

Conditions sévères de biocorrosion en réseau d'assainissement : résistance de différents matériaux cimentaires

■ J. HERISSON^{1,2}, M. GUÉGUEN-MINERBE², É. VAN HULLEBUSCH³, F. SAUCIER¹, V. BOURGIER⁴,
T. CHAUSSADENT²

Mots-clés : biodétérioration, réseaux d'assainissement, réhabilitation, matériaux cimentaires, ciment Portland, ciment d'aluminate de calcium, H₂S, aluminium

Keywords: biodeterioration, sewer networks, rehabilitation, cementitious materials, Portland cement, calcium aluminate cement, H₂S, aluminum

Introduction

Dans la plupart des pays industrialisés, les réseaux d'assainissement ont été construits pour des durées de vie de l'ordre de 60 à 80 ans et ont en moyenne 40 à 50 ans. En conséquence, la proportion de travaux de rénovation et de réhabilitation va continuer à croître afin de maintenir les réseaux fonctionnels. Se pose alors la question du choix des matériaux et des méthodes de réparations pour optimiser la durée de vie des réseaux [1].

La conception hydraulique d'un réseau d'assainissement consiste, dans un premier temps, à évaluer le débit des effluents, puis à dimensionner les ouvrages, en tenant compte des perspectives d'évolution de la collecte et du degré de protection contre les inondations. D'une manière générale, elle doit prendre en considération les aspects physique, chimique, biochimique, bactériologique, visuel et olfactif. Malgré cela, même dans des réseaux bien conçus, on ne peut éviter que certaines zones soient soumises à des

détériorations ayant un impact sur leur durée de vie en service.

Parmi les contraintes de durabilité des matériaux dans les réseaux d'assainissement, la biocorrosion induite par la présence l'hydrogène sulfuré (H₂S) est un problème majeur, pouvant endommager sévèrement les infrastructures. Le gaz H₂S se forme dans les zones anaérobies des boues et sédiments qui s'accumulent dans le fond des canalisations, lorsque l'effluent a un temps de séjour élevé associé à une faible vitesse d'écoulement, avec peu ou sans turbulences et de fortes concentrations en sulfates. 40 à 50 % des postes de refoulement présentent des concentrations en hydrogène sulfuré qui préoccupent les exploitants, ce pourcentage pourrait atteindre 70 % en zone rurale. Trois facteurs principaux favorisent sa formation :

- les réseaux d'assainissement prennent souvent en compte un développement futur. Ils sont alors surdimensionnés et s'étendent sur des distances de plus en plus grandes ;
- la diminution de la consommation en eau conduit à limiter les vitesses d'écoulement des effluents ;
- la séparation des eaux pluviales et sanitaires réduit les débits d'écoulement et augmente les temps de rétention.

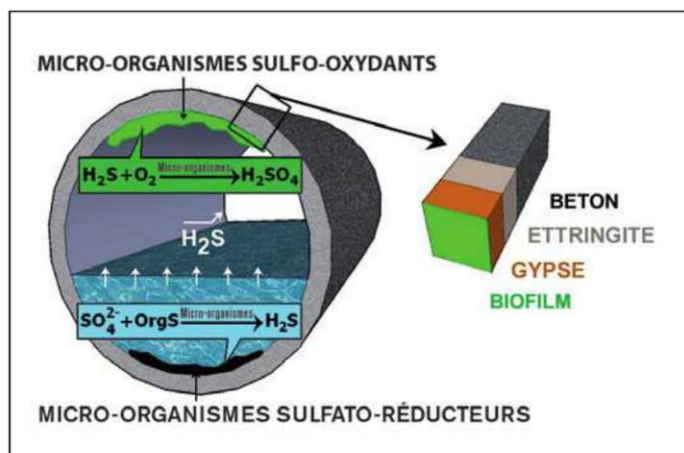
La détérioration des matériaux et des structures, induite par des micro-organismes, est un processus très localisé dans les réseaux d'assainissement qui se

¹ Kerneos – 1, rue Le Chatelier – ZAC Parc Technologique – 38090 Vaulx-Milieu.

² Université Paris-Est – MAST, CPDM, IFSTTAR – 77447 Marne-la-Vallée.

³ Université Paris-Est – Laboratoire Géomatériaux et Environnement – EA 4508 – UPEM – 77454 Marne-la-Vallée.

⁴ Veolia Eau – Direction technique – 1, rue Battista-Pirelli – 94410 Saint-Maurice cedex.



OrgS : soufre contenu dans les molécules organiques.

Figure 1. Cycle schématique du soufre dans un réseau d'assainissement

	XA1	XA2	XA3
Concentration homogène	< 0,1	≥ 0,1 et ≤ 10	> 10 et ≤ 200
Concentration non homogène	< 0,1	≥ 0,1 et ≤ 7	> 7 et ≤ 25

Tableau I. Définition de la classe d'agressivité chimique en fonction de la concentration moyenne en H₂S (ppm) [4].

déroule en plusieurs étapes (figure 1). Tout d'abord, les boues et sédiments présents en suspension dans les eaux usées vont s'accumuler et former des zones anoxiques (privées d'oxygène) dans lesquelles des bactéries sulfato-réductrices vont pouvoir se développer aux dépens de la matière organique des eaux usées en réduisant les sulfates en sulfures. L'hydrogène sulfuré ainsi formé peut ensuite se dégazer plus en aval, notamment quand l'effluent rencontre des zones de turbulences. Une fois dans la partie aérienne de la canalisation, l'H₂S va servir de source d'énergie à d'autres types de bactéries (bactéries sulfo-xydantes) qui vont l'oxyder en acide sulfurique sur les parois de la canalisation et entraîner la dégradation de cette dernière.

Une enquête réalisée en France par le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) en 1989 [2] auprès de 1 106 gestionnaires pour un linéaire test de 49 281 km a recensé les dégradations rencontrées dans les réseaux d'assainissement et conclu que, dans 24 % des cas traités, elles résultent d'un mauvais choix de matériau.

Pour guider les concepteurs dans le choix des matériaux cimentaires, la nouvelle approche de la durabilité des

bétons introduite par la norme EN 206 [3] depuis une dizaine d'années s'appuie sur l'identification des conditions d'exposition (abrasion, gel/dégel, chlorures, attaque chimique...) auxquelles une structure sera soumise durant sa vie en service. Pour chaque classe d'exposition, des recommandations de compositions sont données par différents textes normatifs. La norme FD P18-011 [4] définit des classes d'exposition qui correspondent à trois niveaux d'agressivité chimique dont les valeurs des différents seuils concernant l'H₂S sont données dans le tableau I.

Pour améliorer la tenue aux agressions chimiques des bétons, une des recommandations est d'incorporer dans le béton une addition hydraulique ou pouzzolanique (laitier de haut-fourneau, cendres volantes, fumée de silice, utilisés en substitution partielle de ciment CEM I ou incorporés au béton sans substitution de ciment) pour limiter la teneur en portlandite (Ca(OH)₂) et ainsi conférer au ciment une bonne tenue au contact des solutions acides. Dans la majorité des linéaires d'un réseau d'assainissement bien conçu, la concentration en H₂S sera faible, voire nulle, et aucune recommandation ne sera nécessaire concernant le choix d'un matériau. Dans le cas spécifique d'un milieu acide et avec une classe d'exposition XA3, cette norme préconise l'utilisation de cinq types de ciments : les CEM III/A, B et C, CEM IV/B, CEM V/A et B ainsi que les ciments sursulfatés et d'aluminates de calcium. Toutefois, lorsque la teneur en H₂S dans une structure d'assainissement excède le seuil de la classe XA3, la recommandation actuelle est d'appliquer une protection externe (revêtement ou enduit) ou interne (imprégnation).

La protection des surfaces soumises à la biocorrosion avec des matériaux cimentaires permet de travailler dans des environnements humides. Au contraire de certains revêtements polymères qui nécessitent une surface sèche pour adhérer, le ciment a besoin d'eau pour s'hydrater. Les solutions minérales sont donc spécialement bien adaptées à ces environnements humides. De plus, la nouvelle couche minérale va étanchéifier la structure en recréant une barrière capable de prévenir d'éventuelles infiltrations. Enfin, en utilisant une solution cimentaire adaptée, il est possible de retrouver le profil initial du réseau tout en restaurant l'intégrité structurale. En présence de

corrosion biogénique, la contrainte la plus forte demeure la tenue à l'attaque acide et cette étude vise à mieux documenter la durabilité potentielle des solutions cimentaires, et notamment celles à base d'aluminates de calcium.

1. Objectifs de l'étude

Dans le but de mieux comprendre la biodétérioration des matériaux en présence d' H_2S , l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar) a mis en place un projet de recherche [5] dont les objectifs principaux sont d'évaluer le comportement de différents matériaux cimentaires, de définir les mécanismes mis en jeu et de les modéliser. Cet article présente une partie des résultats d'un travail à long terme entamé en 2010 visant à caractériser le comportement de différents matériaux cimentaires exposés à des conditions sévères de biocorrosion en réseaux d'assainissement.

Un des objectifs de l'étude est de mieux documenter les options pour la réhabilitation (ou la construction) des ouvrages soumis à une biocorrosion sévère, c'est-à-dire pour des conditions d'exposition excédant la classe XA3, avec un focus sur les formulations cimentaires à base d'aluminates de calcium. En effet, quelques publications [6-9] indiquent que les aluminates de calcium peuvent résister à des conditions de biocorrosion sévères malgré leur nature cimentaire et il convient de plus documenter ce comportement particulier.

2. Méthodologie

Afin de vérifier la tenue à des conditions sévères de biocorrosion, un site d'exposition adéquat a été identifié. Il s'agit d'une station de refoulement, en aval d'une station d'épuration, montrant des signes évidents de dégradations d'origine biochimique résultant de hautes concentrations en H_2S . Le site a été équipé d'un analyseur en continu de la température et de la concentration en H_2S . La synthèse des caractéristiques mesurées sur une année est donnée dans le *tableau II*. Le suivi de la concentration d' H_2S confirme que, selon la norme FD P18-011 [4], ce site dépasse les limites supérieures de la classe XA3.

		S2
[H₂S] (en ppm)	Minimum	0
	Moyenne	96
	Maximum	308
Température (en °C)	Minimum	9,5
	Moyenne	20
	Maximum	30

Tableau II. Moyennes des concentrations en H_2S et température du site *in situ* relevées en continu sur une période d'un an

Pour cette étude, des échantillons cylindriques (6 cm de diamètre et 14 cm de haut) de mortier ont été fabriqués. Ces échantillons comportent un manche en PVC pour leur accrochage *in situ*.

Trois types de ciment ont été utilisés pour formuler les cinq mortiers de cette étude :

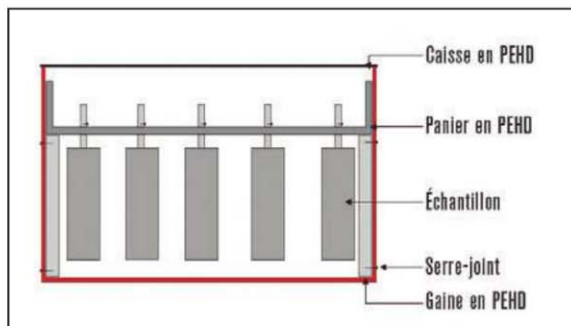
- un ciment Portland de type CEM I, ciment le plus utilisé pour les ouvrages courants et le plus étudié, qui constitue le ciment de référence pour cette étude, mais qui n'est pas préconisé pour les milieux agressifs. Ce matériau est utilisé comme témoin positif de détérioration, on s'attend donc à ce qu'il se dégrade durant l'exposition ;
- un ciment Portland de type CEM III/B qui est un mélange de ciment CEM I et de laitier de haut-fourneau (36 à 95 % suivant la catégorie). Pour les besoins de l'étude, le CEM III a été reconstitué en laboratoire par le mélange du CEM I avec 75 % de laitier de haut-fourneau. Ce type de ciment est conseillé par la norme FD P18-011 dans le cas de travaux souterrains en milieux agressifs, comme les eaux usées, lorsque la classe d'exposition est XA3. Sa résistance aux milieux acides tiendrait du fait qu'il possède moins de chaux et serait donc moins réactif qu'un ciment CEM I face à une attaque acide ;
- un ciment d'aluminates de calcium, compte tenu des bons retours d'expérience lors de sa mise en place dans les réseaux d'assainissement [6]. Mais aussi parce qu'il est conseillé par la norme FD P18-011 de l'employer dans les travaux en milieux fortement et très fortement agressifs (pH < 4). Une variante contenant 75 % de laitier de haut-fourneau a également été réalisée afin de comparer le CEM III avec un matériau similaire contenant du ciment d'aluminates de calcium.

En ce qui concerne les granulats, il a été décidé d'utiliser du sable normalisé Afnor pour une partie des échantillons de mortier. Un granulat de synthèse alumino-calciue (Alag) a également été utilisé. Ce type de granulat a la même composition minéralogique que le ciment d'aluminate de calcium et permet ainsi d'obtenir une matrice dont la minéralogie et la chimie sont homogènes.

Pour tous les mortiers, les rapports massiques eau sur ciment (E/C) et sable sur ciment (S/C) utilisés pour fabriquer les mortiers sont respectivement de 0,37 et de 1,44.

À partir de ces différents choix, cinq formulations de mortier ont été définies (tableau III).

Les échantillons de mortiers sont positionnés dans une caisse plastique permettant les échanges avec l'environnement (figures 2 et 3). Trois échantillons de chacun des cinq types de mortier sont introduits par caisse. La caisse comporte donc quinze échantillons qui sont suspendus sans contact direct avec les parois de la caisse d'exposition.



PEHD : polyéthylène haute densité.

Figure 2. Schéma de montage d'une caisse d'exposition

Tous les 4 mois, les échantillons sont pesés pour estimer les variations de poids, photographiés pour observer leur évolution, et le pH de surface est mesuré. Chacun des trois échantillons d'une formulation exposés (figure 3) est l'objet d'une étude particulière. Les échantillons de la première série sont destinés à l'étude des phénomènes de biodétérioration en partie supérieure des réseaux non soumise aux immersions. Ils sont très peu manipulés et la couche de détérioration qui se forme est conservée. Les échantillons de la deuxième série sont consacrés à l'étude de l'impact des zones de marnage avec la mise en solution de la couche de détérioration. À chaque échéance, les échantillons sont pesés, brossés puis rincés à l'eau du robinet, avant d'être une nouvelle fois pesés et réintroduits dans la caisse d'exposition. La troisième série d'échantillons est destinée à l'étude de la diversité microbienne. À chaque échéance, le biofilm qui se forme en surface de ces échantillons est récupéré sur un quart de la surface totale de l'éprouvette pour être analysé.

Les éprouvettes ont été fabriquées avec des manches en PVC creux permettant de recueillir l'eau de

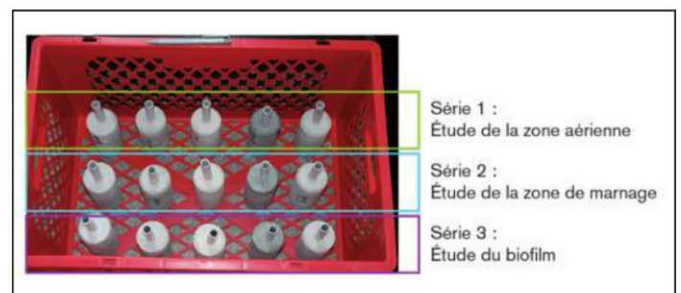


Figure 3. Répartition en série de chaque échantillon par caisse d'exposition

	Type de ciment	Ajout	Type de granulat	Référence
Échantillon 1	Portland (CEM I 52,5 N)	—	Sable Afnor	CEM I
Échantillon 2		Laitier de haut-fourneau (75 %)		CEM III
Échantillon 3	Ciment d'aluminate de calcium (Calcoat RG)	—		CAC + S
Échantillon 4		Laitier de haut-fourneau (75 %)		CAC + L
Échantillon 5		—	Alag	CAC + A

Tableau III. Descriptif des formulations cimentaires utilisées

condensation ($\approx 13 \text{ cm}^3$). Ces eaux, prélevées à différentes échéances, ont été analysées sur site en termes de pH et de contenu en adénosine triphosphate (ATP, molécule énergétique retrouvée chez l'ensemble des êtres vivants et permettant d'estimer l'activité des organismes) ainsi qu'en laboratoire par ICP (Ultima 2000 de la marque Jobin-Yvon) pour déterminer la concentration des ions aluminium en solution. Les mesures d'ATP ont été réalisées à l'aide d'un ATPmètre de marque Novalum de chez Charm Sciences associé à des écouvillons WaterGiene.

La diversité microbienne de la biomasse a été étudiée en utilisant des techniques de biologie moléculaire. La troisième série d'échantillons a été grattée à l'aide d'une brosse imprégnée d'une solution de guanidine thiocyanate (pH 7,5) pour extraire et conserver l'ADN des biofilms. Les échantillons d'ADN ont été maintenus dans ces solutions à -80°C pour le transport et le délai jusqu'à analyse. L'ADN a été extrait grâce au kit Fast DNA SPIN pour les sols (MP Biomedical) selon le protocole défini par ETTEAUER et coll. [7]. L'ADN extrait a été amplifié par *polymerase chain reaction* (PCR) selon le cycle suivant : incubation à 94°C pendant 2 min puis 25 cycles de dénaturation à 94°C pendant 30 s, 61°C pendant 30 s et 72°C pendant 30 s, puis quantifié à l'aide d'un spectromètre NanoDrop 1000.

3. Résultats et discussion

La première mesure faite pour caractériser la tenue des éprouvettes soumises à des conditions sévères de corrosion consiste à suivre l'évolution de leur masse. La figure 4 montre les données mesurées tous les 4 mois, la mesure la plus récente étant faite après plus de 33 mois (1 020 jours) d'exposition. On constate que les éprouvettes commencent toutes par augmenter en masse par simple reprise d'humidité. Ensuite, selon la nature du ciment, des produits de réaction plus ou moins abondants commencent à se former, essentiellement du gypse résultant de la réaction de l'acide sulfurique avec le calcium des hydrates du ciment.

Dans le cas des deux séries d'éprouvettes à base de ciment Portland (CEM I et CEM III) exposées à ces conditions sévères excédant la classe XA3, on constate visuellement une détérioration graduelle.

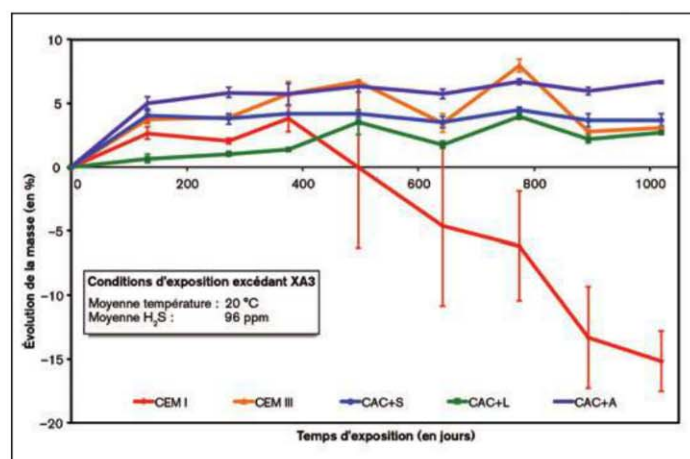


Figure 4. Évolution de la masse des éprouvettes de la série n° 1 exposées à des conditions de biocorrosion sévères pendant 1 020 jours

Pour les éprouvettes à base de CEM I, utilisées comme témoins positifs de détérioration, on constate bien être au-delà du domaine d'utilisation puisque la masse commence à diminuer après 1 an, au fur et à mesure que les produits de réaction se détachent de l'éprouvette par manque de cohésion. Dans le cas des éprouvettes à base de CEM III, qui ne devraient pas être utilisées sans protection au-delà de la classe XA3, on constate une meilleure tenue puisque la masse ne diminue pas après 1 020 jours d'exposition, même si, visuellement, on note la formation graduelle d'un important dépôt peu cohésif.

Dans le cas des éprouvettes à base de ciment d'aluminate de calcium ne contenant pas de laitier, la reprise d'humidité est plus importante et plus rapide, puis la masse reste stable avec une formation limitée de produits de réaction. Pour la série combinant du ciment d'aluminate de calcium avec 75 % de laitier, la reprise d'humidité est plus graduelle, probablement à cause d'une porosité plus fermée.

L'observation des échantillons permet aussi de constater les différences de comportement. En concordance avec les données de suivi de masse de la figure 4, l'éprouvette à base de CEM I (utilisée comme témoin positif de détérioration) montre un important dépôt de produits de réaction dont une partie s'est déjà détachée. Pour l'éprouvette à base de CEM III, la progression des dommages est moins avancée mais reste significative. Pour les trois autres éprouvettes à base d'aluminate de calcium, on observe peu de produits de réaction après 1 020 jours d'exposition,



techfina



Notre eau mérite d'être bien traitée



**Epuration des eaux usées
communales et industrielles**

Lavage et désodorisation des gaz

Traitement des boues



Traitement des déchets industriels et toxiques

Stations de pompage



Plus de 50 ans d'expérience au service de l'environnement

+ **Siège social**

8 avenue des Grandes-Communes
1213 Petit-Lancy / Genève
SUISSE
Tél. : +41 22 879 80 00
Fax : +41 22 879 80 01
info@techfina.ch

+ **Filiale France**

Immeuble WTC - Tour A - Etage 4
2 rue Augustin Fresnel - BP8202
57082 METZ Cedex 3
FRANCE
Tél. : +33 3 87 78 61 00
Fax : +33 3 87 57 82 95
techfina-france@techfina.ch

+ **Filiale Suisse alémanique**

Schützenstr. 32
8400 Winterthur
SUISSE
Tél. : +41 52 269 18 80
Fax : +41 52 269 18 88
winterthur@techfina.ch

www.techfina.ch

Le meilleur pour l'eau ...



Figure 5. Photographies de l'état du témoin positif de détérioration et d'une éprouvette de mortier montrant un bon comportement après 1020 jours d'exposition à des conditions d'exposition excédant la classe XA3

mais la présence d'importants dépôts provenant d'immersions engendrées par des élévations du niveau d'eau dans le réseau. La figure 5 illustre la différence de comportement sur site entre le témoin positif de détérioration et une éprouvette montrant un très bon comportement sur site après 1020 jours d'exposition. Ces éprouvettes ne subissent pas d'action mécanique pour enlever les produits de réaction ou les éventuels dépôts de surface.

La figure 6 compare la perte de masse en fonction du protocole utilisé pour enlever les produits de réaction peu cohésifs. Pour la série n° 1, visant à simuler le béton des parties aériennes, aucune action mécanique n'a été appliquée avant l'échéance de 1020 jours, puis

elles ont été tapotées avec un marteau à cette même échéance. Cette mesure des pertes de masse met en évidence que les éprouvettes à base de CEM III montrent une meilleure tenue que celle à base de CEM I. Pour les éprouvettes à base d'aluminat de calcium, la perte de masse mesurée avec ce premier protocole est nulle parce que le peu de produits de réaction observés reste cohésif. Pour la série n° 2, visant à simuler la zone de marnage dans un réseau d'assainissement, les produits de réaction étaient brossés tous les 4 mois en utilisant de l'eau du robinet pour rincer les éprouvettes. On constate que le protocole de grattage influence les résultats mesurés puisque, dans ce cas, on mesure une petite perte de masse pour les éprouvettes à base d'aluminat de calcium. On constate également que la perte de masse pour les éprouvettes à base de ciment Portland est similaire avec ce deuxième protocole. Une hypothèse pour expliquer la différence entre les deux protocoles serait que le brossage avec rinçage à l'eau claire tous les 4 mois conduit à enlever tout ou une partie du biofilm de micro-organismes, qui doivent alors « re-coloniser » la surface, réduisant ainsi la sévérité de la biodétérioration.

Une autre observation quantitative de l'étude consiste à mesurer le pH à la surface des échantillons. La figure 7 montre les valeurs de pH relevées sur la face supérieure des échantillons. Cette partie présente généralement le plus de dégradation, car c'est une zone de rétention d'humidité, élément nécessaire au développement microbien. Sur cette figure, on constate qu'il y a peu de différence de pH entre les

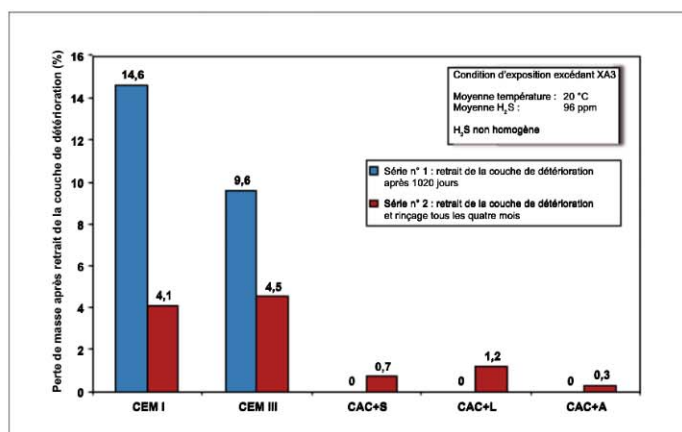


Figure 6. Pourcentage massique des produits de dégradation en fonction du protocole de brossage après 1020 jours d'exposition à des conditions sévères

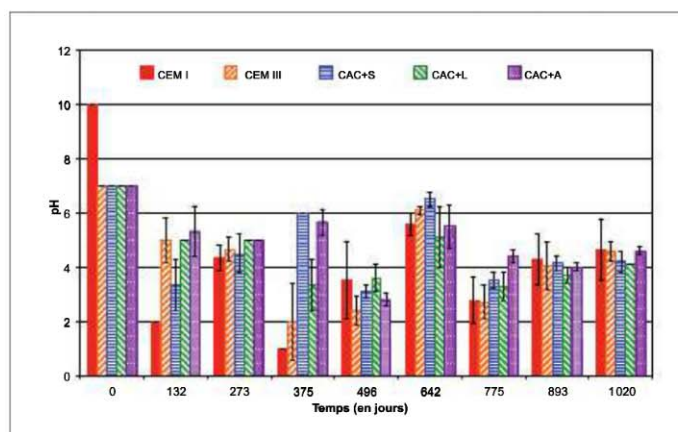


Figure 7. Évolution du pH moyen de surface de la face supérieure des échantillons (moyenne sur trois échantillons, barres d'erreur : écart type)

différentes formulations cimentaires – pH majoritairement inférieurs à 4 après 375 jours d'exposition – et que les variations de pH entre les différentes échéances semblent suivre la même tendance. Ces données ne permettent donc pas d'expliquer les différences de comportement des différentes formulations puisque les pH sont similaires alors que la résistance à la biocorrosion est nettement différenciée.

Pour expliquer les différences de comportement entre les différentes formulations cimentaires, il faut regarder du côté des paramètres microbiologiques. Les analyses effectuées sur les eaux de condensation récupérées dans les manches des échantillons mettent en évidence que seuls les mortiers à base de ciments CEM I et CEM III présentent une quantité d'ATP indiquant la présence de micro-organismes actifs. Les échantillons à base de ciment d'aluminate de calcium ont tous une quantité d'ATP nulle laissant penser que ce ciment inhibe l'activité microbienne. La comparaison entre la concentration totale en aluminium dissous et le niveau d'ATP (figure 8) montre que cet élément a un rôle inhibiteur dans l'activité des micro-organismes à partir d'environ 350 mg/L. Très peu de données sont disponibles dans la littérature sur l'impact de l'aluminium sur les micro-organismes. Néanmoins, EHRICH [8] a montré que l'ion Al^{3+} diminue l'activité bactérienne et a obtenu des valeurs du même ordre de grandeur que celles de cette étude.

L'étude de la colonisation microbienne par la mesure de la quantité d'ADN total présent sur les échantillons (tableau IV) indique que les matériaux cimentaires à base de ciment Portland, et plus particulièrement le CEM I, sont généralement plus bioréceptifs que ceux à base de ciment d'aluminate de calcium. La quantité d'ADN total extrait à la surface des échantillons varie également d'une échéance à l'autre en fonction de la

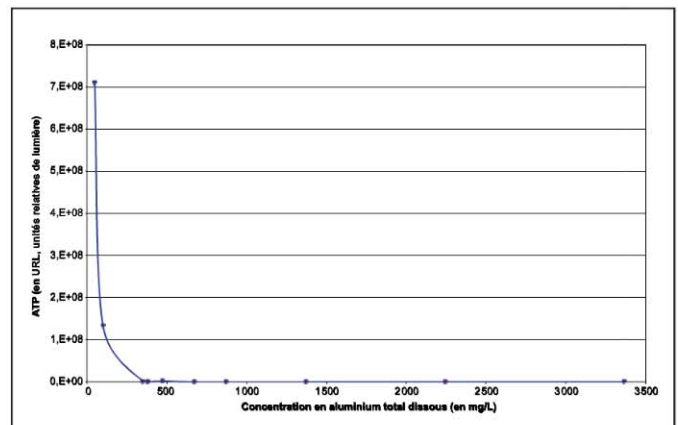


Figure 8. Mesure d'ATP dans l'eau des manches des échantillons en fonction de la concentration totale en aluminium

vie du réseau (lessivage lors de crues, assèchement des surfaces...). Ces déterminations mettent en évidence que plus un matériau est riche en aluminium, et dans la mesure où il peut être solubilisé, et moins il est colonisé par des micro-organismes. La teneur en aluminium croît dans l'ordre suivant : CEM I < CEM III < CAC+L < CAC+S < CAC+A. La chimie de surface des différents mortiers va fortement influencer leur bioréceptivité.

Conclusion

Les recommandations actuelles de la norme FD P18-011 préconisent de protéger le béton lorsque les conditions d'exposition chimique excèdent les seuils maximaux de la classe XA3. Dans le cas des ouvrages d'assainissement soumis à la biocorrosion due à l' H_2S , une solution possible est d'appliquer un revêtement organique, mais vu les conditions d'humidité typique d'un réseau d'assainissement, l'emploi d'une solution minérale hydraulique peut être spécialement bien adapté, si tant est que la durabilité de cette solution soit satisfaisante dans des conditions rudes de biodétérioration. Dans le cadre de la présente étude,

		CEM I	CEM III	CAC+S	CAC+L	CAC+A
T0	Témoïn	0,8	3,2	0,5	13,2	14,9
132 jours	S2	154,5	106,8	47,8	46,7	34,2
273 jours	S2	1,3	Non déterminé	3,1	Non déterminé	Non déterminé
375 jours	S2	70,6	Non déterminé	8,1	Non déterminé	3,6
496 jours	S2	16,9	Non déterminé	3,8	Non déterminé	2,4

Tableau IV. Quantité d'ADN total (en ng/cm² de matériau) extrait à la surface des échantillons

différentes formulations cimentaires ont été exposées *in situ* à des conditions sévères d'exposition – excédant la classe XA3 – et donc au-delà de leur domaine d'utilisation recommandé. Les résultats montrent, après près de 3 ans de suivi :

1°) Que la tenue à la biocorrosion en présence d'H₂S des formulations cimentaires varie sur une large plage (en fonction de la chimie du ciment) et que, même au-delà de la classe XA3, il est possible d'obtenir une bonne durabilité avec une formulation cimentaire à base d'aluminate de calcium.

2°) Que les mesures de pH de surface ne permettent pas d'expliquer les différences de comportement des différentes formulations, compte tenu des tendances identiques et des pH de surface majoritairement inférieurs à 4 après 1 an d'exposition.

3°) Que la libération d'aluminium a un rôle inhibiteur de l'activité des micro-organismes à partir d'environ 350 mg/L, tel que l'illustre le dosage d'ATP sur le liquide au contact des échantillons.

4°) Que le rôle de l'aluminium sur la bioréceptivité des surfaces se vérifie également par les mesures de la quantité d'ADN total extrait à la surface des échantillons.

Globalement, cette étude permet de constater qu'une matrice cimentaire de composition adaptée peut montrer un très bon comportement en réseau d'assainissement, même dans un environnement dont la sévérité excède la limite supérieure définie par la classe XA3 de la norme FD P18-011. Lorsque les conditions d'exposition dépassent ce seuil et qu'il est recommandé de mettre en place un revêtement,

ce revêtement pourrait donc être constitué d'un matériau cimentaire avec une composition adaptée. En outre, il serait pertinent de considérer une évolution des recommandations relatives aux types de matériaux proposés pour la construction, la réparation ou la protection des infrastructures d'assainissement exposées à des environnements dépassant la forte agressivité chimique définie par la classe XA3. En parallèle des résultats *in situ* rapportés ici (mesures qui devraient se poursuivre sur plusieurs années), d'autres essais réalisés en laboratoire [9] ont permis de mieux explorer les différents mécanismes de biodétérioration des matériaux cimentaires [10-12]. La modélisation de ces mécanismes a également été abordée par l'Ifsttar [13-14].

Finalement, un essai normalisé de corrosion biogénique en présence d'H₂S est en cours de définition [15] pour apporter un outil opérationnel afin de mieux sélectionner les matériaux de construction adaptés aux ouvrages d'assainissement.

Remerciements

Les auteurs remercient Kerneos (MM. C. Eychenne-Baron et P. Tacquet) pour son soutien financier, la fourniture des matériaux et la réalisation des échantillons de mortier ainsi que le SIBA (Mme S. Jeandenand) pour la mise à disposition du réseau d'assainissement. Ils remercient également Veolia Eau (MM. J.M. Radenac et V. Parez) et la Sabarc (MM. P. Claval, A. Charlet et L. Mounède) pour les mesures des conditions environnementales dans les sites d'études et leur participation active à l'organisation des essais.

Bibliographie

[1] DRAULT-PEZARD C. [2012] : « Réseaux d'assainissement : bien diagnostiquer pour mieux réhabiliter ». *L'eau, l'industrie, les nuisances* ; 353 : 29-39.

[2] CSTB-AGHTM (1989) : « Réhabilitation des réseaux d'assainissement ». Synthèse des résultats de l'enquête menée en 1989, Commission « Assainissement » de l'AGHTM, Groupe de travail « Réhabilitation », 7 p., octobre 1989.

[3] NF EN 206-1 (2005) : « Béton – Partie 1 : spécification, performances, production et conformité ».

[4] FD P 18-011 (2009) : « Béton – Définition et classification des environnements chimiquement agressifs – Recommandations pour la formulation des bétons ».

[5] « Vieillesse et maintenance des réseaux et structures d'assainissement soumis à des processus bio-physico-chimiques », Projet de recherche Ifsttar, 2010-2013.

[6] GOYNS A. [2001] : « Calcium aluminate cement linings for cost-effective sewers », *Proceedings of the International Conference on Calcium Aluminate Cements (CAC)*, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, 16-19 July 2001, p. 617-31.

[7] ETTENAUER J.D., PIÑAR G., LOPANDIC K., SPANGL B., ELLERSDORFER G., VOITL C., STERFLINGER K. [2012] : « Microbes on building materials – Evaluation of DNA extraction protocols as common basis for molecular analysis ». *Science of the Total Environment* ; 439 : 44-53.

- [8] EHRICH S. (1998) : *Untersuchungen zur biogenen Schwefelsäurekorrosion von zementgebundenen Baustoffen* [thèse]. Université d'Hambourg [Allemagne].
- [9] Herisson J. (2012) : *Biodétérioration des matériaux cimentaires dans les ouvrages d'assainissement – Étude comparative du ciment d'aluminate de calcium et du ciment Portland* [thèse]. Université Paris-Est, 280 p.
- [10] HERISSON J., VAN HULLEBUSCH E.D., MOLETTA-DENAT M., TAQUET P., CHAUSSADENT T. (2013) : « Toward an accelerated biodeterioration test to understand the behavior of Portland and calcium aluminate cementitious materials in sewer networks ». *International Biodeterioration and Biodegradation* ; 84 : 236-43.
- [11] HERISSON J., GUÉGUEN-MINERBE M., VAN HULLEBUSCH E.D., CHAUSSADENT T. (2014) : « Behaviour of different cementitious material formulations in sewer networks ». *Water Science and Technology* ; 69 : 1502-8.
- [12] HERISSON J., VAN HULLEBUSCH E.D., GUÉGUEN-MINERBE M., CHAUSSADENT T. (2014) : « Biogenic corrosion mechanism: study of parameters explaining calcium aluminate cement durability ». In : Fentiman

C.H., Mangabhai R.J., Scrivener K.L., eds. *Calcium aluminate: Proceedings of the International Conference*, Avignon, 18-21 May 2014, pp. 633-44. IHS BRE Press, 2014, EP104. ISBN 978-1-84806-316-7.

[13] YUAN H., DANGLA P., CHATELLIER P., CHAUSSADENT T. (2013) : « Degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack ». *Cement and Concrete Research* ; 53 : 267-77.

[14] YUAN H., DANGLA P., CHATELLIER P., CHAUSSADENT T. (2015) : « Degradation modelling of concrete submitted to biogenic acid attack ». *Cement and Concrete Research* ; 70 : 29-38.

[15] HERISSON J., GUÉGUEN-MINERBE M., VAN HULLEBUSCH E.D., CHAUSSADENT T. (2014) : « Development of a reproducible, representative and accelerated biogenic corrosion test to deliver durable structures in sewer networks ». In : Fentiman C.H., Mangabhai R.J., Scrivener K.L., eds. *Calcium aluminate: Proceedings of the International Conference*, Avignon, 18-21 May 2014, pp. 645-57. IHS BRE Press, 2014, EP104. ISBN 978-1-84806-316-7.

Résumé

J. HERISSON, M. GUÉGUEN-MINERBE, É. VAN HULLEBUSCH, F. SAUCIER, V. BOURGIER, T. CHAUSSADENT

Conditions sévères de biocorrosion en réseau d'assainissement : résistance de différents matériaux cimentaires

Les recommandations actuelles de la norme FD P18-011 préconisent de protéger le béton lorsque les conditions d'exposition chimique excèdent certains seuils. Dans le cas des ouvrages d'assainissement soumis à la biocorrosion initiée par la présence d'H₂S, cette norme préconise l'application de revêtement pour protéger le béton lorsque les seuils maximaux sont dépassés. Si le terme « revêtement » évoque généralement un produit polymère, la présente étude porte uniquement sur différentes formulations cimentaires qui ont été exposées *in situ* dans des conditions sévères et caractérisées tous les 4 mois. Ces solutions minérales ont l'avantage d'être totalement adaptées

aux environnements humides, d'étanchéifier et, suivant l'épaisseur appliquée, de retrouver une intégrité structurale. Après près de 3 ans d'exposition, les formulations cimentaires à base d'aluminates de calcium montrent une très bonne tenue à la biocorrosion malgré des pH de surface se maintenant entre 2 et 4. Le bon comportement de ces formulations a pu être corrélé avec la présence d'aluminium qui inhibe l'activité bactérienne. Ces résultats suggèrent que les « revêtements » utilisés pour protéger les matériaux cimentaires dans les zones à très fortes teneurs en H₂S pourraient être réalisés avec des solutions cimentaires adaptées.

Abstract

J. HERISSON, M. GUÉGUEN-MINERBE, É. VAN HULLEBUSCH, F. SAUCIER, V. BOURGIER, T. CHAUSSADENT

Severe biocorrosion in sewers: resistance of different cementitious products

According to the FD P18-011 standard, it is recommended to protect concrete when the exposure conditions to chemicals exceed specific thresholds. For wastewater infrastructures exposed to biocorrosion initiated by the presence of H₂S, this standard recommends the application of a coating to protect the concrete when maximum thresholds are exceeded. While the term "coating" is often understood as polymer, this study is limited to various cementitious materials that have been exposed *in situ* in severe conditions; they have been characterized every four months for nearly three years. These mineral solutions have the

advantage to be fully suitable for wet environments, to block infiltrations and depending on the applied thickness to restore structural integrity. It appears from this study that specimens based on calcium aluminate are showing a good resistance to biocorrosion despite surfacial pH ranging from 2 to 4. The good behavior of these specimens has been correlated with the presence of aluminum which inhibits bacterial activity. These results suggest that "coatings" used to protect cementitious materials in areas with high H₂S concentration can be performed with appropriate cementitious solutions.

SEWPERCOAT®

Attaques H₂S ?

À la recherche d'une solution pour vos ouvrages d'assainissement ?



Solution éprouvée depuis plus de 20 ans,
le mortier SewperCoat® est votre solution

100

www.sewpercoat.com



Kerneos SA : Immeuble Pacific - 11 Cours Valmy
Paris La Défense - 92800 Puteaux

 **kerneos**
ALUMINATE TECHNOLOGIES



AQUA UV

AQUALABO

CONTRÔLE

GAMME AQUALYSE

Des solutions fiables et simples à installer
pour **vos mesures de débit en canal ouvert**



AQUA BAC



AQUA VENTURI

www.aqualabo.fr

90, rue du Professeur Paul Milliez • 94500 Champigny-sur-Marne • FRANCE • Tél : +33 (0)1 72 87 97 90 • Fax : +33 (0)1 85 09 03 52



AQUALYSE
GRUPPO AQUALABO









Débitmètres Ultrason

pour conduites forcées et canaux ouverts



Rittmeyer SAS
69780 Saint Pierre De Chandieu
T 04-78-40-94-57
lyon@rittmeier.com www.rittmeier.com



rittmeier
BRUGG