

---

Soumis le: 27/01/2018

Forme révisée acceptée le: 14/02/2019

Auteur correspondant: [amine18gc@yahoo.com](mailto:amine18gc@yahoo.com)

---



---

**Nature et Technologie**

**Nature & Technology**

<http://www.univ-chlef.dz/revuenatec>

ISSN : 1112-9778 – EISSN : 2437-0312

---

## Carbonatation du béton des réseaux d'assainissement

Mohammed-Amin BOUMEHRAZ <sup>\*a</sup>, Mekki MELLAS <sup>b</sup>, Farida BOUCETTA <sup>c</sup>,  
Abdelouahed KRIKER <sup>d</sup>

<sup>a,b</sup> Laboratoire de Recherche en Génie Civil (LRGC), Université de Biskra (Algérie)

<sup>b</sup> Faculté des sciences et technologie à l'université de Biskra (Algérie)

<sup>c</sup> Laboratoire de Physique des Couches Minces et Applications (LPCMA), Université de Biskra (Algérie)

<sup>d</sup> Faculté des sciences appliquées à l'université de Ouargla. (Algérie)

---

### Résumé:

Plusieurs dégradations ont été constatées sur les réseaux d'assainissements (conduites et regards) à cause de la qualité du béton produit, le type de conduites utilisées, et aussi l'agressivité de l'environnement extérieur. Parmi ces problèmes, on peut citer la carbonatation du béton ou la diffusion de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) à l'intérieur des pores du béton armé des ouvrages d'assainissement. Dans cette étude nous avons confectionné des éprouvettes en béton de ciment CRS<sup>1</sup>, ces échantillons ont été conservés dans le milieu réel (eau usée et gaz carbonique), et dont les résultats ont été comparés à ceux des éprouvettes témoins. Nous avons conclu que le béton de ciment CRS est de faible durabilité dans les réseaux d'assainissement, et se dégrade rapidement sous l'effet du gaz carbonique. Enfin pour les éprouvettes exposées au ce gaz nous enregistrons une régression d'environ 40 % de résistance à la compression et aussi une profondeur de carbonatation qui atteint l'ordre de 8 mm à l'âge de 365 jours.

Mots-clés: Durabilité, ciment résistants aux sulfates (CRS), eau usée, gaz carbonique (CO<sub>2</sub>).

---

### Abstract:

Several degradations have been observed on the sanitation networks (pipes and manholes) in Ouargla region, because of the quality of the concrete produced, the type of pipes used, and also the aggressiveness of the external environment. These problems include the carbonation of concrete or the diffusion of carbon dioxide inside the pores of reinforced concrete the sewage system. In this study, they are making of SRC<sup>2</sup> cement concrete specimens, these samples were kept in the real environment (waste water and CO<sub>2</sub> gas), and the results were compared to those than of control specimens. They concluded that SRC cement concrete is of low durability in sewage system, and is rapidly degraded by carbon dioxide. Finally, for the specimens exposed to this gas we recorded a regression of 40 % about of compressive strength and also a depth of carbonation that reaches the order of 8 mm at the age of 365 days.

Keywords : Durability, Sulphate Resistant Cement (SRC), waste water, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>).

---

### 1. Introduction

Le réseau d'assainissement dans la région d'Ouargla<sup>3</sup>, cas de notre étude, est de type unitaire mais on distingue aussi des réseaux d'assainissement selon le mode autonome, et les regards sont implantés d'environ tous les 30 m. Les eaux usées dans la ville d'Ouargla sont essentiellement domestiques. Bien que ces eaux soient évacuées avec les eaux usées industrielles dans un seul collecteur sans aucun traitement au préalable, elles sont

fortement sulfatées et provoquent un haut dégagement de gaz H<sub>2</sub>S, pour cela tous les ouvrages d'assainissement (regards et conduites) sont réalisés en béton de ciment de type CRS [1].

Dans la région d'Ouargla, on enregistre plusieurs problèmes de dégradations du béton armé des réseaux d'assainissement, parmi ces problèmes la carbonatation du béton ou la diffusion de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) à l'intérieur des pores du béton. Cette dernière est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous

<sup>1</sup> Ciment Résistant aux Sulfates

<sup>2</sup> Sulfate Resistant Concrete

<sup>3</sup> A près de 900 km Sud-Est d'Alger



Cet article est mis à disposition selon les termes de la licence [Creative Commons Attributions 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

This article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

les bétons, elle correspond à une réaction chimique entre le dioxyde de carbone de l'atmosphère, dont la concentration intérieure normale est d'environ 370 ppmv et extérieure de 700 ppmv et les composés basiques du béton tel que la Portlandite  $[Ca(OH)_2]$  [2]. Il se dissout à l'intérieur des pores du béton sous forme de gaz sous pression ou sous forme d'acide carbonique en présence d'humidité pour former des carbonates de calcium. Il en résulte une diminution de (pH) du béton et la corrosion des armatures [3]. Ce phénomène est très lent, pour cela l'évaluation de ses conséquences se fait à long terme [4]. Les figures 1 et 2 présentent quelques dégradations des réseaux d'assainissement de la région d'Ouargla sous l'effet de carbonatation du béton armé.

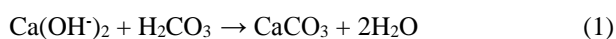


Figure 1. Éclatement du béton d'enrobage de la galerie de Touggourt- Ouargla.

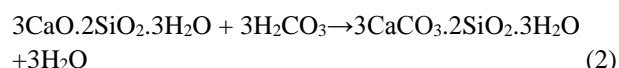


Figure 2. Corrosion des armatures des regards sous l'effet de la carbonatation

Le pH du béton non carbonaté est entre 12,5 et 13,5, mais l'attaque de ces composées par les dioxydes de carbone provoque une diminution dans les zones attaquées jusqu'à environ 8,3 [5, 6]. Le dioxyde de carbone en présence d'humidité se dissout dans l'eau et forme l'acide carbonique ( $H_2CO_3$ ). Ce dernier réagit avec la Portlandite et forme le carbonate de calcium ( $CaCO_3$ ) comme produit final selon l'équation (1) [7]. La carbonatation est maximale lorsque l'humidité relative est comprise entre 40 et 80 % [4].

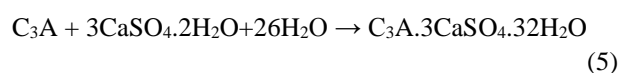
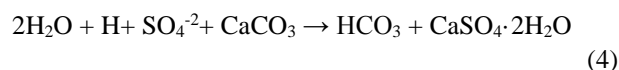


Les autres composants du béton hydraté, tel que le silicate de calcium, réagissent avec le dioxyde de carbone pour former le carbonate de calcium ( $CaCO_3$ ) comme un produit final selon les équations (2) et (3) mais en quantité plus faible et à long terme. Les composants anhydres du béton après l'hydratation du ciment tel que le Silicate tricalcique ( $C_3S$ ) et le Silicate bi-calcique ( $C_2S$ ) sont consommés et réagissent avec le dioxyde de carbone. La carbonatation modifie la composition chimique et la microstructure du béton ce qui affecte évidemment ses propriétés chimiques et mécaniques [8] :



Généralement, la concentration de sulfures dans les eaux usées est de 3 à 6 mg/l [9]. Le sulfure d'hydrogène se forme dans des conditions anaérobies principalement dans les biofilms recouvrant les surfaces des tuyaux immergés. La température est un paramètre important dans la formation du sulfure d'hydrogène. En effet, l'augmentation des températures entraîne une augmentation des taux de consommation d'oxygène conduisant à des conditions anaérobies ce qui augmente le taux de formation de sulfure d'hydrogène [10]. En particulier, le sulfure d'hydrogène diffusé dans un mince film liquide peut être oxydé en acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) par des réactions microbiennes [11].

D'après Vladimir *et al* [12], les eaux usées sont riches aux sulfates, et dans les températures élevées ces sulfates peuvent former rapidement l'acide sulfurique par l'action des bactéries aérobies vivant dans le film d'eau ; cet acide est agressif et il réagit avec le carbonate de calcium pour former du gypse selon l'équation (4). La formation de l'Ettringite expansif ( $C_3A.3CaSO_4.32H_2O$ ) est le résultat de la réaction entre le gypse et les aluminates de calcium anhydres selon l'équation (5) [13] :



La méthode expérimentale d'évaluation de profondeur de la carbonatation se fait par l'utilisation d'une solution alcoolique de phénolphthaléine sur la face de rupture qui sert d'indicateur coloré. La zone non carbonatée, de pH supérieur à 9, se colorie en rose vif, alors que les zones carbonatées restent non colorées (pH est inférieur à 9) [6, 14]. La réduction du temps de cure

humide de béton accroît la profondeur de carbonatation, la diffusion de gaz carbonique dans le béton à l'état liquide étant dix mille fois ( $10^4$ ) plus lente que la diffusion à l'état sec [15].

Selon Mmusi *et al.* [16], l'humidité relative (HR) de 80 % est la teneur critique pour la carbonatation du béton après 21 jours d'exposition au gaz carbonique à 5% de concentration, de même, après 84 jours d'exposition et la même teneur en humidité relative, Il a obtenu une profondeur de carbonatation maximal de 5 mm pour des éprouvettes en béton; plus encore la profondeur de carbonatation est plus élevée pour béton avec (Eau/Ciment) E/C = 0,75 par rapport au béton avec E/C = 0,45 et 0,6 dans les mêmes conditions de conservation.

Arredondo-Rea *et al.* [3], pour des éprouvettes en béton exposées au gaz carbonique de ( $6 \pm 0,1$ ) % et de ( $70 \pm 3$ ) % d'humidité relative pendant une durée de 180 jours, ont obtenues une profondeur de carbonatation minimale et une résistance à la compression maximale pour des éprouvettes en ciment portland (CEM I) fabriquées par des agrégats naturels, par rapport aux éprouvettes en ciment portland (CEM I) fabriquées avec des agrégats concassés recyclés avec différents pourcentages d'ajouts minéraux. Les résultats obtenus par Houst [17], ont été montré que le temps de carbonatation est minimal entre 50 et 80 % d'HR, plus encore la réduction de porosité du béton à hautes performances (BHP) par carbonatation est plus grande, lorsque le rapport E/C est faible. L'objectif de ce travail concerne l'étude du mécanisme de dégradation physico-chimique du béton des réseaux d'assainissement de Ouargla sous l'effet du gaz carbonique représentant un agent agressif réel en tant qu'éléments constitutifs des conduites et/ou des regards utilisés dans l'assainissement d'Ouargla en Algérie

## 2. Partie expérimentale

Dans cette étude, on utilise le ciment CRS (CEMI 52,5 N) de l'usine de Lafarge<sup>4</sup> de M'Sila<sup>5</sup> en Algérie, les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du ciment CRS sont présentées au tableau 1.

Tableau 1  
Caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du ciment CRS.

Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	3,08
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	58,90
Début de prise du ciment (min) a 20°C	140
Fin de prise du ciment (min) a 20°C	245
C3S (%)	57,00
C2S (%)	19,00
C3A (%)	4,00
C4AF (%)	14,00
CaO,L (%)	1,00
Gypse (%)	5,00

Les caractéristiques physico-chimiques des granulats sont présentées dans le tableau 2. Le sable naturel d'une granulométrie (0/5) est d'origine siliceux. Les graviers concassés sont de classes granulaires (3/8) et (8/15), aussi des granulats contiennent des éléments agressifs en quantité faible, ce qui permet leur utilisation pour la confection du béton.

Tableau 2  
Caractéristiques physico-chimiques des granulats

Propriétés	Sable 0/5	Gravier r 3/8	Gravier 8/15
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,53	1,24	1,38
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2,59	2,60	2,63
Équivalente de sable (%)	73,21	-	-
Propreté du gravier (%)	-	1,32	1,73
Friabilité de sable (%)	13,97	-	-
Coefficient de Los Angeles (%)	-	-	23,57
CaCO <sub>3</sub> (%)	1,50	77	
Cl (%)	0,015	0,023	
NaCl (%)	0,026	0,036	
Insoluble (%)	90,21	30,26	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (%)	Traces	Traces	

Pour la confection des éprouvettes en béton, on utilise des moules prismatiques de dimensions (70×70×280) mm<sup>3</sup> selon les normes européennes NF EN 12390 -1. Le tableau 3 présente les pourcentages massiques des constituants de béton, après les calculs et l'utilisation de la méthode graphique de Dreux Gorisse [18].

<sup>4</sup> <https://www.lafarge.dz/>

<sup>5</sup> 450 km Sud-est d'Alger

Tableau 3  
Masses des constituants du béton par la méthode de Dreux Gorisse.

Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Gravier 3/8 (kg/m <sup>3</sup> )	Gravier 8/15 (kg/m <sup>3</sup> )	Rapport E/C
400	621,53	161,19	1021,04	0,54

Après le démoulage, une série d'éprouvettes témoins est conservée au laboratoire ( $20 \pm 2$ ) °C dans un bac rempli d'eau potable. La deuxième série est conservée dans un bassin rempli d'eau usée à la station d'épuration (STEP)<sup>6</sup> d'Ouargla. Les résultats des analyses des paramètres physico-chimiques des eaux usées sont présentés au tableau 4.

Tableau 4  
Résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques annuels de l'eau usée de la STEP

Paramètres	Valeurs
PH	7,78
Salinité (g/l)	9,00
DCO (mg/l)	274,87
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	152,52
MES (mg/l)	310,45
O <sub>2</sub> (mg/l)	0,80
Ca <sup>+2</sup> (%)	492,98
Mg <sup>+2</sup> (%)	4 560,00
Na <sup>+</sup> (%)	660,00
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (%)	4 900,00
Cl <sup>-</sup> (%)	1247,90

D'après ces résultats, l'eau usée est légèrement basique alors que les valeurs des DCO<sup>7</sup>, (DBO<sub>5</sub>)<sup>8</sup> et MES<sup>9</sup> sont très élevées, donc cette eau est très polluée et contient une concentration très faible en oxygène soit une faible aération dans les conduites supports.

La dernière série des éprouvettes est surélevée sur un support métallique (non immergé dans les eaux usées) a été exposée au gaz carbonique dans un regard fermé d'une humidité relative entre 70 et 90 % de la région d'Ouargla (Sa concentration est très variable selon la température et l'humidité relative. Elle atteint les valeurs maximales aux mois d'été. À titre d'exemple cette concentration a atteint plus 10 % aux mois d'été). Ces

éprouvettes sont conservées dans les milieux cités, jusqu'à la date des essais (Voir les figures 3 et 4).



Figure 3. Éprouvettes en béton conservées dans l'eau usée au STEP.



Figure 4. Éprouvettes en béton exposées au gaz carbonique (CO<sub>2</sub>).

### 3. Résultats et analyse

#### 3.1. Profondeur de carbonatation

Cet essai a été effectué au laboratoire, par l'utilisation des chutes des éprouvettes prismatiques de dimensions  $(70 \times 70 \times H_{var})$  mm<sup>3</sup>, l'essai en question se fait sur la face de rupture fraîche des éprouvettes en béton par l'application de la solution phénolphtaléine. Ce test est réalisé sur les surfaces des éprouvettes dans les mêmes conditions d'essai (figure 5). Ce test permet une mesure fiable et rapide de la profondeur de carbonatation des éprouvettes en béton [14]. La figure 6 présente les valeurs de mesure de la profondeur de carbonatation des éprouvettes conservées dans différents milieux.

<sup>6</sup> Station d'Épuration des eaux usées

<sup>7</sup> Demande Chimique en Oxygène

<sup>8</sup> Demande Biochimique en Oxygène au bout de 5 jours

<sup>9</sup> Matières En Suspension



Figure 5. Mesurer la profondeur de carbonatation des éprouvettes en béton conservées dans différents milieux.

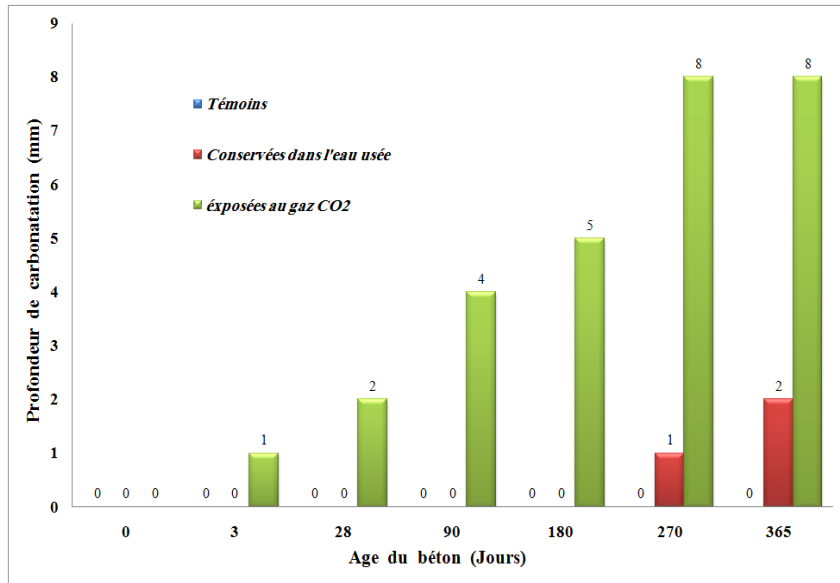


Figure 6. Profondeur de carbonatation des éprouvettes conservées dans différents milieux.

D'après cette figure, la profondeur de carbonatation des éprouvettes exposées au gaz carbonique est supérieure à celle des éprouvettes témoins et des éprouvettes conservées dans les eaux usées. Ainsi, la profondeur de carbonatation des éprouvettes conservées dans les eaux usées est nulle jusqu'à l'âge de 270 jours. Ces résultats montrent que la carbonatation du béton immergé dans les eaux usées est plus lente que le béton exposé au gaz carbonique. La profondeur de carbonatation atteint 2 mm pour les éprouvettes conservées dans l'eau usée à l'âge de 365 jours alors qu'elle se stabilise à 8 mm pour les éprouvettes exposées au gaz carbonique au même âge.

La profondeur de carbonatation des éprouvettes en béton exposées au gaz carbonique augmente en fonction du temps et présente les valeurs les plus élevées comparativement au béton témoin, ce qui confirme la vitesse plus élevée de diffusion du gaz carbonique à l'intérieur des pores du béton à l'état relativement humide et ce en conformité avec les travaux de R. Duval [15] qui a trouvé que la vitesse de pénétration du gaz carbonique est dix mille fois plus élevée dans l'air que dans l'eau.

Ajouté à cela, les regards de conservation représentent des milieux favorables notamment en matière d'humidité relative et de concentration de gaz carbonique plus élevée qui atteint plus de 100 ppm aux mois d'été (d'après des mesures faites par l'utilisation d'un détecteur multi-gaz) ; ce qui explique la diffusion de gaz carbonique sous forme d'acide carbonique ( $H_2CO_3$ ) à l'intérieur des pores du béton, puis la formation des carbonates de calcium ( $CaCO_3$ ) et la diminution de pH du béton. De même, les éprouvettes conservées dans les eaux usées présentent une profondeur de carbonatation faible par rapport aux éprouvettes exposées au gaz carbonique, ce qui explique la vitesse plus lente de diffusion du gaz à l'intérieur des pores du béton selon l'explication de R. Duval. Ces résultats sont conformes à ceux trouvés par M.O. Mmusi [16].

### 3.2. Essai de compression

Cet essai a été effectué au laboratoire par l'utilisation d'éprouvettes cubiques de dimensions  $(70 \times 70 \times 70)$  mm<sup>3</sup> selon la norme européenne NF EN 12390-3. Les résultats de l'essai de compression sont présentés dans la figure 7.

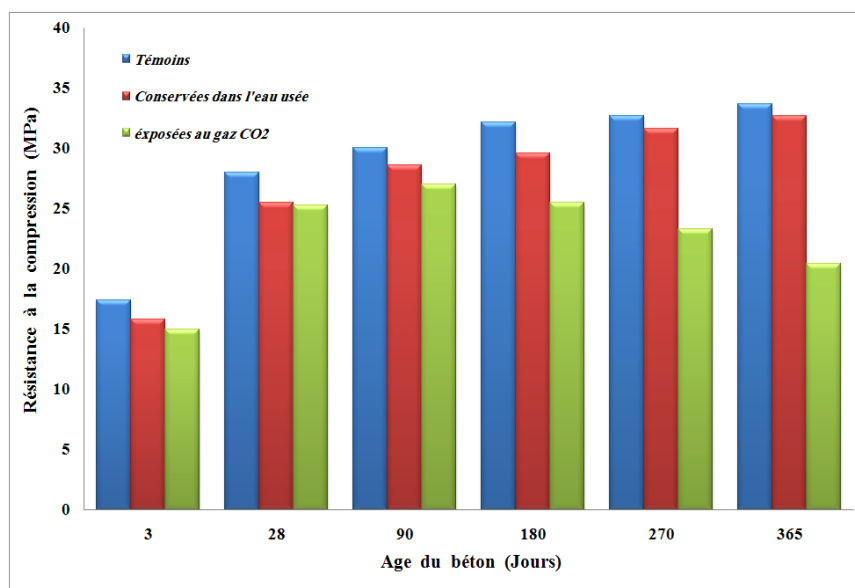


Figure 7. Résistance à la compression des éprouvettes en béton conservées dans différents milieux.

D'après cette figure, nous remarquons que la résistance à la compression des éprouvettes témoins est supérieure à celle des éprouvettes conservées dans les eaux usées et exposées au gaz carbonique, et que les éprouvettes exposées au gaz carbonique présentent des valeurs inférieures de résistances à la compression. De même, la courbe de résistance à la compression des échantillons conservés dans les eaux usées, s'accroît de manière continue jusqu'à l'âge de 365 jours pour atteindre sa valeur maximale de 32,65 MPa, avec une régression de résistance enregistrée du 3 % par rapport aux éprouvettes témoins. Pour les éprouvettes exposées au gaz carbonique, on a constaté que la courbe de résistance de compression s'accroît de façon continue jusqu'à 90 jours, où elle atteint son maximum de 27,04 MPa, au-delà de cette échéance elle diminue jusqu'à 20,41 MPa à l'âge de 365 jours, ou de régression de résistance égal à 40 % par rapport aux éprouvettes témoins. Ceci explique l'effet très négatif du gaz carbonique sur la durabilité du béton de ciment CRS contrairement aux éprouvette témoins, en présence d'une humidité relative au niveau du regard de conservation de l'ordre de 75 % accompagné d'une pression de gaz carbonique de concentration variable. Donc plus la profondeur de carbonatation diminue, plus la résistance à la compression augmente. Ces résultats concordent avec ceux trouvés par S. P. Arredondo-Rea [3].

La concentration du gaz  $H_2S$  dans les réseaux d'assainissement d'Ouargla est très variable selon la température et l'humidité relative, et atteint les valeurs maximales aux mois d'été. Nous pouvons expliquer la diminution de la résistance mécanique sous l'effet du gaz  $H_2S$ , qui réagit avec le carbonate de calcium pour former du gypse selon l'équation (4) et les travaux de Messaoudene *et al* [19], où une réduction à la compression de l'ordre de 41% a été constatée pour des mortiers conservés sur une durée d'une année à une concentration de 0,25 mole/litre d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ).

### 3.3. Essai d'absorption capillaire

Cet essai a été effectué au laboratoire par le prélèvement des éprouvettes en béton de dimensions  $(70 \times 70 \times 150)$  mm<sup>3</sup> conservées dans les différents milieux. Ces éprouvettes sont déposées horizontalement à la face sciée destinée à absorber l'eau pendant une durée de 72 heures d'un récipient contenant 2 cm de sable saturé d'eau, les autres faces des éprouvettes sont badigeonnées de paraffine d'après les normes européenne EN 1925 and EN 1015-18. Les résultats de l'essai de l'absorption capillaire sont présentés dans la figure 8.

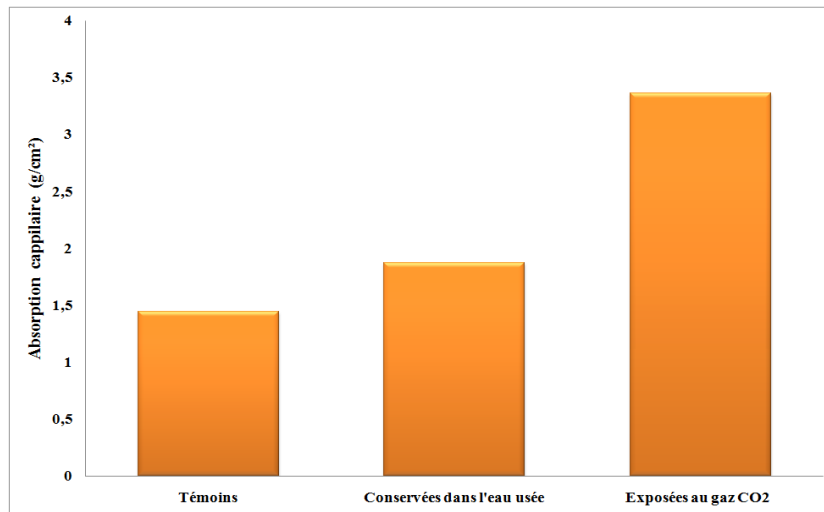


Figure 8. Absorption capillaire des éprouvettes conservées dans différents milieux à la durée de 365 jours.

D'après cette figure, nous remarquons que l'absorption capillaire des éprouvettes exposées au gaz carbonique est supérieure à celle des éprouvettes témoins et des éprouvettes conservées dans les eaux usées. Les éprouvettes témoins présentent des valeurs inférieures de l'absorption capillaires, ainsi cette régression est de 23 % par rapport aux éprouvettes conservées dans les eaux usées et de 57 % par rapport aux éprouvettes exposées au gaz carbonique. L'absorption capillaire plus élevée des éprouvettes exposées au gaz carbonique confirme la porosité interne plus élevée du béton de rapport E/C=0,54 et exposé à une humidité relative variable (70-80) % à cause de la diffusion d'acide carbonique à l'intérieur des pores du béton, puis la formation du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) et la création des fissures superficielles qui augmentent la porosité interne du béton. Ces résultats concordent avec ceux trouvés dans l'essai de compression.

#### 3.4. Résultats des analyses DRX

Les résultats des analyses par diffraction X des couches superficielles des éprouvettes en béton

conservées dans différents milieux jusqu'à 365 jours sont présentés dans les figures 9, 10 et 11.

D'après la figure 9, ont constatée des traces d'Ettringite cristalline, de gypse, de Portlandite, NaCl et du carbonate de calcium aux pics (2 Thêta) 24, 46 et 68 ; plusieurs pics de type NaCl détectés confirment la formation d'une surface protectrice des chlorures pour des échantillons immergés dans les eaux usées. Cependant, aucune Ettringite n'a été détecté pour les éprouvettes témoins selon la figure 10.

Pour le diagramme DRX, des éprouvettes exposées au gaz carbonique (figure 11), Il est indiqué la formation des traces de gypse, l'Ettringite, la Portlandite et la carbonate de calcium aux pics 43, 51, 62 et 74. La plupart des pics détectés sont de type  $\text{CaCO}_3$  (les pics 6) du fait qu'une partie de  $\text{Ca(OH)}_2$  ait été utilisée pour former le carbonate de calcium. Cette réaction peut entraîner la diminution de la Portlandite puis former le gypse et l'Ettringite expansive selon des études antérieures [8,19]. Ces résultats sont en adéquation avec ceux obtenus suite aux précédents essais.

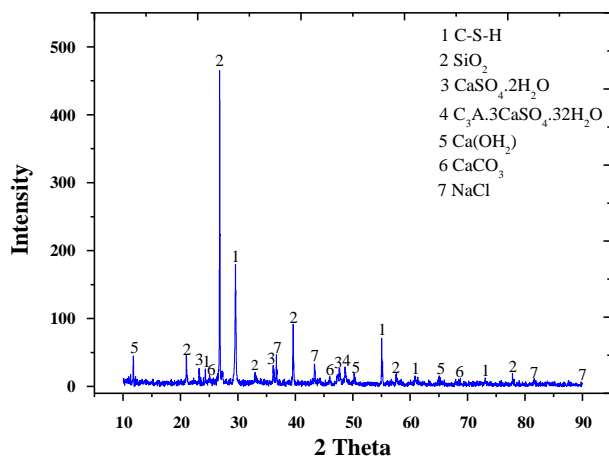


Figure 9. Analyse par diffraction X des éprouvettes conservées dans les eaux usées.

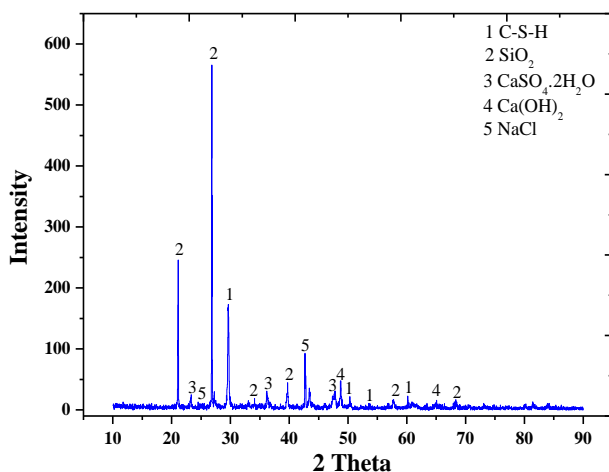


Figure 10. Analyse par diffraction X des éprouvettes témoins.

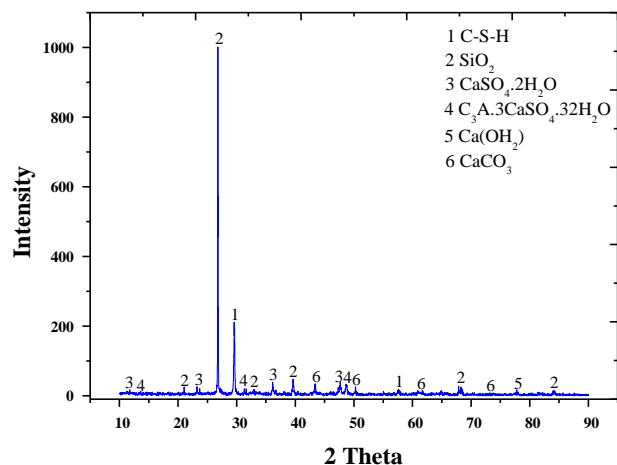


Figure 11. Analyse par diffraction X des éprouvettes conservées au gaz CO<sub>2</sub>.

#### 4. Conclusion

D'après les résultats obtenus dans cette étude, on conclut ce qui suit :

- Le béton à base de ciment résistant aux sulfates (CRS) conservé dans les eaux usées, a présenté des caractéristiques mécaniques acceptables comparativement au béton témoin et une pénétration des agents agressifs assez lente. Une faible régression de la résistance à la compression d'environ 3 % à l'âge de 365 jours de conservation.
- L'exposition du béton de ciment CRS au gaz carbonique montre une dégradation accélérée du béton sous l'effet du gaz carbonique, notamment après 90 jours d'âge où une régression environ de 40 % de résistance à la compression par rapport aux éprouvettes témoins, a été notée à l'âge de 365 jours.
- La carbonatation du béton de ciment CRS exposé au gaz carbonique débute après 3 jours d'immersion ; et pour notre cas, la profondeur de carbonatation maximale a été atteinte après une année soit de 8 mm Pour les éprouvettes immergées dans les eaux usées, n'ont présentées que de faibles profondeurs de carbonatation qui ont atteint leurs maximums à l'âge de 365 jours de conservation d'environ 2 mm.
- La diminution de la résistance mécanique du béton due au l'effet de l'attaque par les sulfates de gaz H<sub>2</sub>S dans les réseaux d'assainissement, qui réagit avec le carbonate de calcium pour former du gypse selon l'équation (4).

Enfin nous recommandons d'éviter l'utilisation des conduites en béton de ciment CRS dans l'assainissement d'Ouargla, notamment en la présence du gaz carbonique et la substitution par des éléments en PRV ou en PVC (conduites et regards) ; mais aussi l'aération des réseaux d'assainissements et le badigeonnage par des peintures bitumineuses en plusieurs couches.

#### Références

- [1] BG (Bureau d'étude technique Suisse), rapport technique, Étude d'assainissements des eaux résiduaires, pluviaux et d'irrigations, mesure complémentaire de lutte contre la remontée de la nappe phréatique, Mission IC. Avant-projet détaillé - Tranche II, 2004.
- [2] Hussain R.R. and Ishida T., Critical carbonation depth for initiation of steel corrosion in fully carbonated concrete and development of electrochemical carbonation induced corrosion model. International journal of electrochemical science, 4 (2009): 1178 – 1195.
- [3] Arredondo-Rea S.P., Corral-Higuera R., Gómez-Soberón J.M., Castorena-González J.H., Orozco-Carmona V. and Almaral-Sánchez J.L., Carbonation rate and reinforcing steel corrosion of concretes with recycled concrete aggregates and supplementary



- cementing materials, International journal of electrochemical science, 7 (2012) 1602-1610.
- [4] Saetta A.V., Bernhard A., Schrefler V.V. and Renato V.V., 2-D Model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials. Pergamon, Cement and Concrete Research, 25 (8) (1995): 1703-1712, printed in the USA
- [5] Saetta A.V., Bernhard A., Schrefler V.V. and Renato V.V., The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials. Pergamon, Cement and Concrete Research, Volume 23, PP. 761-772, printed in the USA, 1993.
- [6] Muntean A. and Böhmb M., A moving-boundary problem for concrete carbonation: Global existence and uniqueness of weak solutions, Elsevier, Journal of Mathematical Analysis and Applications, 350 (2009): 234-251.
- [7] Villain G., Thierry M. and Platret G., Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gamma densimetry, Elsevier, Cement and Concrete Research, 37 (2007): 1182-1192.
- [8] Deepu M.S., Hegde M.N. and Chandrasekaraiah T., Effects of carbonation on lightly reinforced concrete slabs by accelerated testing method, International journal of advancement in engineering technology, Management & Applied science, 1, (2) (2014): 2349-3224.
- [9] Estoup J.M. and Cabrillac R., Corrosion of biological origin observed in concrete digestors, Elsevier, Construction and Building Materials, 11 (4) (1997): 225-232.
- [10] Henriette S.J., Piet N.L.L., Jeppe L.N., Kai B., Asbjørn H.N., Thorkild H. J. and Jes V., Growth kinetics of hydrogen sulfide oxidizing bacteria in corroded concrete from sewers, Elsevier, Journal of Hazardous Materials, 189 (2011): 685-691.
- [11] Shiping W., Mauricio S., David T. and Chris G., Physical and microstructural aspects of iron sulfide degradation in concrete, Elsevier, International Biodeterioration & Biodegradation, 64 (2010): 748-754.
- [12] Vladimir C., Tasnim F. and Adrian M, Multiscale sulfate attack on sewer pipes: Numerical study of a fast-micro-macro mass transfer limit, Journal of Math-for-industry, 2(2010B-7): 171-181.
- [13] Bassuoni M.T. and Nehdi M.L., Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading, Elsevier, Cement and Concrete Research, 39 (2009) 206-226.
- [14] Chandrasekaraiah T., Anantharam H., Krishnamurthy M., Manjunath K.V. and Hegde M.N., Accelerated testing of deteriorated concrete structures due to carbonation, International Journal of Research in Engineering and Technology, 03 (6) (2014): 2319-1163.
- [15] Baron J. and Ollivier J.P., La durabilité des bétons, Collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Edition de l'école des ponts et chaussées, 49, Rue de l'université. 75007 Paris, 1992.
- [16] Mmusi M.O., Alexander M.G and Beushausen H.D., Determination of critical moisture content for carbonation of concrete. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II - Alexander *et al.* Taylor & Francis Group. PP359-364, London, ISBN 978-0-415-46850-3, 2009.
- [17] Houst Y.F., The role of moisture in the carbonation of cementitious materials, International Zeitschrift für Bauinstand setzen (international journal of Building Restoration), 01 (1996): 49-66.
- [18] De Larrard F., Construire en béton, l'essentielle sur les matériaux Collection, Edition presse des ponts. 28, rue de Saints-Pères, 75007 paris, 2002.
- [19] Messaoudene L., Jauberthie R., Molez L., Damien R. and Abdelghani N., Effect of Industrial By-products Fillers on the Properties of Blended Cements in Sulphate Environments, 10<sup>th</sup> International Congress on Advances in Civil Engineering, Ankara, Turkey, 2012