et à l'arrangement des atomes dans la cellule unitaire du matériau cristallin. De cette façon, la technique DRX produit des modèles de positions de pics et d'intensités relatives qui caractérisent différentes structures cristallines et permettent ainsi d'identifier leurs présences dans les échantillons testés [135].

Dans le cadre de cette étude, l'analyse par DRX a été entreprise sur des poudres fines (80  $\mu\text{m}$ ) de béton pour permettre d'évaluer la variation de la composition minéralogique du béton par l'utilisation de l'EP comme eau de gâchage. Pour cela, des morceaux représentatifs de béton, obtenus à partir des éprouvettes ayant servi à la mesure de la résistance à la compression à l'âge de 12 mois, ont été cassés en petits morceaux à l'aide d'un marteau. Les morceaux ont été ensuite broyés et passés dans un tamis de 80 microns. Le broyage se fait en plusieurs étapes pour limiter l'échauffement de l'échantillon. Les mesures DRX ont été conduites avec un diffractomètre Miniflex600 au laboratoire LPCMA-Biskra. L'acquisition des diffractogrammes a été réalisée en utilisant une anticathode de cuivre ( $\text{Cu-K}\alpha$ ), avec une vitesse de balayage de  $0.02^\circ$  par pas. L'analyse de phases obtenues a été faite avec le logiciel HighScore plus ou les différentes phases cristallines ont été identifiées par la comparaison des phases constitutives de l'échantillon avec les diffractogrammes de référence regroupés dans la base de données PDF (Fichier de Diffraction de Poudre).

### **III.4. Étude de l'influence de l'eau épurée sur le comportement à la corrosion des armatures en acier**

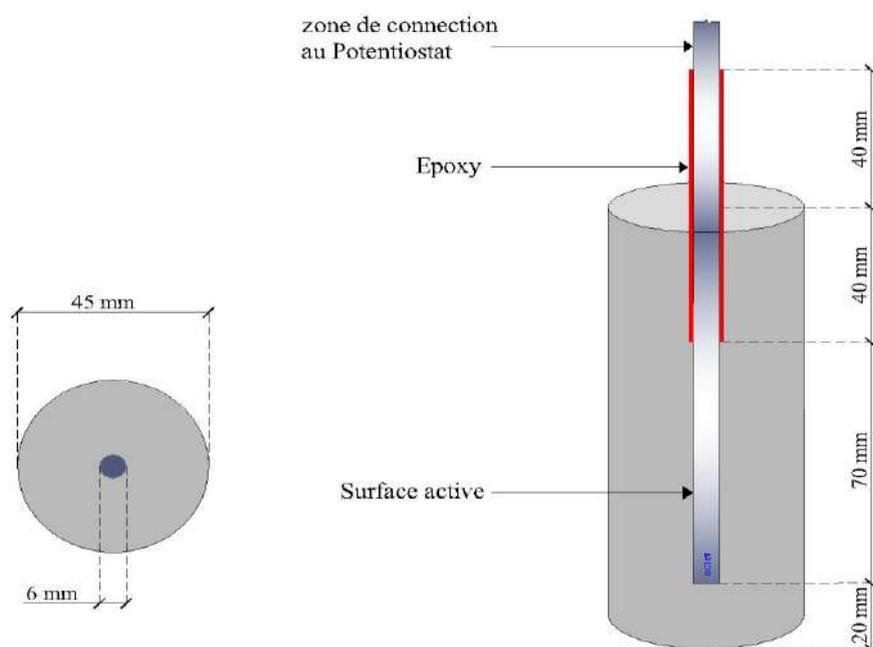
#### **III.4.1 Mesure de la vitesse de corrosion de l'acier enrobé de mortier :**

L'objectif de cette partie est d'évaluer la vitesse de corrosion de l'acier enrobé de mortier, en présence et en absence de l'EP. Pour cela, des tests de polarisation potentiodynamique ont été effectués sur des éprouvettes de mortier armé afin d'évaluer les valeurs de résistance de polarisation ( $R_p$ ), de courant de corrosion ( $I_{\text{corr}}$ ) puis la vitesse de corrosion ( $V_{\text{corr}}$ ).

##### **a) Préparation des éprouvettes de mortier armé**

Pour effectuer les essais de cette partie, des barres d'acier de 6 mm de diamètre et de 20 cm de longueur ont été utilisées comme électrode de travail. Les éprouvettes d'acier ont été frottées légèrement avec une brosse métallique puis polies avec des papiers abrasifs SiC (de granulation variant de P60 à P240). Ensuite, comme indiqué sur la Figure (III.4), un revêtement époxy a été appliqué sur la surface des éprouvettes d'acier en laissant une longueur d'exposition de 7 cm à l'extrémité de la barre enrobée dans le mortier. La surface active est égale  $13.47 \text{ cm}^2$ .

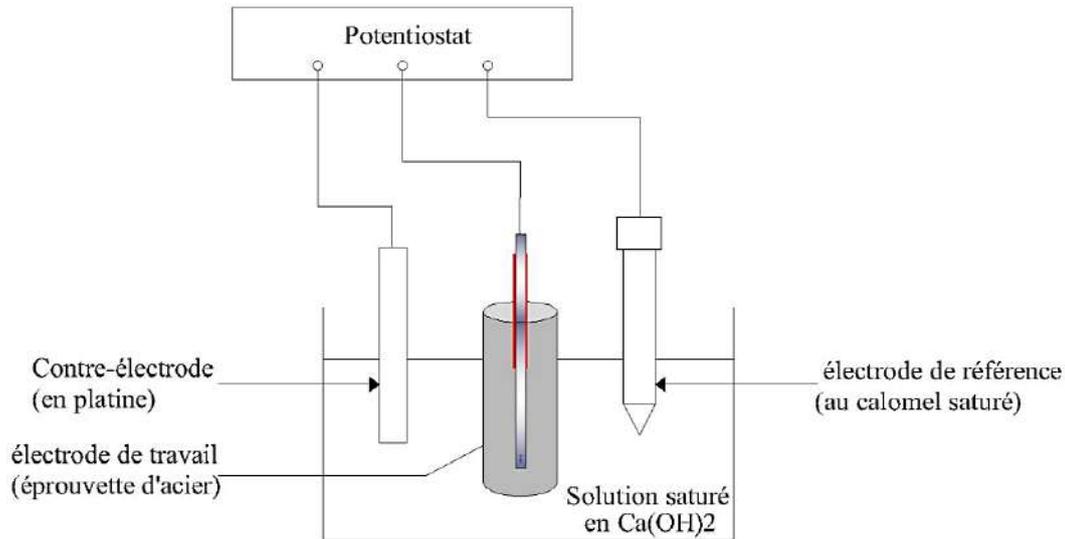
Les éprouvettes de mortier sont des cylindres de diamètre 4.5 cm et de hauteur 13 cm (Figure (III.4)) préparés à partir de la formulation d'un mortier standard tel que, le rapport ciment/sable = 0.3 et le rapport eau/ciment = 0.5, conformément à la norme EN 196-1 [136]. Les dimensions des éprouvettes de mortier ont été choisies conformément à la norme EN 480-14 [137]. Le mortier de référence est malaxé avec de l'eau distillée (ED). Ensuite l'eau distillée a été remplacée par l'eau épurée (EP) avec des pourcentages de 50 et 100%. La barre d'acier préparée comme indiqué précédemment a été ancrée au centre de l'éprouvette sur une longueur de 11 cm et dépassant la face supérieure du mortier par 9 cm. Après décoffrage à 1 jour, les éprouvettes de mortier armé ont été conservées dans l'eau jusqu'à l'âge de test.



**Figure III.4 Représentation schématique de l'éprouvette de mortier armé**

### **b) Cellule électrochimique utilisée pour l'étude sur les éprouvettes de mortier armé**

Le comportement à la corrosion des éprouvettes en mortier armé a été évalué moyennant une cellule électrochimique standard à trois électrodes (Figure (III.5)). L'armature de l'acier enrobée dans le mortier étant l'électrode de travail, une électrode au calomel saturé a été utilisée comme référence et une électrode en platine a été employée comme contre-électrode. Les deux dernières électrodes sont émergées dans une solution saturée en chaux ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) pour simuler la solution interstitielle du béton.



**Figure III.5** Représentation schématique de la cellule électrochimique utilisée pour l'étude sur les éprouvettes de mortier armé

### c) Techniques utilisées pour de la détermination de la vitesse corrosion des éprouvettes de mortier armé

Deux techniques de polarisation potentiodynamique ont été utilisées pour mesurer la vitesse de corrosion des aciers enrobés de mortier :

- **La technique d'extrapolation aux droites de Tafel :** cette technique est basée sur la linéarité entre le logarithme de la densité de courant ( $\log i$ ) en fonction de potentiel appliqué ( $E$ ). Elle nous a permis de déterminer le potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ), le courant de corrosion ( $i_{\text{corr}}$ ), ainsi que les pentes de Tafel utilisées pour calculer la vitesse de corrosion ( $V_{\text{corr}}$ ).
- **Technique de résistance de polarisation :** Cette technique est basée sur la linéarité approximative de la courbe potentiel-densité de courant pour les faibles surtensions anodiques et cathodiques. Elle nous a permis de déterminer la valeur de la résistance de polarisation ( $R_p$ ) et la densité de courant ( $I_{\text{corr}}$ ), puis la vitesse de corrosion ( $V_{\text{corr}}$ ).

Ces deux techniques sont basées sur l'application de différents potentiels entre l'électrode de travail et l'électrode de référence puis la mesure de courant qui circule entre l'électrode de travail et la contre-électrode [138]. Dans notre étude, nous avons utilisé un potentiostat-galvanostat PGZ 100, piloté par le logiciel Voltmaster 4, afin d'effectuer l'ensemble des mesures électrochimiques requises. Le potentiel de l'éprouvette d'acier est balayé de -900 mV à +900 mV avec une vitesse de balayage de 50 mV/min. Pour chaque composition étudiée, les

essais électrochimiques ont été réalisés sur deux éprouvettes de mortier armé et les valeurs moyennes sont retenues.

### **III.4.2 Évaluation de comportement actif-passif de l'acier dans des extraits des aqueux des poudres des bétons :**

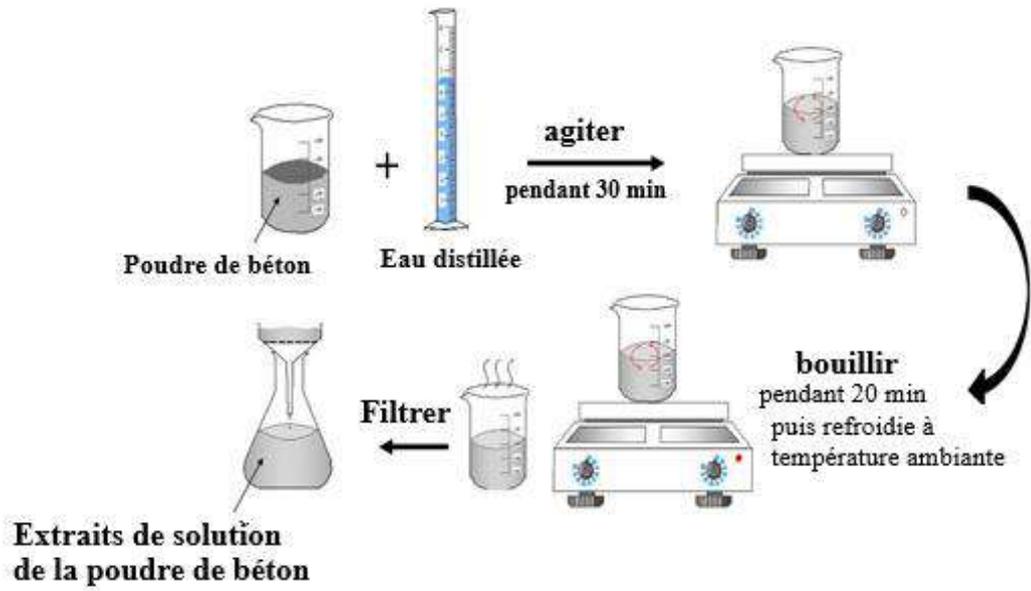
L'objectif principal de cette partie est d'évaluer le comportement actif-passif de l'acier enrobé de béton, en présence et en absence de l'EP. Pour cela, des tests de polarisation potentiodynamique ont été réalisés pour déterminer les différentes zones de corrosion de l'acier dans des extraits aqueux préparés à partir de la poudre de béton.

#### **a) Préparation des extraits de la poudre de béton**

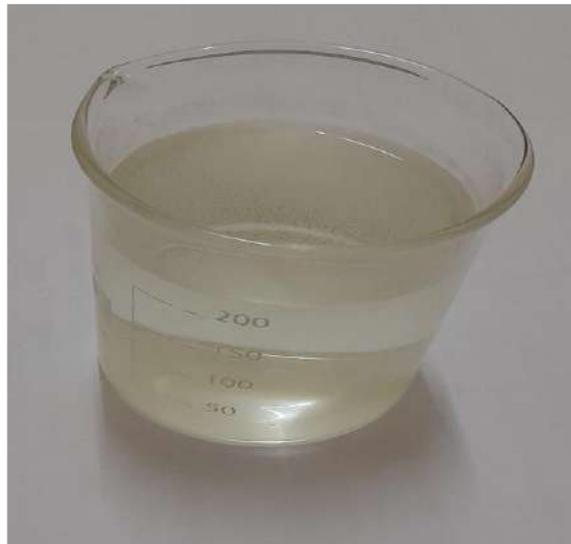
Les extraits aqueux des poudres de bétons ont été préparés étape par étape comme décrite par Kapat et al. [139] à partir des éprouvettes de béton EP100 et ED, comme mentionné dans la Figure (3.6). Pour cela, des morceaux représentatifs de béton, obtenus à partir des éprouvettes cylindriques ayant servi à la mesure de la résistance à la compression à l'âge de 24 mois, ont été concassés en petits morceaux à l'aide d'un marteau. Les morceaux sont ensuite soumis à un processus de broyage et tamisage pour obtenir des poudres d'un diamètre maximal inférieur à 150 microns. Pour préparer les extraits, la poudre de béton a été mélangée par l'eau distillée dans un rapport solide-liquide de 1 :1, puis agitée pendant 30 minutes avec un agitateur magnétique. La solution obtenue est ensuite bouillie pendant 20 minutes puis refroidie à température ambiante. Enfin, la solution a été filtrée par un papier-filtre Whatman n°1. La solution filtrée obtenue (Figure (III.7)) a ensuite été utilisée pour effectuer les essais électrochimiques sur les éprouvettes d'acier.

#### **b) Préparation des éprouvettes de l'acier**

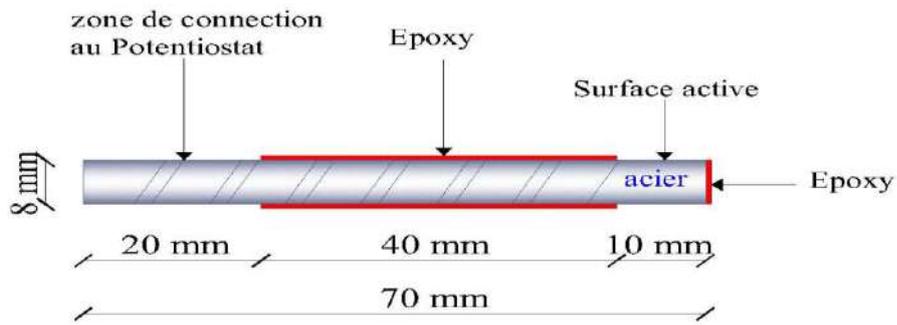
Dans cette partie, les éprouvettes d'acier sont des barres de 8mm de diamètre et de 70 mm de longueur. Les éprouvettes d'acier ont été frottées légèrement avec une brosse métallique puis polies avec des papiers abrasifs SiC (de granulation variant de P60 à P240) pour éliminer la couche d'oxyde de la surface de barre. Ensuite, un revêtement époxy a été appliqué sur la surface des éprouvettes d'acier en laissant une longueur d'exposition de 10 mm à une extrémité, comme indique la Figure (III.8). La surface active des éprouvettes d'acier est égale à 2.51 cm<sup>2</sup>.



**Figure III.6** Représentation schématique de la préparation de l'extrait de la poudre de béton



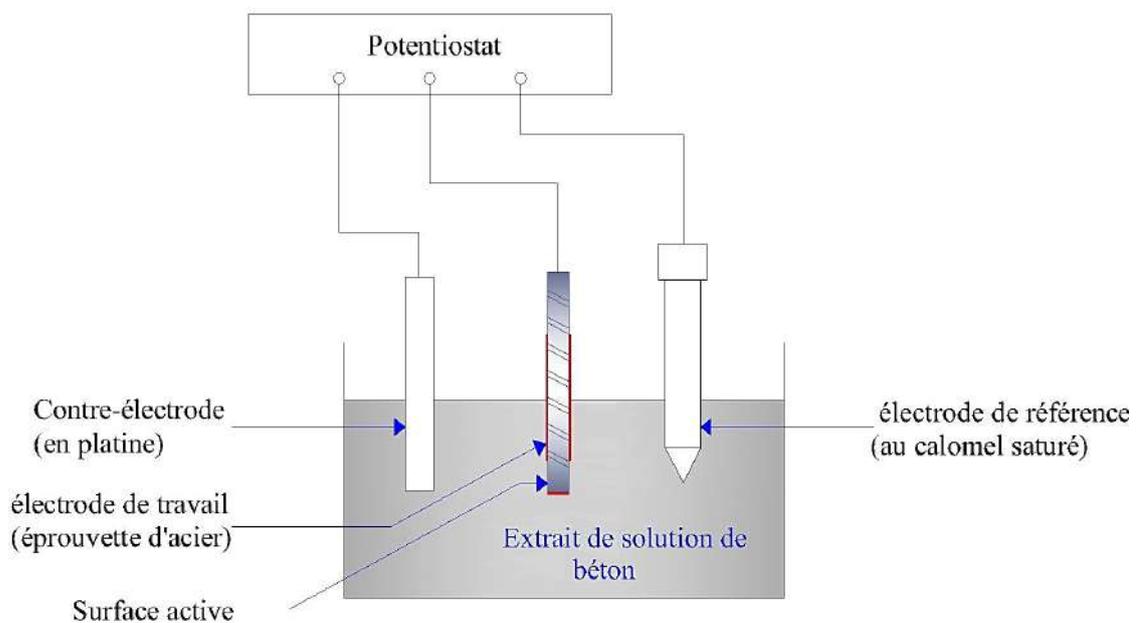
**Figure III.7** Photo de l'Extrait de la poudre de béton EP100



**Figure III.8** Représentation schématique de l'électrode de travail

### c) Cellule électrochimique et mesures

Comme indiqué dans la Figure (III.9), la cellule électrochimique se compose d'une électrode de travail (éprouvette de l'acier), d'une contre-électrode (électrode en platine), d'une électrode de référence (électrode au calomel saturé) et de l'extrait de la poudre de béton comme électrolyte. Les trois électrodes ont été connectées au potentiostat puis le potentiel de l'éprouvette d'acier est balayé de -900 mV à +1500 mV avec une vitesse de balayage de 50 mV/min. Les courbes de polarisation potentiodynamiques ont été obtenues en mesurant la densité de courant en fonction du potentiel appliqué à l'aide d'un potentiostat-galvanostat de type PGZ 100. Les valeurs moyennes pour deux éprouvettes d'acier ont été adoptées pour chaque type de solution de béton étudiée.



**Figure III.9** Représentation schématique de la cellule électrochimique utilisée pour l'étude sur les extraits aqueux des poudres de bétons

### III.5. Étude des propriétés du mortier en présence des ions sulfate et chlorure dans l'eau de gâchage

Cette partie de thèse est consacrée à l'étude de l'influence de différentes concentrations en ions sulfate et chlorure sur les propriétés des éprouvettes de mortier. Pour cela, une première série des essais est effectuée en faisant varier la concentration de sulfate de sodium de 0 à 5 g/l dans l'eau de gâchage. Une deuxième série d'essais a été aussi réalisée en faisant ajouter aux solutions de sulfate des quantités variables de chlorure, afin de comprendre les effets éventuels lorsque ces deux ions sont introduits conjointement dans l'eau de gâchage.

#### III.5.1 Formulation des mortiers étudiés :

Dans le cadre de cette étude expérimentale, un mortier de référence est préparé en utilisant l'eau distillée comme eau de gâchage à partir de la formulation d'un mortier standard tel que, le rapport ciment/sable = 0.3 et le rapport eau/ciment = 0.5, conformément à la norme EN 196-1 [136]. Puis les solutions d'hydratation, préparées en dissolvant la quantité de sulfate ou chlorure de sodium voulue dans l'eau distillée, ont été utilisées pour préparer les éprouvettes de mortier. Un total de 9 formulations de mortier avec différentes concentrations de sulfate et chlorure a été adopté dans cette partie et les paramètres pour chaque formulation sont résumés dans le Tableau (III.6).

**Tableau III.6.** Désignations des différentes formulations des mortiers étudiés

Désignation des mortiers ou pâtes de ciment	Concentration des ions dans l'eau de gâchage
2NS	2 g/l Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
3NS	3 g/l Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
4NS	4 g/l Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
5NS	5 g/l Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
2NS+4NC	2 g/l Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 4 g/l NaCl
3NS+5NC	3 g/l Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 5 g/l NaCl
4NS+6NC	4 g/l Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 6 g/l NaCl
5NS+7NC	5 g/l Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 7 g/l NaCl

### III.5.2 Confection et conservation des éprouvettes de mortier :

Le suivi des variations de la résistance à la compression a été réalisé à partir d'éprouvettes normalisées de dimensions  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  préparées à partir des formulations de mortier désignées dans le Tableau (III.6). Les éprouvettes en mortier ont été confectionnées selon la procédure préconisée par la norme EN 196-1 [136] dans des moules pouvant contenir trois éprouvettes. Le démoulage des éprouvettes a été effectué 24h après le coulage et les éprouvettes ont ensuite conservées dans la chambre humide jusqu'à le jour d'écrasement.

### III.5.3 Mesure de la Résistance mécanique de mortier et des temps de prise de ciment:

Pour notre étude, les caractérisations à la rupture ont été déterminées en utilisant un dispositif de flexion à trois points (Figure (III.10)). Pour chaque concentration et échéance, trois éprouvettes ont été d'abord rompues par flexion, puis les six demi-prismes obtenus ont ensuite soumis à la compression et les valeurs moyennes de résistance sont retenues.



**Figure III.10** Équipement utilisée pour les essais mécaniques sur les mortiers; (a) vue d'ensemble, (b) partie destinée à l'essai de flexion et (c) partie destinée l'essai de compression

Pour étudier l'influence des variables concentrations en ions sulfate et chlorure sur l'hydratation du ciment résistant au sulfate, 9 pâtes de ciment normalisées ont été préparées en utilisant les mêmes concentrations de sulfate et chlorure illustrées dans le Tableau (III.6) pour effectuer des essais de prise conformément à la norme EN 196-3 [133].

### **III.6. Conclusion**

Ce chapitre avait pour objectif de présenter les matériaux et les procédures expérimentales utilisées pour atteindre les deux objectifs principaux de cette thèse.

Premièrement, les propriétés des mélanges de béton préparées en utilisant de l'eau épurée (EP) avec des pourcentages variant de 25, 50 et 100% sont comparées avec celle de béton préparé avec de l'eau distillée (ED). Les essais réalisés ont pour objectif de déterminer les propriétés à l'état frais et durci des bétons étudiés, à savoir le temps d'hydratation et la résistance mécanique en compression (et son évolution dans le temps), l'état de la microstructure, et le comportement électrochimique des armatures enrobées de béton.

Dans la deuxième partie, des éprouvettes en mortier ont été préparées en faisant varier la concentration de sulfate de 0 à 5 g/l dans l'eau de gâchage. Une série d'essais a été aussi réalisée en faisant ajouter aux solutions de sulfate des quantités variables de chlorure. Les essais réalisés dans cette partie ont pour objectif de déterminer les propriétés physico-mécaniques, à savoir le temps de prise et la résistance mécanique à la compression (et son évolution dans le temps), des pâtes des mortiers hydratées avec différentes concentrations en ions sulfate et sulfate-chlorure.

Les deux chapitres qui vont suivre seront consacrés à la présentation des résultats issus des deux programmes expérimentaux menés ainsi qu'à la discussion de ces résultats.

**Chapitre 4 :**

**Résultats et Interprétations**

## **IV.1. Introduction**

Ce Chapitre comprend deux parties. La première partie est consacrée à la présentation et l'interprétation des résultats des essais destinées à l'évaluation de l'effet de l'eau épurée (EP) sur les caractéristiques de béton et sur la résistance à la corrosion de l'acier.

La seconde partie du chapitre est principalement consacrée à l'étude de l'influence de l'augmentation de la concentration en ions sulfate présents dans l'eau de gâchage ainsi que de l'impact de la présence conjointe de ces ions sur la qualité du matériau cimentaire. Dans un premier temps, nous examinons la vitesse d'hydratation du ciment CRS et l'évolution de la résistance mécanique des mortiers de ciment CRS en fonction de la concentration des ions sulfate introduits dissouts dans l'eau de gâchage. Ensuite, nous concentrons sur l'influence des ions sulfate additionnés de chlorure sur les mêmes caractéristiques et nous comparons les résultats à ceux obtenus sur les mélanges hydratés uniquement avec les ions de sulfate.

## **IV.2. Étude de l'influence de l'eau épurée sur les propriétés du béton et sur le comportement à la corrosion des armatures en acier enrobées de béton**

### **IV.2.1 Caractéristiques des eaux épurées utilisées**

D'après la revue bibliographique, l'utilisation des eaux usées traitées peut modifier le temps de l'hydratation du ciment et altérer certaines propriétés du béton tel que le développement de la résistance mécanique, la résistance à la corrosion des armatures, et aussi la durabilité du matériau [5]. À cet effet, les analyses de la composition physico-chimique de l'eau épurée sont très importantes pour préciser sa qualité et les possibilités de son utilisation. Pour cela, nous avons soumis un échantillon d'eau épurée à des analyses physico-chimiques et les résultats des tests sont présentés dans le Tableau (IV.1).

L'analyse des résultats présentés dans le Tableau (IV.1) montre que l'EP est fortement saline. Elle contient des fortes concentrations en ions chlorures, sulfates et sodium. La concentration des ions chlorure est environ cinq fois plus que la limite tolérable pour le béton armé et la teneur d'oxyde de sodium est environ quatre fois plus que la limite admissible fixée à 1 500 mg/l. La concentration en ions sulfate dépasse aussi la limite maximale recommandée par les normes. Cependant, les valeurs de pH, de solides totaux, de plomb, de zinc et de nitrates restent dans les limites acceptables par les normes. On outre, les teneurs en DBO<sub>5</sub> et DCO dans

l'EP, qui qualifiant la pollution organique, sont supérieures aux limites recommandées par Mehrdadi et al [140].

**Tableau IV.1.** Résultats des analyses de l'EP comparés aux exigences des normes et à l'eau de mer utilisée par Younis et al [91]

Paramètre	Unité	EP (utilisée dans cette étude)	Eau de mer (utilisée par Younis et al. [53])	Limites tolérables
pH	-	7.33	8.2	$\geq 4$ [64]
Solides totaux (TS)		18 300	30 300	50 000 [65]
Sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ )		3 148	2 359	3 000 [65]
Chlorure ( $\text{Cl}^-$ )		5 125	18 600	500 à 4 500 (dépendant du type de béton) [64]
Sodium ( $\text{Na}^+$ )	mg/l	4 023	-	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 1 500$ [64]
Potassium ( $\text{K}^+$ )		71	-	
DBO <sub>5</sub>		30	-	18 [140]
DCO		114	-	70 [140]
Zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ )		0.053	-	$\leq 100$ [64]
Plomb ( $\text{Pb}^{2+}$ )		0.152	-	$\leq 100$ [64]
Nitrate ( $\text{NO}_3^-$ )		0.023	-	$\leq 100$ [64]

La salinité de l'EP utilisée dans cette étude peut être attribuée à l'origine des eaux usées. Les eaux souterraines saumâtres représentent la seule source d'approvisionnement en eau pour les habitants de Ouargla. Comme montre le Tableau (IV.1), la différence entre l'EP de cette étude et l'eau de mer utilisée par Younis et al. [91] est que la quantité de sulfates dans notre étude est plus élevée ; elle est 33% plus élevée que celle de l'eau de mer utilisée par Younis et al. Cependant, la teneur des solides totaux et des ions chlorures dans notre effluent est inférieure à celle de l'eau de mer utilisée par Younis et al. [91].

Ainsi, dans cette étude, nous essayons d'utiliser des eaux épurées contenant une concentration élevée de sels dissous pour la confection d'un béton environnemental.

Il a été montré que la présence des concentrations élevées en alcalin dans le mélange de béton entraîne une réduction considérable de la résistance mécanique du béton suite à la formation d'une microstructure plus poreuse [80]. L'augmentation de la concentration en ions de sulfate dans l'eau de gâchage entraîne la réduction de la résistance mécanique du béton suite à la cristallisation de l'ettringite expansive [141]. La présence des ions chlorure présents dans les pores du béton est un facteur principal contribuant à la corrosion de l'acier dans le béton [142]. La réaction entre le ciment et les substances organiques présentes dans l'eau épurée affecte négativement la résistance à la compression et la durabilité du béton [115]. Vu l'ensemble des résultats des analyses de l'EP utilisée dans cette étude, nous essayons donc, dans le cadre de cette recherche, d'évaluer l'influence que les différentes espèces chimiques mentionnées précédemment, présentes simultanément dans l'eau de gâchage, peuvent engendrer sur certaines propriétés du béton et sur sa durabilité.

#### IV.2.2 Effet des eaux épurées sur l'hydratation du ciment et sur l'affaissement de béton

Les résultats de mesure du temps de prise initiale et finale des pâtes de ciment hydratées avec et sans EP sont illustrés dans la Figure (IV.1).

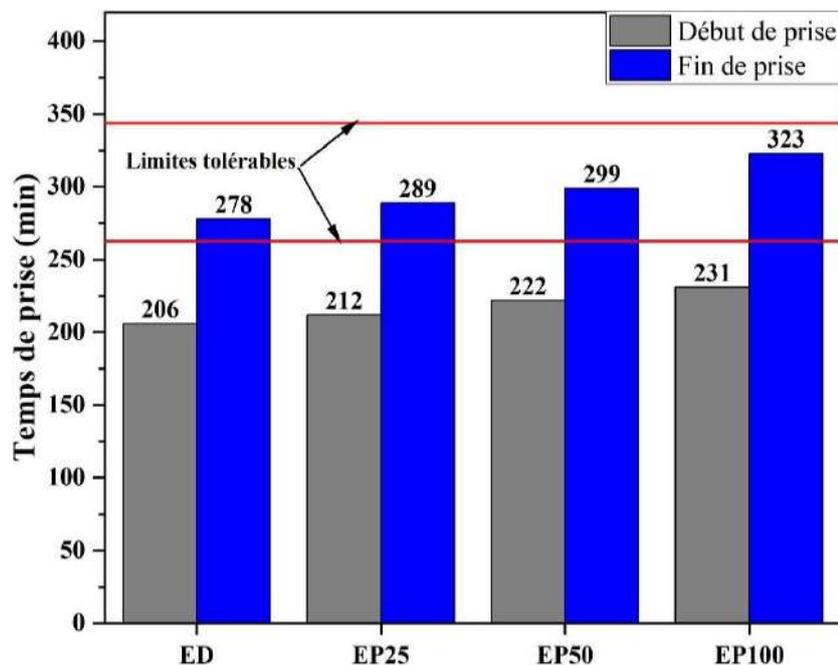


Figure IV.1 Temps de prise des différentes pâtes de ciment

L'analyse des résultats présentés dans la Figure (IV.1) montre que le remplacement de 25%, 50% et 100% de l'ED par de l'EP augmente le temps de prise initiale par 07 min, 16 min et 25 min respectivement, et augmente le temps de prise finale par 11 min, 21 min et 45 min respectivement par rapport aux valeurs obtenues avec la pâte de référence préparée avec l'ED. Malgré cette augmentation, les valeurs des temps de prise obtenues en utilisant de l'EP restent inférieures aux limites minimales et maximales prescrites par les normes EN 1008-2002 [64] et ASTM C1602 [65] présentées dans le Tableau (II.1). Le retard du temps de prise, c'est-à-dire l'augmentation du temps pendant lequel le béton peut être transporté, coulé sur place et fini, obtenu dans cette étude en utilisant l'EP est très utile pour les opérations de bétonnage par temps chaud. Le fait que l'utilisation de l'EP résulte en retardation de prise du ciment est cohérent avec les résultats rapportés par Asadollahfardi et al. [121] et Abushanab et Alnahhal [122].

L'analyse des résultats présentés dans la Figure (IV.1) montre aussi que les temps de prise du ciment augmentent avec l'augmentation de pourcentage de l'EP dans l'eau de gâchage. Cela peut être dû aux substances organiques qui entraînent la diminution de la vitesse d'hydratation du  $C_3S$ . Il est rapporté que la présence d'une concentration aussi faible de certains composés organiques dans le mélange de béton peut conduire à une influence significative sur le temps de prise du ciment [72]. Parmi eux, le propionate, la triéthanolamine, la diéthanolamine, le glyoxal et l'urée ont un effet accélérateur de la réaction d'hydratation du ciment, tandis que les lignosulfonates (sucre), les acides hydroxyles carboxyliques et les glucides ont un effet retardateur. Selon le mécanisme proposé par Suzuki et Nishi, la réaction entre les substances organiques et les ions de calcium (issues de la réaction de l'hydratation du  $C_3S$ ) produisant des sels insolubles est la cause principale du retard de l'hydratation obtenu [72,143]. La retardation de l'hydratation de  $C_3S$  peut être aussi attribuée à l'absorption des composés organiques sur les produits d'hydratation du  $C_3S$  (C-S-H et CH) [72].

La présence des concentrations élevées en particules fines en suspension dans l'eau de gâchage peut diminuer considérablement la surface spécifique ce qui conduit la réduction de la consistance du béton frais entraîné par l'augmentation de la demande en eau et la friction entre les particules du mélange [144]. Pour cela, la mesure de l'affaissement avec le cône d'Abrams pour chaque composition de béton est réalisée pour nous a permet de contrôler la consistance du béton frais. Les résultats trouvés montrent que les valeurs de l'affaissement des bétons contenant de l'EP sont comprises entre 75 et 78 mm, ce qui peut indiquer que l'utilisation de

l'EP comme eau de gâchage a un effet négligeable sur l'affaissement du béton frais. Ces résultats sont en accord avec les ceux rapportés dans [123,124,128].

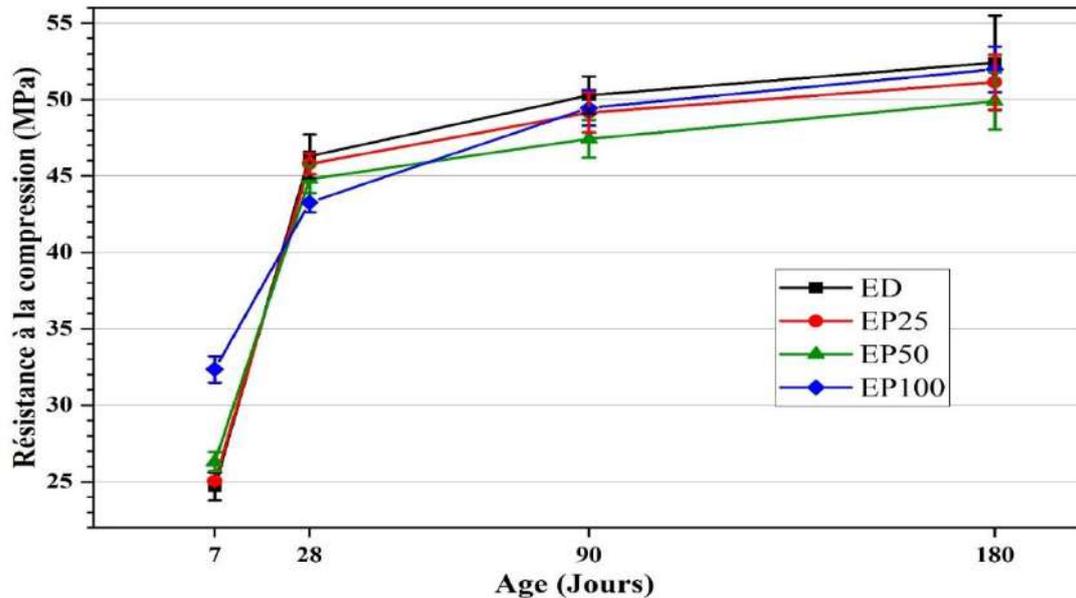
### **IV.2.3 Effet des eaux épurées sur la Résistance mécanique à la compression du béton**

La résistance à la compression du béton est le paramètre fondamental à considérer pour caractériser sa qualité [13]. Pour cela, l'évolution de la résistance à la compression du béton est l'un des paramètres essentiels de notre étude. Le Tableau (IV.2) présente les résultats de la résistance à la compression des bétons préparés avec et sans eau épurée. La Figure (IV.2) montre la variation de la résistance à la compression à différents âges des bétons contenant 0, 25, 50 et 100% de l'EP.

**Tableau IV.2.** Résultats de la résistance à la compression des différents bétons

<b>Type du béton</b>	<b>Résistance à la compression (MPa)</b>				
	<b>7 jours</b>	<b>28 jours</b>	<b>90 jours</b>	<b>180 jours</b>	<b>365 jours</b>
<b>ED</b>	24.69	46.29	50.29	52.41	55.40
<b>EP25</b>	25.04	45.80	49.15	51.14	53.12
<b>EP50</b>	26.31	44.80	47.44	49.90	54.22
<b>EP100</b>	32.35	43.26	49.46	51.98	56.60

L'analyse des résultats présentés dans la Figure (IV.2) et le Tableau (IV.2) indique que tous les bétons contenant de l'EP développent des résistances à la compression plus élevées au jeune âge (à 7 jours) par rapport à celle de béton témoins. On peut aussi remarquer que le remplacement de 25%, 50% et 100% de l'ED par de l'EP augmente la résistance à la compression à 7 jours d'environ 1.4%, 6.5% et 31% respectivement, par rapport au béton témoins préparés avec l'ED. Ces résultats sont conformes aux exigences requises données par les normes EN 1008-2002 [64] et ASTM C1602 [65]. Ces résultats indiquent aussi que l'augmentation de pourcentage de l'EP dans l'eau de gâchage apporte une amélioration de la résistance à la compression du béton à 7 jours. À cause de la forte concentration en chlorure, le béton hydraté avec l'eau de mer a également été rapporté d'avoir une résistance élevée aux jeunes âges [96].

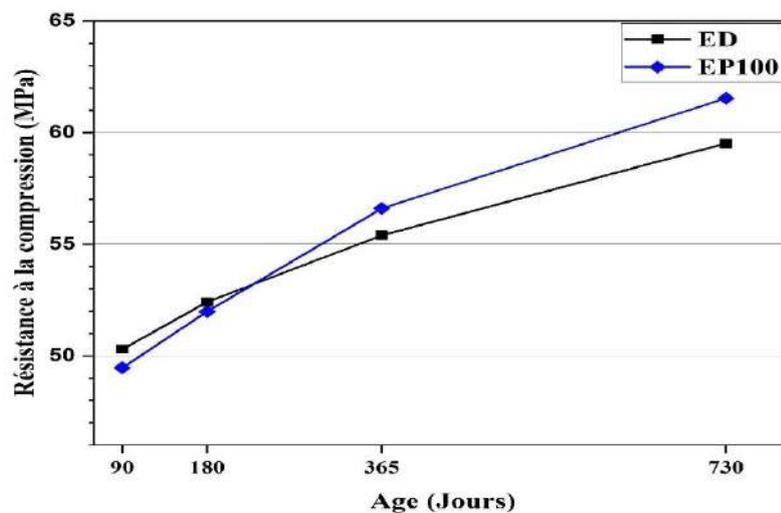


**Figure IV.2** Évolution de la résistance à la compression des bétons contenant de l'ED et 25,50 et 100% EP

En outre, l'augmentation de la résistance à la compression à 7 jours obtenue dans les éprouvettes contenant de l'EP montre que le retard de l'hydratation de  $C_3S$  initialement constaté n'a pas entravé le développement de la résistance initiale du béton. Ce changement peut être expliqué par le fait que la concentration en composés organiques a été fortement réduite dans la solution aqueuse de béton après une certaine période de temps par absorption sur les cristaux de C-S-H et CH.

À l'âge de 28 jours, les bétons préparés avec de l'EP présentent des résistances à la compression légèrement inférieures à celles des éprouvettes témoins. Les résistances à la compression à 28 jours des éprouvettes des bétons contenant 25%, 50%, et 100% de l'EP sont respectivement inférieures d'environ 1%, 3.2% et 6.5% à celle du béton témoins. Cela implique que la résistance de béton à 28 jours diminue graduellement avec l'augmentation du pourcentage de l'eau épurée. Ce changement peut être expliqué par la différence de la concentration ionique entre la solution interstitielle et l'extérieur de l'éprouvette de béton qui provoque la lixiviation de la pâte de ciment durcie et entraîne par conséquent une résistance réduite dans les éprouvettes de béton contenant de l'EP. Ainsi, les pertes maximales de résistance à 28 jours sont constatées pour le béton contenant 100% de l'EP. Des résultats similaires ont été rapportés sur la résistance à la compression à 28 jours du béton contenant de l'eau de mer [91, 145]. Younis et al [91] ont remarqué une augmentation de la résistance à la compression à 7 jours du béton hydraté avec l'eau de mer suivie par une réduction de 7 à 10% de la résistance à l'âge de 28 jours.

Au-delà de l'âge de 3 mois, comme illustré à la Figure (IV.3), les résistances à la compression des éprouvettes de béton contenant 100% de l'EP sont quasiment identiques à celles préparées avec de l'ED. Ces résultats indiquent que la résistance à la compression du béton à long terme est indépendante de la composition chimique de l'eau de gâchage utilisée. Cette dernière remarque a été aussi confirmée par Mohammed et al. [92] et Otsuki et al. [93] pour les bétons hydratés avec l'eau de mer. Les résultats obtenus ont également montré que la lixiviation du ciment observée dans les bétons contenant de l'EP à l'âge de 28 jours est significativement réduite avec l'augmentation de l'âge du béton.



**Figure IV.3** Effet du type de l'eau de gâchage sur la résistance du béton

De façon générale, l'utilisation de l'eau épurée saline de cette étude comme eau de gâchage n'a pas d'effet négatif sur la résistance du béton. Cela peut être expliqué par l'effet simultané des différentes espèces ioniques présentes dans l'EP qui peut permettre de baisser, voire limiter, les actions séparées de chacun des ions présents dans la solution du béton. C'est pour la même raison que l'eau de mer est considérée comme un milieu chimique d'agressivité modérée vis-à-vis du béton [12]. Il a été rapporté que les actions des chacun des ions présents dans l'eau de mer sont interdépendantes et ne sont pas cumulatives [31].

#### **IV.2.4 Effet des eaux épurées sur la microstructure du béton**

La perméabilité à l'eau est considérée comme un indicateur fondamental de durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis de la pénétration des substances agressives du milieu extérieur [13]. Les résultats de mesures de la perméabilité des bétons contenant différents pourcentages de l'EP sont présentés dans le Tableau (IV.3).

Les coefficients de perméabilité ( $K_p$ ) sont calculés par l'équation (IV.1) suivante [146] :

$$K_p = \frac{d^2}{2ht} \quad (\text{IV.1})$$

Où  $d$  (m) : la profondeur de pénétration de l'eau,  $t$  (s) : le temps de l'application de pression, et  $h$  (m) : la hauteur hydrostatique de l'eau.

**Tableau IV.3.** Résultats de la perméabilité à l'eau des différents bétons

Type de béton	Profondeur de pénétration de l'eau (mm)	Coefficient de perméabilité à l'eau (m/s)
<b>ED</b>	25	$2.36 \times 10^{-11}$
<b>EP25</b>	21	$1.66 \times 10^{-11}$
<b>EP50</b>	22	$1.83 \times 10^{-11}$
<b>EP100</b>	18	$1.23 \times 10^{-11}$

Les résultats des essais de pénétration d'eau montrent que les bétons contenant de l'EP sont moins perméables que le béton témoin. La faible perméabilité des bétons contenant de l'EP peut être attribuée à la porosité globale ou à la distribution des tailles de pores dans le béton. En général, les pores à l'intérieur du béton sont principalement classés en micropores (< 5 nm), mésopores (5-50 nm) et macropores (> 50 nm). Il a été rapporté que les macropores sont principalement responsables des caractéristiques de résistance et de l'imperméabilité du béton, tandis que les micropores et les mésopores sont plus influents sur le retrait de dessiccation et le fluage du béton [13].

Compte tenu des éléments précédents, on peut conclure que les bétons contenant de l'EP présentent des quantités plus faibles des macropores et des quantités plus élevées des micropores et mésopores par rapport à ceux formés dans le béton témoin. Des observations similaires ont été rapportées par Shi et al. [96] et Li et al. [97] concernant l'effet de l'eau de mer sur l'affinement de la structure poreuse du béton. Cela peut être attribué à l'effet des ions chlorure sur l'accélération de l'hydratation de  $C_3S$ , qui entraîne la formation d'un C-S-H moins dense ayant une grande surface spécifique et un nombre plus important de pores fins, en comparaison avec celui formé dans le béton témoins [72,147].

En couplant ces analyses avec les images MEB des éprouvettes de béton préparées avec et sans EP (Figures (IV.4) et (IV.5) respectivement), l'ensemble des résultats confirme la

formation d'un béton qui possède une microstructure plus compacte avec des pores plus fins en utilisant l'EP comme eau de gâchage en comparaison avec le béton témoins.

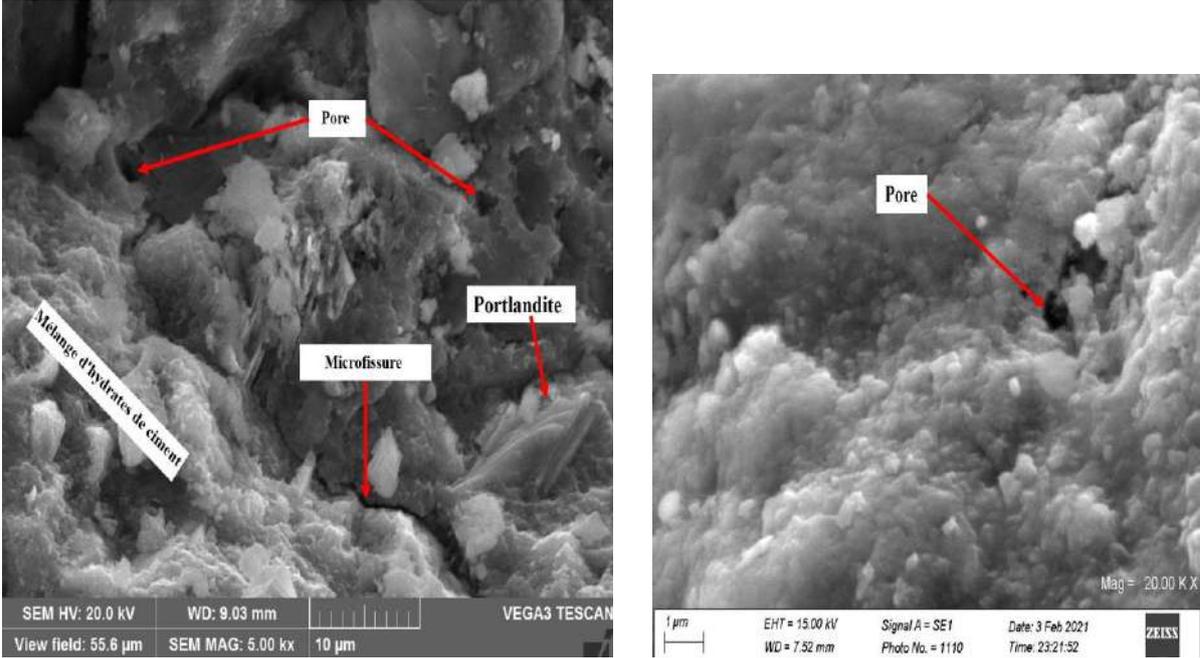


Figure IV.4 Images MEB de béton témoin ED

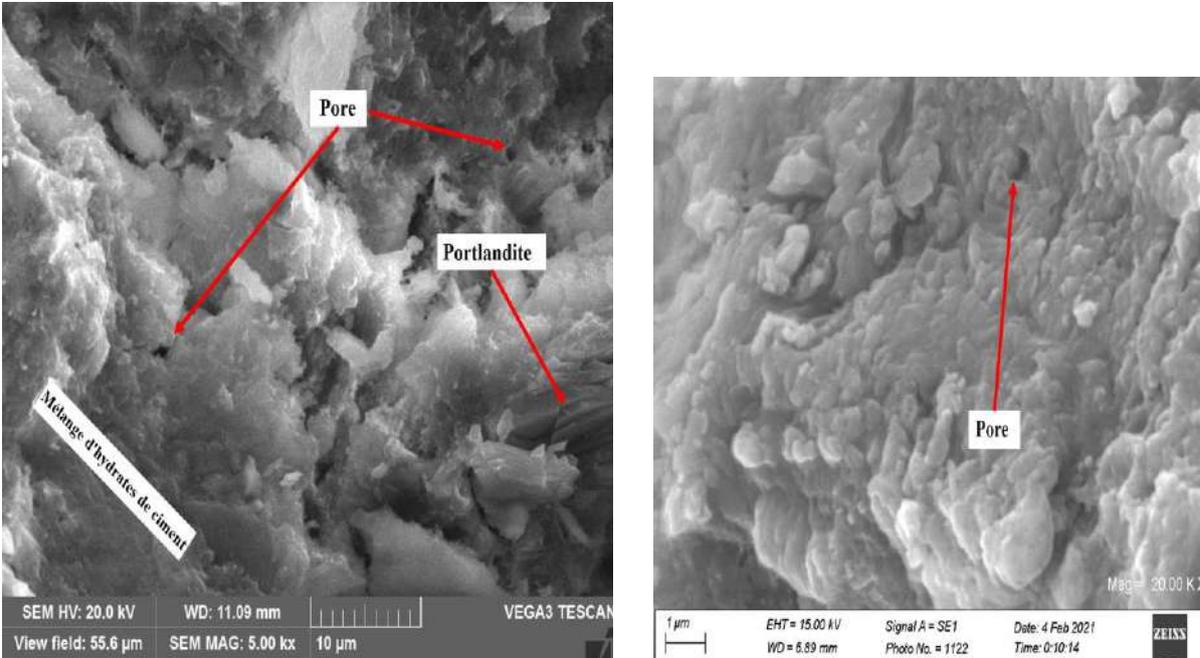
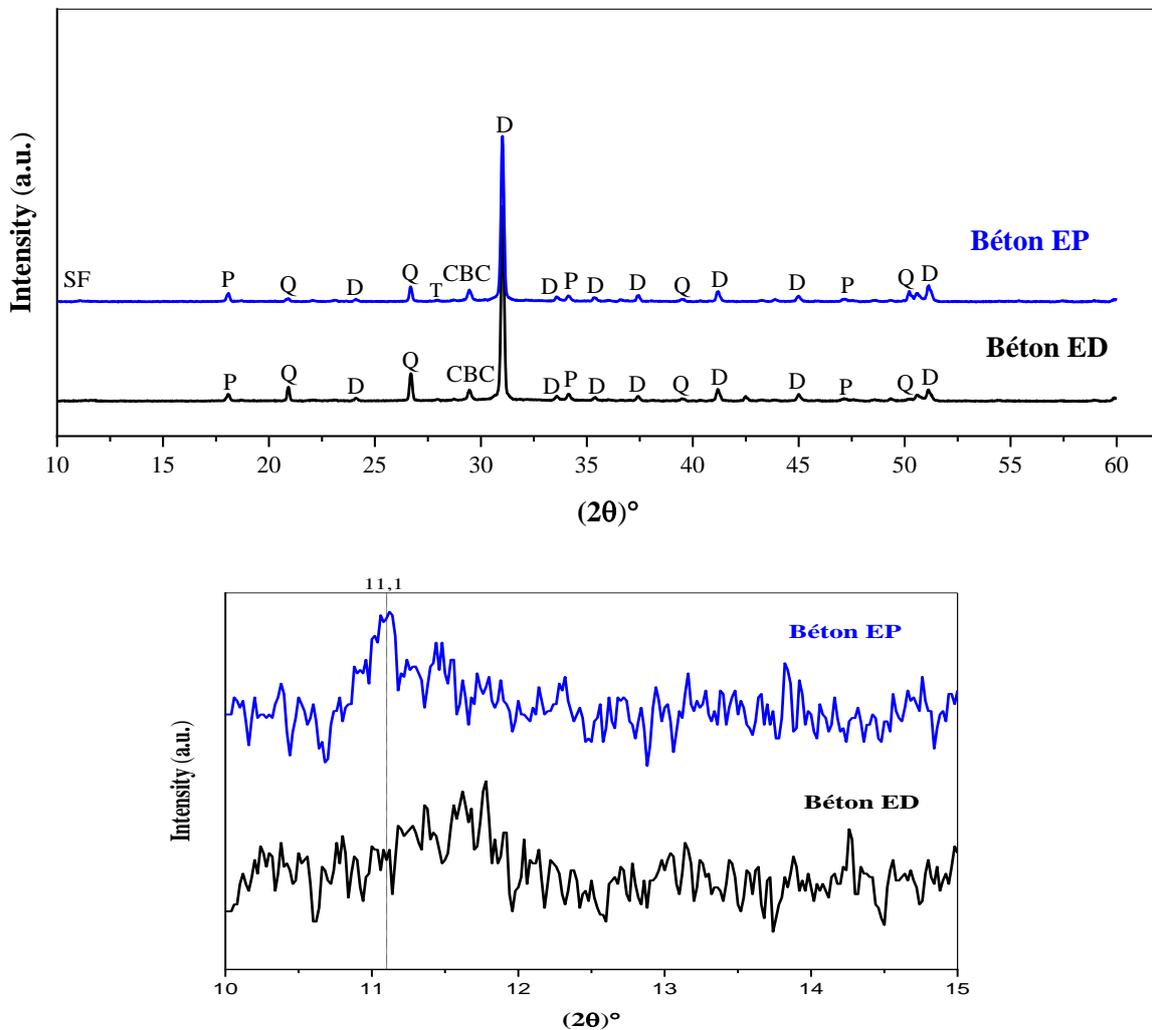


Figure IV.5 Images MEB de béton EP100

Cependant, on peut noter que les images MEB effectuées sur la surface fracturée du béton à cet âge ne suffisent pas pour quantifier complètement les modifications apportées par

l'utilisation de l'EP sur la microstructure de la pâte de ciment. L'utilisation des autres techniques telles que la technique MEB par électrons rétrodiffusés (BSE) sur des surfaces polies du béton ou l'analyse thermogravimétrique (ATG) sur la poudre du béton pourrait être plus efficace.

Les différences entre les espèces minéralogiques formées dans les bétons, préparés avec et sans EP à l'âge de 12 mois, observées à l'aide de DRX sont présentées dans la Figure (IV.6 (a)). Les diffractogrammes obtenus indiquent la formation des produits habituels du béton contenant des granulats calcaires qui sont : dolomite (D), quartz (Q), portlandite (P), carbonate de calcium (CBC). Le quartz et la dolomite proviennent des granulats utilisés dans le mélange de béton. En plus, les résultats de DRX montrent des pics de faible intensité de de sel de Friedel (SF) dans les poudres de béton contenant de l'EP.



**Figure IV.6** Diagrammes DRX des bétons ED et EP100 ; (a) Analyses DRX entre 10° et 60° et (b) Analyses DRX entre 10° et 15°

Comme le montre la Figure (4.6 (b)), le monochloroaluminate hydraté (appelé le sel de Friedel (SF)) se situe à  $11.15^\circ 2\theta$  dans le béton EP100. Il peut être formé par la réaction de  $C_3A$  et  $C_4AF$  avec les ions chlorure introduits au gâchage de béton en utilisant l'EP, selon l'équation (IV.2) [148] :



Comme indique l'équation (IV.2), le sel de Friedel (SF) est un composé important, car il permet la liaison chimique des ions chlorure. Il a été largement considéré que la teneur en  $C_3A$  du ciment est le facteur principal qui affecte la capacité de liaison chimique des ions chlorure par la formation de sel de Friedel (SF) [149].

Dans notre étude, et comme la teneur en  $C_3A$  du ciment CRS utilisé est plus faible, l'intensité de SF est faible ce qui indique que la quantité de SF formée dans le béton EP100 est faible. Cela signifie qu'une grande quantité d'ions de chlorure restent libres dans la solution interstitielle du béton et par conséquent la possibilité de corrosion des aciers enrobés de béton EP100 sera élevée.

#### **IV.2.5 Effet des eaux épurées sur le comportement à la corrosion des armatures en acier enrobées de béton**

La corrosion de l'acier est un phénomène de dégradation majeur qui menace directement la sécurité et la stabilité des structures en béton armé et, par conséquent, entraîne des impacts économiques et environnementaux [150]. Dans cette étude, l'état de la corrosion de l'acier est évalué à travers la vitesse de corrosion de l'acier enrobé dans le mortier (en présence et en absence de l'EP) et aussi à travers le comportement actif-passif de l'acier enrobé dans le béton.

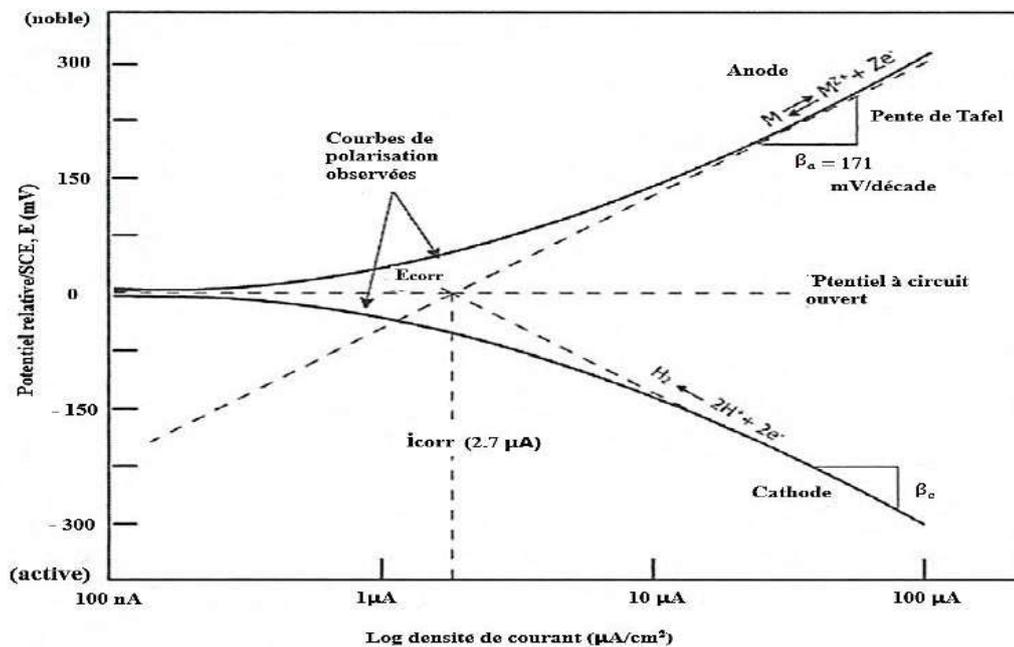
##### **IV.2.5.1 Étude de la vitesse de corrosion de l'acier enrobé de mortier :**

La détermination de la vitesse de corrosion de l'acier enrobé de béton revête une grande importance pour la prévision de la durée de vie d'une structure en béton armé, pour l'estimation de la capacité structurelle en service des ouvrages corrodés, ainsi que pour définir la méthode de réparation adéquate [151]. Pour cela, l'évolution de la vitesse de corrosion est mesurée dans cette étude en se basant sur la technique d'extrapolation aux droites de Tafel et la technique de résistance de polarisation. Les deux techniques permettent au moyen des courbes d'évolution de la densité de courant en fonction de potentiel qui circule dans le métal. Comme la montre la Figure (IV.7), l'intersection des droites anodiques et cathodiques de Tafel donne le potentiel de corrosion ( $E_{corr}$ ) et logarithme du courant de corrosion ( $i_{corr}$ ). Le logiciel VoltaMaster 4 intégré

au potentiostat a permis de déterminer les coefficients de Tafel ( $\beta_a$  et  $\beta_c$ ) par le calcul des pentes des courbes de Tafel après un simple choix de la portion de la courbe E-Log (i) à traiter. La constante de Stern-Geary nécessaire pour le calcul de la vitesse de corrosion est donnée par l'équation de Stern-Geary [152]:

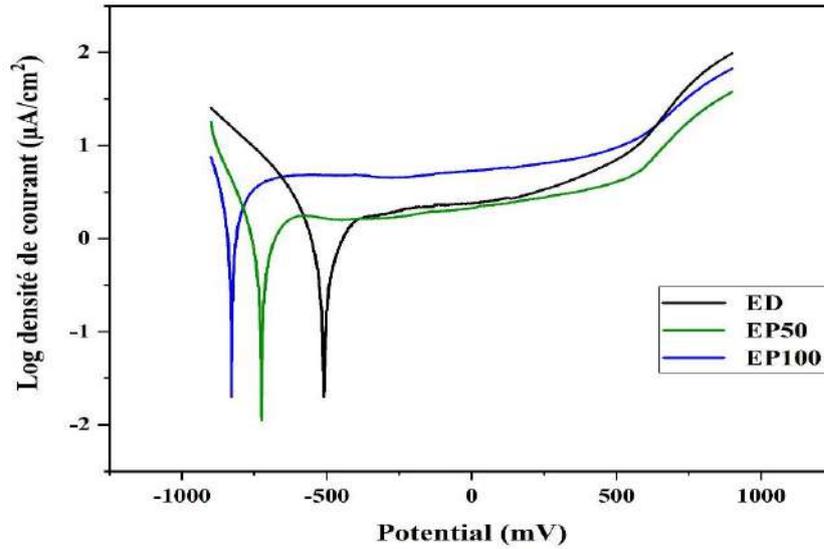
$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c)} \quad (IV.3)$$

La valeur de B peut varier entre 13 mV et 52 mV en fonction du système métal/électrolyte étudié [153]. Dans le cas de l'acier enrobé de béton, il a été trouvé que la valeur de B est égale à 26 mV pour l'acier à l'état actif [154].



**Figure IV.7** Courbe de Tafel [155]

Les courbes de Tafel pour les mortiers ED, EP50 et EP100 sont présentées dans la Figure (IV.8). Le Tableau (IV.4) présente les valeurs des paramètres  $\beta_a$  et  $\beta_c$  ainsi que les valeurs de la constante de Stern-Geary (B) calculées en appliquant la formule IV.3.



**Figure IV.8** Courbes de Tafel de l'acier enrobé dans les mortiers ED, EP50 et EP100

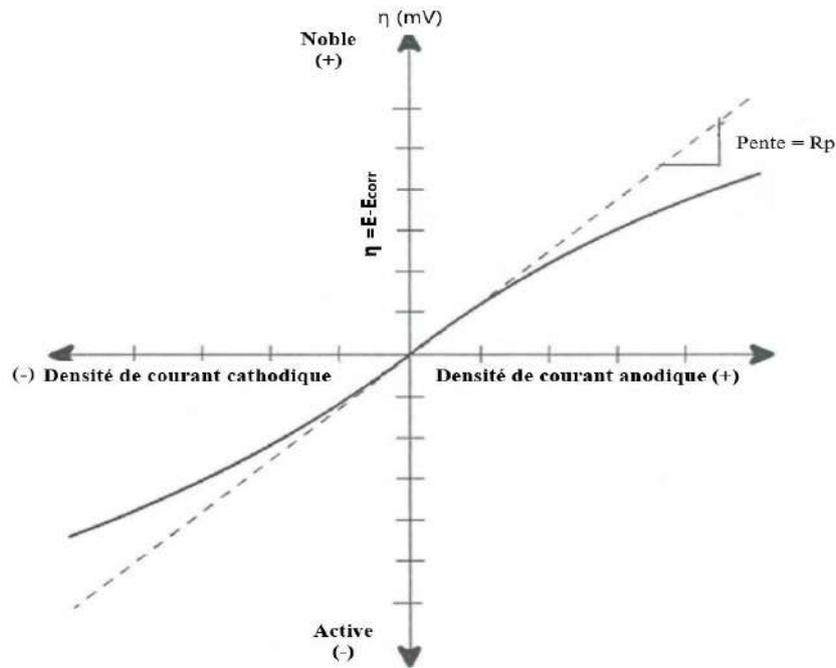
**Tableau IV.4.** Valeurs des coefficients de Tafel et de la constante de Stern-Geary

Type de mortier	$\beta_a$ (mV)	$\beta_c$ (mV)	B (mV)
ED	135	93	23.90
EP50	185	109	29.78
EP100	128	77	20.57

Comme le montre la Figure (IV.9), la courbe potentiel-densité de courant est approximativement linéaire dans la région  $\pm 10$  mV au voisinage de potentiel de corrosion ( $E_{corr}$ ). La pente de cette linéaire région est appelée "résistance de polarisation ( $R_p$ )" [155] :

$$R_p = \left( \frac{\Delta E}{\Delta I} \right)_{\Delta E=0} \quad (IV.4)$$

La résistance de polarisation est la résistance qu'oppose l'acier à la polarisation qu'on lui impose. Les principaux avantages de cette mesure sont sa rapidité d'exécution, sa facilité de mise en application et les faibles surtensions requises pour effectuer la mesure (non destructive) [155].



**Figure IV.9** Courbe de polarisation linéaire [155]

Millard G.S et al. [156] ont proposé une classification pour évaluer le risque de corrosion à partir des valeurs de résistance de polarisation (Tableau (IV.5)).

**Tableau IV.5.** Relation entre l'activité de corrosion et la résistance de polarisation [156]

Risque de corrosion	Résistance de polarisation
	$R_p$ ( $K\Omega.cm^2$ )
État passif	> 250
Faible/ Modéré	250~25
Elevé	25~2.5
Très Elevé	2.5~0.25

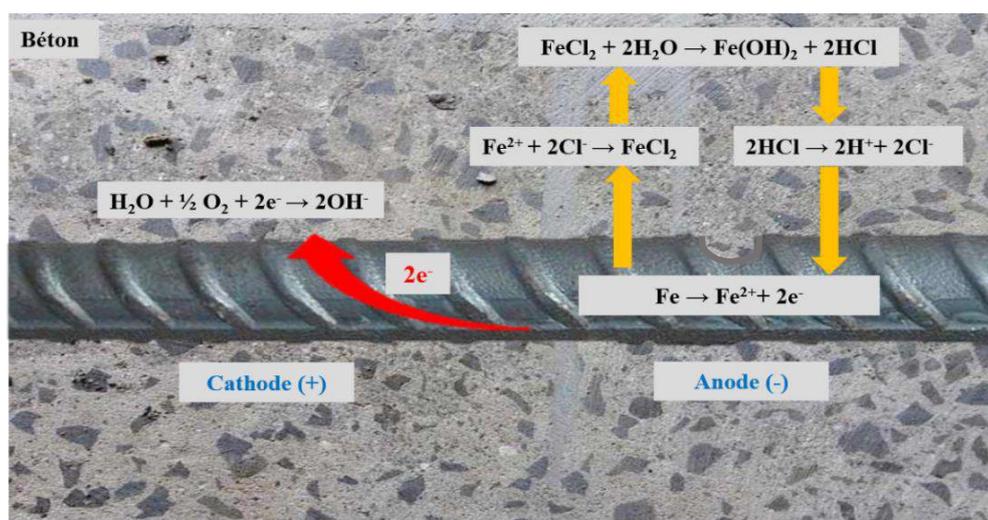
Les valeurs de potentiel de corrosion  $E_{corr}$  et de la résistance de polarisation  $R_p$  sont regroupées dans le Tableau (IV.6).

**Tableau IV.6.** Caractéristiques électrochimiques de l'acier enrobé dans les mortiers étudiés

Type de mortier	$R_p$ ( $K\Omega.cm^2$ )	$-E_{corr}$ (mV)
<b>ED</b>	54.40	513
<b>EP50</b>	38.72	727
<b>EP100</b>	15.09	831

L'analyse des résultats présentés dans le Tableau (IV.6) et la Figure (IV.8) montre que le remplacement de l'eau distillée (50% et 100%) par de l'eau épurée conduit à la diminution de potentiel de corrosion ( $E_{corr}$ ) vers des valeurs plus négatives. Comme indiqué dans le tableau (IV.6), l'augmentation du pourcentage de l'EP à conduit aussi à la diminution de la résistance de polarisation ( $R_p$ ). Selon la classification de Tableau (IV.5) qui précise l'état de corrosion en fonction des valeurs de  $R_p$ , on peut constater que pour les bétons ED et EP50 la corrosion est faible/modérée et pour le béton EP100 la corrosion est élevée. Ceci est principalement dû à la concentration élevée en ions chlorures introduits au gâchage de mortier en utilisant l'EP qui se traduit directement par une concentration élevée en ions chlorure libres dans la solution interstitielle du mortier. Ces observations sont en accord avec le diagramme DRX du béton EP100 (Figure (IV.6)) qui indique la formation de faibles quantités de sel de Friedel.

En générale, les ions chlorure dépassivent les aciers par destruction locale de film d'oxyde protecteur initialement formé grâce à l'alcalinité du béton (appelé film de passivation), ce qui déclenche une attaque de corrosion localisée et par conséquent l'apparition des piqûres de corrosion sur la surface de l'acier. Comme indique la Figure (IV.10), une fois les piqûres sont apparues, la composition de la solution à l'intérieur de la piqûre devient plus acide que la solution inertielle adjacente. Le processus de corrosion dans ce cas est dit 'auto-catalysé' puisque les ions chlorure ne sont pas consommés définitivement dans le processus ; les ions chlorure réagissent avec le métal, mais le complexe formé est instable et se dissout et libère de nouveau les ions de chlorure dans la solution pour se combiner avec d'autres ions métalliques.



**Figure IV.10.** Représentation schématique de mécanisme de corrosion par piqûres induite par les ions chlorure

À partir des mesures de  $R_p$  et du calcul du courant de corrosion ( $i_{\text{corr}}$ ), la densité de courant de corrosion ( $I_{\text{corr}}$ ) est peut-être effectuée. La relation entre la résistance de polarisation et le courant de corrosion est donnée par l'équation de Stern-Geary [152] :

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p} \quad (\text{IV.5})$$

La densité de courant de corrosion peut être calculée en divisant le courant de corrosion par la surface de la zone d'acier polarisé (A) [155] :

$$I_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p A} \quad (\text{IV.6})$$

Finalement, la vitesse de corrosion de l'acier ( $V_{\text{corr}}$ ) est calculée à partir de  $I_{\text{corr}}$  en appliquant la loi de Faraday :

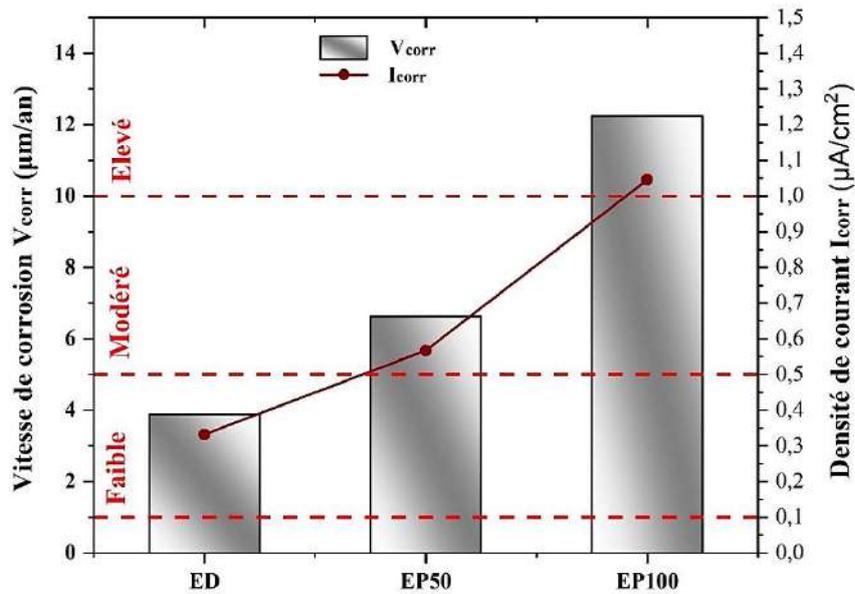
$$\text{Vitesse de Corrosion } (\mu\text{m/an}) = 11.6 I_{\text{corr}} (\mu\text{A/cm}^2) \quad (\text{IV.7})$$

La relation entre la vitesse de corrosion et la densité de courant avec la probabilité de corrosion proposée dans les recommandations RILEM TC 154 EMC [157] est présentée dans le Tableau (IV.7).

**Tableau IV.7.** Relation entre la vitesse de corrosion et la densité de courant avec l'état de corrosion [157]

Densité de courant $I_{\text{corr}} (\mu\text{A/cm}^2)$	Vitesse de corrosion (mm/an)	Probabilité de corrosion
$\leq 0.1$	$\leq 0.001$	Négligeable
0.1 à 0.5	0.001 à 0.005	Faible
0.5 à 1	0.005 à 0.01	Modéré
$> 1$	$> 0.01$	Élevé

Dans le cas de notre étude, la densité de courant ( $I_{\text{corr}}$ ) et la vitesse de corrosion ( $V_{\text{corr}}$ ) des aciers enrobés dans les mortiers ED, EP50 et EP100 calculées en appliquant les formules IV.6 et IV.7, respectivement, sont illustrées dans la Figure (IV.11). À partir de l'équation de Stern-Geary, on peut noter que la vitesse de corrosion ( $V_{\text{corr}}$ ) est inversement proportionnelle à la résistance de polarisation ( $R_p$ ).



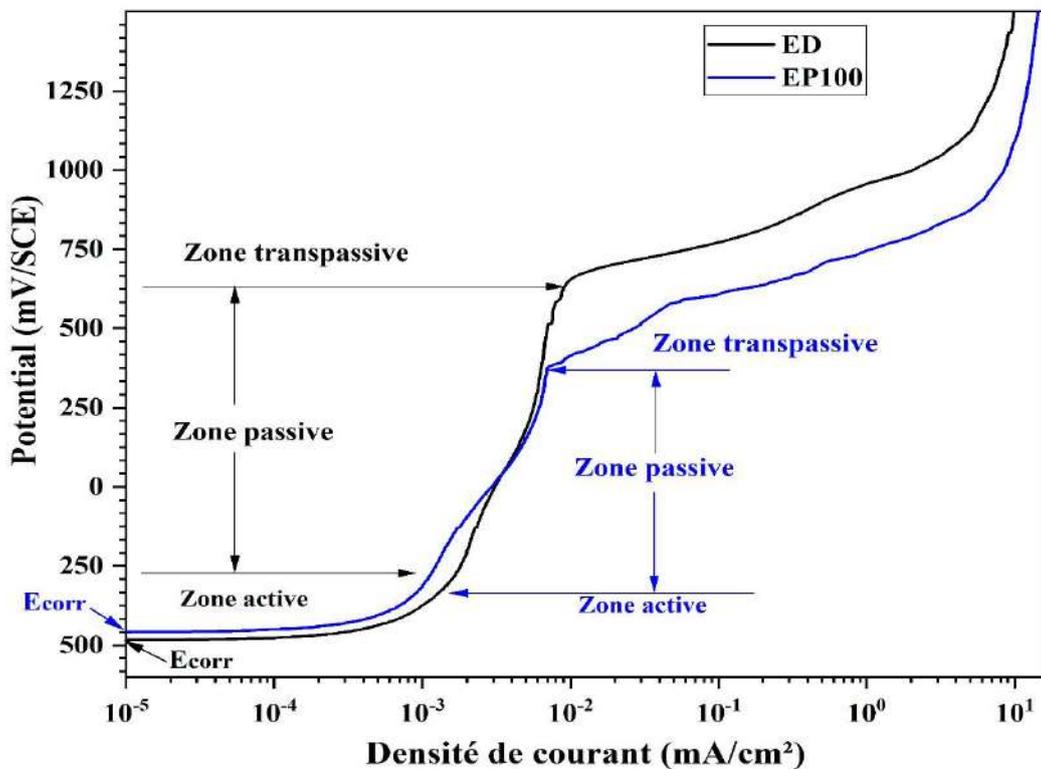
**Figure IV.11** Vitesse de corrosion et densité de courant des aciers enrobés dans les mortiers étudiés

À partir des résultats on observe l'augmentation de la densité de courant ( $I_{corr}$ ) et de la vitesse de corrosion ( $V_{corr}$ ) de l'acier lorsque le pourcentage de l'eau épurée augmente dans le mortier. Selon la classification de Tableau (IV.7), la probabilité de corrosion est considérée faible pour l'acier enrobé dans le mortier ED et modérée pour l'acier enrobé dans le mortier EP50. Cependant, la possibilité de corrosion est élevée pour l'acier enrobé dans le mortier EP100. Ceci est sûrement dû à la concentration élevée en chlorure dans l'EP qui détruit le film passif protecteur de l'acier et conduit à la formation de piqûres à la surface du métal. Ces résultats indiquent que le remplacement total de l'eau de gâchage par de l'eau épurée devrait être évité pour le béton renforcé par des armatures en acier ordinaire.

Bien que l'étude de corrosion basée sur les courbes de polarisation déterminées pour l'acier enrobé de béton (ou mortier) soit une méthode très utile, il apparait que la méthode reste beaucoup plus complexe que pour le cas de l'acier immergé dans une solution électrolytique simulant la solution interstitielle du béton [158]. Le problème est peut être principalement lié au coefficient de diffusion effectif faible de la pâte de ciment (par rapport à l'eau) [151]. Ainsi, lors de la détermination des courbes de polarisation, le pH et la composition ionique de la solution interstitielle du béton enrobant la surface de l'acier peuvent être altérés [151]. C'est peut-être que pour cette raison que dans la majorité des recherches sur la corrosion, les courbes de polarisation sont souvent déterminées dans des solutions électrolytiques simulant la solution interstitielle du béton. Pour cela, on a procédé à la détermination des courbes de polarisation dans des solutions électrolytiques préparées à partir de la poudre de béton.

#### IV.2.5.2 Étude de comportement actif-passif de l'acier dans des extraits des aqueux des poudres de béton :

Dans cette partie, le comportement actif-passif de l'acier enrobé de béton est évalué à travers des tests de polarisation potentiodynamique dans des extraits de poudre de béton. Les extraits de béton ont été préparés à partir des éprouvettes de béton EP100 et ED à l'âge de 24 mois de cure. Selon Kapat et al. [139], la solution préparée à partir de la poudre de béton représente presque l'état électrique de la solution interstitielle du béton entourant l'armature. Les courbes de polarisation obtenues dans cette partie sont illustrées dans la Figure (IV.12).



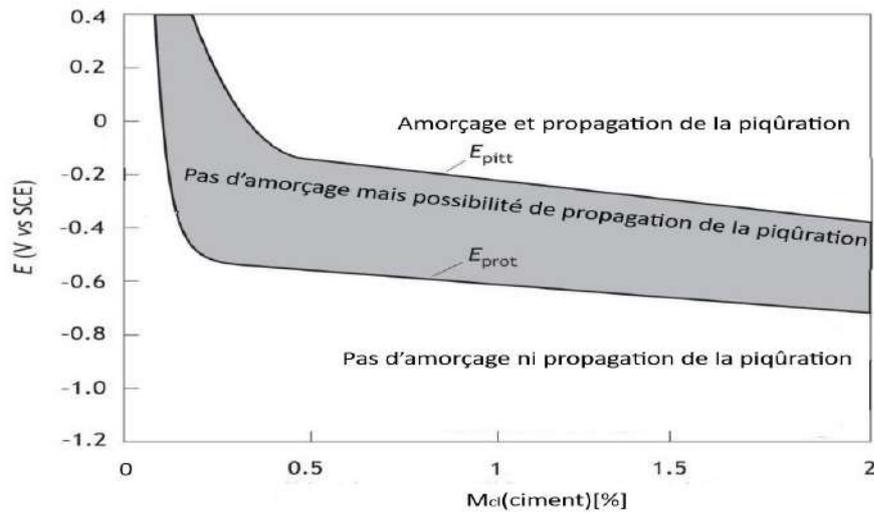
**Figure IV.12** Courbes de polarisation de l'acier dans les extraits aqueux des bétons ED et EP100

Généralement, les allures des courbes de polarisation sont divisées en trois zones de corrosion, à savoir la zone active, la zone passive et la zone transpassive. Dans la zone active, le potentiel est plus positif que le potentiel d'équilibre  $E_{corr}$ . Par conséquent, la dissolution de l'acier a lieu à l'anode, ce qui correspond à une augmentation significative de la densité de courant pour une faible augmentation du potentiel [155]. Au-delà d'un potentiel spécifique, appelé potentiel passif ( $E_{passive}$ ), la vitesse de corrosion de l'acier est considérablement réduite en raison de la formation d'un film très fin d'oxyde de fer (dite film passif) à la surface de l'acier, qui l'isole complètement de la solution. Par conséquent, la densité de courant devient presque

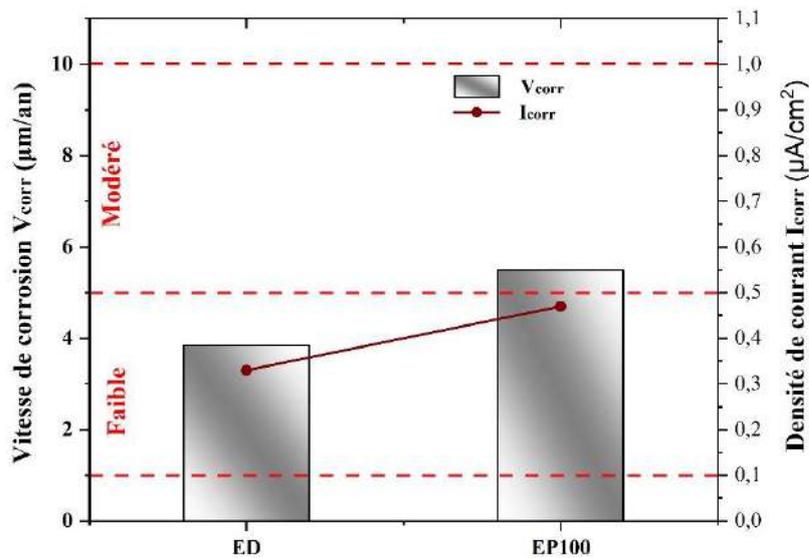
indépendante du potentiel dans cette zone (dite zone passive) jusqu'à ce que la rupture du film passif soit atteinte [155]. Le potentiel auquel la rupture du film passif a lieu, et où la densité de courant augmente de manière significative est appelé le potentiel transpassif. Dans la zone transpassive, l'augmentation de l'oxygène à la surface de l'acier provoque une augmentation significative de la vitesse de corrosion [155]. En cas de présence d'ions chlorure, la région transpassive est appelée région de piqûre (et le potentiel transpassif est appelé potentiel de piqûre ( $E_{\text{pitting}}$ )) [117].

Les résultats illustrés dans la Figure (IV.12) montrent que les valeurs du potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ) sont de -488,75 mV pour la solution de béton ED et -459,5 mV pour la solution de béton EP100. On peut aussi noter que les valeurs du potentiel passif ( $E_{\text{passive}}$ ) sont de -270.4 mV pour la solution de béton ED et -334.4 mV pour la solution de béton EP100, tandis que les valeurs du potentiel de piqûre (ou transpassive  $E_{\text{pitting}}$ ) sont de +628,03 mV pour la solution de béton ED et +369,84 mV pour la solution de béton EP100. D'après ces résultats, on constate que le potentiel de piqûre de l'acier dans les solutions de béton EP100 est inférieur à celui de l'ED, ce qui réduit le domaine de la zone passive et augmente le domaine de la zone de piqûre dans le béton EP100. Ceci est certainement attribué à la teneur plus élevée de chlorure présent dans le béton préparé avec de l'EP, ce qui entraîne un risque plus élevé de corrosion par piqûre de l'acier par rapport au béton ED.

Pietro Pedferri a proposé un diagramme qui présente la variation de potentiel de piqûre de l'acier en fonction de la teneur en chlorure dans le béton. Ce diagramme (Figure (IV.13)) est adopté dans la norme EN 12696-2000 [159] pour la protection cathodique de l'acier enrobé de béton. D'après ce diagramme, et vu que le potentiel de piqûre de l'acier trouvé dans cette étude pour le béton EP100 (+369,84 mV), on peut estimer que la concentration des ions chlorure dans la solution interstitielle au niveau de l'acier comprise entre 0.15% à 0.3% par rapport à la masse de ciment. Il a été signalé que le risque de corrosion des armatures du béton associé à une teneur totale en chlorure inférieure à 0,4 % de la masse de ciment est considéré comme « faible » pour le béton non carbonaté préparé avec un ciment contenant 8% ou plus de  $C_3A$  et comme « modéré » pour le béton non carbonaté préparé avec un ciment contenant moins de 8% de  $C_3A$  [160]. Pour évaluer le niveau de risque de corrosion de l'acier dans les extraits des poudres de béton, la densité de courant ( $I_{\text{corr}}$ ) et la vitesse de corrosion ( $V_{\text{corr}}$ ) sont calculées en appliquant les formules IV.6 et IV.7, respectivement, et les valeurs trouvées sont illustrées dans la Figure (IV.14).



**Figure IV.13** Diagramme de Pedeferri : potentiel de piqûre de l'acier dans le béton contaminé par les chlorures [125]



**Figure IV.14** Vitesse de corrosion et densité de courant des aciers dans les extraits aqueux des bétons ED et EP100

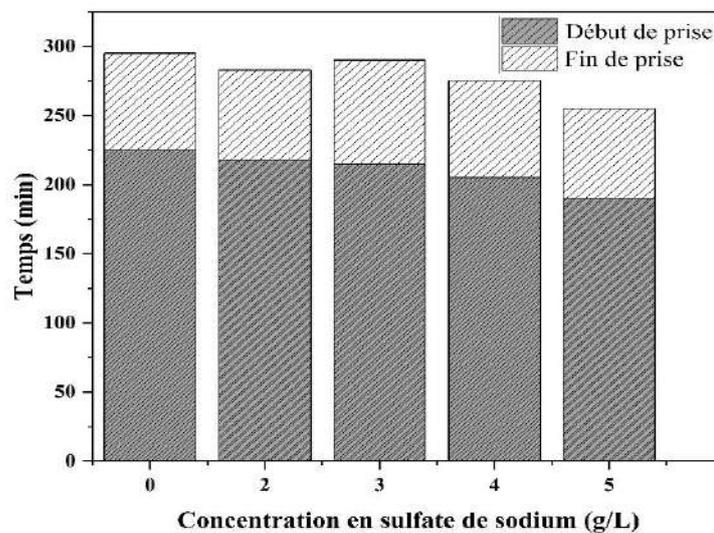
D'après la Figure (IV.14), on peut constater que le risque de corrosion de l'acier enrobé dans le béton EP100 diminue considérablement à l'âge de 24 mois. Ces résultats confirment ceux obtenus par Otsuki [93], qui avait conclu que l'effet négatif de chlorure présent dans l'eau de gâchage (eau de mer) diminue relativement avec l'âge de béton. La diminution de risque de corrosion dans notre étude peut être due à la diminution de la concentration en ions chlorure libres dans la solution interstitielle du béton avec le temps. Cela peut être due à la concentration élevée en ions sulfate introduits simultanément avec les ions chlorure au gâchage de béton en utilisant

l'EP. Cette analyse est en accord avec celle de Shaheen et Pradhan [161] qui ont constaté que le risque de corrosion par piqûre de l'acier dans des extraits de poudre de béton contaminés par des teneurs croissantes en ions de chlorure est atténué par la présence d'une concentration élevée d'ions sulfate dans la solution. C'est-à-dire que la présence des ions sulfate conjointement avec les ions chlorure peut augmenter la résistance à la corrosion des armatures enrobées de béton. Cette dernière observation présente un intérêt positif sur le béton et doit être confirmée par des recherches supplémentaires approfondies.

### IV.3. Étude de l'influence des ions sulfate et chlorure sur l'hydratation et la résistance mécanique du mortier

#### IV.3.1 Étude des temps de prise du ciment CRS en fonction des différentes concentrations en sulfate et chlorure

L'influence des ions sulfate sur les temps de début et fin de prise des pâtes de ciment CRS lorsque ces ions sont présents dans l'eau de gâchage est présentée dans la Figure (IV.15).



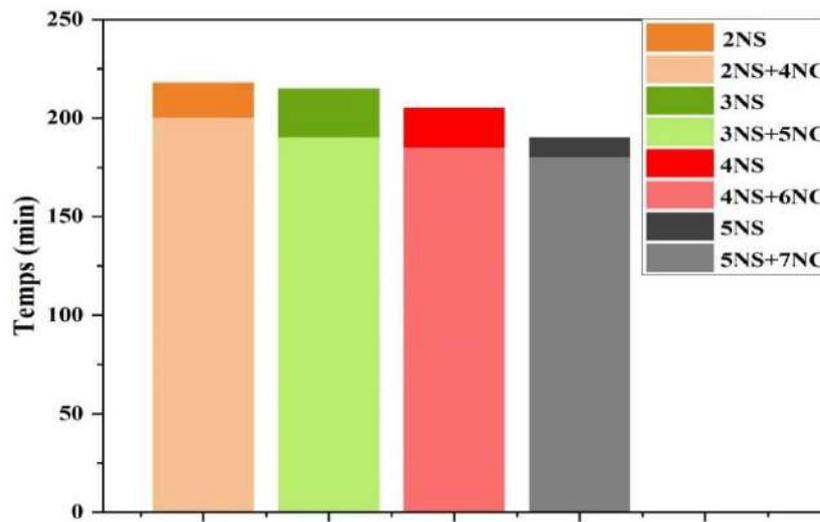
**Figure IV.15** Évolution des temps de prise du ciment CRS en fonction de la concentration en sulfate de sodium.

D'après la Figure (IV.15), on peut remarquer que les ions sulfate présents dans l'eau de gâchage agissent comme accélérateur de prise du ciment CRS pour toutes les concentrations étudiées. Les pâtes de ciment gâchées avec des concentrations de 2, 3 et 4 g/l en sulfate présentent respectivement un gain en temps de début de prise de l'ordre de 3%, 4% et 8.8% et un gain en temps de fin de prise de l'ordre de 4%, 1.7% et 6.7% par rapport au témoin. Il est à noter que la pâte de ciment gâchée avec la concentration 5 mg/l en ions sulfate donnent

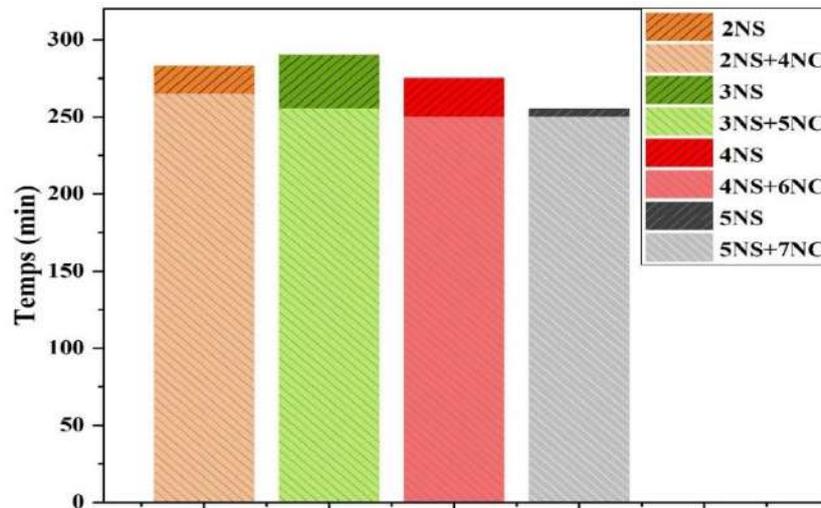
l'accélération maximale sur le temps de début (15.5%) et de fin de prise (13.5%) du ciment CRS. L'accélération de l'hydratation du ciment CRS obtenue dans cette étude peut être attribuée à l'effet des ions sulfate sur l'amélioration de l'hydratation de  $C_3S$ , contribuant ainsi à un durcissement rapide du ciment. Il est possible que cette amélioration de l'hydratation de  $C_3S$  puisse s'expliquer par l'accélération de la solubilité des ions calcium en présence de concentration croissante en ions sulfate [34]. L'étude de Zunino et Scrivener [162] sur l'hydratation des alites ( $C_3S$ ) en présence de gypse, a montré que le degré d'hydratation des  $C_3S$  en présence de gypse est significativement élevé à celui du  $C_3S$  pure. Au contraire, Kumar et Kameswara Rao [34] ont observé que la présence sulfate de sodium dans l'eau de gâchage entraîne l'augmentation des temps de prise du ciment ordinaire. Ces résultats nous a permis de noter que l'effet des sulfates sur l'accélération de l'hydratation du ciment dépend du type de ciment, de la concentration en ions sulfate, du cation associé ( $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $NH_4^+$ ...) associé au sulfate.

L'effet de différentes concentrations en sulfate et chlorure de sodium lorsqu'ils sont présents conjointement dans l'eau de gâchage sur les temps de début et de fin de prise des pâtes de ciment CRS sont présentés dans les Figures ((IV.16) et (IV.27) respectivement. À partir de ces résultats, on peut constater que l'ajout d'une quantité de chlorure aux solutions de sulfates accélère de plus les temps de prises du ciment CRS et que les accélérations mesurées peuvent être jusqu'à 12% supérieures à ceux obtenus avec les pâtes de ciment hydratées uniquement avec les ions sulfate. Ces résultats confirment l'effet accélérateur des ions chlorure sur l'accélération de l'hydratation de la phase  $C_3S$  du ciment qui est largement connue dans le domaine de la chimie des ciments. Dans cette étude, l'effet accélérateur le plus important est remarqué pour les concentrations de 3 et 4 g/l de sulfate de sodium en ajoutant respectivement une quantité de 5 et 6 g/l de chlorure de sodium. Nous pouvons également remarquer que l'effet accélérateur est moins important pour la concentration 5 g/l sulfate de sodium en ajoutant 7 g/l de chlorure de sodium. À partir des résultats de cette partie et celle de la partie précédente, il est évident de constater que la présence des ions  $SO_4^{2-}$  ou  $Cl^-$  accélère individuellement la vitesse de l'hydratation du  $C_3S$  et que la présence conjointe de ces deux espèces accélère de plus l'hydratation du  $C_3S$ . Les résultats de l'étude de l'hydratation des pâtes de ciment en présence de l'eau de mer montrent aussi que le processus d'hydratation du  $C_3S$  a été accéléré par rapport aux pâtes de référence préparées avec de l'eau distillée et que cette accélération est principalement due aux ions ( $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ), présents dans l'eau de mer [163]. La

pâte de ciment hydratée avec l'eau de mer présente par conséquent une période dormante raccourcie et une structure plus cohésive et plus rigide à l'état frais [163].



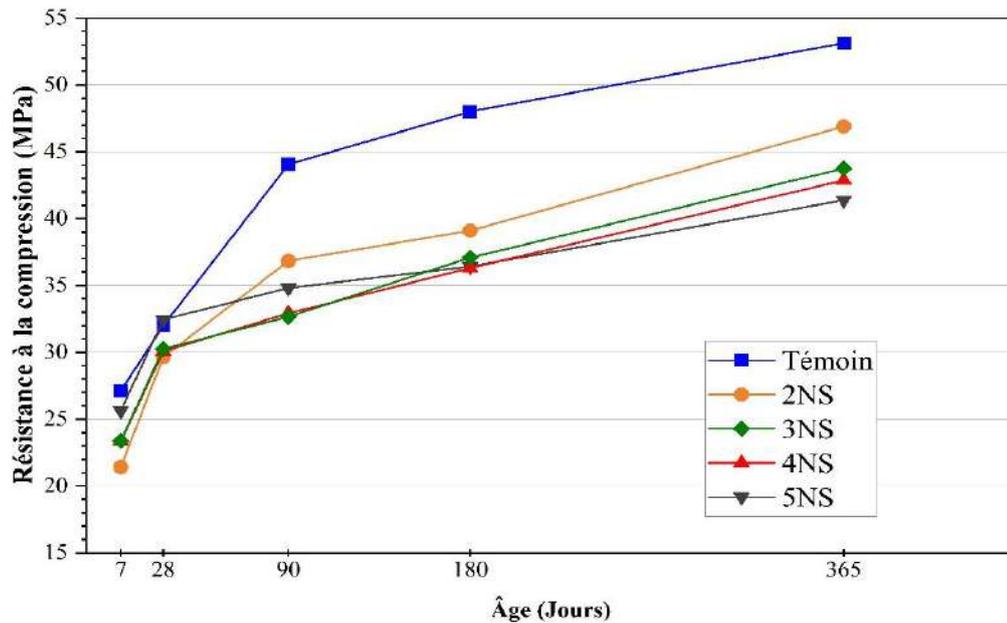
**Figure 4.16** Évolution des temps de début de prise du ciment CRS hydratés avec des solutions de différentes concentrations en sulfate et chlorure de sodium.



**Figure 4.17** Évolution des temps de fin de prise du ciment CRS hydratés avec des solutions de différentes concentrations en sulfate et chlorure de sodium.

### IV.3.2 Étude de résistance mécanique du mortier de ciment CRS en fonction des différentes concentrations en sulfate et chlorure

L'influence des ions sulfate sur la résistance à la compression de mortier de ciment CRS lorsque ces ions sont présents dans l'eau de gâchage est illustré dans la Figure (IV.18).



**Figure 4.18** Évolution des résistances à la compression des mortiers de ciment CRS hydratés avec des solutions de différentes concentrations en sulfate de sodium.

La Figure (IV.18) montre que l'effet négatif de la présence des ions sulfate dans la solution d'hydratation du ciment CRS se manifeste dès 7 jours. La concentration de 2 g/l de sulfate conduit à la plus grande réduction de la résistance à 7 jours (21%) par rapport au témoin, en accord avec la valeur limite exigée par la norme EN 1008-2002 [64]. Par contre la concentration 5 g/l de sulfate présente une résistance à 7 jours proche de celle du témoin avec un pourcentage de réduction de 5.45%. Les résultats présentés dans la Figure (IV.18) indiquent aussi que l'effet négatif des ions de sulfate sur la résistance à la compression du mortier observé à 7 jours est remarquablement diminué à l'âge de 28 jours lorsque l'hydratation du ciment est plus avancée. On obtient alors des résistances à la compression à 28 jours de l'ordre de 92% à 94% pour les mortiers contenant 2, 3 et 4 mg/l sulfate. Mais pour les mortiers contenant 5 mg/l de sulfate la résistance à la compression à 28 jours est similaire du mortier témoins. Il est à noter aussi que les écarts des résistances obtenus à l'âge de 28 jours ont tendance à augmenter au-delà de cet âge (90 et 180 jours). Les pourcentages de réduction de la résistance à la compression peut atteindre jusqu'à 26% par exemple pour l'âge de 90 jours pour la concentration de 3 mg/l sulfate. On peut constater alors que l'effet le plus considérable de la présence des ions de sulfate dans l'eau de gâchage sur la résistance à la compression du mortier se manifeste à des âges supérieurs à 28 jours sauf pour la concentration de 2 mg/l où il se manifeste au jeune âge (7 jours). Au bout d'un an, l'ajout de 5 mg/l sulfate à l'eau de gâchage

produise l'effet le plus significatif sur la résistance à la compression, avec une perte de 22% par rapport à la résistance du mortier témoins.

La diminution de la résistance à la compression observée dans les mortiers contenant les ions sulfate est probablement due à la formation des produits qui possède une faible cohésion et résistance mécanique suite de réaction des ions sulfate avec les hydrates de la pâte de ciment. Dans notre étude, le ciment CRS utilisé contient une forte proportion de  $C_3S$  et une teneur faible en  $C_3A$ . La teneur faible de  $C_3A$  conduit alors à la formation d'une faible quantité de l'ettringite ( $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ ) suite à la réaction entre les aluminates et les ions sulfate selon l'équation IV.8 [164] et par conséquent permet de limiter la transformation de l'ettringite primaire en ettringite secondaire en présence des ions sulfates.

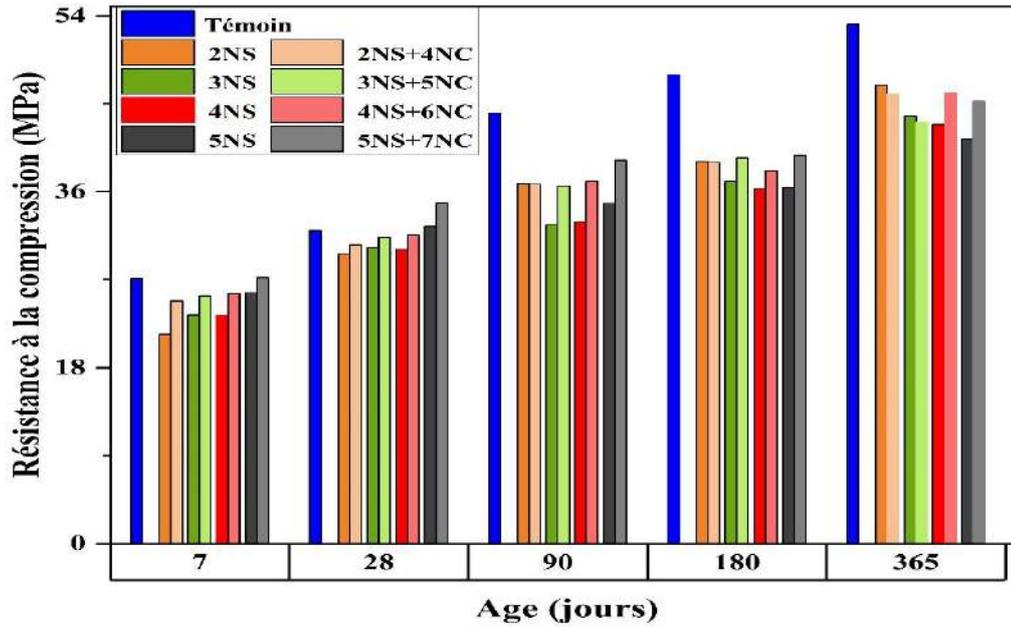


Par contre, la teneur élevée en  $C_3S$  du ciment utilisé dans notre étude conduit à la formation d'une quantité élevée d'hydroxyde de calcium (CH). Le CH peut réagit directement avec le sulfate de sodium entraînant la formation de gypse selon l'équation IV.9 [165].



La formation de gypse ( $C\bar{S}H_2$ ) selon l'équation IV.9 entraîne la réduction de la résistance et la cohésion du mortier et, à un moindre degré, l'expansion et la fissuration du mortier [164]. Le gypse peut réduire aussi la durabilité du matériau en affaiblissant la matrice et en réduisant la résistance mécanique à long terme et la résistance aux attaques agressives. L'hydroxyde de sodium (NH) produit selon l'équation IV.9 augmente le pH de la solution interstitielle de la pâte de ciment hydraté à environ 13.5 conduisant ainsi à stabiliser le C-S-H et peut se traduit par un effet expansif sur l'ettringite [165].

La Figure (IV.19) présente les mesures de la résistance à la compression des mortiers de ciment CRS hydratés avec des solutions de différentes concentrations en de sulfate et chlorure de sodium. Les pertes de résistance maximales observées pour chaque concentration étudiée sont présentées dans le Tableau (IV.8).



**Figure IV.19** Évolution des résistances à la compression des mortiers de ciment CRS hydratés avec des solutions de différentes concentrations en sulfate et chlorure de sodium.

**Tableau IV.8.** Réduction de la résistance à la compression des mortiers de ciment CRS en fonction des concentrations en sulfate et chlorure introduits dans l'eau de gâchage.

Type de mortier	Âge de la perte maximale	Perte de résistance (%) / témoins		
		NS	NS+ NC	Différence
2NS	7 jours	21	-	12.48
2NS+4NC		-	8.52	
3NS	90 jours	25.88	-	9.85
3NS+5NC		-	16.03	
4NS	90 jours	25.3	-	9.41
4NS+6NC		-	15.89	
5NS	180 jours	24.15	-	6.92
5NS+7NC		-	17.23	

L'analyse des résultats illustrés dans la Figure (IV.19) et le Tableau (IV.8) montre que, en comparaison des résultats obtenus sur les mortiers contenant seulement les ions sulfate, l'ajout d'une quantité de chlorure à la solution de gâchage entraîne une augmentation de la

résistance à la compression presque à tous les âges et pour toutes les concentrations en sulfate. L'amélioration remarquable de la résistance à la compression de mortier par la présence d'ions de chlorure est remarquée au-delà de 90 jours sauf pour le cas de mortier contenant 2 g/l de sulfate de sodium où l'amélioration maximale de la résistance est observée à l'âge de 7 jours en ajoutant 4 g/l de chlorure de sodium. On peut aussi constater qu'aucune amélioration de la résistance à la compression n'est obtenue pour le mortier contenant 2 g/l de sulfate de sodium plus 4 g/l de chlorure de sodium à partir de l'âge de 90 jours. C'est le cas aussi de mortier contenant 3 g/l de sulfate de sodium plus 5 g/l de chlorure de sodium à partir de l'âge de 365 jours.

Les résultats de la Figure (IV.19) indiquent aussi que lorsque les ions sulfate et chlorure sont introduits conjointement dans la solution de l'hydratation, les mortiers présentent des résistances à la compression à 7 et 28 jours comprises entre 91% à 108% par rapport au témoin. Il est à noter aussi que les résistances à la compression pour ces mortiers sont supérieures à 80% par rapport au témoin au-delà de l'âge de 90 jours.

L'amélioration de la résistance à la compression obtenue on ajoutant aux solutions de sulfate des quantités de chlorure de sodium est peut être due à l'inhibition de la formation de gypse et des produits expansifs en présence des ions chlorure. L'influence positive des ions chlorure sur la diminution de l'expansion due à l'attaque sulfatique externe des bétons est rapportée par Al-Amoudi et al. [165]. Ils ont constaté que la formation de gypse et de l'ettringite associés à l'attaque sulfatique est inhibée par la présence des ions chlorure et cela se traduit par une atténuation de la perte de résistance à la compression et de l'expansion du béton [166]. Selon Kind, cité par Al-Amoudi et al. [165], le sulfoaluminate de calcium se produit en faible quantité et sous forme de cristaux faiblement développés lorsque les ions sulfate et chlorure sont présents conjointement dans la solution d'immersion. Cette constatation sert de la base de l'augmentation de taux admissible des ions sulfate en présence de concentration élevée en ions chlorure par les spécifications des normes russes [165]. L'inhibition de la formation de gypse et d'ettringite peut être attribuée aussi à l'alcalinité élevée de la solution interstitielle du mortier gâché avec des solutions riches en ions sulfate et chlorure. Lorsque le sulfate de sodium et le chlorure de sodium présents conjointement en solution entre en contact avec le ciment, les ions sulfate et chlorure régissent avec le  $C_3A$  et le  $CH$  tandis que les ions  $OH^-$  et  $NA^+$  restent libres dans la solution interstitielle entraînant un accroissement de son alcalinité [76]. L'alcalinité élevée de la solution interstitielle peut modifier les réactions chimiques qui se produisent et

peut conduire à la formation des phases moins solubles que le gypse et moins expansives que l'ettringite.

#### **IV.4. Conclusion**

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons étudié l'effet d'une eau épurée saline sur les propriétés du béton frais et durci et sur sa durabilité vis-à-vis la corrosion des armatures. Nous avons tous d'abord analysé l'eau épurée pour connaître sa composition chimique et puisse interpréter les résultats. Nous avons intéressé ensuite à l'étude de l'hydratation du ciment avec différentes concentrations de l'eau épurée. Les résultats montrent que les temps de début et de fin de prise du ciment augmentent avec l'augmentation du pourcentage de l'EP dans l'eau de gâchage. Cependant, le retard des temps de prise obtenu en utilisant de l'EP n'a pas entravé le développement de la résistance initiale du béton. Cela a été vérifié en évaluant la résistance à la compression à courte et à long terme. Par rapport au béton de référence (ED), il semble que le l'utilisation de l'EP augmente la résistance à la compression à 7 jours, alors qu'à 28 jours l'effet est inversé et la résistance est légèrement plus faible à la résistance du béton témoins. Cependant, l'effet de la composition chimique de l'eau épurée sur la résistance à la compression du béton devient négligeable au-delà de 3 mois. La comparaison des caractéristiques microstructurales des bétons durcis a été établie à partir des mesures de perméabilité à l'eau, les analyses DRX et les images MEB.

Ensuite, nous sommes intéressés à l'étude de l'effet de l'eau épurée sur la résistance à la corrosion des armatures qui doit certainement influencer à cause de la forte concentration en chlorure présente dans l'EP. La conclusion estimée à partir des résultats électrochimiques effectués est que le remplacement total de l'eau de gâchage par de l'eau épurée devrait être évité pour le béton renforcé par des armatures en acier ordinaire. Cela implique qu'à cause de risque de corrosion des armatures, l'applicabilité des mélanges incorporant 100% de l'EP comme eau de gâchage doit être limitée seulement au béton non armé. Cependant, l'incorporation de certains ajouts minéraux en quantité suffisante peut améliorer la résistance à la corrosion du béton incorporant l'EP. Par exemple, il a été confirmé que la concentration d'ions libres dans la solution interstitielle du béton à base de l'eau de mer est remarquablement diminuée avec l'augmentation de la quantité de laitier et de fumée de silice utilisée des ajouts cimentaires [58]. De plus, le risque de corrosion des armatures peut être évité totalement en utilisant des armatures résistantes à la corrosion telles que les armatures d'«époxy coating», les aciers inoxydables et les armatures galvanisées.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudié la cinétique de l'hydratation et l'évolution de la résistance mécanique des éprouvettes de pâtes de ciment et de mortiers gâchées avec différentes concentrations en ions sulfate et chlorure. Les résultats montrent que les ions sulfate présents dans l'eau de gâchage agissent comme accélérateur de prise du ciment CRS pour toutes les concentrations étudiées et se traduisent logiquement par un affaiblissement de la résistance à la compression du mortier durci. La présence des ions chlorure dans les solutions de sulfates accélère de plus les temps de prises du ciment CRS et présente un effet bénéfique sur la perte de résistance à la compression observée dans le mortier contenant seulement les ions sulfate. L'effet bénéfique de la présence de chlorure sur la diminution de l'attaque sulfatique a été aussi signalé dans le cas de béton exposé à l'eau de mer. Les résultats de notre étude restent insuffisants pour mieux comprendre le mécanisme de la réduction de l'agressivité des ions sulfate en présence des ions chlorure dans la solution interstitielle. C'est pourquoi qu'une étude approfondie qui porte sur l'effet de la coexistence des ions sulfate et chlorure dans la solution d'hydratation sur la microstructure finale du béton est révélée indispensable.

onclusion générale et

erspectives

## Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude est de contribuer aux recherches qui visent à créer un équilibre entre le progrès social et le développement économique, la protection de l'environnement et l'industrie de béton. Au début de cette recherche, nous nous sommes intéressés de déterminer les effets des eaux usées épurées, par la principale station d'épuration de la ville d'Ouargla, qui utilisées pour le gâchage sur la qualité du béton obtenu. Au cours de cette recherche, nous nous sommes aussi intéressés à comprendre comment les propriétés du béton ont influencé lorsque des ions sulfate sont présents seuls ou conjointement avec les ions chlorure dans sa solution interstitielle.

Le premier axe de recherche nous a permis d'apporter les conclusions suivantes :

- En raison de la présence des substances organiques, les temps de prise de la pâte de ciment ont progressivement augmenté avec l'augmentation du pourcentage de l'EP dans l'eau de gâchage. Ce retard du temps de prise, c'est-à-dire l'augmentation du temps pendant lequel le béton peut être transporté, coulé sur place et fini, est très utile pour les opérations de bétonnage par temps chaud dans la région de Ouargla.
- L'utilisation de l'EP de cette étude comme eau de gâchage a un effet négligeable sur l'affaissement du béton frais.
- L'augmentation du pourcentage de l'EP dans l'eau de gâchage apporte une amélioration de la résistance à la compression du béton à 7 jours. Les résistances à la compression à 28 jours des éprouvettes des bétons contenant de l'EP sont légèrement inférieures à celles des bétons témoins. Cependant, les résistances des bétons contenant de l'EP au-delà de l'âge de 3 mois sont comparables à celles des bétons préparés avec de l'ED.
- Globalement, l'utilisation de l'eau épurée saline de cette étude comme eau de gâchage n'a pas d'effet négatif sur la résistance à la compression du béton.
- Les bétons contenant de l'EP présentent un réseau poreux plus fin que celui de béton témoin. Cela reflète l'effet bénéfique de l'utilisation de l'EP sur la durabilité du béton face aux différents agents agressifs.
- L'étude électrochimique indique que la vitesse de corrosion de l'acier enrobé de mortier augmente progressivement avec l'augmentation du pourcentage de l'EP dans l'eau de gâchage. Le mortier EP50 présente une probabilité de corrosion modérée tandis que le mortier EP100 présente une possibilité de corrosion élevée.

- Le domaine de passivité de l'acier dans les solutions de poudre de béton EP100 est réduit à celui de béton ED. Cela indique l'augmentation de la possibilité de corrosion par piqûre des aciers enrobés dans le béton EP100.
- En raison du risque élevé de corrosion des armatures en acier, il est recommandé de ne pas utiliser complètement l'EP de cette étude comme eau de gâchage pour le béton armé et le béton précontraint. Cependant, elle peut être utilisée dans le béton non armé ou dans le béton incorporant des armatures résistantes à la corrosion.
- Le remplacement partiel de l'eau potable par l'EP de cette étude, à des pourcentages de 25% et 50%, offre des résultats acceptables en termes de résistance mécanique et durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures.

À travers cette partie de l'étude, nous pouvons constater que le principal inconvénient de l'utilisation des eaux épurées salines provenant de la station d'épuration de Saïd-Otba de la ville d'Ouargla pour le gâchage de béton est le risque élevé de corrosion de l'acier. Cela indique que l'applicabilité de l'utilisation complète de cet effluent comme eau de gâchage nécessite des matériaux et des techniques spécifiques. Cependant, on peut s'attendre à de nombreuses améliorations de la qualité du béton à travers son utilisation, notamment une meilleure résistance initiale, une pénétrabilité faible, une bonne résistance aux agressions extérieures et une meilleure considération de l'environnement.

Le deuxième axe de recherche nous a permis de constater l'effet des ions sulfate présents dans l'eau de gâchage sur l'accélération des temps de prise du ciment CRS et sur l'affaiblissement de la résistance à la compression du mortier. Il nous a permis aussi d'identifier l'effet bénéfique de la présence de chlorure dans la solution interstitielle du béton sur l'atténuation de l'effet négatif de sulfate. Cela nous permettra aussi d'interroger sur l'effet de la coexistence des ions sulfate et chlorure dans la solution d'hydratation sur la microstructure finale du béton.

## Perspectives

À l'issue de cette recherche, plusieurs perspectives peuvent être proposées :

- ✓ Pour augmenter l'applicabilité de l'EP saline, des études supplémentaires sont nécessaires pour déterminer ses effets sur d'autres mélanges de béton préparés avec d'autres types de ciment ou incorporant certains ajouts minéraux.
- ✓ La réalisation d'une étude expérimentale sur une structure réelle en béton incorporant l'EP et des armatures en polymères renforcés de fibre est révélée nécessaire pour confirmer les possibilités de l'utilisation de l'EP saline.
- ✓ L'analyse du coût et l'évaluation de rentabilité de l'utilisation de l'EP soit pour le béton non armé ou pour le béton armé en utilisant des armatures résistantes à la corrosion seraient aussi intéressantes afin de préciser le bienfait économique de l'utilisation de l'EP comme eau de gâchage.
- ✓ L'évaluation de l'efficacité et la rentabilité de l'utilisation de différentes alternatives des barres en acier dans le béton contenant l'eau épurée saline seraient également bénéfiques pour l'étude économique.
- ✓ Au sujet de l'effet de la coexistence des ions sulfate et chlorure dans la solution interstitielle du béton, une étude expérimentale approfondie serait nécessaire pour mieux comprendre la microstructure de la pâte de ciment formée dans ces conditions.
- ✓ L'influence de la présence des ions chlorure conjointement avec les ions sulfate dans la solution d'hydratation de béton sur le risque de corrosion est une étude particulièrement nécessaire.

# Références bibliographiques

- 1** Monteiro, P.J.M., Miller, S.A., Horvath, A. "Towards sustainable concrete", *Nature Materials*, 16, pp. 698-699, 2017.
- 2** Miller, S.A., Horvath, A., Monteiro, P.J.M. "Impacts of booming concrete production on water resources worldwide", *Nature Sustainability*, 1, pp. 69-76, 2018.
- 3** Mayer, C. "Concrete and Sustainable Development", *ACI Special Publication*, 206, pp. 501-512, 2002.
- 4** United Nations Water "Summary progress Update 2021: SDG – Water and Sanitation for All", United water, 2021, [online] tire de: <https://www.unwater.org/publications/summary-progress-update-2021-sdg-6-water-and-sanitation-all> (consulté le 12/4/2023)
- 5** Neville, A.M. "Properties of Concrete", 5th ed., Pearson Education Limited, 2011. ISBN 978-0-273-75580-7
- 6** Khenfer, B. "Capacité de régénération des ressources fourragères des parcours sahariens. Cas des régions d'Ouargla et Ghardaïa", thèse de doctorat, Université de Kasdi Merbah de Ouargla, 2020.
- 7** Hani, M.A., Deblaoui, M. "Analyse de la variation temporelle de l'évapotranspiration de référence dans la région de Ouargla", mémoire de mster, Université de Kasdi Merbah de Ouargla, 2018.
- 8** Al-Amoudi, O.S.B., Khan, M.M. "Effect of Hot weather on the compressive strength of plain and blended cement mortars", In: 1995 The Fourth Saudi Engineering Conference, Jeddah, Saudi Arabia, November 5-8, 1995, pp.193-199.
- 9** Bouhanna, A. "Gestion des produits d'épuration des eaux usées de la cuvette de Ouargla et perspectives de leurs valorisations en agronomie saharienne", mémoire de magister, Université de Kasdi Merbah de Ouargla, 2013/2014.
- 10** Dehane, S. "Valorisation des eaux épurées et de la nappe Moi-Pliocène dans la confection du béton", mémoire de magister, Université de Kasdi Merbah de Ouargla, 2015.
- 11** Neville, A.M. "Water and concrete: a love-hate relationship", *Concrete International*, 22(12), pp. 34-38, 2000.
- 12** Olivier, J.P., Vichot, A. "La durabilité des bétons", 2<sup>ème</sup> ed., Press de l'école national des ponts et chaussées, 2008. ISBN 2-85978-184-8
- 13** Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. "Concrete Microstructure, Properties, and Materials", 3<sup>rd</sup> ed., McGraw-Hill, 2006. ISBN 0-07-158919-8
- 14** Josserand, L., Coussy, O., de Larrard, F. "Bleeding of concrete as an ageing consolidation process", *Cement and Concrete Research*, 36, pp. 1603-1608, 2006.
- 15** Yim, H.J., Kim, J.H., Kwak, H.G., Kim, J.K. "Evaluation of internal bleeding in concrete using a self-weight bleeding test", *Cement and Concrete Research*, 53, pp. 18-24, 2013.

- 16** Missemmer, L. "Etude du comportement sous très hautes températures des bétons fibrés à ultra performances : application au BCV", thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- 17** Mbemba-Kiele, E.P. "Influence du vent et de la cure sur le comportement des bétons au très jeune âge", thèse de doctorat, Université de Nantes, 2010.
- 18** Aïtcin, P.C., Neville, A., Acker, P. "Les différents types de retrait du béton", Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 215 :4184, pp. 41-51, Mai-Juin 1998.
- 19** Holt, E., Leivo, M. "Cracking risks associated with early age shrinkage", Cement and Concrete Composites, 26, pp. 521-530, 2004.
- 20** Zhang, S., Hamed, E., Song, C. "Computational modelling of the basic creep of concrete: An image-based meso-scale approach", Engineering Analysis with Boundary Elements, 136, pp. 64-76, 2022.
- 21** Hong, K. "Cyclic wetting and drying and its effects on chloride ingress in concrete", Master Thesis, University of Toronto, 1998.
- 22** Parmentier, B., Pollet, V., Zarmati, G. "Le retrait empêché du béton Prédiction selon l'Eurocode 2 et maîtrise via les techniques d'exécution", Le Dossiers du CSTC, 215, N°2, Cahier n°3, 2009.
- 23** Amran, M., Murali G., Makul, N., Kurpińska, M., Nehdi, M. "Fire-induced spalling of ultra-high performance concrete: A systematic critical review", Construction and Building Materials, 373, 130869, 2023.
- 24** Kodur, V., Banerji, S. "Cracking Modeling the fire-induced spalling in concrete structures incorporating hydro-thermo-mechanical stresses", Cement and Concrete Composites, 117, 103902, 2021.
- 25** Alonso, C., Fernandez, L. "Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments", Journal of Materials Science, 39, pp. 3015-3024, 2004.
- 26** Akca, A.H., Özyurt, N. "Effects of re-curing on residual mechanical properties of concrete after high temperature exposure", Construction and Building Materials, 159, pp. 540-552, 2018.
- 27** Granger, S., Loukili, A., Gilles, P.C., Gilles, C. "Caractérisation expérimentale de l'auto-cicatrisation des fissures dans un béton à ultra-hautes performances", Revue Européenne de Génie Civil, 10(3), pp. 279-294, 2006.
- 28** Neville, A. "Autogenous healing—a concrete miracle ?", Concrete International, 94, pp. 76-82, 2002.
- 29** Granger, S., Loukili, A., Gilles, P.C., Gilles, C. " Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis", Cement and Concrete Research, 37, pp. 519-527, 2007.

- 30** Hover, K.C. "The influence of water on the performance of concrete", *Construction and Building Materials*, 25, pp. 3003-3013, 2011.
- 31** Duval, R., Hornain, H. "La durabilité du béton vis-à-vis des eaux agressives", dans : *La durabilité du béton*, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1992, pp. 351-390. ISBN 2-85978-184-6
- 32** Santhanam, M., Cohen, M., Olek, J. "Differentiating seawater and groundwater sulfate attack in Portland cement mortars", *Cement and Concrete Research*, 36, pp. 2132-2137, 2006.
- 33** Mehta, P.K. "Mechanism of sulfate attack on Portland cement concrete - another look", *Cement and Concrete Research*, 13, pp. 401-406, 1983.
- 34** Kumar, S., Kameswara Rao, C.V.S. "Effect of sulfates on the setting time of cement and strength of concrete", *Cement and Concrete Research*, 27(7), pp. 1237-1244, 1994.
- 35** Türker, F., Aköz, F., Koral, S., Yüzer, N. "Effect Effects of magnesium sulfate concentration on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume", *Cement and Concrete Research*, 27(2), pp. 205-214, 1997.
- 36** Yi, Y., Zhu, D., Guo, S., Zhang, Z., Shi, C. "A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment", *Cement and Concrete Composites*, 113, 103695, 2020.
- 37** Qu, F., Li, W., Dong, W., Tam, V.W.Y., Yu, T. "Durability deterioration of concrete under marine environment from material to structure: A critical review ", *Journal of Building Engineering*, 35, 102074, 2021.
- 38** Chen, M.C., Wang, K., Xie, L. "Deterioration mechanism of cementitious materials under acid rain attack", *Engineering Failure Analysis*, 27, pp. 272-285, 2013.
- 39** Zivica, V., Bajza, A. "Acidic attack of cement based materials a review. Part 1. Principle of acidic attack", *Construction and Building Materials*, 15, pp. 331-340, 2001.
- 40** Balabanić, G., Bićanić, N., Dureković, A. "The influence of w/c ratio, concrete cover thickness and degree of water saturation on the corrosion rate of reinforcing steel in concrete", *Cement and Concrete Research*, 26, pp. 761-769, 1996.
- 41** Tuutti, K. "Corrosion of Steel in Concrete", CBI Research Report 4:82, Swedish Cement and Concrete Research Institute: Stockholm, 1982.
- 42** Azarsa, P., Gupta, R. "Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, pp. 1-30, May 2017.
- 43** Hills, T.P., Gordon, F., Florin, N.H, Fennell, P.S "Statistical analysis of the carbonation rate of concrete", *Cement and Concrete Research*, 72, pp. 98-107, 2015.

- 44** Criado, M. "The corrosion behaviour of reinforced steel embedded in alkali-activated mortar", in: Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes, Elsevier Ltd, 2015, pp. 333-372. ISBN 978-1-78242-276-1
- 45** Kwan, A.K.H., Wong, H.H.C. "Durability of reinforced concrete structures, theory vs practice", In: Hong Kong Government Standing Committee on Concrete Technology Annual Concrete Seminar, Hong Kong: Dept. of Civil Engineering, Univ. of Hong Kong, 2005, pp.1-20.
- 46** Vu, N.T. "Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé : approche expérimentale et probabiliste", thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2011.
- 47** Rhardane, A., Al Haj Sleiman, S., Alam, S.Y., Grondin, F. "A quantitative assessment of the parameters involved in the freeze–thaw damage of cement-based materials through numerical modelling", Construction and Building Materials, 272, 121838, 2021.
- 48** Kurdowski W. "Cement and concrete chemistry". 15th ed. New York, USA: Springer; 2014. ISBN 798-94-007-7944-0
- 49** Liu, D., Tu, Y., Shi, P., Elfgren, L. "Mechanical and durability properties of concrete subjected to early-age freeze–thaw cycles", Materials and Structures, 54, 211, 2021.
- 50** Marzouk, H., Langdon, S. "The effect of alkali-aggregate reactivity on the mechanical properties of high and normal strength concrete", Cement and Concrete Composites, 25, pp. 549-556, 2003.
- 51** Fanijo, E.O., Kolawole, J.T., Almakrab, A. "Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: Mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States", Case Studies in Construction Materials, 15, e00563, 2021.
- 52** Cai, X., He, Z., Tang, S., Chen, X. "Abrasion erosion characteristics of concrete made with moderate heat Portland cement, fly ash and silica fume using sandblasting test", Construction and Building Materials, 127, pp. 804-814, 2016.
- 53** Grdic, Z.J., Curcic, G.A.T., Ristic, N.S., Despotovic, I.M. "Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers", Construction and Building Materials, 27, pp. 305-312, 2012.
- 54** ACI Committee 207 "Report on the Erosion of Concrete in Hydraulic Structures", American Concrete Institute, Farmington Hills, 2017.
- 55** Martinović, S, Vlahović, M., Dojčinović, M., Pavlović, M., Husović, T.V. "Comparison of cavitation erosion behavior of cordierite and zircon based samples using image and morphological analyses", Materials Letters, 220, pp. 136-139, 2018.
- 56** Martinovic, S., Vlahovic, M., Boljanac, T., Dojcinovic, M., Volkov-Husovic, T. "Cavitation resistance of refractory concrete: Influence of sintering temperature", Journal of the European Ceramic Society, 33, pp. 7-14, 2013.

- 57** Wan, W., Liu, B., Raza, A. "Numerical Prediction and Risk Analysis of Hydraulic Cavitation Damage in a High-Speed-Flow Spillway", *Shock and Vibration*, 2018, 1817307, 2018.
- 58** Georgali, B., Tsakiridis, P.E. "Microstructure of fire-damaged concrete. A case study B", *Cement and Concrete Composites*, 27, pp. 255-259, 2005.
- 59** Zhang, W., Min, H., Gu, X., Xi, Y., Xing, Y. "Mesoscale model for thermal conductivity of concrete", *Construction and Building Materials*, 98, pp. 8-16, 2015.
- 60** Naus, D.J. "The Effect of Elevated Temperature on Concrete Materials and Structures— A Literature Review", U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6900, 2006.
- 61** Xiang, N., Wang, Y., Oleiwi, H.M., Chadwick, E., Yao, G., Augustus-Nelson, L., Chen, X., Shabalin, I. "Modelling the electrical resistivity of concrete with varied water and chloride contents", *Magazine of Concrete Research*, 72:11, pp. 552-563, 2020.
- 62** Elkey, W., Sellevold, E.J. "Electrical resistivity of concrete", 5th ed., Publication N0.80. Norwegian Road Research Laboratory, 1995.
- 63** Chiarello, M., Zinno, R. "Electrical conductivity of self-monitoring CFRC", *Cement and Concrete Composites*, 27, pp. 463-469, 2005.
- 64** CEN "EN 1008:2002 Eau de gâchage pour bétons — Spécification d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton", Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, Belgique, 2002.
- 65** ASTM "C1602/C1602M-12 Standard specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- 66** Kosmatka SH, Wilson ML. "Design and Control of Concrete Mixtures". 15th ed. Skokie, USA: Portland Cement Association; 2011.
- 67** Neville, A.M. "Water—Cinderella ingredient of concrete", *Concrete International*, 22(9), pp. 66-71, 2000.
- 68** Thomas, W.N. "The effect of sugar on cement and concrete", *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 212:1921, pp. 414-423, 1921.
- 69** Legube, B. "Production de l'eau potable : filière et procédés de traitement", Dunod, 2015. ISBN 978-2-10-059321-7
- 70** Lamond, J.F., Pielert, J.H. "Significance of tests and properties of concrete-making materials (STP 169D)", ASTM International, 2006. ISBN 0-8031-33-67-7
- 71** CEN "EN 206-1 Béton — Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité", Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, Belgique, 2002.
- 72** Ramachandran, V.S. "Concrete Admixture Handbook", Noyes Publications, 1995. ISBN 0-8155-1373-9

- 73** Das, J.K., Pradhan, B. "Effect of cation type of chloride salts on corrosion behavior of steel in concrete powder electrolyte solution in the presence of corrosion inhibitors", *Construction and Building Materials*, 208, pp. 175-191, 2019.
- 74** Abdel Gawwad, H.A., Abd EL-Aleem, S., Faried, A.S. "Effect of internal sulfate attack on the properties of sulfate-resisting cement and alkali-activated slag", *Geosystem Engineering*, 20(4), pp. 195-206, 2017.
- 75** Arel, H.Ş. "Effect of magnesium sulfate and sodium sulfide on fresh and hardened cement mortar", In: 2017 Asia-pacific engineering and technology conference, Kuala Lumpur, Malaysia, May 25-26, 2017, pp.2291-2306. ISBN 978-1-60595-443-1
- 76** Dehwah, H.A.F. "Influence of cement composition on concrete durability in chloride-sulfate environments", PhD Thesis, Loughborough University, 1999.
- 77** Venkateswara Reddy, V., Sudarsana Rao, H. Jayaveera, K.N. "Influence of strong alkaline substances (sodium carbonate and sodium bicarbonate) in mixing water on strength and setting properties of concrete", *Indian Journal of Engineering and materials Sciences*, 13, pp. 123-128, 2006.
- 78** Bureau of Indian Standards "SP 23: 1982 Handbook on concrete mixes (based on Indian Standards)", Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, 1982. ISBN 81-7061-012-5
- 79** Madhusudana Reddy, B., Ramana Reddy, I.V. "Effect of heavy metal and magnesium sulfate on properties of high strength cement mortar", *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 2(8), pp. 160-168, 2011.
- 80** Smaoui, N., Bérubé, M.A., Fournier, B., Bissonnette, B., Durand, B. "Effects of alkali addition on the mechanical properties and durability of concrete", *Cement and Concrete Research*, 35, pp. 203-212, 2005.
- 81** Kucche, K.J., Jamkar, S.S., Sadgir, P.A. "Quality of water for making concrete: A review of literature", *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(1), 2015.
- 82** Hewlett, P.C. "Lea's Chemistry of cement and concrete", 4th ed. Oxford, UK: Elsevier Butterworth Heinemann, 1998. ISBN 798-0-7506-6256-7.
- 83** Taylor, H.F.W. "Cement chemistry", 2nd ed. London, Thomas Telford, 1997. ISBN 0-7277-2592-0.
- 84** Abrams, D.A. "Test of impure waters for mixing concrete", In *Proceeding of the American Concrete Institute*, 20, pp. 442-486, 1924.
- 85** Hassan, I.H., Abdul-Kareem, O.M., Shihab, A.Y. "Effect of using well water as mixing water in concrete", *Al-Rafidain Engineering Journal*, 22(5), pp. 166-177, 2014.
- 86** Taryal, S., El-Shahat, R.M., Yousef, A.M. "Fabriquer du béton avec de l'eau de puits saumâtre", *Batiment International, Building research and Practice*, 11(2), pp. 97-105, 1983.

- 87** Ghorab, H.Y., Hilal, M.S., Antar, A. "Effect of mixing and curing waters on the behavior of cement pastes and concrete Part 2: properties of cement paste and concrete", *Cement and Concrete Research*, 20(1), pp. 69-72, 1990.
- 88** Reddy Babu, G., Madhusudana Reddy, B., Venkata Ramana, N. "Quality of mixing water in cement concrete "a review"", *Materials Today : Proceedings*, 5, pp. 1313-1320, 2018.
- 89** Open University Course Team "Seawater: its composition, properties and behaviour", 2nd ed., UK: Butterworth-Heinemann and the Open University, 1995. ISBN 0-7506-3715-3
- 90** Li, H., Farzadnia, N., Shi, C. "The role of seawater in interaction of slag and silica fume with cement in low water-to-binder ratio pastes at the early age of hydration", *Construction and Building Materials*, 185, pp. 508-518, 2018.
- 91** Younis, A., Ebead, U., Suraneni, P. Nanni, A. "Fresh and hardened properties of seawater-mixed concrete", *Construction and Building Materials*, 190, pp. 276-286, 2018.
- 92** Mohammed, T.U., Hamada, H. Yamaji, T. "Performance of seawater-mixed concrete in the tidal environment", *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 593–601, 2004.
- 93** Otsuki, N. "Research on the influence of chloride on corrosion of the embedded steel bars in concrete." Report of the Port and Harbour Research Institute, 24(3), pp. 183–185, 1985 (in Japanese).
- 94** Nishida, T., Otsuki, N., Ohara, H. Garba-Say, Z.M., Nagata, T. "Some considerations for applicability of seawater as mixing water in concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(7), B4014004, 2015.
- 95** Otsuki, N., Saito, T., Tadokoro, Y. "Possibility of seawater as mixing water in concrete", *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 6(10), pp. 1273-1279, 2012.
- 96** Shi, Z., Shui, Z., Li, O., Geng, H. "Combined effect of metakaolin and sea water on performance and microstructures of concrete", *Construction and Building Materials*, 74, pp. 57-64, 2015.
- 97** Li, Q., Geng, H., Shui, Z. Huang, Y. "Effect of metakaolin addition and seawater mixing on the properties and hydration of concrete", *Applied Clay Science*, 115, pp. 51-60, 2015.
- 98** Blanchard, S.C. "Utilisation des eaux usées dans le béton prêt à l'emploi d'un recycleur à béton RA20 de demix béton situé à ville LaSalle", *Mémoire de maîtrise ès science appliquées*, Université de Sherbrooke, 2008.
- 99** Borger, J., Carrasquillo, R.L., Fowler, D.W. "Use of recycled wash water and returned plastic concrete in the production of fresh concrete", *Advanced Cement Based Materials*, 1(6), pp. 267–274, 1994
- 100** Wang, R., Zhang, Y.X. "Recycling fresh concrete waste: A review", *Structural Concrete*, 19(6), pp. 1939-1955, 2018.

- 101** Moffatt-Bergeron, S. "Optimisation de l'adjuvantation des bétons fabriqués avec de l'eau recyclée traitée", Mémoire de maîtrise ès science appliquées, Université de Sherbrooke, 2009.
- 102** Arel, H.Ş. "Influence de l'eau recycle traitée sur les propriétés des bétons", In: Septième édition des journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)<sup>2</sup> B, Toulouse, France, 19-20 juin, 2006, pp.132-146.
- 103** Sandrolini, F., Franzoni, E. "Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants", *Cement and Concrete Research*, 31(3), pp. 485–489, 2001.
- 104** Chatveera, B., Lertwattanakul, P. "Use of ready-mixed concrete plant sludge water in concrete containing an additive or admixture", *Journal of Environmental Management*, 90(5), pp. 1901–1908, 2009.
- 105** Chatveera, B., Lertwattanakul, P., Makul, N. "Effect of sludge water from ready-mixed concrete plant on properties and durability of concrete", *Cement and Concrete Composites*, 28, pp. 441-450, 2006.
- 106** Asadollahfardi, G., Asadi, M., Jafari, H., Moradi, A., Asadollahfardi, R. "Experimental and statistical studies of using wash water from ready-mix concrete trucks and a batching plant in the production of fresh concrete", *Construction and Building Materials*, 98, pp. 305–314, 2015.
- 107** Sue, N., Miao, B., Liu, F.S. "Effect of wash water and underground water on properties of concrete". *Cement and Concrete Research*, 32, pp. 777–782, 2002.
- 108** Vickers, G. "Gray water recycling – Tips on how concrete producers should evaluate recycling equipment and process". *Concrete producer*, 21(4), pp. 32-35, 2003.
- 109** De Matos, P.R., Prudêncio, L.R., Pilar, R., Gleize, P.J.P., Pelisser, F. "Use of recycled water from mixer truck wash in concrete: Effect on the hydration, fresh and hardened properties", *Construction and Building Materials*, 230, 116987, 2020.
- 110** Tounsi, A., Hassini, M. "Réutilisation des eaux grises déversées par le centrale à béton dans le processus de production", mémoire de master académique, Université de Ghardaïa, 2021.
- 111** Metcalf & Eddu Inc., Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H.D. "Wastewater engineering: Treatment and reuse", 4th ed., New York, NY: McGraw Hill Companies, 2003. ISBN 7-302-05851-7
- 112** Al-Jabri, K.S., Al-Saidy, A.H., Taha, R., Al-Kemyandi, A.J. "Effect of using wastewater on the properties of high strength concrete", *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Procedia Engineering*, 14, pp. 370–376, 2011.
- 113** Nirmalkumar, K., Sivakumar, V. "Corrosion studies on concrete using treated and untreated textile effluent and impact of corrosion inhibitor", *Journal of Sustainable Development*, 1(3), pp. 68–74, 2008.

- 114** Ismail, Z.Z., Al-Hashmi, E. "Assessing the recycling potential of industrial wastewater to replace fresh water in concrete mixes: application on polyvinyl acetate resin wastewater", *Journal of cleaner production*, 19, pp. 197-203, 2011.
- 115** Raza, A., Ali, B., Haq, F.U., Awais, M. Jameel, M.S. "Influence of fly ash, glass fibers and wastewater on production of recycled aggregate concrete", *Materiales de Construcción*, 71(343), e253, 2021.
- 116** Asadollahfardi, G., Mahdavi, A.R. "The feasibility of using treated industrial wastewater to produce concrete", *Structural Concrete*, 20(1), pp. 123-132, 2019.
- 117** Taherlou, A., Asadollahfardi, G., Salehi, A.M., Katebi, A. "Sustainable use of municipal solid waste incinerator bottom ash and the treated industrial wastewater in self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, 297, 123814, 2021.
- 118** Ahmed, S., Alhoubi, Y., Elmesalami, N., Yehia, S., Abed, F. "Effect of recycled aggregates and treated wastewater on concrete subjected to different exposure conditions", *Construction and Building Materials*, 266, 120930, 2021.
- 119** Lee, O.S., Salim, M.R., Ismail, M., Ali, M.I. "Reusing treated effluent in concrete technology", *Jurnal teknologi*, 34(F), 2001.
- 120** Ghrair, A.M., Al-Mashaqbeh, O. "Domestic wastewater reuse in concrete using bench-scale testing and full-scale implementation", *Water*, 8, 366, 2016.
- 121** Asadollahfardi, G., Delnavaz, M., Rashnoiee, V., Ghonabadi, N. "Use of treated domestic wastewater before chlorination to produce and cure concrete", *Construction and Building Materials*, 105, pp. 253–261, 2016.
- 122** Abushanab, A., Alnahhal, W. "Combined effects of treated domestic wastewater, fly ash, and calcium nitrite toward concrete sustainability", *Journal of Building Engineering*, 44, 103240, 2021.
- 123** Peighambarzadeh, F.S., Asadollahfardi, G., Akbardoost, J. "The effects of using treated wastewater on the fracture toughness of the concrete", *Australian Journal of Civil Engineering*, 18, pp. 56–64, 2020.
- 124** Al-Ghusian, I., Terro, M.J. "Use of treated wastewater for concrete mixing in Kuwait", *Kuwait Journal of Science Engineering*, 30(1), pp. 213-228, 2003.
- 125** Shekarchi, M., Yazdian, M., Mehrdadi, N. "Use of biologically treated domestic waste water in concrete", *Kuwait Journal of Science Engineering*, 39(2B), pp. 97-111, 2012.
- 126** Meena, K., Luhar, S. "Effect of wastewater on properties of concrete", *Journal of Building Engineering*, 21, pp. 106–112, 2019.
- 127** Tay, J.H., Yip, W.K. "Use of reclaimed wastewater for cement mixing", *Journal of Environmental Engineering*, 113(5), pp. 1156-1161, 1987.

- 128** Arooj, M.F., Haseeb, F., Butt, A.I., Irfan-ul-Hassan, M., Batool, H., Kibriya, S., Javed, Z., Nawaz, H., Batool, S. "A sustainable approach to reuse of treated domestic wastewater in construction incorporating admixture", *Journal of Building Engineering*, 33, 101616, 2021.
- 129** Yahyaei, B., Asadollahfardi, G., Salehi, A.M. "Workability, mechanical, and durability properties of self-compacting concrete using the treated wastewater", *Structural Concrete*, 22(S1), pp. E997-E1008, 2021.
- 130** Faury, J. "Le béton: influence de ses constituants inertes: règles à adopter pour sa meilleure composition", 3ème édition, Dunod, 1942.
- 131** CEN "EN 12390-2 Testing hardened concrete —Part 2: Making and curing specimens for strength tests", European committee for standardization, Brussels, Belgium, 2009.
- 132** CEN "EN 12390-3 Testing hardened concrete—Part 3: Compressive strength of test specimens", European committee for standardization, Brussels, Belgium, 2009.
- 133** CEN "EN 196-3 Methods of testing cement—Part 3: Determination of setting times and soundness", European Committee for standardization, Brussels, Belgium, 2009.
- 134** CEN "EN 12390-8 Testing hardened concrete—Part 8: depth of penetration of water under pressure", European committee for standardization, Brussels, Belgium, 2009.
- 135** Scrivener, K., Snellings, R., Lothenbach, B. "A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials", CNR Press, 2016. ISBN 978-1-4987-3865-1
- 136** CEN "EN 196-1 Methods of testing cement—Part 3: Determination of strength", European Committee for standardization, Brussels, Belgium, 2009.
- 137** CEN "EN 480-14 Admixture for concrete, mortar and grout- test methods—Part 14: Determination of the effect on corrosion susceptibility of reinforcing steel by potentiostatic electro-chemical test", European committee for standardization, Brussels, Belgium, 2007.
- 138** Ben Mansour, H. " Etude du comportement à la corrosion des armatures tendues dans le béton contaminé par des ions chlorure. Effet anticorrosif d'un inhibiteur à base de phosphates", thèse de doctorat, Université de Lyon, 2018.
- 139** Kapat, C., Pradhan, B., Bhattacharjee, B. "Potentiostatic study of reinforcing steel in chloride contaminated concrete powder solution extracts", *Corrosion Science*, 48, pp. 1757-1769, 2006.
- 140** Mehrdadi, N., Akbarian, A., Haghollahi, A. "Using domestic wastewater for producing and curing concrete", *Journal of Environmental Studies*, 35(50), pp. 129-136, 2009. (in Farsi).
- 141** Al-Kadhimi, T.K., Ikzer, B.G., Al-Takarli, A. "The combined effect of chlorides and sulphates present in water and aggregates on properties of concrete", *Materials and Structures*, 21, pp. 436-442, 1988.

- 142** Arya, C. "An assessment of four methods of determining the free chloride content of concrete", *Materials and Structures*, 23, pp. 319-330, 1990.
- 143** Peschard, A., Govin, A., Pourchez, J., Fredon, E., Bertrand, L., Maximilien, S., Guilhot, B. "Effect of polysaccharides on the hydration of cement suspension", *Journal of the European Ceramic Society*, 26, pp. 1439-1445, 2006.
- 144** Yahia, A., Tanimura, M., Shimoyama, Y. " Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio", *Cement and Concrete Research*, 35, pp. 532-539, 2005.
- 145** Khatibmasjedi, M., Ramanathan, S., Suraneni, P., Nanni, A. "Compressive strength development of seawater-mixed concrete subject to different curing regimes", *ACI Materials Journal*, 117(5), pp. 3-12, 2020.
- 146** Ibrahim, M., Issa, M. "Evaluation of chloride and water penetration in concrete with cement containing limestone and IPA", *Construction and Building Materials*, 129, pp. 278–288, 2016
- 147** Juenger, M.C.G., Monteiro, P.J.M., Gartner, E.M., Denbeaux, G.P. "A soft X-ray microscope investigation into the effects of calcium chloride on tricalcium silicate hydration", *Cement and Concrete Research*, 31(1), pp. 19–25, 2005.
- 148** Hirao, H. Yamada, K., Takahashi, H., Zibara, H. "Chloride binding of cement estimated by binding isotherms of hydrates", *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3(1), pp. 77–84, 2005.
- 149** Suryavanshi, A.K., Scantlebury, J.D., Lyon, S.B. "The binding of chloride ions by sulphate resistant Portland cement", *Cement and Concrete Research*. 25(3), pp. 581-592, 1995.
- 150** Poursaei, A. "Corrosion of Steel in Concrete Structures", Woodhead Publishing, 2016. ISBN 978-1-78242-381-2
- 151** Bertolini, L., Elsener, B., Pedersen, P., Polder, R. "Corrosion of Steel in Concrete : Prevention, diagnosis, repair", second ed., WILEY-VCH verlag gmbH & Co. KGaA, 2004. ISBN 3-527-30800-8
- 152** Stern, M., Geary, A.L. "Electrochemical polarization: I. A theoretical of the shape of polarization curves", *Journal of Electrochemical Society*, 104(1), pp. 56-63, 1957.
- 153** Andrade, C., Gonzalez, J.A. "Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements", *Materials and Corrosion*, 29(8), pp. 515-519, 1978.
- 154** Stern, M., Weisert, E.D. "Experimental observations on the relations between polarization resistance and corrosion rate", *Proceeding of the American Society for Testing and Materials*, 59, pp. 1280-1291, 1958.

- 155** Ahmed, Z. "Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control", Elsevier Science and Technology Books, London, 2006. ISBN 0750659246
- 156** Millar, S.G., Law, Bungey, J.H., Cairns, J. "Environmental influences on linear polarization corrosion rate measurement in reinforced concrete", *NDT&E International*, 34 pp. 409-417, 2001.
- 157** Andrade, C., Alonso, C. "Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method", *Materials and Structures*, 37, pp. 623-643, 2004.
- 158** Bhuiyan, S. "Effectiveness of Impressed Current Cathodic Protection Systems in Concrete Following Current Interruption", thèse de master d'engineering, Université RMIT, 2015.
- 159** CEN "EN 12696 Cathodic protection of steel in concrete", European committee for standardization, Brussels, Belgium, 2000.
- 160** Ferreira, R.M. "Probability based durability analysis of concrete structures in marine environment", thèse de doctorat, Université de Minho, 2004.
- 161** Shaheen, F., Pradhan, B. "Effect of chloride and conjoint chloride-sulfate of reinforcing steel in electrolytic concrete powder solution (ECPS)", *Construction and Building Materials*, 101, pp. 99-112, 2015.
- 162** Zunino, F., Scrivener, K. "Factors influencing the sulfate balance in pure phase  $C_3S/C_3A$  systems", *Cement and Concrete Research*, 133, 106085, 2020.
- 163** Wang, J., Liu, E., Li, L. "Multiscale investigations on hydration mechanisms in seawater OPC paste", *Construction and Building Materials*, 191, pp. 891-903, 2018.
- 164** Al-Amoudi, O.S.B. "Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments", *Cement and Concrete Composites*, 24, 305-316, 2002.
- 165** Al-Amoudi, O.S.B., Rasheeduzzafar, Maslehehuddin, M., Abduljauwad, S.N. "Influence of chloride ions on sulphate deterioration in plain and blended cements", *Magazine of Concrete Research*, 46, No.167, 113-123, 1994.