

Pérennisation des Ouvrages en Génie Civil : Diagnostic et Inspection des Bétons d'Égouts

Oualit*. M¹, Abadlia. M^{ed} T¹, Hami. B¹

¹ Unité de Recherche Matériaux, Procédés et Environnement (URMPE), cité Frantz Fanon, 35000 Boumerdès, Algérie. *oualitmehenna@hotmail.com

Jauberthie. R², Melinge. Y²

² Laboratoire de Génie Civil Génie Mécanique (Matériaux), (LGCGM) - INSA de Rennes, France.

La durabilité des bétons dans les réseaux d'assainissement est principalement affectée par l'action combinée, chimique (sels, sulfates, acides...), mécaniques (poinçonnement, abrasion...) et biologiques (bactéries aérobies, anaérobies...) provoquant une détérioration souvent de la matrice cimentaire. Ces dégradations sont souvent aggravées en fonction de la vitesse, la nature, la concentration et le pH ainsi que les conditions environnementales aux alentours (taux d'oxygène, température...etc).

L'objectif de ce travail qui a été réalisé à l'INSA de Rennes consiste à effectuer une étude sur la dégradation et les facteurs responsables d'altération du béton employé dans le réseau d'égouts de la ville de Rennes. Ainsi, des échantillons prélevés dans différentes zones (radier, medium et toit) d'une conduite ont été analysés à l'aide de moyens d'investigation afin de mettre en évidence l'état d'endommagement interne due aux effluents et externe (sol) de réseau ainsi que les modifications chimiques et minéralogiques enregistrées. Ces essais sont complétés par une caractérisation physique et mécanique. Dans cet article, nous présentons les résultats de l'inspection d'un tronçon dont les sollicitations prédominantes sont en majorité chimiques et abrasives.

Cette étude met clairement en évidence la très forte anisotropie des dégradations aussi bien internes qu'externes.

Enfin, des recommandations seront proposées en adéquation avec l'environnement ainsi qu'une évaluation de la perte de performance des conduits.

Mots clés : Réseau d'assainissement, Diagnostic, Anisotropies des dégradations, Attaques chimiques, Caractérisations mécaniques.

* Auteur correspondant: oualitmehenna@hotmail.com,

1. INTRODUCTION

Les ouvrages du génie civil présents sur nos territoires remplissent une fonction de service auprès de la population. Il s'agit par exemple d'assurer le transit de personnes et/ou de marchandises (ponts, tunnels, écluses, etc.) ou la distribution d'une ressource vitale (château d'eau, réservoir). Le maintien de ces ouvrages est nécessaire au bon fonctionnement de la société moderne puisqu'ils sont des points de liaison indispensables à la connexion des réseaux. De plus, certains d'entre eux, de par leurs valeurs architecturales, constituent une richesse historique et culturelle.

De manière générale et encore plus particulièrement dans le cadre de la politique de développement durable actuelle, ils doivent donc être pérennisés. Cette démarche ne peut se faire qu'au moyen d'une bonne compréhension des mécanismes de vieillissement qui l'affectent, résultat de la réponse de l'ouvrage aux contraintes auxquelles il est soumis.

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 [6] (T. Mori et al 1992), pays arabes du Golfe [9] (H. Saricimen et M. Maslehuddin 1987), Allemagne [8] (W. Sand et E. Bock 1984), l'Afrique du Sud [2] (J.L. Barnard 1967).

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 [4] (M.S. McGovern 1999). Dans l'état d'Australie du Sud à lui seul, un budget prévisionnel pour l'entretien des infrastructures des eaux usées existante est estimé à 48 millions de dollars par an [10] (W.F. Stewart 1999).

A Los Agnelés, 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 estimés à 400 million € [11] (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 [3] (Kaempfer et Berndt, 1998).

La ville de Rennes avec une surface de 5022 ha, ses 209922 habitants, représente la dixième ville de France. La structuration contemporaine du schéma d'assainissement date de 1880 avec une accélération dans son développement à partir des années 1960. Par ailleurs, le réseau est composé presque exclusivement de conduites à base cimentaire. Dans le cadre du management intégré des réseaux d'assainissement, et en collaboration avec la ville de Rennes, des outils de gestion patrimoniale des réseaux, de suivi de leur fonctionnement et d'aide à la décision en matière d'entretien, de réhabilitation ont été lancés. 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.

Ces outils sont basés généralement sur le recensement d'informations factuelles (caractéristiques des 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...).

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

2. MATERIAUX ET METHODES

Pour cette étude, on a adopté le même Protocole expérimental que celui de [5] (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 illustré dans la figure 1.

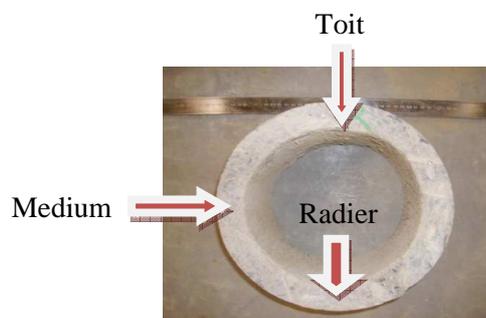


Figure 1. Les trois zones de carottage des échantillons (Radier, medium et le Toit).

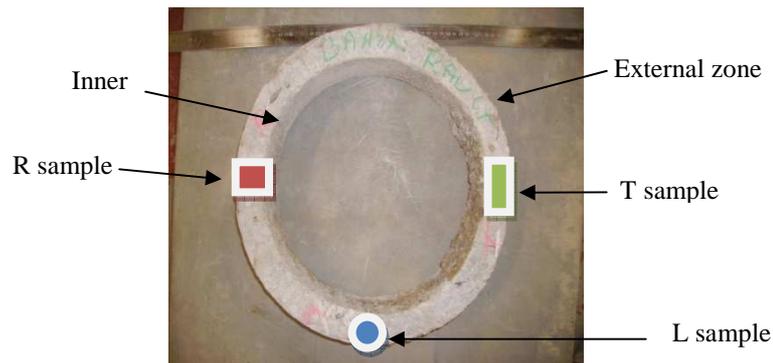


Figure 2. Les trois directions de découpage des échantillons.

Ce choix nous permet 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 et la profondeur des pathologies.

Les éprouvettes obtenues possèdent un diamètre $\Phi = 28$ mm et un élanement $h = 1,5$. $\Phi = 42$ mm, exception faite pour les éprouvettes découpées en position radiales (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 relative jusqu'à l'obtention d'une masse constante.

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1. Caractérisation physique

3.1.1. Masse volumique apparente

Le tableau 1 présente les résultats des valeurs moyennes de la masse volumique apparente des éprouvettes carottées dans les trois zones de la conduite (radier, medium et toit) et suivant la direction radiale (R), longitudinale (L) et transversale (T).

Tableau 1. Valeurs moyennes de la masse volumique apparente en (Kg/m³).

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

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 subi d'altération (à supposer que cette masse volumique n'a pas changé par rapport à celle du matériau initial).

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 faibles par rapport même aux bétons ordinaires ce qui signifie que le béton est poreux et non compact.

3.2. Caractérisation mécanique

3.2.1. 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 2 donne les valeurs trouvées pour chaque zone ainsi que la direction correspondante dont laquelle est prélevé l'échantillon. Les essais de traction indirecte ont été réalisés selon la norme NF P 94-422 à l'aide d'une presse INSTRON 4507.

Tableau 2. Valeurs des essais en traction indirecte (essai brésilien).

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

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

3.3. Mise en évidence de la zone à pH réduit

Après avoir subi la traction par fendage, et pour illustrer l'ampleur et l'anisotropie de l'endommagement, on a appliqué de la phénolphthaléine sur les demi-morceaux des échantillons radiaux des trois zones (radier, medium et toit). Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 3 et le tableau 4.

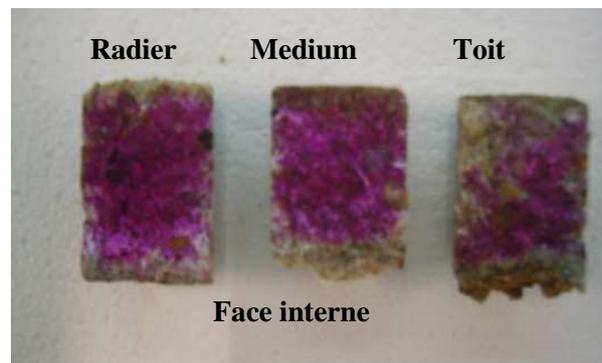


Figure 3. Evolution du pH des échantillons radiaux dans les zones: Radier, medium et le Toit (Conduite de la rue BINGUENAIIS).

Tableau 3. Taux d'endommagement et valeurs des épaisseurs à pH réduit.

	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 (%)
Radier	41	41	5	3	00	19,51
Medium	41	38,1	9	5	7,07	41,21
Toit	41	39,6	7	6,5	3,41	36,33

D'après la photographie ainsi que le tableau 3, on remarque une différence considérable 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 H₂S, [7] (Parker, 1945a). 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).

Le mécanisme de dégradation le plus courant est la formation d'acide sulfurique biogène H₂SO₄ dans la partie hors d'eau, une oxydation biologique de gaz H₂S formant de l'acide sulfurique avec un pH acide de l'ordre de 2. La détérioration du béton résulte alors de l'attaque par cet acide sulfurique : conversion de portlandite en gypse ce qui va engendrer la dépassivation des armatures et l'altération du béton (pH de 1 à 3) ce qui confirme les résultats de la phénolphthaléine (Figure 3).

En revanche, le pH réduit de côté extérieur est attribué à la carbonatation notamment dans le haut de la conduite ainsi qu'à l'agressivité éventuelle des sols [1] (Aziz et Al).

4. CONCLUSION

Cette étude permet 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 « **BINQUENAIS** » de la ville de Rennes. D'après les résultats obtenus, nous pouvons tirer 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 des 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 vue la faible compacité du 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 (sulfates) ainsi qu'une analyse de sol support afin d'expliquer vraisemblablement les pertes de matières constatées notamment au niveau de la face externe.

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.

Références

[1] Aziz MA., Koe LCC 1990., « Durability of concrete sewers in aggressive sub-soils and groundwater conditions, Geotechnical aspects of restoration works », ed. Balasubraman et al, Rotterdam, p. 299 - 310.

[2] Barnard JL 1967. Corrosion of sewers, Council for Scientific and Industrial Research (CSIR) Research Report 250, South Africa.

[3] Kaempfer W., Berndt M., 1998. Polymer modified mortar with high resistance to acid to corrosion by biogenic sulfuric acid. In: Pro- ceedings of the IXth ICPIC Congress, Bologna, Italy, pp. 681–687.

[4] M^c Govern MS., 1999. Can coatings protect wastewater treatment systems, Aberdeen's Concrete Construction 44 (4) 53– 57.

[5] 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, 27eme rencontres annuelles de l'AUGC, réf. AUGC_02-53, St Malo 3-5 juin.

[6] Mori T, Nonaka T., Tazaki M., Koga Y., Hikosaka S 1992. Interactions of nutrients, moisture and pH on microbial corrosion of concrete sewer pipes, Water Research 26 (1) 29– 37.

NF P 94-422 : Détermination de la résistance à la traction indirecte- essai brésilien- janvier 2001.

[7] Parker CD 1947. Species of sulphur bacteria associated with the corrosion of concrete. Nature; 159 (4039) :439–40.

[8] Sand W., Bock E 1984. Concrete corrosion in the Hamburg sewer system, Environmental Technology Letters 5 517 – 528.

[9] Saricimen H., Maslehuddin M 1987., Case study of deterioration of concrete in sewerage environment in an Arabian Gulf Country, Durability of Building Materials 5 145– 154.

[10] Stewart WF 1999. Disaggregation of environmental factors affecting sewer pipe failures, Journal of infrastructure Systems 5 (4) 150– 158.

[11] Sydney R., Esfandi E., Surapaneni S., 1996. Control concrete sewer corrosion via the crown spray process. Water Environ. Res. 68 (3), 338–347.