

Centre Eau Terre Environnement

# **Corrosion des réseaux de distribution d'eau potable : Analyse expérimentale des facteurs influençant la dégradation des infrastructures**

Par

**Bahareh Ghorbani Aliabadi**

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de  
Maître ès Sciences (M.Sc.)

## **Jury d'évaluation**

Président du jury et  
Examineur interne

Fateh Chebana  
INRS ETE

Examineur externe

Ngandu Balekelayi  
Université de Moncton

Directrice de recherche

Sophie Duchesne  
INRS ETE

Codirecteur de recherche

Peter Vanrolleghem  
Université Laval



# TABLE DES MATIÈRES

<b>TABLE DES MATIÈRES .....</b>	<b>III</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>V</b>
<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVUE DE LITTÉRATURE .....</b>	<b>3</b>
2.1 FACTEURS AYANT UN IMPACT SUR LES BRIS DES CONDUITES D'EAU .....	3
2.1.1 <i>Diamètre des conduites</i> .....	4
2.1.2 <i>Âge des conduites</i> .....	5
2.1.3 <i>Matériau des conduites</i> .....	5
2.1.4 <i>Type de sol</i> .....	6
2.1.5 <i>Saisonnalité</i> .....	7
2.1.6 <i>Bris précédents</i> .....	8
2.2 CORROSION.....	8
2.2.1 <i>Mécanismes de corrosion</i> .....	8
2.2.2 <i>Types de corrosion</i> .....	10
2.2.3 <i>Facteurs favorisant la corrosion</i> .....	12
2.2.4 <i>Inspection et mesure de la corrosion</i> .....	16
2.2.5 <i>Méthodes de contrôle de la corrosion</i> .....	18
2.3 ÉTUDES ÉVALUANT L'EFFET COMBINÉ DE FACTEURS SUR LA CORROSION .....	24
2.4 RÉSUMÉ DE LA REVUE DE LA LITTÉRATURE ET DES LACUNES SCIENTIFIQUES IDENTIFIÉES .....	28
<b>3 MÉTHODOLOGIE .....</b>	<b>29</b>
3.1 ÉTUDE DE CAS.....	29
3.1.1 <i>Ville de Québec</i> .....	29
3.2 MÉTHODOLOGIE D'IDENTIFICATION DES FACTEURS FAVORISANT LA CORROSION DES CONDUITES EN FG/FD ET DES COMPOSANTS MÉTALLIQUES PAR ANALYSE DE LA STRUCTURE D'ÉCHANTILLONS CORRODÉS.....	32
3.2.1 <i>Collecte des données</i> .....	33
3.2.2 <i>Analyse de la corrosion des composants métalliques par tomographie et MEB/EDS</i> 35	35
<b>4 RÉSULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>41</b>
4.1 ANALYSE PAR TOMODENSITOMÉTRIE DES CONDUITES EN FG ET FD .....	43
4.1.1 <i>Structure interne et intégrité</i> .....	43
4.2 ANALYSE PAR MEB ET EDS DES ÉCHANTILLONS EN FONTE GRISE EN EN FONTE DUCTILE.....	48
4.2.1 <i>Échantillon C-1 : Conduite en fonte grise</i> .....	49
4.2.2 <i>Échantillon C-2 : Conduite en fonte grise</i> .....	51

4.2.3	<i>Échantillon C-3 : Conduite en fonte grise</i>	52
4.2.4	<i>Échantillon C-4 : Conduite en fonte grise</i>	53
4.2.5	<i>Échantillon D-1 : Conduite en fonte ductile</i>	54
4.2.6	<i>Échantillon D-2 : Conduite en fonte ductile</i>	56
4.2.7	<i>Échantillon D-3 : Conduite en fonte ductile</i>	57
4.2.8	<i>Échantillon D-4 : Conduite en fonte ductile</i>	58
4.3	ANALYSE PAR MEB ET EDS D'ÉCHANTILLONS EN FONTE GRISE ET EN FONTE DUCTILE EN CONTACT AVEC L'ACIER	59
4.3.1	<i>Échantillon M-1 – Conduites en fonte grise et fonte ductile reliées par un manchon en acier</i>	59
4.3.2	<i>Échantillon M-2 – Conduite en FG reliée à un composant en acier via un manchon en acier</i>	64
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCES</b>	<b>71</b>
<b>7</b>	<b>ANNEXE</b>	<b>76</b>

## LISTE DES FIGURES

---

FIGURE 1 : PRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES RÉACTIONS DE CORROSION .....	10
FIGURE 2 : PROTECTION CATHODIQUE DES CONDUITES SOUTERRAINES (MÉTHODES DE PCAS ET DE PCCI).....	22
FIGURE 3 : RÉSEAU DE DISTRIBUTION DE QUÉBEC - LOCALISATION DES BRIS DE CONDUITES (1985 – 2020) .....	30
FIGURE 4 : EXEMPLES D'ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS SUR DES COMPOSANTS DÉTÉRIORÉS ET SUR LE SOL ENVIRONNANT À LA VILLE DE QUÉBEC .....	32
FIGURE 5 LES ÉCHANTILLONS COLLECTÉS AUPRÈS DU RDE DE LA VILLE DE QUÉBEC .....	33
FIGURE 6 : APPAREIL DE TOMODENSITOMÉTRIE UTILISÉ POUR LES ESSAIS NON DESTRUCTIFS DE COMPOSANTS MÉTALLIQUES .....	36
FIGURE 7 : APPAREIL DE MEB UTILISÉ POUR L'ANALYSE DES SURFACES MÉTALLIQUES .....	39
FIGURE 8 : IMAGE DE MEB MONTRANT LA MORPHOLOGIE DÉTAILLÉE DE LA SURFACE (EN HAUT) ET SPECTRE EDS METTANT EN ÉVIDENCE LA COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE AVEC LA RÉPARTITION DES ÉLÉMENTS CLÉS (EN BAS). ...	40
FIGURE 9 : IMAGES DE TDM DES CONDUITES EN FG (À GAUCHE) ET EN FD (À DROITE) .....	44
FIGURE 10 : RECONSTRUCTION 3D DES STRUCTURES DE CONDUITES DE FG ET DE FD À L'AIDE DES RÉSULTATS DU TOMODENSITOMÈTRE.....	45
FIGURE 11 : ANALYSE TDM DES ÉCHANTILLONS EN FG ET FD, POURCENTAGE DE PERTE DE PAROI LE LONG DE LA CONDUITE .....	46
FIGURE 12 : ÉCHANTILLON C-1 EN FG .....	49
FIGURE 13 : RÉSULTATS MEB/EDS DES ÉCHANTILLONS EN FG, A) C-1, B) C-2, C) C-3 ET D) C-4 .....	50
FIGURE 14 : ÉCHANTILLON C-2 EN FG .....	51
FIGURE 15 : ÉCHANTILLON C-3 EN FG .....	52
FIGURE 16 : ÉCHANTILLON C-4 EN FG .....	53
FIGURE 17 : ÉCHANTILLON D-1 EN FD.....	54
FIGURE 18 : RÉSULTATS MEB/EDS DES ÉCHANTILLONS EN FD, A) D-1, B) D-2, C) D-3 ET D) D-4 .....	55
FIGURE 19 : ÉCHANTILLON D-2 EN FD.....	56
FIGURE 20 : ÉCHANTILLON D-3 EN FD.....	57
FIGURE 21 : ÉCHANTILLON D-4 EN FD.....	58

FIGURE 22 : ÉCHANTILLON M-1 - CONDUITE EN FONTE GRISE ET CONDUITE EN FONTE DUCTILE RELIÉES PAR UN MANCHON EN ACIER .....	60
FIGURE 23 : RÉSULTATS MEB/EDS DE L'ÉCHANTILLON M-1 : SURFACE EN FG EN CONTACT AVEC A) LE SOL, B) L'ACIER ; SURFACE EN FD EN CONTACT AVEC C) LE SOL, D) L'ACIER ; SURFACE EN ACIER EN CONTACT AVEC E) LE SOL, F) LA FG, G) LA FD .....	61
FIGURE 24 : ÉCHANTILLON M-2 - CONDUITE EN FG RELIÉE À UN COMPOSANT EN ACIER VIA UN MANCHON EN ACIER .....	64
FIGURE 25 : RÉSULTATS MEB/EDS DE L'ÉCHANTILLON M-2 : SURFACE EN FG EN CONTACT AVEC A) LE SOL, B) L'ACIER ; SURFACE EN ACIER EN CONTACT AVEC C) LE SOL, D) LA FG .....	65

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : CLASSIFICATION DES FACTEURS DE DÉTÉRIORATION (D'APRÈS INFRAGUIDE, 2003) .....	4
TABLEAU 2 : CLASSIFICATION DE L'AGRESSIVITÉ DU SOL SELON LEI AND SÆGROV (1998).....	7
TABLEAU 3 : RÉSEAU DE DISTRIBUTION DE LA VILLE DE QUÉBEC .....	29
TABLEAU 4 : SOMMAIRE DES ÉCHANTILLONS DE MÉTAUX PRÉLEVÉS SUR LE RÉSEAU DE QUÉBEC.....	41
TABLEAU 5 SOMMAIRE DES ÉCHANTILLONS DE SOLS PRÉLEVÉS SUR LE RÉSEAU DE QUÉBEC .....	41
TABLEAU 6 : ÉVALUATION DE LA CORROSIVITÉ DU SOL À L'AIDE DE LA MÉTHODE EN 10 POINTS (ADAPTÉ DE AWWA, 1971) .....	43

## Remerciements

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à ma directrice de recherche, Sophie Duchesne, pour son soutien indéfectible, ses conseils et ses précieuses idées tout au long de cette recherche. Son expertise et son encouragement ont été essentiels à l'achèvement de ce projet de recherche.

Je suis également reconnaissante envers mon co-directeur, Peter Vanrolleghem, dont les connaissances et le mentorat ont grandement contribué à la profondeur et à la qualité de ce travail. Ses retours constructifs et son dévouement ont été essentiels pour façonner cette recherche.

J'adresse mes sincères remerciements à la Ville de Québec pour leur collaboration et la fourniture des données nécessaires à cette étude.

Enfin, je souhaite exprimer ma sincère appréciation à ma famille, mes amis et mes collègues pour leur compréhension, leur patience et leur soutien indéfectible tout au long de ce parcours. Vos encouragements ont été une source constante de motivation.

Merci à tous pour vos contributions et votre soutien, qui ont rendu cette recherche possible.



## Résumé

Ce mémoire explore le processus de corrosion des composants métalliques au sein des réseaux de distribution d'eau (RDE), en se concentrant sur les infrastructures souterraines. La corrosion représente une menace importante pour l'intégrité structurale et la longévité des actifs souterrains, nécessitant une compréhension approfondie des facteurs qui contribuent à la corrosion sur les conduites métalliques enterrées.

Des échantillons de conduites et de sol recueillis du RDE de la ville de Québec ont été analysés pour quantifier les effets de diverses propriétés du sol sur la corrosion. La tomographie à densité (CT-scan) a fourni des informations détaillées sur la structure interne et l'intégrité des échantillons, identifiant les zones de corrosion significative. La microscopie électronique à balayage (MEB) et la spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS) ont ensuite été utilisées pour examiner ces zones afin de caractériser les produits de corrosion et leur composition élémentaire. L'analyse a révélé que la résistivité et la teneur en humidité du sol influencent significativement la corrosion des métaux enterrés. En particulier, la corrosion graphitique a été identifiée comme le type de corrosion dominant dans les conduites en fonte grise (FG), exacerbée par la présence d'ions agressifs tels que le chlorure. Les conduites en fonte ductile (FD), en revanche, ont présenté un taux élevé de corrosion localisée. Les images du CT-scan ont révélé que les conduites en FG présentaient une structure plus poreuse et plus hétérogène en raison de la corrosion graphitique, tandis que les conduites en FD montraient une structure plus uniforme et plus dense, suggérant une meilleure résistance à la corrosion. L'analyse des échantillons de sol a souligné l'influence des conditions environnementales, telles que la résistivité et le drainage, sur la corrosion.

## Abstract

This thesis explores the corrosion behaviour of metallic components within water distribution networks (WDNs), focusing on buried infrastructure and the effectiveness of cathodic protection (CP) systems. Corrosion poses a significant threat to the structural integrity and longevity of underground assets, necessitating a comprehensive understanding of the factors contributing to corrosion-related failures.

The pipe and soil samples collected from Quebec City's WDN were analyzed to quantify the effects of various soil properties on corrosion. Computed Tomography (CT) scanning provided detailed insights into the internal structure and integrity of the samples, identifying areas of significant corrosion. Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) further examined these areas to characterize the corrosion products and their elemental composition. The analysis revealed that soil resistivity and moisture content significantly influence the corrosion behaviour of buried metals. Specifically, graphitic corrosion was identified as the dominant type of corrosion in cast iron (CI) pipes, exacerbated by the presence of aggressive ions such as chloride. Ductile iron (DI) pipes, on the other hand, exhibited a high rate of localized corrosion. CT-scan images revealed that CI pipes exhibited a more porous and inhomogeneous structure due to graphitic corrosion, while DI pipes showed a more uniform and dense structure, suggesting better resistance to internal degradation. Soil analysis underscored the significant role of environmental conditions, such as resistivity and drainage in influencing corrosion.

# 1 Introduction

---

Les réseaux de distribution d'eau potable (RDE) sont des infrastructures urbaines vitales, garantissant un approvisionnement fiable en eau potable aux communautés. Ces réseaux, constitués majoritairement de conduites souterraines en métaux ferreux, sont de plus en plus menacés par la corrosion externe induite par les conditions du sol. Selon les données d'une enquête de l'American Water Works Association, près de 70 % des conduites souterraines en métaux ferreux se détériorent en raison des conditions corrosives du sol (Romer et al., 2004), ce qui souligne la nécessité d'aborder les facteurs contribuant à cette dégradation.

Le Bulletin de Rendement des Infrastructures Canadiennes 2020 (CIRC, 2019) souligne la gravité du problème, révélant que 25 % des systèmes de distribution d'eau au Canada sont classés dans un état « passable » à « très mauvais ». Cette classification reflète une dégradation de l'état des systèmes par rapport aux normes établies pour les infrastructures souterraines, soulevant ainsi le risque de réduction de la capacité hydraulique en raison de bris de conduites principales. La disponibilité limitée de données complètes sur ces réseaux, de même que les contraintes financières liées aux analyses approfondies, accentuent encore cette problématique. Compte tenu du manque de données, il est essentiel d'acquérir des connaissances sur les mécanismes de détérioration et de corrosion par des méthodes alternatives. Ceci peut être réalisé notamment en analysant des données historiques et à l'aide d'examen et d'analyses expérimentales détaillés.

Compte tenu du rôle important de la corrosion dans la détérioration des RDE, cette recherche se concentre sur une analyse expérimentale visant à étudier la corrosion d'échantillons métalliques souterrains. En complément, une analyse du sol est effectuée pour identifier les principaux facteurs influençant la corrosion. L'objectif est de quantifier les effets de ces facteurs sur la détérioration des composants métalliques souterrains, permettant ainsi une compréhension détaillée des mécanismes de corrosion.

Les matériaux couramment utilisés dans les composants des RDE – polychlorure de vinyle (PVC), fonte grise (FG), fonte ductile (FD), cuivre et acier – présentent des taux de bris variables. Les conduites métalliques, telles que les conduites en FG et FD, qui sont très utilisées au Canada, sont particulièrement sensibles à la détérioration causée par la corrosion. La corrosion externe, facteur majeur de dégradation des conduites en FG et FD, est plus prononcée dans les segments exposés à des sols agressifs ou à des courants vagabonds. Ce type de corrosion compromet la

structure des conduites et peut entraîner des bris, nécessitant des réparations coûteuses et posant des risques pour l’approvisionnement en eau.

Ce projet vise à explorer de manière approfondie le comportement de la corrosion des composants métalliques au sein des RDE, en particulier pour les infrastructures souterraines. Bien que plusieurs recherches aient déjà analysé les mécanismes de corrosion à l’échelle internationale et nationale, cette étude offre une perspective spécifique aux conditions des réseaux d’eau du Québec, en enrichissant les connaissances actuelles par l’analyse de l’interaction entre les propriétés des sols locaux, les caractéristiques structurales des matériaux et les processus de corrosion dans ce contexte spécifique. L’objectif de cette recherche est défini comme suit :

- Identifier les facteurs qui favorisent la corrosion des conduites de FG/FD et des composants métalliques de RDE en analysant la structure d’échantillons corrodés.

Les chapitres suivants de cette thèse sont structurés pour fournir une compréhension plus claire de la recherche entreprise. Le chapitre suivant propose une revue de la littérature examinant le phénomène de corrosion dans les composants des RDE, identifiant les facteurs influents et évaluant les méthodologies de protection existantes. Ensuite, le chapitre de la méthodologie détaille l’approche expérimentale et les différentes analyses effectuées pour atteindre les objectifs de recherche.

Le chapitre des résultats et de la discussion présente les résultats de l’étude, en interprétant les données dans le contexte des objectifs de recherche. Un aperçu du comportement de la corrosion des composants métalliques souterrains y est présenté. Enfin, le chapitre de conclusion résume les principaux constats, discute de leurs implications et suggère des pistes de travaux futurs.

## 2 Revue de littérature

---

Le rôle des paramètres environnementaux et des caractéristiques des matériaux dans l'influence du comportement à la corrosion est d'abord exploré. Ensuite, une revue de la littérature est essentielle pour comprendre les méthodes expérimentales utilisées pour analyser la corrosion dans les réseaux de distribution d'eau. Elle couvre diverses approches expérimentales, telles que la microscopie électronique à balayage (MEB), l'analyse par spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS) et la tomodynamométrie, qui fournissent des informations détaillées sur les mécanismes de corrosion et les facteurs associés. Les méthodes statistiques sont également abordées, avec un accent particulier sur l'analyse de l'efficacité des systèmes de PC. Cette revue de littérature met en évidence l'importance des méthodes expérimentales et statistiques pour développer une meilleure compréhension de la corrosion et de son impact sur les systèmes de distribution d'eau.

### 2.1 Facteurs ayant un impact sur les bris des conduites d'eau

Au cours des dernières décennies, de nombreux chercheurs ont tenté de relier les taux de bris des conduites d'eau aux caractéristiques des conduites et à leurs conditions environnementales. Cette section contient un examen des études qui ont été menées sur les caractéristiques des conduites afin de déterminer la nature et l'étendue de leur impact sur les bris des conduites. Rajani et Tesfamariam (2005) ont rapporté que, dans la plupart des cas, une combinaison de circonstances conduit à la défaillance d'une conduite. InfraGuide (2003) a classé les facteurs contribuant à la détérioration des conduites d'eau en trois catégories principales, soit physiques, environnementales et opérationnelles, comme le montre le Tableau 1.

Tableau 1 : Classification des facteurs de détérioration (d'après InfraGuide, 2003)

Type de facteurs de détérioration	Exemples
Physique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Matériau de la conduite</li> <li>- Épaisseur de paroi de la conduite</li> <li>- Âge de la conduite</li> <li>- Diamètre de la conduite</li> <li>- Longueur de la conduite</li> <li>- Type de joint</li> <li>- Revêtement de la conduite</li> <li>- Couplage de métaux différents</li> <li>- Installation des conduites</li> <li>- Fabrication de la conduite</li> </ul>
Environnemental	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Matériau de remblai</li> <li>- Corrosion</li> <li>- Type de sol</li> <li>- Emplacement de la conduite</li> <li>- Climat</li> <li>- Courants vagabonds</li> </ul>
Opérationnel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pression d'écoulement</li> <li>- Fuites</li> <li>- Qualité de l'eau</li> </ul>

Afin de mieux comprendre la relation entre la défaillance d'une conduite et les facteurs contributifs, à savoir les caractéristiques de la conduite et du sol environnant parmi celles présentées dans le Tableau 1, ces relations sont brièvement expliquées dans les sections suivantes.

### 2.1.1 Diamètre des conduites

Toutes les études menées sur la relation entre la taille des conduites et leur fréquence de bris indiquent qu'il existe une relation inverse entre le diamètre des conduites et le taux de bris. Kettler et Goulter (1985) sont arrivés à la conclusion que les conduites de plus petit diamètre, en raison d'une épaisseur de paroi et d'une résistance inférieures, ont une fréquence de bris plus élevée. De plus, Boxall et al. (2007) ont proposé une relation exponentielle décroissante entre le taux de bris et le diamètre de la conduite. Rajani et Tesfamariam (2005) ont réalisé que le taux de croissance d'une seule piqûre de corrosion dans des conduites en FD de petit diamètre est presque toujours plus dommageable aux conduites minces (petit diamètre) qu'aux conduites épaisses (grand diamètre) si toutes les autres propriétés restent inchangées. Tesfamariam et al. (2006) ont montré que les conduites de grand diamètre sont plus sensibles aux charges externes et que les conduites de petit diamètre sont sensibles à l'ampleur de la perte de support du remblai.

### **2.1.2 Âge des conduites**

Les premières études dans ce domaine n'ont pas révélé de relation claire entre l'âge des conduites et le taux de bris. Certaines études suggèrent que l'âge n'a aucun effet sur la défaillance des conduites (Ciottoni, 1983; O'Day, 1982, 1983; O'Day et al., 1980) tandis que d'autres concluent qu'il existe une relation directe entre l'âge et la défaillance des conduites (Clark et al., 1982). Des études ultérieures ont montré que, dans certains cas, l'âge des conduites à lui seul n'a pas beaucoup d'effet sur la défaillance des conduites (Goulter & Kazemi, 1988), mais qu'il peut avoir un impact significatif en combinaison avec d'autres facteurs contribuant à la défaillance des conduites. Par conséquent, son intégration dans les modèles peut permettre de fournir des résultats plus précis (Herbert, 1994). Andreou et al (1987) ont examiné l'historique des bris de conduites dans des réseaux où l'âge des conduites était le même, mais le moment de l'installation différent, démontrant que la période d'installation a un plus grand effet sur la défaillance des conduites que l'âge des conduites elle-même.

### **2.1.3 Matériau des conduites**

Étant donné que le matériau d'une conduite détermine sa résistance aux facteurs causant les bris, il joue un rôle important dans l'occurrence des bris d'une conduite. Certaines études sur les RDE ont conduit à l'idée selon laquelle différents modèles de bris de conduite devraient être utilisés pour différents matériaux de conduite (Lei & Sægrov, 1998). Selon la même approche, Kettler et Goulter (1985) ont étudié les variations des taux de bris selon le matériau des conduites et ont examiné le type de bris (p. ex., fissuration longitudinale, circonférentielle ou bris du joint) pour chaque matériau de conduites. Leurs résultats montrent que le bris des joints est prédominant pour les tuyaux en FG alors que le mode de bris prédominant pour les tuyaux en amiante-ciment (AC) est la fissuration circonférentielle.

Au Canada, les conduites d'eau sont principalement constituées de PVC, d'acier et de FG ou de FD, parmi lesquelles les conduites en FG ont les taux de bris les plus élevés (Folkman, 2018). Dans les conduites en FG, le graphite se retrouve sous la forme de flocons suite au processus de coulage, ce qui rend le matériau plus fragile et susceptible de se briser. Depuis les années 1970, les conduites en FD ont été utilisées dans de nombreux RDE (Kirmeyer et al., 1994). Une conduite en FD est différente d'une conduite FG, car l'introduction d'éléments graphitisants tels que le magnésium pendant le processus de coulage favorise la sphéroïdisation du graphite sous la forme de nodules plutôt que de flocons. Cette distribution uniforme du graphite dans la matrice ferritique rend le matériau moins fragile et plus résistant que la FG et permet un comportement

élastique à des niveaux de contrainte inférieurs. Cependant, comme les conduites en FD ont une épaisseur de paroi moins importante que les conduites en FG de taille équivalente, dans de nombreux cas, la perforation apparaît relativement peu de temps après l'installation (Makar & Rajani, 2000). En raison de la structure supérieure des conduites en FD, ces conduites ont été initialement installées avec une protection minimale contre la corrosion, voire inexistante; cependant, au fil des années, il a été constaté que dans des sols agressifs, les conduites en FD peuvent corroder au même rythme que celles en FG (Makar & Rajani, 2000). Par conséquent, l'installation de conduites en FD doit être accompagnée d'une protection contre la corrosion.

L'utilisation de conduites en AC dans les RDE a été associée à des problèmes de santé liés à la libération de fibres d'amiante dans l'eau potable en raison de l'attaque chimique de la conduite et de l'érosion de la surface interne par l'eau. Il a été observé que dans certains environnements, les conduites en AC sont sujettes à des dommages dus à divers processus chimiques qui lixivient le matériau cimentaire ou pénètrent dans la paroi de la conduite pour former des produits qui affaiblissent la matrice cimentaire (Mordak & Wheeler, 1988). Les conduites en acier sont relativement coûteuses, mais ce sont les plus solides et les plus durables. Elles tolèrent des pressions élevées, se soudent facilement et ont des coûts d'installation et de transport inférieurs (Bhatia, 2019).

Non corrosives et extrêmement légères, les conduites en PVC sont faciles à installer et à transporter, mais elles ont l'inconvénient de posséder une faible résistance physique et thermique. Lorsqu'exposées à de lourdes charges, leur comportement fragile peut entraîner la rupture. De plus, ce type de conduite se déforme à des températures supérieures à 65 °C. Cependant, même pour des réseaux avec des conduites en PVC, d'autres composants métalliques tels que les valves sont présents. La corrosion doit donc toujours être prise en compte.

#### **2.1.4 Type de sol**

Hu et Hubble (2005) ont examiné l'influence des facteurs de détérioration des conduites d'eau principales à Régina, au Canada. Ils ont signalé que l'état du sol était un facteur critique dans les mécanismes de défaillance des conduites d'eau principales de la région. Les conditions du sol affectent les taux de corrosion externe des conduites d'eau et jouent un rôle important dans le processus de dégradation des conduites, en particulier celles en fonte.

Lei et Saegrov (1998) ont suggéré une classification de l'agressivité du sol, présentée au Tableau 2.



Tableau 2 : Classification de l'agressivité du sol selon Lei and Sægrov (1998)

Classification	Exemples
Très agressif	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zones de marée</li> <li>- Niveau élevé de la nappe phréatique</li> <li>- Sol naturel avec une résistivité inférieure à 750 ohm·cm</li> <li>- pH inférieur à 5</li> <li>- Pollution par des produits chimiques</li> <li>- Courant vagabonds</li> </ul>
Modérément agressif	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Argile</li> <li>- Zone humide</li> <li>- Non homogène</li> </ul>
Pas agressif	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résistivité naturelle du sol supérieure à 2500 ohm·cm</li> <li>- Conditions sèches</li> <li>- Sable</li> <li>- Moraine</li> </ul>

Dans une étude du profil des bris des conduites d'eau en AC, Mordak et Wheeler (1988) ont observé que la répartition des bris au cours de l'année était aléatoire dans les zones où les sols sableux/gravier étaient courants, alors que dans les zones aux sols argileux cohésifs, la plupart des bris se produisaient pendant les mois secs de l'été. Les sols argileux cohésifs étaient également associés à un nombre élevé de bris circonférentiels, généralement liés aux contraintes de flexion.

### 2.1.5 Saisonnalité

Les changements saisonniers peuvent entraîner une augmentation du taux de bris des conduites. Les différences de température entre la conduite et le sol lors des changements saisonniers entraînent le développement de contraintes dans la conduite. En général, le taux de bris des conduites atteint une pointe en hiver et une autre en été. Le retrait du sol dû à la sécheresse lors de périodes chaudes entraîne des contraintes plus importantes dans les conduites, les détériorant ainsi (Rajani et al., 1996; Sægrov et al., 1999). La pointe hivernale des bris de conduites est due au gel et à l'expansion de l'humidité du sol, qui provoquent des mouvements du sol, des forces de traction et une compression supplémentaire sur les conduites (Sægrov et al., 1999). Cela entraîne la défaillance des conduites les moins résilientes affectées par un sol corrosif.

Newport (1981) a rapporté que les taux de bris les plus élevés en hiver sont associés aux premières gelées hivernales, provoquant la défaillance des conduites les plus faibles. Cette recherche affirme également que l'impact du gel sur les bris des conduites souterraines est plus

élevé pendant une période de gel prolongée, ce qui permet au gel de pénétrer plus profondément dans le sol.

### **2.1.6 Bris précédents**

L'historique des bris des conduites peut être un facteur important à prendre en compte pour prédire les bris futurs (Walski & Pelliccia, 1982). Le taux de bris augmente souvent à chaque bris (Andreou, 1986). Goulter et Kazemi (1988) ont suggéré que les opérations de réparation et d'excavation après un bris, en raison de l'augmentation du mouvement du sol, pourraient provoquer des bris ultérieurs. Clark et al. (1982) ont estimé la probabilité d'un bris ultérieur après un premier bris. Leurs résultats ont démontré que le taux de bris augmente de façon exponentielle avec le temps après le premier bris et qu'il existe une forte probabilité de bris ultérieure au cours des cinq années suivantes.

## **2.2 Corrosion**

La détérioration induite par la corrosion est l'une des principales préoccupations liées à l'état des RDE, car la corrosion est inévitable dans tous les composants métalliques souterrains des RDE. Rajani et Kleiner (2003a) ont affirmé que le principal mécanisme de détérioration de la paroi externe des conduites en FG est la corrosion.

La corrosion résulte de deux réactions simultanées : l'oxydation d'un métal à l'anode et la réduction d'une substance à la cathode. En tant que réaction électrochimique, pour que la corrosion ait lieu, les trois conditions suivantes doivent être remplies : i) une différence de potentiel entre deux sites sur la surface métallique, pour agir comme anode et cathode, ii) un chemin électrique entre l'anode et une cathode pour permettre le flux d'électrons et iii) un électrolyte capable de conduire l'électricité.

### **2.2.1 Mécanismes de corrosion**

Pour commencer à comprendre l'étendue du problème de corrosion, il est important de connaître, d'abord, les mécanismes par lesquels les dommages commencent à se produire.

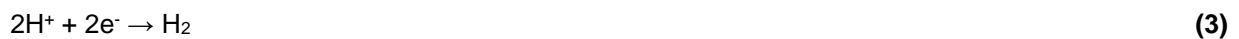
La corrosion externe des conduites d'eau est fonction de l'interaction entre la conduite et le sol qui l'entoure. En théorie, le processus de corrosion suit un processus électrochimique simple et bien connu, mais, en général, la grande variété de conditions dans lesquelles se trouvent les

conduites d'eau conduit à de nombreux mécanismes de corrosion possibles. Les principales étapes de la corrosion d'un métal, par exemple le fer, semblent impliquer les équations suivantes.

La réaction d'oxydation a lieu sur les sites anodiques. Une fois exposé aux ingrédients oxydants, le fer s'oxyde rapidement, générant des électrons et libérant des ions de fer, ce qui entraîne une perte de métal.



Simultanément, la réaction de réduction se produisant à la cathode implique la réduction d'un agent oxydant, tel que l'air, l'oxygène ou les ions hydrogène (dans un environnement presque neutre ou acide, les molécules d'eau sont dissociées en ions hydrogène et ions hydroxyle). Un agent oxydant est nécessaire pour accepter les électrons émis par le métal lors de la réaction anodique.



Les ions de fer libérés ( $\text{Fe}^{2+}$ ) réagissent entre autres avec l'oxygène et forment des oxydes de fer (III), communément appelés rouille.



Les équations mentionnées sont les réactions de base responsables de la corrosion électrochimique, comme le démontre la Figure 1.

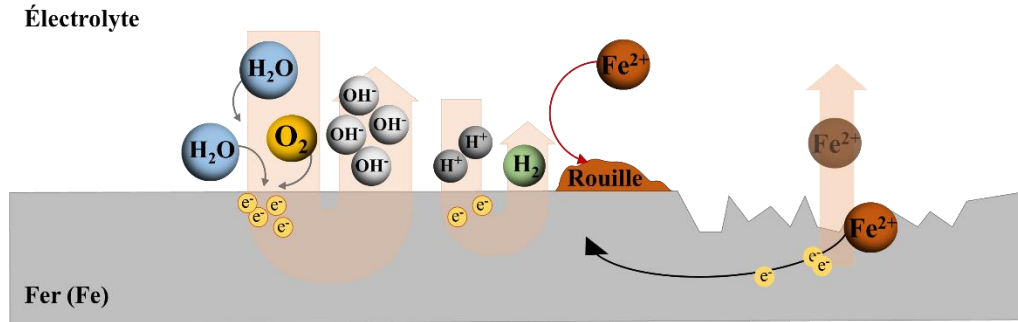


Figure 1 : Présentation schématique des réactions de corrosion

## 2.2.2 Types de corrosion

La corrosion peut se produire sous diverses formes et pour différentes raisons. Certains des types de corrosion les plus courants sont abordés ci-dessous. Le type d'attaque de corrosion qui se produit dépend de la proportion relative de zones anodiques et cathodiques.

- **Corrosion généralisée**

Dans le cas où l'attaque de corrosion est répartie uniformément, c'est-à-dire que les sites anodiques et cathodiques de la surface métallique sont presque égaux, on parle de corrosion généralisée.

- **Corrosion localisée**

Une corrosion localisée se produit lorsque les zones anodiques et cathodiques de la surface métallique ne sont pas égales. Ceci est le résultat de différences dans le matériau ou dans l'environnement dans lequel la conduite est située. O'Day (1989) a identifié la corrosion localisée comme la principale raison de la détérioration externe des conduites en matériaux ferreux, déterminée par les propriétés du sol, telles que le pH, la résistivité, la teneur en humidité et le potentiel d'oxydoréduction (redox). La corrosion localisée peut être distinguée en différents types.

La corrosion par cellules de concentration est un type de corrosion localisée qui se produit en raison des variations de la concentration de l'électrolyte dans différentes parties de la surface métallique (Charnig & Lansing, 1982). Il existe trois types généraux de corrosion par cellules de concentration: i) lorsqu'il y a une variation de la concentration d'oxygène, le métal peut développer des régions anodiques/cathodiques, ce qui entraîne une **corrosion par cellules de**

**concentration en oxygène**; ii) au contact d'une solution aqueuse, il existe une différence de concentration en métal autour de la surface de contact ; la concentration plus élevée de métal sous la surface de contact et la concentration plus faible près des surfaces des crevasses dans le substrat métallique créent un potentiel électrique qui provoque des **cellules de concentration d'ions métalliques**; iii) la **corrosion cellulaire passive-active** se produit lorsque le métal repose sous un film passif adhérent pour se protéger contre la corrosion. Par exemple, si un film de sels accumulés sur un substrat métallique est rompu, la surface métallique active située sous le film passif sera exposée à la corrosion.

- **Corrosion par piqûres**

La corrosion par piqûres est un type de corrosion localisée qui se produit souvent en raison d'une inhomogénéité du dépôt métallique à la surface ou de la rupture d'un film protecteur (Szkłarska-Smiałowska, 2005). Une fois la piqûre initiée, la différence de concentration en oxygène entre la base de la piqûre et la surface métallique conduit à la formation d'une cellule de concentration. Les piqûres se produisent généralement dans les solutions contenant des halogénures, parmi lesquels, pour la plupart des métaux, l'ion chlorure est le plus agressif.

- **Corrosion caverneuse**

La corrosion caverneuse est un autre type de corrosion localisée des cellules de concentration qui se produit préférentiellement dans les régions de la surface métallique où le transfert de masse est limité, comme la crevasse entre deux surfaces de jonction. Elle est causée par une différence de concentration de certains constituants, généralement de l'oxygène, entre les deux sites, conduisant à la formation d'une cellule électrochimique (Syrett & Begum, 2016).

- **Érosion/corrosion**

L'érosion/corrosion est un type de perte de matière très complexe qui implique des processus à la fois électrochimiques et mécaniques. Ce type de corrosion peut affecter considérablement la durée de vie du composant, car non seulement il endommage le mince film passif à la surface du matériau, mais également le métal de base (Hu et al., 2011).

- **Corrosion microbienne**

Ce type de corrosion se produit lorsque des bactéries aérobies ou anaérobies augmentent le taux de corrosion. Les micro-organismes accélèrent la corrosion en générant des sous-produits pouvant interagir avec les produits de corrosion ou en transformant un sol non corrosif en un

environnement très agressif. Une étude a révélé qu'environ 20 à 30 % de la corrosion externe dans les pipelines souterrains est liée à la corrosion induite par des microbes (Al-Darbi, 2004).

- **Fissuration par corrosion sous contrainte (CSC)**

La fissuration par corrosion sous contrainte (CSC) se produit en raison de l'influence combinée d'un environnement corrosif et de contraintes de traction, souvent à des températures élevées. Les contraintes peuvent résulter de charges de traction sur le métal ou de contraintes résiduelles induites lors du processus de fabrication, telles que le formage à froid, le soudage, le meulage, etc. En CSC, la surface reste généralement intacte tout en étant remplie de fissures microscopiques, ce qui rend difficile de détecter la corrosion avant la rupture. Certains alliages subissent la CSC dans des environnements spécifiques. Par conséquent, la sélection de matériaux appropriés pour un environnement donné peut réduire le risque de défaillance due à la CSC.

- **Corrosion graphitique**

La corrosion graphitique est un mécanisme de corrosion galvanique principalement associé aux conduites en FG. Ce phénomène de corrosion se produit lorsque le composant acier, matrice de la structure acier/graphite de la FG, devient anodique pour le graphite, entraînant la formation d'une matrice prédominante d'oxyde de fer en remplacement de la matrice d'acier initiale. En présence d'un électrolyte, généralement de l'eau plus ou moins contaminée, la corrosion graphitique se manifeste par un processus de lixiviation conduisant à la détérioration de la matrice en acier. Il est important de noter qu'une fois la corrosion initiée, la surface corrodée a tendance à conserver sa forme et son aspect extérieur d'origine, masquant ainsi l'affaiblissement sous-jacent de l'intégrité structural (Shankar et al., 2020). La corrosion graphitique a été principalement identifiée dans les conduites en FG souterraines exposées à l'eau et aux contaminants du sol. Les causes de la corrosion graphitique proviennent de la microstructure de la FG, où des flocons de graphite sont présents dans une matrice perlitique. La recherche souligne le besoin urgent de conscientisation, d'évaluation et de mise en place de mesures préventives pour remédier à la susceptibilité des conduites en FG à la corrosion graphitique, compte tenu du risque de défaillances des systèmes de services publics vieillissants (Jur et al., 2021).

### **2.2.3 Facteurs favorisant la corrosion**

Une connaissance approfondie du sol et de ses propriétés constitue la première étape pour comprendre comment ces paramètres influencent la corrosion des conduites souterraines. Il a

été établi que la corrosivité d'un sol est affectée par des propriétés telles que le type de sol, le pH, la résistivité électrique, la teneur en humidité et les bactéries sulfato-réductrices (Romanoff, 1964, O'Day, 1989).

- **Type de sol**

La corrosivité d'un sol envers le métal est affectée par les propriétés physiques, la minéralogie et la teneur en matières organiques du sol (Jack & Wilmott, 2011). En ingénierie, les sols sont globalement classés en sols à grains grossiers (sable et graviers), sols à grains fins (limons et argiles) et sols hautement organiques (tourbes) (ASTM, 2011). Les propriétés physiques des sols, telles que la perméabilité, la capacité de rétention d'eau (p. ex. taille des particules, répartition des particules) et la structure globale, ont les effets les plus importants sur la corrosion. La perméabilité du sol contrôle la vitesse de déplacement de l'eau et de l'air dans le sol. Cela peut affecter la teneur en humidité du sol à proximité d'une conduite et sa variation avec le temps et le degré d'aération. Par exemple, les sols à grains grossiers ont une perméabilité élevée, une faible capacité de rétention d'eau, un bon drainage et une bonne aération ; tandis que les sols à grains fins tels que l'argile ont une faible perméabilité, une capacité de rétention d'eau élevée et généralement un mauvais drainage et une mauvaise aération, ce qui entraîne un comportement corrosif du sol à proximité des conduites en matériaux ferreux.

Clark et al. (1982) ont pris en compte la présence d'un environnement corrosif dans l'analyse des bris de conduites, mais ont trouvé une faible corrélation entre la longueur de conduite posée dans un environnement corrosif et la fréquence de bris. En outre, Le Gat and Eisenbeis (2000) ont utilisé la corrosivité du sol comme variable explicative dans l'analyse des bris de conduites. Ils ont conclu que les paramètres ayant l'impact le plus important sur les bris de conduites sont le nombre de bris antérieurs, le diamètre, le type de sol, le matériau de la conduite, son emplacement et l'intensité du trafic.

- **pH**

Le pH du sol est considéré comme l'un des facteurs pouvant avoir un impact sur la corrosion des conduites souterraines. Les changements de pH produits par les pluies acides, les déchets industriels, l'agriculture, la lixiviation des minéraux et les activités microbiennes peuvent entraîner une augmentation du risque de corrosion dans les pipelines souterrains (Pritchard et al., 2013).

Cependant, dans une étude menée par Penhale (1984), aucune corrélation n'a été trouvée entre le pH du sol et le taux de corrosion. Aussi, Rajani et Makar (2000) ont étudié l'effet de différentes

valeurs de pH sur la corrosion des conduites en FG et n'ont trouvé aucune corrélation. Doyle et Grabinsky (2003) ont examiné la relation entre le pH du sol et la profondeur maximale des piqûres de corrosion ; ils ont conclu que les sols à faible pH sont plus corrosifs. Cependant, ils ont affirmé que les sols dont le pH varie de 5,5 à 8,5 peuvent également être considérablement corrosifs en présence de micro-organismes comme les bactéries sulfato-réductrices, qui se développent dans un environnement anaérobie.

- **Teneur en humidité**

La teneur en humidité du sol est importante à prendre en compte lors de l'évaluation de la corrosivité du sol car elle a une influence directe sur la résistivité du sol. La présence d'humidité dans un sol contenant des sels dissous peut conduire à un environnement agressif.

Wasim et al. (2016) ont étudié l'effet combiné de l'humidité du sol et du pH sur le taux de corrosion. Ils ont observé qu'un pH bas de 3, associé à une forte teneur en humidité, accélère le taux de corrosion en fragilisant le film passif à la surface du métal. Des recherches connexes ont révélé que le taux de corrosion augmente avec une augmentation de la teneur en humidité du sol jusqu'à une certaine teneur en humidité, puis, avec une augmentation supplémentaire de la teneur en humidité, le taux de corrosion diminue (Wasim, Shoaib, Mubarak, & Asiri, 2018). L'explication de ce comportement est qu'après avoir atteint la teneur en humidité critique, l'apport d'oxygène à la surface métallique diminue, ce qui entraîne une diminution du taux de corrosion.

De plus, Petersen et Melchers (2012) ont affirmé que dans les sols moins humides, le fer s'oxyde rapidement pour former un film protecteur qui inhibe la diffusion de l'oxygène.

- **Teneur en oxygène dissous**

La présence d'oxygène dissous influence de manière significative la corrosion de la FG, un facteur essentiel pour la longévité des structures métalliques. L'augmentation de la teneur en oxygène dissous accélère l'oxydation de la FG, conduisant à la formation d'oxydes de fer ou de rouille. Ce processus de corrosion, exacerbé par un niveau élevé d'oxygène dissous, présente un risque pour l'intégrité structurale des composants en FG, tels que les conduites. La gestion de la teneur en oxygène dissous dans les systèmes d'eau est cruciale pour atténuer les effets de la corrosion et prolonger la durée de vie des infrastructures en FG (Jażdżewska et al., 2020).

Cependant, l'effet de l'oxygène dissous diminue après un certain temps en raison de la formation d'un film passif de produits de corrosion sur le substrat d'une conduite (Sarin et al., 2004).



La concentration en oxygène dissous diminue avec une augmentation de la teneur en humidité et du degré de compactage du sol. Ces variations de concentration en oxygène peuvent également développer des cellules de concentration qui contribuent à la corrosion. Dans les conduites dont le fond est adjacent à une nappe phréatique, une cellule de concentration différentielle d'oxygène se forme et les zones en contact avec l'eau agissent comme une anode et se corrodent (Romanoff, 1964).

La concentration en oxygène dissous peut également varier en raison des différents types de sol ou de la profondeur d'enfouissement. Un changement différentiel dans la teneur en oxygène du sol peut développer une cellule de concentration différentielle, ce qui contribue à la corrosion. Un cas courant de cellule différentielle d'oxygène se développe entre le haut et le bas d'une conduite, ce qui entraîne de la corrosion (Roberge, 2008).

- **Résistivité du sol**

La résistivité du sol joue un rôle central en influençant la corrosion des composants métalliques souterrains des RDE. La résistivité du sol affecte la conductivité électrique et, par conséquent, la vitesse de corrosion des métaux. La faible résistivité du sol renforce l'environnement corrosif, accélérant potentiellement la dégradation des structures métalliques souterraines. Dans les régions à forte résistivité du sol, le risque de corrosion a tendance à être plus faible.

De nombreuses études ont indiqué que les sols ayant une résistivité inférieure à 700  $\Omega$ -cm sont très corrosifs, avec une corrosion minimale observée dans les sols dépassant 5 000  $\Omega$ -cm (Hamilton, 1960; Romanoff, 1964). Doyle et al. (2003) ont trouvé une corrélation significative entre la résistivité du sol et la profondeur maximale des piqûres de corrosion dans les conduites métalliques souterraines. Les résultats d'une étude de Rajani et Makar (2000) ont révélé qu'une résistivité plus faible dans les sols correspond à une profondeur maximale accrue des piqûres de corrosion sur les conduites d'eau. De même, Alamilla et al. (2009) ont observé des taux de corrosion élevés dans des sols à faible résistivité pour les conduites en FG et en FD. Cependant, des résultats contradictoires existent concernant la corrélation entre la résistivité du sol, la corrosion et les bris de conduites. L'enquête d'O'Day (1989) sur le réseau d'eau de Philadelphie a révélé une faible corrélation entre le taux de corrosion et la résistivité du sol. En revanche, Melchers et Wells (2018) ont noté l'absence de corrélation évidente entre la résistivité du sol et l'occurrence des bris dans une étude portant sur des conduites en FG vieilles de 65 ans. Petersen and Melchers (2012) suggèrent que l'impact de la résistivité sur la corrosion diffère entre la corrosion à court terme et la corrosion à long terme en raison de la formation progressive d'une

couche de produits de corrosion sur les piqûres. À l'inverse, Wang et al. (2019) ont rapporté, dans une étude sur des conduites en FG dans des sols argileux, que la corrélation entre la résistivité et la perte de poids par corrosion diminue à mesure que la résistivité augmente, mettant l'accent sur une corrélation plus forte dans les sols à plus faible résistivité.

- **Bactéries sulfato-réductrices**

Tel que mentionné précédemment, la vitesse de corrosion peut être affectée par l'activité des micro-organismes. Il a été rapporté que de nombreuses formes de bactéries accélèrent la corrosion, parmi lesquelles les bactéries sulfato-réductrices ont attiré davantage l'attention (Roberge, 2008). Les bactéries sulfato-réductrices sont des bactéries anaérobies qui ne sont actives que dans les sols dépourvus d'oxygène et peuvent transformer le sol en un environnement agressif en générant des produits corrosifs. Ces bactéries réduisent les sulfates présents dans le sol et produisent du sulfure d'hydrogène qui corrode le fer pour former du sulfure de fer (Crolet, 1992).

- **Ions et produits chimiques agressifs**

Les ions agressifs tels que les ions chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) jouent un rôle important dans le processus de corrosion de divers métaux. Les ions chlorure sont particulièrement connus pour leurs effets corrosifs en raison de leur capacité à accélérer la dégradation des couches d'oxyde protectrices sur les surfaces métalliques. Lorsqu'ils sont présents en concentrations suffisantes, les ions chlorure peuvent pénétrer dans le film passif qui se forme naturellement sur les métaux, exposant le métal sous-jacent à des attaques corrosives (Ma, 2012). Ce processus, appelé corrosion par piqûres, peut entraîner des dommages localisés caractérisés par de petites piqûres ou cratères sur la surface métallique. De plus, les ions chlorure peuvent faciliter la formation d'électrolytes agressifs dans le sol ou dans les environnements aqueux, augmentant ainsi le taux de corrosion.

#### **2.2.4 Inspection et mesure de la corrosion**

Une méthode d'inspection efficace doit être précise, sensible, rentable et rapide. L'inspection visuelle, une méthode courante pour l'évaluation de la corrosion des pipelines, consiste à examiner visuellement la surface du composant pour détecter la corrosion. Cependant, pour les conduites souterraines, une excavation est nécessaire, ce qui augmente les coûts et nécessite d'interrompre la distribution d'eau. Les techniques non destructives telles que la radiographie, la mesure d'épaisseur par ultrasons (UT) et les courants de Foucault pulsés (PEC) fournissent des

informations sur la perte de masse, la perte de paroi et la détection de la corrosion, aidant ainsi à estimer l'étendue de la corrosion.

### **Inspection visuelle**

L'inspection visuelle, bien que simple, nécessite l'excavation des conduites souterraines, ce qui peut augmenter les coûts et nécessiter l'interruption de la distribution d'eau. Les aides optiques telles que les éclairages, les miroirs, les caméras, les systèmes informatiques et les analyseurs d'images numériques peuvent améliorer l'inspection visuelle. Cette méthode est généralement utilisée comme précurseur de techniques d'inspection avancées capables de détecter et de mesurer la corrosion avec une plus grande précision.

### **Radiographie numérique**

La radiographie numérique, technique non destructive de détection et de mesure des défauts dans les réseaux de conduites, offre une qualité d'image globale améliorée et un aperçu immédiat des images d'inspection. Cette méthode consiste à évaluer la projection de l'ombre et à utiliser des rayons X pour identifier la surface intérieure et extérieure de la conduite, affichant ainsi l'épaisseur de paroi précise sur toute la longueur du tuyau. Pour cette technique, il n'est pas nécessaire de vider ou d'excaver la conduite ; au lieu de cela, une source de rayons X externe et un détecteur sont positionnés à proximité de la conduite pour capturer des images détaillées. Cette méthode convient à l'inspection de divers types de corrosion, notamment la corrosion uniforme, la corrosion sous revêtement, la corrosion sous les supports de conduites et la corrosion par érosion (Edalati et al., 2006).

### **Mesure d'épaisseur par ultrasons (UT)**

La mesure d'épaisseur par ultrasons (UT) est une méthode non destructive et précise pour l'inspection de la corrosion des conduites, même à travers les revêtements. Cette technique est basée sur le mouvement des ondes ultrasonores, calculant l'épaisseur de paroi d'une conduite en mesurant le temps nécessaire à une impulsion sonore (générée par un transducteur ultrasonique) pour traverser la paroi d'une conduite et se refléter sur la paroi intérieure (Honarvar et al., 2013).

### **Analyse par courants de Foucault pulsés (PEC)**

L'analyse par courants de Foucault pulsés (PEC) est une technique d'inspection électromagnétique utilisée pour détecter la corrosion et mesurer l'épaisseur des matériaux ferromagnétiques, tels que l'acier au carbone, la FG et la FD. Dans l'analyse par PEC, un courant électrique est pulsé à travers une bobine placée près de la surface du matériau. Cela crée un champ magnétique primaire qui induit des courants de Foucault dans le matériau. La réponse de ces courants de Foucault, influencés par l'épaisseur du matériau et par la corrosion éventuelle, est ensuite détectée par la même bobine ou par une bobine secondaire. En analysant le taux de détérioration de ces courants de Foucault, l'analyse par PEC fournit une mesure volumétrique moyenne de l'épaisseur du matériau. Cette technique permet d'inspecter à travers les revêtements, ce qui en fait une méthode non invasive de détection de la corrosion (Duchesne et al., 2011).

### **Tomodensitométrie aux rayons X**

La technique de tomodensitométrie aux rayons X permet de visualiser la structure interne d'un spécimen. Elle repose sur l'atténuation des rayons X et peut être utilisée pour étudier les phénomènes de corrosion en laboratoire. La loi de Lambert-Beer est appliquée pour obtenir des images en coupe de la densité du composant, offrant ainsi un aperçu des problèmes liés à la corrosion (Beutel et al., 2000).

#### **2.2.5 Méthodes de contrôle de la corrosion**

Comme mentionné ci-dessus, la corrosion externe est un phénomène chimique ou électrochimique qui se produit en raison d'une réaction entre la surface d'une conduite et son environnement. Par conséquent, la corrosion externe peut être contrôlée en modifiant les conditions électrochimiques autour de la conduite ou en déconnectant l'interface entre la conduite et son environnement. Il existe deux principales stratégies d'atténuation de la corrosion externe, soit la protection par revêtement et la protection cathodique (PC).

- **Revêtements**

Le revêtement du matériau s'impose comme une méthode répandue et simple pour lutter contre la corrosion. En formant une barrière physique, les revêtements isolent électriquement la surface d'une conduite de son environnement, empêchant ainsi la corrosion. Lorsqu'ils sont convenablement appliqués, les revêtements peuvent protéger plus de 99 % de la surface d'une

conduite (Rajani & Kleiner, 2003b). Malgré l'efficacité des revêtements, des défauts sont inévitablement présents en raison de défauts de construction, d'une application inappropriée, de phénomènes naturels, de l'achèvement du cycle de vie du revêtement ou de contraintes du sol (Abu-Baker, 2008; Lindström & Wallinder, 2011).

#### - **Revêtements en polyéthylène**

Le revêtement en polyéthylène (PE), distinct des revêtements traditionnels, n'agit pas comme un isolant électrique. Cette enveloppe flexible isole la conduite du sol non homogène, créant un environnement uniforme avec une couche d'eau piégée passivée, empêchant les cellules de corrosion localisées. Bien qu'une corrosion initiale puisse se produire, les réactions cathodiques consomment l'oxygène présent dans l'eau emprisonnée, inhibant ainsi la poursuite de la corrosion. Les inconvénients de cette méthode incluent la création potentielle de cellules de corrosion, à long terme, dues à l'humidité emprisonnée et à un espace d'air humide entre la conduite et le sol, diminuant l'efficacité de la PC. La méthode est peu coûteuse, facile à appliquer et présente un faible risque de dommages pendant le transport ou le stockage (Rajani & Kleiner, 2003b). Ellis, Moore et al. (1998) ont observé des taux de corrosion plus faibles dans les sections de conduites en FD munies de revêtements en PE, mais ont noté des piqûres de corrosion profondes près des déchirures du revêtement. La PC peut atténuer la corrosion au niveau des déchirures et des coupures dans le revêtement de PE (Schiff & McCollom, 1993). Bonds, Bernard et al. (2005) ont démontré son efficacité dans divers types de sols.

#### - **Revêtements par galvanisation au zinc**

Le revêtement de zinc, appliqué par trempage à chaud ou par pulvérisation, doit être protégé par des couches de revêtements en polyéthylène, de vernis bitumineux, de vernis au goudron froid ou de vernis à base de résine synthétique (Nielsen 1996). Dans les sols agressifs, une couche blanche de produits de corrosion du zinc recouvre les conduites galvanisées, offrant ainsi une protection même après la perte de zinc (Marchal, 1981). Les chercheurs ont rapporté une grande efficacité du revêtement à base de zinc dans les conduites en FG et FD, l'attribuant à la PC du métal exposé par le revêtement de zinc. Les coupures et les éraflures sur la conduite deviennent de petites zones cathodiques par rapport à la vaste surface anodique du revêtement de zinc, assurant ainsi une protection efficace.

- **Protection cathodique**

La PC est utilisée pour contrôler la corrosion d'une surface métallique en la forçant à jouer le rôle de cathode au sein d'une cellule électrochimique (Peabody, 2001). Gummov (1999) a suggéré que les conduites d'eau principales peuvent être protégées par la PC pour seulement 5 à 10 % de leur coût de remplacement. Les enquêtes menées sur l'installation de PC au Canada ont démontré que les bris des conduites d'eau principales ont diminué de 90 à 95 % au cours de la durée de vie du système de PC (Kleiner & Rajani, 2002). Dans une étude sur les RDE au Canada, Schramuk et Klopfer (2005) ont conclu que l'installation de systèmes de PC entraînerait une prolongation de la durée de vie de 20 ans à moins de 10 % du coût de remplacement des conduites.

Les programmes de PC sont généralement mis en œuvre soit de manière systématique (lors d'opérations de modernisation), soit de manière opportuniste lorsqu'un bris survient, ce est communément appelé « hotspot ». Lors de la modernisation des réseaux avec des systèmes de PC, les anodes sacrificielles sont installées systématiquement sur les conduites d'eau existantes qui sont électriquement continues. Comparativement, lors d'installation de systèmes de PC selon la méthode opportuniste, les anodes sacrificielles sont installées lorsqu'un bris survient et demeurent généralement sous la terre sans remplacement jusqu'à leur fin de vie.

La PC peut être mise en œuvre de deux manières, soit par l'installation d'une anode sacrificielle ou par imposition d'un courant externe.

- **Protection cathodique par anode sacrificielle (PCAS)**

Dans la méthode de PC par anode sacrificielle (PCAS), un métal ayant une électronégativité supérieure à celle du matériau de la conduite est mis en contact avec le substrat de la conduite. Par conséquent, agissant elle-même comme anode, l'anode sacrificielle empêche la corrosion des conduites.

Les résultats d'une étude de Jansen (1995) sur l'impact de l'installation de la PCAS sur des conduites en FG et FD a montré une diminution significative du nombre de bris dans les conduites en FD avec une PCAS. Cependant, aucune diminution considérable n'a été observée pour celui des conduites en FG. La différence peut s'expliquer par le fait que les conduites en FG ont déjà été protégées par l'effet de la PC dû à la présence de conduites en FD adjacentes aux conduites en FG. En effet, depuis les années 1970, les conduites en FG détériorées ont été en grande partie remplacées par des conduites en FD. Les nouvelles conduites en FD sont plus anodiques

que celles en FG. Par conséquent, étant connectées électriquement dans le même environnement, les conduites en FD agissent comme anodes sacrificielles (Yule, 2001).

Marqueur (2001) a étudié le taux de corrosion des conduites causée par des paramètres environnementaux. Les registres de bris étudiés ont montré que les sections les plus corrodées des conduites d'eau principales étaient celles en contact avec les installations en cuivre. En présence de cuivre à proximité de la FD, ayant une électronégativité plus élevée, la FD agit comme anode sacrificielle. L'étude a également conclu que les piqûres de corrosion sur les conduites protégées cathodiquement étaient considérablement plus petites que celles des conduites non protégées.

De plus, les résultats d'une analyse de la base de données des bris de conduites de Toronto ont démontré qu'après l'installation de systèmes de PCAS sur des conduites en FD, le temps moyen entre les bris de conduites a augmenté jusqu'à 4 ans (Schuster & McBean, 2008).

#### - **Protection cathodique à courant imposé (PCCI)**

Dans la méthode de PC à courant imposé (PCCI), les anodes sacrificielles sont connectées à une source d'alimentation externe. La source d'alimentation externe, souvent une alimentation en courant continu, fournit le courant requis pour piloter la réaction électrochimique requise pour la PC, laissant ainsi les anodes saines. Les systèmes de PCCI se sont avérés plus efficaces lorsqu'appliqués sur des conduites non préalablement revêtues. Schiff et McCollom (1993) ont signalé une réduction négligeable du taux de corrosion lorsque la PCCI était installée sur des conduites préalablement recouvertes de PE. Cependant, lorsqu'elle est installée seule, elle présente une diminution considérable du taux de corrosion. Brownlie et al. (2020) ont affirmé que les anodes sacrificielles et la PCCI étaient capables de réduire considérablement les dommages induits par la corrosion de la fonte blanche.

La Figure 2 présente un schéma des méthodes de PCAS et de PCCI.

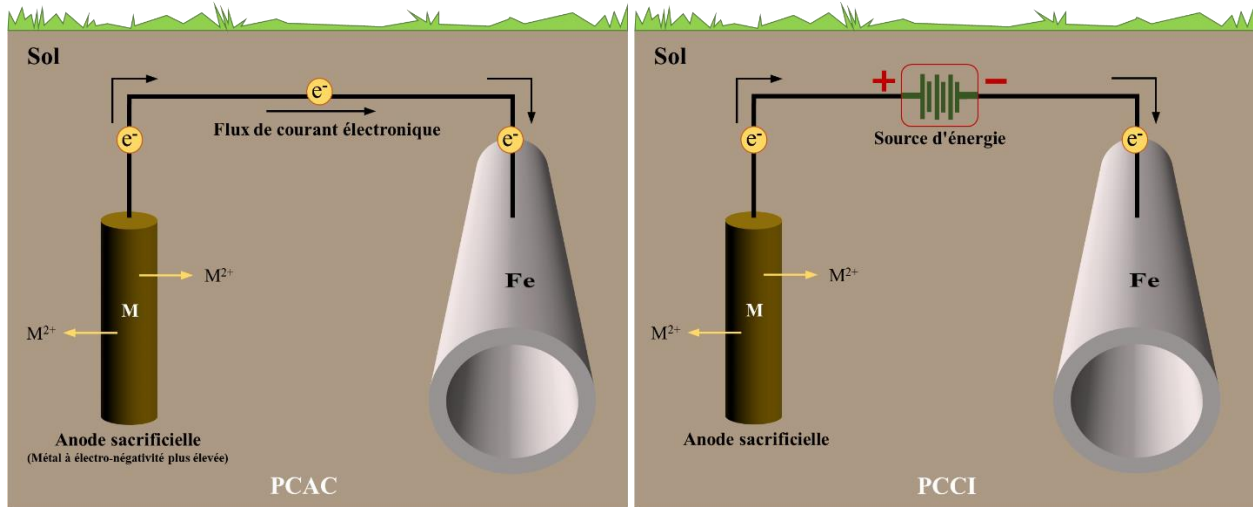


Figure 2 : Protection cathodique des conduites souterraines (méthodes de PCAS et de PCCI)

- **Résumé des études au sujet de la protection contre la corrosion**

Après l'introduction des méthodes de protection contre la corrosion, cette section résume les applications réelles à travers des études pertinentes. Ces résumés traitent de techniques spécifiques telles que les revêtements, la PC (PCCI et PCAS) et les approches hybrides. En reliant les concepts théoriques à des exemples pratiques, la revue de littérature montre la mise en œuvre et l'efficacité de différentes stratégies de protection contre la corrosion pour prévenir la détérioration des réseaux de conduites.

Xu et al. (2011) ont étudié la protection des conduites en acier par revêtement et par PC. L'étude a mis en évidence que les défauts des revêtements et leur décollement créent un environnement idéal pour les bactéries anaérobies telles que les bactéries sulfato-réductrices qui jouent un rôle critique dans la corrosion microbienne. La protection typique des conduites souterraines en acier contre la corrosion par piqûre externe impliquait la combinaison d'un revêtement et de PC.

Attia et al. (2011) ont étudié l'efficacité d'un revêtement de bandes adhésives combiné à la PC pour les conduites en acier. L'étude a identifié des problèmes de corrosion causés par une combinaison de salinité, de décollement/délaminage et de défauts du revêtement, de PC inefficace et surprotectrice et, finalement, de courants vagabonds. La recherche suggère qu'un revêtement plus efficace que le revêtement de bandes adhésives est nécessaire et que le niveau de PC doit être ajusté efficacement pour éviter une surprotection.



M. Akhoondan (2018) a étudié la protection des conduites d'eau en FD à l'aide de PC hybride, d'un revêtement fermement ajusté ou d'enrobage de PE. La recherche a conclu que ces méthodes étaient efficaces pour protéger les conduites d'eau en FD contre l'activité bactérienne et la corrosion microbiologique sous l'enveloppe en PE, en particulier dans les environnements avec une concentration élevée de sulfates.

Spickelmire (2003) a évalué l'utilisation de revêtements en combinaison avec la PC pour les conduites en FD. La recherche suggère que même si le revêtement en PE convient aux sols moins corrosifs, les sols plus corrosifs peuvent entraîner des défaillances de conduites en moins de cinq ans. L'étude a recommandé l'utilisation de revêtements et de PC pour atténuer la corrosion externe causée par des sols corrosifs et des courants vagabonds.

Paul et O'Connor (2003) ont axé leur recherche sur la protection de conduites en acier et en FD à l'aide d'un revêtement collé et de PCCI. Les résultats ont indiqué que l'approche hybride combinant la PCCI et un revêtement collé jouait un rôle crucial dans le contrôle de la corrosion due aux sols corrosifs, prolongeant ainsi la durée de vie des conduites d'eau.

Rajani et Kleiner (2003a) ont exploré l'efficacité de deux systèmes hybrides pour la protection de conduites en FD, tous deux faisant intervenir la PCCI. L'un des systèmes possédait une enveloppe en PE alors que l'autre possédait un revêtement en PE (fermement apposé contre la surface métallique). Malgré une légère diminution des taux de corrosion grâce à la présence de PCCI pour ces conduites revêtues de PE, les chercheurs ont constaté que l'enveloppe en PE interférait avec la PC lorsqu'elle était appliquée de manière lâche (enveloppe au lieu d'un revêtement), ne fournissant pas les caractéristiques protectrices attendues. Ils ont donc recommandé l'utilisation de revêtements bien adhérents couplés avec la PC pour une efficacité maximale dans les sols corrosifs.

Gan et al. (1994) ont étudié l'utilisation d'un revêtement combiné à la PCCI pour les conduites en acier dans des sols à haute résistivité. Les résultats ont indiqué que la PCCI était efficace pour atténuer la corrosion caverneuse externe sous un revêtement décollé présentant un défaut. La PCCI a joué un rôle en augmentant le pH de la solution dans la crevasse tout en diminuant sa résistivité.

Corrao et al. (2015) ont souligné l'importance de combiner la PC avec un regarnissage avec émail au goudron/mortier de ciment pour protéger les conduites en acier. L'étude a révélé que le revêtement utilisé s'est détérioré, entraînant des piqûres sur la paroi des conduites. L'approche hybride avec PC s'est avérée efficace pour prévenir les piqûres externes, la corrosion interne et

les défaillances causées par d'autres facteurs, prolongeant ainsi la durée de vie des conduites en acier.

### **2.3 Études évaluant l'effet combiné de facteurs sur la corrosion**

L'impact des facteurs influents sur le taux de défaillance des conduites de distribution d'eau potable, mentionné précédemment dans les sections 2.1 et 2.2, a été évalué au moyen de nombreuses analyses expérimentales et statistiques. Dans ce qui suit, un bref résumé des études sur les caractéristiques de la corrosion dans les conduites de distribution d'eau potable est présenté.

Kleiner et Rajani (2012) ont étudié la géométrie de piqûres de corrosion externes et des facteurs contributifs par le biais d'analyses statistiques sur des échantillons de conduites déterrées pour quatre réseaux d'approvisionnement en eau différents. Pour représenter les profondeurs maximales de piqûres, ils ont utilisé différentes distributions statistiques, notamment celle de Weibull (à 2 paramètres), celle de Gumbel (ou double exponentielle) et des distributions exponentielles. Ils ont conclu que la distribution de Weibull tronquée correspondait le mieux à la distribution des maxima de profondeur de piqûres.

Wasim et al. (2018) ont étudié les facteurs de corrosion externes affectant les conduites souterraines, en se concentrant sur le pH, la teneur en humidité, la résistivité, l'oxygène dissous et les bactéries. Ils ont réalisé des études sur le terrain et en laboratoire, soulignant la nécessité de recherches approfondies sur des sols réels en raison de la corrélation limitée entre la corrosion dans les simulations contrôlées et les environnements de sol réels. L'étude a révélé que les taux de corrosion étaient inversement proportionnels à la résistivité du sol et augmentaient avec la teneur en humidité jusqu'à une valeur critique. Ils ont aussi soulevé la nécessité d'effectuer de futures recherches sur l'impact de la PC sur les propriétés mécaniques des conduites souterraines, en particulier sur la résistance.

L'effet de la corrosion sur les conduites souterraines en acier galvanisé et en fonte d'un RDE au Népal a été étudié par Dahal et al. (2021). Six facteurs du sol ont été analysés, notamment le pH, l'humidité, la résistivité, le potentiel d'oxydo-réduction, les ions chlorure et les sulfates, catégorisant les sols en deux groupes, soit légèrement corrosifs et moins corrosifs. L'étude a révélé que la plupart des échantillons de sol étaient légèrement corrosifs et que les sols les plus corrosifs avaient une humidité, une concentration en chlorure et une teneur en sulfate plus élevées ainsi qu'une résistivité du sol plus faible. Les mesures de protection recommandées incluaient l'utilisation d'une enveloppe en polyéthylène, ainsi que le gravier et le sable comme

matériaux de remblai dans les tranchées, afin de prolonger la durée de vie des conduites souterraines. Ces résultats apportent des informations utiles pour guider le choix des stratégies de protection dans les futurs projets de réseau.

Une étude récente de Liu et al. (2023) a inspecté la défaillance d'une conduite de FD grâce à une analyse complète impliquant des enquêtes sur le terrain et des expériences en laboratoire. L'enquête a étudié les caractéristiques morphologiques des dépôts de corrosion, révélant la présence de sulfures, d'oxydes de fer, de graphite sphérique et de résidus de ciment. L'analyse des matériaux a révélé que la microstructure et les propriétés mécaniques de la conduite respectaient les exigences standards. L'analyse du sol a révélé l'impact corrosif des bactéries sulfato-réductrices et a permis de valider la nature corrosive du sol. Les conclusions identifient le courant vagabond (continu) comme le principal facteur ayant conduit à la défaillance, les bactéries sulfato-réductrices agissant comme une influence secondaire.

Jur et al. (2021) ont étudié le phénomène de corrosion graphitique dans des conduites en FG. Les deux études de cas présentées offrent des résultats instructifs. Dans l'étude de cas A, impliquant la défaillance d'une conduite principale d'un RDE souterrain, un examen métallurgique approfondi a confirmé que la corrosion graphitique était la cause du bris. La conduite, en service depuis plus d'un siècle, présentait des produits de corrosion caractéristiques enveloppant des flocons de graphite. L'étude souligne l'urgence de s'attaquer à la détérioration des conduites en FG vieillissantes afin d'éviter des bris catastrophiques et des pannes de service. Dans l'étude de cas B, qui examine le bris longitudinal d'une conduite d'évacuation verticale située dans une maison construite en 1939, la recherche souligne que l'exposition intermittente à l'humidité est un facteur ayant contribué à la corrosion graphitique, même en l'absence de pression interne. L'étude conclut que les contraintes résiduelles, induites lors du coulage centrifuge et exacerbées par la corrosion, ont conduit à la fissure observée. Les deux études de cas soulignent la nécessité de mesures proactives pour évaluer et prévenir la corrosion graphitique dans les conduites en FG afin de garantir l'intégrité des systèmes de services publics.

Une évaluation complète de l'état de corrosion de conduites en FG souterraines a été réalisée par Shankar et al. (2020). L'étude a utilisé diverses techniques de caractérisation, notamment la microscopie optique, la MEB, l'EDS), la diffraction des rayons X (DRX) et la spectroscopie Raman par laser. Les résultats ont révélé que les conduites en FG présentaient une microstructure typique de graphite en flocons avec des variations d'épaisseur attribuées à la technique de moulage sous pression. L'examen visuel et l'analyse par MEB ont révélé différentes formations de rouille sur les surfaces intérieures et extérieures. Un type de rouille poreuse et blanchâtre a

été observé à l'extérieur alors qu'une rouille fine, dense et de couleur brun foncé a été observée à l'intérieur. L'étude a indiqué que la corrosion externe des conduites est principalement due au sol constitué de sable et gravier. Les analyses EDS et DRX des couches de rouille ont révélé la présence de Si, Ca, S et P, en plus de Fe et d'O. Malgré les signatures de corrosion graphitique, la présence de bactéries et la formation de rouille, il n'y a eu aucune réduction substantielle de l'épaisseur des conduites. L'article conclut que malgré la corrosion graphitique locale, la durée de vie des conduites peut être prolongée en mettant en œuvre des stratégies appropriées de gestion de la corrosion, telles qu'une surveillance régulière et des revêtements de protection. Cela souligne l'importance de comprendre les facteurs influençant la corrosion pour la planification future de l'entretien et de la conception.

Une revue par Zhang et al. (2022) fournit un examen approfondi de la corrosion des conduites de RDE, mettant l'accent sur le processus de corrosion, sur la formation de couches de produits de corrosion, sur les facteurs d'influence et sur les technologies de surveillance. La structure multicouche des produits de corrosion a été étudiée, en considérant les influences de la qualité de l'eau et de l'activité microbienne sur la transformation des produits de corrosion. L'étude a conclu que la corrosion non uniforme ou localisée nuit davantage à l'intégrité des conduites que la corrosion uniforme. De plus, les analyses électrochimiques ont été soulignées comme étant une approche efficace et pratique pour caractériser les processus de corrosion et de formation de produits de corrosion, offrant des informations précieuses sur les processus, les mécanismes et les facteurs d'influence de la corrosion *in situ*.

Moghareh Abed et al. (2020) ont exploré la corrosion des conduites de distribution d'eau en FG enfouies dans des sols argileux, en mettant l'accent sur la compréhension des changements chimiques induits par les processus électrochimiques et de leur impact potentiel sur les propriétés du sol. L'étude a exploré la pertinence des techniques de surveillance des conduites souterraines, en considérant l'influence des altérations chimiques de l'argile sur les propriétés électromagnétiques du sol. Grâce à des expériences en laboratoire simulant la corrosion de la FG, en particulier dans le contexte de différents types d'argile, la recherche a souligné la forte dépendance de la corrosion aux caractéristiques du sol.

Wang et al. (2010) ont estimé l'état et le taux de détérioration des conduites d'eau en employant une approche bayésienne pour déterminer l'importance de divers facteurs influençant l'état des conduites. L'état des conduites d'eau a été défini en termes de leur intégrité structurale, de leur probabilité de bris et de leurs performances globales. Les facteurs pris en compte étaient le diamètre, l'âge, le revêtement (intérieur et extérieur), l'état du sol, l'état du remblai, la profondeur

de la tranchée, les fuites, les courants, la pression, les matériaux (acier, FG et FD) et le nombre de voies routières au-dessus des conduites. Leurs expériences numériques ont indiqué que les informations sur les voies routières et la profondeur des tranchées n'étaient pas nécessaires pour cette évaluation. Selon l'étude, l'âge des conduites s'est avéré être le facteur le plus important pour déterminer l'état des conduites d'eau.

Kabir et al. (2015) ont étudié le risque de bris des conduites d'eau métalliques (FG, FD et acier galvanisé) en utilisant une grande variété de facteurs physiques, environnementaux et opérationnels à l'aide d'un réseau de croyances bayésien (BBN). Un BBN est un modèle probabiliste qui représente un ensemble de variables et leurs relations probabilistes tout en capturant les informations historiques sur ces dépendances. Les facteurs pris en compte dans cette étude étaient le diamètre, l'âge, la longueur, l'épaisseur de la paroi, la pression de l'eau, la vitesse de l'eau, la turbidité, le chlore résiduel libre, la couleur, la saison, le pH de l'eau, l'indice de gel, la résistivité du sol, le pH du sol, le potentiel redox, la teneur en sulfures, la teneur en humidité, la population, l'utilisation du territoire, le trafic et le type de route. Les résultats ont indiqué que les tuyaux de FG et de FD sont respectivement plus sensibles à la résistivité et à la corrosivité du sol (un indice de corrosivité mesuré en fonction des caractéristiques du sol) qu'aux autres facteurs pris évalués. De plus, les résultats de cette étude ont montré que les facteurs du sol influençant les bris des conduites comprennent sa résistivité électrique, son pH, son potentiel redox, sa teneur en sulfures et son humidité.

Aydogdu et Firat (2015) ont développé une nouvelle approche pour l'estimation du taux de bris dans les RDE et pour la détermination de la relation entre les facteurs ayant un impact sur les bris. Ils ont divisé la base de données du RDE de la ville de Malatya, en Turquie, en trois groupes distincts en fonction de leur matériau (FG, PVC et AC) et ont estimé le taux de bris en tenant compte de l'âge, du diamètre et de la longueur des conduites comme covariables. Ils ont observé que le taux de bris était le plus élevé pour les trois groupes de conduites suivants : conduites d'une longueur de 0 à 200 m, conduites d'un diamètre de 110 cm et conduites d'un âge compris entre 15 et 20 ans.

Kimutai et al. (2015) ont étudié les effets de différents paramètres sur le taux de bris des conduites d'eau tout en considérant les relations entre plusieurs covariables. La longueur, le diamètre et le type de conduites ont été inclus dans leur étude en tant que variables physiques, alors que les variables environnementales prises en compte sont la résistivité du sol, l'indice de gel (température) et le déficit de pluie (précipitations). Le RDE de la ville de Calgary (Canada) a été

utilisé comme étude de cas. Ils ont conclu que les effets des facteurs physiques sur le taux de bris des conduites d'eau principales étaient plus importants que les facteurs environnementaux.

#### **2.4 Résumé de la revue de la littérature et des lacunes scientifiques identifiées**

Les études antérieures ont étudié les processus et les facteurs influençant les bris induits par la corrosion par le biais d'analyses expérimentales ainsi qu'en utilisant différentes approches statistiques. Selon ces études, les facteurs contributifs peuvent être classifiés en trois catégories : paramètres structuraux (matériau, diamètre, longueur et âge), facteurs opérationnels (pression d'écoulement, qualité de l'eau, présence de CP) et facteurs environnementaux (climat et caractéristiques du sol). Cependant, plusieurs de ces études ont mené à des conclusions différentes (et parfois même opposées) en ce qui concerne la corrélation entre la forme et l'étendue de la corrosion et les propriétés du sol telles que la résistivité, la teneur en humidité et le pH. Alors qu'on observe des taux de corrosion élevés sur des composants métalliques souterrains dans des zones spécifiques, telles que les zones de climat froid, le besoin est urgent pour une évaluation complète et cohérente de la dépendance de la corrosion sur les paramètres mentionnés ci-dessus.

### 3 MÉTHODOLOGIE

---

Dans ce chapitre, des détails sur les études de cas sélectionnées et la méthodologie mise en place pour atteindre l'objectif de recherche sont fournis.

#### 3.1 Étude de cas

Une étude de cas a été sélectionnée pour cette recherche. Elle porte sur la base de données du réseau de distribution d'eau potable de la ville de Québec.

##### 3.1.1 Ville de Québec

L'eau potable de la ville de Québec, qui compte 800 000 habitants, provient principalement des eaux de surface. La base de données du RDE fournie par la Ville de Québec contient des informations sur 228 431 conduites (4 400 km), dont 44 447 conduites de distribution métalliques (2 200 km) installées entre les années 1900 et 2020. Elle contient également un registre des bris de conduites sur 36 ans, soit de 1985 à 2020. Plus précisément, les informations contenues dans cette base de données concernent l'année de l'installation, l'emplacement, le matériau, la longueur et le diamètre, puis, pour le registre des bris de conduite, la localisation, la date du bris ainsi que le type de bris. Le registre des bris des vannes, depuis 2019, y est également inclus. Un bref résumé de l'ensemble de données est fourni au Tableau 3. La Figure 3 présente géographiquement le RDE de la ville de Québec, en identifiant les conduites et les bris.

Tableau 3 : Réseau de distribution de la ville de Québec

Variable	Matériau de la conduite		
	Fonte grise	Fonte ductile	Cuivre
Nombre total de conduites	19 387	24 995	65
Année d'installation	1900 - 1980	1960 – 2020	1935 – 2017
Longueur des conduites (m)	7 - 1 222	1 - 1 508	60 - 129
Longueur totale de conduites (km)	992	1 200	1 707
Diamètre des conduites (mm)	75 - 400	75 - 400	75 - 250
Nombre total de bris	8 640	3 629	17

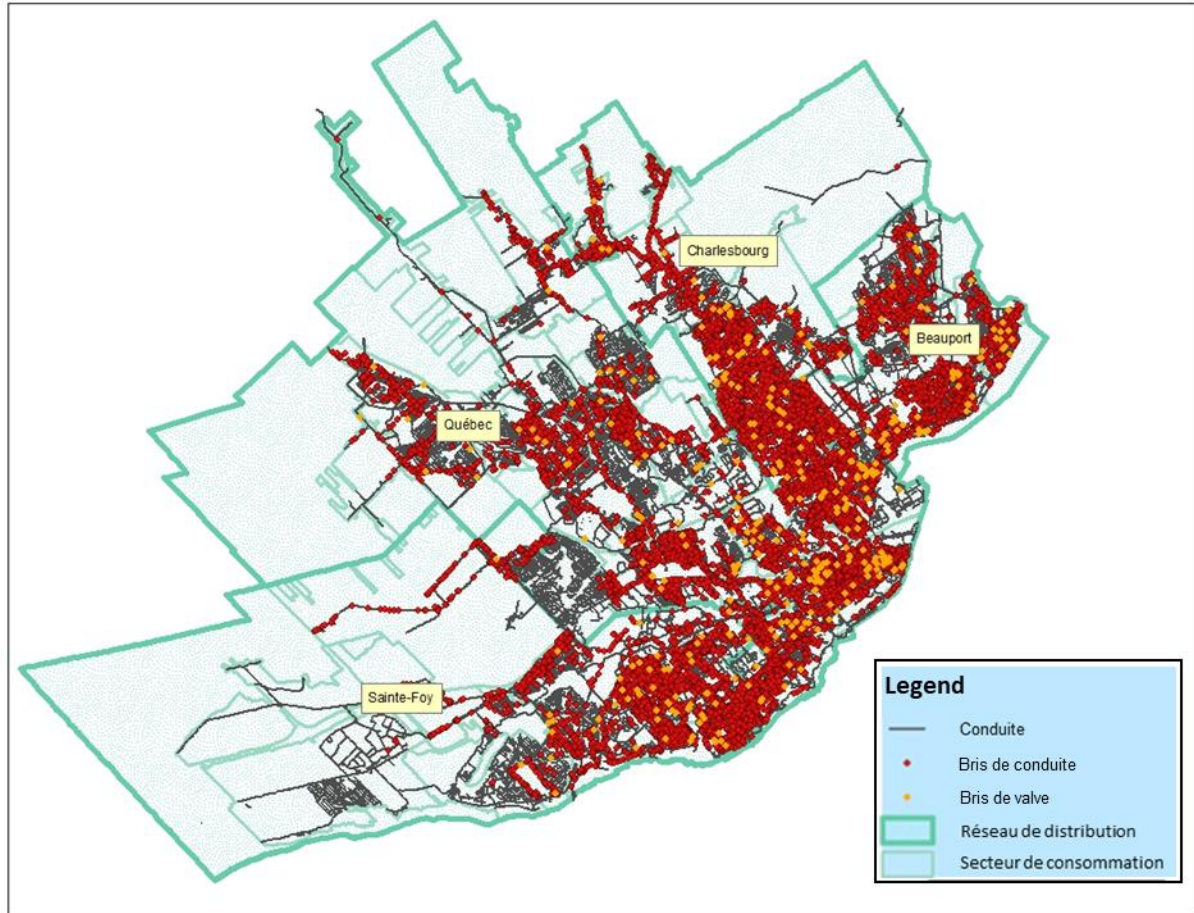


Figure 3 : Réseau de distribution de Québec - localisation des bris de conduites (1985 – 2020)

Malheureusement, dans la base de données fournie par la ville de Québec, beaucoup d'informations quant au matériau, au diamètre et à l'année d'installation des conduites étaient manquantes. C'était le cas pour 147 244 conduites, soit plus de la moitié des 228 431 conduites répertoriées. Pour ces raisons, une approche méthodologique utilisant le logiciel ArcMap a été utilisée pour estimer la plupart des informations manquantes.

Ci-dessous, un bref résumé de l'approche appliquée pour compléter les informations est présenté, expliquant de quelle façon chacune des caractéristiques manquantes a été estimée.

- **Diamètre des conduites**
  - ✓ Selon le diamètre médian des conduites adjacentes
- **Année d'installation des conduites**
  - ✓ Selon celle des conduites adjacentes
  - ✓ Selon l'année de construction des rues



- **Matériau des conduites**

- ✓ Selon le matériau des conduites de la même zone possédant les mêmes années d'installation

Une fois la base de données des conduites complétée, celle-ci a été jointe spatialement au registre des bris afin de préparer l'ensemble de données nécessaire à l'analyse statistique. Les secteurs de la ville de Québec où l'information sur les caractéristiques et les bris des conduites était la plus complète et détaillée ont été choisis pour cette étude. À noter qu'en fonction de la méthode appliquée pour compléter les données et des données initialement disponibles, la qualité des données est différente pour chacun des secteurs de distribution.

La base de données du RDE de Québec contient des informations au sujet de l'installation de systèmes de PC seulement dans certains secteurs limités du réseau et pour certaines années. Les données disponibles font état de l'installation d'anodes sacrificielles dans les secteurs de distribution de Sainte-Foy et de Charlesbourg entre 1995 et 2018. Selon les données, l'installation d'anodes sacrificielles dans le secteur de Sainte-Foy a eu lieu avant 2007 et celles-ci étaient en magnésium. Pour le secteur de Charlesbourg, ce sont plutôt des anodes en zinc qui ont été installées, et ce, depuis 2017.

De plus, des échantillons ont été prélevés sur différents composants du RDE de la ville de Québec dans le cas où des bris liés à la corrosion se sont produits. Ces échantillons ont été prélevés à la fois sur les composants endommagés (12 échantillons) et sur le sol du milieu environnant (12 échantillons). Chaque échantillon a été photographié et des rapports complets fournissant des informations sur l'emplacement, le type de composant, le matériau, la présence de méthodes de protection contre la corrosion, des détails sur la procédure d'installation, le type de bris et la nature de l'environnement ont été rédigés. La Figure 4 montre quelques exemples d'échantillons collectés.



Figure 4 : Exemples d'échantillons prélevés sur des composants détériorés et sur le sol environnant à la ville de Québec

### 3.2 Méthodologie d'identification des facteurs favorisant la corrosion des conduites en FG/FD et des composants métalliques par analyse de la structure d'échantillons corrodés

Une étude approfondie de la relation entre la corrosion externe des composants métalliques des RDE et les facteurs environnementaux a été menée. Bien que diverses études aient été menées pour évaluer l'impact de divers paramètres sur les caractéristiques de la corrosion, leurs résultats ont mené à des conclusions différentes et parfois contradictoires. Dans certains cas, ces recherches ont également fait état d'une faible corrélation entre l'étendue de la corrosion et les propriétés du sol telles que la résistivité, la teneur en humidité et le pH, alors que de nombreux RDE démontraient un taux de corrosion élevé dans les composants métalliques souterrains dans des environnements corrosifs.

L'une des principales raisons de la faible corrélation entre la corrosion et les propriétés du sol dans la littérature est l'absence de données appropriées. L'obtention de données expérimentales sur des composants métalliques souterrains, telles que la composition chimique, le type de matériau et la microstructure, de même que des informations sur l'environnement auquel ces derniers sont exposés, tels que la texture du sol, la résistivité, la teneur en humidité et le pH,

pourraient permettre d'approfondir les connaissances quant aux facteurs contribuant à la corrosion et au processus de corrosion des composants métalliques souterrains.

### 3.2.1 Collecte des données

Dans la présente recherche, des enquêtes sur le terrain ont été menées pour combler les lacunes scientifiques et obtenir un aperçu plus complet de la dépendance de la corrosion aux facteurs environnementaux.

Au total, 12 échantillons de sol et 12 échantillons provenant du RDE de la ville de Québec ont été prélevés dans des cas où des bris liés à la corrosion s'étaient produits (Figure 5). En plus, la ville de Québec a fourni une base de données sur les propriétés des échantillons de sol collectés dans la zone étudiée, notamment la résistivité du sol, le potentiel redox, le pH et la teneur en humidité.

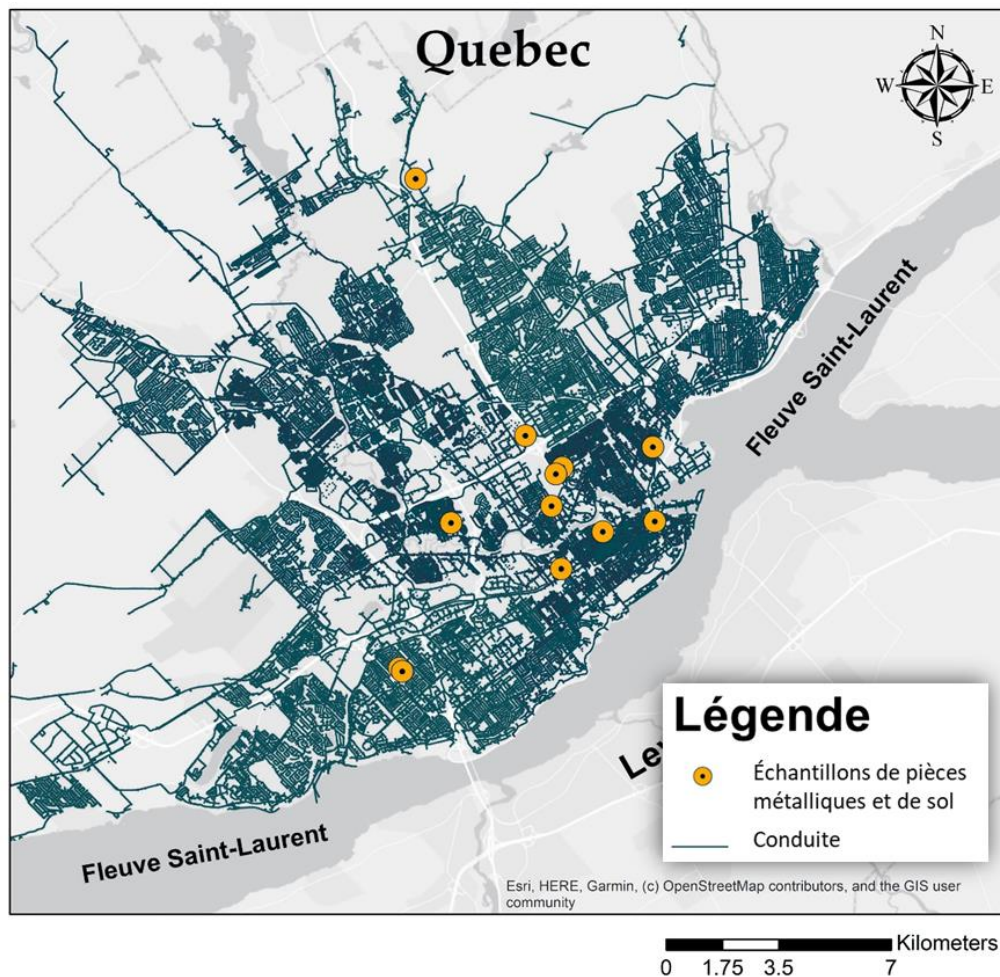


Figure 5 : Localisation des échantillons collectés sur le RDE de la ville de Québec

Le choix des 12 échantillons repose sur leur pertinence pour répondre aux objectifs spécifiques de la recherche. Parmi les nombreux échantillons disponibles, ceux-ci ont été sélectionnés en raison de leur représentativité en matière de conditions de corrosion et de types de dégradations observées, permettant une analyse complète et ciblée. En couplant chaque échantillon de conduite avec un échantillon de sol correspondant, nous avons pu maximiser la validité des résultats et mieux comprendre l'influence des propriétés du sol sur les mécanismes de corrosion dans le RDE étudié.

Au cours de ces investigations, la localisation de tous les échantillons a été enregistrée afin de cartographier leur répartition spatiale par rapport aux bris de conduite. La préparation de ces rapports a permis de mieux comprendre la détérioration induite par la corrosion en considérant les points suivants :

- Nature de la défaillance :
  - Cause du bris
  - Section du composant où le bris s'est produit
- Présence d'une méthode de protection contre la corrosion :
  - Méthode de protection appliquée
  - Matériau et procédure d'installation
  - Matériau utilisé pour les joints, vis, etc.
  - Assemblage de conduites avec des métaux dissimilaires
  - Nature du milieu environnant
  - Apparence et couleurs des produits de corrosion (rouille) : L'identification de la composition pourrait fournir des indices pour aider à déterminer la source et la cause de la corrosion.

L'étude sur la corrosion des composants métalliques souterrains a impliqué la collecte, la préparation et l'analyse d'échantillons. Des échantillons de sol ont été prélevés à divers endroits pour évaluer leurs propriétés telles que la résistivité, la teneur en humidité, le pH et le potentiel redox. Ces échantillons ont été envoyés au laboratoire pour une analyse complète, fournissant des données essentielles pour comprendre la relation entre les propriétés du sol et la corrosion des composants métalliques souterrains.

### **3.2.2 Analyse de la corrosion des composants métalliques par tomographie et MEB/EDS**

- **Tomographie**

La première étape a consisté à utiliser la technique de tomographie (TDM) dans le laboratoire de l'INRS, pour obtenir des informations détaillées sur l'état des composants métalliques. Les tomographies ont fourni des images tridimensionnelles révélant la structure interne des composants, y compris les défauts de corrosion, les fissures ou les faiblesses structurales. En identifiant ces caractéristiques internes, les tomographies ont joué un rôle crucial pour guider le processus de sélection pour la collecte ultérieure d'échantillons sur chaque pièce. Les tomographies (CT-scans) ont permis d'identifier avec précision les zones de corrosion interne et les faiblesses structurales dans les conduites enterrées. En analysant les images 3D générées par le CT-scan, il a été possible de repérer des régions de perte de matériau, de porosité accrue et de fissures internes. Ces zones, qui montraient des signes visibles de détérioration avancée, ont été priorisées pour le prélèvement des échantillons en vue d'analyses plus poussées par MEB/EDS. Cette approche a permis de cibler les points les plus représentatifs de la corrosion, afin d'obtenir des résultats plus précis sur la composition des produits de corrosion et les mécanismes de dégradation en jeu. Plus précisément, les zones présentant une corrosion importante ou des anomalies structurales ont été ciblées pour une analyse plus approfondie par la MEB et l'EDS. Cette approche garantissait que les sections les plus représentatives et potentiellement problématiques des composants étaient examinées en détail, permettant ainsi une évaluation plus précise des mécanismes de corrosion impliqués.

La technique de TDM (illustrée à la Figure 6) fonctionne en faisant tourner une source de rayons X et des détecteurs autour de l'objet, captant plusieurs images en coupe transversale, qui sont ensuite reconstruites dans un modèle 3D détaillé. Dans cette étude, l'appareil SOMATOM Definition AS+ 128 de la compagnie SIEMENS CT Scan a été utilisé. La résolution des tomographies a été réglée à 50 micromètres, permettant une imagerie à haute résolution des caractéristiques internes parfois fines. Des paramètres spécifiques tels que la tension (130 kV) et le courant (150  $\mu$ A) ont été ajustés pour optimiser la qualité de l'image et la profondeur d'analyse.



Figure 6 : Appareil de tomodensitométrie utilisé pour les essais non destructifs de composants métalliques

La reconstruction 3D des conduites et des composants métalliques et les calculs de perte de paroi obtenus à partir des résultats de l'appareil permettent une évaluation complète de la corrosion et de l'intégrité structurale. L'image tomodensitométrique met en évidence des zones d'intensité variable, qui correspondent à différentes densités du matériau au sein du composant métallique. Les zones plus claires indiquent généralement des régions plus denses et moins corrodées, tandis que les zones plus sombres révèlent des sections moins denses, potentiellement corrodées ou fissurées. En analysant ces résultats, il est possible d'identifier avec précision les régions de dégradation importante, d'identifier la présence et l'étendue des défauts internes et d'évaluer l'état général du composant métallique. Cette reconstruction détaillée aide à sélectionner les zones critiques pour un examen plus approfondi et garantit que les analyses ultérieures (MEB, EDS) soient effectuées sur les échantillons de corrosion les plus représentatifs.

En plus de générer une reconstruction 3D des composants métalliques, les résultats obtenus par TDM contiennent une multitude de données qui peuvent être analysées plus en détail pour quantifier divers aspects de la corrosion et de la perte de matière. L'une des analyses clés réalisées à l'aide de ces fichiers est le calcul de la perte moyenne de paroi de la conduite. En traitant les images de sortie avec des scripts développés sur mesure, des mesures précises de l'épaisseur de paroi restante à différents points le long d'une conduite peuvent être extraites.

D'abord, des images transversales détaillées des conduites, avec des variations d'intensité des pixels reflétant les différences de densité du matériau dues à la corrosion, ont été générées via les analyses par TDM à haute résolution. Ces images ont ensuite été importées dans MATLAB, où des techniques de traitement d'images numériques ont été appliquées pour convertir les valeurs d'échelle de gris en mesures quantitatives de densité.

Le processus a impliqué l'importation des fichiers de sortie de l'appareil TDM (DICOM) dans les bibliothèques MATLAB pour segmenter les images et isoler les régions métalliques des zones corrodées à l'aide de techniques de seuillage basées sur les valeurs d'intensité des pixels. Des algorithmes de détection des surfaces ont ensuite été appliqués pour délimiter précisément les limites intérieures et extérieures de la paroi des conduites, permettant la mesure de l'épaisseur en différents points en calculant la distance entre ces surfaces sur plusieurs sections transversales. Les données obtenues ont permis d'estimer la perte moyenne de paroi en comparant l'épaisseur actuelle des conduites à leur épaisseur d'origine non corrodée.

Après la TDM, des régions spécifiques sur les composants métalliques ont été sélectionnées pour une analyse détaillée à l'aide de la MEB et de l'EDS. Ces régions ont été choisies en fonction de la gravité de la corrosion révélée par les analyses par TDM, permettant d'identifier les zones de dégradation potentielle. L'observation visuelle a permis de compléter les résultats de TDM en aidant à identifier les zones présentant des signes visibles de dommages. Des échantillons métalliques ont ensuite été soigneusement découpés dans les régions les plus corrodées à l'aide d'un équipement de précision, garantissant ainsi l'obtention de sections représentatives pour une analyse plus approfondie.

Chaque échantillon a subi un nettoyage en profondeur. Tout d'abord, les échantillons ont été nettoyés avec de l'eau distillée pour éliminer tous les contaminants de surface et les produits de corrosion libres. Par la suite, la surface intérieure de chaque échantillon métallique a été grattée à l'aide d'un outil abrasif fin pour réduire la porosité et garantir des résultats précis et fiables lors de l'analyse par MEB. Cette étape de préparation s'est avérée essentielle pour faciliter un examen détaillé de la microstructure et de la composition chimique du substrat métallique, des produits de corrosion et des mécanismes de dégradation associés.

- **Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) et spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS)**

L'analyse par MEB et EDS (tel que présenté à la Figure 7) a permis d'examiner les changements dans le matériau du substrat, les patrons de corrosion et la présence de divers constituants. La



MEB utilise des électrons pour générer des images à fort grossissement de l'échantillon, offrant ainsi des informations visuelles détaillées (Figure 8). Un canon à électrons émet un faisceau d'électrons qui interagissent avec l'échantillon, entraînant l'émission d'électrons secondaires, de rayons X et d'électrons rétrodiffusés. Ces émissions sont capturées par des détecteurs et traduites en une image visuelle affichée sur un écran, facilitant un examen approfondi.

L'appareil de MEB utilisé dans cette recherche était de marque Carl Zeiss EVO® 50 smart SEM. Les paramètres ont été soigneusement définis pour optimiser le processus d'imagerie :

- Tension d'accélération : 20 kV
- Distance de travail : 10 mm
- Plage de grossissement : 50x à 50 000x

Les images haute résolution obtenues par la MEB ont permis de fournir des informations détaillées sur la morphologie de la surface, révélant des caractéristiques telles que des piqûres, des fissures et des produits de corrosion (Figure 8).

La MEB est généralement couplée à l'EDS pour procéder à une analyse chimique. L'EDS détecte les rayons X émis par l'échantillon lors d'un bombardement par faisceau d'électrons, fournissant ainsi des informations précieuses sur la composition élémentaire du volume analysé. Le système d'EDS comprenait un détecteur de rayons X et un logiciel d'analyse spectrale.

Dans cette recherche, un appareil d'EDS Bruker Quantax 800/Z30 SDD a été utilisé. Les paramètres clés pour l'analyse EDS comprenaient :

- Résolution : 129 eV à Mn K $\alpha$
- Angle de décollage : 35 degrés
- Gamme élémentaire : Béryllium (Be) à Uranium (U)

Cette combinaison synergique des techniques de MEB et d'EDS améliore les capacités analytiques, permettant aux chercheurs de caractériser la composition chimique des produits de corrosion et d'identifier les éléments clés contribuant aux processus de corrosion. Des cartes et des spectres élémentaires détaillés ont été générés, mettant en évidence la distribution et la concentration d'éléments tels que le fer (Fe), l'oxygène (O), le carbone (C) et le chlore (Cl) (Figure 8).





Figure 7 : Appareil de MEB utilisé pour l'analyse des surfaces métalliques

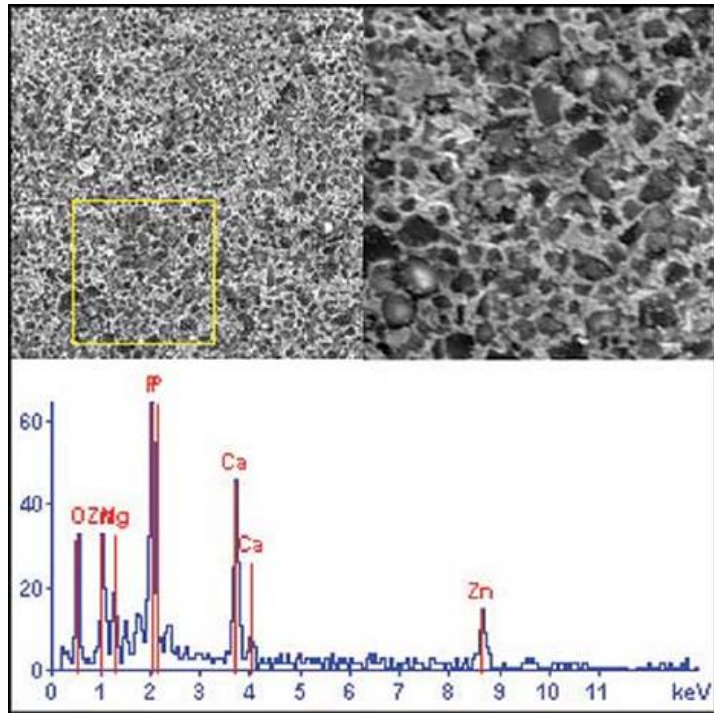


Figure 8 : Image de MEB montrant la morphologie détaillée de la surface (en haut) et spectre EDS mettant en évidence la composition élémentaire avec la répartition des éléments clés (en bas).

## 4 Résultats et discussion

Ce chapitre présente les résultats de la recherche. Il détaille l'analyse expérimentale de la corrosion, présentant les informations obtenues à partir des analyses par TDM et MEB/EDS. Ces résultats permettent de mieux comprendre les mécanismes de corrosion, la dégradation des matériaux ainsi que les facteurs environnementaux influençant la corrosion des composants métalliques souterrains.

Dans le cadre de cette étude, 12 échantillons ont été prélevés du RDE de la ville de Québec, chacun étant muni d'un échantillon correspondant du sol environnant. Les Tableau 4 et Tableau 5 présentent une brève description des échantillons utilisés pour cette recherche.

Tableau 4 : Sommaire des échantillons de métaux prélevés sur le réseau de Québec

Propriétés de la conduite				
échantillon	Type	Année d'installation	Matériau	Diamètre (po)
<b>C-1</b>	Conduite	1967	FG	6
<b>C-2</b>	Conduite	1967	FG	6
<b>C-3</b>	Conduite	1970	FG	6
<b>C-4</b>	Conduite	1961	FG	6
<b>D-1</b>	Conduite	1991	FD	6
<b>D-2</b>	Conduite	1986	FD	6
<b>D-3</b>	Conduite	1989	FD	6
<b>D-4</b>	Conduite	1995	FD	6
<b>M-1</b>	2 Conduites + Manchon	2005	FG + FD + Acier	6
<b>M-2</b>	Conduite + Manchon	1998	FG + Acier	6

Tableau 5 Sommaire des échantillons de sols prélevés sur le réseau de Québec

échantillon	Type	Résistivité ( $\Omega$ -cm)	pH	Potentiel redox (mV)	Soufre	Drainage	Agressivité
<b>C-1</b>	Argile silteux	2550 (1)	6.7	208.5	Négatif	Moyen (1)	2
<b>C-2</b>	Silteux (+argile)	2300 (2)	6.42	87.2 (3.5)	Négatif	Faible (2)	7.5
<b>C-3</b>	Silteux et argile	1600 (3)	6.82	203.2	Négatif	Moyen (1)	4
<b>C-4</b>	Silteux	3400	7.32	201.5	Négatif	Moyen (1)	1
<b>D-1</b>	Sable	2700 (1)	6.4	181.3	Négatif	Bon	1
<b>D-2</b>	Sable et gravier	800 (10)	7.04	184.6	Négatif	Bon	10
<b>D-3</b>	silteux sable	2000 (5)	6.92	158.8	Négatif	Moyen (1)	6
<b>D-4</b>	Sable (+silteux)	610 (10)	6.45	246.5	Négatif	Moyen (1)	11
<b>M-1</b>	Sable	1400 (10)	7.35	218.5	Négatif	Bon	10
<b>M-2</b>	Silteux sable	13000	6.48	157	Négatif	Bon	0

La détermination des années d'installation des conduites étudiées, telles que présentées dans le Tableau 4, est basée sur les registres municipaux disponibles. Ces enregistrements peuvent toutefois comporter des incertitudes en raison d'une tenue incomplète du registre, d'une éventuelle erreur humaine dans la saisie des données ou de travaux de mise à jour et de maintenance qui n'ont peut-être pas systématiquement été enregistrés. De plus, dans certains cas, l'année d'installation exacte a été estimée en fonction de la date de fabrication ou de la date de construction de la rue, si les dossiers d'installation originaux n'étaient pas disponibles. Il est important de reconnaître ces incertitudes car elles ont un impact sur la fiabilité des données et sur les conclusions qui en sont tirées.

L'agressivité du sol (dernière colonne du Tableau 5) est un paramètre critique dans l'évaluation du potentiel de corrosion des conduites souterraines. Elle est influencée par plusieurs facteurs, notamment la résistivité du sol, le pH, le potentiel redox, les sulfures et la teneur en humidité. La méthode en 10 points fournit une évaluation de la corrosivité du sol basée sur ces paramètres. Le pointage cumulé de ces facteurs détermine l'agressivité globale du sol, les pointages plus élevés indiquant des sols plus agressifs présentant un plus grand risque pour les conduites souterraines. Le Tableau 6 fournit un résumé des propriétés du sol et de leurs pointages respectifs basé sur la méthode en 10 points.

Tableau 6 : Évaluation de la corrosivité du sol à l'aide de la méthode en 10 points (adapté de AWWA, 1971)

Caractéristiques du sol	Valeurs	Points
<b>Résistivité (<math>\Omega \cdot \text{cm}</math>)</b>	<1500	10
	$\geq 1500 - 1800$	8
	$\geq 1800 - 2100$	5
	$\geq 2100 - 2500$	3
	$\geq 2500 - 3000$	1
	> 3000	0
<b>pH</b>	0 - 2	5
	2 - 4	3
	4 - 6.5	0
	6.5 - 7.5	5
	7.5 - 8.5	3
	> 8.5	5
<b>Potentiel Redox (mV)</b>	> +100	0
	-50	3.5
	0 - +50	4
	< 0	5
<b>Sulfures</b>	Positif	3.5
	Trace	2
	Négatif	0
<b>Humidité</b>	Mauvais drainage (constamment humide)	2
	Drainage correct (généralement humide)	1
	Bon drainage (généralement sec)	0

#### 4.1 Analyse par tomodesitométrie des conduites en FG et FD

L'analyse par TDM a fourni un aperçu de la structure interne et de l'intégrité des conduites en FG et en FD. Cette section traite des différences observées dans la morphologie et la perte de matière entre les échantillons de FG et de FD, visualisées et quantifiées à travers les images de TDM et les graphiques de perte de paroi. Les différences observées sont liées aux caractéristiques de chaque conduite et à ses conditions environnementales.

##### 4.1.1 Structure interne et intégrité

La Figure 9 montre des couches sélectionnées des images de TDM des conduites en FG et en FD. Les images révèlent des différences significatives dans les structures internes de ces matériaux. Les conduites en FG présentent une structure poreuse et non homogène, avec une dégradation interne notable. Cette dégradation suggère la possibilité d'une corrosion graphitique dans les conduites en FG, où le fer est éliminé, laissant derrière lui un réseau poreux de graphite.

En revanche, les conduites en FD présentent une structure plus uniforme et plus dense, indiquant une meilleure résistance à la dégradation interne.

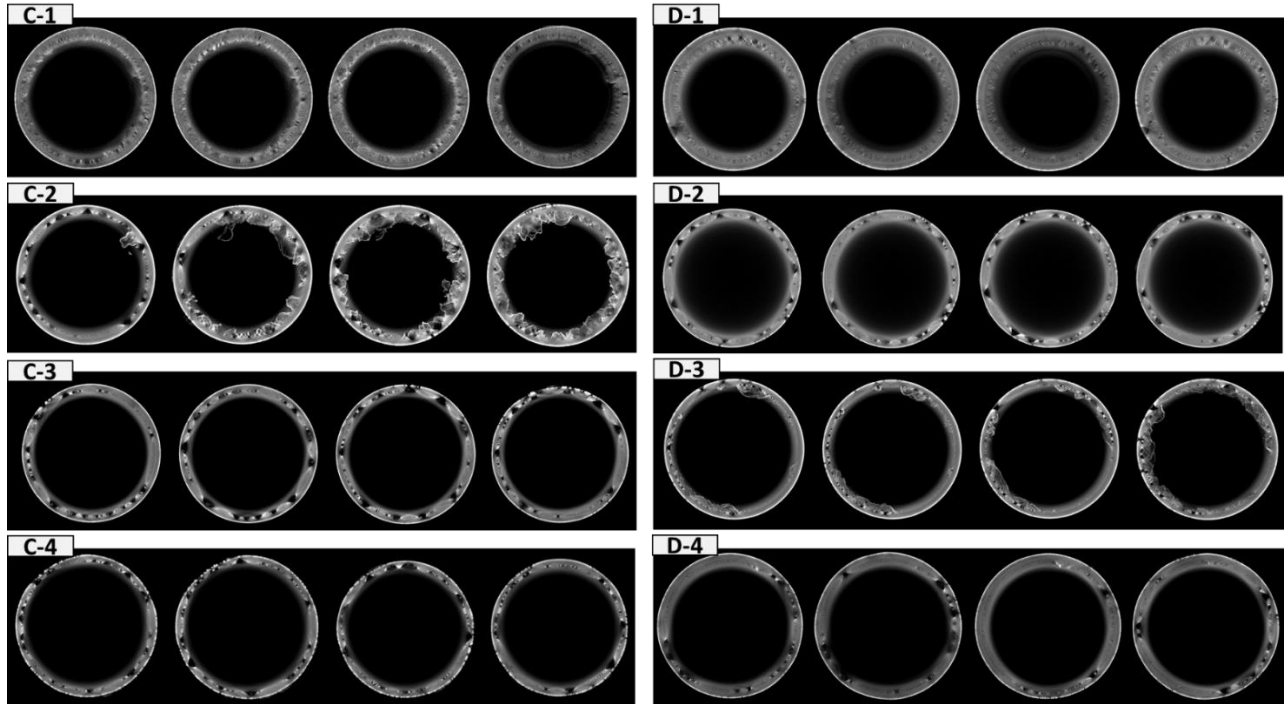


Figure 9 : Images de TDM des conduites en FG (à gauche) et en FD (à droite)

Cependant, il est essentiel de noter que la structure interne et l'intégrité des conduites sont influencées par divers facteurs, notamment l'âge des conduites, les matériaux, les conditions environnementales et les variations de pression interne. Les propriétés du sol telles que la résistivité, le pH et le potentiel redox, ainsi que les conditions de drainage, jouent un rôle important dans les processus de corrosion affectant ces conduites.

La Figure 10 présente les images de reconstruction 3D des échantillons obtenus à partir des analyses de TDM. Les images montrent des vues en coupe à différentes profondeurs, mettant en évidence la structure interne en spécifiant l'intensité du rayonnement incident par un code de couleurs, qui dépend de la densité des différents matériaux présents dans la structure de la conduite.

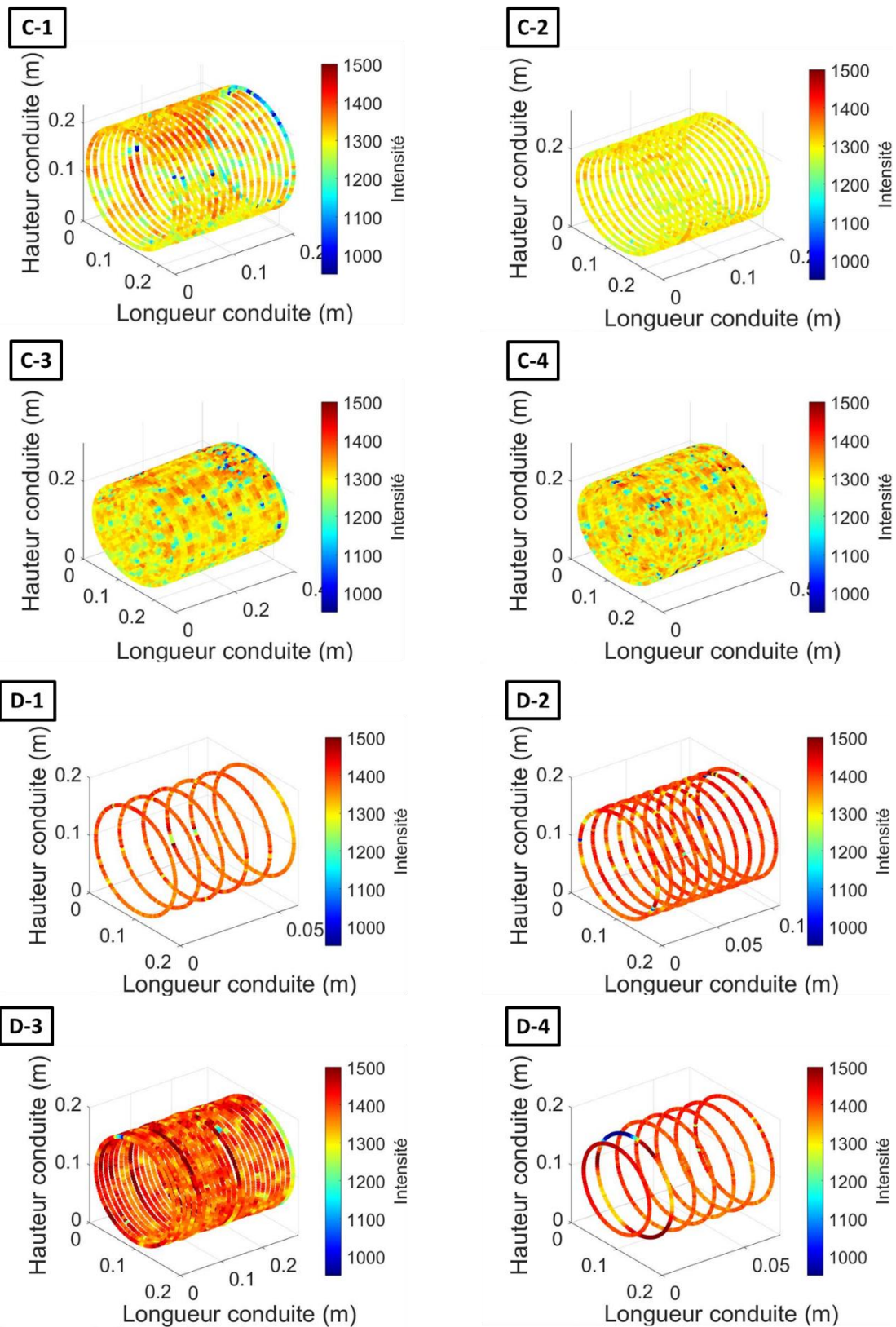


Figure 10 : Reconstruction 3D des structures de conduites de FG et de FD à l'aide des résultats du tomodensitomètre

La Figure 11 présente les graphiques du pourcentage de perte de paroi sur la longueur de chaque échantillon de conduite, offrant une évaluation quantitative de la perte de matière due à la corrosion. L'épaisseur nominale de paroi utilisée pour calculer ces pourcentages de perte a été déterminée à partir des images du CT-scan.

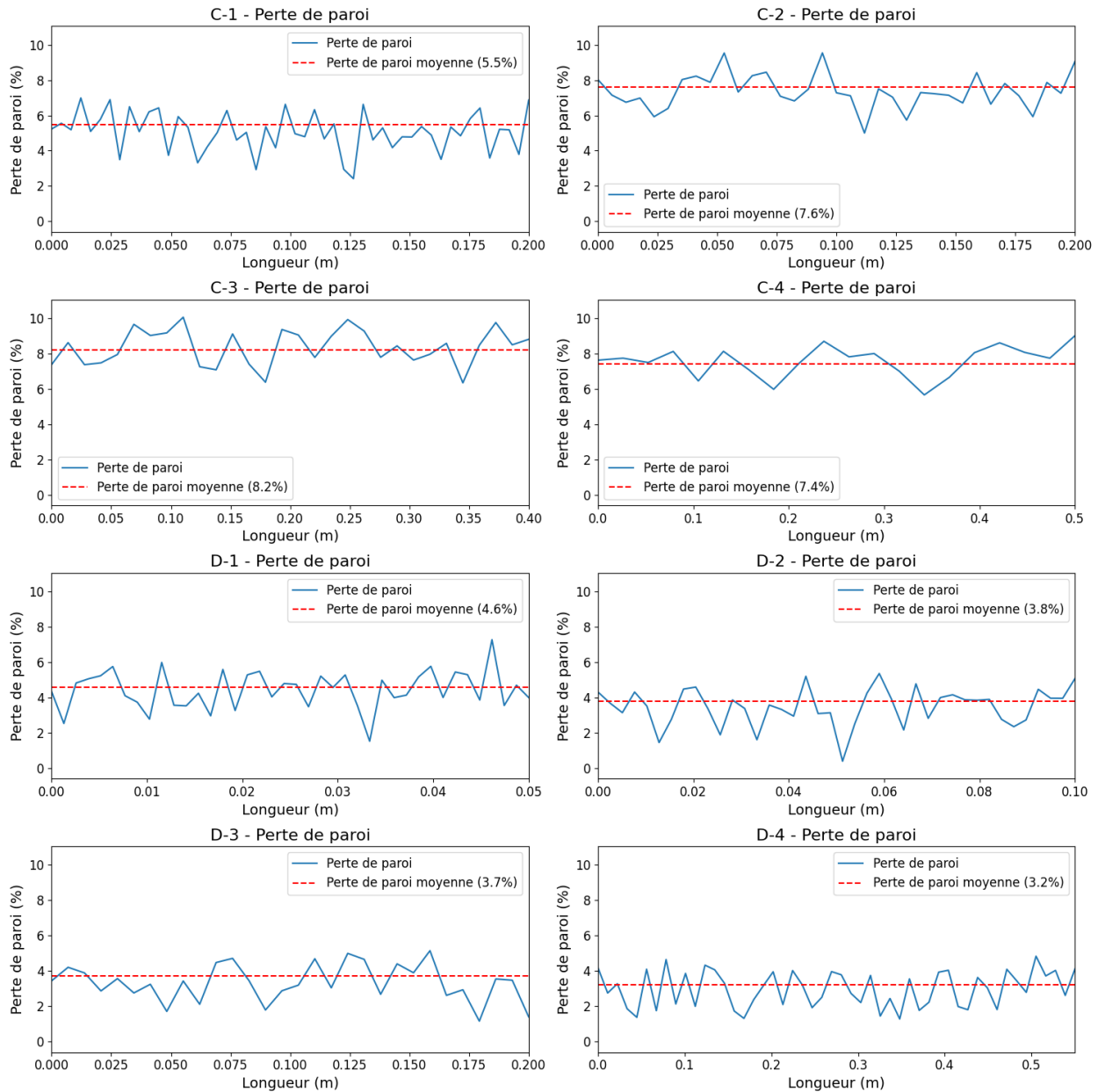


Figure 11 : Analyse TDM des échantillons en FG et FD, pourcentage de perte de paroi le long de la conduite



- **Conduites en FG (C-1 à C-4):** Les conduites en FG, notamment C-2 et C-3, présentent une dégradation interne importante avec une structure poreuse, indiquant une corrosion graphitique avancée. Les graphiques en 3D (Figure 10) révèlent une perte de matière substantielle, en particulier pour l'échantillon C-2, qui présente une sévère corrosion localisée. Les graphiques de perte de paroi quantifient davantage cette observation, l'échantillon C-2 ayant une perte de paroi moyenne de 7,6 % et C-3 de 8,2 %. Les conduites en FG, avec leurs années d'installation plus anciennes (allant de 1961 à 1970), présentent des niveaux de dégradation plus élevés, en relation avec leur exposition prolongée à des conditions environnementales agressives.

Les conditions environnementales impactent également la corrosion observée dans ces conduites. Les conduites en FG sont installées dans des environnements avec une agressivité du sol variable. Par exemple, C-2, placée dans du limon (+argile) avec une faible résistivité de 2300  $\Omega$ -cm et un faible drainage, présente un indice d'agressivité du sol élevé de 7,5, en relation avec son niveau élevé de dégradation interne. En revanche, C-4, avec un indice d'agressivité du sol inférieur à 1 en raison d'un drainage moyen et d'une résistivité plus élevée, présente une dégradation presque identique (perte moyenne de parois de 7,4 %).

- **Conduites en FD (D-1 à D-4):** Les conduites en FD présentent une structure plus cohérente et uniforme. Cependant, une corrosion localisée est encore évidente dans certains échantillons. Les graphiques en 3D (Figure 10) pour D-2 et D-3 montrent des zones de perte de matière importante, mais le phénomène est moins sévère que ce qui a été observé pour les conduites en FG. Les graphiques de perte de paroi indiquent que les conduites en FD ont généralement des pourcentages moyens de perte de paroi inférieurs, avec D-1 à 4,6 %, D-2 à 3,8 %, D-3 à 3,7 % et D-4 à 3,2 %. Les conduites en FD ont été installées plus récemment (1986 à 1995), ce qui explique, en partie, leur état de corrosion moins sévère par rapport aux conduites en FG plus anciennes.

Les conduites en FD, généralement placées dans des environnements plus agressifs avec une résistivité plus faible, présentent toujours des niveaux de perte de matière inférieurs à ceux des tuyaux en FG. Par exemple, l'échantillon D-4, installé dans du sable (+ limon) avec un bon drainage et une faible résistivité de 610  $\Omega$ -cm, a l'indice d'agressivité du sol le plus élevé, de 11, mais présente néanmoins une perte de paroi relativement faible (3,2 %) par rapport aux conduites plus vieilles en FG.

L'analyse par TDM a mis en évidence des différences significatives dans la structure interne et les pertes de matière entre les conduites en FG et en FD. Les conduites en FG, en particulier les plus anciennes, présentaient une dégradation interne relativement plus élevée et des pourcentages de perte de paroi plus élevés, principalement en raison de l'âge et des caractéristiques de la FG. En revanche, les conduites en FD présentent une structure plus uniforme et des pertes de matière plus faibles, attribuées au matériau et à une installation plus récente.

Les sections suivantes se concentreront sur l'examen approfondi de chacun des échantillons, en examinant leurs caractéristiques spécifiques et en discutant des informations qui en sont tirées.

#### **4.2 Analyse par MEB et EDS des échantillons en fonte grise et en fonte ductile**

Cette section se concentre sur l'analyse par MEB et EDS des échantillons prélevés des conduites. Les échantillons ont été prélevés à des endroits spécifiques des conduites, choisis sur la base d'une combinaison d'observations visuelles et de résultats de TDM. Ces derniers ont joué un rôle crucial dans ce processus de sélection en fournissant une vue tridimensionnelle détaillée de la structure interne des conduites. Les images haute résolution obtenues à partir de ces analyses ont révélé des variations dans la densité des matériaux, indiquant des sites potentiels de corrosion. Les zones présentant une perte de matière importante ou des anomalies de densité – mises en évidence par des intensités de pixels plus sombres ou irrégulières – ont été identifiées comme zones prioritaires pour une enquête plus approfondie. Ces résultats ont été accompagnés d'inspections visuelles, au cours desquelles des signes visibles de corrosion, tels que la présence de produits de corrosion, de piqûres ou une décoloration inhabituelle, ont permis de valider le choix des sites soumis à une analyse détaillée. Sur la base de ces évaluations, des sections spécifiques des conduites ont été prélevées par découpage. Celles-ci présentaient généralement des caractéristiques de corrosion prononcées, en faisant des candidats idéaux pour l'analyse par MEB et EDS afin d'explorer les changements microstructuraux et les compositions élémentaires impliquées dans le processus de corrosion. Cette approche méthodique garantit que les échantillons analysés sont directement liés aux zones les plus touchées, fournissant ainsi un aperçu des mécanismes de corrosion impliqués.

Dans cette section, les résultats de l'analyse par MEB et EDS pour les échantillons en FG et en FD sont présentés en détail. Chaque image de MEB inclut un sommaire des résultats de l'EDS dans le coin inférieur droit. Les résultats de l'EDS consistent en un graphique à barres montrant la composition élémentaire de l'ensemble de l'image de MEB et un tableau répertoriant les

compositions élémentaires en trois points spécifiques sur chaque image de MEB. Ces points ont été choisis en fonction de leur morphologie plus complexe ou distincte, comme l'indiquent les différentes nuances de gris sur les images de MEB. Ces critères de sélection visent à fournir des informations sur les mécanismes de corrosion en se concentrant sur les zones présentant des différences morphologiques notables.

Les résultats de l'EDS présentés dans cette section se concentrent sur les quatre éléments principaux (C, O, Fe, Cl), car les concentrations d'autres minéraux étaient négligeables (moins de 1 %). Les compositions détaillées de ces éléments sont fournies aux annexes 1 à 10.

#### 4.2.1 Échantillon C-1 : Conduite en fonte grise

L'échantillon C-1 (Figure 12) provient d'une conduite en FG qui a connu un bris, ce qui a nécessité d'importants efforts de réparation. Dans un premier temps, le bris a nécessité le remplacement de plusieurs mètres de conduites d'eau et de vannes le long de la conduite. Cependant, lors de la remise en service du réseau à la suite des réparations, un autre bris s'est produit très près du site de réparation initiale. C'est à ce nouveau site de bris que l'échantillon C-2 a été prélevé.



Figure 12 : Échantillon C-1 en FG

Comme l'indique l'image de morphologie de surface de l'échantillon C-1 à la Figure 13 (a), l'échantillon présente un patron de corrosion essentiellement uniforme et une morphologie de produits de corrosion poreuse, indiquant une activité de corrosion généralisée. La morphologie poreuse des produits de corrosion est visible à travers la texture et les vides présents dans l'image. Les différentes nuances de gris sur l'image de MEB représentent les variations de densité

des matériaux et des produits de corrosion, les zones plus sombres indiquant des régions plus poreuses et moins denses. Les résultats de l'EDS pour l'échantillon C-1 ont révélé une teneur en carbone relativement élevée dans les produits de corrosion (points 2 et 3, Figure 13 (a)) et la présence de flocons de graphite (point 1, Figure 13 (a)), indiquant la possibilité d'une corrosion graphitique. La corrosion graphitique est généralement identifiable par la présence d'une structure en forme de flocons relativement foncés avec une teneur élevée en carbone.

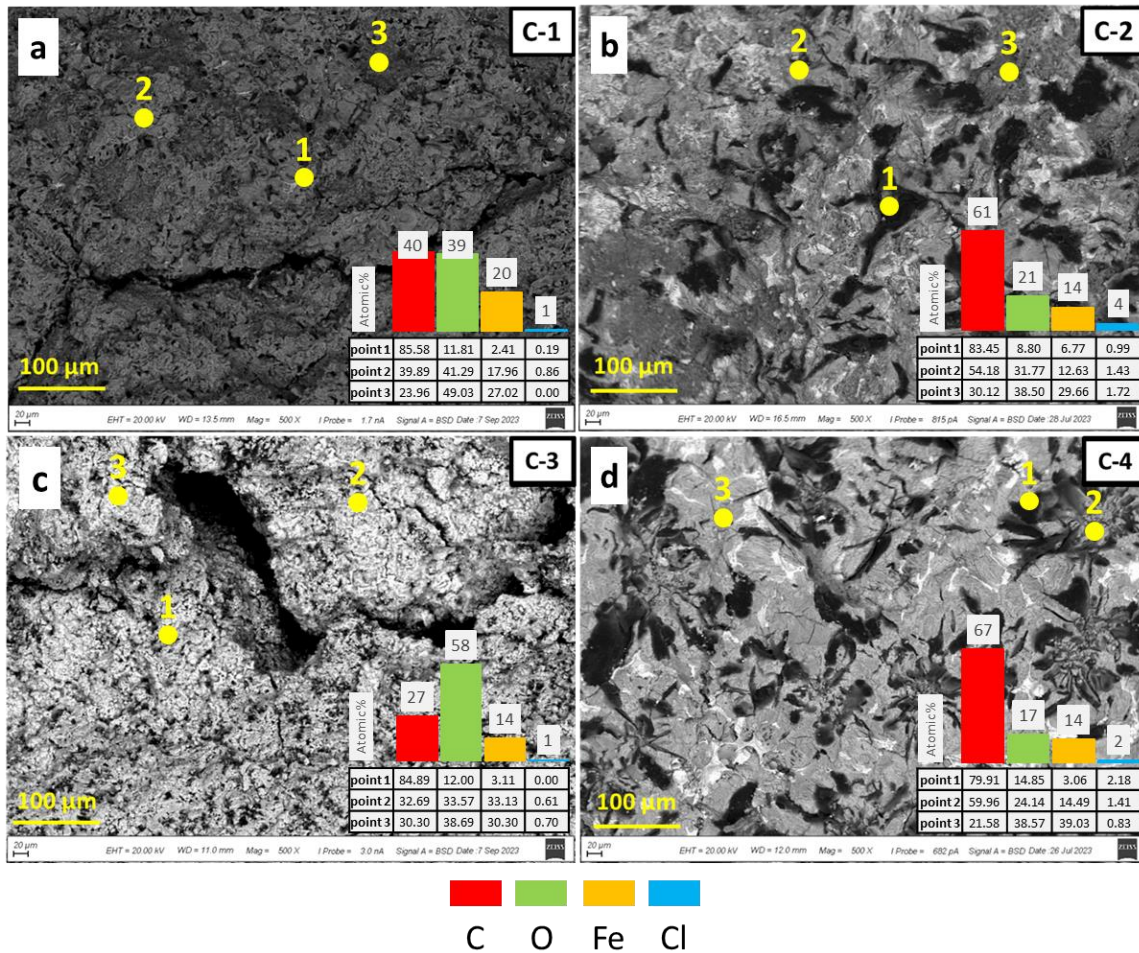


Figure 13 : Résultats MEB/EDS des échantillons en FG, a) C-1, b) C-2, c) C-3 et d) C-4

Comme indiqué au Tableau 4, le sol entourant l'échantillon C-1 est classifié comme non corrosif. Cependant, le drainage moyen du sol est susceptible de favoriser l'accumulation d'humidité, permettant ainsi l'interaction de la surface de la conduite avec un environnement riche en

humidité, accélérant ainsi la corrosion. Cela pourrait être la cause de l'activité de corrosion généralisée observée sur cet échantillon.

#### 4.2.2 Échantillon C-2 : Conduite en fonte grise

Tel que décrit précédemment, l'échantillon C-2 (Figure 14) a été collecté à partir de la même conduite que l'échantillon C-1 lors d'un bris secondaire étant survenu lors de la remise en service du réseau suite à la réparation du premier bris. Tout comme l'échantillon C-1, l'échantillon C-2 est composé de FG.



Figure 14 : Échantillon C-2 en FG

L'image de MEB de la surface de l'échantillon C-2 (Figure 13 (b)) a révélé un patron de corrosion distinctif. Notamment, la présence de flocons de graphite allongés à travers la microstructure a été observée (point 1, Figure 13 (b)), pointant vers une corrosion graphitique. La composition élémentaire des produits de corrosion obtenue par analyse EDS a permis d'identifier des régions riches en carbone (point 1 – les flocons de graphite) et des zones appauvries en fer (points 2 et 3, Figure 13 (b)), qui indiquent en outre des signes de corrosion graphitique. Les résultats ont démontré une quantité légèrement élevée d'ions chlorure (4 %, Figure 13 (b)) sur les produits de corrosion, ce qui pourrait être dû à la présence de sels dans le sol environnant.



Les signes de corrosion graphitique observés dans cet échantillon peuvent être dus au faible drainage du sol ainsi qu'au faible potentiel rédox (87,2 mV). La faible capacité de drainage du sol augmente la probabilité d'accumulation d'humidité qui, en présence de sel dissous (comme le 4% de Cl identifié par l'analyse EDS, Figure 13 (b)) autour de la conduite, contribue à accélérer le processus de corrosion.

#### 4.2.3 Échantillon C-3 : Conduite en fonte grise

Échantillon C-3 (Figure 15) a été collecté sur un segment du RDE qui a subi une réparation et un remplacement en raison d'un dysfonctionnement de la vanne. Tout comme les échantillons C-1 et C-2, l'échantillon C-3 est composé de FG.



Figure 15 : Échantillon C-3 en FG

L'analyse par MEB et EDS de l'échantillon C-3 (Figure 13 (c)) a révélé un patron de corrosion compatible avec une corrosion de type graphitique. Les structures en forme de flocons (points 1, 2 et 3) visibles sur l'image de MEB avec une teneur en carbone relativement élevée (27%) et faible en fer (14%) sur l'image (Figure 13 (c), graphique à barres), obtenues à partir de l'analyse EDS, sont des signes de corrosion graphitique.

Selon le Tableau 4, le sol entourant l'échantillon C-3 est caractérisé comme étant un environnement non corrosif ; cependant, la résistivité relativement faible (1600  $\Omega$ -cm) et le

drainage moyen, spécifiquement en présence d'ions chlorure (1 %) identifiés par l'analyse EDS (Figure 13 (c)), sont des facteurs pouvant potentiellement accélérer le processus de corrosion.

#### 4.2.4 Échantillon C-4 : Conduite en fonte grise

Échantillon C-4, présenté à la Figure 16, a été obtenu à partir d'un segment de conduite en FG du RDE lors de travaux de réhabilitation, incluant le remplacement de la conduite et l'installation de vannes en raison de pannes répétées du système et d'une perte de pression excessive.



Figure 16 : Échantillon C-4 en FG

La conduite excavée était fortement détériorée avec de multiples fissures et bris longitudinaux visibles sur l'échantillon (Figure 16). L'examen visuel a confirmé la présence de corrosion en surface de la conduite.

L'image de MEB de la section la plus détériorée de l'échantillon C-4 présentée à la Figure 13 (d) révèle un patron de corrosion compatible avec la corrosion graphitique, révélé notamment par la présence de flocons de graphite allongés dans la microstructure et de zones riches en carbone (80 %) (point 1, Figure 13 (d)). Ces observations ressemblent à celles effectuées pour l'échantillon C-2, qui possède un patron de corrosion similaire. Il est également à noter que les résultats de l'analyse par EDS de l'échantillon C-4 (Figure 13 (d)) indiquent des régions à faible teneur de fer et à haute teneur en oxygène (points 2 et 3).

L'échantillon C-4 présente des caractéristiques de corrosion graphitique similaires à celles des échantillons C-1, C-2 et C-3, soulignant la nature persistante de ce mécanisme de corrosion dans les conduites en FG.

L'échantillon C-4, tel qu'indiqué au Tableau 4, est situé dans un environnement non corrosif. Cependant, la présence de corrosion graphitique suggère des interactions complexes entre le sol et le matériau de la conduite, conduisant à la corrosion. Cela pourrait être dû au drainage moyen du sol environnant. La capacité modérée de drainage du sol permet une accumulation d'humidité autour de la conduite, ce qui, en présence d'ions chlorure (2 %), accélère potentiellement la corrosion.

#### **4.2.5 Échantillon D-1 : Conduite en fonte ductile**

L'échantillon D-1, présenté à la Figure 17, a été collecté dans une conduite en FD excavée au cours de travaux de réparation visant à remédier aux défaillances récurrentes de la conduite au fil des ans, nécessitant le remplacement de sections de conduites et de vannes. Une inspection visuelle des produits de corrosion et de la structure de la conduite indiquent que la conduite s'est dégradée à certains endroits précis et présente un historique de corrosion localisée.



Figure 17 : Échantillon D-1 en FD

L'examen des produits de corrosion de l'échantillon D-1 par MEB et EDS, présenté à la Figure 18 (a), a révélé la présence de produits de corrosion sous forme d'aiguilles. Ces structures se caractérisent par leur morphologie allongée et pointue, qui peut être observée comme de fines projections pointues émanant de la surface corrodée. L'apparence distincte en forme d'aiguilles



suggère des mécanismes de corrosion complexes, probablement attribués à une corrosion localisée, où des zones spécifiques de la surface métallique sont préférentiellement attaquées, conduisant à ces formations pointues en aiguilles. Cette morphologie est typiquement associée à des environnements de corrosion agressifs et peut indiquer la présence de phénomènes de corrosion par piqûres ou de corrosion cavernreuse. L'analyse EDS (Figure 18 (a)) a en outre permis d'identifier une teneur légèrement élevée d'ions chlorure (3 %) et une teneur minimale en minéraux ( $\leq 1\%$ ) sur les produits de corrosion.

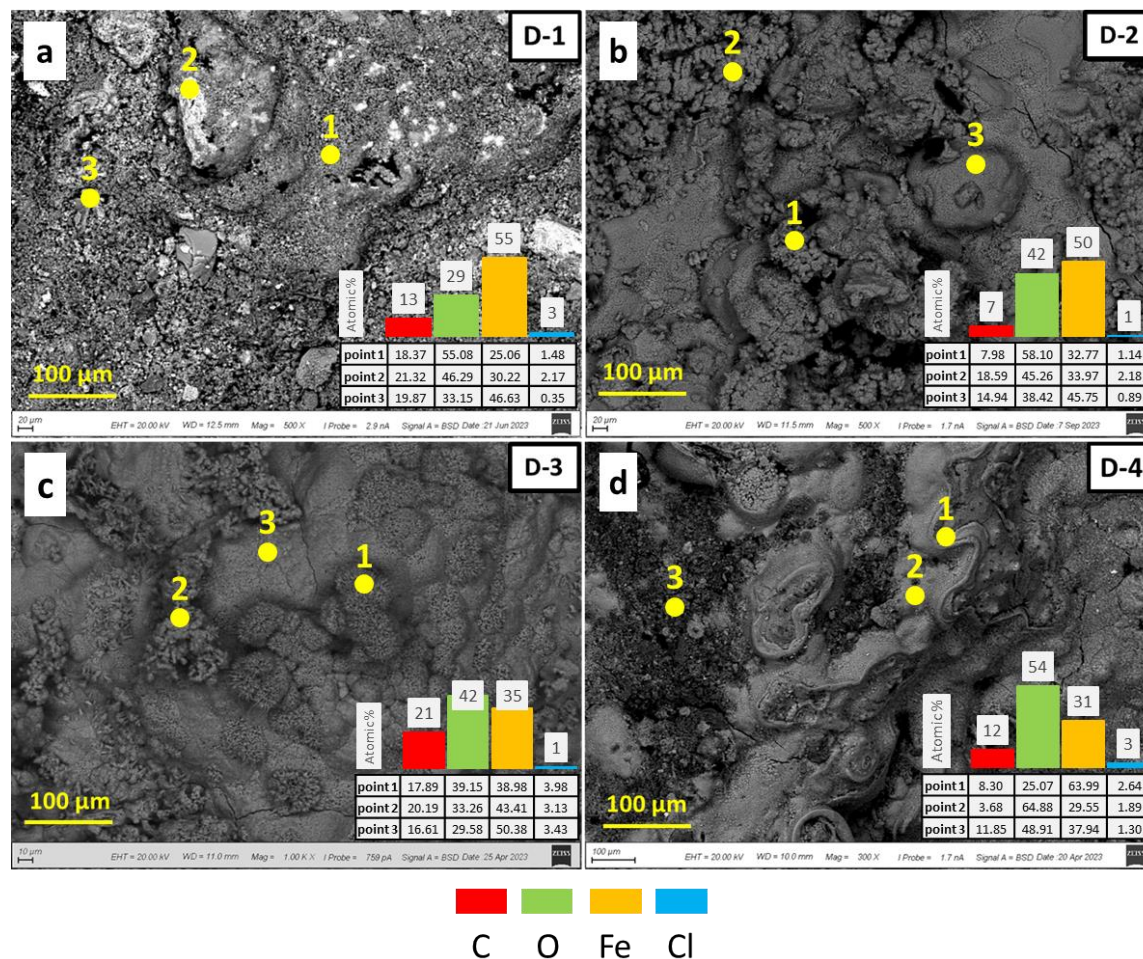


Figure 18 : Résultats MEB/EDS des échantillons en FD, a) D-1, b) D-2, c) D-3 et d) D-4

Malgré la nature non corrosive du sol environnant, tel que présenté au Tableau 4, qui devrait idéalement atténuer la corrosion, la conduite présentait des signes de corrosion localisée. Ces observations concordent avec les résultats des analyses par EDS, qui indiquent une faible perte en fer (55 % de Fe, Figure 18 (a)), suggérant la présence de processus de corrosion en cours.

#### 4.2.6 Échantillon D-2 : Conduite en fonte ductile

L'échantillon D-2, présenté à la Figure 19, a été prélevé dans une conduite en FD lors d'une réparation impliquant plusieurs excavations sur toute sa longueur pour remédier aux défaillances de conduites et aux pertes de pression excessives. Une inspection visuelle a indiqué que la conduite avait subi un bris longitudinal avec une faible détérioration. Cependant, la formation importante de produits de corrosion sur une portion significative de la surface externe était évidente à l'examen visuel. Des spécimens ont été découpés dans les régions présentant une accumulation importante de produits de corrosion afin de réaliser une caractérisation approfondie via les analyse par MEB et EDS.



Figure 19 : Échantillon D-2 en FD

La caractérisation des produits de corrosion de l'échantillon D-2 par MEB, présentée à la Figure 18 (b), présente une morphologie non uniforme et en forme d'aiguilles (point 3) recouverte de structures en forme de fleurs (points 1 et 2). De plus, tel qu'identifié par l'analyse EDS (Figure 18 (b)), le pourcentage légèrement élevé d'ions chlorure (1 % et 2 %) sur les points 1 et 2 suggère la possibilité d'un taux de corrosion localisé plus élevé à ces endroits, car la présence d'ions contribue à la corrosion. De plus, la prédominance de l'oxydation du fer (faible teneur en fer et teneur élevée en oxygène) pour les points analysés par EDS est signe d'une activité de corrosion localisée rapide. Une corrosion rapide est normalement indiquée par la présence de zones

présentant une morphologie de surface distincte comme une structure en forme de fleurs telle que celle observée pour les points 1 et 2.

L'environnement modérément corrosif entourant l'échantillon D-2 (illustré au Tableau 4), caractérisé par sa résistivité légèrement faible et son drainage moyen, contribue à la morphologie distincte des produits de corrosion et à la corrosion localisée observées.

#### **4.2.7 Échantillon D-3 : Conduite en fonte ductile**

L'échantillon D-3, présenté à la Figure 20, a été obtenu à partir d'une conduite en FD lors d'une opération de réparation visant au remplacement de sections de conduites et de vannes pour remédier aux pannes récurrentes du système.



Figure 20 : Échantillon D-3 en FD

Les examens visuels et les résultats de TDM pour l'échantillon D-3 (Figure 20) indiquaient une faible dégradation de la structure de cette conduite. Cependant, il y avait des indices d'une accumulation de produits de corrosion dans certaines régions spécifiques de la surface externe, indiquant des processus de corrosion rapides et une exposition potentielle à un environnement corrosif.

L'analyse de la surface de l'échantillon D-3 via MEB a également révélé une morphologie non homogène en forme d'aiguilles recouverte de structures en forme de fleurs (points 1 et 2 à la Figure 18 (c)), révélant une activité de corrosion localisée rapide. De plus, l'analyse par EDS a indiqué que les régions en forme de fleurs étaient principalement constituées d'oxydes de fer, comme en témoigne la teneur en fer inférieure à cet endroit par rapport à la teneur moyenne pour cet échantillon, ce qui correspond à une corrosion localisée rapide. Les résultats de l'analyse par



EDS ont également montré une quantité négligeable de minéraux et une quantité légèrement élevée d'ions chlorure (1 à 3 %), ce qui confirme l'apparition d'une corrosion localisée.

Finalement, le sol environnant de l'échantillon D-3 (indiqué au Tableau 4), avec une faible résistivité de 800  $\Omega$ -cm, est considéré comme corrosif, ce qui contribue au processus de corrosion rapide et à la morphologie distincte des produits de corrosion révélée par l'analyse.

#### 4.2.8 Échantillon D-4 : Conduite en fonte ductile

L'échantillon D-4 (montré à la Figure 21) provient d'une conduite en FD excavée suite à la défaillance majeure d'une conduite et impliquant des réparations temporaires et le remplacement de sections de conduite et de vannes (exemple d'image fourni à l'annexe 8). Des sections provenant des régions les plus détériorées ont été découpés dans la conduite afin de procéder à une analyse par MEB et EDS.



Figure 21 : Échantillon D-4 en FD

L'examen par MEB et EDS de l'échantillon D-4, présenté à la Figure 18 (d), a révélé une structure non homogène des produits de corrosion. Cela inclut des éléments en forme d'aiguilles, caractérisés par leurs fines projections allongées, et des zones recouvertes de structures en forme de tiges, identifiables comme des formations cylindriques plus longues qui sont proéminentes par rapport au matériau environnant. Ces structures en forme de tiges sont plus

épaisses et uniformes que celles en forme d'aiguilles. La présence de ces morphologies distinctes, particulièrement pour le point 1, indique un mécanisme de corrosion localisée complexe et rapide. La variation de structure et de forme à travers l'échantillon met en évidence la nature agressive des processus de corrosion à l'œuvre, les structures en forme d'aiguilles et de tiges fournissant une preuve visuelle de ces phénomènes. Les résultats de l'analyse par EDS, présentés à la Figure 18 (d), mettent en évidence une oxydation substantielle du fer sur la surface globale d'analyse (54% d'O et 31% de Fe) ainsi que sur les structures en forme d'aiguilles (point 3). De plus, l'appauvrissement notable en fer de la matrice de surface est évident car les structures en forme de tiges riches en fer (64 %) (point 1) sont entourées de produits oxydés (point 2), indiqués par une teneur élevée en oxygène (65 %) et un faible teneur en fer (30%).

Les conditions corrosives entourant l'échantillon D-4 (présentées dans le Tableau 4), comme le suggèrent sa faible résistivité de 610  $\Omega$ -cm et ses caractéristiques de drainage modérées, ont possiblement joué un rôle important dans l'accélération de la corrosion localisée de l'échantillon D-4. La combinaison de ces facteurs environnementaux crée un environnement propice aux processus de corrosion agressifs, en particulier aux attaques localisées, dans lesquels la corrosion se produit préférentiellement sur des sites spécifiques plutôt qu'uniformément sur la surface du matériau, ce qui entraîne la morphologie distincte indiquée par l'analyse par MEB présentée à la Figure 18 (d).

### **4.3 Analyse par MEB et EDS d'échantillons en fonte grise et en fonte ductile en contact avec l'acier**

#### **4.3.1 Échantillon M-1 – Conduites en fonte grise et fonte ductile reliées par un manchon en acier**

L'échantillon M-1 consistait en une conduite en FG connectée à une conduite en FD à l'aide d'un manchon en acier, tel qu'illustré à la Figure 22. La conduite sur laquelle l'échantillon M-1 a été prélevé avait préalablement été réparée suite à un bris de conduite, en remplaçant une section de conduite en FG par une nouvelle conduite en FD à l'aide d'un manchon en acier. L'excavation de l'échantillon M-1 a été initiée en raison d'une perte de pression et de débit au niveau d'une vanne, nécessitant le remplacement de la vanne et des sections de conduite.

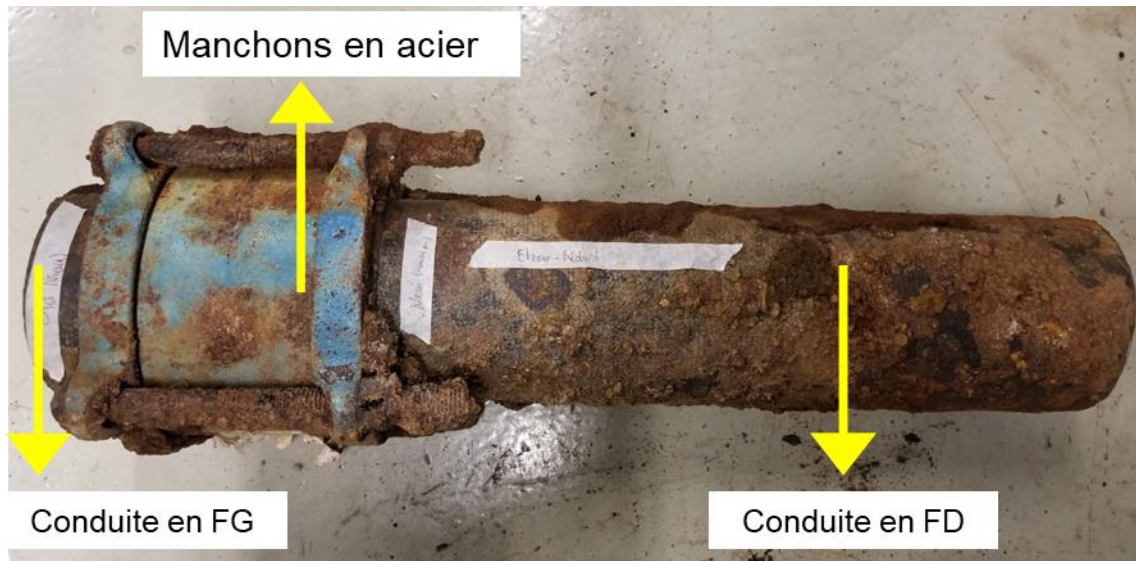


Figure 22 : Échantillon M-1 - Conduite en fonte grise et conduite en fonte ductile reliées par un manchon en acier

La corrosion de l'échantillon M-1 a été évaluée par les analyses par MEB et EDS présentées à la Figure 23. Chaque matériau est analysé séparément dans la section suivante afin de réaliser une approche comparative. Cette analyse vise à évaluer l'impact des métaux dissimilaires en contact sur le patron de corrosion, en se concentrant particulièrement sur les différentes interfaces, notamment : les surfaces de FG et de FD en contact avec le sol et l'acier, ainsi que les surfaces d'acier en contact avec le sol, la FG et la FD.



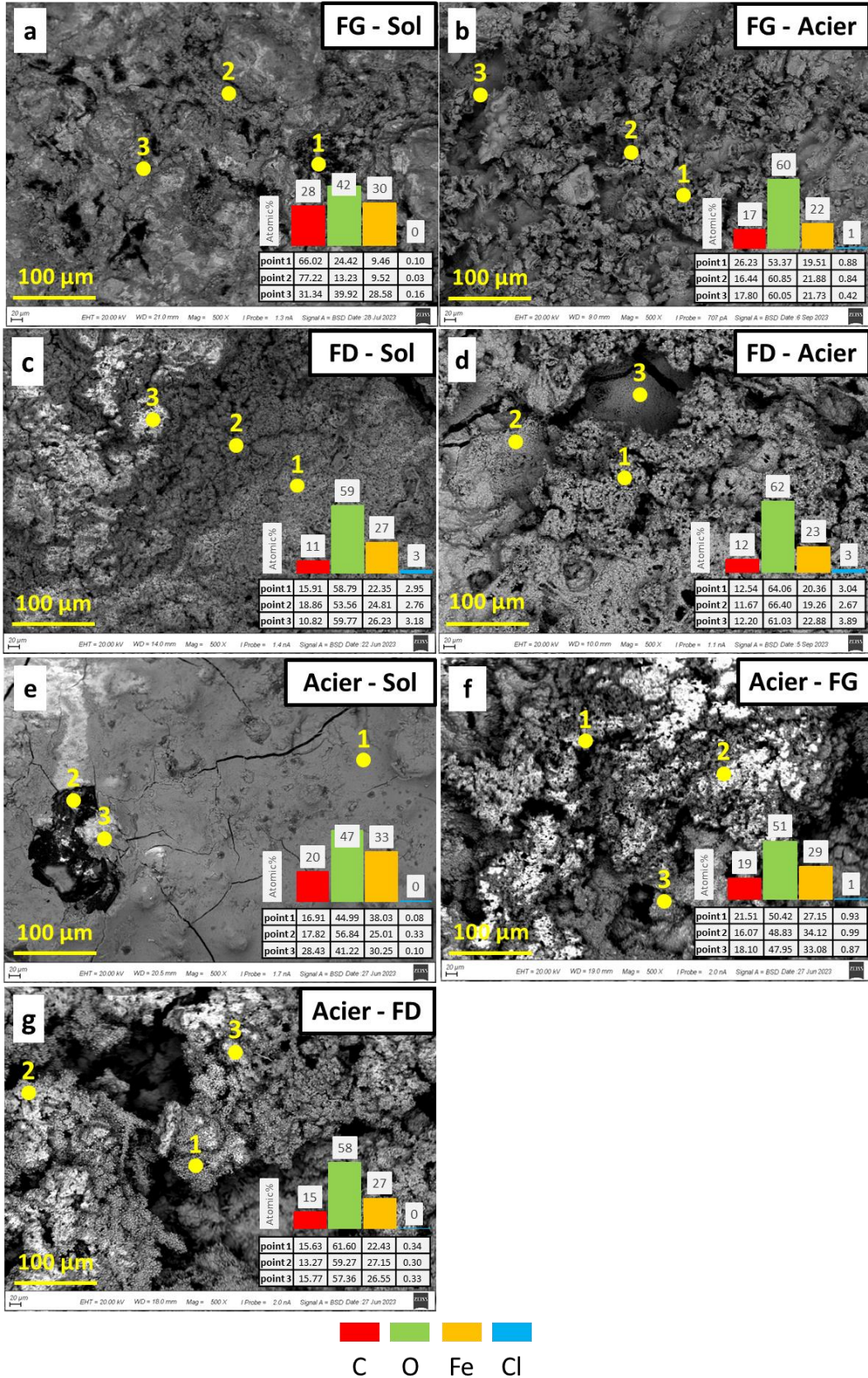


Figure 23 : Résultats MEB/EDS de l'échantillon M-1 : surface en FG en contact avec a) le sol, b) l'acier ; Surface en FD en contact avec c) le sol, d) l'acier ; surface en acier en contact avec e) le sol, f) la FG, g) la FD

- **Surface de la conduite en FG en contact avec le sol comparativement à celle en contact avec l'acier**

**M-1 – FG-sol** : La morphologie de surface présentée à la Figure 23 (a) montre la conduite en FG en contact avec le sol. La morphologie et la composition élémentaire obtenues par les analyses par MEB et EDS ont révélé des signes de corrosion généralisée avec des indices de corrosion graphitique identifiable grâce aux flocons de graphite (point 1) et aux régions appauvries en fer (points 2 et 3).

**M-1 - FG-acier** : L'analyse par MEB et EDS sur la surface de la conduite en FG en contact avec l'acier (Figure 23 (b)) présente une structure plus complexe, caractérisée par une structure poreuse (points 1 et 2) et des flocons de graphite (point 3). Cela suggère une corrosion accrue à l'interface FG-acier.

L'analyse par MEB et EDS des produits de corrosion à la surface de la FG dans l'échantillon M-1 a indiqué qu'au contact du sol, la corrosion graphitique s'est avérée être le processus de corrosion dominant. Cependant, au contact de l'acier, le processus de corrosion devient un processus plus complexe intégrant une corrosion localisée.

- **Surface de la conduite en FD en contact avec le sol comparativement à celle en contact avec l'acier**

**M-1 - FD-sol** : La morphologie de surface de la conduite en FD en contact avec le sol est présentée à la Figure 23 (c). Des structures en forme d'aiguilles sont visibles, réparties de manière homogène sur la surface, indiquant une corrosion localisée, telle qu'observée pour les échantillons en FD précédents. La composition chimique reflète l'oxydation du fer (59 % d'O et 27 % de Fe), avec une faible teneur en carbone (11 %) par rapport à la conduite en FG (avec normalement 42 % d'O, 30 % de Fe et 28 % de C).

**M-1 - FD-acier** : La surface de la conduite en FD en contact avec l'acier présente une morphologie plus complexe (Figure 23 (d)). Comme le montre l'image de MEB, la morphologie en forme d'aiguilles semble moins homogène et recouverte de structures présentant une porosité et une fragilité accrues, suggérant des effets de corrosion localisés rapides intensifiés par la présence d'acier. La composition chimique (présentée à la Figure 23 (d)) démontre que le taux de corrosion de cette surface a été plus élevé que celui de la surface FD-sol car davantage de fer a été oxydé, comme le montre la teneur plus élevée en oxygène (62 %) et plus faible en fer (23 %).

L'analyse par MEB et EDS des produits de corrosion à la surface de la FD dans l'échantillon M-1 a révélé qu'au contact du sol, le processus de corrosion prédominant était la corrosion localisée



uniforme alors qu'au contact de l'acier, la morphologie des produits de corrosion devenait plus complexe, présentant des structures fragiles et non homogènes, indiquant un processus de corrosion rapide.

- **Analyse des surfaces du manchon en acier en contact avec le sol, avec la conduite en FG et avec la conduite en FD**

**M-1 – acier-sol** : La morphologie présentée sur l'image de MEB de l'interface acier-sol (Figure 23 (e)) semble homogène avec de faibles irrégularités de surface, suggérant une activité de corrosion limitée sur la surface de l'acier en contact avec le sol. Ces observations sont appuyées par l'analyse EDS, qui a permis de mesurer une teneur de 33 % en fer, de 47 % en oxygène et 20 % en carbone. La teneur relativement élevée en oxygène indique une certaine activité d'oxydation, mais l'homogénéité et les faibles irrégularités de la surface suggèrent que cette oxydation n'est pas étendue. Le faible niveau d'irrégularités de surface et la composition élémentaire spécifique témoignent d'une activité de corrosion limitée dans cet échantillon.

**M-1 - acier-FG** : La morphologie de surface présentée à la Figure 23 (f) représente le manchon en acier en contact avec la conduite en FG. La morphologie observée dans l'image de MEB pour l'interface acier-FG présente un niveau de porosité accru, indiquant une corrosion localisée accélérée de l'acier en présence de la FG. De plus, les résultats de l'analyse par EDS (Figure 23 (f)) pour les points 1, 2 et 3 indiquent une augmentation de la consommation de fer (à 29 %) et de la teneur en oxygène (51 %), deux indicateurs d'un taux de corrosion accru.

**M-1 - acier-FD** : La morphologie présentée à la Figure 23 (g) suggère une activité de corrosion plus complexe et un niveau de porosité plus importants que ceux des interfaces acier-sol et acier-FG. De plus, les résultats de l'analyse par EDS (Figure 23 (g)) indiquent une augmentation de la consommation du fer et de la teneur en oxygène comparativement aux interfaces acier-sol et acier-FG, indiquant une corrosion plus importante.

En fonction des caractéristiques du sol (Tableau 4), l'environnement de cet échantillon est considéré comme corrosif. La faible résistivité du sol (1400  $\Omega$ -cm) a mené à une accélération de la corrosion galvanique entre métaux dissimilaires (FG, FD et acier) qui est observée dans l'analyse comparative sur les trois composants différents en contact dans l'échantillon M-1. L'analyse par MEB et EDS des produits de corrosion sur la surface de l'acier dans l'échantillon M-1 a montré que l'acier subit un processus de corrosion plus rapide et plus complexe lorsqu'il entre en contact avec la FG ou la FD. La morphologie poreuse et non uniforme observée sur les

images de MEB indique une corrosion localisée rapide, comme en témoignent les analyses élémentaires par EDS réalisées en différents points, qui révèlent une teneur appauvrie en fer.

#### 4.3.2 Échantillon M-2 – Conduite en FG reliée à un composant en acier via un manchon en acier

Cette section présente une analyse détaillée de l'échantillon M-2, extrait du RDE de la ville de Québec. Les travaux visaient à réparer le réseau de distribution suite à des défaillances récurrentes du système. Malgré les difficultés opérationnelles, aucune perforation n'a été observée dans les conduites lors de l'excavation, indiquant que l'intégrité structurale n'avait pas été compromise. L'échantillon M-2, tel que montré à la Figure 24, comprend une conduite en FG reliée à un composant en acier via un manchon en acier. Il s'agit donc d'un assemblage de matériaux dissimilaires.



Figure 24 : Échantillon M-2 - Conduite en FG reliée à un composant en acier via un manchon en acier

Selon les résultats de MEB présentés à la

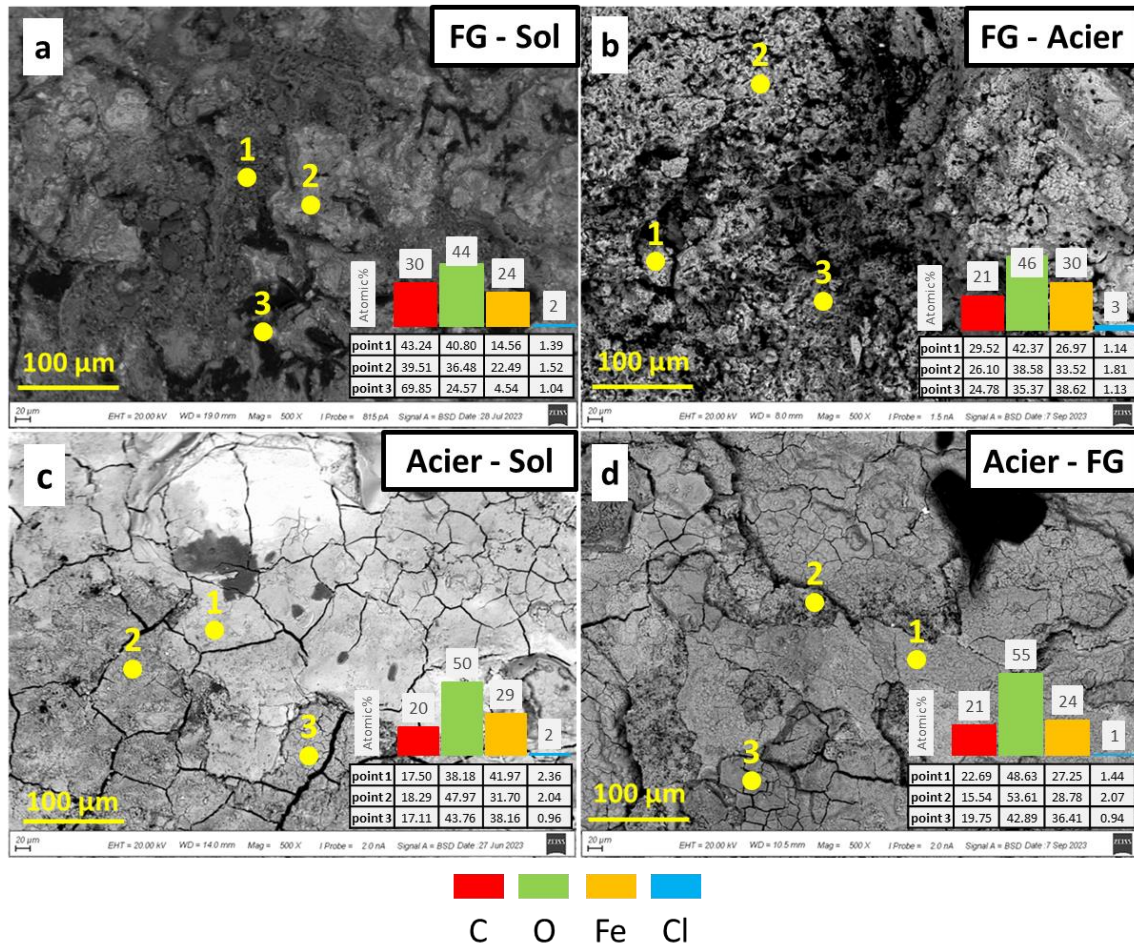


Figure 25, l'échantillon M-2 présente des caractéristiques variées de corrosion aux interfaces entre la FG et les composants en acier, influencées par les propriétés du sol telles que la résistivité, le drainage et la présence d'ions chlorure.



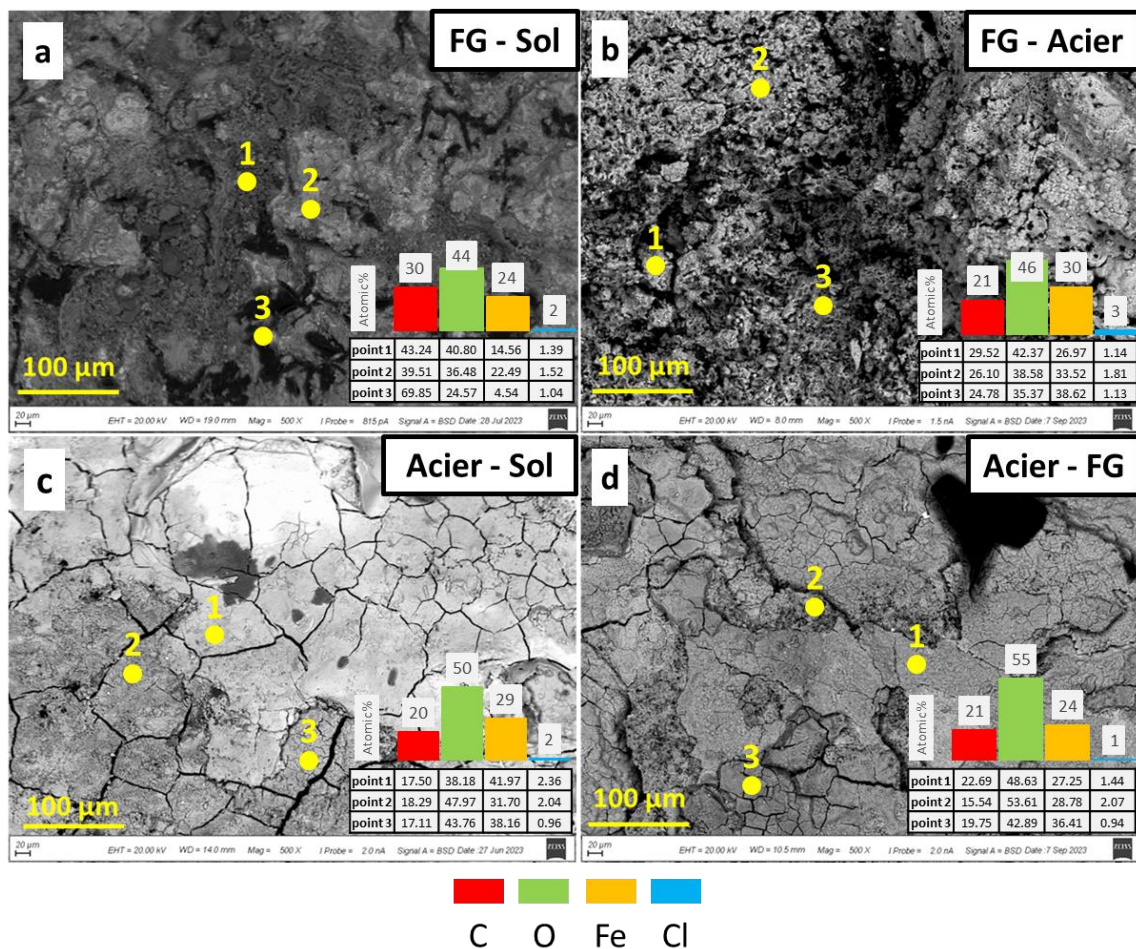


Figure 25 : Résultats MEB/EDS de l'échantillon M-2 : surface en FG en contact avec a) le sol, b) l'acier ; surface en acier en contact avec c) le sol, d) la FG

**M-2 - FG-sol** : La morphologie présentée à la Figure 25 (a) révèle des signes de corrosion généralisée et graphitique, indicateurs d'une activité électrochimique entre la FG et les constituants du sol. La résistivité élevée du sol sableux ( $1\ 400\ \Omega\text{-cm}$ ) suggère un environnement non corrosif, atténuant le potentiel de corrosion à l'interface FG-sol. Cependant, la présence d'ions chlorure peut contribuer à une corrosion localisée.

**M-2 - FG-acier** : La morphologie complexe présentée à la Figure 25 (b), caractérisée par une porosité importante sur les flocons de graphite, suggère une augmentation de la corrosion à l'interface FG-acier. Les propriétés de drainage du sol (telles qu'indiquées au Tableau 4), facilitant le mouvement de l'humidité et la présence de chlore indiquée par les résultats de l'analyse par EDS (Figure 25 (b)), peuvent également expliquer le taux de corrosion accéléré.

**M-2 - sol-acier** : La morphologie de surface homogène avec des irrégularités minimales présentée à la Figure 25 (c) suggère une activité de corrosion limitée à l'interface acier-sol. La combinaison d'une résistivité élevée et d'un bon drainage dans le sol sableux (Tableau 4) suggère également un environnement non corrosif.

**M-2 - acier-FG** : Une corrosion accélérée a été observée dans les résultats de MEB présentés à la Figure 25 (d), caractérisée par un niveau de porosité plus important et une structure relâchée, qui pourraient être attribués aux effets de la corrosion galvanique induite par le contact entre métaux dissimilaires. La présence d'ions chlorure révélée par les résultats de l'analyse par EDS (Figure 25 (d)) peuvent également avoir contribué à la corrosion rapide à l'interface acier-FG.

### Résultats communs à tous les échantillons

Après avoir analysé les données collectées, plusieurs tendances et observations communes ont émergé pour tous les échantillons.

- **Teneur en humidité et corrosion**: L'analyse des échantillons C-2, C-3, C-4, D-2, D-4 et M-2 a suggéré une relation potentielle entre la teneur en humidité du sol et le taux de corrosion, de telle sorte qu'un moins bon drainage du sol accélère le mécanisme de corrosion.
- **Teneurs en chlore et impact du sel de déglacage**: Une constatation dérivée principalement des échantillons C-2, C-3, D-1, D-2, D-3 et M-2 était la présence de teneurs élevées en chlore dans les échantillons (comme le montrent les résultats EDS aux Figure 13 et Figure 25), ce qui pourrait être dû à l'application de sels de déglacage. Le processus de corrosion des composants métalliques souterrains est accéléré par la présence de chlore dans le sol environnant. L'utilisation de sels de déglacage, comme le chlorure de sodium (NaCl), le chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) ou le chlorure de magnésium ( $\text{MgCl}_2$ ), dans l'entretien des routes peut entraîner l'accumulation d'ions chlorure dans le sol environnant.

## 5 Conclusions et perspectives

---

Les conclusions tirées de cette étude concordent bien avec la littérature existante sur la corrosion dans les réseaux de distribution d'eau potable, notamment en ce qui concerne l'effet des paramètres environnementaux sur les taux de corrosion. Les résultats montrent que la corrosion graphitique était dominante dans les conduites en fonte grise (FG), confirmant et renforçant les observations faites dans la revue de littérature. Cette forme de corrosion a été principalement influencée par la teneur en humidité et la résistivité du sol, des facteurs également largement reconnus dans la littérature comme déterminants majeurs de la corrosion. De plus, l'influence importante des ions agressifs comme le chlorure et les effets des interactions galvaniques entre métaux dissimilaires sont cohérents avec les résultats de recherches antérieures. Ces résultats, détaillés dans les sections suivantes, fournissent une meilleure compréhension des comportements de la corrosion et de l'efficacité des stratégies d'atténuation, renforçant et élargissant le corpus de littérature existant.

L'analyse expérimentale des échantillons prélevés sur le réseau de la ville de Québec a permis de tirer les conclusions suivantes :

### 1. Impact des propriétés du sol :

- La résistivité du sol et la teneur en humidité affectent de manière significative la corrosion des métaux enfouis. Une résistivité plus faible du sol, indiquant une meilleure conductivité, facilite les réactions électrochimiques et accélère le processus de corrosion. À l'inverse, des valeurs de résistivité plus élevées limitent le mouvement des ions et des électrons, réduisant ainsi le taux de corrosion. Une analyse détaillée de la résistivité du sol révèle que les environnements humides ou salins, caractérisés par des sols à faible résistivité, entraînent des taux de corrosion plus élevés en raison d'une mobilité ionique accrue et d'une activité électrochimique accrue. En revanche, les sols secs ou sableux à haute résistivité présentent des taux de corrosion plus faibles.
- Le drainage du sol influence la corrosion en affectant la répartition de l'humidité et de l'oxygène autour des métaux enfouis. Un drainage adéquat réduit le risque de corrosion localisée et favorise une corrosion uniforme. Un mauvais drainage peut créer des poches d'humidité stagnantes, exacerbant les processus de corrosion.

Les sols bien drainés, tels que les limons sableux ou les graviers, présentent des taux de corrosion inférieurs à ceux des sols mal drainés comme les argiles.

## 2. Types dominants de corrosion :

- La corrosion graphitique est prédominante dans les conduites en FG, caractérisée par l'élimination de la matrice métallique et la conservation des flocons de graphite. Cela était évident dans les échantillons provenant de conduites en FG C-1 à C-4, où les analyses par MEB et EDS ont montré une teneur élevée en carbone et la présence de flocons de graphite.
- Les tuyaux en FD ont démontré une meilleure résistance à la corrosion grâce à leur microstructure inhérente et à leurs revêtements résistants à la corrosion. Les produits de corrosion dans les conduites en FD (échantillons D-1 à D-4) formaient des couches denses et adhérentes, comme l'indiquent les pourcentages de perte de paroi inférieurs mesurés lors des analyses par TDM. Cela a été spécifiquement observé dans les images de TDM des échantillons D-1 et D-4, où les couches de produits de corrosion étaient plus compactes et présentaient moins de perte de matière par rapport aux échantillons en FG.

## 3. Influence des ions agressifs :

- La présence d'ions chlorure accélère les processus de corrosion en facilitant le mouvement des ions et des électrons, entraînant des taux de corrosion plus élevés dans les zones présentant des concentrations en chlorure plus élevées. Cela a notamment été observé dans des échantillons provenant de sols mal drainés ou à salinité plus élevée, tels que C-2 et M-2.
- Les ions agressifs, tels que les ions chlorure, ont un impact significatif sur le taux et le type de corrosion. L'analyse par EDS d'échantillons provenant de conduites en FG, en particulier les échantillons C-2, C-3 et M-2, a révélé une teneur plus élevée en chlorure, en corrélation avec des taux de corrosion et de piqûres accrus. L'échantillon en FG C-2 présentait une teneur en chlore de 4 %, alors que l'échantillon C-3 en contenait 1 % et l'échantillon M-2 en contenait 2 %, démontrant l'accélération des processus de corrosion en présence des ions chlorure.

#### 4. Effets galvaniques et interactions des matériaux :

- L'analyse des échantillons M-1 et M-2 a mis en évidence l'impact de la corrosion galvanique sur les RDE. Cette forme de corrosion se produit en raison de l'interaction entre des métaux dissimilaires, exacerbant les processus de corrosion. Lorsque des métaux ayant des propriétés électrochimiques différentes sont couplés, le métal le plus actif (anodique) subit une corrosion accélérée, tandis que le métal le moins actif (cathodique) demeure relativement peu affecté. L'interaction observée entre les composants en FG et l'acier dans l'échantillon M-1, ainsi qu'entre les composants en FD et l'acier dans l'échantillon M-2, a confirmé ce phénomène. Ces interactions ont conduit à une corrosion localisée et à une détérioration structurale, soulignant l'importance de la compatibilité des matériaux pour atténuer la corrosion dans les RDE.

#### 5. Observations générales :

- La résistivité et la teneur en humidité du sol ont un impact important sur la corrosion des métaux enfouis.
- La corrosion graphitique est le type de corrosion dominant dans les matériaux en FG.
- La présence d'ions agressifs, tels que les ions chlorure, a un impact important sur la vitesse de corrosion graphitique.
- Les conduites en FD étaient soumises à un taux élevé de corrosion localisée.
- Lorsqu'en contact avec des composants en acier, la FG subit un taux de corrosion et de détérioration plus élevé que la FD.
- Au contact de l'acier, la FD est plus corrosive que la FG, en raison de la teneur plus élevée en carbone et de la forme nodulaire du graphite dans sa microstructure.

En conclusion, les résultats de ces analyses soulignent l'importance de comprendre l'influence des propriétés du sol sur la corrosion des composants métalliques souterrains des RDE. En examinant l'interaction entre les caractéristiques du sol, les mécanismes de corrosion et les interactions entre les matériaux, cette recherche fournit des informations pour développer des stratégies efficaces d'atténuation de la corrosion afin de garantir la longévité et la fiabilité des RDE.



## Suggestions et recommandations de recherches futures

- Analyse approfondie du comportement de la corrosion :
  - Mener des études pour évaluer comment différents facteurs environnementaux, tels que la température et l'humidité, influencent la corrosion des matériaux dans les systèmes de distribution d'eau. Cela permettra de mieux comprendre les mécanismes de corrosion et d'optimiser les stratégies de gestion.
- Études sur les matériaux des conduites :
  - Effectuer des études comparatives sur différents types de matériaux utilisés dans les conduites pour identifier ceux qui présentent la meilleure résistance à la corrosion dans des conditions spécifiques. Cela aidera à améliorer la durabilité des infrastructures.
- Suivi de l'état des infrastructures :
  - Mettre en place des programmes de suivi à long terme pour surveiller l'évolution de la corrosion dans les conduites. L'intégration de technologies de capteurs pourrait fournir des données précieuses sur l'état des infrastructures au fil du temps.
- Modèles prédictifs pour la corrosion :
  - Développer des modèles statistiques ou des algorithmes d'apprentissage automatique pour prédire les taux de corrosion basés sur les données collectées. Cela permettra d'anticiper les problèmes potentiels et d'optimiser les interventions de maintenance.
- Impact des interventions de maintenance :
  - Analyser l'efficacité des différentes méthodes de maintenance préventive sur la réduction des taux de corrosion. Cela peut inclure l'évaluation de techniques de nettoyage et de revêtements protecteurs appliqués aux conduites.

## 6 References

---

- Abu-Baker, A. (2008). Investigating the corrosion and microstructure of five copper-based archaeological artefacts from Tell el-Ajjul. *AICCM bulletin*, 31(1), 87-96.
- Al-Darbi, M. M. (2004). *The Prevention And Prediction Of Corrosion Using Novel Methods* Dalhousie University ].
- Andreou, S. A. (1986). *Predictive models for pipe break failures and their implications on maintenance planning strategies for deteriorating water distribution systems* Massachusetts Institute of Technology].
- Andreou, S. A., Marks, D. H., & Clark, R. M. (1987). A new methodology for modelling break failure patterns in deteriorating water distribution systems: Theory. *Advances in Water Resources*, 10(1), 2-10.
- Attia, M., Ragab, A., & El-Raghy, S. (2011). Failure analysis of buried piping and cold drain vessel. *Engineering Failure Analysis*, 18(3), 933-943.
- Aydogdu, M., & Firat, M. (2015). Estimation of failure rate in water distribution network using fuzzy clustering and LS-SVM methods. *Water resources management*, 29(5), 1575-1590.
- Beutel, J., Kundel, H., & Van Metter, R. (2000). *Handbook of Medical Imaging*. SPIE Press.
- Bhatia, A. (2019). Process piping materials. *Continuing Education and Development, Inc. no date*.
- Bonds, R. W., Barnard, L. M., Horton, A. M., & Oliver, G. L. (2005). Corrosion and corrosion control of iron pipe: 75 years of research. *Journal American Water Works Association*, 97(6), 88-98.
- Boudreau, S. P., J. B.; Sheflin, M. (2003). *InfraGuide - Canadian national guide to sustainable municipal infrastructure*. NRC Publications. Retrieved 2003-11-01 from <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=146b7142-926b-4110-a0bd-d8cc0c8b6b4b>
- Brander, R. (2001). Water pipe materials in Calgary, 1970–2000. AWWA Infrastructure Conference Proceedings, Denver Colorado.
- Brownlie, F., Giourntas, L., Hodgkiess, T., Palmeira, I., Odutayo, O., Galloway, A., & Pearson, A. (2020). Effect of cathodic protection methods on ferrous engineering materials under corrosive wear conditions. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 55(6), 480-486.
- Chang, T., & Lansing, F. (1982). Review of corrosion causes and corrosion control in a technical facility. *TDA progress report*, 42(69), 145-156.
- Ciottoni, A. (1983, 1983). Computerized data management in determining causes of water main breaks: The Philadelphia case study. Proceeding International Symposium on Urban Hydrology, Hydraulics and Sediment Control, Lexington, KY.
- Clark, R. M., Stafford, C. L., & Goodrich, J. A. (1982). Water distribution systems: A spatial and cost evaluation. *Journal of the Water Resources Planning and Management Division*, 108(3), 243-256.
- Corrao, A., Briones, B., VanderSchaaf, R., & Bermudo, J. E. (2015). Condition assessment methods for 1920s lock-bar steel pipe. In *Pipelines 2015* (pp. 931-942).
- Crolet, J. (1992). From biology and corrosion to biocorrosion. *Oceanologica acta*, 15(1), 87-94.

- Dahal, K. P., Timilsena, J. N., Gautam, M., & Bhattarai, J. (2021). Investigation on probabilistic model for corrosion failure level of buried pipelines in Kirtipur urban areas (Nepal). *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 21, 914-926.
- Doyle, G., & Grabinsky, M. (2003). Applying GIS to a water main corrosion study. *American Water Works Association. Journal*, 95(5), 90.
- Duchesne, S., Bouzida, N., & Villeneuve, J.-P. (2011). Performance estimation of a remote field eddy current method for the inspection of water distribution pipes. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(6), 521-530.
- Edalati, K., Rastkhah, N., Kermani, A., Seiedi, M., & Movafeghi, A. (2006). The use of radiography for thickness measurement and corrosion monitoring in pipes. *International journal of pressure vessels and piping*, 83(10), 736-741.
- Ellis, D., Moore, G., & Ferguson, P. (1998). Environmental corrosion testing of ductile iron water pipes. *Corrosion and Prevention*, 98, 61-68.
- Folkman, S. (2018). Water main break rates in the USA and Canada: A comprehensive study.
- Gan, F., Sun, Z.-W., Sabde, G., & Chin, D.-T. (1994). Cathodic protection to mitigate external corrosion of underground steel pipe beneath disbonded coating. *Corrosion*, 50(10).
- Goulter, I. C., & Kazemi, A. (1988). Spatial and temporal groupings of water main pipe breakage in Winnipeg. *Canadian journal of civil engineering*, 15(1), 91-97.
- Gummow, R. A., & Eng, P. (1999). Corrosion control of municipal infrastructure using cathodic protection. Proceedings of NACE International Northern Area Eastern Conference, Ottawa.
- Hamilton, H. L. (1960). Effects of soil corrosion on cast-iron pipe. *Journal-American Water Works Association*, 52(5), 638-650.
- Herbert, H. (1994). Technical and economic criteria determining the rehabilitation and/or renewal of drinking water pipelines. *Water Supply*, 12(3), 105-117.
- Honarvar, F., Salehi, F., Safavi, V., Mokhtari, A., & Sinclair, A. N. (2013). Ultrasonic monitoring of erosion/corrosion thinning rates in industrial piping systems. *Ultrasonics*, 53(7), 1251-1258.
- Hu, X., Barker, R., Neville, A., & Gnanavelu, A. (2011). Case study on erosion–corrosion degradation of pipework located on an offshore oil and gas facility. *Wear*, 271(9-10), 1295-1301.
- Hu, Y., & Hubble, D. (2005, 2005-06-01). Failure conditions of asbestos cement water mains in Regina. Proceedings of the 1st CSCE Specialty Conference on Infrastructure Technologies, Management and Policy, Toronto, Ontario, Canada.
- Jack, T., & Wilmott, M. (2011). *Corrosion by soils*. John Wiley New York (NY).
- Jansen, J. (1995). Review of the Cast-iron and Ductile-iron Portion of the Water Distribution System. *Prince Albert*.
- Jażdżewska, A., Gruszka, M., Mazur, R., Orlikowski, J., & Banaś, J. (2020). Determination of the effect of environmental factors on the corrosion of water distribution system based on analysis of on-line corrosion monitoring results. *Archives of Metallurgy and Materials*, 109-116-109-116.

- Jur, T. A., Middleton Jr, J. I., Yurko III, A. A., Windham, R. L., & Grey Jr, J. R. (2021). Case studies in graphitic corrosion of cast iron pipe. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 21(2), 376-386.
- Kabir, G., Tesfamariam, S., Francisque, A., & Sadiq, R. (2015). Evaluating risk of water mains failure using a Bayesian belief network model. *European Journal of Operational Research*, 240(1), 220-234.
- Kettler, A., & Goulter, I. (1985). An analysis of pipe breakage in urban water distribution networks. *Canadian journal of civil engineering*, 12(2), 286-293.
- Kimutai, E., Betrie, G., Brander, R., Sadiq, R., & Tesfamariam, S. (2015). Comparison of statistical models for predicting pipe failures: Illustrative example with the City of Calgary water main failure. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 6(4), 04015005.
- Kirmeyer, G. J., Richards, W., & Smith, C. D. (1994). *An assessment of water distribution systems and associated research needs* (0898677637).
- Kleiner, Y., & Rajani, B. (2002). Quantifying the effectiveness of cathodic protection in water mains. NACE International Seminar, Northern Area, Montréal Section, Quebec City, QC,
- Kleiner, Y., Rajani, B., & Krysz, D. (2012). Performance of ductile iron pipes. I: Characterization of external corrosion patterns. *Journal of infrastructure systems*, 61.
- Klopper, D. J., & Schramuk, J. (2005). A sacrificial anode retrofit program for existing cast-iron distribution water mains. *Journal-American Water Works Association*, 97(12), 50-55.
- Le Gat, Y., & Eisenbeis, P. (2000). Using maintenance records to forecast failures in water networks. *Urban water*, 2(3), 173-181.
- Lei, J., & Sægrov, S. (1998). Statistical approach for describing failures and lifetimes of water mains. *Water science and technology*, 38(6), 209-217.
- Lindström, D., & Wallinder, I. O. (2011). Long-term use of galvanized steel in external applications. Aspects of patina formation, zinc runoff, barrier properties of surface treatments, and coatings and environmental fate. *Environmental monitoring and assessment*, 173(1), 139-153.
- Liu, M., Du, C., Luo, X., Liu, C., Wu, Z., & Li, X. (2023). Failure analysis in buried ductile iron pipelines: A study of leakage in drinking water distribution systems. *Engineering Failure Analysis*, 107361.
- M. Akhoondan, G. B. (2018). MIC Considerations for Cathodically Protected Encased Ductile Iron Pipelines: A Case Study. NACE International Corrosion Conference Proceedings,
- Ma, F.-Y. (2012). Corrosive effects of chlorides on metals. *Pitting corrosion*, 294, 139-178.
- Makar, J., & Rajani, B. (2000). Gray cast-iron water pipe metallurgy. *Journal of materials in civil engineering*, 12(3), 245-253.
- Marchal, R. (1981). Protection of Buried Ductile Iron Pipelines With a Zinc-Based Coating-Healing Power of Coating Damages. Proceedings of 4 th Internat. Conf. on Internal & External Protection of Pipes, Noordwijkerhout(Netherlands) 1981, 125-37,
- Moghareh Abed, T., Eskandari Torbaghan, M., Hojjati, A., Rogers, C. D., & Chapman, D. N. (2020). Experimental investigation into the effects of cast-iron pipe corrosion on GPR detection performance in clay soils. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 11(4), 04020040.

- Mordak, J., & Wheeler, J. (1988). Deterioration of asbestos cement water mains. *Final Report to the Department of the Environment*.
- Newport, R. (1981). Factors influencing the occurrence of bursts in iron water mains. *Aqua*(3).
- O'Day, D. K. (1982). Organizing and analyzing leak and break data for making main replacement decisions. *Journal-American Water Works Association*, 74(11), 588-594.
- O'Day, D. K. (1983). Analyzing infrastructure condition—A practical approach. *Civil Engineering—ASCE*, 53(4), 39-42.
- O'Day, D. K. (1989). External corrosion in distribution systems. *Journal-American Water Works Association*, 81(10), 45-52.
- O'Day, D. K., Fox, C., & Huguet, G. (1980). Aging urban water systems: a computerized case study. *Public Works*, 111(8).
- Paul, S., & O'Connor, P. (2003). Corrosion Control of Large Diameter Piping Cathodic Protection a Proven Method. In *New Pipeline Technologies, Security, and Safety* (pp. 146-155).
- Peabody, A. W. (2001). *Peabody's control of pipeline corrosion*. NACE international.
- Penhale, H. (1984). Corrosion of mild steel plates in some New Zealand soils, after 20 years. *New Zealand journal of science*, 27(1), 57-68.
- Petersen, R., & Melchers, R. (2012). Long-term corrosion of cast iron cement lined pipes. *Corrosion and Prevention*, 23(10).
- Pritchard, O., Hallett, S. H., & Farewell, T. S. (2013). Soil corrosivity in the UK—Impacts on Critical Infrastructure. *ITRC—Infrastructure Transition Research Consortium, Cranfield University*.
- Rajani, B., & Kleiner, Y. (2003a). Protecting ductile-iron Water Mains: What protection method works best for what soil condition? *Journal-American Water Works Association*, 95(11), 110-125.
- Rajani, B., & Kleiner, Y. (2003b). Protection of ductile iron water mains against external corrosion: review of methods and case histories. *Journal American Water Works Association*, 95(11), 110-125.
- Rajani, B., & Makar, J. (2000). A methodology to estimate remaining service life of grey cast iron water mains. *Canadian journal of civil engineering*, 27(6), 1259-1272.
- Rajani, B., & Tesfamariam, S. (2005). Estimating time to failure of ageing cast iron water mains under uncertainties. Institution of Civil Engineers-Water Management,
- Rajani, B., Zhan, C., & Kuraoka, S. (1996). Pipe soil interaction analysis of jointed water mains. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 393-404.
- Roberge, P. R. (2008). *Corrosion Engineering*. McGraw-Hill Education.
- Romanoff, M. (1964). Exterior corrosion of cast-iron pipe. *Journal-American Water Works Association*, 56(9), 1129-1143.
- Romer, A. E., Bell, G. E., Duranceau, S. J., & Foreman, S. (2004). *External Corrosion and Corrosion Control of Buried Water Mains*. American Water Works Association.
- Sægrov, S., Baptista, J. M., Conroy, P., Herz, R., LeGauffre, P., Moss, G., Oddevald, J., Rajani, B., & Schiatti, M. (1999). Rehabilitation of water networks: Survey of research needs and on-going efforts. *Urban water*, 1(1), 15-22.

- Sarin, P., Snoeyink, V., Bebee, J., Jim, K., Beckett, M., Kriven, W., & Clement, J. (2004). Iron release from corroded iron pipes in drinking water distribution systems: effect of dissolved oxygen. *Water research*, 38(5), 1259-1269.
- Schiff, M., & McCollom, B. (1993). Impressed current cathodic protection of polyethylene-encased ductile iron pipe. *Materials performance*, 32(8), 23-27.
- Schuster, C., & McBean, E. (2008). Impacts of cathodic protection on pipe break probabilities: a Toronto case study. *Canadian journal of civil engineering*, 35(2), 210-216.
- Shankar, A. R., Anandkumar, B., Thinaharan, C., George, R., Rooby, J., Philip, J., & Mudali, U. K. (2020). Corrosion evaluation of buried cast iron pipes exposed to fire water system for 30 years. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73, 9-21.
- Spickelmire, W. S. (2003). Ductile Iron Corrosion Factors to Consider and Why. In *New Pipeline Technologies, Security, and Safety* (pp. 130-145).
- Syrett, B., & Begum, S. (2016). Corrosion, Crevice.
- Szklarska-Smialowska, Z. (2005). ZS-Smialowska. *Pitting and crevice corrosion: NACE International Houston, TX*.
- Tesfamariam, S., Rajani, B., & Sadiq, R. (2006). Possibilistic approach for consideration of uncertainties to estimate structural capacity of ageing cast iron water mains. *Canadian journal of civil engineering*, 33(8), 1050-1064.
- Walski, T. M., & Pelliccia, A. (1982). Economic analysis of water main breaks. *Journal-American Water Works Association*, 74(3), 140-147.
- Wang, C.-w., Niu, Z.-g., Jia, H., & Zhang, H.-w. (2010). An assessment model of water pipe condition using Bayesian inference. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 11(7), 495-504.
- Wang, W., Robert, D., Zhou, A., & Li, C. Q. (2019). Effect of corrosion influencing factors of cast iron pipes in clay soil. *Mechanics of Structures and Materials XXIV*, 386-391.
- Wasim, M., Li, C.-Q., Robert, D., Mahmoodian, M., & Setunge, S. (2016, 2016). Experimental investigation of factors influencing external corrosion of buried pipes. Proceedings of the 4th International Conference on Sustainability Construction Materials and Technologies (SCMT'16), Las Vegas, Nevada, USA.
- Wasim, M., Shoaib, S., Mubarak, N., & Asiri, A. M. (2018). Factors influencing corrosion of metal pipes in soils. *Environmental Chemistry Letters*, 16(3), 861-879.
- Wasim, M., Shoaib, S., Mubarak, N., Inamuddin, & Asiri, A. M. (2018). Factors influencing corrosion of metal pipes in soils. *Environmental Chemistry Letters*, 16, 861-879.
- Xu, J., Wang, K., Sun, C., Wang, F., Li, X., Yang, J., & Yu, C. (2011). The effects of sulfate reducing bacteria on corrosion of carbon steel Q235 under simulated disbonded coating by using electrochemical impedance spectroscopy. *Corrosion science*, 53(4), 1554-1562.
- Yule, J. (2001). Viking Infrastructure Systems Ltd. *Personal communication*. St. Paul, Alberta, Can. February.
- Zhang, H., Liu, D., Zhao, L., Wang, J., Xie, S., Liu, S., Lin, P., Zhang, X., & Chen, C. (2022). Review on corrosion and corrosion scale formation upon unlined cast iron pipes in drinking water distribution systems. *Journal of Environmental Sciences*, 117, 173-189.

## 7 Annexe

Annexe 1 – Résultats MEB et EDS de l'échantillon C-1 – Composition élémentaire complète

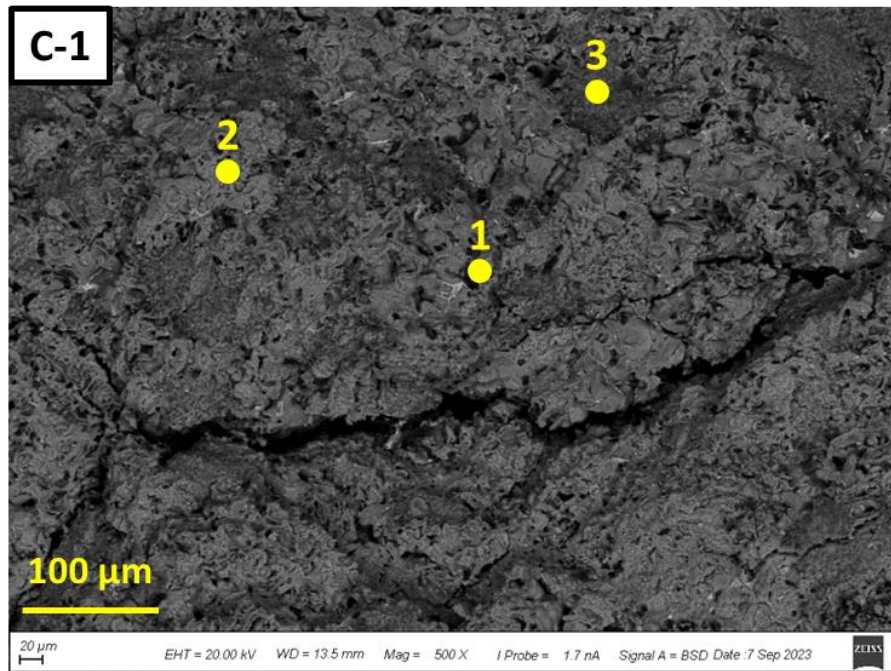


Image MEB des dépôts de corrosion de l'échantillon C-1

Composition élémentaire des produits de corrosion de l'échantillon C-1

Spectre (atomique%)	C	O	Fe	Cl	Mg	Zn	Al	K	P	Ca	Ti	Si
<b>Composition élémentaire</b>	37.21	36.28	18.60	0.93	1.12	1.40	0.74	0.84	1.21	0.65	0.56	0.47
<b>Point 1</b>	77.58	10.71	2.19	0.17	2.01	2.45	0.83	0.96	0.92	0.83	0.74	0.61
<b>Point 2</b>	36.67	37.95	16.51	0.79	1.63	2.07	0.74	0.84	0.89	0.74	0.64	0.54
<b>Point 3</b>	22.54	46.12	25.42	0.00	0.58	0.68	1.10	0.79	0.89	0.73	0.63	0.52

Annexe 2 – Résultats MEB et EDS de l'échantillon C-2 – Composition élémentaire complète

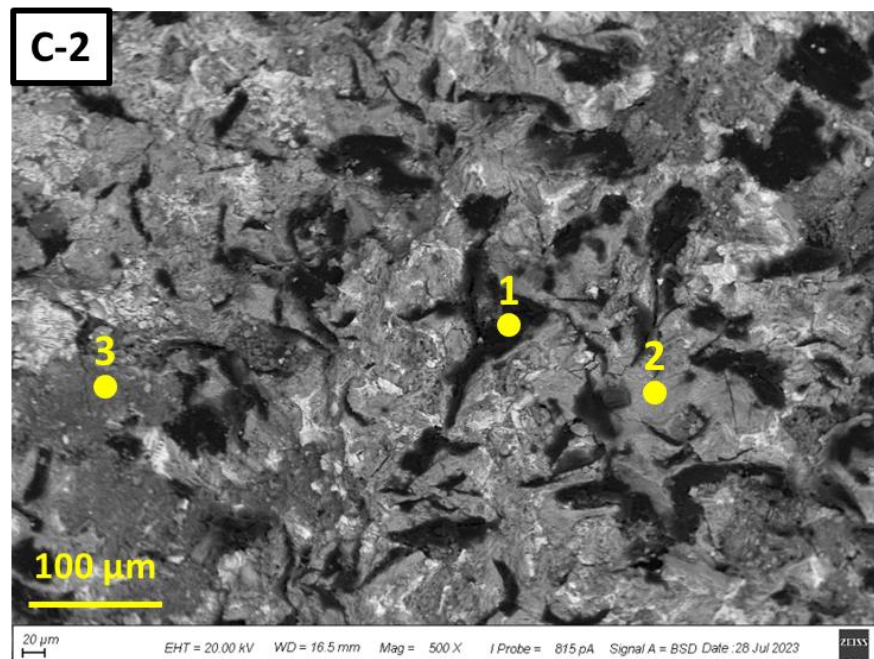


Image MEB des dépôts de corrosion de l'échantillon C-2

Composition élémentaire des produits de corrosion de l'échantillon C-2

Spectre (atomique%)	C	O	Fe	Cl	Mg	Zn	Al	K	P	Ca	Ti	Si
<b>Composition élémentaire</b>	56.96	19.61	13.07	3.73	0.84	1.68	0.47	0.65	1.03	0.75	0.65	0.56
<b>Point 1</b>	79.06	8.33	6.41	0.94	2.14	2.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.56
<b>Point 2</b>	51.00	29.91	11.89	1.34	1.23	1.46	0.54	0.61	0.65	0.54	0.46	0.38
<b>Point 3</b>	28.79	36.80	28.35	1.65	0.39	0.52	0.78	0.61	0.69	0.56	0.48	0.39



Annexe 3 – Résultats MEB et EDS de l'échantillon C-3 – Composition élémentaire complète

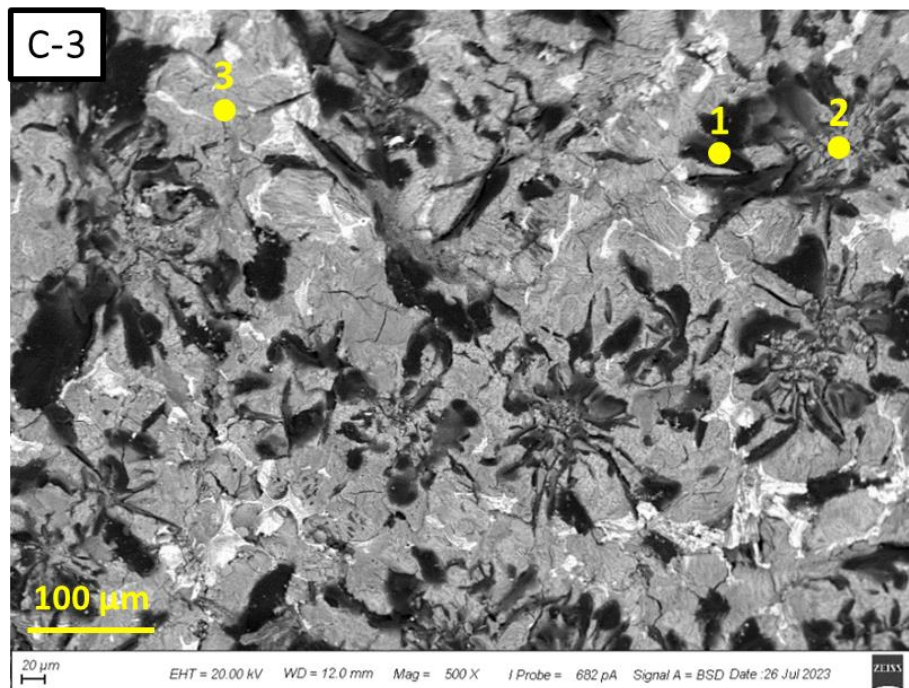


Image MEB des dépôts de corrosion de l'échantillon C-3

Composition élémentaire des produits de corrosion de l'échantillon C-3

Spectre (atomique%)	C	O	Fe	Cl	Mg	Zn	Al	K	P	Ca	Ti	Si
<b>Composition élémentaire</b>	62.27	15.80	13.01	1.86	1.39	1.12	0.56	0.74	0.84	0.93	0.84	0.65
<b>Point 1</b>	75.53	14.03	2.89	2.06	1.07	0.91	0.50	0.62	0.70	0.66	0.58	0.45
<b>Point 2</b>	56.65	22.81	13.69	1.33	1.06	1.29	0.49	0.61	0.68	0.53	0.46	0.38
<b>Point 3</b>	20.62	36.86	37.30	0.79	0.53	0.44	0.70	0.61	0.70	0.57	0.48	0.39

Annexe 4 – Résultats MEB et EDS de l'échantillon C-4 – Composition élémentaire complète

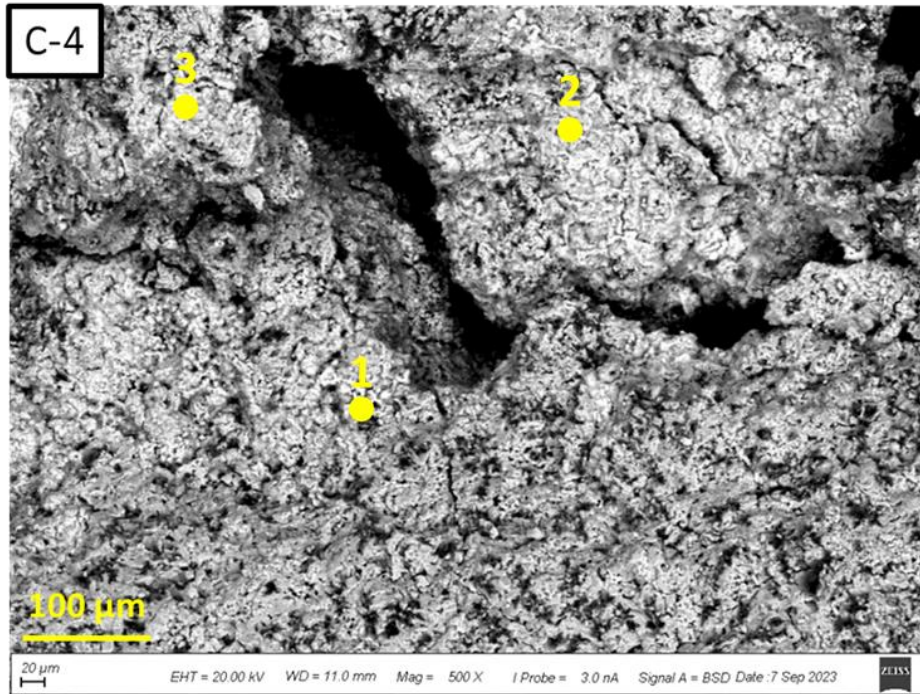


Image MEB des dépôts de corrosion de l'échantillon C-4

Composition élémentaire des produits de corrosion de l'échantillon C-4

Spectre (atomique%)	C	O	Fe	Cl	Mg	Zn	Al	K	P	Ca	Ti	Si
<b>Composition élémentaire</b>	25.19	54.10	13.06	0.93	1.03	0.65	0.93	0.47	1.12	0.56	0.75	1.21
<b>Point 1</b>	80.25	11.34	2.94	0.00	0.84	0.50	0.76	0.38	0.92	0.46	0.59	1.01
<b>Point 2</b>	30.76	31.58	31.17	0.57	0.98	1.23	0.66	0.74	0.82	0.57	0.49	0.41
<b>Point 3</b>	28.75	36.71	28.75	0.66	0.44	0.53	0.75	0.44	0.66	0.53	0.71	1.06

Annexe 6 – Résultats MEB et EDS de l'échantillon D-1 – Composition élémentaire complète

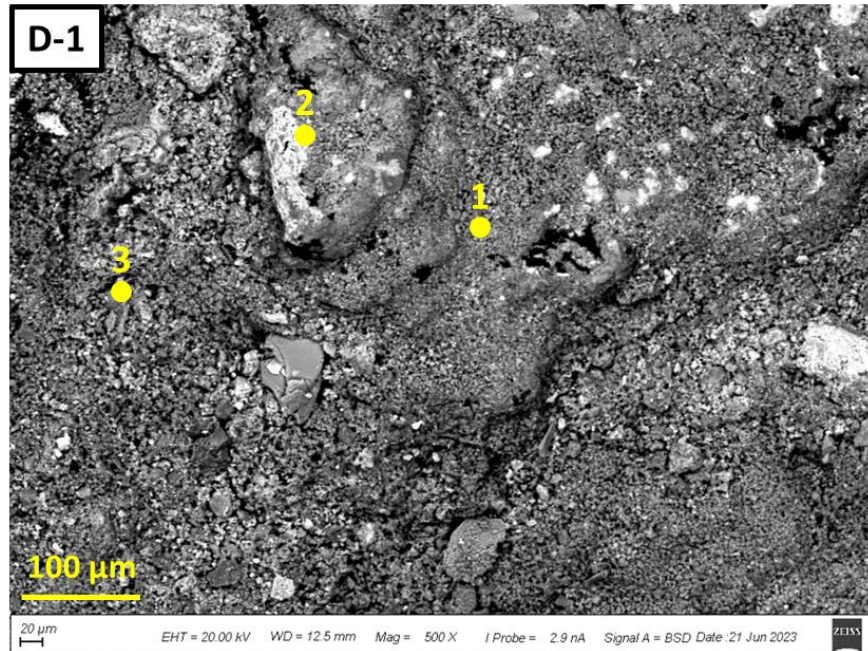


Image MEB des dépôts de corrosion de l'échantillon D-1

Composition élémentaire des produits de corrosion de l'échantillon D-1

Spectre (atomique%)	C	O	Fe	Cl	Mg	Zn	Al	K	P	Ca	Ti	Si
<b>Composition élémentaire</b>	12.35	27.54	52.23	2.85	0.95	1.90	0.47	0.19	0.28	0.38	0.38	0.47
<b>Point 1</b>	16.86	36.89	36.73	3.75	0.73	1.87	0.52	0.42	0.31	0.42	0.52	0.99
<b>Point 2</b>	19.12	31.49	41.10	2.97	0.82	1.64	0.46	0.36	0.26	0.36	0.46	0.97
<b>Point 3</b>	15.63	27.84	47.40	3.23	0.76	1.87	0.55	0.45	0.35	0.45	0.55	0.91

Annexe 7 – Résultats MEB et EDS de l'échantillon D-2 – Composition élémentaire complète

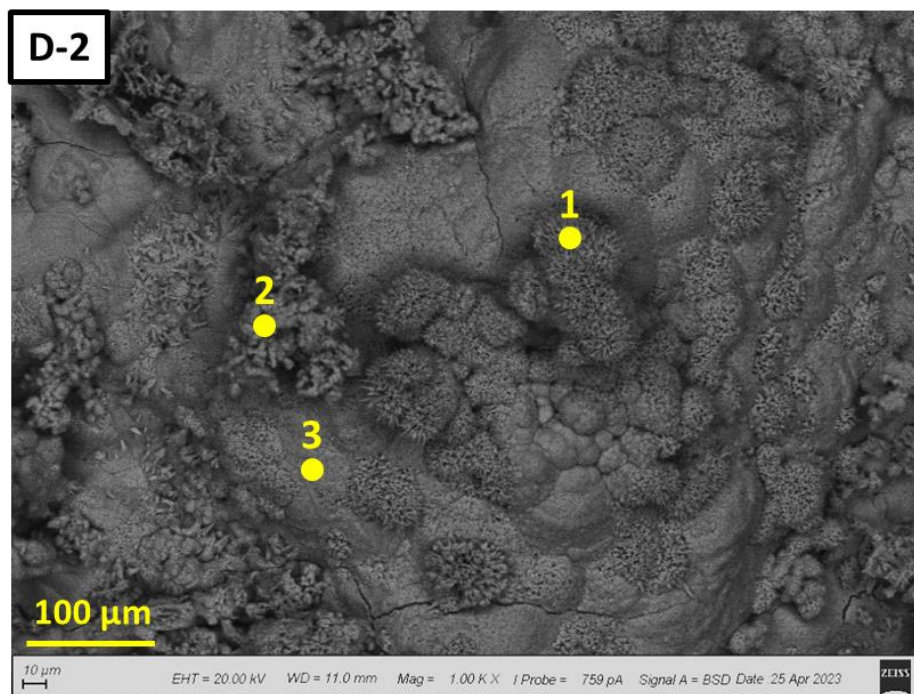


Image MEB des dépôts de corrosion de l'échantillon D-2

Composition élémentaire des produits de corrosion de l'échantillon D-2

Spectre (atomique%)	C	O	Fe	Cl	Mg	Zn	Al	K	P	Ca	Ti	Si
<b>Composition élémentaire</b>	20.43	40.86	34.05	1.00	0.49	1.46	0.68	0.29	0.39	0.49	0.49	0.39
<b>Point 1</b>	17.66	52.96	24.10	1.43	0.55	1.16	0.66	0.22	0.45	0.36	0.28	0.18
<b>Point 2</b>	20.51	44.53	29.07	2.09	0.60	1.00	0.52	0.35	0.41	0.40	0.30	0.21
<b>Point 3</b>	19.02	31.74	44.65	0.33	0.46	0.93	0.68	0.39	0.56	0.52	0.41	0.31



Annexe 7 – Résultats MEB et EDS de l'échantillon D-3 – Composition élémentaire complète

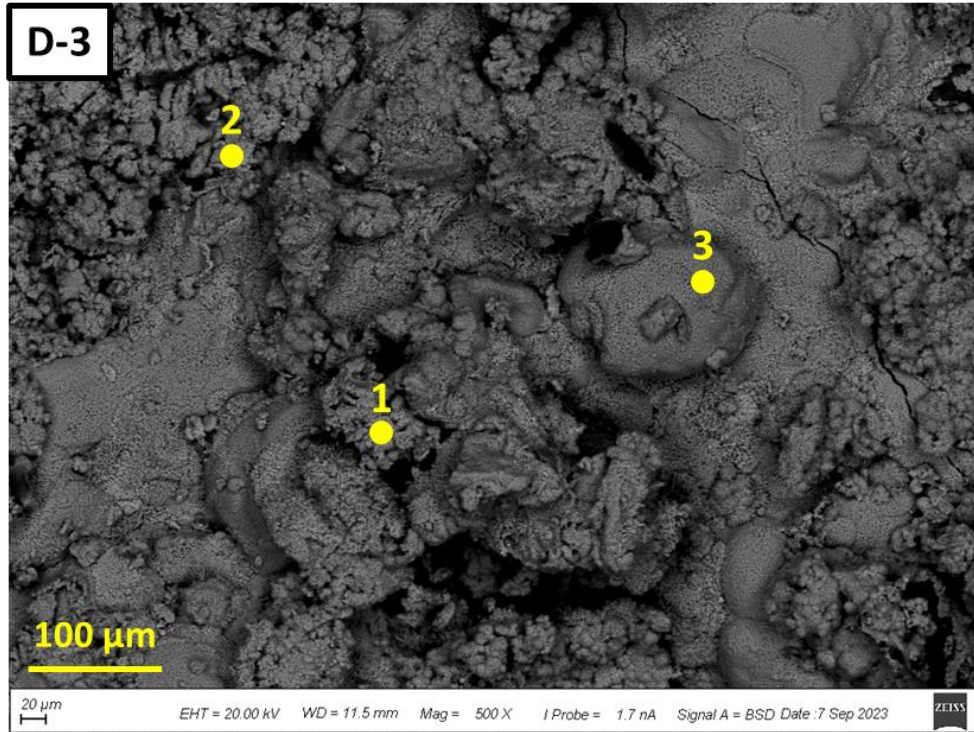


Image MEB des dépôts de corrosion de l'échantillon D-3

Composition élémentaire des produits de corrosion de l'échantillon D-3

Spectre (atomique%)	C	O	Fe	Cl	Mg	Zn	Al	K	P	Ca	Ti	Si
<b>Composition élémentaire</b>	6.82	40.94	48.73	0.97	0.29	0.78	0.29	0.19	0.19	0.29	0.29	0.19
<b>Point 1</b>	7.78	56.62	31.93	1.11	0.22	0.67	0.33	0.22	0.22	0.33	0.33	0.22
<b>Point 2</b>	18.09	44.04	33.05	2.12	0.31	0.84	0.31	0.20	0.20	0.31	0.31	0.20
<b>Point 3</b>	14.60	37.56	44.72	0.87	0.23	0.64	0.32	0.14	0.14	0.32	0.32	0.14

Annexe 8 – Résultats MEB et EDS de l'échantillon D-4 – Composition élémentaire complète

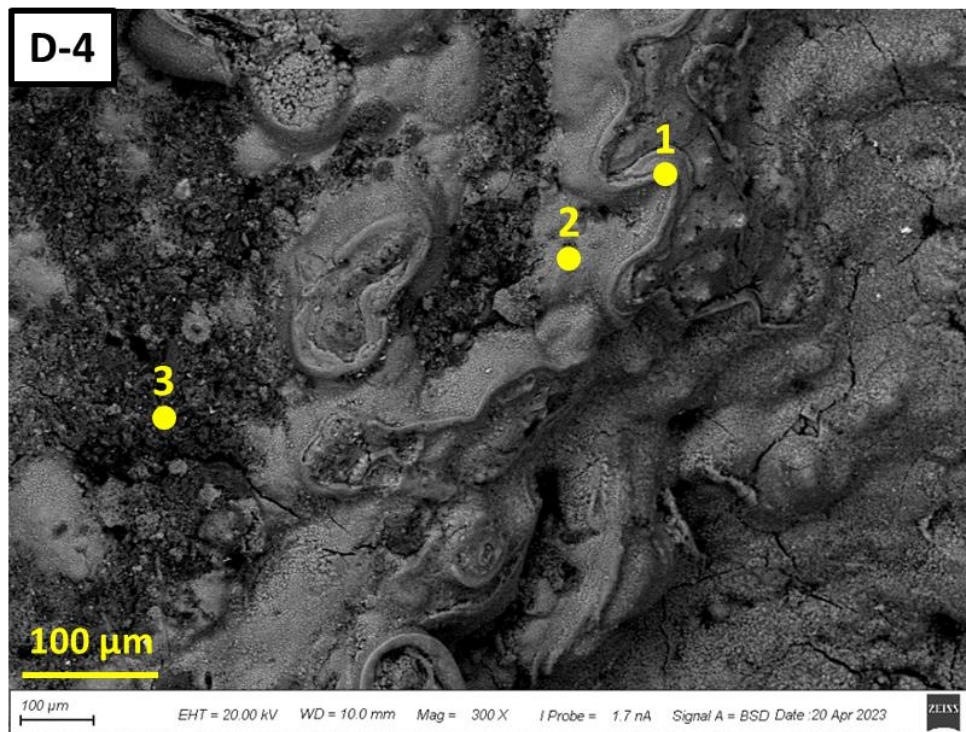


Image MEB des dépôts de corrosion de l'échantillon D-4

Composition élémentaire des produits de corrosion de l'échantillon D-4

Spectre (atomique%)	C	O	Fe	Cl	Mg	Zn	Al	K	P	Ca	Ti	Si
<b>Composition élémentaire</b>	11.43	51.38	29.52	2.90	0.57	1.14	0.57	0.38	0.48	0.57	0.57	0.48
<b>Point 1</b>	7.92	23.92	61.05	2.52	0.63	1.17	0.54	0.27	0.36	0.63	0.63	0.36
<b>Point 2</b>	3.52	61.98	28.23	1.81	0.48	1.14	0.52	0.33	0.43	0.57	0.57	0.43
<b>Point 3</b>	11.37	46.91	36.39	1.24	0.52	0.94	0.50	0.32	0.40	0.50	0.50	0.40

Annexe 9 – Résultats MEB et EDS de l'échantillon M-1 – Composition élémentaire complète

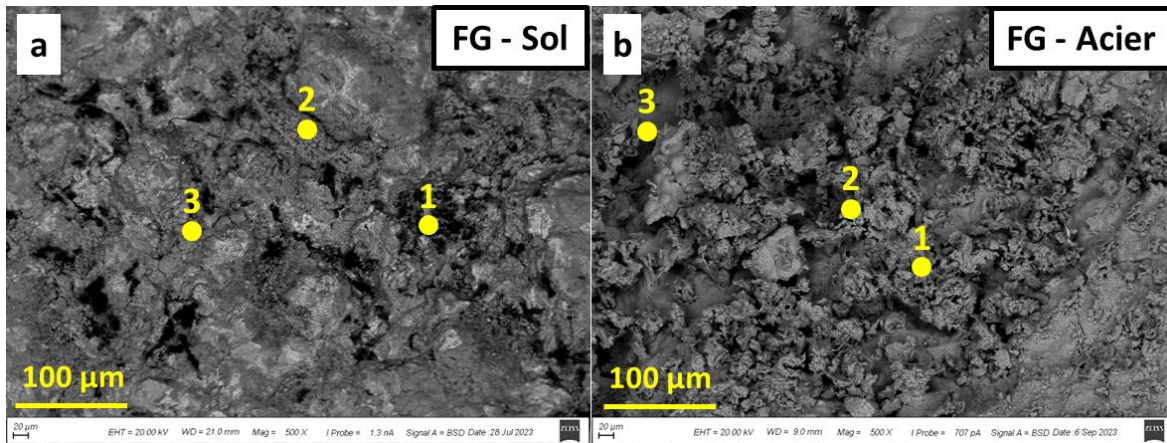


Image MEB des dépôts de corrosion de l'échantillon M-1: surface en FG en contact avec a) le sol, b) l'acier

Composition élémentaire des produits de corrosion de l'échantillon M-1 surface en FG en contact avec le sol et l'acier

Spectre (atomique%)		C	O	Fe	Cl	Mg	Zn	Al	K	P	Ca	Ti	Si
M-1 FG/Acier M-1 FG/Sol	<b>Composition élémentaire</b>	34.20	49.30	26.90	2.10	1.05	0.97	0.89	1.03	0.57	0.65	0.59	0.65
	<b>Point 1</b>	62.63	23.16	8.97	0.10	1.15	0.79	0.60	0.47	0.70	0.51	0.41	0.51
	<b>Point 2</b>	75.61	12.96	9.32	0.03	0.53	0.27	0.26	0.17	0.23	0.19	0.15	0.28
	<b>Point 3</b>	29.37	37.41	26.78	0.15	1.38	0.91	0.72	0.61	0.82	0.68	0.57	0.60
	<b>Composition élémentaire</b>	15.92	56.18	20.60	0.94	0.66	1.40	0.56	0.75	0.94	0.84	0.66	0.56
	<b>Point 1</b>	24.72	50.29	18.39	0.83	0.58	1.24	0.53	0.69	0.87	0.76	0.61	0.51
	<b>Point 2</b>	15.45	57.20	20.57	0.79	0.61	1.31	0.54	0.72	0.89	0.78	0.62	0.53
	<b>Point 3</b>	16.67	56.24	20.35	0.39	0.67	1.39	0.56	0.75	0.94	0.82	0.65	0.57

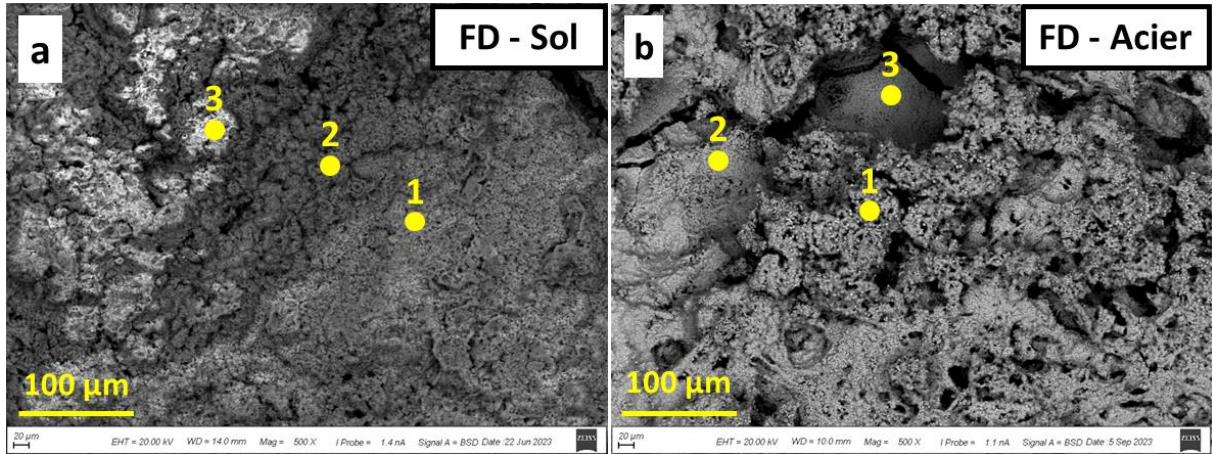


Image MEB des dépôts de corrosion de l'échantillon M-1: surface en FD en contact avec a) le sol, b) l'acier

Composition élémentaire des produits de corrosion de l'échantillon M-1 surface en FG en contact avec le sol et l'acier

Spectre (atomique%)		C	O	Fe	Cl	Mg	Zn	Al	K	P	Ca	Ti	Si
M-1 FD/Sol	Composition élémentaire	10.34	55.45	25.38	2.82	0.94	1.22	0.66	0.56	0.85	0.75	0.56	0.47
	Point 1	14.98	55.36	21.05	2.78	0.86	1.16	0.61	0.56	0.83	0.72	0.55	0.56
	Point 2	17.79	50.52	23.41	2.61	0.87	1.18	0.63	0.52	0.76	0.66	0.50	0.57
	Point 3	10.13	55.98	24.57	2.98	0.88	1.32	0.61	0.62	0.91	0.79	0.61	0.60
M-1 FD/Acier	Composition élémentaire	11.27	58.22	21.60	2.82	1.13	0.85	0.75	0.38	1.03	0.66	0.75	0.56
	Point 1	11.70	59.79	19.00	2.84	1.11	0.86	0.73	0.41	1.02	0.70	0.78	0.55
	Point 2	11.04	62.83	18.23	2.52	0.98	0.73	0.64	0.35	0.90	0.61	0.69	0.48
	Point 3	11.24	56.24	21.09	3.59	1.41	1.13	0.93	0.53	1.29	0.88	0.97	0.70



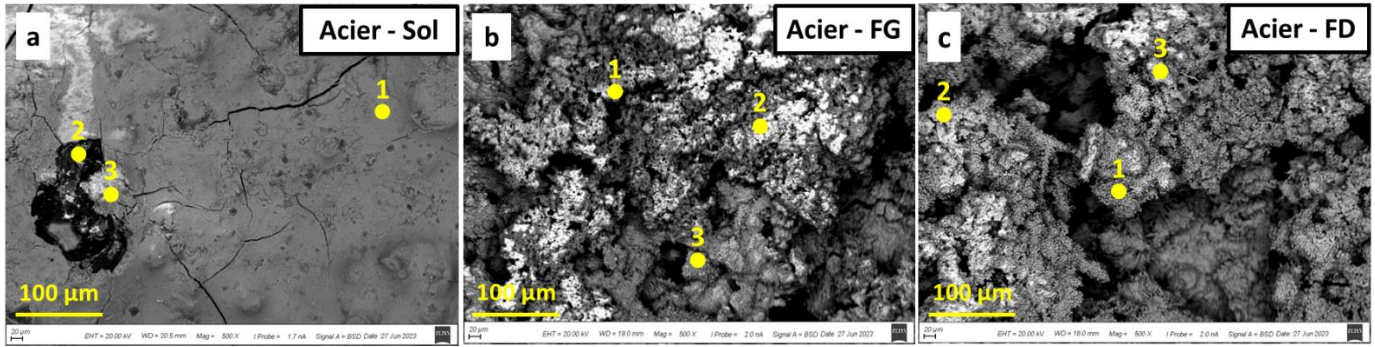


Image MEB des dépôts de corrosion de l'échantillon M-1: surface en acier en contact avec a) le sol, b) la FG, c) la FD

**Composition élémentaire des produits de corrosion de l'échantillon M-1 surface en acier en contact avec le sol, la FG et la FD**

Spectre (atomique%)	C	O	Fe	Cl	Mg	Zn	Al	K	P	Ca	Ti	Si
<b>Composition élémentaire</b>	18.78	44.13	30.99	0.19	1.03	1.13	0.85	0.66	0.75	0.56	0.47	0.47
<b>Point 1</b>	15.98	42.51	35.93	0.07	1.13	0.78	0.86	0.52	0.70	0.62	0.48	0.40
<b>Point 2</b>	4.97	15.86	6.98	0.09	0.96	0.74	15.70	0.43	0.60	0.53	52.79	0.34
<b>Point 3</b>	26.73	38.75	28.44	0.09	1.23	0.82	0.95	0.57	0.76	0.68	0.54	0.45
<b>Composition élémentaire</b>	17.91	48.07	27.33	0.94	1.23	0.57	0.66	0.85	0.85	0.66	0.57	0.38
<b>Point 1</b>	20.36	47.74	25.71	0.88	1.17	0.55	0.64	0.78	0.68	0.58	0.56	0.37
<b>Point 2</b>	15.16	46.08	32.20	0.94	1.21	0.60	0.68	0.81	0.72	0.61	0.59	0.40
<b>Point 3</b>	17.17	45.48	31.38	0.83	1.10	0.54	0.63	0.75	0.66	0.56	0.54	0.36
<b>Composition élémentaire</b>	14.06	54.36	25.30	0.28	0.75	1.31	0.56	0.47	0.94	0.75	0.66	0.56
<b>Point 1</b>	14.70	57.92	21.09	0.32	0.78	1.35	0.57	0.46	0.92	0.74	0.63	0.54
<b>Point 2</b>	12.46	55.64	25.49	0.28	0.82	1.35	0.56	0.48	0.94	0.74	0.66	0.57
<b>Point 3</b>	14.82	53.93	24.96	0.31	0.78	1.33	0.57	0.45	0.93	0.74	0.63	0.54

Annexe 10 – Résultats MEB et EDS de l'échantillon M-2 – Composition élémentaire complète

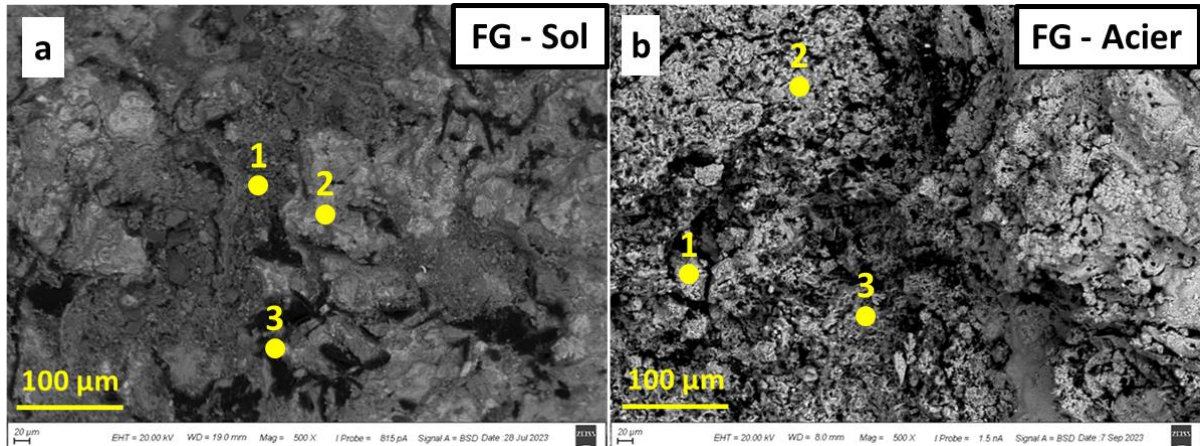


Image MEB des dépôts de corrosion de l'échantillon M-1: surface en FG en contact avec a) le sol, b) l'acier

Composition élémentaire des produits de corrosion de l'échantillon M-1 DI in contact with soil and steel

Spectrum (Atomic%)		C	O	Fe	Cl	Mg	Zn	Al	K	P	Ca	Ti	Si
M-2 FG/Sol	Map composition	34.20	49.30	26.90	2.10	1.05	0.97	0.89	1.03	0.57	0.65	0.59	0.65
	spot 1	40.66	38.37	13.70	1.31	0.84	0.95	0.92	0.54	0.64	0.59	1.02	0.45
	spot 2	37.18	34.34	21.17	1.43	0.80	1.07	0.64	0.48	0.75	0.52	0.42	1.21
	spot 3	65.73	23.12	4.36	0.89	1.17	0.74	1.05	0.44	0.53	0.45	0.34	1.17
M-2 FG/Acier	Map composition	22.42	47.91	31.08	3.14	0.83	1.15	1.02	0.97	0.73	0.52	0.63	0.67
	spot 1	7.86	51.74	32.93	1.39	0.77	0.85	0.63	0.72	0.96	0.62	0.66	0.86
	spot 2	24.64	36.42	31.64	1.71	0.80	0.58	0.70	0.72	0.87	0.61	0.50	0.80
	spot 3	23.12	33.40	36.09	1.82	0.74	0.85	0.53	0.57	0.84	0.66	0.71	0.69

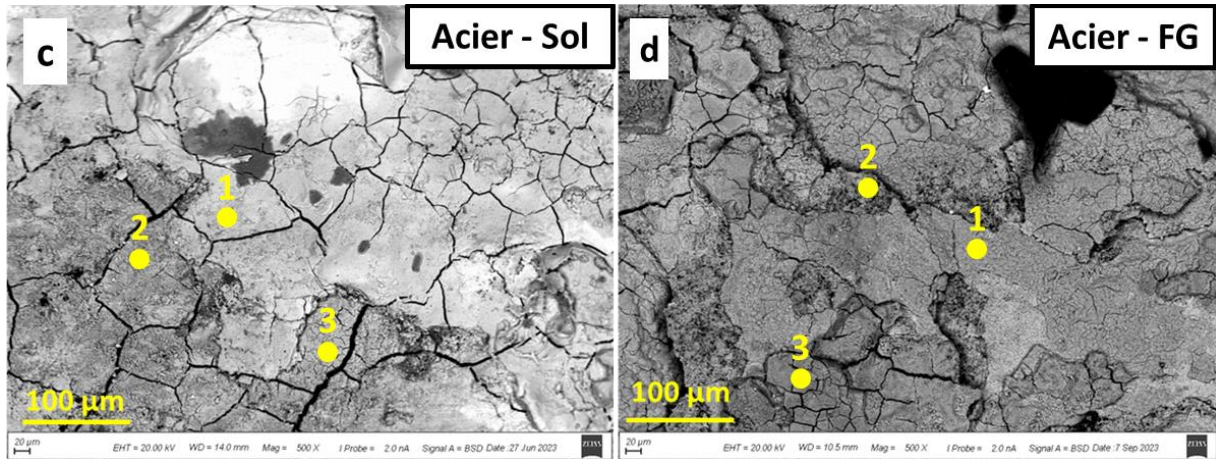


Image MEB des dépôts de corrosion de l'échantillon M-1: surface en acier en contact avec a) le sol, b) la FG

**Composition élémentaire des produits de corrosion de l'échantillon M-1 surface en acier en contact avec le sol, la FG et la FD**

Spectrum (Atomic%)		C	O	Fe	Cl	Mg	Zn	Al	K	P	Ca	Ti	Si
M-2 Acier/Sol	<b>Map composition</b>	18.62	47.72	27.31	1.48	1.28	0.92	1.01	1.07	0.79	0.61	0.72	0.76
	spot 1	16.37	35.71	39.26	2.21	0.89	0.82	0.73	0.67	1.07	0.62	0.76	0.89
	spot 2	17.19	45.08	29.79	1.92	0.74	0.88	0.64	0.67	0.96	0.58	0.74	0.82
	spot 3	15.89	40.63	35.43	0.89	1.08	0.84	0.73	0.75	1.18	0.71	0.89	0.97
M-2 Acier/FG	<b>Map composition</b>	19.21	51.08	22.35	0.79	1.34	1.09	1.17	1.05	0.68	0.69	0.57	0.73
	spot 1	21.18	45.40	25.44	1.34	0.95	0.86	0.75	0.65	1.07	0.71	0.77	0.88
	spot 2	14.53	50.11	26.90	1.93	0.96	0.77	0.71	0.66	1.08	0.64	0.80	0.90
	spot 3	18.38	39.92	33.89	0.88	1.04	0.85	0.73	0.75	1.11	0.68	0.81	0.96