

# PÉRENNISATION DES OUVRAGES EN GÉNIE CIVIL : DIAGNOSTIC ET INSPECTION DES BÉTONS D'ÉGOUTS

---

**Mehena OUALIT<sup>1</sup>, Med Tahar ABADLIA<sup>1</sup>, Raoul JAUBERTHIE<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Unité de Recherche Matériaux, Procédés et Environnement (URMPE), cité Frantz Fanon, 35000, Boumerdès, Algérie.  
oualitmehenna@hotmail.com, abadlia\_tahar@yahoo.fr

<sup>2</sup>Laboratoire de Génie Civil Génie Mécanique (Matériaux), (LGCGM) - INSA de Rennes, France.  
raoul.jaubertie@insa-rennes.fr

---

## 1. INTRODUCTION

L'état des systèmes d'infrastructure urbains est devenu une préoccupation majeure dans le monde entier en raison du coût de maintenances et d'entretien. La durabilité des réseaux d'assainissement est d'une importance majeure, où la défaillance peut conduire à des problèmes de santé et peut provoquer des dommages importants.

Le béton est le matériau de construction le plus largement utilisé pour les structures d'égout. Toutefois, l'environnement dans certaines structures d'égout peut devenir très acide due à la formation de l'acide sulfurique  $H_2SO_4$  converti à partir du sulfure d'hydrogène  $H_2S$  par l'action des bactéries. Des détériorations significatives du béton dans de pareils environnements ont été rapportées à travers le monde, à titre d'exemple, au Japon (T. Mori et al 1992), pays arabes du Golfe (H. Saricimen et M. Maslehuddin 1987), Allemagne (W. Sand et E. Bock), l'Afrique du Sud (J.L. Barnard).

Par ailleurs, La détérioration d'un système d'égout peut entraîner de graves problèmes tels que la perte de capacité de transport d'assainissement, contamination des sols et des eaux souterraines, des tassements du sol ainsi que des effondrements.

Des coûts très élevés sont impliqués dans la réparation de la détérioration des structures d'égout. Aux Etats-Unis, l'attaque à l'acide sulfurique est responsable de milliards de dollars de dommages aux conduites en béton des eaux usées et les systèmes de traitement (M.S. McGovern 1999). Dans l'état Australie du Sud à lui seul, un budget prévisionnel pour l'entretien des infrastructures des eaux usées existante est de 48 millions de dollars par an (W.F. Stewart 1999).

A l'état de Los Angeles, environ 10% des canalisations d'égouts sont soumises à une importante corrosion, et les coûts pour la réhabilitation de ces conduites sont à peu près estimé à 400 million € (Sydney et al. 1996). La restauration de l'ensemble des systèmes d'égouts endommagés en

Allemagne est estimée à environ 100 millions de dollars par an (Kaempfer et Berndt, 1998).

En collaboration avec la ville de Rennes et dans le cadre du management intégré des réseaux d'assainissement, des outils de gestion patrimoniale des réseaux, de suivi de leur fonctionnement et d'aide à la décision en matière d'entretien, de réhabilitation ou de renouvellement sont développés. Ces outils permettront à terme d'évaluer les performances des réseaux par types et, par exemple, de juger l'aptitude à l'emploi des produits en fonction des matériaux constitutifs des canalisations.

Ces outils sont basés généralement sur le recensement d'informations factuelles (caractéristiques réseaux, performances constatées, défauts identifiés, incidents...). Toutefois, le choix de certaines données dépend de la nature des produits et de leur comportement supposé (par exemple : fissuration, érosion, attaque de paroi...).

Ces outils ayant une fonction d'aide à la décision en matière de gestion patrimoniale, ils intègrent des modèles de dégradations (causes possibles pour une observation donnée, évolution possible dans le temps), qui prennent en compte, lorsque c'est pertinent, la nature des produits et notamment des tuyaux.

Cependant, l'objet de cette étude qui a été réalisée au laboratoire de génie civil, génie mécanique (LGCGM) de l'INSA de Rennes est uniquement consacré à l'échelle de matériau constitutif (béton) et nous ciblons sur des pathologies d'ordre chimique et d'abrasion dans le but d'identifier l'état et les facteurs responsables de la dégradation et de mettre en évidence les désordres du réseau d'assainissement à base cimentaire de la conduite de la rue « *BINQUENAIS* ». Cela afin de juger l'intensité de l'endommagement de la face interne et externe et formuler des recommandations vis-à-vis des futures inspections et d'analyser les modèles d'évaluation de ce tronçon et les processus identifiés de perte de performance appliqués aux tuyaux en béton.

## 2. ANALYSE MACROSCOPIQUE DES CONDUITES

### 2.1. Radier

On distingue sur la surface interne (Figure 1. a) un dépôt de matières organiques tout au long du radier avec des trous considérables due probablement à une mauvaise vibration du béton, alors que la surface externe (Figure 1. b) est plus ou moins rugueuse avec des pores visibles suite éventuellement au rapport E/C élevé. L'épaisseur de cette zone est estimée environ à 42,5mm avec des granulats de type siliceux.

### 2.2. Medium et le toit

Ces deux zones sont caractérisées par une grande érosion interne beaucoup plus intense en medium (Figure 1. a) avec une apparition flagrante des graviers, une pâte cimentaire complètement détériorée, emportée par le fluide. L'épaisseur est non homogène avec une épaisseur minimale au niveau de medium de 31,3mm et maximale avoisinant les 36 mm. L'épaisseur maximale du toit est de 39,8 mm.

## 3. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

Pour cette étude, on a adopté le même Protocole expérimental que celui de (Melingue et al 2009).

Le carottage des échantillons a été réalisé suivant les trois directions, longitudinale (L), transversale (T) et radiale (R), comme le montre la figure 2 et dans les trois zones : radier, medium et le toit comme s'est illustré dans la figure 3.



Figure 1. Vue globale des conduites avant le carottage

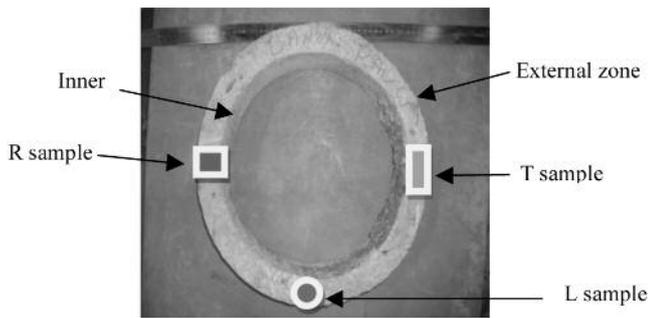


Figure 2. Les trois directions de découpage des échantillons.

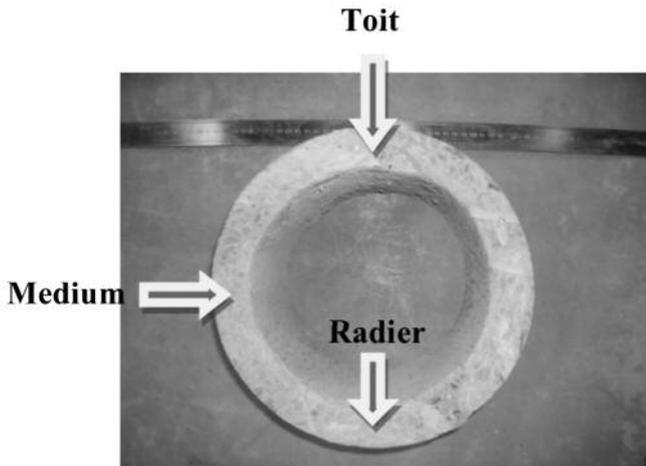


Figure 3. Les trois zones de découpage des éprouvettes (Radier, medium et le toit).

Ce choix nous permettra de mettre en évidence la dégradation causée par le milieu extérieur (sol), la dégradation due au fluide (effluents) et l'altération de la composition du béton lié aux granulats ainsi que la passivation des armatures ainsi que la profondeur des pathologies.

Les éprouvettes obtenues possèdent un diamètre  $\varnothing = 28$  mm et un élanement  $h = 1,5$ .  $\varnothing = 42$  mm, exception faite pour les éprouvettes découpées en position radiales (on est limité par l'épaisseur de la conduite). Les éprouvettes sont ensuite conservées dans une salle sèche avec une température de 25°C et 50% d'humidité jusqu'à l'obtention d'une masse constante avant d'entamer les différents essais de caractérisation.

## 4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

### 4.1. Caractérisation physique

#### 4.1.1. Masse volumique apparente

Le tableau 1 présente les résultats des valeurs moyennes de la masse volumique apparentes des éprouvettes carottées

Conduite	Zone	Echantillon R	Echantillon L	Echantillon T
Rue Biquenais	Radier	2170	2185	2172
	Mi-hauteur	2095	2096	2193
	Toit	2056	2124	2186

Tableau 1. Valeurs moyennes de la masse volumique apparente en (Kg/m<sup>3</sup>).

dans les trois zones de la conduite (radier, medium et toit) et suivant la direction radiale (R), longitudinale (L) et transversale (T).

On remarque d'après ces résultats que les éprouvettes carottées dans la direction radiale de la conduites (face interne et externe incluses) notamment en medium et en toit présentent les plus faibles valeurs de masse volumique à cause de l'endommagement chimique et l'abrasion causé sur les deux faces exception faite aux échantillons du radier ce qui signifie que ce dernier n'a pas subit d'altération importante.

On note également que l'échantillon longitudinal du medium possède une valeur faible ce qui nous laisse supposer que l'altération a pris de l'ampleur en profondeur en cette zone (marnage).

D'une façon globale, ces masses volumiques sont faible par rapport même aux bétons ordinaires ce qui signifie que le béton est poreux et non compact.

#### 4.1.2. Absorption d'eau par capillarité

Les échantillons sont pesés après séchage à 50 °C pendant deux jours, puis placés dans l'enceinte de mesure (figure 4).

Les éprouvettes sont immergées dans l'eau du récipient sur une hauteur max de 3 mm à l'aide d'un lit de sable fin et un papier filtre. A chaque échéance, les éprouvettes sont sorties de récipient, essuyées à l'aide d'une éponge humide, pesées, puis replacées dans le récipient.

Les échéances sont les suivantes : 1 heures, 2 heures, 3 heures, 6 heures, 9 heures et 24 heures...etc. L'essai doit être terminé après stabilisation de la masse.



Figure 4. Dispositif d'essai d'absorption capillaire.

Les résultats obtenus (évolution de la masse en fonction du temps) sont présentés dans la Figure 5.

Il est utile de signaler que c'est les valeurs moyennes sur trois échantillons (R, L et T) de chaque zone (radier, medium et le toit).

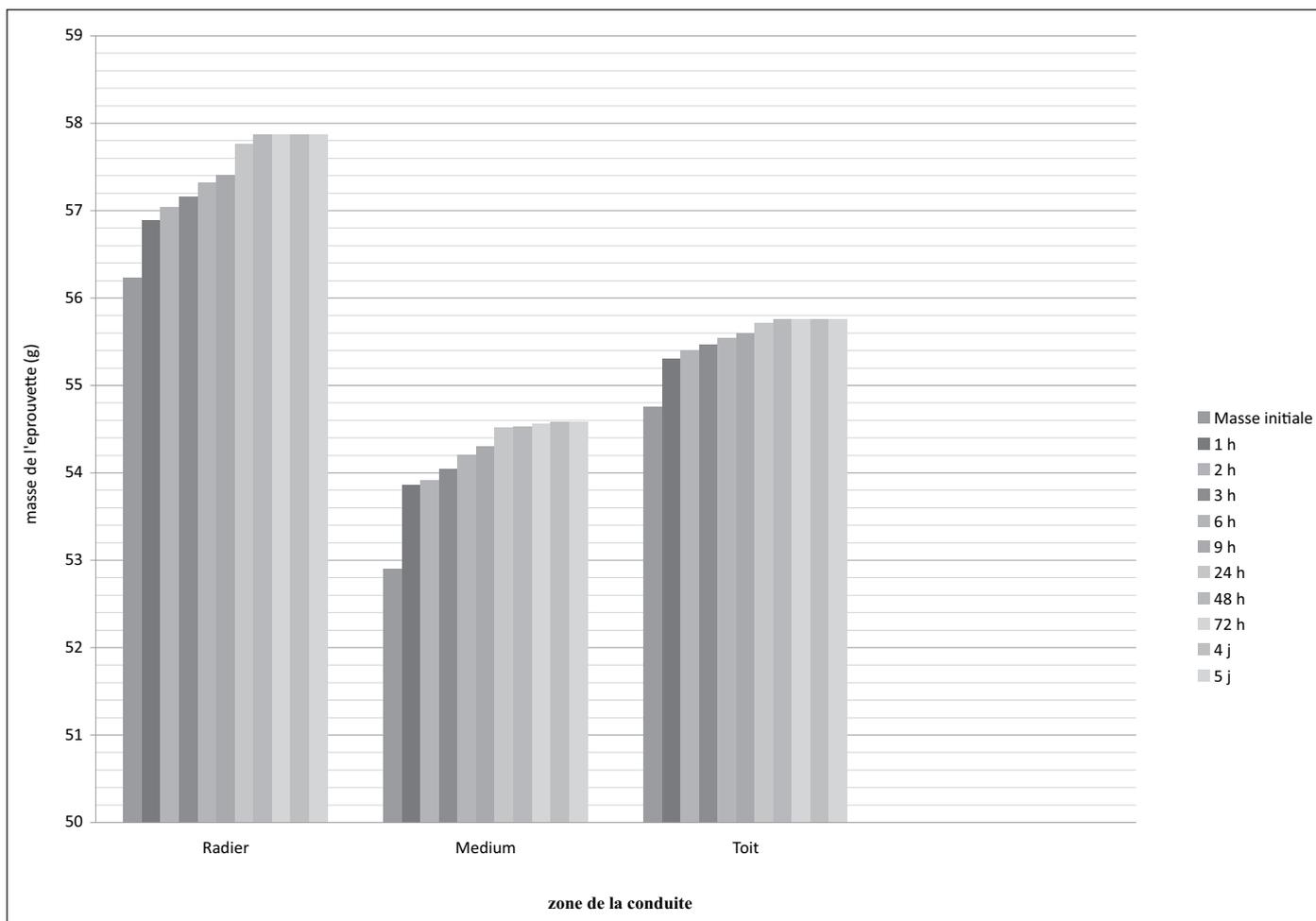


Figure 5. Évolution de l'absorption capillaire dans les différentes zones de la conduite.

Les cinétiques d'absorption sont présentées par les variations de la quantité d'eau absorbée par unité de surface. La Figure 5 montre un exemple de cinétique d'absorption d'eau. La pente décroissante indique qu'au fur et à mesure de l'essai, ce sont des capillaires de plus en plus fins qui sont concernés par le processus d'absorption d'eau. Deux paramètres peuvent être dégagés.

La première partie des courbes, curviligne, située entre 0 et 1 h, traduit le remplissage des plus gros pores. On peut caractériser ces plus gros pores à partir de l'absorption initiale, quantité d'eau absorbée entre 0 et 1 h, suivant ce qui a été avancé dans la théorie.

La deuxième partie des courbes, d'allure plus linéaire, représente le remplissage des capillaires les plus fins. Un facteur représentatif de cette deuxième partie est la pente de la droite par exemple entre 1 et 24 h. Cette pente est nommée 'absorptivité' en référence aux travaux de (Hall, C 1989).

Pour la caractérisation de la durabilité, l'élément prédominant reste bien entendu l'absorption initiale représentative des plus gros capillaires.

D'après la figure 5, on remarque que l'absorption initiale (entre 0 et 1h) est plus importante au niveau de la zone de marnage de la conduite ce qui veut dire que cette partie est plus poreuse et plus altérée et moins compacte. Ces résultats confirment les résultats précédents de la masse volumique apparente avec une compatibilité parfaite.

## 4.2. Caractérisation mécanique

### 4.2.1. Contrainte limite en compression

Les essais de compression ont été effectués à l'aide de la machine INSTRON 4507 avec une vitesse de 0,5 mm/min. Les résultats obtenus (tableau 2) sont entachés d'une erreur relativement importante car le diamètre des éprouvettes est faible par rapport à la taille des graviers et la longueur est limitée par l'épaisseur de la conduite.

Par ailleurs, une correction de la résistance a été effectuée suivant le rapport hauteur/diamètre selon la norme ASTM C42-90.

Hauteur/diamètre = 1,5 coefficient de correction est de 0,96

D'après ces résultats, on distingue que les éprouvettes prélevées dans le sens radial (R) dans les zones medium et le toit ont subi respectivement une dégradation plus importante par rapport à leur homologue du radier, cela peut s'expliquer par l'action combinée (humidification/séchage) au niveau de la zone de marnage vu le degré de remplissage journalier variable en effluents de la conduite ce qui amplifie l'abrasion au niveau de cette zone précise.

Par ailleurs, on remarque que les échantillons longitudinaux (L) possèdent une contrainte limite à la rupture légèrement plus faible par rapport aux échantillons transversaux (T) à cause de la surface de contacts moins

Zone	Direction	Charge max (KN)	Contrainte max corrigée (MPa)	Moyenne (MPa)	Energie de rupture(J)
<b>Radier</b>	Echantillon R	13,91	21,68	19,14	11,231
	Echantillon L	10,29	16,04		7,640
	Echantillon T	12,65	19,72		9,684
<b>Medium</b>	Echantillon R	6,52	10,06	17,73	5,371
	Echantillon L	12,22	19,05		8,260
	Echantillon T	15,46	24,10		12,408
<b>Toit</b>	Echantillon R	7,07	10,91	19,2	8,005
	Echantillon L	9,67	15,08		8,149
	Echantillon T	20,49	31,61		14,956

**Tableau 2. Valeurs moyennes des contraintes limites en compression en (MPa).**

importante de ces derniers vis-à-vis de la surface interne du conduit trop endommagé.

D'une façon générale, ces résultats présentent une anisotropie remarquable de la dégradation interne (due aux effluents) suivant les différentes zones avec une intensité au niveau de la zone de marnage (D/2) de la conduite.

#### 4.2.2. Traction indirecte (essai brésilien)

L'essai brésilien permet d'estimer la résistance à la traction directe du béton sans avoir recours au système de chargement compliqué que nécessite l'essai de traction directe.

L'essai consiste à appliquer une charge de compression centrée selon deux génératrices de l'éprouvette. Les contraintes induites provoquent la rupture suivant un plan diamétral de l'éprouvette.

Le tableau 3 donne les valeurs trouvées pour chaque zone d'échantillon ainsi que la direction correspondante dont laquelle est prélevé.

On remarque que la résistance à la traction indirecte présente des valeurs trop faible. Ici l'effet des extrémités est exclu ce qui nous laisse supposer que la contrainte limite moyenne obtenue représente juste le cœur de conduite. Ces résultats ne montrent pas une grande anisotropie par rapport à la direction ou la zone de prélèvement.

## 5. MISE EN ÉVIDENCE DE L'ENDOMMAGEMENT PAR PHÉNOLPHTALÉINE

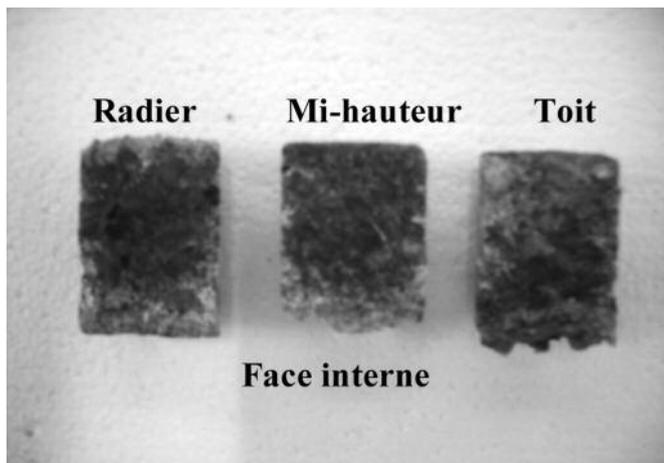
Après avoir subi la traction par fendage, et pour illustrer l'ampleur et l'anisotropie de l'endommagement, on a appliqué de la phénolphtaléine sur les demi-morceaux des échantillons radiaux des trois zones (radier, medium et toit). Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 6 et présentés en chiffres dans le tableau 4.

Zone	Direction	Contrainte (MPa)	Valeurs Moy (MPa)
<b>Radier</b>	Echantillon R	3,58	2,91
	Echantillon L	2,06	
	Echantillon T	3,10	
<b>Medium</b>	Echantillon R	2,68	3,12
	Echantillon L	2,25	
	Echantillon T	4,44	
<b>Toit</b>	Echantillon R	2,78	2,5
	Echantillon L	2,12	
	Echantillon T	2,62	

**Tableau 3. Valeurs des essais en traction indirecte (essai brésilien).**

	Epaisseur initiale (mm)	Epaisseur actuelle (mm)	Face interne Ep en (mm) à pH < 11	Face externe Ep en (mm) à pH < 11	Erosion (%)	Epaisseur Endommagée (%)
<b>Radier</b>	41	41	5	3	00	19,51
<b>Medium</b>	41	38,1	9	5	7,07	41,21
<b>Toit</b>	41	39,6	7	6,5	3,41	36,33

**Tableau 4. Taux d'endommagement et valeurs des épaisseurs à pH réduit.**



**Figure 6. Evolution du pH des échantillons radiaux dans les trois zones: Radier, medium et le Toit.**

D'après la photographie ainsi que le tableau 4, on remarque une différence remarquable et notable de la diminution de niveau de pH entre la partie interne et externe ainsi que depuis le radier vers le toit de la conduite.

Les résultats montrent une altération superficielle (perte de matière) et endommagement intense en face interne maximum en zone de marnage de la conduite (D/2). Ainsi, ces résultats montrent logiquement que le couplage des deux effets, chimique et érosif, s'organise différemment sur le pourtour de la conduite, la contribution de ces deux effets atteints son paroxysme en mi-hauteur à cause des cycles émergence/immersion.

La dégradation interne peut être attribuée à la production du sulfure d'hydrogène  $H_2S$ , (Parker 1945). Ce dernier se combine en présence d'humidité sur les surfaces non-immersées de la conduite, est biologiquement oxydé en acide sulfurique  $H_2SO_4$ .

Progressivement les espèces résistantes à l'acide, des bactéries aérobies vont successivement coloniser les surfaces supplémentaires dont l'acide sulfurique est produit et le pH diminue. Par conséquent, les nouveaux bétons ont un pH de surface alcalin d'environ 6, ce qui va engendrer la corrosion (pH de 1 à 3) ce qui confirme les résultats de la phénolphthaléine (Figure 6).

Au niveau du toit, l'attaque est souvent sous forme gazeuse et le remplissage total (section pleine) de la conduite peut expliquer l'érosion de la pâte cimentaire (apparition des granulats).

En revanche, le pH réduit de coté extérieur est attribué à la carbonatation notamment dans le haut de la conduite ou bien à la présence de sulfates contenus dans le sol support. D'une façon globale, ces résultats nous montrent l'anisotropie des dégradations suivant la zone de la conduite avec une intensité en zone de marnage ce qui est compatible avec les résultats précédents.

## 6. CONCLUSION

Cette étude nous a permis de mettre en évidence l'état de la dégradation interne et externe ainsi que l'anisotropie de la détérioration de la conduite en béton du tronçon de la rue « Biquenais » de la ville de Rennes.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure les conclusions et les recommandations suivantes :

Le béton employé dans ce tronçon a des caractéristiques physiques et mécaniques très médiocres, ce qui a facilité la pénétration des agents agressifs à l'intérieur de matériaux ce qui va compromettre la durée de vie de ce réseau, cela est due éventuellement à la mauvaise formulation du béton avec un rapport E/C élevé.

Une forte altération ainsi qu'un endommagement important sur la face interne de la conduite qui s'intensifie en zone de marnage (mi-hauteur).

Le radier et la zone la moins touchée par la dégradation sur l'ensemble de la conduite que ce soit de l'intérieur ou de l'extérieur ce qui met en évidence l'anisotropie des dégradations dans ce type d'ouvrage.

Le contact avec le milieu extérieur, s'est traduit par une carbonatation vu la faible compacité de béton. Celle-ci a pu se propager vers l'intérieur du béton ce qui explique la diminution de pH de la face externe surtout au niveau du toit.

Cette étude devrait être complétée par une étude microscopique (DRX MEB...etc) pour détecter les nouvelles formations (ettringite) ainsi qu'une analyse de sol support et d'expliquer vraisemblablement les pertes de matières constatées notamment au niveau de la face interne.

Comme recommandation, Vu l'état de la conduite et l'intensité de la détérioration ainsi que la qualité actuelle du béton, on suggère une réhabilitation ou bien un renforcement immédiat qui rentre dans un cadre préventif.

Ces outils permettront à terme d'évaluer les performances de réseaux par types et, par exemple, de juger l'aptitude à l'emploi des produits en fonction des matériaux constitutifs des canalisations.

## 7. RÉFÉRENCES

- Barnard JL., Corrosion of sewers, Council for Scientific and Industrial Research (CSIR) Research Report 250, South Africa, 1967.
- Chaker, (Ed.), *Corrosion Forms and Control for Infrastructure, ASTM STP 1137, American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 1992, pp. 273–283.
- Cochet C., Derangere D., *La dégradation du béton dans les ouvrages d'assainissement en présence d'hydrogène sulfuré*, Cahiers du CSTB, cahier 2382, 1990.
- Hall C., *Materials and Structures*, 27,291-306, 1994.
- Kaempfer W., Berndt M., 1998. *Polymer modified mortar with high resistance to acid to corrosion by biogenic sulfuric acid*. In: Proceedings of the IXth ICPIC Congress, Bologna, Italy, pp. 681–687.
- Kelly DP., Wood AP., Reclassification of some species of Thiobacillus to the newly designated genera Acidithiobacillus gen. nov., Halothiobacillus gen. nov and Thermithiobacillus gen. nov. *Int J Syst Evol Microbiol* 2000;50:511–6.
- M<sup>r</sup> Govern MS., Can coatings protect wastewater treatment systems, *Aberdeen's Concrete Construction* 44 (4) (1999) 53–57.
- Melinge Y., Jauberthie R., Daiguebonne C., Guillou O., Lahogue R., Gueguen B., 2009, *étude de l'altération du réseau d'assainissement de la ville de Rennes*, 27<sup>eme</sup> rencontres annuelles de l'AUGC, réf. AUGC\_02-53, St Malo 3-5 juin.
- Mori T, Nonaka T., Tazaki M., Koga Y., Hikosaka S., *Interactions of nutrients, moisture and pH on microbial corrosion of concrete sewer pipes*, *Water Research* 26 (1) (1992) 29–37.
- Parker CD., *Species of sulphur bacteria associated with the corrosion of concrete*. *Nature* 1947;159 (4039) :439–40.
- Parker CD. The corrosion of concrete 1. *The isolation of a species of bacterium associated with the corrosion of concrete exposed to atmospheres containing hydrogen sulphides*. *Aust J Exp Biol Med Sci* 1945a;23:81–90.
- Sand W., Bock E., *Concrete corrosion in the Hamburg sewer system*, *Environmental Technology Letters* 5 (1984) 517 – 528.
- Saricimen H., Maslehuddin M., *Case study of deterioration of concrete in sewerage environment in an Arabian Gulf Country*, *Durability of Building Materials* 5 (1987) 145–154.
- Stewart WF., *Disaggregation of environmental factors affecting sewer pipe failures*, *Journal of infrastructure Systems* 5 (4) (1999) 150–158.
- Sydney R., Esfandi E., Surapaneni S., 1996, *Control concrete sewer corrosion via the crown spray process*. *Water Environ. Res.* 68 (3), 338–347.