



HAL
open science

Étude du comportement mécanique et de durabilité des bétons fibrés dans un milieu agressif

Ourdia Fedaoui-Akmoussi, L Molez, S Kaci, R Jauberthie

► **To cite this version:**

Ourdia Fedaoui-Akmoussi, L Molez, S Kaci, R Jauberthie. Étude du comportement mécanique et de durabilité des bétons fibrés dans un milieu agressif. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. hal-01167611

HAL Id: hal-01167611

<https://hal.science/hal-01167611>

Submitted on 24 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Étude du comportement mécanique et de durabilité des bétons fibrés dans un milieu agressif (égouts)

O. Fedaoui-Akmoussi¹, L. Molez², S. Kaci¹, R. Jauberthie²

¹ *Laboratoire de génie civil, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie (fedaouio@yahoo.fr)*

² *Laboratoire GCGM, INSA de Rennes, France*

RÉSUMÉ. Cette étude porte sur le comportement mécanique et la durabilité des bétons fibrés conservés en milieu agressif (égouts). Nous avons réalisé trois essais, les essais de résistances mécaniques, le test à la phénolphthaléine et l'étude microstructurale (MEB). Les compositions ont été fabriquées avec des rapports eau sur ciment (0,5 ; 0,65 ; 0,8), un dosage en fibres métalliques de 0,5 %. Après une année de conservation dans trois environnements différents qui sont: environnement témoin humide (20°C et 95% HR), environnement cycles (mouillage et séchage), et environnement agressif (égouts), nous avons caractérisé les performances mécaniques et de durabilité des mortiers étudiés. Une observation au microscope électronique à balayage (MEB) a été réalisée sur les échantillons et montre un début de dégradation des fibres et de la matrice.

ABSTRACT. This study was carried out to examine the mechanical behavior and durability of fibre reinforced mortar conserved in an aggressive environment (sewer). Three tests were carried out: strength, depth of pH reduction using phenolphthalein, and micro-structural analysis by SEM. The mixes studied had three water cement ratios (0.5; 0.65; 0.8), with a 0.5% steel fibre content. To characterize the durability performance of the mortars studied, samples were exposed to one-year in three environments: wet environment (control samples under laboratory conditions, 20°C and 95% RH) and exposure samples: in cyclic environment (wetting and drying) and a sewage pumping station sump (an aggressive environment). The SEM observation shows that there is a deterioration of the external surface of the samples and fibres which are caused by a bacterial and sulfatic attack. .

MOTS-CLÉS : mortier fibré, agents agressifs, dégradation, microstructure, durabilité.

KEY WORDS: fibres-reinforced mortar, aggressive agents, degradation, microstructure, durability.

1. Introduction

Le béton est un matériau largement utilisé dans les réseaux d'égouts; sous certaines conditions, cet environnement peut être extrêmement agressif. L'intervention de micro-organismes agissant en synergie avec les facteurs physiques et chimiques peut provoquer un danger non négligeable pour le béton. Le facteur biologique, trop souvent ignoré, peut induire des modifications d'état du matériau allant de l'apparition de tâches et de salissures sur les parements en béton [DUB 01], [GAY 05] à la ruine de l'ouvrage [VIN 02], [TUL 02].

Les eaux circulant dans les réseaux d'assainissement sont généralement riches en sulfates. En absence d'oxygène ou lorsque l'écoulement est lent, les bactéries sulfato-réductrices, présentes dans l'eau réduisent les sulfates en hydrogène sulfuré (H_2S) qui se dégage dans l'atmosphère de la canalisation lorsque les turbulences apparaissent [DEB 04], [VIN 02]. L'hydrogène sulfuré réagit avec les produits alcalins de la surface du béton en donnant un condensat contenant des ions HS^- et S_2^- [ROB 02]. La réaction de ce condensat avec l'oxygène de l'atmosphère conduit à la formation d'un dépôt d'espèces oxydées comme le thiosulfate, le soufre élémentaire et les polysulfates. Ce dépôt constitue alors un excellent substrat pour le développement de certaines bactéries comme celles du genre *Thiobacilli*. Une fois la surface du béton carbonatée, des bactéries neutrophiles telles que les *Thiobacilli thiopari*, peuvent s'y développer.

Le milieu d'assainissement est un exemple qui montre l'importance des phénomènes de biodégradation. Ce milieu induit la carbonatation, préambule nécessaire à toute colonisation, puis fournit les micro-organismes et les nutriments propices au développement microbien, le béton n'offrant normalement pas de nutriments aux micro-organismes. La bioréceptivité du béton dépend de sa composition chimique ainsi que des caractéristiques physiques liées à sa mise en œuvre (rapport eau/ciment, temps de malaxage...). Un état récent de la revue d'art d'attaque biochimique a été faite par [OCO 10].

Dans ce document nous avons présenté les résultats de notre étude concernant l'apport des fibres sur la durabilité des mortiers dans les différents environnements (humide, cycles et égouts).

Après une année de conservation, dans les trois environnements, les caractéristiques mécaniques des échantillons 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 $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ des mortiers renforcés de fibres métalliques. Les caractéristiques de durabilité ont été déterminées par les mesures de l'épaisseur du béton à pH réduit en utilisant comme indicateur la phénolphthaléine, et par des observations au microscope électronique à balayage afin d'expliquer les différentes modifications microstructurales de la matrice cimentaire.

2. Expérimentation

2.1. Matériaux utilisés

Le ciment utilisé est un ciment Portland CEM I 52.5, sa surface spécifique Blaine est de $3600 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. Le sable utilisé est un sable siliceux normalisé selon CEN 196-1 conforme à la norme ISO 679. Sa granulométrie est comprise entre 0.08 et 2 mm, sa masse volumique réelle est égale à 2640 kg/m^3 .

Nous avons utilisé des fibres métalliques droites de longueur 25 mm et de diamètre 0.25 mm (Figure 1), leurs caractéristiques physiques et mécaniques sont données dans le tableau 1. Le taux de pourcentage en fibres utilisés est de 0.5 % du volume total du mortier.

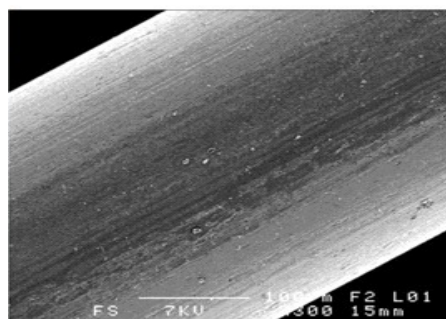


Figure 1. Aspect d'une fibre non altérée.

Tableau 1. *Propriétés physiques et mécaniques des fibres.*

Propriétés	Fibre métallique
Masse volumique (kg/m ³)	7800
Résistance en traction (GPa)	1 - 3
Module d'élasticité (GPa)	200
Résistance au feu (°C)	1500
Coefficient de dilatation (µm/m)	11

2.2. Préparation des échantillons et essais

Dans cette étude nous avons confectionné deux séries de mortiers selon la norme (EN 106 – 1) qui sont : (MN : mortier sans fibres et MNfm : mortier avec fibres métalliques). La composition des mortiers est donnée dans le tableau 2.

Tableau 2. *Composition des mortiers à E/C=0,5.*

Composition (kg/m ³)	MN	MNfm
Ciment	494	492
Sable	1483	1476
Eau	247	246
Fibres métalliques 0,50 %	/	39.0

De plus chaque série a été étudié pour trois valeurs de E/C (0,5 ; 0,65 ; 0,8). Pour chaque cas, la proportion sable / ciment est conservée égale à 3.

Après le gâchage, les moules d'éprouvettes (4×4×16 cm³) ont été remplis de mortier et conservées dans une salle à 20 °C et 95 % d'Humidité Relative (HR) pendant 24 heures. Une fois démoulées, les éprouvettes sont conservées dans la même salle pendant sept jours. Ensuite, les éprouvettes ont été placées dans une salle à 20°C et 55 % HR jusqu'à 28 jours d'âge.

Après 28 jours, et afin de caractériser les performances mécaniques et de durabilité dans l'environnement égouts, une série d'éprouvettes a été immergée dans le flux d'un regard d'assainissement de la ville de Rennes (Figure 2), une autre série a été placée en environnement cycles (mouillage/séchage) et pour témoin nous avons placé une série d'éprouvette en environnement humide.

**Figure 2.** *Aspect des éprouvettes à la sortie des égouts.*

A 365 jours d'âge, des essais de compression et de flexion 3 points ont été effectués. Afin d'éviter les effets parasites provoqués par les défauts de parallélisme et de planéité de la face supérieure de l'éprouvette, nous avons appliqué le chargement sur les faces latérales de l'éprouvette.

Les essais de flexion ont été réalisés selon la norme NF P 18 – 407. La vitesse de montée en charge est de 0,1 mm/min. La mesure de la flèche a été réalisée à l'aide de deux capteurs LVDT (± 1 mm), placés à l'aide d'un dispositif à mi-portée de la travée (Figure 3). Ces derniers sont en contact avec la face inférieure de l'éprouvette. Cette méthode de mesure permet de suivre l'évolution des déplacements en fonction de la charge jusqu'à la rupture.

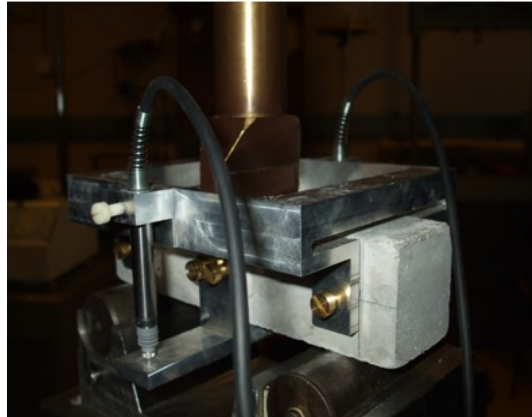


Figure 3. Capteurs LVDT utilisés pour la lecture des déplacements en flexion 3 points.

Les essais de compression ont été réalisés sur les demi – éprouvettes issues des essais de flexion trois points comme indiqué sur la figure (4) avec une vitesse de chargement de 0,25 mm/min. La résistance en compression a été évaluée selon la norme (NF P 18 – 406). Nous avons testé des cubes de $4 \times 4 \times 4$ cm³.



Figure 4. Essai de compression.

De plus, nous avons mesuré l'épaisseur du béton à pH réduit après pulvérisation d'une solution de phénolphtaléine sur la face de rupture qui révèle l'interface entre la zone saine et la zone dépassivée. Et enfin des observations au microscope électronique à balayage ont été réalisées afin de visualiser les différentes formations.

3. Résultats et discussions

3.1. Caractéristiques mécaniques

Par ces essais, nous avons déterminé les contraintes de rupture en compression et en flexion. Les figures 5 et 6 montrent les résultats obtenus après une année d'exposition dans les différents environnements.

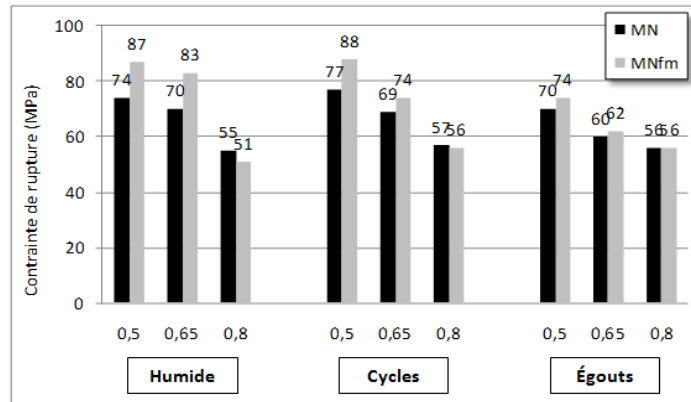


Figure 5. Conainte de rupture en compression.

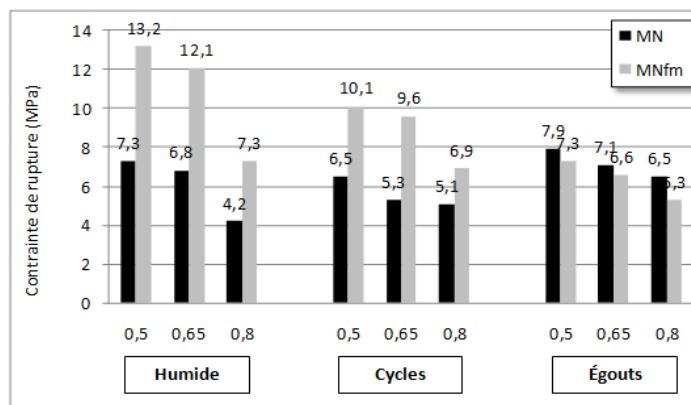


Figure 6. Conainte de rupture en flexion.

Les mortiers fibrés (MNfm) présentent des contraintes de rupture en compression plus importante par rapport aux mortiers sans fibres MN pour les différents environnements et les différents rapports E/C. Par contre en flexion la résistance des mortiers MNfm a diminué par rapport aux mortiers MN dans l'environnement égouts de 7,6% pour E/C = 0,5, de 7% pour E/C = 0,65 et de 18% pour E/C = 0,8. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'après exposition aux agents agressifs dans les égouts, les fibres métalliques qui étaient en contact des effluents, ont subi une dégradation qui a altéré leur section initiale et donc a diminué leurs caractéristiques physico-chimiques (figure 7). Ceci a provoqué une augmentation de la porosité donc une diminution des résistances en flexion.

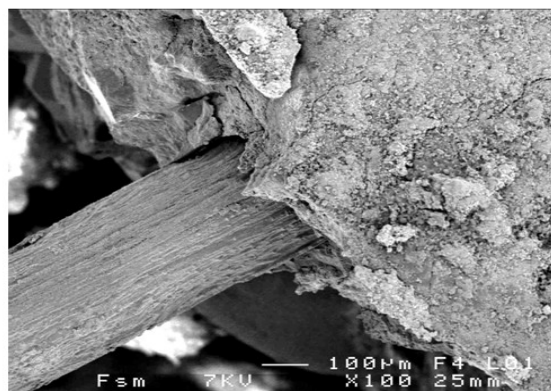


Figure 7. Altération d'une fibre métallique au contact des égouts.

Sur les figures 8, 9 et 10 nous avons représenté les courbes efforts-déplacements. Pour chaque rapport E/C, nous avons superposé les courbes obtenues sur les mortiers fibrés des trois environnements (humide, cycles et égouts).

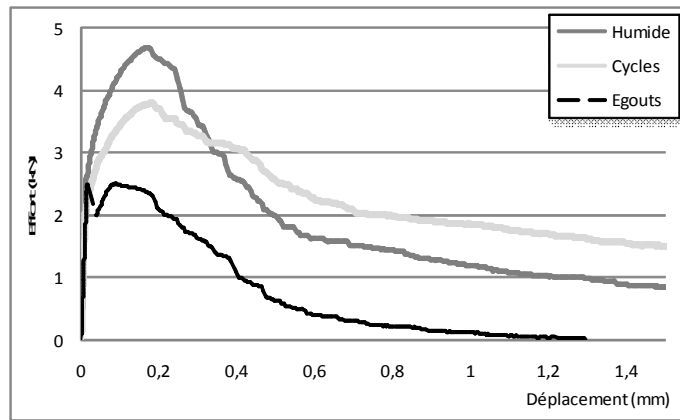


Figure 8. Courbes effort-déplacement pour $E/C = 0,5$.

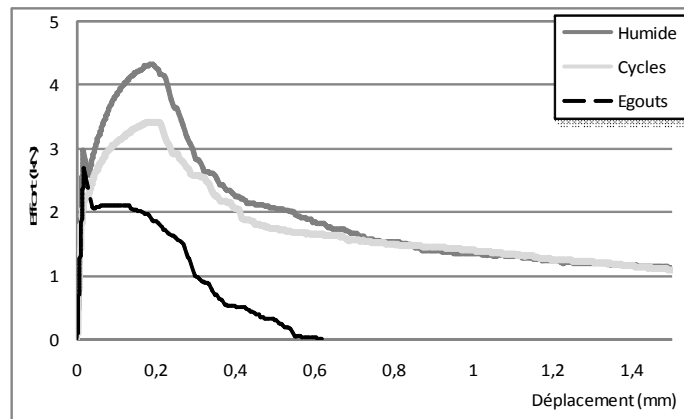


Figure 9. Courbes effort-déplacement pour $E/C = 0,65$.

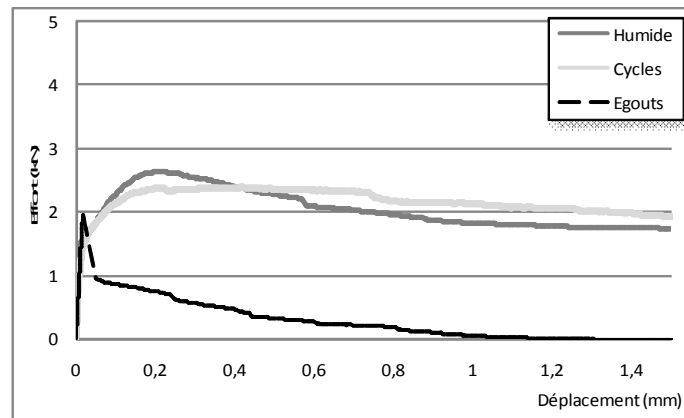


Figure 10. Courbes effort-déplacement pour $E/C = 0,8$.

Les courbes ainsi obtenues montrent que ces mortiers ne se rompent pas brutalement, ils présentent un comportement plutôt ductile.

Pour une meilleure exploitation des données, nous avons utilisé les courbes efforts-déplacements pour calculer les énergies de fissuration en flexion par une unité de surface transversale, les résultats sont donnés en figure 11. Cette énergie est obtenue par un calcul d'intégrale selon la méthode utilisée par [GUO 99].

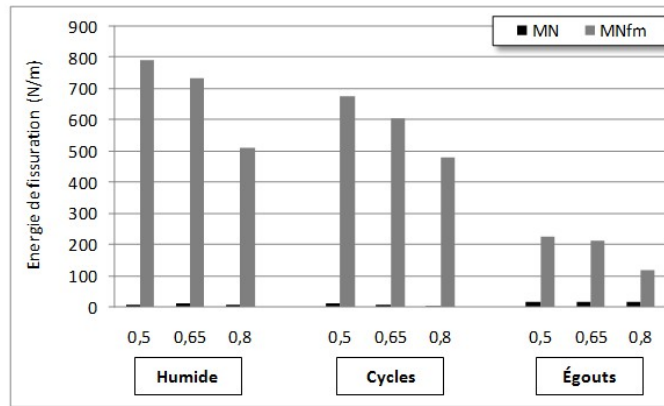


Figure 11. *Énergie de fissuration.*

Les résultats montrent que les mortiers fibrés conservés en milieu humide présentent une importante énergie de rupture. De plus, les résultats montrent que l'énergie de rupture varie proportionnellement au rapport E/C, cela dans les trois environnements de conservation (humide, cycles et égouts). En comparant les environnements cycles et égouts par rapport à l'environnement humide pour le rapport E/C égale à 0,5, on observe une chute d'énergie de fissuration respectivement de 15% et 71%.

Sur la figure 12 nous avons représenté les modules élastiques estimés par la pente de la première phase du diagramme en flexion (efforts-déplacements) qui est la partie élastique.

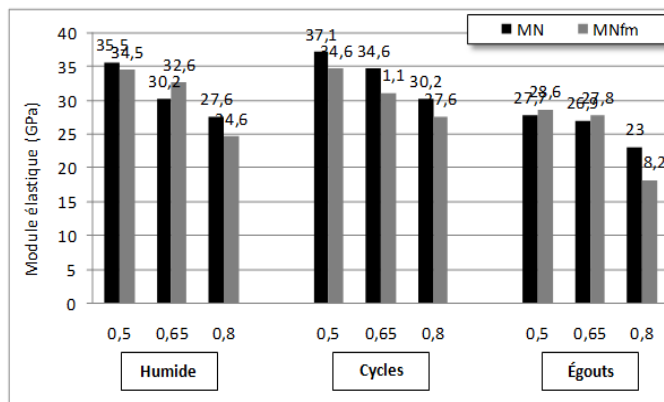


Figure 12. *Modules élastiques.*

Pour tous les rapports E/C, on constate que les mortiers conservés dans les environnements humide et cycles, présentent des modules d'élasticité plus importants par rapport à ceux conservés en environnements égouts.

Les forces résiduelles sont présentées sur la figure 13.

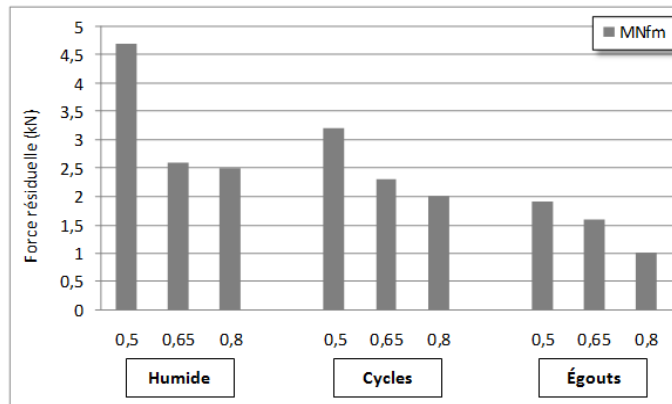


Figure 13. Forces résiduelles.

En comparant l'environnement égout avec l'environnement cycles pour $E/C = 0.5$, on constate une chute de force résiduelle de l'ordre de 40%, 30% pour $E/C = 0.65$ et 50% pour $E/C = 0.5$. Si on compare l'environnement égout avec l'environnement humide, on a une chute de 59% pour $E/C = 0.5$, 40% pour $E/C = 0.65$ et 60% pour $E/C = 0.8$.

3.2. Test à la phénolphthaléine

La profondeur de carbonatation a été déterminée par le test à la phénolphthaléine (indicateur coloré). La pulvérisation de cet indicateur, virant au rose vif lorsque le pH est supérieur à 9, permet de mettre en évidence le front carbonatation du béton. Cinq mesures ont été prises sur chaque face de l'éprouvette en évitant les lectures aux coins, ce qui nous a permis de représenter la moyenne de 20 lectures. Les résultats sont présentés sur la figure 14.

	MN	MNfm
$E/C = 0,5$		
$E/C = 0,65$		
$E/C = 0,8$		

Figure 14. Front à pH réduit détecté par pulvérisation de phénolphthaléine.

Toutes les éprouvettes conservées dans les environnements humide et cycles ne présentent pas d'épaisseur à pH réduit. Par contre celles conservées en égouts présentent une épaisseur à pH réduit qui varie en fonction du rapport E/C pour les deux types de mortiers (mortier normal et mortier fibré). On constate qu'il y'a une légère augmentation de la profondeur à pH réduit pour les mortiers fibrés par rapport à ceux non fibrés, ceci peut s'expliquer par le fait qu'en surface extérieure des éprouvettes certaines fibres sont restées apparentes, elles auraient favorisés l'accès à la solution agressive. L'ajout de fibres métalliques a engendré l'augmentation de la porosité, ce qui a favorisé l'augmentation de la perméabilité donc une diminution de la durabilité.

3.3. Observation au MEB

Les observations faites au microscope électronique à balayage (MEB) sont présentées sur la figure 15, elles concernent seulement les mortiers avec un rapport E/C = 0,8 et qui sont conservés dans les égouts afin de mieux analyser les différentes modifications de la microstructure.

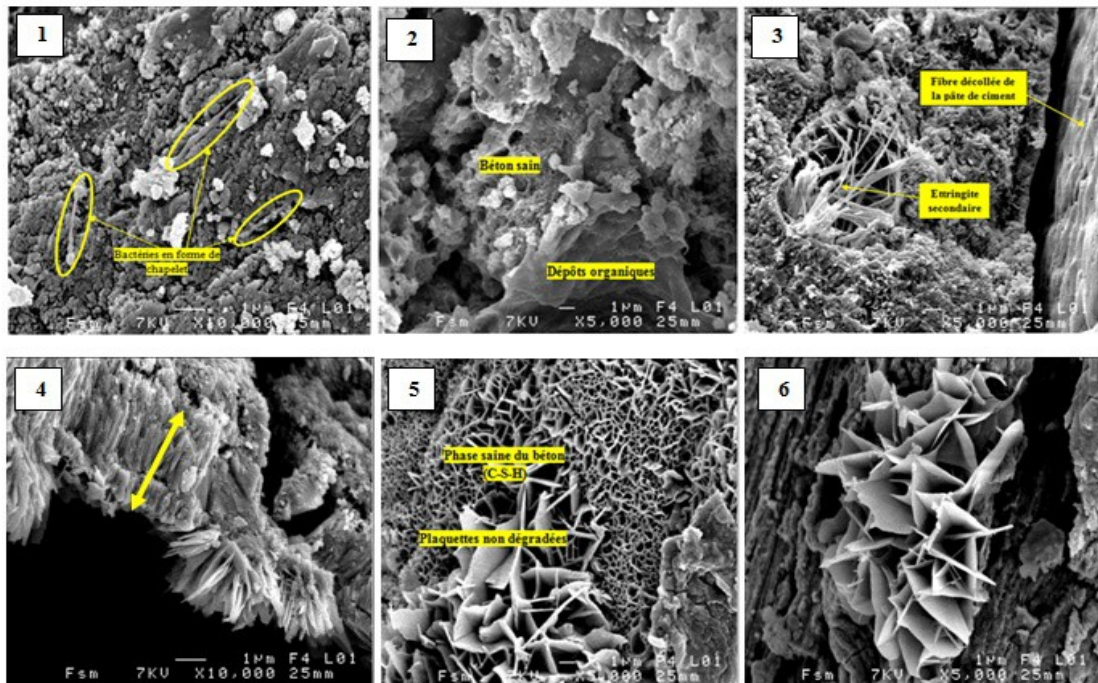


Figure 15. Front à pH réduit détecté par pulvérisation de phénolphtaléine.

- 1) Les traces de bactéries ($\times 10\,000$), 2) Dépôts de matière organique ($\times 5000$), 3) Ettringite secondaire ($\times 5000$), 4) Aspect des C-S-H dégradés ($\times 10\,000$), 5) La phase saine du béton (C-S-H) ($\times 5000$), 6) Plaquettes des C-S-H non dégradées ($\times 5000$).

La figure 15 présente l'aspect des différentes formations microstructurale de la matrice. La photo (1) illustre les traces de bactéries en forme de chapelet. Sur la photo (2), on voit les dépôts de matière organique repérés à l'intérieur d'un pore et juste au dessus on voit le béton sain qui est mieux représenté sur les photos (5 et 6). La photo (3) illustre l'interface entre la matrice et la fibre. La fibre décollée de la matrice présente un aspect altéré et juste à gauche on peut voir la formation de l'ettringite secondaire. L'absence de liaison observée entre les fibres et la matrice explique en partie l'augmentation de la profondeur de l'épaisseur à pH réduit pour les mortiers exposés à l'égout. Cette ouverture de la structure permet la pénétration de dioxyde de carbone et des acides provoquant des réactions biochimiques. Des C-S-H dégradés sur une épaisseur de $4\ \mu\text{m}$ sont repérés sur la photo (4). Nous pouvons remarquer que la dégradation des CSH était apparente sur une faible épaisseur.

4. Conclusion

Le comportement d'un béton dans le milieu égouts est très complexe, du fait qu'il soit soumis aux attaques bactériennes et sulfatique en même temps.

Les résultats de cette étude, après une année de conservation dans le milieu égouts, nous montrent que:

Les résistances en compression des mortiers conservés dans les différents environnements sont sensiblement les mêmes.

Pour la flexion, les mortiers fibrés (MNfm) conservés dans l'environnement égouts présentent une diminution de résistance par rapport à ceux conservés dans l'environnement humide et cycles. Cette diminution peut s'expliquer par le début de corrosion des fibres métalliques qui étaient en contact avec les eaux usées, qui au final ne participent pas à la résistance à la traction et à une modification de la surface du mortier. Par contre pour les mortiers non fibrés, on constate un gain de résistance ce qui peut s'expliquer par le fait que les pores présents dans la matrice soit obstrués par la formation de cristaux d'ettringite et de gypse, observations confirmées par le MEB.

Les épaisseurs à pH réduit obtenues sur les mortiers fibrés sont plus importantes par rapport à celles obtenues sur les mortiers non fibrés, ceci n'est pas du à la carbonatation, vu que l'environnement des regards d'assainissement est un environnement fermé et très humide. Donc il est probable que cette modification soit due aux effets biochimiques qui sont responsables de ces altérations à la surface externe du mortier.

Les observations au MEB ont mis en évidence : un début de colonisation bactérienne, présence d'une faible épaisseur des C-S-H dégradés, formations d'ettringite secondaire et une phase saine du mortier.

5. Bibliographie

- [DUB 01] DUBOSE A., ESCADEILLAS G., BLANC P.J., « Characterization of biological stains on external concrete walls and influence of concrete as underlying material », *Cement and Concrete Research*, Vol 31 (11), 2001, p. 1613-1617.
- [GAY 05] GAYLARDE, C.C., GAYLARDE, P.M., « A comparative study of the major microbial biomass of biofilms on exteriors of building in Europe and Latin America », *International Biodeterioration and Biodegradation*, Vol 55 (2), 2005, p. 131-139.
- [VIN 02] VINCKE E., BOON N., VESTRACTE W. « Analysis of the microbial communities on corroded concrete sewer pipes- a case study », *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol 57 (5-6), 2002, p. 776-785.
- [TUL 02] TULLIANI J.M., MONTANARO L., NEGRO A., COLLEPARDI M., « Sulfate attack of concrete building foundations induced by sewage waters », *Cement and Concrete Research*, Vol 32 (6), 2002, p. 843-849.
- [ROB 02] ROBERTS D.J., NICA D., ZUO G., DAVIS J.L., « Quantifying microbially induced deterioration of concrete : initial studies », *International Biodeterioration and Biodegradation*, Vol 49 (4), 2002, p. 221-234.
- [DEB 04] DE BELIE N., MONTENY J., BEELDENS A., VINCKE E., VAN GEMERT D., VERSTRAETE W., « Experimental research and prediction of the effect of chemical and biogenic sulfuric acid on different types of commercially produced concrete sewer pipes », *Cement and Concrete Research*, Vol 34 (12), 2004, p. 2223-2236.
- [VIN 02] VINCKE E., VAN WANSEELE E., MONTENY J., BEELDENS A., DE BELIE N., TAERWE L., VAN GEMERT D., VERSTRAETE W., « Influence of polymer addition on biogenic sulfuric acid attack of concrete », *International Biodeterioration and Biodegradation*, Vol 49 (4), 2002, p. 283-292.
- [OCO 10] O'Connell M., McNally C., Richardson M G., « Biochemical attack on concrete in wastewater application: a state of the art review », *Cement and Concrete Composites*, Vol 32, n°7, 2010, p.479-485.
- [GUO 99] GUO X.H., TIN-LOI F., LI H., « Determination of quasibrittle fracture law for cohesive crack models », *Cement and Concrete Research*, Vol 29, 1999, p. 1055-1059.