

## Service life in sewerage system, simulation

## Durée de vie des réseaux d'assainissement, modélisation

C. Jauberthie<sup>1</sup>, R. Jauberthie<sup>2</sup> et Y. Meline<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CNRS; LAAS; 7, avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse, France

Université de Toulouse; UPS, INSA, INP, ISAE; LAAS; F-31077 Toulouse, France,

<sup>2</sup>Laboratoire Génie Civil Génie Mécanique –EA 3913 – Institut National des Sciences Appliquées – UEB – 35043 Rennes Cedex, France

**Abstract.** Building models of physical systems turns out to be an awkward task by the presence of noise and disturbance. It is not always possible to get information about disturbances and noises acting on the system. This may turn the usual stochastic framework inappropriate. In such cases, assuming bounded uncertainties may be a solution. An interesting way to go is then to use guaranteed estimation methods, which learn the state and/or parameters of the models from data. The set-membership models are well suited for fault detection and for making relevant diagnoses to improve the process evolution. A damage analysis of sewerage structures in Rennes (France) is undertaken. These systems (unit network rainwater and wastewater or separate system) consist of cement-based materials. The damage is quantified through various indicators of material properties (material extracted in the city). One hundred samples characterized by different streets and laying dates between 1892 and our days are analyzed. Thus, in this work, starting from a set-membership model of the behaviour of different sections of pipe wastewater, we use recent techniques of set-membership estimation to model and diagnose the system. A particular attention is paid to estimating the corrosion level for considering the full or partial rehabilitation.

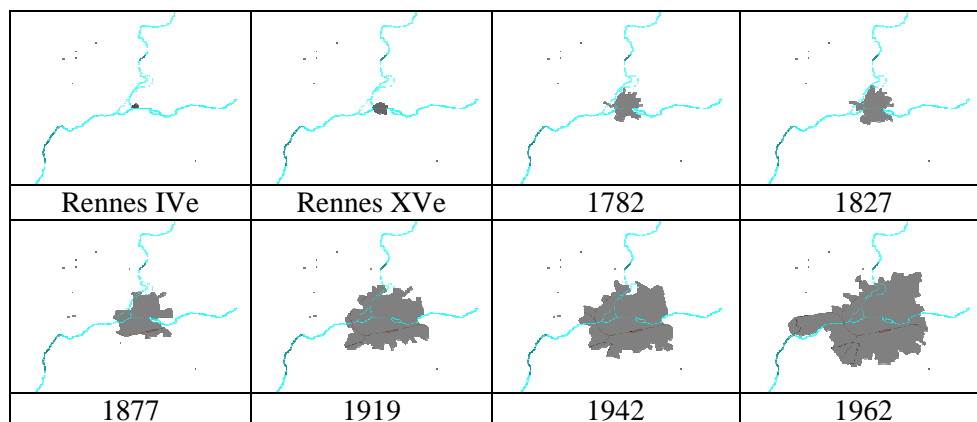
**Résumé.** La modélisation des systèmes physiques peut parfois être rendue difficile par la présence de bruits et perturbations. Lorsqu'il est possible de faire des hypothèses sur les caractéristiques de ces bruits et perturbations, les approches permettant d'inclure un modèle de ces perturbations dans le modèle du processus sont pertinentes et permettent entre autre de reconstruire l'état du processus. Cependant, ces hypothèses sont rarement satisfaites en pratique et, les modèles eux-mêmes sont parfois entachés d'erreurs. Néanmoins, ces grandeurs et paramètres non mesurés sont amenés à fluctuer entre des bornes relativement bien connues. C'est pourquoi il est naturel de se concentrer sur des estimateurs ensemblistes garantis en tout temps, dans un cadre déterministe à erreurs bornées. Ces méthodes relèvent de l'analyse par intervalles, qui est apparue pour la première fois dans l'ouvrage "Interval Analysis", de R.E. Moore en 1966. Il a été montré que les modèles ensemblistes sont bien adaptés pour la détection d'aléas ou de défauts

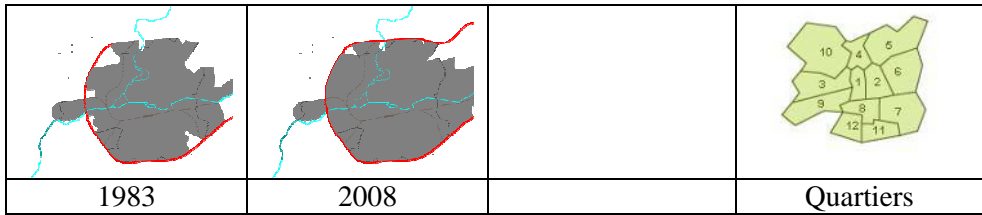
de processus et la formulation de diagnostics pertinents quant à l'amélioration du déroulement de processus. Après une présentation des modèles les plus courants, une analyse de l'endommagement des ouvrages d'assainissement de la ville de Rennes est entreprise. Ces ouvrages représentent le réseau unitaire et le réseau des eaux usées du système séparatif et sont constitués de matériaux à base cimentaire, armés ou non. L'endommagement est traduit par l'intermédiaire de différents indicateurs des propriétés des matériaux prélevés dans la ville. A ce jour, nous disposons d'une centaine de prélèvements effectués dans différentes rues et caractérisés par des dates de pose comprise entre 1892 à nos jours. Ainsi, dans ce travail, partant d'un modèle ensembliste du comportement des différents tronçons de canalisation des eaux usées, nous utilisons les techniques les plus récentes d'estimation ensembliste afin de diagnostiquer ces éléments. Une attention particulière est portée sur l'estimation du niveau de corrosion permettant d'envisager la programmation d'une réfection totale ou partielle.

## 1 Introduction

Communes et villes ont à faire face à la mise en place et au prolongement de réseaux d'assainissement à cause de la démographie. La réhabilitation de l'existant n'est pas une priorité. Mais les dysfonctionnements, désordres [1] et défaillances sont courants sur les tronçons très anciens (plus de 100 ans) avec des impacts sur la vie des habitants et sur l'environnement. Le fonctionnement des stations d'épuration est perturbé [2]. Certaines émanations peuvent même être particulièrement toxiques. Il convient de suivre l'état des réseaux pour palier ces accidents. Ceci sous entend la mise au point d'outils d'aide à la décision en matière d'entretien, de réhabilitation et/ou de renouvellement des tronçons [3,4]. Le socle est bâti sur l'évolution de la ville dans le temps : les industries de la périphérie s'éloignent et laissent place à l'habitat, les caractéristiques des effluents évoluent de façon concomitante; les caractéristiques des réseaux : matériaux constitutifs, pose, performances initiales ont changé durant les décennies. Seul l'état actuel est évalué de façon précise mais uniquement de façon ponctuelle sur des tronçons devant subir de nouveaux raccordements ou bien défaillants. Dans ce contexte, les mesures sont très ponctuelles, sur un petit tronçon, avec une orientation souvent précise sur la périphérie, les échantillons prélevés sont de taille réduite hors normalisation. Il en découle une marge d'erreur inhabituelle sur chaque analyse.

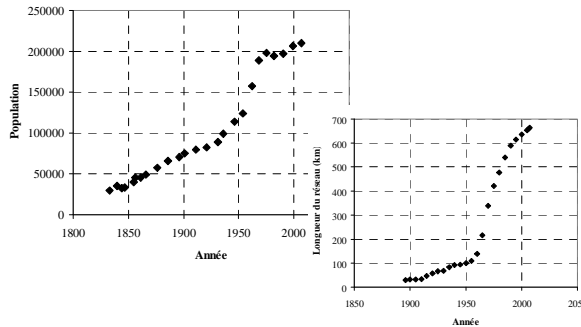
## 2 Etat des lieux de la banque de données





**Fig. 1,** Evolution de la surface urbanisée de Rennes

La figure 1 représente l'évolution de la surface urbanisée de la ville de Rennes au cours du temps. Les industries de la périphérie sont déplacées au fur et à mesure de l'urbanisation. Les effluents sont donc modifiés lors de ces déplacements. Actuellement ce problème a disparu : les rejets industriels sont contrôlés. Le découpage de la ville en quartiers (figure 1) suit cette expansion du quartier 1 (historique) vers les quartiers 9 et suivants urbanisés récemment et qui se sont substitués à des zones industrielles, dont certaines empreintes sont visibles dans le système d'assainissement. L'évolution démographique est accompagnée de l'extension du réseau d'assainissement (figure 2) qui passe de l'unitaire vers le séparatif. L'évolution de la nature des effluents génère des imprécisions sur la durée de vie résiduelle.

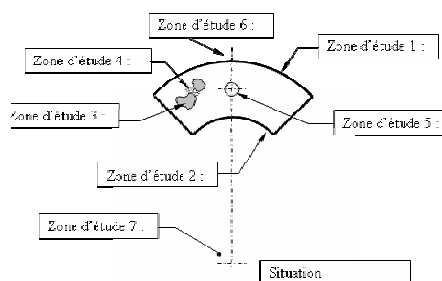


**Fig. 2,** Évolution démographique vs longueur de réseau.

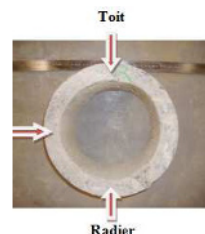
### 3 Quantification de la dégradation des réseaux

Le linéaire du réseau avoisine les 700km, il est donc impossible de connaître son état : ceci nécessiterait des moyens d'inspection très importants. L'identification des propriétés des matériaux est réalisée à partir de prélèvements directement réalisés sur le réseau de la ville. Pour le projet, nous profitons essentiellement des interventions des équipes techniques (opérations de maintenance, de connexions, ...) pour lesquelles il est nécessaire de « retirer un morceau de conduite ». Cette opération est réalisée le plus fréquemment par carottage et pour les besoins de l'étude, le diamètre doit être le plus important possible. L'opération de prélèvement peut avoir lieu au cours d'une intervention plus sérieuse sur le réseau, telle une réhabilitation partielle, ce qui représente un idéal pour les travaux à réaliser dès lors qu'un tronçon de conduite est disponible.

En présence de matériaux à base cimentaire, tels que ceux utilisés pour la fabrication des conduites d'assainissement, la recherche des pathologies peut être effectuée selon le schéma de la figure 3. Des cylindres sont prélevés ( $\varnothing=28\text{mm}$ , élancement 1,5). Pour les cylindres taillés radialement par rapport à la conduite, la longueur est égale à l'épaisseur.



- 1 face externe de la conduite,
- 2 face interne de la conduite,
- 3 granulats,
- 4 liant,
- 5 armatures,
- 6 environnement extérieur,
- 7 propriétés des effluents actuels.



**Fig. 3,** Mise en évidence des zones potentielles d'altérations des conduites en bétons.

**Tableau 1.** Identification des échantillons à réaliser et essais pratiqués

	R	T	L
<b>N Essais</b>	4	3	3 max (2+1)
	Rcompr et E statique (1 Ech)	Rcompr et E statique (1 Ech)	Rcompr et E statique (1 Ech)
	R traction (1 Ech)	Rtraction (1 Ech)	R traction (1 Ech)
	Phmétrique	Rem capillaire (1 Ech)	Rem capillaire (1 Ech)
	Analyse RX,	(Soit T ou L)	(Soit T ou L)
	Analyse MEB et EDS	Masse volumique apparente	Masse volumique apparente
	Remontée capillaire (2 Ech)	Dimensions Echantillons	
	Masse volumique apparente		Dimensions Echantillons
	Dimensions Echantillons		

La réalisation des essais réclame une dizaine d'échantillons par prélèvement (tableau 1). Ceci n'est jamais réalisé compte tenu de la cause des prélèvements (un seul, souvent de petite taille, sur tout le linéaire et quasiment jamais sur toute la périphérie). Enfin les cylindres testés ont toujours des diamètres faibles par rapport à la taille des gros granulats (hors norme). Les armatures sont difficiles à éviter. Tous les essais sont donc entachés d'une grande incertitude : à partir de mesures sur un seul prélèvement il est donc impossible de généraliser.

## 4 Résultats des essais

Une première approche de la mesure de l'épaisseur saine résiduelle de la conduite est déterminée par application de phénol phtaléine : la zone de pH élevé est saine. Cette mesure est donc effectuée sur des échantillons dans la direction radiale. Outre les causes d'incertitudes précédemment décrites et qui s'appliquent à tous les types d'essais, s'ajoute ici la présence de gros granulats qui perturbent la mesure par leur taille mais aussi par leur nature : calcaire (pH réduit), silex (avec ou sans alcali réaction), armature acier (quelquefois présentes). L'épaisseur initiale de la conduite n'est pas connue, sa valeur est approchée par mesure sur des granulats supposés uniquement déchaussés. La figure 4 représente la fréquence cumulée de prélèvements en fonction des épaisseurs à pH réduit. Dans la majeure partie des cas, la face interne des canalisations est la plus dégradée, la face externe est relativement saine : le remblai de pose est un sable argileux et le sol ou la roche environnant est peu agressif dans le bassin rennais. La réduction du pH peut être provoquée par la présence de carbonates, de sulfates (ettringite secondaire ou gypse) la rouille des armatures et, par voie de conséquence, la fissuration du béton lors de leur oxydation.

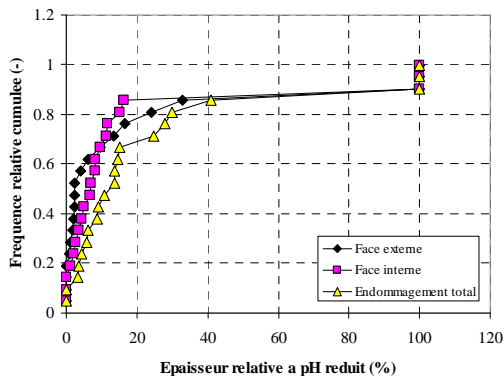


Fig. 4, Epaisseurs à pH réduit (éch. radiaux).

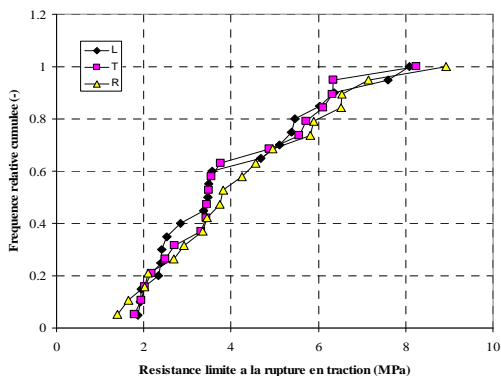


Fig. 5, Résistance à la traction (3 directions).

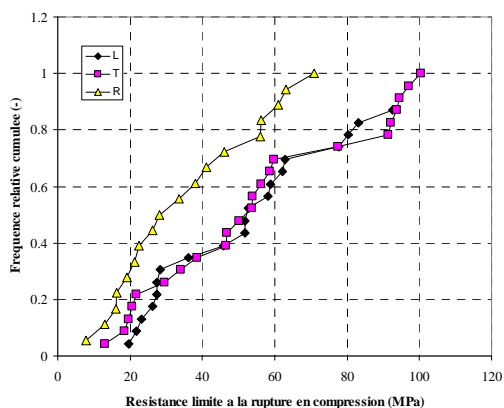


Fig. 6, Résistance en compression (3 directions).

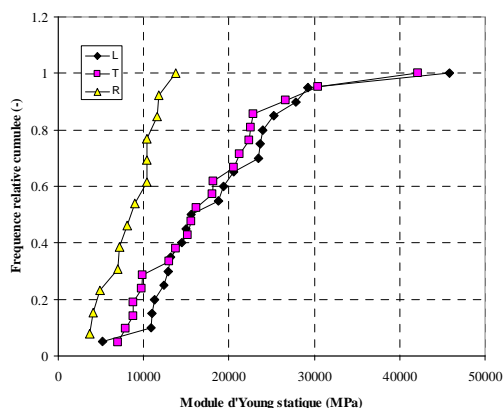


Fig. 7, Module d'Young (3 directions).

Les mesures de résistance à la traction par fendage (essai Brésilien) sont réalisées dans les 3 directions longitudinale, transversale et radiale de la conduite (figure 5). La tendance décrite par les fonctions de distribution est de type normal. Ce paramètre n'est pas discriminant pour distinguer un effet de la direction puisque les trois fonctions de distribution sont équivalentes. Ce test est très peu significatif essentiellement à cause du rapport diamètre du cylindre sur diamètre du gros gravier loin de la norme mais aussi à cause des armatures difficiles à éviter lors des prélèvements. Les résultats relatifs à la résistance limite à la rupture par compression sont présentés sous la forme d'une fonction de distribution pour les trois directions, figure 6.

Pour un échantillon (au sens de la statistique), l'intervalle des valeurs de la résistance en compression est compris entre 13 et 100 MPa pour les directions L et T ; il est entre 8 et 71 MPa pour la direction R. La tendance décrite par les fonctions de distribution est de type normal et on note que l'essai de compression est discriminant pour établir un effet de direction. Une anisotropie apparaît entre la direction R et les directions L et T. La résistance est systématiquement inférieure dans la direction R par rapport aux deux autres directions. Dans les directions L et T, les fonctions sont similaires, ce qui indique que les valeurs

obtenues dans ces directions représentent la résistance limite à la rupture du cœur de l'épaisseur des conduites. Ceci est lié également au fait que l'endommagement détecté jusqu'ici ne dépasse pas 40% de l'épaisseur pour 85% de la population analysée (réduction du pH).

Les résultats relatifs au module d'Young statique sont présentés sous la forme d'une fonction de distribution pour les trois directions, figure 7. Ce module est obtenu au moyen des signaux (effort vs déplacement) des essais de compression. La tendance décrite par les fonctions de distribution est de type normal ; ce test est discriminant pour établir un effet de direction. Une anisotropie apparaît entre la direction R et les directions L et T. Le module E est systématiquement inférieur dans la direction R par rapport aux deux autres directions. Dans les directions L et T, les fonctions de distribution sont similaires, les valeurs obtenues dans ces directions représentent le module E du cœur de l'épaisseur des conduites. Ceci est probablement lié au fait que l'endommagement détecté jusqu'ici ne dépasse pas 40% de l'épaisseur pour 85% de la population analysée (réduction du pH). Il est expérimentalement difficile de donner le temps de vie résiduel d'un ouvrage d'assainissement compte tenu de toutes les incertitudes données précédemment. Ainsi, comme son endommagement est en partie lié à son niveau de corrosion, nous nous concentrons sur la prédiction de son niveau de corrosion en utilisant les outils ensemblistes, plus précisément les outils provenant de l'analyse par intervalles.

## 5 Simulation de l'évolution de la corrosion

### 5.1 Brève introduction à l'analyse par intervalles

L'analyse par intervalles a été introduite par R. E. Moore [5]. Elle repose sur la représentation des nombres réels ou entiers par des intervalles qui les contiennent. Les intervalles peuvent être utilisés dans la prise en compte d'une incertitude sur une valeur mesurée. Cette valeur est alors encadrée par des bornes inférieure et supérieure connues. L'analyse par intervalles est utilisée dans de nombreux domaines, par exemple pour la commande robuste de systèmes [6] ainsi que pour l'estimation de paramètres [7] ou encore pour la détection de défauts [8]. Classiquement, les intervalles sont notés  $[.]$ . Par exemple l'intervalle  $[x]$  est noté  $[x_{\text{inf}} \ x_{\text{sup}}]$  où  $x_{\text{inf}}$  est la borne inférieure de  $[x]$  et  $x_{\text{sup}}$  sa borne supérieure. De plus les opérations arithmétiques classiques telles que l'addition, la soustraction, la multiplication et la division peuvent être étendues aux intervalles en prenant quelques précautions. De plus amples informations sur le calcul par intervalles peuvent être obtenues dans l'ouvrage [9].

### 5.2 Utilisation de l'analyse par intervalles dans la simulation de l'évolution de la corrosion

Dans cette section, nous utilisons l'analyse par intervalles pour prédire l'évolution de la corrosion sur la conduite considérée. Les résultats numériques sont obtenus en utilisant le logiciel Matlab ainsi que l'outil Intlab développé par S.M. Rump [10]. Les valeurs numériques utilisées proviennent de [13].

La prédiction théorique de la corrosion est donnée dans [11] (en  $\text{g/m}^2\text{h}$ ) et réutilisée dans [12]. Après quelques simplifications, dans [12] et [13], l'équation suivante proposée :

$$C = (100/32) * (365/10^2) * k * \varphi_{ra} * (1/a), \quad (1)$$

où  $C$  représente le niveau de corrosion (en  $\text{mm/an}$ ), d'autres auteurs [13] notent  $C$  le taux moyen de la corrosion du béton par l'acide (en  $\text{mm/an}$ ).  $k$  est un coefficient de réaction acide. La valeur de  $k$  dépend de la concentration en acide dans l'effluent. Nous prendrons  $k = [0.6 \text{ } 0.8]$ . En effet, dans [12],  $k = 0,8$  si  $S < 1$ ,  $k = 0,7$  si  $1 \leq S \leq 5$  et  $k = 0,6$  si  $S > 5$  où  $S$  représente la concentration en hydrogène sulfuré. Cependant  $k$  peut varier de 1 jusque 0,3 ou 0,4 suivant la réaction lente ou rapide de l'acide ainsi dans les simulations, nous considérons également  $k = [0.3 \text{ } 1]$ .  $\varphi_{ra}$  représente le flux de sulfure d'hydrogène  $\text{H}_2\text{S}$  dans la conduite (en  $\text{g / h * m}^2$ ), nous le prendrons dans l'intervalle  $[0.024 \text{ } 0.044]$  (figure 8, partie gauche) puis dans  $[0 \text{ } 0.1]$  (figure 8, partie droite) et  $a$  est un coefficient pour l'alcalinité du béton, valant normalement 0,16, nous le prendrons dans l'intervalle  $[0.15 \text{ } 0.17]$ . La figure 8 représente l'enveloppe (bornes inférieure et supérieure) de l'évolution de la corrosion sur 50 ans. Ainsi, par exemple, dans 10 ans, si le flux de sulfure d'hydrogène reste compris entre 0,024 et 0,044, le niveau de corrosion sera compris entre 9.6 mm et 26.7mm. Il est possible de recalculer les valeurs prédites de la corrosion sous forme d'intervalle avec les valeurs mesurées. En effet ces valeurs mesurées sont également entachées d'erreurs (dues aux appareils de mesure...) ainsi, il est possible de les donner sous forme d'intervalle. On fait alors l'intersection de l'intervalle prédit avec l'intervalle mesuré.

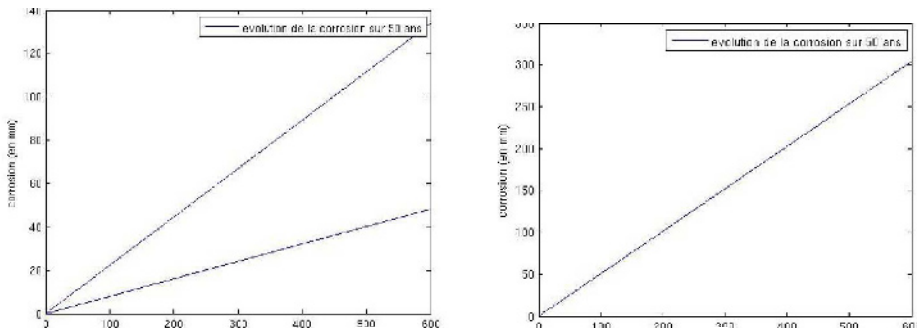


Fig. 8, Evolution de la corrosion avec  $[\varphi_{ra}] = [0.024 \text{ } 0.044]$  (gauche) et  $[\varphi_{ra}] = [0 \text{ } 0.1]$  (droite).

## 6 Conclusion

L'assainissement occupe une place non négligeable dans la ville, compte tenu des volumes fluides pollués qui sont véhiculés au quotidien. La gestion des ressources en eaux, la qualité des effluents traités fait l'objet de contrôles de plus en plus sévères et il convient d'entreprendre les opérations de maintenance nécessaires pour éviter les entrées d'eaux dans les systèmes de transport, mais également les fuites vers l'extérieur. Au cours du temps, les évolutions morphologiques de la ville contribuent à une meilleure gestion du fonctionnement du réseau en déplaçant notamment les activités industrielles en périphérie de la ville. Le trafic routier a évolué par une modification des chargements de la voirie.

Technologiquement, le réseau est de constitutions et de mise en œuvre diverses, ces états de références (initiaux) sont inconnus pour les ouvrages anciens. La cinétique d'endommagement impose des points de vue multicritères avec des protocoles particuliers pour accéder à des indicateurs pertinents.

Nos futurs travaux portent sur le pronostic en utilisant l'analyse par intervalles, c'est-à-dire sur l'estimation de la durée de vie résiduelle du tronçon considéré (appelé RUL : remaining useful life) en utilisant des modèles de vieillissement spécifiques au pronostic.

## Références

1. Ch. Carde, Dégradation des réseaux, *Béton* **19**, Nov. Dec., 71-72, (2008).
2. B. Nucci, Assainissement : les professionnels s'inquiètent d'une dégradation de la qualité des réseaux posés. *L'eau, l'industrie, les nuisances*, Oct., 8-9. (2010)
3. L. Monfront, . Réseaux d'assainissement : gestion patrimoniale et tuyaux en béton. *CERIB LM/MA PO 103/Produits – Systèmes, Editions du CERIB*. Sep. (2007)
4. P. Le Gauffre, F. Cherqui, J.C. De Mordant de Massiac, C Joannis, C Werey, A Rozan., INDIGO rapport final, Indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains, *Projet ANR*, (2006).
5. R. Moore, Interval Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. (1966).
6. L. Jaulin, I. Braems, E. Walter, Interval methods for nonlinear identification and robust control. *Proceedings of Conference on Decision and Control*, Las Vegas. december (2002)
7. L. Jaulin, E. Walter, Guaranteed nonlinear parameter estimation from bounded-error data via interval analysis, *Mathematics and Computers in Simulation*, **35**, pages 123-137. (1993).
8. R. Pons, C. Jaubertie, L. Travé-Massuyès, P. Goupil, 24-26 juin. Interval analysis based learning for fault detection. Application to control surfaces oscillatory failures. *22nd Workshop on QR, Boulder (USA)* (2008).
9. L. Jaulin, M. Kieffer, O. Didrit, E. Walter., Applied Interval Analysis, *Springer-Verlag, London*. (2001).
10. S. M. Rump, <http://www.ti3.tu-harburg.de/~rump/intlab>
11. R. D. Pomeroy, J. D. Parkhurst., The forecasting of sulphide buildup rates in sewers. *Progress in Water Technology*, vol. 9, p. 621-628, (1977).
12. W. Kaempfer, M. Berndt., Estimation of service life of concrete pipes in sewer networks. *Durability of Building Materials and Components 8. Edited by M.A. Lacasse and D.J. Vanier. Institute for Research in Construction, Ottawa ON, K1A 0R6, Canada*, p. 36-45. (1999).
13. Corrosion Model Theory. <http://www.biosol.com.au/corrosion/theory.htm>. Tiré de Bowker, R.P.G, Smith, J.M., Webster, N.A.,. *Odor and Corrosion Control in Sanitary Sewerage Systems and Treatment Plants*. Hemisphere, New York. (1989).