

Corrélation entre des prélèvements terrains et des lois de cinétique de corrosion externe des fontes grises dans les sols

Y. GOURBEYRE¹, L. NGO¹, S. OBERTI¹, J.M. LUCATELLI², F. JOLY²

¹ Anjou-Recherche, Chemin de la digue, BP 76, 78603 Maisons-Laffitte Cedex, France

Yannick.gourbeyre@veolia.com

² Centre d'Analyses Environnementales, 40 Avenue de la Première Armée Française, 14000 Caen, France

Résumé

La société Veolia Environnement exploite 200 000 km de réseaux d'eau potable en France. Environ 60% de ces canalisations sont en matériau métallique (majoritairement en fonte) et sont, dans la grande majorité des cas, enterrées. Dans cet environnement, ces matériaux sont soumis à des dégradations naturelles comme la corrosion externe. Ces dégradations peuvent aboutir à des casses ou des fuites qui nuisent à la qualité de la prestation assurée par les distributeurs d'eau en terme d'interruptions de service et de rendement de réseau sans compter les gênes occasionnées aux usagers pendant la durée des travaux (perturbation du trafic routier, impacts sociaux, bruit...).

Afin d'anticiper au mieux et de prévenir les incidents survenant sur les réseaux, il est nécessaire d'évaluer les cinétiques de corrosion externe des fontes dans les sols. La connaissance des lois de cinétique de corrosion permettra de planifier le renouvellement de certaines parties de réseaux.

Les sols sont des électrolytes particuliers dans lesquels interviennent différents composés chimiques, présents sous les trois phases (solide, liquide et gazeuse). De ce fait, les facteurs régissant la corrosion par les sols sont très complexes.

Peu d'articles font état d'une loi de cinétique de corrosion dans les sols et très souvent, la simple règle de trois ($V_{cor} = \text{perte d'épaisseur} / \text{âge de la canalisation}$) est employée à tort. En effet, cette loi implique une vitesse constante de la corrosion de la fonte ce qui n'est en général pas le cas du fait de la présence du résidu graphitique formé par les phénomènes de corrosion de la fonte.

Cette couche de graphite forme un écran entre le front de corrosion et le milieu corrosif ce qui engendre un ralentissement de la corrosion.

C'est pourquoi, quelques auteurs présentent des lois de corrosion dans les sols prenant en compte ce ralentissement.

Dans ce travail seront présentés des résultats de corrélation entre les différents modèles de cinétique de corrosion et des mesures effectuées sur des prélèvements de canalisations et de sols. Les premiers résultats montrent l'influence de la résistivité du sol sur les vitesses de corrosion. Les lois de cinétiques encadrent les valeurs des prélèvements ce qui permet d'obtenir des cinétiques extrêmes de corrosion qui pourront être reliées à un calcul mécanique.

Introduction

En 2005, l'adoption d'une politique de gestion patrimoniale des réseaux par les gestionnaires d'eau potable [1] est devenue un enjeu majeur dans la distribution de l'eau. Les installations vieillissantes (certaines canalisations datent de plus d'une centaine d'années), la diversité des matériaux (PVC, ciment, fonte, acier...) et les conditions de pose (les canalisations sont enterrées pour la grande majorité dans des environnements très variables) sont des difficultés à appréhender dans la gestion du réseau.

Dans ce contexte, plusieurs méthodes et outils ont été développés pour assister les exploitants à préparer leurs plans de réhabilitation et de renouvellement : approches multicritères, outils statistiques, outils économiques... Depuis quelques années, Veolia Eau accompagne donc les exploitants à la mise en place d'une démarche globale et logique de gestion de leurs réseaux dans un souci d'équilibre entre les coûts d'exploitation et les coûts de renouvellement pour garantir une performance satisfaisante. Dans cette dynamique et afin d'alimenter les différents outils, la détermination prédictive de la durée de vie résiduelle d'une canalisation en fonte à graphite lamellaire corrodée dans les sols est un objectif d'importance à moyen terme. Simplement dénommé « fonte grise », ce matériau a été largement employé dès la fin du 19^{ème} siècle et jusqu'aux années 1960.

La définition de la corrosion établie par la norme internationale ISO 8044 (1999) montre explicitement qu'il s'agit d'un processus résultant de l'interaction physico-chimique entre un matériau et son milieu environnant *"entraînant des modifications dans les propriétés du métal et pouvant conduire à une dégradation significative de la fonction du métal, du milieu environnant ou du système technique dont*

il fait partie". Dans la gestion des réseaux d'eau potable, la corrosion des canalisations en fonte est problématique puisqu'elle peut provoquer des fuites d'eau ou fragiliser les canalisations et donc modifier leur résistance mécanique. La compréhension de ce phénomène devient donc essentielle dès lors qu'on souhaite évaluer la durée de vie des canalisations enterrées.

Influence du sol environnant

L'environnement des canalisations est un facteur conditionnant leur durée de vie pourtant dans chaque cas, le taux de casse peut être expliqué de différentes manières. La très grande majorité des canalisations d'eau potable étant enterrées, le sol forme l'électrolyte.

Il existe un grand nombre de paramètres qui peuvent influencer la corrosivité du sol parmi lesquels les plus cités sont [2, 3, 4, 5, 6] :

- La résistivité
- Le pH
- L'humidité du sol
- L'aération
- La présence de sels solubles, chlorures, sulfates

La résistivité du sol

Le sol étant un électrolyte, sa résistivité détermine sa capacité à conduire le courant de corrosion et pour de nombreux auteurs il s'agit du facteur le plus important pour caractériser la corrosivité d'un sol vis-à-vis des matériaux métalliques. En effet, c'est un paramètre facile à mesurer et qui rend compte de l'humidité et de la teneur en sels solubles.

Tableau 1 : Valeur de résistivité en fonction de la nature du sol [7]

| Nature | Résistivité ($\Omega \cdot \text{cm}$) |
|---------------------|--|
| Argiles et marnes | $500 < X < 2000$ |
| Alluvions anciennes | $1000 < X < 2000$ |
| Limons des plateaux | $3000 < X < 5000$ |
| Terre sablonneuse | $5000 < X < 15000$ |
| Tourbières | $5000 < X < 20000$ |
| Sable sec / graves | $20000 < X < 200000$ |

Tableau 2 : Critère de corrosivité en fonction de la gamme de résistivité des sols [7]

| Résistivité ($\Omega \cdot \text{cm}$) | Corrosivité |
|--|-------------|
| < 1000 | Forte |
| $1000 < X < 2000$ | Modérée |
| $2000 < X < 5000$ | Faible |
| > 5000 | Quasi nulle |

Dans une de ses études [8], Rajani reprend une information publiée par Mc Mullen en 1982 selon laquelle 94% des casses apparaissent dans des sols dont la résistivité est inférieure à $2000 \Omega \cdot \text{cm}$, c'est-à-dire pour des sols définis comme moyennement à fortement corrosifs selon la littérature. La figure 1 illustre la relation entre résistivité faible du sol et corrosion élevée de la fonte grise (pour rappel $V_{\text{cor}} = d(\text{perte de matière}) / dt$).

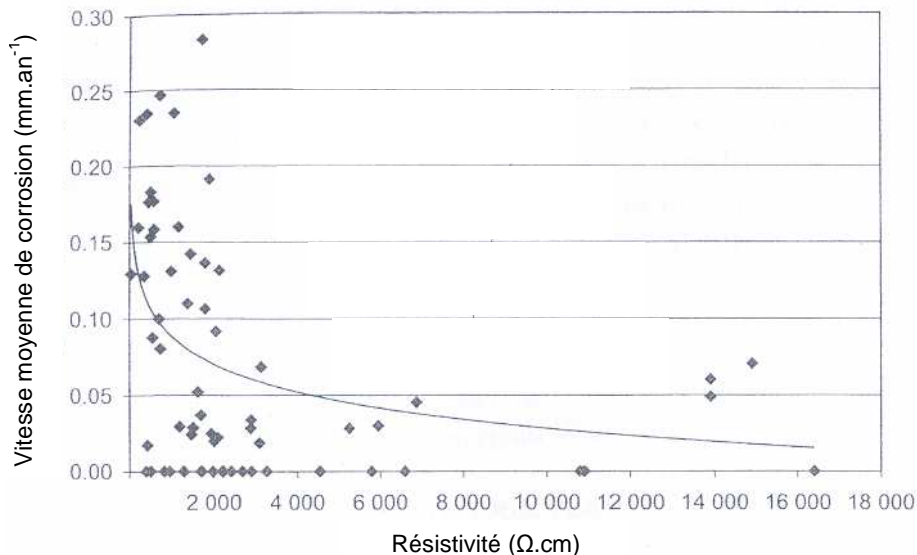


Figure 1 : Relation entre la vitesse de corrosion et la résistivité pour la fonte grise [8]

Le pH

Les sols naturels ont généralement un pH compris entre 5 et 9, des pH très acides ou très alcalins peuvent être l'indice d'une pollution industrielle. L'expérience montre une corrosion importante lorsque le sol a un pH en dessous de 6 [4] ; autour de 10, le fer est dans sa zone de passivation [6], la corrosion pouvant reprendre pour des pH très alcalins (pH>12).

L'humidité

Elle joue un rôle important car elle influe directement sur la conductivité du sol, notamment via la dissolution des sels, mais aussi par l'apport d'oxygène dissous, donc plus un sol sera humide et plus il sera corrosif. Avec les saisons, peut apparaître une cyclicité de la conductivité d'un même sol. La présence et le mouvement des nappes phréatiques est aussi à prendre en considération.

L'aération

A pH modéré (entre 5 et 9), c'est l'oxygène se réduisant à la surface cathodique du métal qui contrôle la vitesse de corrosion.

Oxydation : $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$

Réduction : $\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2 \text{OH}^-$

La quantité d'oxygène présente dans le sol est directement liée à la texture de ce dernier (perméabilité).

Moins il y a d'oxygène en proche surface du matériau, moins les produits de corrosion seront protecteurs et plus les cinétiques de corrosion seront importantes [6].

Dans les sols anaérobies, les bactéries sulfato-réductrices peuvent accélérer les processus d'attaque.

Un bon indice d'évaluation de l'activité en oxygène dans les sols est le potentiel redox, mesuré entre une électrode de métal chimiquement inerte comme le platine et une électrode de référence comme ECS, ESH ou Cu/CuSO₄.

La présence de sels solubles

La présence de chlorures (Cl⁻) peut engendrer des phénomènes de corrosion par piqûration. Une concentration critique est établie à 300 ppm pour les fontes [7]. Leur présence peut être due à une nappe saline ou des sels de déverglassement...

Une concentration critique en sulfate (SO₄²⁻) est établie à 500 ppm [7]. Les sulfates sont par ailleurs propices au développement de bactéries sulfato-réductrices (plus couramment appelées BSR)

La présence de carbonates et de bicarbonates peut par contre être favorable et ralentir la corrosion.

Bilan : Les sols corrosifs pour les fontes à graphite lamellaire ont une faible résistivité, un faible pH, une forte humidité, une faible aération, une forte concentration en chlorures et sulfates.

Aspect normatif

Ces paramètres sont repris dans différentes normes relatant de l'évaluation de la corrosivité des sols. L'impact de l'évolution de ces paramètres sont les mêmes pour toutes les normes mais évidemment, les seuils critiques correspondant à un sol corrosif sont différents en fonction des normes auxquelles on se réfère de même que la pondération de ces paramètres (NF A 05-250 (1990) qui a été récemment annulée, EN 12501 (2003), DIN 50 929 (1985), ASTM D2488-93 (1993)).

Modélisation de la cinétique de corrosion dans les sols

Un grand nombre d'études fait état d'une vitesse de corrosion plus rapide lors des premières années qu'ultérieurement. Cela suggère que la corrosion est un processus auto-inhibiteur et que les produits de corrosion des fontes à graphite lamellaire (couche de graphitisation) ont un effet protecteur et réduisent la vitesse de corrosion avec le temps [3, 6, 7].

Différentes études établissent des équations analytiques pour évaluer la profondeur des piqûres de corrosion. Ainsi, Rossum [6] constate que pour différentes conditions d'aération du sol environnant, l'évolution, dans le temps, de la profondeur maximale des piqûres de corrosion (p), suit une fonction puissance ($p = a \cdot x^b$). Pour différentes conditions d'aération du sol, il établit alors le lien entre la profondeur des piqûres de corrosion sur les canalisations en fonte grise lamellaire, la résistivité du sol ρ_{sol} et son pH avec l'équation suivante :

$$p = K_n \cdot Z^n$$
$$Z = \left[\frac{(10 - \text{pH}) \cdot t}{\rho_{sol}} \right] \quad \text{[éq 1]}$$

où :

- p : profondeur des piqûres de corrosion (mil ou milli-inch ou $2.54 \cdot 10^{-3}$ cm) ;
- K_n : constante fonction de l'aération du sol ;
- ρ_{sol} : résistivité du sol (ohm.cm) ;
- pH : acidité du sol ;
- n : fonction de l'aération du sol ;
- t : âge de la canalisation (année).

Une étude réalisée par Rajani [3] propose une formulation alternative basée sur des mesures de piqûres de corrosion réalisées sur quelques centaines de canalisations prélevées sur le terrain. Cette formulation fait toutefois abstraction du type de sol dans lequel les canalisations étaient enfouies. Cette loi essaie donc de s'affranchir des données sol pour donner une estimation de la perte d'épaisseur et de la cinétique de corrosion, on peut donc qualifier cette loi de « globale ». C'est une loi de type exponentielle et s'exprime de la façon suivante :

$$p_c = at + b(1 - e^{-ct}) \quad \text{[éq 2]}$$

où :

- p_c = la profondeur de piqûre maximale (mm)
- t = âge de la canalisation (année)

Les constantes a , b et c sont des paramètres d'ajustement déterminées empiriquement par rapport au lot d'échantillons étudiés. Rajani [3] propose les valeurs suivantes issues de modélisation sur environ 200 échantillons:

Tableau 3 : Valeurs des constantes de Rajani dans deux cas extrêmes de modélisation [3]

| Vitesse de corrosion (mm/an) | a (mm.an ⁻¹) | b (mm) | c (an ⁻¹) |
|------------------------------|----------------------------|----------|-------------------------|
| moyenne | 0.0042 | 1.95 | 0.058 |
| maximale | 0.0125 | 5.85 | 0.058 |

Le but de l'étude est d'affiner les paramètres a , b , c en fonction des prélèvements de canalisation et de sol, afin de modéliser au mieux la vitesse de corrosion et à terme estimer une durée de vie résiduelle d'une canalisation.

Prélèvements et analyses

Les prélèvements de canalisation et de sol

Les résultats présentés dans ce travail ont été réalisés à partir de 41 échantillons de canalisation en fonte grise lamellaire de 50 cm de longueur. Ces échantillons ont été prélevés lors de réparations ou de travaux de renouvellement sur différents réseaux gérés par Veolia Eau sur tout le territoire français. Seuls 16 échantillons de sol ont été prélevés avec les canalisations correspondantes. Le sol est prélevé au plus près de la canalisation.

Les différents échantillons ont été envoyés directement après prélèvement au Centre d'Analyses Environnementales de Caen.

Les analyses

L'analyse métallographique

Le Centre d'Analyse Environnementale (CAE) de Veolia Environnement situé à Caen propose une prestation d'évaluation de l'état de corrosion des canalisations en fonte en exploitant un outil de profilométrie. Cet outil permet de capturer la topologie 3D d'une canalisation et rend possible les mesures de perte d'épaisseur avec une très grande précision (au dixième de millimètre).



Figure 2 : Numérisation par profilométrie laser d'un échantillon de canalisation en fonte

Il s'agit d'un bras mécanique, géopositionné, équipé d'une caméra qui capture la déformation d'un faisceau laser émis afin de tracer le profil d'une canalisation (figure 2). Pour permettre cet examen de la canalisation, celle-ci doit d'abord être préparée : en effet, les produits de corrosion (notamment la couche de graphitisation) sont adhérents à la surface de la canalisation et de nombreux dépôts subsistent. Un sablage de la canalisation s'avère donc nécessaire pour visualiser la surface corrodée (figure 3).



Figure 3 : Exemple d'une canalisation en fonte à graphite lamellaire avant et après sablage

La profilométrie, à proprement parler, peut débuter après le sablage. Elle transforme la surface étudiée en un nuage de points composé de plusieurs dizaines de milliers d'éléments. Les routines informatiques développées spécifiquement pour le CAE de Caen permettent alors de calculer les épaisseurs résiduelles et profondeurs de corrosion en tout point de la canalisation (figure 4).

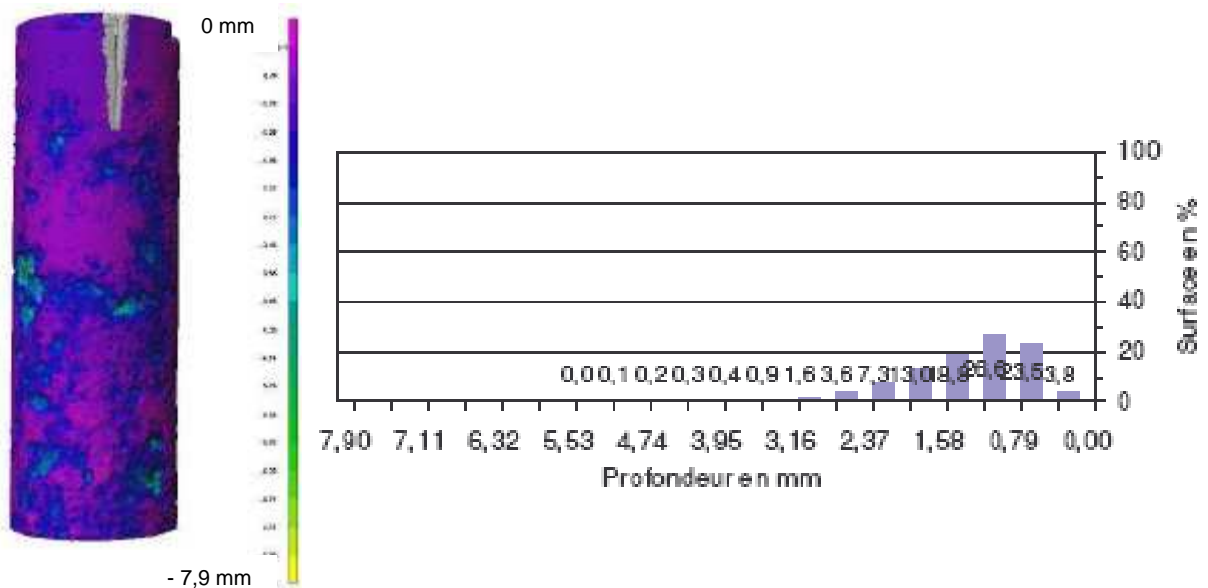


Figure 4 : Exemple d'une profilométrie 3D d'un échantillon de canalisation en fonte à graphite lamellaire après sablage

Une synthèse statistique des données relevées par la profilométrie permet finalement de calculer les valeurs minimale, moyenne et maximale de l'épaisseur résiduelle et de la profondeur de corrosion sur l'ensemble de la canalisation analysée.

L'analyse des sols

Différents paramètres sont mesurés par le CAE de Caen :

- La nature du sol
- La résistivité
- Le pH
- La teneur en eau
- La concentration en chlorure
- La concentration en sulfates

Dans ce travail, seuls des résultats concernant la résistivité ont été traités dans un premier temps. Elle a été mesurée en laboratoire à différentes teneurs en eau pour un même sol (ajout d'eau distillée) et c'est la résistivité minimale qui a été retenue (selon la norme 12501-2).

La résistivité est mesurée par une cellule de résistivité dans laquelle le sol est placé entre 2 électrodes en acier inoxydable de surface et de distance inter-électrodes connues et fixes. Les deux électrodes sont reliées à un pont RLC de référence HIOKI 3522-50 LCR HiTESTER.

Résultats

Les profondeurs de piqûres maximales mesurées sur 41 canalisations en fonte grise ont été confrontées aux cinétiques de corrosion proposées par Rajani [3] (figure 5) en raison de la mise en œuvre aisée de ses lois.

La taille du lot d'échantillons considéré est faible en raison de la nécessité de disposer de l'année de pose de la canalisation. L'information sur l'année de pose est rarement connue et à titre indicatif, environ 60 % des canalisations en fonte grise recensées dans la base de données construite au CAE de Caen contient cette information.

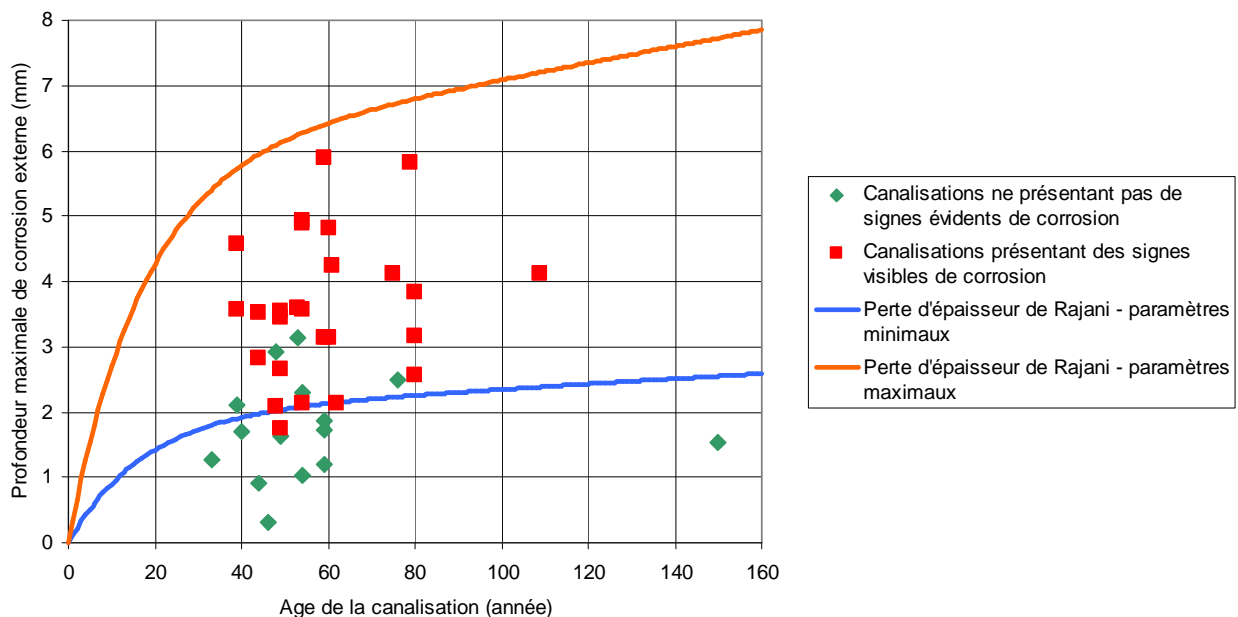


Figure 5 : Etude de la profondeur de piqûre des échantillons prélevés en fonction de l'âge de la canalisation et comparaison aux cinétiques maximale et minimale de Rajani

On distingue sur le graphe les canalisations qui portent des signes évidents de corrosion avancée et celles qui ne semblent pas corrodées. En effet, une quantité non négligeable de canalisations ne présentaient qu'une corrosion superficielle voire quasi nulle.

Un examen visuel permet actuellement de les identifier ; 63% des canalisations étudiées présentent une corrosion prononcée et 37% une corrosion "superficielle". Un critère déterministe est en cours de réalisation pour permettre un tri automatisé des données.

Les courbes de corrosion proposées par Rajani ne s'ajustent pas aux valeurs mesurées de notre base de données. Des observations intéressantes sont toutefois à signaler :

- la majorité des canalisations portant des traces évidentes de corrosion externe est comprise entre les 2 courbes de corrosion proposées par Rajani : 92 % soit 24 canalisations sur 26.
- 67% des canalisations à corrosion superficielle se situent en dessous de la cinétique de corrosion minimale donnée par Rajani : 10 canalisations sur 15.

A partir de ces observations, les paramètres de Rajani pourraient définir des cinétiques de corrosion extrêmes pour obtenir une vision optimiste et/ou pessimiste de la durée de vie résiduelle d'une canalisation.

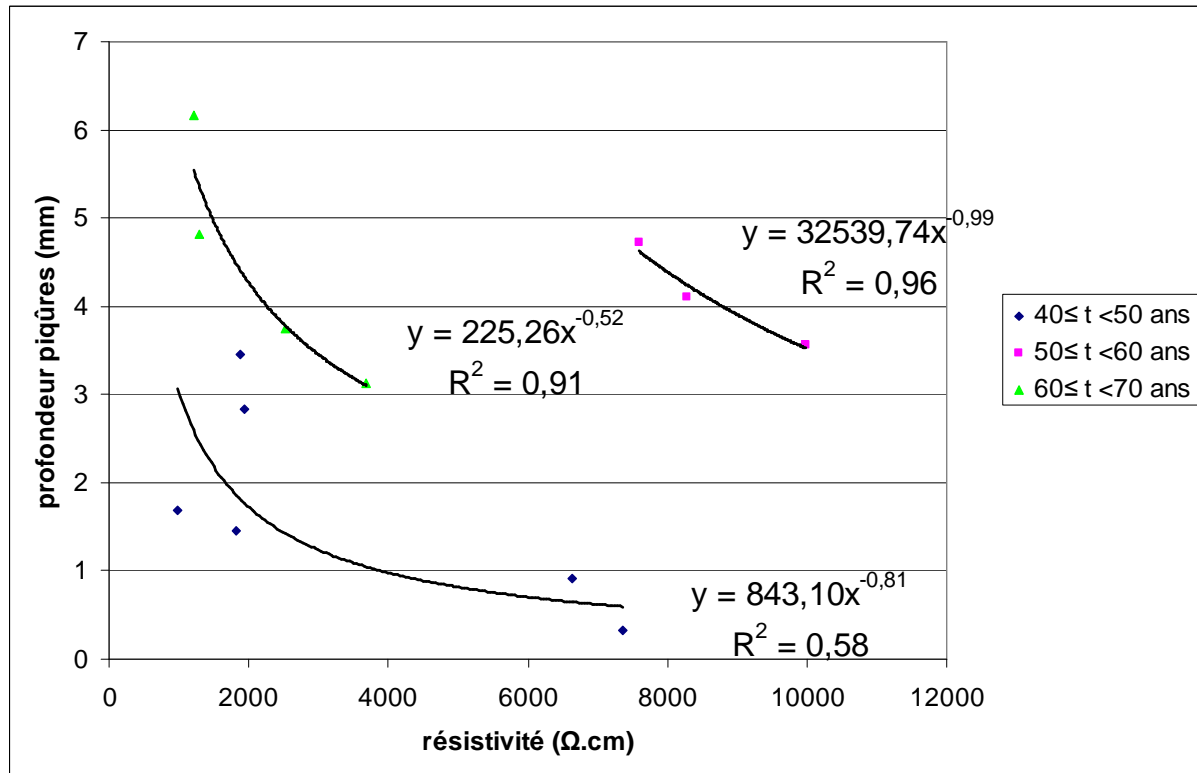


Figure 6 : Etude de la profondeur de piqûre en fonction de la résistivité du sol et de l'âge de la canalisation

Sur la figure 6, les échantillons ont été regroupés par tranche d'âge pour pouvoir comparer, à durée d'enfouissement égale, l'impact de la résistivité du sol sur la profondeur de piqûre.

Cette dernière semble suivre une loi puissance ce qui est cohérent avec la littérature (figure 1). Le groupe de canalisation ayant entre 50 et 60 ans se distingue mais le fait que ces canalisations ont été prélevées au même endroit induit un biais dans les résultats. Les 2 autres groupes d'âge sont plus significatifs car prélevés sur différents sites.

Afin d'affiner ces différentes lois en fonction des matériaux et des sols, une campagne de prélèvement de plus grande échelle (plus de 100 échantillons) a été programmée sur 2009.

Conclusion

Les différents prélèvements de canalisation et de sol sont riches en renseignements et les premiers résultats montrent une influence de la résistivité du sol sur la corrosion. Ce paramètre global semble donc intéressant à étudier pour de futures analyses.

Par ailleurs, les lois de cinétique de corrosion issues de la bibliographie semblent bien encadrer les résultats des différents prélèvements, ce qui permet déjà d'obtenir des cinétiques maximales et minimales.

D'autres prélèvements sont prévus pour l'année en cours afin de venir compléter ces premiers résultats et peut être devenir plus discriminant en terme de cinétique en fonction des matériaux et des sols.

Ces lois trouvées, couplées aux différentes actions de l'environnement sur la canalisation (charges roulantes, gel/dégel, corrosion interne...), pourront être intégrées dans des systèmes informatiques, prenant par exemple en compte le comportement mécanique de la structure, et permettront d'estimer des durées de vie résiduelles des canalisations afin d'optimiser les travaux de renouvellement ou de réhabilitation, ou à des fins d'expertise.

Références

- [1] **Syndicat Professionnel des Entreprises de Services d'Eau et d'Assainissement**, « Charte du Syndicat professionnel des entreprises de services d'eau et d'assainissement pour la gestion du patrimoine », 2005, 10 p.
- [2] **Arnoux, P.**, « *Modélisation du vieillissement d'un réseau d'eau potable en fonte et application aux stratégies de renouvellement* », Thèse de l'université Louis Pasteur de Strasbourg, 1998.
- [3] **Rajani, B. Makar, J. McDonald, S. Zhan, C. Kuroaka, C. Viens, M.**, « *Investigation of grey cast iron water mains to develop a methodology for estimating service life* », AWWA Research Foundation, 2000
- [4] **Escalante, E.** « *Concepts of underground corrosion. Effects of soil characteristics on corrosion* », ASTM STP 1013, 1989, pp 81-94.
- [5] **Race, J. M., Dawson, S. J., Stanley, L. M., Kariyawasam, S.**, « *Development of a predictive model for pipeline external corrosion rates* », 19th Pipeline Pigging and Integrity Management Conference, Houston, 2007.
- [6] **Rossum, J. R.**, « *Prediction of Pitting Rates in Ferrous Metals from Soil Parameters* », Journal AWWA, 1969
- [7] **Reynaud, A.**, « *Corrosions & fontes* », Editions Techniques des Industries de la Fonderie, 2006.
- [8] **Kleiner, Y., Rajani, B.**, « *Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models* », Urban Water, vol. 3, n°3, 2001, pp. 131-150