

---

## Durabilité des bétons fibrés conservés en réseau d'assainissement

Ourdia Fedououi-Akmoussi<sup>1\*</sup>, Raoul Jauberthie<sup>2</sup>, Laurent. Molez<sup>2</sup>, Salah Kaci<sup>1</sup>, Ourdia Haddad<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Laboratoire de génie civil, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie,

<sup>2</sup> Laboratoire GCGM : matériaux EA 3913, INSA de Rennes, France,

\*[fedaouio@yahoo.fr](mailto:fedaouio@yahoo.fr)

---

*RÉSUMÉ. Suites aux détériorations causées par les dégradations des réseaux d'assainissement, notre étude s'est basée sur le comportement mécanique et la durabilité des bétons fibrés avec et sans ajout de fumée de silice. Les compositions ont été fabriquées avec un même rapport eau-ciment ( $E/C = 0.5$ ), un dosage en fibres de 0.5 % (fibre de verre ou fibre métallique) et un dosage de 10 % (de la masse de ciment) pour la fumée de silice. Afin de caractériser les performances de durabilité des mortiers étudiés, des éprouvettes témoins ont été conservées dans une atmosphère à 20 °C et à humidité relative de 50 % ; les autres ont été conservées dans les égouts pendant trois mois. Une observation au microscope électronique à balayage a été réalisée sur les différents échantillons ce qui permet de visualiser les différentes modifications de la microstructure de la matrice et l'altération éventuelle des fibres.*

*ABSTRACT. This study was based on the mechanical behavior and the durability of concretes with and without addition of silica fume stored in sewerage system. The composition were made with the same water-cement ratio ( $W/C = 0.5$ ), a fiber composition is fixed at 0.5 % (glass fiber or metal fiber) and 10 % of silica fume (by mass of cement). To characterize the sustainability performance of the studied mortars, control specimens were kept in an atmosphere at 20° C and 50 % relative humidity and others were kept in the sewers for three months. An observation by scanning electron microscopy was performed on different samples which allow us to see the different changes in the microstructure of the matrix and the appearance of the fibers.*

*MOTS-CLÉS: Durabilité, bétons, fibres métalliques, fibres de verre, fume de silice, égouts.*

*KEYWORDS: Durability, concrete, metal fiber, glass fiber, silica-fume, sewers*

---

## Introduction

Le phénomène de dégradation des réseaux d'assainissement est complexe et les investigations s'avèrent délicates du fait du nombre important des paramètres influents. Parmi ces dégradations on peut citer : les dégradations biologiques (bactéries, champignons, mousses...), les dégradations physiques (chocs ou abrasion, contraintes mécaniques, poinçonnement, gel-dégel...) et les dégradations chimiques (corrosion d'armatures, attaques acides, formation de produits expansifs...), d'où l'orientation de notre étude (Belghit, 2008), (Roux et al 2005).

Les eaux usées transportent des quantités importantes de bactéries, en particulier des bactéries sulfato-réductrices à l'origine de la formation de sulfures solubles par réduction des composés soufrés. Dans un milieu pauvre en oxygène, cela entraîne le dégagement d'hydrogène sulfuré ( $H_2S$ ) qui est susceptible de s'oxyder en acide sulfurique  $H_2SO_4$  provoquant ainsi la dégradation du béton (Vichot et al, 2008), (Dugnolle, 1973), (Kampen, 1995).

La durabilité d'un béton dépend essentiellement de sa porosité donc de la fissuration développée et de la résistance à la compression (Mehta, 1998), mais aussi de la différence de concentration des alcalins entre la solution interstitielle et l'environnement extérieur.

Des études ont démontré que l'ajout des fibres participe à la limitation du développement des fissures donc éventuellement à améliorer la durabilité (Maage, 1984), (Rossi, 1998). Par ailleurs, d'autres études ont démontrés que l'ajout de fumée de silice contribue à la réduction de la perméabilité du béton mais aussi à l'amélioration de sa résistance à la compression. Deux avantages qui peuvent apporter un plus vis-à-vis de la durabilité (Regourd, 1985), (Regourd et al, 1986), (Neville, 2000).

Notre démarche consiste à étudier l'apport des fibres et l'apport de l'ajout de la fumée de silice vis-à-vis de la durabilité dans cet environnement.

Après trois mois de conservation des échantillons dans le réseau d'assainissement «égouts», les caractéristiques mécaniques ont été déterminées par la flexion 3 points sur des éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ , et par la compression sur des cubes de  $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ . Les caractéristiques de durabilité ont été déterminées par une observation au microscope électronique à balayage pour constater les différentes modifications microstructurales de la matrice cimentaire et la dégradation par corrosion des fibres métalliques et de verre.

## 1. Expérimentation

## Bétons fibrés en réseaux d'assainissement

### 1.1. Matériaux utilisés

- **Ciment:** le ciment utilisé est un ciment Portland CEM I 52.5 de l'usine Saint Pierre Lacour (France), sa composition chimique est donnée dans le tableau 1.

- **Sable:** le sable utilisé est un sable siliceux normalisé selon CEN EN 196 N1 ISO 679. La granulométrie de ce sable est comprise entre 0.08 et 2 mm.

- **Fumée de silice:** la fumée de silice utilisée est de couleur grise, ses caractéristiques chimiques sont données dans le tableau 1.

- **Fibres:** deux types de fibres ont été utilisées: les fibres métalliques droites de longueur 25 mm et de diamètre 0.25 mm et les fibres de verre de type Cem Fil AR (alcali résistante) de longueur 12 mm. Le taux de pourcentage en fibres utilisés est de 0.5 % du volume total du mortier. Les propriétés physiques et mécaniques des fibres sont données dans le tableau 2.

Constituants (%)	Ciment	Fumée de silice
CaO	64,50	0,14
SiO <sub>2</sub>	21,01	97,64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,90	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,80	0,1
MgO	0,90	0,15
SO <sub>3</sub>	3,00	
K <sub>2</sub> O	0,90	0,39
Na <sub>2</sub> O	0,20	0,14
Résidus insolubles	0,20	
Perte au feu	1,10	
CaO libres	0,45	
C <sub>3</sub> S	65,94	
βC <sub>2</sub> S	10,47	
C <sub>3</sub> A	8,24	
C <sub>4</sub> AF	8,52	

**Tableau 1.** Composition chimique et minéralogique (Bogue) du ciment et de la fumée de silice.

Fibres	Fibre métallique	Fibre de verre
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	7500	2680
Résistance en traction (GPa)	1 ÷ 3	3
Module d'élasticité (GPa)	200	73
Résistance au feu (°C)	1500	773
Allongement à la rupture (%)	/	4.3
Coefficient de dilatation (µm/m)	11	/

Tableau 2. Propriétés physiques et mécaniques des fibres.

## 1.2. Préparation des échantillons et essais

Pour cette étude, six séries de mortiers ont été confectionnées: trois séries sans ajout de fumée de silice et les trois autres avec ajout de fumée de silice. Les formulations sont présentées dans le tableau 3.

Composition	Échantillons					
	MN	MNfv	MNfm	MFs	MFsfv	MFsfm
Eau / ciment (E/C)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sable / ciment	3	3	3	3	3	3
Fumée de silice	-	-	-	10	10	10
Fibres métalliques	-	-	0.5	-	-	0.5
Fibres de verre	-	0.5	-	-	0.5	-

Tableau 3. Composition des séries de mortiers étudiés.

**MN**: mortier normal

**MNfv**: mortier + fibres de verre

**MNfm**: mortier + fibres métalliques

**MFs**: mortier + fumée de silice

**MFsfv**: mortier + fumée de silice + fibres de verre

**MFsfm**: mortier + fumée de silice + fibres métalliques

## Bétons fibrés en réseaux d'assainissement

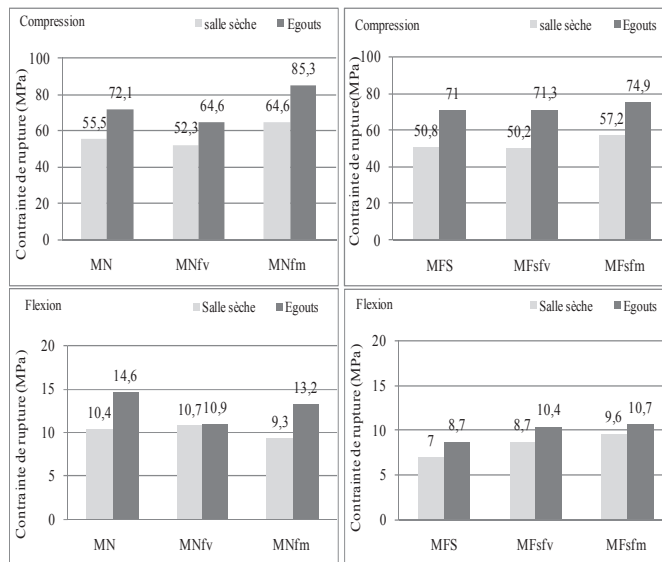
Après le gâchage, les moules d'éprouvettes ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ) ont été remplis de mortier et conservées dans une salle à  $20^\circ \text{C}$  et 95 % d'Humidité Relative (HR) pendant 24 heures. Une fois démoulées, les éprouvettes sont conservées dans la même salle pendant trois jours. Ensuite, les éprouvettes ont été placées dans une salle à  $20^\circ \text{C}$  et 50 % HR jusqu'à 28 jours d'âge.

Après cette cure, et afin de caractériser les performances mécaniques et de durabilité dans l'environnement des égouts, une série d'éprouvettes a été immergée dans le flux d'un regard d'assainissement de la ville de Rennes. Une autre série d'éprouvette a été placée pendant trois mois dans la salle à  $20^\circ \text{C}$  et 50 % HR pour nous servir de témoin.

A 120 jours d'âge (soit 90 jours d'exposition aux eaux usées), des essais de compression et de flexion 3 points ont été effectués. Pour ces essais nous avons enregistré les courbes effort-déplacement. De plus, nous avons effectué des observations au microscope électronique à balayage pour visualiser les dégradations liées à cet environnement agressif.

## 2. Présentation des résultats et discussion

Par ces essais, nous avons calculé la contrainte à la rupture en compression et en flexion et l'énergie de rupture. Les figures 1 et 2 montrent les résultats de flexion et de compression, obtenus sur les mortiers dans les deux environnements (égouts et environnement sain).

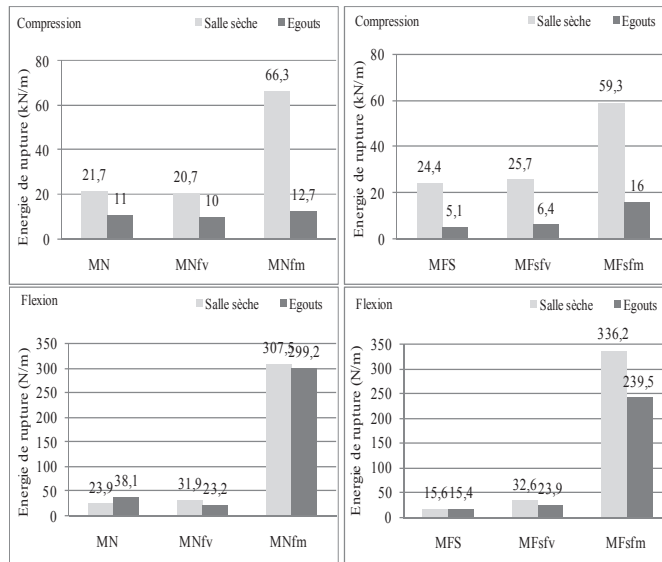


**Figure 1.** Contraintes à la rupture en compression et en flexion [MPa].

Sur la figure 1 on remarque une augmentation de la contrainte à la rupture en compression et en flexion des mortiers conservés dans les égouts. La présence de  $\text{CO}_2$  dissout dans l'effluent provoque avec la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et les C-S-H, la formation des carbonates de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), ce qui a provoqué l'augmentation des caractéristiques mécaniques du point de vue résistances. Ceci a été constaté par certains auteurs (Chaussadent, 1999), (Purnell et al, 2003). La carbonatation est plus marquée en présence d'eau ou d'humidité qu'en atmosphère sèche. Malgré les attaques liées à la nature des effluents, la conservation en milieu humide a un effet prépondérant.

Pour une meilleure exploitation des données, nous avons utilisé les courbes effort - déplacement pour calculer les énergies de rupture en compression et en flexion par une unité de surface transversale (figure 2). Cette énergie est obtenue par un calcul d'intégrale selon la méthode utilisée par L.Molez (Molez, 2003).

## Bétons fibrés en réseaux d'assainissement



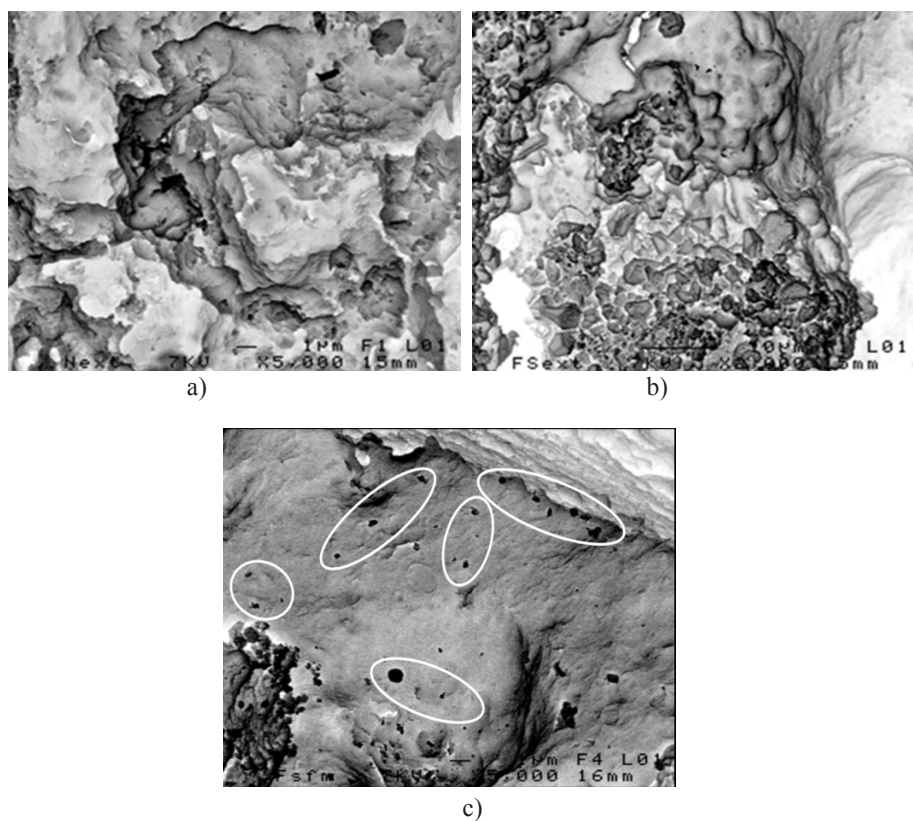
**Figure 2.** Énergie de rupture en compression [kN/m] et en flexion [N/m] par unité de surface transversale.

L'énergie de rupture a nettement diminué dans l'environnement égouts pour tous les types de mortiers (figure 2).

L'ajout de la fumée de silice entraîne une diminution des résistances mécaniques des MFs, MFsfv et MFsfm par rapport aux mortiers MN, MNfv et MNfm. Ceci peut s'expliquer par le fait que la durée de cure appliquée à nos éprouvettes dans la salle humide est insuffisante pour constater l'effet pouzzolanique de la fumée de silice. Au contraire, cette fumée de silice a un effet bénéfique marqué, lorsque les échantillons sont stockés dans les effluents 'humides': l'effet réaction pouzzolanique peut apparaître dans ces conditions de conservation.

Une nette amélioration est observée dans le comportement en flexion des mortiers avec fibres métalliques du point de vue résistance au pic et post pic. Sauf que dans l'environnement égout, l'énergie de rupture des mortiers MFsfm chute de 20 % par rapport aux mortiers MNfm. Alors que dans la salle sèche on distingue une augmentation de l'énergie de rupture, ce qui s'explique par la dégradation des fibres dans l'environnement égouts.

Les observations faites au microscope électronique à balayage sont présentées sur les figures 3 et 4, elles concernent seulement les mortiers conservés dans les égouts.



**Figure 3.** Observation au MEB de la matrice des échantillons conservés dans les égouts.

*a) Aspect des dépôts organiques ( $\times 5000$ ), b) Carbonates et dépôts de matière organique ( $\times 2000$ ), c) Les traces de Bactéries ( $\times 5000$ ).*

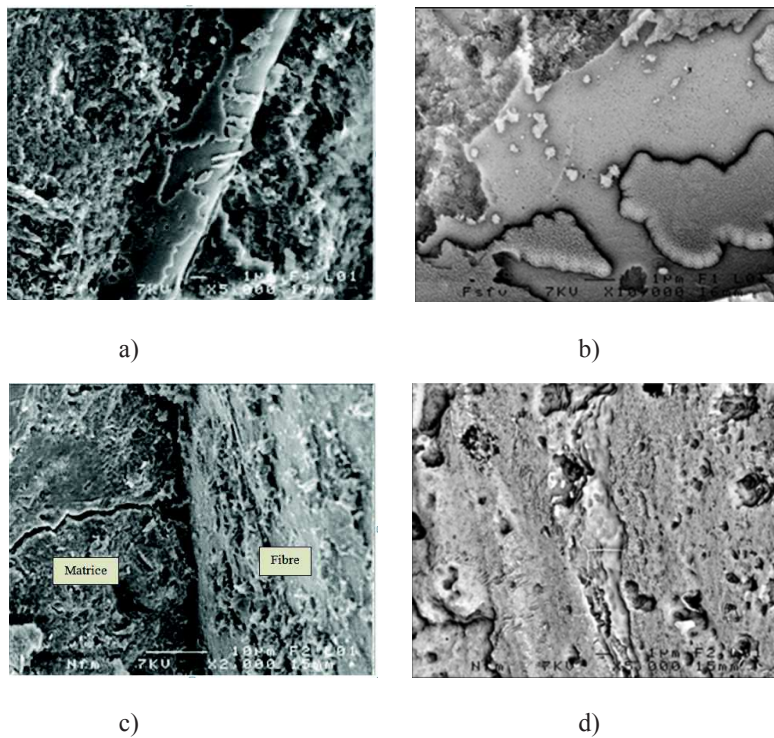
La figure 3 illustre l'intérieur d'un pore qui a été au contact de l'effluent. La photo (a) montre un aspect de dépôts de matière organique. Sur la photo (b), on voit les carbonates de calcium au dessus desquels il y'a des dépôts de matière organique sous



### Bétons fibrés en réseaux d'assainissement

forme de draperie. Les traces blanches de forme rondes et ovales repérées sur la photo (c) sont un début de colonisation des bactéries.

La dégradation des fibres de verre et des fibres métalliques est observée sur la figure 4.



**Figure 4.** Observation au MEB de l'état des fibres à plusieurs échelles.

*a) fibre de verre ( $\times 5000$ ), b) fibre de verre ( $\times 10\ 000$ ), c) fibre métallique ( $\times 2000$ ), d) fibre métallique ( $\times 5000$ ).*

La couche extérieure des fibres de verre est presque totalement dégradée, malgré l'utilisation des fibres de type Alkali-résistante. Dans le cas des fibres métalliques, on a constaté un début d'oxydation sans qu'il y ait rupture.

## XXIX<sup>e</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

La substitution d'une partie du liant par de la fumée de silice n'a pas favorisé la formation des C-S-H par effet pouzzolanique, ce qui peut être expliqué par l'insuffisance de la durée de cure appliquée à nos éprouvettes conservées en milieu sec. Peu de différences sont observées avec les conservations en milieu humide pour ce qui est de la protection éventuelle liée à l'ajout de fumée de silice.

### Conclusion

Les résultats de cette étude mettent clairement en évidence:

Les dégradations engendrés par les effluents d'égouts et ceci au niveau du battement humide/sec sont, en partie compensées par la carbonatation qui obstrue la porosité.

Le dépôt de matière organique à la surface des échantillons contribue aussi, dans le cas de notre expérimentation, à la protection.

Dans les effluents les fibres de verre sont moins efficaces mécaniquement que les fibres métalliques.

Les fibres de verre sont alcali résistantes et malgré cela elles sont attaquées en milieu humide.

Malgré la présence de zones rouillées, les fibres métalliques ont une influence mécanique plus marquée.

La présence de fumée de silice n'a pas le rôle espéré dans la protection.

### Bibliographie

Belghit C., « La durabilité des bétons en réseau d'assainissement », Colloque National Pathologie des constructions du diagnostic à la réparation. Dépt Génie civil Université Mentouri Constantine, 25-26 Nov 2008.

Chaussadent T., « État des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé », *Études et recherches des LPC, série, Ouvrages d'art*, N° 29, 1999.

Dugnolle E., « Corrosion biologique des bétons au contact avec les eaux résiduaires », *Revue CSTC*, N°4, 1973, p. 26-28.

Kampen R., « Durability and corrosion of sewers », *Beton*, vol. 45, n°8, aug 1995, p. 554-556.

Maage M., Effect of microsilica on the durability of concrete structures, Report STF65 A 84019, FCB/SINTEF, The Norwegian Institute of technology, Trondheim, Norway, march 1984.

### Bétons fibrés en réseaux d'assainissement

- Mehta P.K., « High performance concrete technology for the future », *National Seminar on performance enhancement of cements and concretes by the use of fly ash, slag, silica fume and chemical admixtures*, Special lecture, New Delhi, jan 1998, p. 3-16.
- Molez L., Comportement des réparations structurales en béton: couplage des effets hydriques et mécaniques, Thèse de doctorat, École normale supérieur de Cachan, Université Laval, Québec, Canada, 2003.
- Neville A.M., *Propriétés des bétons*, Éditions Eyrolles, 2000.
- Purnell P., Seneviratne A.M.G., Short N.R., Page C.L., « Super-critical carbonation of Glass-fiber reinforced cement. Part 2: Microstructural observations », *Composites Part A*, Vol. 34, n° 11, 2003, p. 1105-1112.
- Regourd M., « Microstructure of high strength cement paste systems », *Material research society symposia proceedings 4*, 1985, p. 3-17.
- Regourd M., et al., « Use of Silica Fume as Filler in Blended Cements », *ACI SP-79*, Vol.2, 1986.
- Rossi P., *Les bétons de fibres métalliques*, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées 1998.
- Roux S., Feugeas F., Cornet A., « Biodégradation des bétons : analyse des bétons et mortiers en contact avec une eau douce naturelle », *Matériaux & Techniques 93*, Hors série, 2005, p. 123-135.
- Vichot A., Ollivier J.P., *La durabilité des bétons*, Presses de l'école Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), 2008.