

TABLE DES MATIÈRES

	Page
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Mise en contexte	2
CHAPITRE 2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
2.1 Impact de la corrosion sur l'économie.....	5
2.2 Gestion des réseaux d'aqueduc	6
2.3 Aspect préventif des réseaux d'aqueduc	8
2.4 Procédures d'auscultation	11
2.4.1 Évaluation hydraulique	11
2.4.2 Méthode d'échantillonnage.....	12
2.4.3 Auscultation structurale	12
CHAPITRE 3 CORROSION ET PROTECTION DES CONDUITES MÉTALLIQUES.....	15
3.1 Processus de corrosion.....	15
3.2 Circuit électrique équivalent d'une cellule simple de corrosion.....	17
3.3 Diagramme de Pourbaix	18
3.4 Agressivité du sol.....	20
3.4.1 Méthode d'évaluation de l'agressivité du sol	21
3.4.2 Paramètres déterminant l'agressivité du sol	22
3.4.3 Méthode de mesure de la résistivité du sol	24
3.4.4 Principe de mesure de la résistivité du sol	24
3.4.5 Validité des mesures de la résistivité du sol	26
3.4.6 Facteurs affectant la résistivité du sol	26
3.5 Prévention de la corrosion des conduites souterraines	28
3.5.1 Protection par revêtement	29
3.5.2 Protection par inhibition	29
3.5.3 Protection cathodique (P.C)	30
3.5.3.1 Principe de la protection cathodique	30
3.5.3.2 Critères de la protection cathodique	33
3.5.3.3 Facteurs affectant la validité des critères	33
3.5.3.4 Type de protection cathodique.....	36
3.5.3.5 Avantages et inconvénients des systèmes P.C	39
3.5.3.6 Facteurs affectant la protection cathodique	40
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE.....	43
4.1 Approche.....	43
4.2 Plan de travail	44
4.2.1 Mesure de la résistivité du sol.....	44
4.2.1.1 Profondeurs de prélèvement	45

4.2.1.2	Sélection des régions.....	46
4.2.1.3	Répartition des mesures par arrondissement.....	46
4.2.2	Analyse de l'historique des bris.....	47
4.2.2.1	Spécificité des bris	47
4.2.3	Relevé de potentiel à espace rapproché	48
4.2.3.1	Principe de mesure du potentiel.....	48
4.2.3.2	Évaluation de la performance de la protection cathodique	49
4.2.4	Évaluation de l'activité de corrosion	50
4.2.4.1	Choix des sites d'excavation.....	50
4.2.4.2	Analyse des échantillons de sol	51
4.2.4.3	Inspection de la conduite	52
CHAPITRE 5 ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS		55
5.1	Résistivité du sol	55
5.1.1	Constitution d'une base de données.....	55
5.1.2	Analyse et discussion.....	58
5.1.2.1	Validation des mesures de résistivité du sol	59
5.1.2.2	Homogénéité du sol	61
5.1.2.3	Comparaison des niveaux de corrosivité du sol.....	61
5.1.2.4	Comparaison des niveaux de résistivité du sol	63
5.1.3	Synthèse	64
5.2	Analyse de l'historique des bris	66
5.2.1	Analyse et caractérisation des bris	66
5.2.1.1	Évolution du nombre de bris.....	67
5.2.1.2	Calcul du taux de bris	68
5.2.2	Effet de la résistivité du sol et l'âge des conduites sur l'évolution des bris	72
5.2.2.1	Constitution d'une base de données.....	72
5.2.2.2	Analyse statistique des données cartographiques	73
5.2.2.3	Analyse corrélative des paramètres physiques.	91
5.2.3	Synthèse	94
5.3	Relevés de potentiel	96
5.3.1	Cueillette des données.....	96
5.3.1.1	Relevé de potentiel des conduites non protégées.....	96
5.3.1.2	Relevé de potentiel des conduites protégées.....	100
5.3.2	Analyse et discussion	105
5.3.2.1	Sections de conduites non protégées.....	105
5.3.2.2	Sections de conduites protégées.....	107
5.3.3	Synthèse	112
5.4	Évaluation de l'activité de corrosion	114
5.4.1	Constitution d'une base de données.....	114
5.4.2	Analyse statistique des données.....	123
5.4.2.1	Effet de la résistivité du sol sur la vitesse de corrosion	125
5.4.2.2	Effet des ions chlorures sur la résistivité du sol.....	127
5.4.2.3	Effet du pH sur la résistivité du sol.....	127

5.4.2.4	Effet de la résistivité du sol sur la corrosivité du sol	129
5.4.2.5	Effet cumulé des paramètres de pointage sur la vitesse de corrosion	130
5.4.3	Synthèse	132
5.4.3.1	État de la corrosion sur les conduites.....	132
5.4.3.2	Causes de la corrosion des conduites.....	132
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		134
ANNEXE I	RESULTATS DES CORRELATIONS CARTOGRAPHIQUES	136
ANNEXE II	RESULTATS D'ANALYSE EN LABORATOIRE	149
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		151

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1	Corrosivité du sol selon la résistivité 21
Tableau 3.2	Pondération des paramètres caractérisant la corrosivité du sol 23
Tableau 3.3	Critères du seuil de potentiel de protection selon la norme EBS 736..... 35
Tableau 3.4	Critères du seuil de potentiel de protection selon la norme DIN 30676 ... 35
Tableau 3.5	Comparaison des éléments de systèmes P.C..... 40
Tableau 4.1	Mesures de la résistivité par site 46
Tableau 4.2	Longueur totale des conduites expertisées..... 49
Tableau 4.3	Sites d'excavation 51
Tableau 5.1	Corrosivité du sol par arrondissement 65
Tableau 5.2	Données statistiques des bris 66
Tableau 5.3	Chronologie du taux de bris par arrondissement 69
Tableau 5.4	Informations relatives aux PV 100
Tableau 5.5	Synthèse du relevé de potentiel..... 104
Tableau 5.6	Classification des PV selon la catégorie de protection 108
Tableau 5.7	Répartition des PV par niveau de protection et année d'installation 109
Tableau 5.8	Classification des PV par catégorie de protection et année de protection..... 109
Tableau 5.9	Causes des dysfonctionnements de la protection cathodique 110
Tableau 5.10	Effet de la résistivité du sol sur la vitesse de corrosion 125
Tableau 5.11	Variation du pH et résistivité du sol à 2 m..... 128
Tableau 5.12	Vitesse de corrosion en rapport avec le cumul des points 130

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 3.1	Phénomène de corrosion dans une cellule de corrosion.....	15
Figure 3.2	Circuit électrique équivalent d'une cellule simple de corrosion.....	17
Figure 3.3	Courbe d'équilibre E-pH de Fer-eau à 25 °C.....	19
Figure 3.4	Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner.....	25
Figure 3.5	Schéma électrique du principe de la protection cathodique.....	31
Figure 3.6	Principes de la protection par anodes sacrificielles.....	38
Figure 3.7	Principe de la protection par courant imposé.....	39
Figure 5.1	Distribution statistique de la résistivité du sol- Arrondissement AR-A ..	55
Figure 5.2	Distribution statistique de la résistivité du sol- Arrondissement AR-B....	56
Figure 5.3	Distribution statistique de la résistivité du sol- Arrondissement AR-C....	56
Figure 5.4	Distribution statistique de la résistivité du sol- Arrondissement AR-D..	57
Figure 5.5	Distribution statistique de la résistivité du sol- Arrondissement AR-E...	57
Figure 5.6	Distribution statistique de la résistivité du sol- Arrondissement AR-F...	58
Figure 5.7	Distribution statistique de la résistivité du sol- Arrondissement AR-G. ..	58
Figure 5.8	Mesure de la résistivité du sol parallèlement et perpendiculairement à la conduite à 1 m de profondeur.....	60
Figure 5.9	Distribution statistique de la résistivité du sol à 2 m pour les différents arrondissements.....	62
Figure 5.10	Distribution statistique de la résistivité du sol à 1 m pour les différents arrondissements.....	62
Figure 5.11	Résistivités des sols des arrondissements à une profondeur de 2 m.	64
Figure 5.12	Résistivité des sols des arrondissements à une profondeur de 1 m.....	64

Figure 5.13	Évolution du nombre de bris par année.....	67
Figure 5.14	Étude comparative de l'évaluation des taux de bris dans les arrondissements.....	69
Figure 5.15	Évolution du taux de bris aux arrondissements entre 2003 et 2004.....	70
Figure 5.16	Corrélation entre le degré de corrosivité et le taux de bris entre 2003 et 2004.....	71
Figure 5.17	Distribution statistique des bris selon la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-A.....	74
Figure 5.18	Distribution statistique des bris en fonction de l'âge des conduites dans l'arrondissement AR-A.....	75
Figure 5.19	Taux de bris cumulatif en fonction de la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-A.....	76
Figure 5.20	Distribution statistique des bris en fonction de la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-C.....	77
Figure 5.21	Distribution statistique des bris en fonction de l'âge de conduite dans l'arrondissement AR-C	78
Figure 5.22	Taux de bris cumulatif en fonction de la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-C	79
Figure 5.23	Distribution statistique des bris en fonction de la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-D.....	80
Figure 5.24	Distribution statistique des bris en fonction de l'âge de conduite dans l'arrondissement AR-D.....	81
Figure 5.25	Cumulatif des taux de bris en fonction de la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-D.....	82
Figure 5.26	Distribution statistique des bris selon la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-E	83
Figure 5.27	Distribution statistique des bris selon l'âge de conduite dans l'arrondissement AR-E	84
Figure 5.28	Taux de bris cumulatif en fonction de la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-E	85

Figure 5.29	Distribution statistique des bris en fonction de la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-F.....	86
Figure 5.30	Distribution statistique des bris en fonction de l'âge de conduite dans l'arrondissement AR- F.....	87
Figure 5.31	Taux de bris cumulatif en fonction de la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-F.....	88
Figure 5.32	Distribution statistique des bris selon la résistivité du sol dans l'arrondissement AR- G.....	89
Figure 5.33	Distribution statistique des bris en fonction de l'âge de conduite dans l'arrondissement AR- G.....	90
Figure 5.34	Taux de bris cumulatif en fonction de la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-G.....	91
Figure 5.35	Évolution du nombre de bris en fonction des années répertoriées.....	92
Figure 5.36	Évolution du taux de bris en fonction des années répertoriées.....	92
Figure 5.37	Évolution du nombre de bris en fonction de la résistivité du sol.....	93
Figure 5.38	Évolution du nombre de bris en fonction de l'âge des conduites.....	94
Figure 5.39	Potentiel statistique des conduites dans l'arrondissement AR-A	97
Figure 5.40	Potentiel statistique des conduites dans l'arrondissement AR-C.....	97
Figure 5.41	Potentiel statique des conduites dans l'arrondissement AR-D	98
Figure 5.42	Potentiel statique des conduites dans l'arrondissement AR-E.....	98
Figure 5.43	Potentiel statique des conduites dans l'arrondissement AR-F.....	99
Figure 5.44	Potentiel statique des conduites dans l'arrondissement AR-G.	99
Figure 5.45	Potentiel des sections de conduites protégées depuis 1994 dans l'arrondissement AR-B.	101
Figure 5.46	Potentiel des sections de conduites protégées depuis 1997 dans l'arrondissement AR-B.	101

Figure 5.47	Potentiel des sections de conduites protégées depuis 1998 dans l'arrondissement AR-B	102
Figure 5.48	Potentiel des sections de conduites protégées depuis 1999 dans l'arrondissement AR-B	102
Figure 5.49	Potentiel des sections de conduites protégées depuis 2000 dans l'arrondissement AR-B	103
Figure 5.50	État de protection des points de vérification.....	108
Figure 5.51	Potentiel de polarisation moyen des sections de conduite.....	112
Figure 5.52	Phénomène de graphitisation de la conduite- Rue AR-AX1.....	114
Figure 5.53	Épaisseur résiduelle de la conduite- Rue AR-AX1.....	115
Figure 5.54	Profondeur des piqûres dans la conduite- Rue AR-AX1.....	115
Figure 5.55	Phénomène de graphitisation de la conduite- Rue AR-GX1.....	116
Figure 5.56	Épaisseur résiduelle de la conduite- Rue AR-GX1.....	117
Figure 5.57	Profondeur des piqûres dans la conduite- Rue AR-GX1.....	117
Figure 5.58	Phénomène de graphitisation de la conduite- Rue AR-GX2.....	118
Figure 5.59	Épaisseur résiduelle de la conduite- Rue AR-GX2.....	118
Figure 5.60	Profondeur des piqûres dans la conduite- Rue AR-GX2.....	118
Figure 5.61	Phénomène de graphitisation de la conduite- Rue AR-FX1.....	119
Figure 5.62	Épaisseur résiduelle de la conduite- Rue AR-FX1	120
Figure 5.63	Profondeur des piqûres dans la conduite- Rue AR-FX1.....	120
Figure 5.64	Phénomène de graphitisation de la conduite- Rue AR-FX2.....	121
Figure 5.65	Épaisseur résiduelle de la conduite- Rue AR-FX2	122
Figure 5.66	Profondeur des piqûres dans la conduite- Rue AR-FX2.....	122
Figure 5.67	Phénomène de graphitisation de la conduite- Rue AR-DX1.....	122

Figure 5.68	Épaisseur résiduelle de la conduite- Rue AR-DX1.....	123
Figure 5.69	Profondeur des piqûres dans la conduite- Rue AR-DX1	123
Figure 5.70	Épaisseur résiduelle et profondeur maximum des piqûres en fonction de l'âge des conduites.....	124
Figure 5.71	Effet de la résistivité du sol sur la vitesse de corrosion.	125
Figure 5.72	Effet corrigé de la résistivité du sol sur la vitesse de corrosion.....	127
Figure 5.73	Effet du pH sur la résistivité du sol à 2 m.	128
Figure 5.74	Contribution de la résistivité du sol dans le système de pointage selon la norme AWWAC 105.	129
Figure 5.75	Effet cumulé des paramètres de pointage sur la vitesse de corrosion....	130
Figure 5.76	Effet cumulé corrigé des paramètres de pointage sur la vitesse de corrosion.	131

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

pH	Pression d'hydrogène
MPPR	Vitesse de pénétration de piqûre maximum
CSC	Corrosion sous contrainte
T.A.S	Taux d'Agressivité du Sol
SRB	Bactérie sulfato-réductrice
C	Coulomb
Ca ²⁺	Ion de calcium
Zn ²⁺	Ion de zinc
SiO ₂	Oxyde de silice
H ₂ O	Molécule d'eau
O ₂	Atome d'Oxygène (gaz)
Fe ²⁺	Ion Ferreux
Fe ³⁺	Ion Ferrique
Fe ₂ O ₃	Oxyde de fer (Magnétite)
Fe ₃ O ₄	Oxyde de fer magnétique
HFeO ²⁻	Ion Ferrate
H ₂	Atome d'hydrogène (gaz)
H ₂ S	Sulfure d'hydrogène
P.V	Point de vérification
P.C	Protection cathodique

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Ia	Courant anodique (mA)
Ic	Courant cathodique (mA)
Ra	Résistance anodique (Ω)
Rc	Résistance cathodique (Ω)
Ea,p	Potentiel de polarisation anodique (mV)
Ec,p	Potentiel de polarisation cathodique (mV)
E	Potentiel (mV)
ρ	Résistivité moyenne du sol ($\Omega \cdot \text{cm}$)
R	Résistance moyenne du sol (Ω)
d	Distance entre piquets (m)
P	Masse de métal dessous (g)
M	Masse molaire (g/mol)
n	Nombre d'électrons mis en jeu
F	Nombre de Faraday (96500 C/mol)
t	Temps de consommation (s)
K	Épaisseur de la paroi (mm)
V	Vitesse de diffusion (m/s)
T	Temps de réflexion (s)
E	Électron ($1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$)
∂	Densité de courant
μ	Microns (10^{-6})

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

1.1 Introduction

La majorité des services publics des municipalités du Canada et des États-Unis gèrent de vieux réseaux d'aqueduc fabriqués en fonte. Le choix d'utilisation des conduites en fonte dans la construction des réseaux de transport d'eau revient principalement à la bonne résistance fournie par ce métal aux différents facteurs physiques et mécaniques dont les pressions internes, les charges cycliques, la retenue de la poussée, les charges de terre, les charges longitudinales, les charges de poutre, les prises sous pression et la manutention en cours de construction (Tuyauterie Canada ltée, 2009). Cependant, le développement urbain a pris une croissance accélérée avec l'introduction des technologies de construction modernes en matériaux et en qualité de design. Cette évolution technologique est à l'origine de l'apparition d'un réseau d'aqueduc hétérogène composé de vieilles et de nouvelles conduites reliées entre elles par des moyens de raccordement appropriés.

Au fil des années, une hétérogénéité considérable a été créée et développée entre ces deux modèles de réseaux. La croissance du nombre de bris sur les anciens réseaux d'aqueduc en fonte et la dégradation importante dans la qualité d'eau au niveau des différentes zones urbaines et, en particulier, dans les zones où la corrosivité du sol est jugée agressive, étaient parmi les principaux constats soulevés sur le terrain (Doyle et al,2003). Éventuellement, la croissance du nombre de défaillances sur les conduites des vieux réseaux induit une perturbation de service fourni par les nouveaux réseaux dont le risque de vieillissement accéléré pour ces derniers pourrait être fortement présent.

La défaillance des aqueducs est liée aux différents facteurs physiques, mécaniques et environnementaux. Toutefois, le facteur de corrosion est considéré comme le principal élément responsable du vieillissement et de la détérioration des conduites métalliques souterraines. Il est difficile de quantifier les dégâts produits par ce processus destructif. Néanmoins, les coûts budgétaires destinés chaque année aux services publics pour le maintien du fonctionnement de ces infrastructures souterraines endommagées reflètent nettement l'ordre du dommage causé par la corrosion sur l'économie et la sécurité de n'importe quel pays (CACE et NRC, 2008).

1.2 Mise en contexte

Les conduites d'aqueduc en fonte fonctionnent en interaction continue avec le sol de l'extérieur et l'eau transportée à l'intérieur. L'indice d'efficacité du fonctionnement de ce réseau est qualifié par son degré de performance et son comportement passif ou actif vis-à-vis de son milieu environnant. D'autre part, ce type de réseau est affecté par d'autres facteurs opérationnels physiques et mécaniques qui influencent sa performance, son fonctionnement et sa maintenance. Ainsi, la présence permanente des conduites d'aqueduc dans ces conditions défavorables mène à la fragilisation de la structure métallique, à l'accélération de son processus de vieillissement et, par conséquent, à la réduction de sa performance. Suite aux nombreuses interventions de réhabilitation réalisées sur le réseau d'aqueduc, certains aspects destructifs peuvent être observés sur ces conduites (Bennis, 2008):

- **Aspect structural:** La détérioration structurale peut s'exprimer par une rupture ou une fuite sur la conduite. C'est une détérioration physique liée au vieillissement.
- **Aspect fonctionnel:** La détérioration hydraulique est provoquée par une baisse de pression et de débit en raison du rétrécissement du diamètre interne des conduites causé par les dépôts de sédiments, la corrosion ou les fuites.
- **Aspect qualitatif:** Une dégradation de la qualité d'eau peut être observée dans la conduite. Cela se manifeste par une coloration de l'eau provoquée par des infiltrations de substances ou d'autres matières dans les conduites.

Face aux dommages enregistrés sur les aqueducs en fonte, les solutions actuelles des services publics se sont orientées vers la réhabilitation des aqueducs souterrains existants. Cette issue vise à prolonger leur durée de vie et à réduire les coûts liés à l'exploitation. Toutefois, ce type de solution requiert d'importants coûts budgétaires. De plus, la disponibilité insuffisante de l'information sur l'historique du réseau d'aqueduc (banque de données mise à jour) pousse les responsables à concentrer toutes leurs interventions sur les conduites en état de détérioration très avancé. De ce fait, le problème majeur auquel les services publics sont confrontés consiste en l'identification d'une méthodologie permettant d'investir dans ces réseaux de la manière la plus efficace possible. Notons que le design de la gestion du réseau souterrain (aqueducs) a été mis de l'avant ces dernières années pour résoudre de façon économique et durable les problèmes liés à la sécurité et à la pérennité de ce dernier.

La mise en place d'un tel système repose sur la recherche de l'information précise sur l'état actuel des aqueducs. Cette information est essentielle pour l'identification des causes du dommage, de sa sévérité et aussi de son étendue. L'acquisition de ces données a pour effet de prédire l'évolution des détériorations dans le temps et de fournir un outil d'aide à la décision pour énoncer les meilleurs programmes de réparation dans un objectif de prévention.

Le champ expérimental utilisé dans le présent mémoire porte sur une Ville choisie dans la grande région de Montréal. Cette Ville a déjà bénéficié dans le passé de plusieurs interventions de réparation sur les réseaux de ses arrondissements. Ces travaux ont rendu possible la constitution d'une banque de données portant sur chaque conduite endommagée. Les données en question ont trait à la longueur, au nombre de bris issus de la conduite, à l'année de construction (l'âge de réseau), etc. De plus, cette Ville dispose déjà des plans de ses réseaux d'ensemble qui servent d'outils pour décrire la situation globale de l'état de ses différentes infrastructures et de réaliser une saine gestion. Néanmoins, l'évaluation de la condition des infrastructures a été établie selon un nombre limité d'inspections. Bien que l'échantillonnage de ces inspections soit valable, il demeure important de poursuivre cette démarche dans le but d'organiser davantage la planification stratégique des interventions.

Du point de vue protection contre l'avarie de corrosion, on souligne que seul un des arrondissements de la Ville choisie possède un système de protection cathodique. Ceci fait que certaines données inhérentes à ce système sont déjà disponibles. Cependant, les infrastructures de la Ville évoluent continuellement et il devient essentiel de mettre à jour cette base de données. À cet égard, il a été constaté que plusieurs informations importantes pour la gestion des actifs municipaux n'étaient pas disponibles ou qu'elles manquaient de précision et d'uniformité pour être exploitées adéquatement. Parmi ces dernières, on cite le nombre total de bris non enregistrés par année, corrosivité du sol non définie, etc. C'est ainsi que nous prenons en considération dans le présent travail toutes les particularités soulevées afin de concevoir une base de données fiable. Il s'agit donc de collecter toutes les informations pertinentes liées au réseau d'aqueduc tout en appliquant un plan d'intervention composé de plusieurs techniques d'évaluation d'état.

Les travaux entrepris dans le cadre de ce projet visent le développement d'une approche pour intégrer les facteurs clés dont l'agressivité du sol, l'âge de conduite, l'historique des bris et l'activité de corrosion et qui sont liés à la conception et à la planification des interventions pour le remplacement et la réhabilitation des réseaux d'aqueduc. Cette approche consiste à établir un diagnostic global basé sur le prélèvement des mesures caractérisant l'état de corrosivité des sols et l'activité de corrosion sur les conduites d'aqueduc de l'ensemble de la Ville. L'étude inclut également l'application d'un programme d'évaluation des sections d'aqueduc présentant déjà une protection cathodique. L'approche proposée permet ainsi de déterminer l'état de performance du réseau et d'établir un plan d'intervention de priorisation.

CHAPITRE 2

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Impact de la corrosion sur l'économie

La corrosion exerce une action destructrice sur les infrastructures souterraines. En se présentant sous différentes formes, cette avarie pose de nombreux problèmes techniques et économiques à l'échelle économique et environnementale. Ainsi, le diagnostic de ce processus nécessite un temps énorme et une capacité de maîtrise très élevée.

Les études réalisées sur les coûts annuels liés directement aux dommages portés par la corrosion des infrastructures dans les pays industrialisés révèlent un taux variant entre 3,1 et 4,5% du produit national brut (Mars, 2004). En référence à l'année 1998, ces coûts ont atteint un seuil total de 276 billions de dollars pour les différentes industries aux États-Unis (Koch et al 2002). Ceci équivaut à environ 3.1% du produit national brut américain. Les coûts générés par le service de transport, les infrastructures et les services publics en représentent les portions les plus élevées, soit près de \$23 milliards seulement pour le système des services d'eau (Virmani, 2002).

D'autre part, l'American Society of Civil Engineers (ASCE) a publié dans son rapport annuel de 2005 que les États-Unis allaient être confrontés à un déficit de 11 milliards de dollars par année pour le remplacement des conduites du réseau d'eau détériorées par la corrosion (Klopfer et Schramuk, 2005).

Les coûts de la corrosion demeurent excessivement élevés et variables annuellement d'un pays à l'autre à cause de la différence du taux de développement de ces derniers. Aux États-Unis, par exemple, ces coûts ont été de l'ordre de 429 billion de dollars en 2007 avant d'enregistrer une limite de 430 billions dollars américains en 2008 (Hart, 2009).

En Australie, le coût engendré par les dommages de corrosion a été évalué à 923 billions pour l'année 2005 (Klopfer et Schramuk, 2005). En Inde, le montant a été établi à 3% par rapport au produit national brut, ce qui représente un montant de 30 billions de dollars (Subramanian, 2010) . Au Japon, le coût estimé pour l'année 1997 a atteint 3937,69 billions yens (C.C.C.J., 2001).

2.2 Gestion des réseaux d'aqueduc

Le bris de vieilles conduites est un problème de tous les instants pour l'ensemble des services publics de distribution d'eau. La rupture d'une conduite d'amenée d'eau de grand diamètre peut entraîner une coupure de service pour un bon nombre de clients d'un service public. De ce fait, les gestionnaires du service doivent alors élaborer une stratégie de gestion fiable et durable permettant le contrôle de ce phénomène fatal. L'application d'une telle stratégie peut sauver de 25 à 30% des coûts annuels reliés au dommage. En outre, l'application de meilleures pratiques liées aux techniques de prévention contre la corrosion peut également atténuer les coûts engendrés par la corrosion de plus de 50% (Mars, 2004).

Les outils d'élaboration d'un plan de gestion performant destiné au réseau d'aqueduc offrent des avantages multiples tels que le suivi de l'évolution des réseaux d'aqueduc en fonction du temps, la réduction du risque des dommages et la planification de futurs travaux préventifs pour une durée de vie optimale. En effet, l'outil de gestion doit aussi tenir compte des critères économiques, techniques et socio-économiques. Dans les pays développés, plusieurs organismes et centres de recherches travaillent actuellement sur le développement des programmes d'aide à la décision. Parmi les principaux modèles déjà développés, on cite les suivants :

- WARP (Water Mains Renewal Panner), développé par le centre national de recherche de Canada (CNRC).
- WILCO (Whole Life for Water Distribution Network Management) : celui-ci est établi par un groupement d'équipes universitaire en Grande Bretagne.
- PARMS (Pipeline Basset and Risk Management System), développé en Australie par le CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation).

- CARE-W (Computer Aided Rehabilitation of Water works) : le système est à l'origine du projet de recherche européen CARE-W Consortium de 10 centres de recherche.

En novembre 2002, le gouvernement du Québec a adopté une politique nationale de l'eau inscrite dans le but de mieux encadrer la gestion, la protection, la restauration et la mise en valeur de l'eau. Pour ce faire, le gouvernement a pris plusieurs engagements pour encourager les municipalités à atteindre un taux de renouvellement de 1% pour leurs réseaux d'ici 2012 (M A M R, 2005). L'engagement dans une telle politique a incité le gouvernement à exiger de façon graduelle que toute demande d'aide financière pour la réalisation des travaux d'infrastructures soit appuyée par une mise en priorité des travaux à partir d'un plan d'intervention. Ce dernier doit permettre de vérifier et d'attester qu'une démarche systématique ait lieu pour établir la priorité des interventions à effectuer et ce afin d'intervenir au meilleur endroit possible et de la meilleure façon qui soit pour optimiser les interventions.

Dans la plupart des cas, les intervenants prennent les décisions en matière de travaux en considérant seulement les coûts directs alors que les coûts socio-économiques sont rarement pris en compte et ce malgré leur part importante dans l'estimation des coûts réels des projets. Or, la prise en compte d'une telle stratégie aide à l'identification de la solution la plus économique pour minimiser les coûts globaux. Malgré la volonté démontrée par les services de gestion de prendre en compte les coûts socio-économiques, les intervenants se trouvent confrontés à l'absence ou à la non maîtrise des outils et/ou des données leur permettant de quantifier ces coûts. Afin d'aider les municipalités et autres intervenants du domaine des infrastructures à mieux estimer les coûts reliés à l'utilisation des technologies de renouvellement, le ministère des affaires municipales, des régions et de l'occupation du territoire a mandaté le CERIU pour élaborer un guide déterminant l'évaluation des coûts socio-économiques des travaux de renouvellement des conduites d'eau potable et d'égout. Dans ce cadre, le CERIU a établi un guide d'aide à la décision et à la sélection de la meilleure technique d'intervention afin d'assurer une meilleure gestion des infrastructures (CERIU, 2010).

2.3 Aspect préventif des réseaux d'aqueduc

Les études effectuées sur la corrosion des conduites d'eau principales pour les municipalités du sud de l'Ontario ont montré que la résistivité du sol est la seule caractéristique ayant un effet important sur les vitesses de corrosion des conduites en cuivre (Wakelln et Gummow, 1994). Par contre, lorsque les conduites principales sont raccordées à la tuyauterie en plomb, en fer galvanisé ou en fer ductile, les vitesses de corrosion sont relativement indépendantes des caractéristiques du sol. Il est également retenu que les taux de bris des conduites principales en acier raccordées à des canalisations faites en plomb, en acier galvanisé ou en acier doux, étaient toujours plus faibles que lorsque ces conduites sont branchées à des conduites en cuivre. Les vitesses de corrosion interne ont tendance à décroître exponentiellement avec le temps (Wakelln et Gummow, 1994).

Dans le but de réduire l'impact de la corrosion, la recherche et le développement de la technologie a rendu disponible sur le marché trois classes de protection contre la corrosion: la première repose sur l'application d'un type de revêtement approprié. Cette catégorie est généralement désignée pour la protection des surfaces métalliques de l'extérieur. La deuxième classe est basée sur les principes électrochimiques d'oxydoréduction. Cette technique est connue sous le nom de protection cathodique. La troisième classe est destinée à être appliquée sur les surfaces internes des conduites. Cela se réalise par l'utilisation des inhibiteurs de corrosion (Rajani et Kleiner, 2003).

L'application de la technique de protection cathodique sur le réseau d'aqueduc a donné des résultats probants et avantageux avec un coût très faible comparativement aux autres techniques. Cela donne la priorité à ce groupe de se placer en premier rang de protection. Schramuk (2009) a soutenu le choix d'utilisation du système de protection cathodique comme moyen de lutte contre la corrosion. Depuis le développement du système de protection cathodique, plusieurs installations ont été réalisées sur les réseaux d'eau des services municipaux des Villes canadiennes comme les régions de Toronto et Ottawa.

Les résultats encourageants obtenus avec ce système ont été présentés par de nombreux chercheurs dont en particulier Robert A. Gummow (1999), Thomas J. Langill (2006) et Mehrooz Zamanzadeh (2007). Les conclusions retenues étaient très satisfaisantes aussi bien sur le plan économique que technique.

Malgré l'efficacité des procédures préventives appliquées sur la conduite métallique, la corrosion peut se manifester sous d'autres formes. Cette forme destructive touche particulièrement la paroi interne de la conduite (corrosion interne). Ce type de corrosion est souvent provoquée par la qualité de l'eau transportée, de la concentration de certains éléments chimiques dissous dans l'eau (oxygène, chlorures, sulfates, matières organiques, solides en suspension), le pH, l'alcalinité et la dureté (Judy Thompson et al., 1979).

Les symptômes indiquant la présence de la corrosion interne dans les conduites de réseau de distribution d'eau à base de fonte sont généralement identifiés par la réduction de l'épaisseur de la paroi interne de la conduite, la formation de gros tubercules qui diminuent la capacité d'écoulement ainsi que la dissolution des particules solubles de fer dans l'eau (eau rouge). À ce stade, les indices de risque de défaillance deviennent élevés pour nécessiter l'utilisation des inhibiteurs de corrosion. Ce mode de traitement d'anticorrosion est généralement fabriqué à base de phosphate (polyphosphate, l'orthophosphate, le zinc, l'orthophosphate de zinc, métaphosphate, et le phosphate bimétallique sous forme de sodium-zinc ou de potassium-zinc phosphate (McNeil et Edwards, 2000). D'autres inhibiteurs en silicates sont également utilisés pour les aqueducs.

Les inhibiteurs à base de phosphate sont des outils utilisés pour permettre aux conduites de distribution d'eau en fonte de résister à la corrosion. À cet effet, ils permettent de créer une couche protectrice sur la paroi interne des tuyaux par l'effet de la forte attraction des anions phosphatés aux métaux corrodés. Ceci conduit à la formation d'un composé stable sous forme de métal phosphaté sur la paroi interne de la conduite en empêchant ainsi la progression de la corrosion.

De plus, l'utilisation combinée du phosphate et du zinc dans le but de renforcer la résistance à la corrosion interne a donné lieu à un résultat satisfaisant par l'effet des molécules de zinc qui ont la faculté de former un dépôt avec les carbonates sur la surface cathodique en même temps que les phosphates bloquent les zones anodiques.

Concernant l'application des poly phosphates (hexa méta phosphate), l'alliance produite entre les cations (Ca^{2+} et Zn^{2+}) et l'inhibiteur de polyphosphates forme une barrière de diffusion sur les zones cathodiques. Cet écran limite en fait l'arrivée de l'oxygène au fer. Depuis leur mise en pratique, les inhibiteurs de corrosion ont prouvé leur fiabilité comme moyen de protection contre la corrosion interne. Cependant, le surdosage des ces produits provoque des suites indésirables lors de leur emploi. Ainsi, plusieurs recherches ont été effectuées dans le but d'analyser les effets indésirables et de déterminer les concentrations optimales de ces produits dans le réseau. Dans ce cadre, Boffardi (1993) a noté que le surdosage en polyphosphates peut écarter et disperser les dépôts d'oxyde de fer formés sur la paroi interne de la conduite avant de former des dépôts en suspension. Ce processus augmente la probabilité de former une eau rouge.

De plus, plusieurs recherches ont été menées sur l'effet des inhibiteurs à base de phosphate sur la tenue à la corrosion de différents nouveaux tuyaux en fonte. En fait, chaque tuyau transporte une qualité d'eau différente avec des pH différents. Les conduites sont dosées avec des quantités en orthophosphates et en polyphosphates. Les résultats ont montré que l'augmentation de la quantité des deux inhibiteurs n'a aucun effet sur les concentrations de fer. Par contre, l'influence des inhibiteurs de corrosion à base de phosphate dans les tuyaux avec de l'eau stagnante est significative (McNeil et Edwards, 2000).

Concernant l'effet des silicates, Davis, Chen et Edwards (2002) ont étudié l'absorption de silicate avec des concentrations en SiO_2 allant de 0 à 200mg/L sur l'hydroxyde ferrique en présence des pH variables de 5 à 9,5. Les résultats obtenus ont montré que les surfaces en fer deviennent plus chargées négativement avec la dose croissante SiO_2 et le pH.

Les démarches sus énoncées font partie d'une stratégie élaborée par les services publics pour conserver la performance des réseaux et ainsi offrir une bonne qualité de service au public.

2.4 Procédures d'auscultation

La mise en application d'un modèle de gestion du réseau d'aqueduc auprès des services des municipalités nécessite une base de données qui doit être mise à jour. C'est ainsi qu'il est indispensable d'effectuer des diagnostics d'évaluation d'état sur le réseau afin de collecter les informations nécessaires pour la mise à jour de ce modèle.

Pour évaluer l'état du réseau d'aqueduc, trois techniques d'auscultation ont été développées, à savoir : l'évaluation hydraulique, la méthode d'échantillonnage de l'eau et l'auscultation structurale.

2.4.1 Évaluation hydraulique

L'évaluation hydraulique d'un réseau aqueduc est effectuée principalement dans le but d'évaluer les conditions hydrauliques. Le travail consiste ainsi en la collecte de toutes les informations pertinentes liées aux conditions opérationnelles de la conduite, soit :

- les résultats des essais particuliers de débit d'incendie;
- le type de matériau des conduites ;
- le relevé de pression et de débit;
- le rendement des pompes;
- la détermination du coefficient de Hazen-Williams. Ce dernier contribue à l'élaboration d'un diagnostic de l'état interne de la conduite;
- l'inspection de l'état des vannes;
- l'analyse des plaintes des clients ;
- l'inspection des réducteurs de pression.

2.4.2 Méthode d'échantillonnage

La méthode d'échantillonnage consiste au prélèvement des échantillons d'eau pour analyser sa qualité. La variation dans la qualité de l'eau sert d'indice sur la présence d'un problème dans le réseau d'aqueduc.

2.4.3 Auscultation structurale

L'auscultation structurale consiste à utiliser des appareils de détection tels qu'une caméra télescopique, un profilomètre au laser, un mesureur d'épaisseur résiduelle ou un GPR (Technologie de radar).

Les techniques principales d'auscultation structurale mises en œuvre sont citées ci-après (Bennis, 2008) :

Méthode de champs lointains : Cette technique repose sur la mesure de l'atténuation d'un signal électromagnétique. La comparaison des signaux voyageant à travers la paroi et l'intérieur de la conduite permet de mesurer l'épaisseur de la conduite et mettre en évidence les défauts.

Méthode RFEC avec transformateur de couplage REFC/TC : Cette méthode adapte le principe du RFEC aux conduites en béton-acier. Elle permet de déterminer l'état de performance des barres d'acières précontraintes. Les barres d'acier spiralées créent un effet de transformateur de couplage (TC) en présence d'un champ magnétique. Cependant, l'intensité du transformateur du couplage diminue lorsque le nombre de barres d'acier rompues augmente. De plus, le délaminaison du mortier de revêtement intérieur ou extérieur ne peut être détecté. La technique est valable seulement pour les grands diamètres et elle s'applique dans une conduite vidée.

Auscultation par flux magnétique (MFL) : Pour cette technique, l'outil MFL sature magnétiquement la paroi de la conduite au fur et à mesure qu'il se déplace le long de la conduite. Le surplus de flux qui fuit vers l'extérieur de la conduite est détecté et mesuré. Pour cela, trois détecteurs sont utilisés pour mesurer les composantes axiale, radiale et circonférentielle du vecteur de flux de fuite magnétique. Comme l'intensité du flux de fuite magnétique dépend de l'état de la paroi, l'ampleur du défaut est proportionnelle à la variation de cette intensité.

Méthode de thermographie infrarouge : Le principe du système de thermographie infrarouge est basé sur le rayonnement des objets selon leurs températures. Une caméra infrarouge enregistre les variations de température sur la surface examinée où la présence de défaut interfère avec le flux de chaleur causant ainsi des variations localisées de température. Néanmoins, la détection des défauts dépend de plusieurs paramètres tels que la géométrie du défaut et les caractéristiques thermiques du matériau.

Les techniques d'auscultation structurale sus énoncés sont destinées à l'inspection interne de la conduite. La limitation de ces techniques réside dans le fait que les données collectées tiennent compte seulement des informations liées à l'aspect structural de la conduite inspectée à savoir l'épaisseur, la longueur, le diamètre et les défauts détectés. Néanmoins, la complexité de la compréhension du phénomène de dégradation des conduites souterraines dépend également des facteurs participant au vieillissement et à la dégradation de celle-ci. La situation devient de plus en plus complexe surtout quant il s'agit d'un manque de données liées aux facteurs à prendre en compte ainsi qu'à l'ignorance des interactions entre les mécanismes élémentaires de dégradation.

Toutes les techniques d'auscultation, de diagnostic et de réhabilitation utilisées expriment l'envie de créer une base de données à moyen et à long terme et dont la constitution est importante et pratiquement inévitable. Cependant, on note qu'en dépit de la diversité des méthodes existantes, très peu de moyens sont réellement mis en œuvre pour permettre la création d'une base de données fiable et exploitable et espérer un suivi permanent.

En ce qui concerne les systèmes de maintenance et de diagnostic, on souligne qu'il y a un manque à combler en terme de données pour l'aide à la réhabilitation du réseau aqueduc. Ces systèmes doivent comprendre également des techniques d'évaluation de l'état des réseaux et de ces systèmes préventifs à appliquer.(Édgard, 1998).

Le modèle de diagnostic proposé dans le présent travail tient en consécration les anomalies observées au niveau des modèles existants. Les paramètres du présent modèle vont permettre d'évaluer, entre autre, le caractère du milieu électrolytique (le sol) entourant le réseau d'aqueduc, l'état de la structure (activité de la corrosion établie sur la surface de la conduite) et finalement le système préventif existant.

CHAPITRE 3

CORROSION ET PROTECTION DES CONDUITES MÉTALLIQUES

3.1 Processus de corrosion

La corrosion du métal est un processus de destruction qui s'effectue généralement par action chimique ou électrochimique. La surface métallique est attaquée par son milieu et se transforme en composé d'oxyde, en sel ou en autre composé. Il s'agit d'une circulation de courant électrique produite sous l'échange d'électrons à l'interface de métal /électrolyte par l'intermédiaire des réactions chimiques. Les réactions d'oxydation (corrosion) se produisent sur les surfaces anodiques du métal alors que les réactions de réduction se produisent sur les surfaces cathodiques permettant ainsi de créer des pilles galvaniques (Figure 3.1).

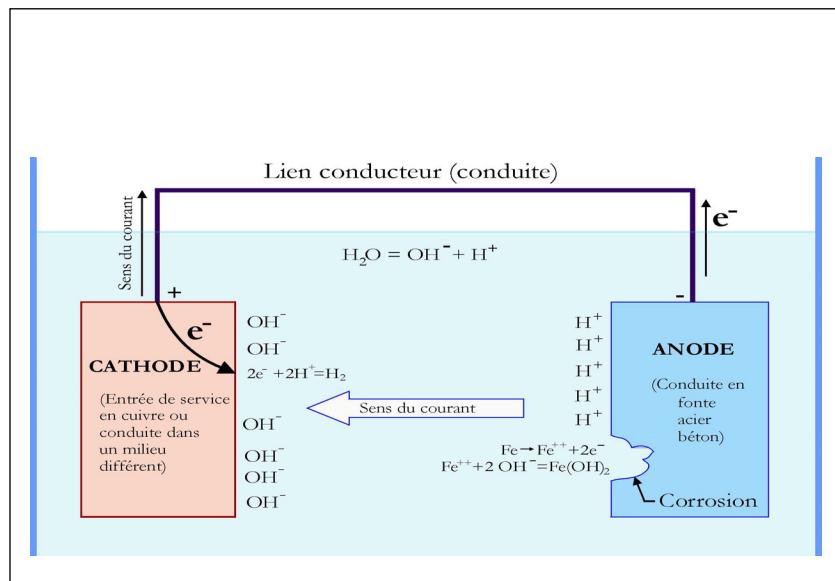
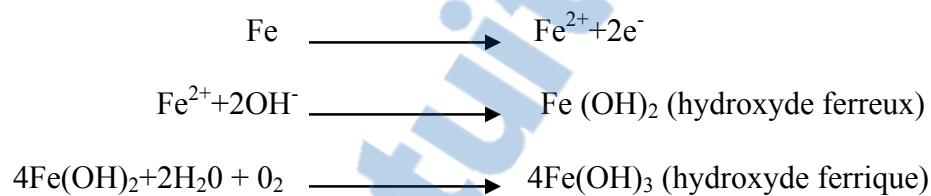


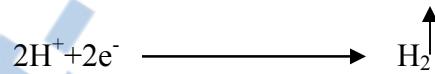
Figure 3.1 Phénomène de corrosion dans une cellule de corrosion.
Tirée de Bennis (2007)

Par ailleurs, le phénomène de dissolution ne se produit que lorsque les quatre éléments ci-après sont présents (U.S. Army Corps of Engineers, 2003):

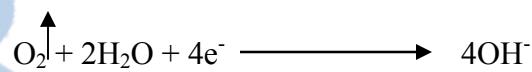
- **La zone anodique :** Elle est le siège de la réaction d'oxydation. À cet endroit, le métal s'oxyde et libère des ions dans l'électrolyte laissant derrière lui une perte d'électrons ce qui entraîne la corrosion de la structure métallique aux endroits appelés zones anodiques. Le mécanisme réactionnel de cette réaction chimique est décrit par les réactions suivantes :



- **La zone cathodique :** Il s'agit du siège de la réaction de réduction où les ions présents dans l'électrolyte sont réduits sur la surface de la cathode. La réaction de réduction des ions d'hydrogène présents dans l'eau est celle qui se produit le plus souvent en formant le gaz d'hydrogène selon le processus chimique suivant :



En présence de sols aérés, une autre possibilité de réaction chimique peut avoir lieu à la cathode. C'est la réduction des atomes d'oxygène dissous dans l'électrolyte qui se produit selon la réaction suivante:



- **L'électrolyte :** est un composé permettant le passage du courant électrique par déplacement d'ions quand il est à l'état liquide ou en solution aqueuse. En l'occurrence, le sol a la capacité de conduire un courant électrique entre l'anode et la cathode et provoquer la dissociation d'une molécule en ions.
- **Le chemin métallique :** Il nécessite non seulement une zone anodique mais aussi une zone cathodique qui coexiste avec la première. Ces deux zones doivent être

électriquement reliées entre elles par un milieu conducteur tel que la conduite. Le phénomène de corrosion est alors établi comme étant un processus électrochimique permettant aux électrons libérés de circuler entre la zone anodique et la zone cathodique.

3.2 Circuit électrique équivalent d'une cellule simple de corrosion

Le schéma de la cellule de corrosion décrit par la figure 3.1 peut se présenter en circuit électrique équivalent (Dieter, 1993). Le potentiel développé sur la surface anodique atteint la valeur $E_{a,p}$ tandis que le potentiel développé sur la surface cathodique atteint la valeur du potentiel de polarisation cathodique ($E_{c,p}$). La différence de potentiel créée entre l'anode et la cathode génère un courant de corrosion I_{corr} qui est égale au courant anodique (I_a) et au courant cathodique (I_c) (figure 3.2).

Ainsi, le circuit électrique présenté ci-dessous illustre non seulement le mécanisme de fonctionnement électrique d'une cellule de corrosion mais présente également une introduction sur le principe d'application de la technique de protection cathodique sur les conduites d'acier ou de fonte. La technique est discutée dans le prochain chapitre.

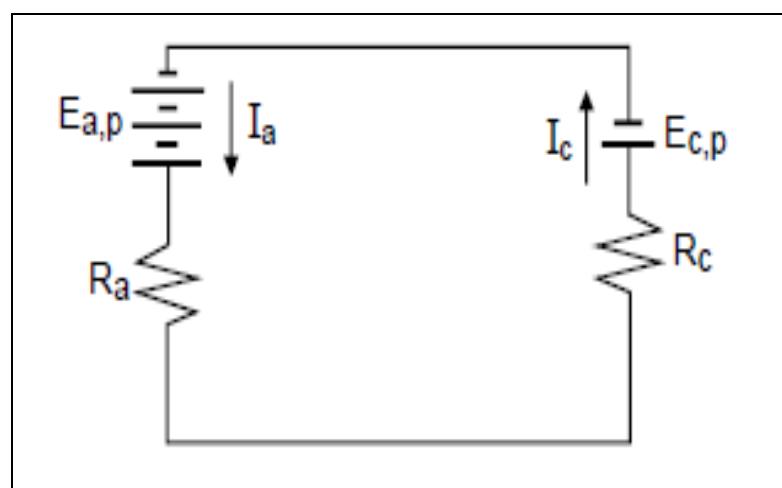


Figure 3.2 Circuit électrique équivalent d'une cellule simple de corrosion.
Tirée de NACE CP3 (2007)

Où :

Ia : courant anodique (A) ;
 Ic : Courant cathodique (A) ;
 Ra : Résistance anodique (Ω) ;
 RC : Résistance cathodique (Ω) ;
 Ea, p: Potentiel de polarisation anodique (V) ;
 Ec, p : Potentiel de polarisation cathodique (V).

3.3 Diagramme de Pourbaix

Les diagrammes de Pourbaix potentiel- pH (E-pH) sont utilisés principalement pour aider à prévoir les états les plus stables d'un métal, de ses produits de corrosion et de ses ions associés (forme complexe) dans une solution aqueuse sous différentes conditions de potentiel et de pH (Silverman et al, 2007). Le diagramme de Pourbaix localise également les frontières des produits de corrosion insolubles du métal dissous avec les limites en concentration d'ions métalliques libres. Sur le diagramme de potentiel E-pH du système Fe-H₂O à 25°C (Figure 3.3), plusieurs points thermodynamiques critiques peuvent être soulevés (Benjamin et Fergusson, 1996):

- Il est possible de ramener le potentiel de Fer à la région d'immunité en appliquant un moyen de protection cathodique adéquat.
- Il n'existe aucun pH pour lequel le fer métallique et le fer bivalent (ions ferreux) sont stables en présence de l'oxygène.
- Lorsque l'acier atteint des potentiels plus électropositifs en présence d'un milieu acide (pH faibles) ou intermédiaires, les ions Fe²⁺ et Fe³⁺, ont tendance à se stabiliser sous l'effet de l'augmentation de la vitesse de corrosion et en présence des conditions thermodynamiques favorables.
- Lorsque l'acier atteint un potentiel électropositif dans un électrolyte alcalin, la formation d'un complexe solide tel que le Fe₂O₃ ou le Fe₃O₄ a lieu. Ces complexes peuvent être formés et déposés sur la surface du Fer en formant une couche protectrice.

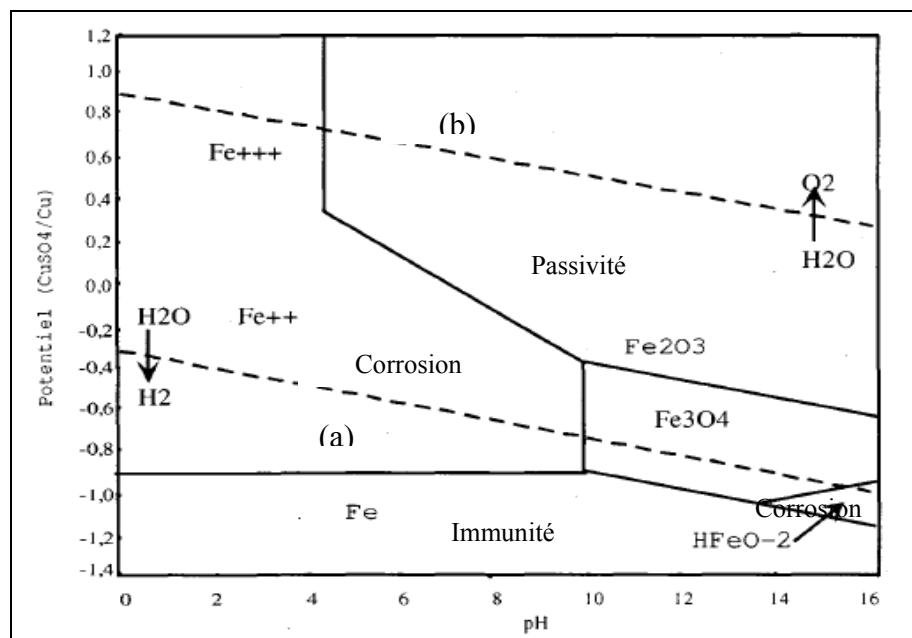


Figure 3.3 Courbe d'équilibre E-pH de Fer-eau à 25 °C.
Tirée de Pourbaix (1974)

- La région limitée par les lignes (a) et (b) de la figure (3.3) présente la zone de stabilité thermodynamique des molécules d'eau. Dans cette région, le potentiel et le pH sont considérablement stables. Par ailleurs, le rapprochement de ces limites provoque une dissolution de l'eau (NACE, 2007).

La ligne (a) présente la ligne d'évolution d'hydrogène qui est présentée par le mécanisme réactionnel suivant :



La ligne (b) présente la ligne d'évolution d'oxygène dont la réaction est représentée par:



Pour le cas du fer, le diagramme potentiel-pH du système Fer- H₂O à 25°C fait apparaître trois phases distinguées (Pourbaix, 1974), à savoir:

- **Phase d'immunité :** À cet état thermodynamique, la corrosion du métal ne peut pas se produire dans son milieu environnant parce qu'il atteint un état stable assuré par l'effet d'équilibre thermodynamique provoqué par le niveau énergétique emmagasiné dans le métal (polarisation).
- **Phase de corrosion :** Dans cet état de système, le métal se transforme d'un niveau stable à un niveau actif (corrosion). Cette transformation se traduit par la dissolution de métal en ions solubles dans l'électrolyte. En solution neutre ou acide, le diagramme prévoit la dissolution du fer avec la formation d'ions ferreux Fe²⁺ et d'ions ferriques Fe³⁺ tandis qu'en solution alcaline, le fer est sous forme d'ions ferrate HFeO₂.
- **Phase de passivité :** C'est la plage où se trouvent les différentes phases condensées sous forme d'oxydes et d'hydroxydes qui recouvrent la surface du métal et le protègent contre les attaques de corrosion. Le métal a donc été oxydé en surface mais ce film le protège d'une agression en profondeur. La couche passive recouvrant la surface métallique est généralement très stable, compacte et fortement liée au métal.

3.4 Agressivité du sol

L'agressivité du sol est considérée comme la principale caractéristique qui contribue directement au processus de corrosion des structures enfouies (Rim-rukeh et Awatefe, 2006). Un sol résistif a un faible apport sur le processus de corrosion tandis qu'un sol de faible résistivité permet l'activation et la propagation rapide de la corrosion et, par conséquent, une apparition importante du nombre de bris sur les conduites du réseau (Paul, 1990). La conduite en fonte ductile présente généralement une bonne résistance à la corrosion externe. Cependant, en présence des sols agressifs, les risques d'activité de corrosion sont élevés (Agostinis, 2008). À cet effet, la connaissance de la résistivité du sol entourant les conduites sert à estimer la corrosivité du sol, à déterminer les zones exposées à la corrosion et aussi à établir des plans d'intervention et de prévention en fonction des priorités.

3.4.1 Méthode d'évaluation de l'agressivité du sol

Le chemin parcouru par le courant de corrosion entre les zones anodiques et cathodiques d'une structure métallique enterrée dans un milieu conducteur comme le sol est facilité par la faible résistivité de celui-ci. La résistivité du sol présente ainsi un facteur déterminant dans la propagation de la corrosion (Silverman et al, 2007).

Les spécialistes en études de sol ont fait appel au développement de techniques d'évaluation d'agressivité de sol. Par ailleurs, aucune norme n'a été raffinée et acceptée par les organisations de standardisation telles que l'ASTM & NACE (Paul, 1990). Les seules références disponibles, soit les normes PACE (Règlement sur les produits pétroliers), AWWA C105 (American Water Works Association) et AFNOR A05-250 (Évaluation de la corrosivité des sols pour les canalisations enterrées en matériaux ferreux non ou peu alliés). Ces essais permettent d'évaluer la corrosivité de l'échantillon de sol de manière assez précise. Pour ces raisons, on s'est basé sur ces normes existantes afin de définir des limites de résistivité sur le terrain concernant les conduites d'aqueduc en fonte. Les limites de résistivité considérées sont présentées au tableau 3.1 où cinq classes de sol sont ainsi définies en fonction de leur résistivité et de la corrosivité associée à chacune d'elles.

Tableau 3.1 Corrosivité du sol selon la résistivité

Plage de résistivité du sol ($\Omega \text{ cm}$)	Catégorie du sol
0-1500	Très corrosif
1500-3000	Corrosif
3000-5000	Moyennement corrosif
5000-10000	Faiblement corrosif
>10000	Peu corrosif

La résistivité du sol est considérée comme le premier indicateur déterminant l'échelle d'activité de corrosion. Néanmoins, il existe d'autres facteurs qui peuvent affecter le sol tels que les produits chimiques présents dans le sol, le taux d'humidité et la qualité du sol, etc.

Il est alors important de développer un système qui tient en compte ces facteurs afin de prévoir le taux d'agressivité du sol avec beaucoup plus de certitude. Pour ce faire, l'American Water Works Association « AWWA » a développée une norme «AWWAC 105» basée sur un système de pointage de 10 Points (10P). En référence à cette norme, l'analyse du taux d'agressivité du sol désigné «T.A.S» s'effectue au laboratoire et les résultats obtenus permettent d'évaluer l'agressivité du sol avec une grande précision (ANSI/AWW C105/A21.5-99, 1999).

3.4.2 Paramètres déterminant l'agressivité du sol

L'analyse du taux d'agressivité du sol consiste en la détermination des paramètres suivants (Agostinis, 2008):

- **Résistivité du sol :** La résistivité du sol est inversement proportionnelle à la capacité du courant de corrosion et donc à l'activité de la corrosion. Un sol avec une résistivité de 1500 Ohm cm ou moins se fait attribuer 10 points et est considéré comme potentiellement corrosif.
- **pH :** Le pH exprime la teneur en ions acidifiants dissous dans l'électrolyte (le sol) et indique l'aptitude d'un sol à être le siège de certaines réactions particulières influençant la corrosion. Un sol à faible pH indique un sol aux propriétés acides et un sol avec un pH élevé indique la présence de sels alcalins dans le sol.
- **Sulfures :** La présence des sulfures indique l'existence de bactéries sulfato-réductrices. L'analyse considère les degrés de la réaction du catalyseur de l'échantillon du sol étudié (positif, trace ou aucune).
- **Potentiel d'oxydoréduction (Redox) :** Le potentiel redox vise à mesurer la capacité d'un sol à permettre l'échange d'électrons, ce qui est le fondement même du processus de corrosion.
- **Humidité :** Le taux d'humidité et ses variations ont un impact double : ils affectent autant la résistivité que le transport d'oxygène aux zones de corrosion.

L'analyse de l'humidité considère les conditions de drainage (excellente, moyenne, pauvre) plutôt que la teneur en eau effective de l'échantillon.

À chacun de ces paramètres énumérés ci-dessus, il est possible d'affecter un pointage relatif à son agressivité. Le cumulatif des points pour un échantillon détermine le taux d'agressivité du sol (T.A.S.). Les points attribués aux taux d'agressivité du sol selon la norme «AWWAC 105/A21.5-99» sont illustrés dans le tableau 3.2 (ANSI/AWW C105/A21.5-99, 1999).

Tableau 3.2 Pondération des paramètres caractérisant
la corrosivité du sol
Tiré d'appendix A, ANSI/AWWAC105 (1999)

Résistivité (Ohm .cm)	Points
< 1500	10
≥ 1500 – 1800	8
> 1800 – 2100	5
> 2100 – 2500	2
> 2500 – 3000	1
> 3000	0
pH	
0-2	5
2-4	3
4-6.5	0
6.5-7.5	0
7.5-8.5	0
> 8.5	3
Potentiel Redox (mV)	
> 100	0
50-100	3.5
0-50	4
< 0	5
Sulfures	
Positive	3.5
Trace	2
Négative	0
Humidité	
Élevé	2
Moyenne	1
Pauvre (sec)	0

3.4.3 Méthode de mesure de la résistivité du sol

La méthode la plus utilisée pour déterminer la résistivité des sols est la méthode des quatre électrodes de Wenner (Scott et O'connor, 2003). Cette technique présente de nombreux avantages dont entre autres sa caractéristique non destructive, capacité de fournir de hautes résolutions, relevé de mesure rapide et données facilement interprétables.

3.4.4 Principe de mesure de la résistivité du sol

Tel qu'illustré sur la figure 3.4, on fait circuler un courant d'intensité I entre les deux piquets extérieurs et on mesure la différence de potentiel ΔE qui en résulte par l'effet Ohmique entre les deux piquets intérieurs. Les valeurs obtenues des mesures de I et ΔE permettent de calculer la résistivité du sol selon l'équation 3.1 (Laver et Griffiths, 2001). Comme le sol n'est pas homogène, la valeur obtenue par la mesure ne correspond pas à la résistivité réelle du sol mais plutôt à une moyenne des résistivités des diverses couches le constituant. Ainsi, cette valeur est appelée la résistivité apparente.

La résistivité moyenne du sol peut être déterminée à partir de la résistance mesurée par l'Ohm-mètre. Toutefois, la connaissance de la distance entre chaque piquet de terre est nécessaire dans chaque mesure. Ceci rend la procédure lente et compliquée (ASTM G57-95a, 1997). Pour cela, la norme ASTM G57-97 a été conçue pour simplifier l'utilisation de la méthode de Wenner. Cette norme exige que les quatre piquets de terre soient alignés suivant une distance égale pour être connectés par la suite avec des fils conducteurs aux bornes d'un résistance-mètre.

La conception actuelle de résistance-mètre utilisé permet de générer le courant à injecter, de mesurer le voltage et d'afficher la valeur de la résistance qui présente en fait la résistivité moyenne du sol.

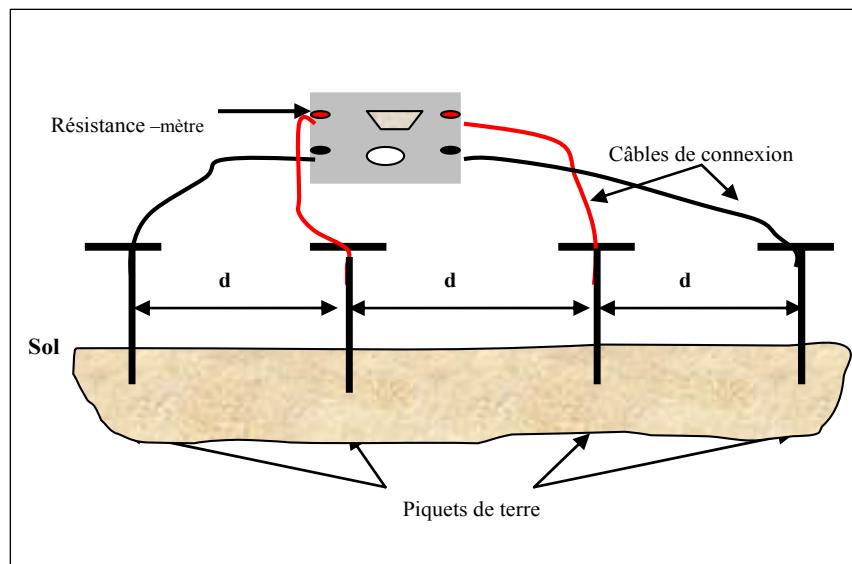


Figure 3.4 Principe de fonctionnement de la méthode de Wenner.

La résistivité moyenne du sol (ρ) peut être calculée en fonction de la résistance moyenne du sol mesuré avec l'application de la formule 3.1 (Nigel et Booth, 2006):

$$\rho = 2 \pi R d \quad (3.1)$$

Où :

ρ = résistivité moyenne du sol ($\Omega \text{ cm}$) ;

R = résistance moyenne du sol (Ω) ;

d = espacement entre deux piquets (cm).

Il est à noter que les relevés de résistivité du sol doivent être réalisés sous une profondeur constante. Il s'agit donc de l'exploration horizontale d'une surface de terrain d'épaisseur uniforme.

3.4.5 Validité des mesures de la résistivité du sol

Avant de procéder aux mesures de résistivité du sol, des mesures préliminaires doivent être effectuées sur le terrain à l'aide d'un matériel qui permet de détecter la présence de câbles, des conduites adjacentes enterrées ou tout autre conducteur pouvant influencer l'exactitude de la mesure (Nigel et Booth, 2006). Alors, il est important de ne pas effectuer la mesure de la résistivité directement au-dessus de la conduite mais plutôt à côté de celle-ci.

3.4.6 Facteurs affectant la résistivité du sol

La résistivité du sol gère l'efficacité du courant de corrosion ionique parcouru dans le sol. Néanmoins, le comportement résistif de ce dernier peut être affecté par de nombreux facteurs environnementaux tels que la qualité du sol (facteur géologique), la température (facteur métrologique) et les éléments chimiques dissous. Parmi les éléments chimiques les plus réagissant dans le processus d'activité de corrosion des structures métalliques souterraines, on cite les ions de chlorures, les sulfates, les phosphates et les bicarbonates de chlorure. La présence de ces anions dans le sol peut affecter considérablement l'exactitude des mesures obtenues, et par conséquent la validité de la méthode de mesure (Nigel et Booth, 2006).

A) Effet de la qualité du sol

Les sols entourant les conduites métalliques enterrées sont généralement caractérisés par leur conductivité électrique. Ils permettent aux charges ioniques et aux courants de corrosion développés de se mouvoir entre les surfaces anodiques et cathodiques. Par ailleurs, la vitesse de corrosion produite par les cellules de corrosion est relative au taux de résistivité du sol. Par exemple, si un sol présente une faible résistivité, la vitesse de corrosion sera grande et la structure sera rapidement endommagée (Wakelln et Gummow, 1994).

B) Effet de l'humidité

La présence de l'humidité dans le sol joue un rôle essentiel sur le processus des réactions physico-chimiques. Elle gère le phénomène de durcissement et de retrait, la perméabilité, l'immobilité des ions en plus de participer au développement des cellules de corrosion sur les conduites d'aqueduc. La croissance du taux d'humidité diminue la résistivité du sol et augmente son caractère agressif.

C) Effet de sel

En période hivernale, l'utilisation du sel sur les chemins de passage des piétons et sur les routes en particulier a pour but de fournir la sécurité aux publics et facilite la circulation des transports. En fondant sous l'effet de l'humidité, le sel fait diminuer la température à laquelle l'eau gèle en prévenant la formation de verglas. Mais, les ions chlorures impliqués dans la composition du sel sont infiltrés dans le sol pour former des concentrations élevées en ions chlorures. Ainsi, l'accroissance du taux des ions chlorures dans le sol réduit la résistivité du sol et fait accroître la vitesse de corrosion sur les surfaces des conduites enterrées (Wakelln et Gummow, 1994).

D) Effet de la température

La variation de la température du sol intervient directement dans le processus de corrosion des structures métalliques enfouies. En fait, elle se manifeste sur le potentiel de corrosion, la résistivité du sol, le taux de corrosion et le transport des particules (Pruckner, 2001). La diminution de la température dans le sol est inversement proportionnelle à sa résistivité.

3.5 Prévention de la corrosion des conduites souterraines

La large utilisation mondiale des aqueducs en fonte est due à sa bonne résistance à la pression interne et à la corrosion dans les différents types de sol (Cast Iron Soil Pipe Institute, 2006). Cependant, la présence permanente de la conduite dans un sol corrosif et une eau agressive augmente les probabilités d'activité des cellules de corrosion. C'est ainsi que l'application des procédures de protection contre l'évolution de la corrosion sur les conduites des réseaux est indispensable. En terme de prévention, il existe quatre moyens pour lutter contre la corrosion, à savoir :

- **Choix du matériel de fabrication des conduites :** Cette étape vient en priorité du fait qu'elle donne l'avantage au réseau de mieux résister aux conditions opérationnelles et environnementales.
- **Application de revêtements :** Ce type de protection a pour but d'isoler la conduite électriquement et d'éliminer tout contact direct avec le milieu environnant. Ainsi, ce revêtement anticipe la formation des cellules de corrosion sur la surface de la conduite.
- **Application de la protection cathodique :** La technique de protection repose sur l'injection d'un courant électrique continu permettant d'abaisser le potentiel de la structure métallique à protéger jusqu'à la zone d'immunité.
- **Utilisation des inhibiteurs de corrosion :** Ce type de protection est destiné à la protection des surfaces internes de la conduite métallique. Ils forment une couche passive sur la paroi interne avant d'empêcher la production des cellules de corrosion.

3.5.1 Protection par revêtement

La protection de la surface extérieure de la conduite métallique par un type de revêtement approprié a pour but de former une barrière qui l'isole de son milieu environnant. Ce type de revêtement ne fournit pas de protection absolue et définitive en raison des défectuosités susceptibles de se produire lors de la pose ou au cours de la vie de l'ouvrage. Afin d'être performant, le revêtement appliqué doit répondre à certaines spécifications dont, entre autres, l'adhérence, la bonne résistance à l'impact, le bon isolement électrique et aussi une stabilité durable de sa composition chimique (Shiwei, 2001).

Sur le marché de l'industrie des revêtements, plusieurs gammes de revêtements sont destinées à la protection des structures métalliques. Les revêtements en bitume, en goudron de houille, en asphalte, en thermoplastiques, en polyéthylène, en polypropylène, en époxy et aussi en bandes adhésives sont les types les plus disponibles (Zhao *et al.*, 1998).

3.5.2 Protection par inhibition

L'inhibiteur de corrosion est une forme de substance rajoutée avec une faible concentration au liquide transporté pour réduire le taux de corrosion sur les conduites du réseau (Nguyen-Thuy, 2008). Les interactions chimiques s'établissant entre l'inhibiteur et la surface du métal permettent de former un écran passif sur la paroi de la conduite qui sert à empêcher le processus de corrosion de se produire. Les inhibiteurs de corrosion sont de deux types, soit anodique ou cathodique (Bofardi, 1987). Les inhibiteurs anodiques sont conçus pour interférer avec la réaction de corrosion sur les sites anodiques. Quant aux inhibiteurs cathodiques, ces produits sont destinés à réduire le flux par l'effet de la réaction cathodique. Par ailleurs, les inhibiteurs de corrosion peuvent fonctionner autrement comme agent d'inhibition. Ils peuvent être injectés dans le liquide transporté pour ajuster son pH, récupérer la quantité d'oxygène dissout et neutraliser les espèces acides en solution. Ainsi, ces formes d'utilisation sont très pratiques et en même temps efficaces dans la lutte contre la corrosion.

3.5.3 Protection cathodique (P.C)

Lorsqu'un métal entre en contact avec un électrolyte conducteur (eau ou sol), il s'établit spontanément un système d'échange ionique à l'interface métal/électrolyte sous l'effet du potentiel développé. Cet évènement électrochimique continu produit simultanément deux phénomènes : une dissolution métallique aux sites anodiques produite par les réactions d'oxydation d'une part, et une formation d'un dépôt métallique créé par les réactions de réduction aux sites cathodiques d'une autre part. L'utilisation de la protection cathodique est basée sur l'injection d'un courant continu qui permet de baisser le potentiel naturel du métal de la zone active vers la zone d'immunité.

Le système de protection cathodique a vu un développement rapide et une application beaucoup plus large dans l'industrie pétrolière et gazière que dans le secteur municipal aux États-Unis d'Amérique (Koehl, 2000). Les anciennes générations pensaient que la cause principale des ruptures de canalisations d'eau municipale est attribuable à la nature fragile de la fonte grise plutôt qu'à la corrosion. Pour cette raison, l'application de ce système protecteur sur les réseaux d'aqueduc a pris des années de retard.

Au Canada, la première utilisation de la protection cathodique sur le réseau d'alimentation en eau remonte au début des années 1960. Les petites entreprises de distribution d'eau n'ont commencé à se servir de cette technique qu'à partir des années 1980. Actuellement, la majorité des services publics ne cessent d'adopter cette méthode de protection (Gummow, 1999).

3.5.3.1 Principe de la protection cathodique

Comme montré précédemment sur la figure 3.2, la cellule de corrosion peut se présenter en circuit électrique. Ce circuit est principalement constitué d'une anode, d'une cathode, un conducteur du courant électrique et des résistances implantées en série. L'incorporation du système de protection cathodique au circuit d'une cellule de corrosion existante conduit à une modification des paramètres électriques du circuit préliminaire.

Pour cela, il est indispensable de présenter un nouveau concept pour le circuit électrique qui est équivalent à l'ensemble du système (Cellule de corrosion - Système de protection cathodique) comme le montre la figure 3.5.

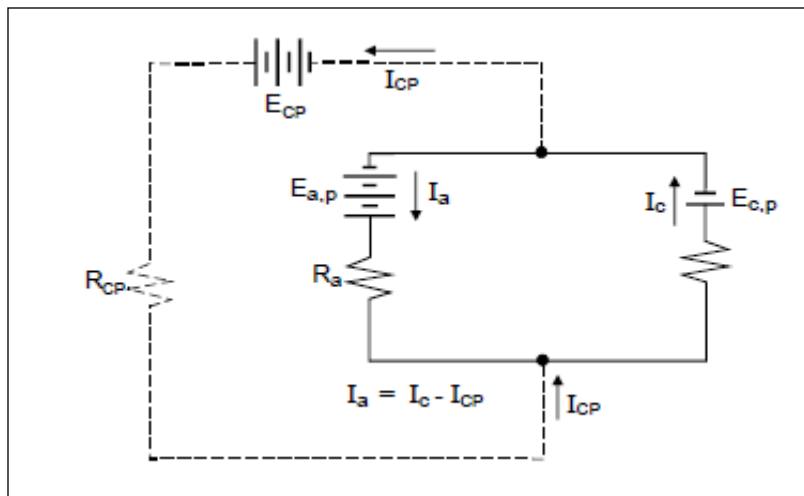


Figure 3.5 Schéma électrique du principe de la protection cathodique.
Tirée de NACE (2007)

Selon la loi d'Ohm, le courant de corrosion (I_{corr}) présent dans le circuit d'une cellule simple de corrosion est déterminé par la formule 3.2 (NACE, 2007):

$$I_{corr} = (E_{a,p} - E_{c,p}) / (R_a + R_c) \quad (3.2)$$

$$I_a = I_c = I_{corr}. \quad (3.3)$$

Où :

I_{corr} : courant de corrosion (A);

E_{cp} : potentiel de polarisation de la cathode (V);

E_{ap} : potentiel de polarisation de l'anode (V);

R_a : résistance de l'anode dans l'électrolyte (Ω);

R_c : résistance de la cathode dans l'électrolyte (Ω);

I_a : courant anodique (oxydation) (A);

I_c : courant cathodique (réduction) (A).

Une fois que le système de protection cathodique incorporé, le courant fourni par ce système rejoint le circuit de la cellule de corrosion. Ainsi, les paramètres de courant (I_a) et (I_c) déterminés précédemment par la formule (3.2) et (3.3) ne sont plus valables.

Selon le nouveau concept du circuit électrique du système intégral et en référence à la loi de Kirchhoff, le courant cathodique (I_c) est équivalent à la somme du courant anodique (I_a) et du courant de protection (I_{cp}) injecté par le système de protection cathodique (3.4).

$$I_c = I_a + I_{cp} \quad (3.4)$$

Ou

$$I_a = I_c - I_{cp} \quad (3.5)$$

Où :

- I_a : courant anodique (oxydation);
- I_c : courant cathodique (réduction);
- I_{cp} : courant de protection cathodique;
- $E_{c,p}$: potentiel de polarisation cathodique;
- $E_{a,p}$: potentiel de polarisation anodique;
- E_{cp} : potentiel de protection cathodique.

D'après la formule (3.5) ci-dessus, le courant de protection (I_{cp}) injecté dans le circuit de la cellule de corrosion réduit le courant de corrosion (I_{corr}) jusqu'à son élimination totale. Autrement dit, lorsque le courant I_{cp} augmente, la polarisation de la cathode augmente alors que la différence de potentiel ($E_{a,p} - E_{c,p}$) tend vers zéro.

3.5.3.2 Critères de la protection cathodique

Les critères de la protection cathodique pour une structure d'acier enterrée dans le sol ou submergée sont déterminés par le standard de la « NACE » et définis en particulier par la norme « SP0169 » (NACE SP0169, 2007). Cette norme énonce ce qui suit:

- Le seuil de potentiel de protection cathodique relevé sur la structure d'acier par l'intermédiaire d'une électrode de référence en cuivre-sulfate de cuivre doit atteindre la valeur de -850 mV. Cette valeur est le critère le plus souvent utilisé pour accepter le niveau de protection cathodique.
- La valeur du seuil de potentiel de -850 mV représente le potentiel de polarisation de la structure qui peut être réduit par la chute Ohmique créée entre l'électrode de mesure et la structure mesurée. Pour cela, l'électrode doit être toute proche de la structure pour réduire la chute Ohmique durant le relevé de potentiel.
- Une différence de polarisation (niveau de polarisation) de 100 mV peut être également utilisée comme un critère de protection pour une structure métallique soumise à une protection cathodique. Ce critère s'applique souvent sur une structure nue ou avec un revêtement endommagé où il est impossible d'atteindre le seuil de -850 mV.

3.5.3.3 Facteurs affectant la validité des critères

Les critères de la protection cathodique peuvent être affectés par de nombreux paramètres environnementaux et structuraux tels que la température, la bactérie, l'influence du courant alternatif (AC) et la qualité du métal de la structure (Peabody, 1976).

A) Température

Pour un acier enterré dans un sol sous une température ambiante allant de 20 à 25 °C, les critères de protection de -850 mV (Cu/CuSO_4) et une polarisation de 100 mV restent valables. Cependant, à une température de 60°C, ces critères ne sont plus jugés satisfaisants et auquel cas le seuil de protection doit être ajusté à -950 mV (Cu/CuSO_4) et le niveau de polarisation de 150 à 250 mV au lieu de 100 mV (Barlo et Berry, 1984).

B) Bactérie Sulfato-réductrice

En présence de la bactérie Sulfato-réductrice à la température ambiante, le critère du potentiel de protection recommandé pour une structure d'acier enterrée passe à -950 mV (Cu/CuSO₄) au lieu de -850 mV et le shift de polarisation doit atteindre le seuil de 200 mV. Cependant, lorsque la température atteint les 60 °C en présence de bactéries, le shift de polarisation doit être ajusté encore une fois de 200 à 300 mV (Barlo et Berry, 1984).

C) Courant alternatif

Les investigations réalisées pour l'évaluation du niveau d'interférence des sources de courant alternatif indésirables ont révélé que l'effet d'interférence est proportionnel à la densité du courant présent à l'interface du métal/ électrolyte. Éventuellement, une densité de courant (δ) de 20 A/m² n'affecte pas les critères de protection alors que pour une densité supérieure de 100A/m², le dommage de corrosion est considérable (NACE, 2007).

D) Type de métal

Chaque métal est défini par son propre potentiel de corrosion. Ainsi, les seuils de protection sont ajustés convenablement à chaque type de métal. Comme montré dans les tableaux ci-dessous (3.3) et (3.4), des ajustements ont été portés sur le seuil de potentiel de protection de certains métaux dans le standard British standard «BS 7361» et Germain standard «DIN 30676».

Tableau 3.3 Critères du seuil de potentiel de protection selon la norme EBS 736
Tiré de NACE (2007)

Material	Potential, CSE Soil and Fresh Water	Potential, Silver- silver Chloride Seawater
Iron and steel Aerobic environment	-850 mV	-800 mV
Iron and Steel Anaerobic environment	-950 mV	-900 mV
Lead	-600 mV	-550 mV
Aluminum	-950 mV	-900 mV
Not to exceed	-1200 mV	-1150 mV
Copper Alloys	-500 to -650 mV	-450 to -600 mV

Tableau 3.4 Critères du seuil de potentiel de protection selon la norme DIN 30676
Tiré de NACE (2007)

Material	Temperature, °C or Electrolyte	Potential V_{CSE}
Unalloyed & low-alloy ferrous materials	Below 40 °C (104 °F)	-850 mV
Same	Greater than 60 °C (140°F)	-950 mV
Same	Anaerobic media	-950 mV
Same	Sandy soil, $\rho > 500 \Omega\text{-m}$	-750 mV
Stainless steels with Cr $\geq 16\%$	Soil or fresh water and less than 40°C	-100 mV
Same	Soil or fresh water and higher than 40°C	-300 mV
Same	Salt water	-300 mV
Copper, Copper-nickel alloys		-200 mV
Lead		-650 mV
Aluminum	Fresh water	-800 mV
Same	Salt water	-900 mV
Steel in contact with concrete		-750 mV
Galvanized steel		-1200 mV

E) Métaux dissimilaires

Lorsque deux structures métalliques dissemblables sont connectées entre elles par un moyen approprié, l'effet de la corrosion galvanique développe un potentiel mixte différent du potentiel individuel de chacun d'elles. Pour cette raison, les critères de protection appliqués précédemment pour l'acier ou la fonte doivent aussi être ajustés.

F) Décollement de revêtement

Lorsque le potentiel de la protection cathodique atteindre le niveau de -1,12 V (Cu/CuSO₄) à l'instant «OFF», l'évolution de l'hydrogène gazeux commence à se produire (U.S. Army Corps of Engineers, 2004). Le gaz généré est généralement pris en otage à l'interface métal/revêtement ce qui provoque le décollement du revêtement (décollement cathodique). Il en résulte que ce phénomène va empêcher le courant de protection d'atteindre la zone de la structure affectée. De même, l'électrolyte entourant la structure métallique peut venir combler le vide créé à l'interface métal/revêtement/métal et ce qui permet d'activer les cellules de corrosion. En conséquence, les critères de protection à ces endroits du décollement deviennent difficiles à obtenir.

3.5.3.4 Type de protection cathodique

La transformation d'une surface métallique corrodée à une surface protégée catholiquement nécessite de ramener le potentiel naturel de celle-ci vers celui de la zone d'immunité. Pour y parvenir, on doit procéder à une installation d'un système de protection par courant continu dans le même électrolyte. La mise en œuvre d'un tel système requiert l'application de l'un des deux types d'anodes suivants :

1. Anodes galvaniques (sacrificielles) ayant un potentiel plus électronégatif que le métal à protéger.
2. Anodes branchées à un générateur électrique assurant la protection par courant imposé.

L'utilisation de l'un ou l'autre type d'anode est souvent justifié par les conditions environnementales (résistivité du sol, température, présence de bactéries, etc.) en plus des critères d'ordre économique tels que la conception de design, les spécifications des équipements et le mode d'installation ainsi que la maintenance et la consommation en matière d'énergie (Nguyen-Thuy, 2008).

A) Protection par anodes sacrificielles

Le principe de protection par anodes sacrificielles est basé sur la connexion d'une anode ou une série d'anodes sacrificielles avec la structure à protéger en présence d'un milieu électrolytique conducteur (sol ou eau) comme le montre la figure 3.6. La structure se polarise négativement jusqu'à ce qu'elle atteint un niveau de potentiel suffisant et uniforme qui assure l'immunité de la surface contre l'activité de corrosion. Le courant généré par les anodes sacrificielles du système de protection est la source du processus de polarisation de la structure métallique.

Au fil des années, l'anode se consomme graduellement selon un principe électrochimique défini par la loi de Faraday qui stipule que la masse consommée d'une matière impliquée dans la réaction d'oxydo-réduction est directement proportionnelle à la quantité du courant délivré. Ainsi, le taux de consommation de l'anode (g/A.ans) dépend de la quantité du courant émis par l'anode, de la taille de l'anode et sa composition chimique ainsi que de la structure à protéger et de l'environnement (C.S.R.P.P.G., 1986). La loi de Faraday est exprimée par la formule suivante :

$$P = (M/nF) * (I_{corr.} * t) \quad (3.6)$$

Où :

P : masse de métal dissous;

M : masse molaire;

n : nombre d'électrons en jeux;

F : le nombre de Faraday;

I_{corr} : courant de corrosion et;
 t : temps de consommation.

La durée de vie d'un système de protection cathodique par anode sacrificielle est limitée par le temps de consommation du matériau composant l'anode et par le courant qu'elle délivre. Toutefois, le blocage électrochimique causé par la passivation de l'anode peut mettre fin au fonctionnement de cette dernière dont la durée usuelle est généralement estimée entre 10 à 15 ans. Cette période est déterminée lors du dimensionnement de design du système de protection qui prend en compte les paramètres de l'expérience (U.S. Army Corps of Engineers, 2004).

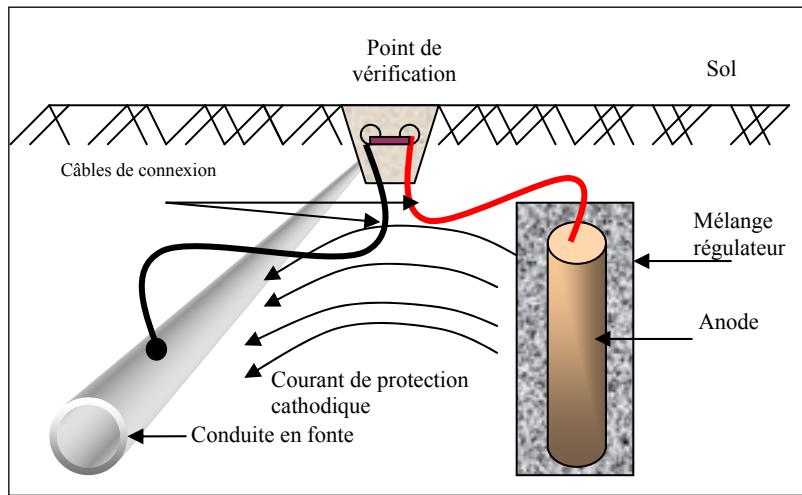


Figure 3.6 Principes de la protection par anodes sacrificielles.

B) Protection par courant imposé

Dans certaines situations de protection, les anodes sacrificielles ne peuvent pas délivrer suffisamment de courant pour une protection idéale. Cette situation est souvent rencontrée dans les cas de longues conduites ayant un grand diamètre et de conduites présentant un problème d'isolation. De même, certaines conditions environnementales peuvent parfois être à l'origine de ce genre de problèmes. Devant des circonstances pareilles, les ingénieurs de design favorisent l'application de la protection par courant imposé.

La protection cathodique par courant imposé d'une structure métallique enterrée dans le sol repose principalement sur l'injection d'un courant continu à l'aide d'un générateur de courant. Comme le montre la figure 3.7, le circuit d'un système de protection cathodique par courant imposé est constitué principalement des éléments suivants :

- Un lit d'anodes ;
- Un générateur de courant;
- Un Conducteur électrolytique (sol ou eau);
- La structure à protéger.

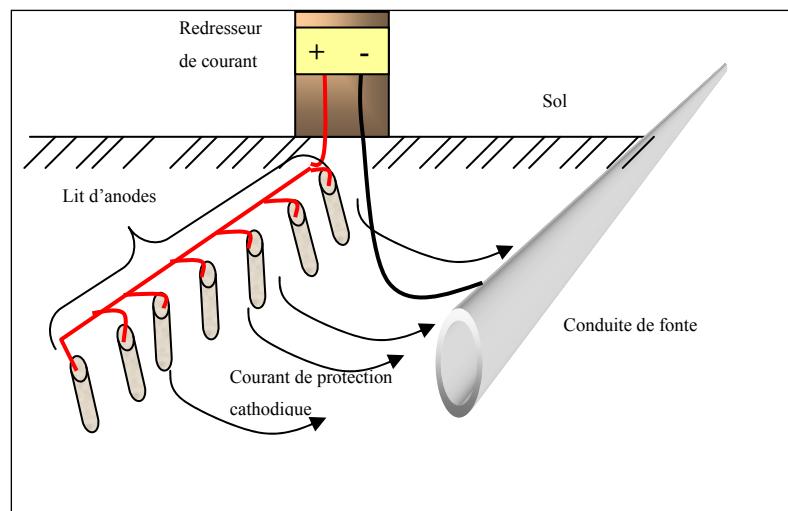


Figure 3.7 Principe de la protection par courant imposé.

3.5.3.5 Avantages et inconvénients des systèmes P.C.

Quoique l'utilisation d'un système de protection cathodique est toujours bénéfique, la sélection du système à adopter demeure généralement assujetti à des conditions environnementales, énergétiques et économiques. À cet égard, une étude comparative doit être établie par l'ingénieur de design afin de mettre en relief les avantages et les inconvénients de chacun des systèmes de protection. À titre d'exemple, le tableau 3.5 donne un aperçu sur les éléments comparatifs en question.

Tableau 3.5 Comparaison des éléments de systèmes P.C
Tiré de Nguyen-Thuy (2008)

	Anode galvanique ou sacrificielle	Système à courant imposé
Complexité de l'installation	Simple	Complexe
Source d'énergie	Non nécessaire	Nécessaire
Distribution du courant sur la structure	Homogène	Souvent hétérogène
Poids de la structure	Importante surcharge en poids pour des longues durées de vie	Peu d'accroissement
Influence de la résistivité du milieu	Non envisageable si la résistivité du milieu est trop grande	Pas de difficulté
Débit par anode	Faible	Élevé
Nombre d'anode	Important	Faible
Facilité d'adapter le courant consommé en fonction de la demande	Adaptation possible à travers une liaison résistante	Adaptation Facile
Risque de surprotection	Pratiquement aucune	Possible
Interférence avec d'autres structures	Non	Possible
Risques humains	Non	Possible (poste de soutirage)
Surveillance	Aisée et occasionnelle	Surveillance fréquente requise par un spécialiste

3.5.3.6 Facteurs affectant la protection cathodique

L'efficacité d'un système de protection cathodique appliquée sur une conduite donnée peut être atténuée par certains facteurs mécaniques, physiques et environnementaux qui se manifestent sous différentes formes (Peabody, 1976) :

- Insuffisance de continuité électrique;
- Perte d'adhérence des revêtements sur la conduite à protéger;
- Influence des structures adjacentes;
- Influence des courants vagabonds (courant continu et courant alternatif).

A) Insuffisance de continuité électrique

L'insuffisance de la continuité électrique dans le système de protection cathodique se manifeste suite à une faible conductibilité électrique de l'électrolyte, soit par la présence d'un revêtement qui inhibe le passage du courant de protection. Ce manque de flux de courant se traduit par une insuffisance au niveau de la polarisation de la structure. Il s'ensuit alors que les critères de protection cathodique ne peuvent pas plus être conclus. Pour éviter que cela ne se produise, il est donc nécessaire d'assurer la continuité électrique en tous points de la structure. Il est à noter que, pour le cas des réseaux d'aqueduc, la présence des joints de raccordement non continus électriquement entre les différents éléments de l'ouvrage forme un blocage de circulation de courant. Ce fait oblige le courant de s'échapper de la conduite pour aller suivre d'autres chemins moins résistants ce qui crée des zones chaudes au niveau la structure (points de corrosion).

B) Perte d'adhérence des revêtements

L'apparition du phénomène de décollement des revêtements provoqué par un excès de protection cathodique exige aux utilisateurs de ce système de respecter le seuil de potentiel d'évolution du gaz d'hydrogène une fois que le système est opérationnel. L'application d'une telle spécification permet d'éviter le décollement du revêtement et la dépolarisatoin rapide de la structure.

C) Influence des structures adjacentes

La présence voisine des structures métalliques dans un électrolyte conducteur peut induire des interférences électriques défavorables sur la structure. Le courant électrique délivré par les anodes de protection a tendance à s'échapper de la source pour embarquer sur une structure adjacente non protégée et ce avant de rejoindre la structure à protéger. De ce fait, les critères de protection cathodique peuvent être affectés et les points de sortie du courant de protection créées sur la structure voisine sont exposés à la corrosion.

D) Influence des courants vagabonds

Les courants vagabonds se définissent comme étant des courants qui abandonnent leurs sources d'origine pour aller circuler dans le sol et chercher par la suite le parcours qui leur offre le minimum de résistance. Ces courants électriques qui empruntent le chemin métallique le plus proche à rencontrer. Le comportement de ce type de courant est généralement variable en terme d'intensité, de direction et de trajet. Ils affectent souvent le système de protection cathodique de la structure et conduisent à la formation des cellules de corrosion aux points de sorties.

Les courants vagabonds proviennent souvent des installations nourries aussi bien en courant continu qu'en courant alternatif. En courant continu, ces courants s'émanent d'installations mal isolées par rapport au sol comme les voies ferrées électrifiées. En courant alternatif, les structures métalliques sont susceptibles de recevoir des interférences au voisinage des lignes de haute tension où l'excès de courant injecté dans les structures produit sous l'effet inductif et capacitif perturbe les critères de la protection cathodique. Ainsi, l'emplacement des lignes de transmission de courant alternatif devrait être souligné lors de la conception des systèmes de protection cathodique.

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE

4.1 Approche

L'approche méthodologique consiste à établir un diagnostic global basé sur le prélèvement des mesures caractérisant l'état de corrosivité des sols et l'activité de corrosion sur les conduites d'aqueduc de l'ensemble de la Ville. L'étude inclut également l'application d'un programme d'évaluation des sections d'aqueduc présentant déjà une protection cathodique. L'approche proposée permet ainsi de déterminer l'état de performance du réseau et d'établir un plan d'intervention de priorisation.

L'atteinte de ces objectifs visés dans cette étude nécessite une bonne compréhension des aspects phénoménologiques qui interviennent dans le processus de la dégradation du réseau d'aqueduc. Il est donc essentiel d'établir un plan d'approche méthodologique convenable aux procédures techniques impliquées afin de mieux répondre aux exigences et objectifs.

La méthodologie considérée fait appel à des techniques d'investigation directes appliquées sur le terrain. Ces dernières consistent à évaluer l'état de corrosivité du sol entourant les conduites métalliques et établir l'état de performance du système de protection cathodique déjà mise en place. Concernant les informations répertoriées par les services de la Ville, ces dernières font l'objet d'analyse dans le but d'établir des corrélations entre les différents paramètres existants et interreliés tels que l'âge de conduite, les bris et les degrés de corrosivité des sols déterminés.

Relativement aux résultats obtenus, la phase finale consiste à réaliser des excavations exploratoires aux emplacements jugés à risque afin de pouvoir évaluer l'activité de la corrosion à l'aide des techniques d'inspections directes. De même, des prélèvements d'échantillons de sol sont également effectués et analysés au laboratoire LVM TECHNISOL à Laval pour faire ressortir les paramètres liés à l'agressivité du sol.

4.2 Plan de travail

Afin d'élaborer un diagnostic efficace et riche en informations, le plan du présent travail comporte quatre volets à savoir l'évaluation de la corrosivité du sol, l'analyse de l'historique des bris d'aqueduc, l'évaluation du potentiel des conduites d'aqueduc et de l'activité de corrosion.

4.2.1 Mesure de la résistivité du sol

Le phénomène de corrosion des conduites métalliques ne peut avoir lieu que si l'électrolyte entourant la conduite a la capacité de les corroder. Un électrolyte, soit l'eau ou le sol, favorise souvent la corrosion des métaux. Cependant, certains types de sols ont la capacité de mieux véhiculer le courant de corrosion que d'autres et génèrent donc une corrosion plus importante. Ainsi, la résistivité du sol fait partie des principaux paramètres qui peuvent être mis en jeu dans le processus de corrosion des conduites d'aqueduc. Dans le cas présent, le travail consiste à évaluer le niveau de corrosivité du sol entourant les conduites en fonte de chacun des arrondissements de la Ville située dans la grande région de Montréal. Il s'agit donc des arrondissements surnommés AR-A, AR-B, AR-C, AR-D, AR-E, AR-F et l'arrondissement AR-G.

La technique préconisée pour la détermination in-situ de la résistivité consiste en une méthode non destructive qui repose sur l'application de la méthode de Wenner dite la méthode des quatre piquets qui est régie par la norme ASTM G 57 « Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using Wenner Four Electrode Method ». Le schéma de principe de la technique de mesure de la résistivité du sol est déjà présenté dans la figure (3.4) du chapitre trois. L'essai consiste à injecter un faible courant entre les deux piquets extérieurs et à mesurer le voltage produit entre les deux piquets intérieurs pour enfin obtenir la résistance du sol. Le résistance-mètre utilisé dans cette opération permet l'injection du courant, la mesure du voltage et celle de la résistance.

Il est à noter que la résistance mesurée exprime la résistance moyenne du sol au voisinage des piquets sur une profondeur équivalente à l'écartement entre ces derniers. Cependant, la résistivité moyenne du sol (ρ) peut être obtenue en interprétant la résistance moyenne du sol par le biais de la formule (3.1) présentée au chapitre trois.

L'analyse des mesures de résistivité du sol et l'évaluation de son degré de corrosivité permet de cibler les territoires corrosifs envers les conduites en fonte. Les résultats obtenus constituent ainsi un élément clé dans l'évaluation globale de l'état des sections de conduites et dans l'établissement de la susceptibilité à la corrosion des différentes zones de la Ville.

4.2.1.1 Profondeurs de prélèvement

D'après les expériences d'intervention réalisées dans le cadre de la réhabilitation du réseau, les profondeurs de pose des conduites d'aqueduc obtenues par les moyens de détection varient de 1 à 2 m du niveau de sol.

Effectués parallèlement à la conduite, les prélèvements de résistivité sur la profondeur de deux mètres (2m) permettent l'identification du caractère corrosif du sol entourant la conduite alors que ceux correspondant à 1 mètre (1m) de profondeur consistent à caractériser le sol situé entre la surface et la conduite. Une faible résistivité du sol situé au-dessus de la conduite renseigne sur une forte présence de sel de déglaçage ce qui permet de prévoir un risque supplémentaire vis-à-vis de la corrosion à moyen terme.

Quant aux prélèvements perpendiculaires à la conduite, les mesures de la résistivité à une profondeur de un mètre (1m) sont effectuées pour établir une analyse comparative avec les mesures parallèles. La particularité de ces mesures permet d'identifier la présence des objets indésirables dans le sol tels que les câbles souterrains, conduites de gaz, etc. Notons qu'une variation importante de résistivité entre les mesures parallèles et perpendiculaires à la conduite est considérée comme un indice de présence d'un objet gêneur.

Au total, trois (3) mesures de résistivité du sol ont été obtenues pour fins de sélection. Le tableau 4.1 récapitule les trois profondeurs de mesure avec l'objectif assigné à chacune d'elles. Ces mesures sont exploitées dans le cadre du processus d'évaluation de l'agressivité du sol des sites étudiés.

Tableau 4.1 Mesures de la résistivité par site

N° Mesure	Position de mesure	Profondeur (mètre)	Objectif
1	Parallèle à la conduite	2 m	Déterminer le caractère du sol entourant la conduite
2	Parallèle à la conduite	1 m	Déterminer le caractère du sol au-dessus de la conduite
3	Perpendiculaire à la conduite	1 m	Vérifier qu'aucun objet métallique n'est présent sous le site d'essai

4.2.1.2 Sélection des régions

Les régions sont sélectionnées sur la base d'une cartographie établie par la Ville qui représente la totalité des conduites d'aqueduc réparties sur le territoire. Cette cartographie montre la position et la nature de toutes les conduites d'aqueduc, ce qui nous donne la possibilité de localiser les points de mesure de la résistivité au niveau des conduites en fonte.

4.2.1.3 Répartition des mesures par arrondissement

Les prélèvements de la résistivité sont établis de manière à recouvrir les secteurs où les conduites d'aqueduc sont concentrées à travers le territoire de chaque arrondissement à l'exception des arrondissements AR-G et AR-B. Pour l'arrondissement AR-G, les mesures réalisées par la Ville ont été récupérées et complétées par d'autres mesures supplémentaires couvrant la superficie manquante. Concernant l'arrondissement AR-B, certaines conduites en fonte qui n'étaient pas protégées cathodiquement ont nécessité des mesures de résistivité afin de déterminer l'état d'activité de la corrosion.

4.2.2 Analyse de l'historique des bris

Cette phase de travail consiste à collecter les données associées à l'historique des sections de conduite d'aqueduc du territoire de la Ville. Le traitement et l'analyse de ces données nous permettent dans un premier temps d'établir un plan d'intervention précis qui vise l'identification de la position des points de mesure de la résistivité du sol. Ces données servent par la suite à établir des corrélations entre la vitesse de corrosion et l'ensemble des éléments pertinents tels que l'âge des conduites, l'agressivité du sol, la concentration en ions chlorures et le pH.

4.2.2.1 Spécificité des bris

L'historique des bris recueilli par la Ville permet de faire ressortir certaines constatations importantes qui doivent être signalées. Il est à noter que les données récupérées contiennent toute l'information relative aux bris survenus au niveau de chaque arrondissement. Par ailleurs, comme chaque arrondissement a son système de gestion de données, la précision de ces dernières peut varier d'un arrondissement à un autre. Ainsi, la quantité énorme des données impliquées rend leur exploitation difficile.

On tient encore à souligner que les bris répertoriés n'indiquent pas toujours le type de conduite. Devant cette situation, on a supposé en premier temps que tous les bris étaient localisés sur les conduites en fonte. Il est aussi important de mentionner quelques effets qui peuvent influencer l'interprétation des résultats à savoir:

- Les bris ne sont pas nécessairement dus à la corrosion puisque plusieurs facteurs peuvent aussi y intervenir tels que, la température, la pression interne, les charges cycliques, la retenue de la poussée, les charges de terre, etc.
- Les bris apparus ne sont pas tous répertoriés en l'espace d'une année. Bien entendu, la validité des données s'en trouve altérée.

4.2.3 Relevé de potentiel à espace rapproché

Suite à l'interprétation des résultats de mesures de la résistivité, des sites pertinents du réseau d'aqueduc de fonte sont visés pour faire l'objet d'un relevé de potentiel à espace rapproché permettant d'évaluer l'activité de corrosion sur les sections de conduite. Les sites visés représentent une proportion estimée à 2% de l'ensemble du réseau.

Les relevés de potentiel réalisés sur les sections de conduite des arrondissements AR-A, AR-G, AR-F, AR-C, AR-D et AR-E ont pour but d'évaluer le potentiel de corrosion des conduites et servir de base de travail pour une future campagne de protection cathodique du réseau d'aqueduc.

4.2.3.1 Principe de mesure du potentiel

La technique du relevé de potentiel à espace rapproché consiste à réaliser des mesures de potentiel à partir de la surface du sol en suivant le parcours de la conduite enfouie avec un pas régulier. Les mesures de potentiel sont obtenues au moyen d'une électrode de référence (Cu/CuSO_4) déposée sur le sol et reliée à une borne d'un appareil d'acquisition de données spécialement conçu à cet effet. L'autre borne de l'appareil est reliée à la conduite d'aqueduc par l'intermédiaire d'un fil de connexion. Le relevé de potentiel est alors réalisé en déplaçant l'électrode le long de la conduite avec un pas de 5 mètres à l'exception de l'arrondissement AR-G pour lequel un pas de 10 m a été considéré.

Pour chacun des arrondissements, le choix des conduites pour lesquelles les relevés de potentiels ont été effectués a été fait en fonction de leur âge et de la résistivité du sol. Ce choix tient également compte de l'ensemble des groupes d'âge présents sur tout le territoire de la Ville. La lecture des potentiels a été effectuée sur une longueur totale de 19,4 km de conduites d'aqueduc réparties sur les différents arrondissements comme le montre le tableau 4.2.

Tableau 4.2 Longueur totale des conduites expertisées

Arrondissement	Longueur de conduite expertisée (m)
AR-A	3050
AR-C	2255
AR-D	2730
AR-E	2455
AR-F	5060
AR-G	3890
Total	19440

4.2.3.2 Évaluation de la performance de la protection cathodique

Cette partie de l'intervention porte particulièrement sur les sections de conduite du réseau d'aqueduc de l'arrondissement AR-B possédant déjà un système de protection cathodique par anodes sacrificielles. Les travaux de protection cathodique ont été réalisés par diverses compagnies spécialisées sur une durée de cinq années, débutant en 1994 et se poursuivant en 1997, 1998, 1999 et 2000. Depuis lors, il semble que peu ou aucun suivi n'a été effectué concernant la maintenance de ce système.

Les anodes de magnésium destinées à la protection des conduites de l'arrondissement AR-B sont implantées dans le sol et reliées à la conduite au moyen des points de vérification (PV). Ces derniers permettent d'acheminer le câble de l'anode non pas directement à la conduite mais plutôt au boîtier dans lequel se trouvent un ou plusieurs câbles électriques soudés à la conduite. Pour que le système de protection cathodique soit opérationnel, il est indispensable que le câble d'anode « câble positif » soit relié au câble de la conduite que l'on désigne par «câble négatif» à l'aide d'une barrette en cuivre amovible installée dans le boitier au niveau du point de vérification (P.V) comme le montre la figure 3.6 (chapitre 3). La présence de points de vérification est essentielle pour évaluer le bon fonctionnement de la protection cathodique. Toutefois, ces points ne représentent que l'état de la protection à l'endroit où ces derniers sont implantés.

Les travaux d'investigation établis consistent en premier lieu à évaluer la fonctionnalité de la protection aux points de vérification existants (PV) et, en deuxième lieu, à établir des relevés de potentiel à espace rapproché visant l'évaluation de l'efficacité de la protection sur des sections de conduites ciblées suite aux résultats de mesures du potentiel des prises de vérification et à l'année d'installation du système de protection.

La procédure d'évaluation de l'efficacité du système de protection cathodique installé est basée sur l'application de critères de protection définis par la norme SP0169 de la NACE « National Association of Corrosion Engineer ».

4.2.4 Évaluation de l'activité de corrosion

Cette partie de l'étude consiste à réaliser des excavations exploratoires afin d'évaluer l'état d'activité de corrosion sur les sections de conduites jugées à risque du réseau d'aqueduc. Les inspections n'ont nécessité aucun prélèvement ni aucune altération pouvant nuire à l'état actuel de la conduite. De plus, les travaux ont été réalisés de manière à remettre le site dans son état initial une fois que les inspections sont terminées.

4.2.4.1 Choix des sites d'excavation

Les lieux des excavations exploratoires sont localisés en fonction de trois principaux paramètres à savoir :

- La résistivité du sol ;
- La date d'installation des conduites;
- La concentration des bris.

Au total, six (6) sites d'excavation ont été retenus au niveau de quatre arrondissements différents, soit AR-A, AR-G, AR-F et AR-D, tels que présentés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 Sites d'excavation

N ° site	Arrondissement	Localisation	Année d'installation
1	AR-A	AR-A X1	1965
2	AR-G	AR-G X1	1983
3	AR-G	AR-GX2	1957
4	AR-F	AR-F X1	1973
5	AR-F	AR-F X2	1972
6	AR-D	AR-D X1	1964

Les travaux impliqués au niveau des sites excavés comportent le prélèvement et l'analyse des échantillons de sol ainsi que l'établissement d'une inspection approfondie sur la surface de la conduite.

4.2.4.2 Analyse des échantillons de sol

Pour chaque site excavé, il a été procédé au prélèvement de deux échantillons de sol, soit l'un à la mi-profondeur entre la surface et la conduite et l'autre, au voisinage de la conduite. Les échantillons vont être mis en place dans des sacs étanches pour éviter toute modification de leurs caractéristiques avant d'être acheminés au laboratoire afin d'y être analysés. L'analyse inclut l'agressivité du sol et le taux en ions chlorure.

A) Analyse de l'agressivité du sol

Cette analyse détermine le taux d'agressivité du sol désigné par T.A.S. Pour ce faire, la procédure nécessite préalablement la détermination de la résistivité du sol, le pH, les Sulfures; le potentiel d'oxydoréduction (Redox) et l'humidité. Pour chacun des paramètres, il est possible d'y affecter un pointage relatif à sa sévérité. Le cumulatif des points pour un échantillon reflète le taux d'agressivité du sol (T.A.S.). En se basant sur la norme AWWA C-105, les résultats du T.A.S. sont classés en trois catégories :

- 0 à 5 : peu agressif;
- 5 à 10 : moyennement agressif;
- >10 : agressif.

B) Analyse du taux de chlorures

Cette analyse permet de détecter, entre autres, la contamination du sol entourant les conduites par les sels de déglaçage. Une comparaison de la concentration en ions chlorure de deux échantillons provenant d'un même site, soit celui prélevé à la mi-profondeur de la conduite et celui près de la conduite, permet d'évaluer le degré de la contamination en fonction de la profondeur. La technique d'analyse est effectuée en référence à la norme California test 422 qui stipule que le sol ne devrait pas contenir une concentration en ions chlorures supérieure à 100 ppm (Departement of Transportation, 2000).

4.2.4.3 Inspection de la conduite

L'inspection d'une section de conduite déblayée consiste à évaluer le degré de défaillance et de déterminer l'état de performance de la conduite. La démarche d'inspection est structurée en quatre phases à savoir:

- L'inspection visuelle générale de la conduite;
- Évaluation du phénomène de graphitisation;
- La détermination de l'épaisseur résiduelle de la paroi;
- Profondeur des piqûres.

A) Inspection visuelle

L'inspection visuelle consiste principalement à mettre en évidence certaines particularités relatives à l'apparence de la conduite. Pour cette fin, il est important de disposer d'un appareil photo pour photographier la section de la conduite excavée de manière à illustrer l'état de sa surface.

B) Évaluation du phénomène de graphitisation

Les poches de graphitisation créées sur une surface extérieure d'une conduite de fonte peuvent être détectées en martelant la paroi externe et en utilisant une brosse pour enlever les résidus de carbone. La localisation des endroits de la graphitisation devient possible une fois que les débris de carbone sont retirés. En effet, la graphitisation est une conséquence engendrée par la corrosion dont l'étendue est évaluée par les techniques d'inspection.

C) Détermination de l'épaisseur résiduelle de la paroi

La technique d'évaluation de l'épaisseur résiduelle des parois des conduites de fonte consiste à utiliser un mesureur d'épaisseurs par ultrasons (ASTM E797-95, 1998). En référence à la norme, des mesures longitudinales sont effectuées à différentes zones réparties sur les quatre quadrants de chacune des conduites.

Le principe de la méthode repose sur l'émission d'une onde ultrasonore par un palpeur spécialement conçu pour ce genre de mesure. L'onde émise par le palpeur traverse la paroi métallique de la conduite dans un temps dépendant la vitesse de propagation du signal à travers le métal. Le signal émis est ensuite renvoyé à partir de la limite de l'épaisseur de la paroi. La mesure affichée sur l'écran de l'appareil indique l'épaisseur résiduelle de la conduite qui est obtenue par l'application de la formule suivante :

$$K = \text{Vitesse de diffusion} \times \text{Temps de réflexion} \quad (4.1)$$

Où :

K : épaisseur de la paroi (mm);

V : vitesse de diffusion (m/s);

T : temps de réflexion (s).

Dans le cas présent, les conduites d'aqueduc inspectées sont fabriquées en fonte. Selon le manuel de l'appareil, la vitesse de propagation à utiliser est donc de 4500 m/s (Stresstel ultrasonic testing equipment, 1998). En effet, les mesures d'épaisseur résiduelle des sections de conduites déblayées ont été effectuées en suivant les étapes ci-dessous :

- Nettoyage de l'endroit de prise de mesure par une brosse métallique.
- L'application de l'écho gel pour assurer la continuité entre la surface du palpeur et celle de la conduite.
- Prise de lectures.

Il est à souligner que la valeur de la vitesse de propagation (4500 m/s) est appliquée pour l'ensemble des conduites expertisées.

D) Profondeur des piqûres

Un nettoyage soigné de la conduite aux endroits de la section dégagée permet à l'inspecteur de pouvoir révéler la présence de piqûres. Ainsi, les épaisseurs résultant de ces endroits localisés sont amincies par rapport à l'épaisseur moyenne de la conduite. La profondeur des piqûres est identifiée et mesurée afin de statuer sur l'ampleur du phénomène de la corrosion localisée.

À la fin de cette étude, une conclusion générale basée sur les résultats obtenus du diagnostic est présentée. Des recommandations sont également proposées pour mieux gérer le réseau, garder une mise à jour des données du système et établir un plan préventif par priorisation.

CHAPITRE 5

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

5.1 Résistivité du sol

5.1.1 Constitution d'une base de données

Les mesures de résistivité du sol qui ont été réalisées sur des sections de 1 m et de 2 m de profondeur ont permis d'établir une distribution statistique pour chacun des sept arrondissements étudiés. Cette distribution est présentée sous forme de graphiques sur les figures 5.1 à 5.7 ci-après.

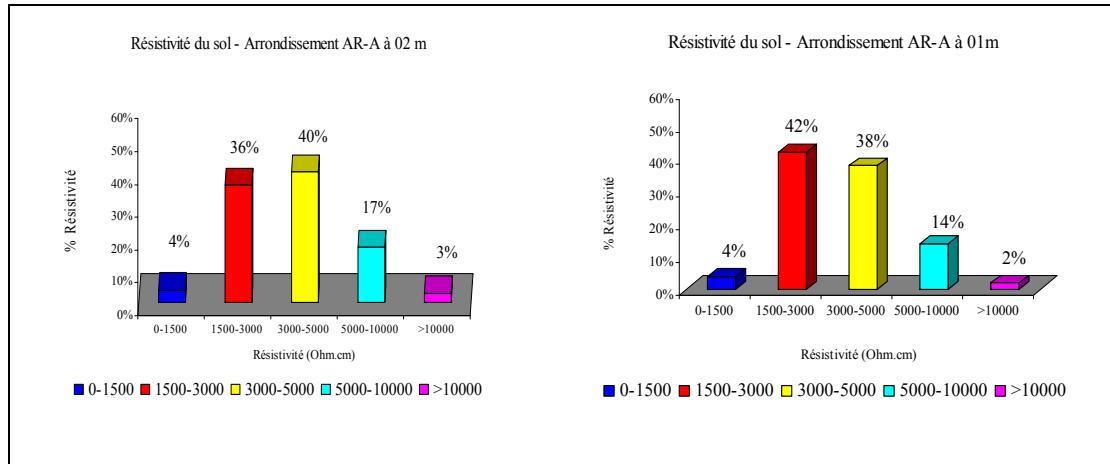


Figure 5.1 Distribution statistique de la résistivité du sol- Arrondissement AR-A.

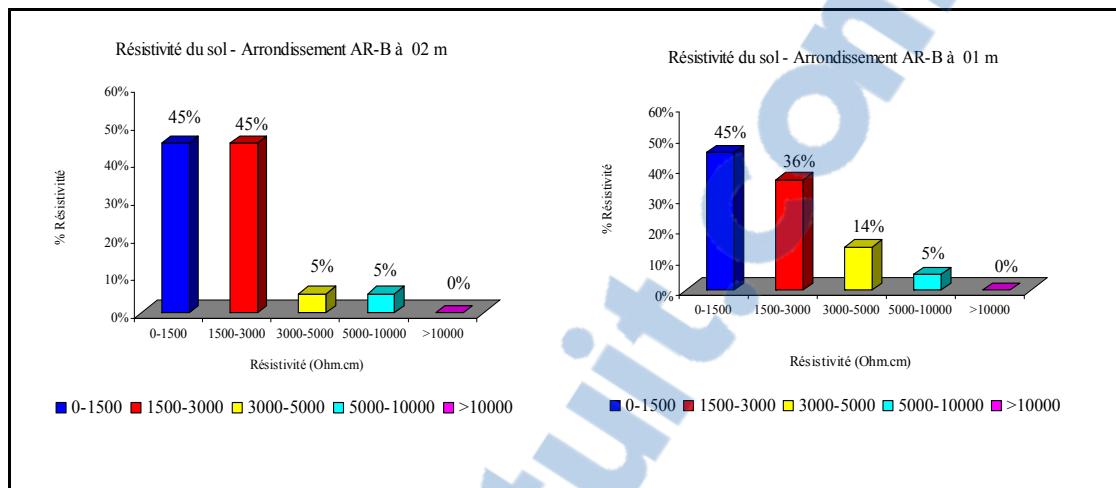


Figure 5.2 Distribution statistique de la résistivité du sol- Arrondissement AR-B.

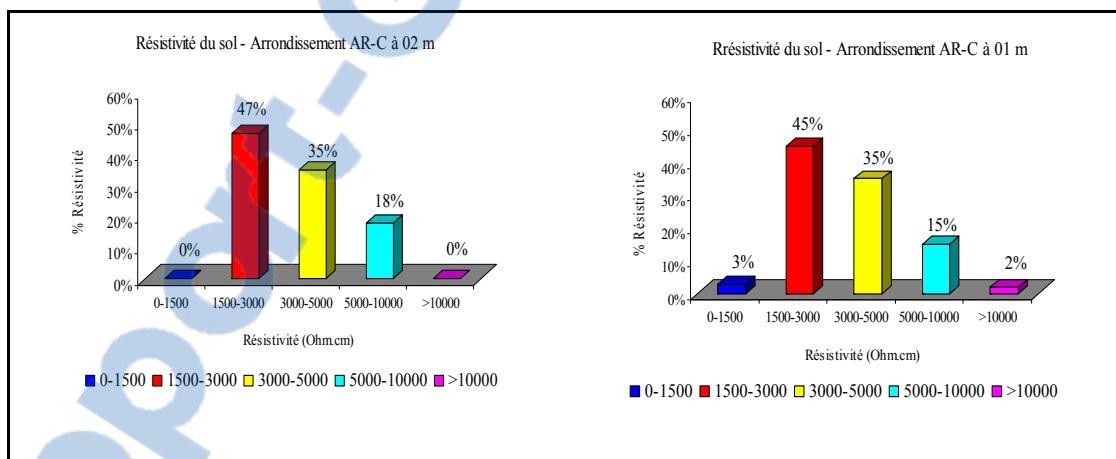


Figure 5.3 Distribution statistique de la résistivité du sol- Arrondissement AR-C.

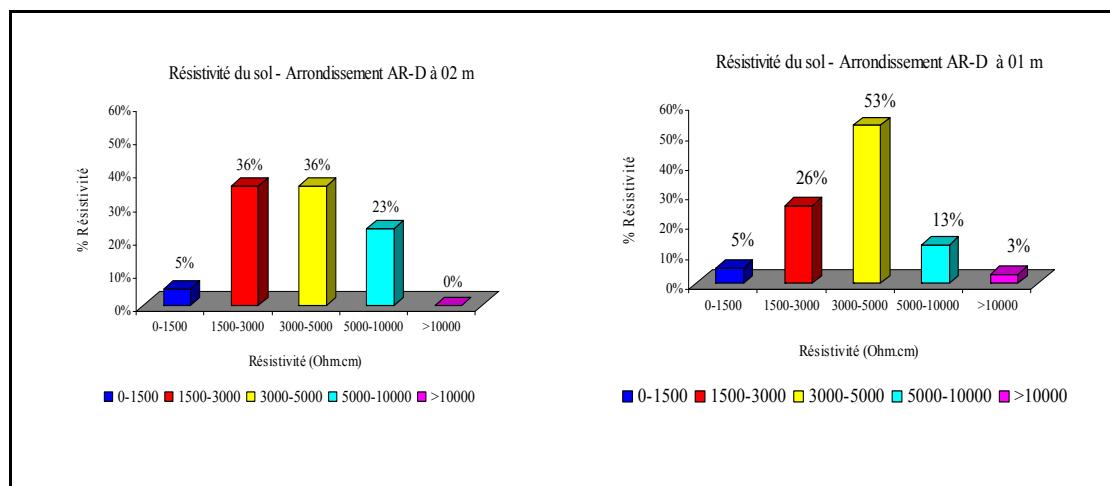


Figure 5.4 Distribution statistique de la résistivité du sol- Arrondissement AR-D.

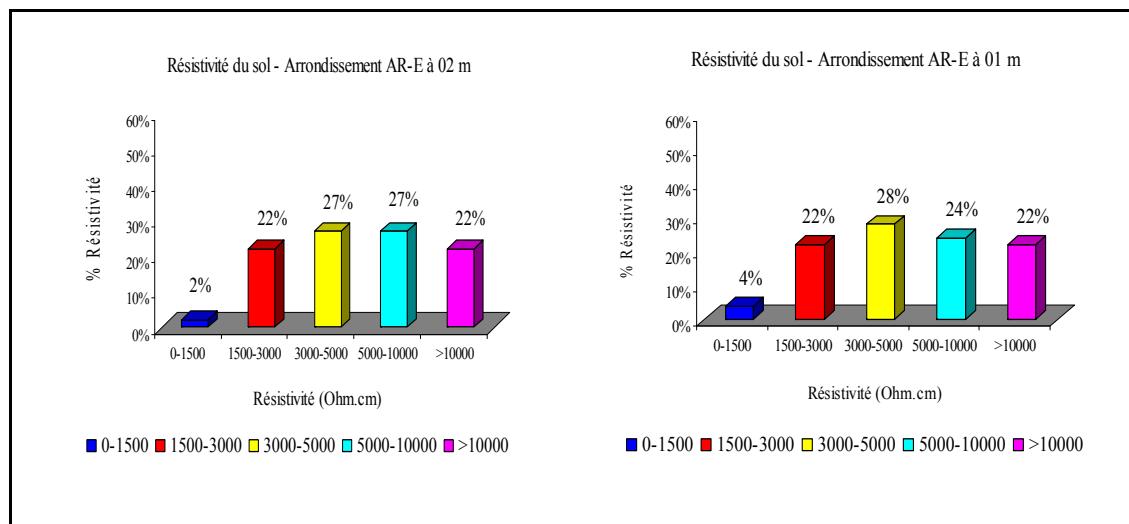


Figure 5.5 Distribution statistique de la résistivité du sol- Arrondissement AR-E.

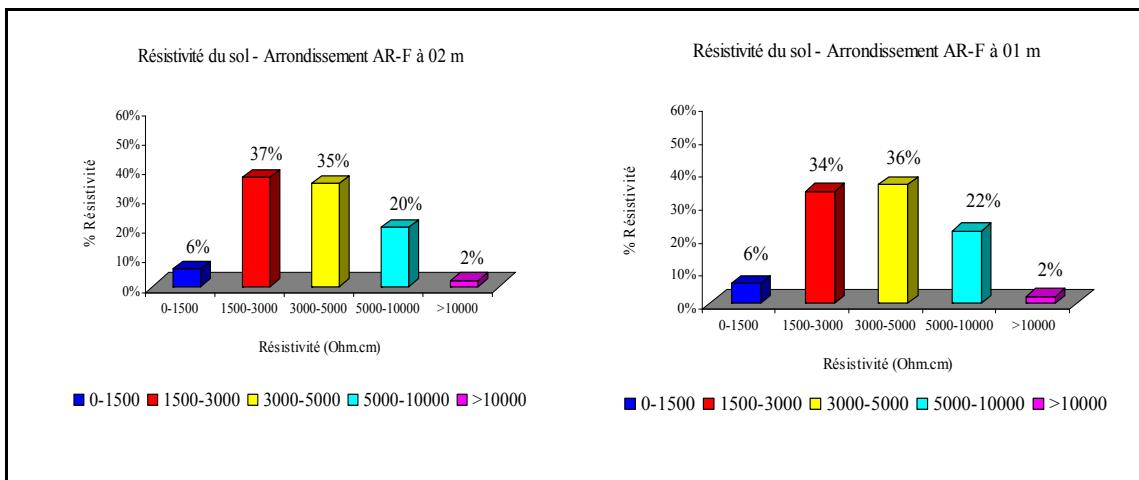


Figure 5.6 Distribution statistique de la résistivité du sol- Arrondissement AR-F.

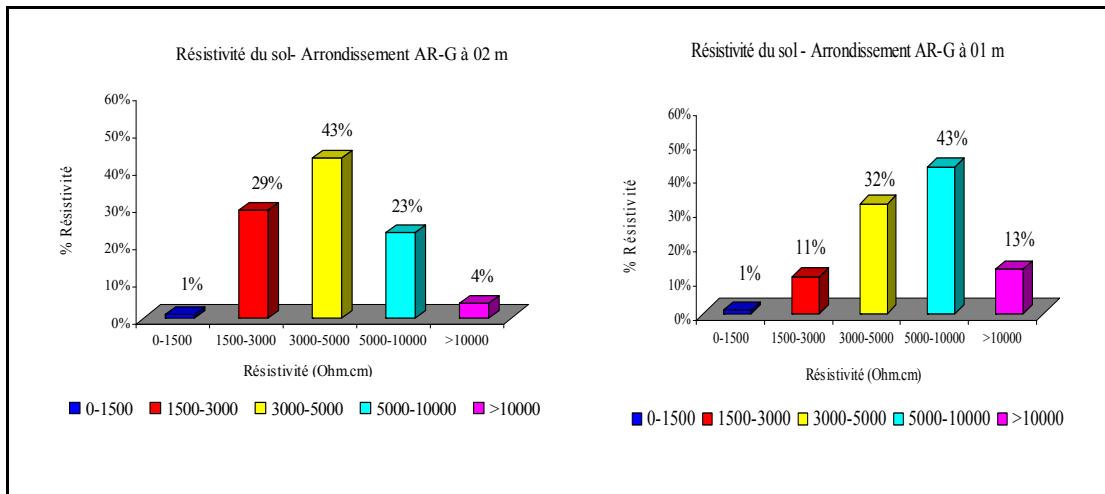


Figure 5.7 Distribution statistique de la résistivité du sol- Arrondissement AR-G.

5.1.2 Analyse et discussion

Selon les plages définissant la sévérité du sol, voir tableau 3.1, les valeurs de résistivité relevées autour des conduites des arrondissements AR-A, AR-F, AR-C et AR-D démontrent globalement que l'agressivité du sol s'étend d'un niveau corrosif à moyennement corrosif.

Cependant, la résistivité relevée dans l'arrondissement AR-G renseigne sur un sol de comportement variant de moyennement à faiblement agressif. Par ailleurs, l'arrondissement AR-E est le seul arrondissement à renfermer une proportion importante des sols peu corrosif, faiblement corrosif et moyennement corrosif. Concernant l'arrondissement AR-B, ce dernier présente le sol le plus corrosif pour les conduites d'aqueduc pour la majorité des points de mesure.

5.1.2.1 Validation des mesures de résistivité du sol

La validation des mesures de résistivité consiste à comparer les valeurs acquises au niveau horizontal et perpendiculaire à 1 m de profondeur du sol. Pour ce faire, une superposition graphique est établie comme le montre le graphique ci-après (Figure 5.8). Cette comparaison permet de s'assurer qu'aucune structure métallique enfouie n'a interféré sur les lectures de résistivité.

L'allure du graphique montre une très grande harmonie entre les deux relevés. En effet, aucune variation importante n'est observée entre les deux types de mesures au niveau des sept arrondissements explorés. De ce fait, les lectures de résistivité sont considérées valides et représentatives de l'état du sol.

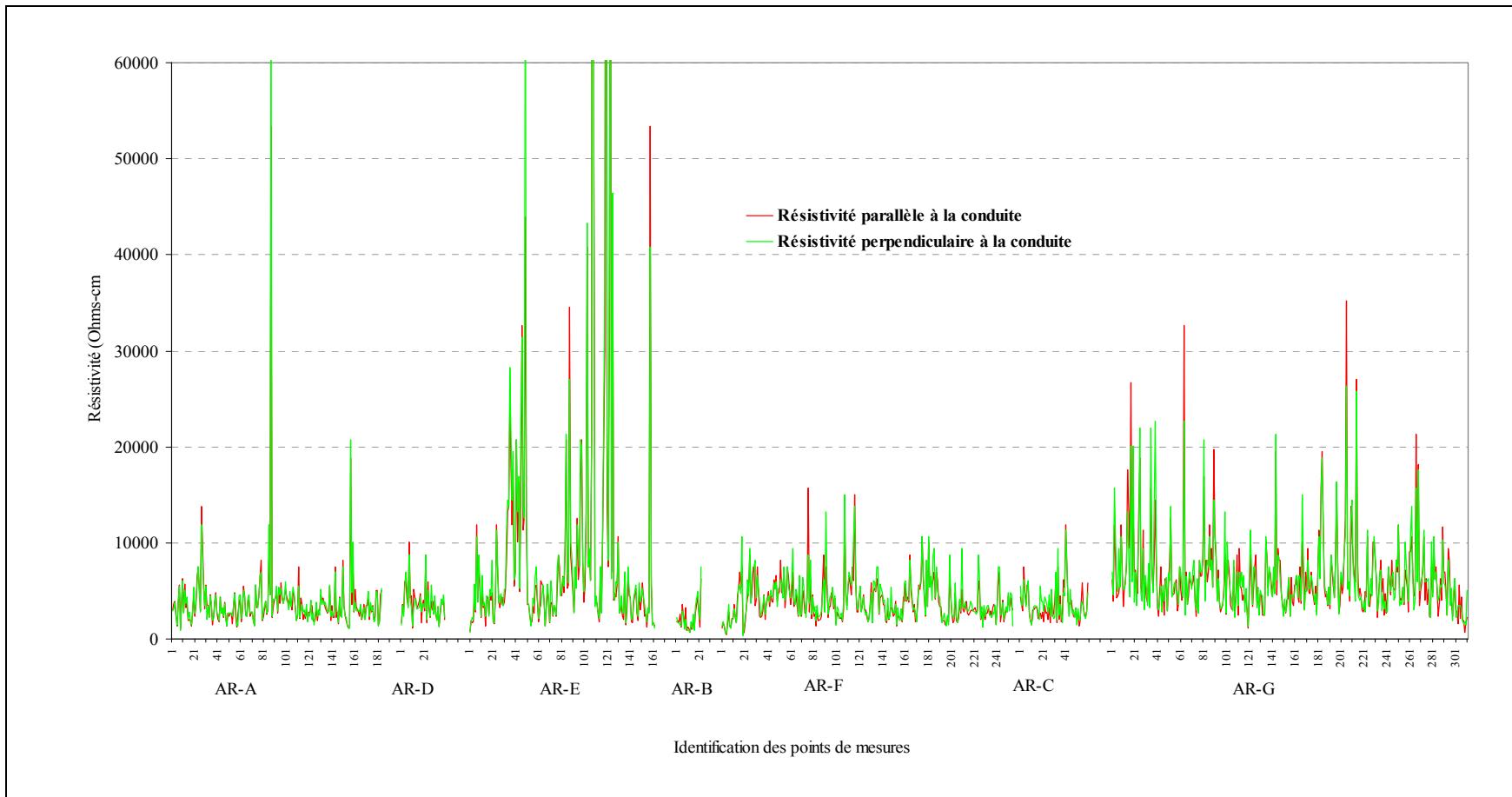


Figure 5.8 Mesure de la résistivité du sol parallèlement et perpendiculairement à la conduite à 1 m de profondeur.

5.1.2.2 Homogénéité du sol

Pour s'assurer que le sol se trouvant au-dessus des conduites ne soit pas plus corrosif que celui entourant les entourant, il est nécessaire de comparer les relevés de résistivité pris en parallèle à la conduite à 2 et à 1 m de profondeur. Dans cette perspective, les valeurs des distributions statistiques obtenues en fonction des profondeurs de 1m et 2m (Figure 5.1 à 5.7) restent exploitables.

Dans la majorité des cas, les arrondissements AR-F, AR-C, AR-E et AR-A présentent des niveaux de résistivité très similaires pour les deux profondeurs examinées. La corrosivité du sol peut donc être caractérisée comme étant homogène pour ces arrondissements. En ce qui concerne les autres arrondissements, soit AR-G, AR-D et AR-B, il apparaît que la résistivité relative à la profondeur de 1 mètre est légèrement supérieure à celle mesurée à 2 mètres. On peut donc confirmer que le sol au niveau de la conduite semble être plus agressif que celui du dessus.

Ainsi, les constatations tirées de cette comparaison permettent de valider le fait que la corrosivité du sol autour des conduites ne peut pas être attribuée à la présence des sels de déglaçage mais plutôt à la nature du sol environnant le réseau d'aqueduc.

5.1.2.3 Comparaison des niveaux de corrosivité du sol

Dans le but d'établir un ordre comparatif des niveaux d'agressivité des différents sols des arrondissements, on a procédé à la détermination des valeurs moyennes de résistivité prises à 1 mètre et à 2 mètres de profondeur pour avoir la répartition statistique de cette caractéristique comme l'illustre les figures 5.9 et 5.10.

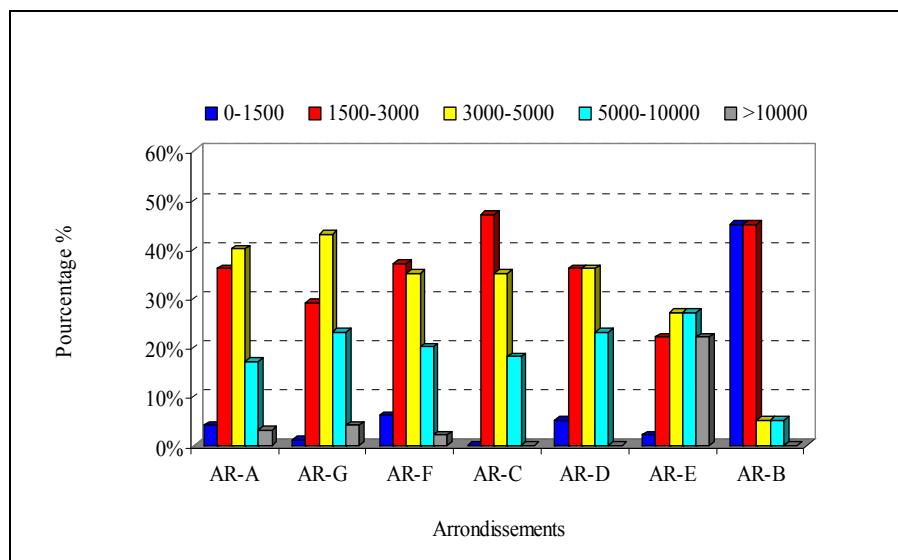


Figure 5.9 Distribution statistique de la résistivité du sol à 2 m pour les différents arrondissements.

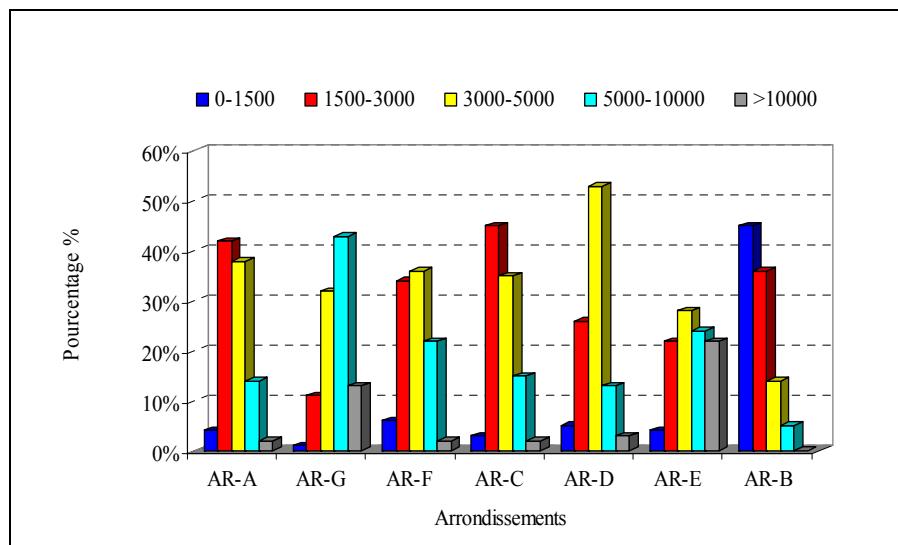


Figure 5.10 Distribution statistique de la résistivité du sol à 1 m pour les différents arrondissements.

Il en ressort que la quasi-totalité des valeurs moyennes de résistivité se concentrent dans les fourchettes (1500-3000 Ohm.cm) et (3000-5000 Ohm.cm) qualifiant les sols de corrosifs et moyennement corrosifs respectivement. Il est constaté également que l'arrondissement AR-B possède la plus grande proportion de sol ayant le plus faible niveau de résistivité, soit de 0 à 1500 Ohm.cm.

La corrosivité élevé à travers l'étendue de cet arrondissement vient appuyer les raisons de la mise en place de la protection cathodique existante. La gamme des basses résistivités (1500–5000 Ohm.cm) est recensée majoritairement dans les arrondissements AR-C, AR-F, AR-D et AR-A et ce pour les deux niveaux de profondeur (1m et 2m).

Concernant l'arrondissement AR-E, sa grande étendue de surface a une résistivité moyenne supérieure à 5000 Ohm.cm, soit une résistivité correspondant à un sol faiblement corrosif. Quant au sol de l'arrondissement AR-G, ce dernier peut être considéré comme étant moins corrosif que celui des autres arrondissements.

5.1.2.4 Comparaison des niveaux de résistivité du sol

Les valeurs de résistivité minimale, maximale et moyenne du sol déterminées pour les profondeurs de 2 et 1m pour chacun des arrondissements ont été exploitées et présentées sous forme de graphiques afin de pouvoir comparer le niveau de résistivité du sol des arrondissements. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 5.11 et 5.12, pour les profondeurs de 2 et 1 m respectivement.

Les résultats des graphiques ci-dessous, démontrent que les valeurs de résistivité moyenne indiquent en général un sol moyennement corrosif, c'est-à-dire avec une résistivité comprise entre 3000 et 5000 Ohm.cm, et ce pour les deux profondeurs de sol considérées à l'exception l'arrondissement AR-E dont, la résistivité du sol moyenne est supérieure à 5000 Ohm.cm (Sol faiblement corrosif).

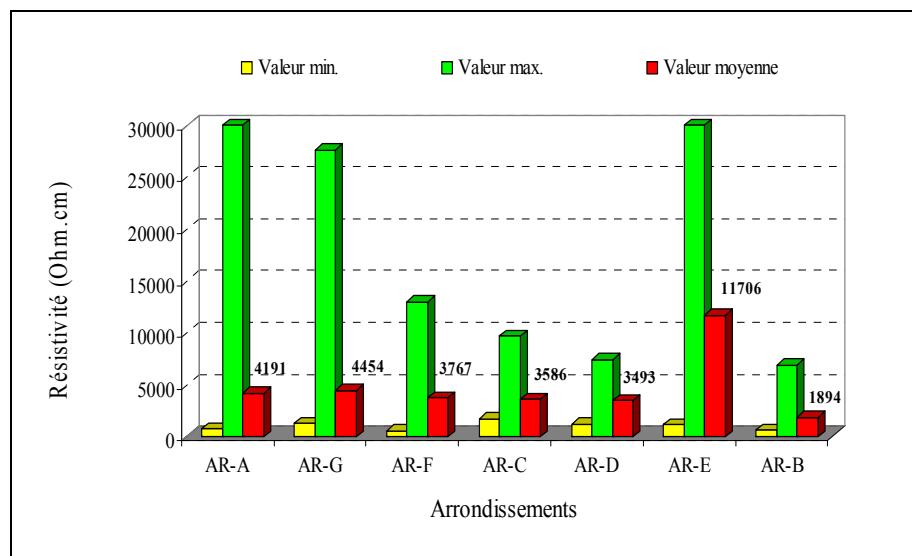


Figure 5.11 Résistivités des sols des arrondissements à une profondeur de 2 m.

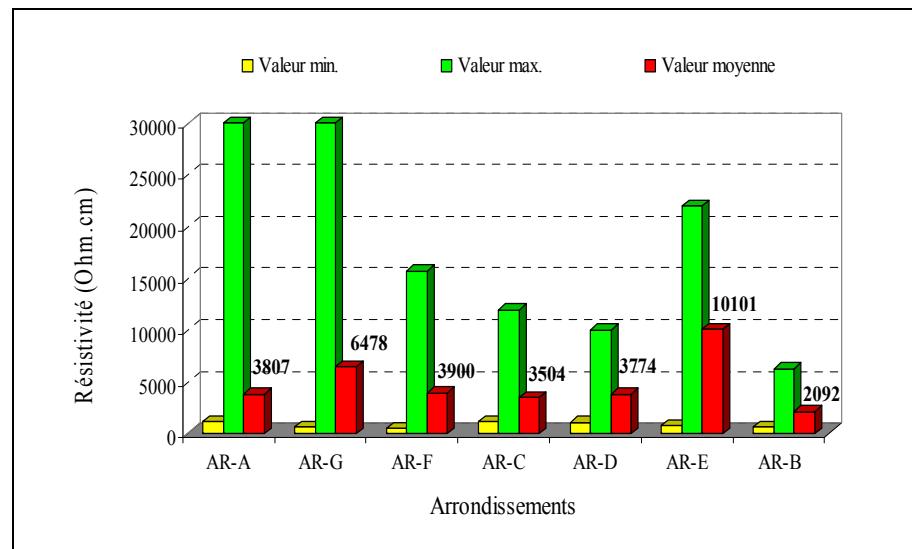


Figure 5.12 Résistivité des sols des arrondissements à une profondeur de 1 m.

5.1.3 Synthèse

Les valeurs minimales, moyennes et maximales de la résistivité du sol, déterminées à 2m de profondeur permettent d'établir une classification des différents sols des arrondissements par ordre de corrosivité comme le montre le tableau 5.1.

Tableau 5.1 Corrosivité du sol par arrondissement

Arrondissement	Corrosivité
AR-A	Moyennement corrosif à corrosif
AR-G	Faiblement à moyennement corrosif
AR-F	Moyennement corrosif à corrosif
AR-C	Moyennement corrosif à corrosif
AR-D	Moyennement corrosif à corrosif
AR-E	Faiblement à moyennement corrosif
AR-B	Corrosif

Les investigations réalisées par la technique du relevé de résistivité du sol dans les différents arrondissements de la Ville ont permis de faire ressortir certains constats relativement à la corrosivité. En effet, il a été démontré que le sol au-dessus des conduites est corrosif mais à un degré moindre ou équivalent par rapport au sol qui les entoure.

De plus, les seuils minimum, moyen et maximum de la résistivité correspondant à la profondeur de 2 mètres (Figure 5.11) se situent dans des plages qualifiant les sols de corrosifs et de moyennement corrosifs. Par ailleurs, il ressort que le sol de l'arrondissement AR-B est considéré comme le plus corrosif de tous les arrondissements de la Ville alors que celui de l'arrondissement AR-E s'avère être le moins corrosif.

En fait, le développement des cellules de corrosion est favorisé sur la surface externe des conduites de fonte dans les sols à faible résistivité électrique. Cela contribue au vieillissement accéléré du réseau d'aqueduc dans la majorité des arrondissements ce qui affecte ses performances et sa longévité. De même, la faible résistivité du sol offre aux courants vagabonds un milieu conducteur préféré pour embarquer sur les conduites métalliques et y provoquer des zones chaudes aux points de sorties.

5.2 Analyse de l'historique des bris

5.2.1 Analyse et caractérisation des bris

Les statistiques remises par la Ville concernant l'historique des bris sont présentées dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2 Données statistiques des bris

Arrondissement	Bris par année											
	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
AR-A					3	35	61	75	59	71	42	25
AR-B					30	16	13	18	10	62	18	19
AR-E								2		71	45	23
AR-F	186	141	175	156	181	151	206	212	201	232	178	93
AR-C										71	45	22
AR-G					136	104	163	141	235	222	214	136
AR-D					6	11	7	17	14	19	12	28
Non répertorié					32	51	71	72	81			
Total	186	141	175	156	388	368	521	537	600	748	554	346

Les données récapitulées par la Ville sont incomplètes. On trouve, entre autres, qu'il y a un manque de recensement du nombre de bris s'étant produit pendant la période de 1994 à 1997 au niveau de l'ensemble des territoires de la Ville excepté l'arrondissement AR-F. La seule période où l'on dispose de données complète est celle qui s'étale entre 2003 à 2005.

D'après les services de la Ville, les bris relatifs à l'année 2005 ont été répertoriés jusqu'au mois octobre seulement. Il est aussi à souligner que plusieurs bris survenus durant les années 1994 à 2002 n'ont pas été dénombrés sur certains sites des arrondissements. Par ailleurs, les bris non répertoriés relativement à l'année 2003 ont été localisés et intégrés au nombre de bris relevé par la Ville et correspondant aux arrondissements AR-E et AR-C.

Devant cette situation, l'élaboration avec certitude d'une tendance permettant d'analyser l'évolution des bris en fonction des années répertoriées devient difficile et nécessite un suivi à long terme.

5.2.1.1 Évolution du nombre de bris

L'évolution des bris répertoriés en fonction des années répertoriées au niveau de chaque arrondissement est présentée sur la figure 5.13.

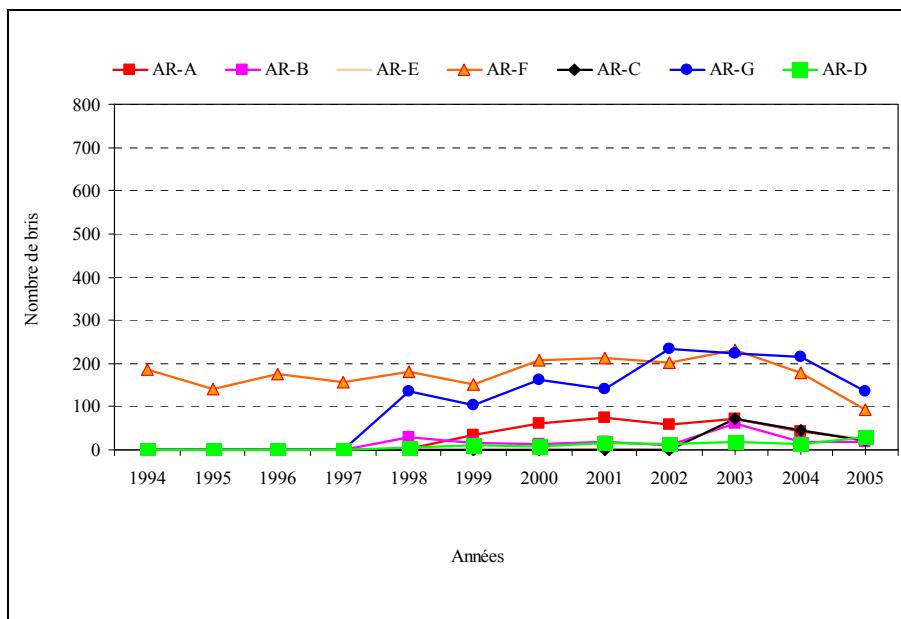


Figure 5.13 Évolution du nombre de bris par année.

D'après l'allure des données, il apparaît que les arrondissements AR-F et AR-G ont subi plus de bris avec un nombre variant de 169 à 176 bris par année. Par ailleurs, il semble aussi que l'évolution des bris dans l'arrondissement AR-F est stable tandis que l'arrondissement AR-G présente une évolution de bris légèrement croissante dans le temps.

À propos de l'arrondissement AR-A et AR-C, le nombre de bris moyen déterminé est de 46 bris/année. Cependant, l'évolution de bris pour ces deux arrondissements semble aussi stable dans le temps.

Concernant les arrondissements AR-E, AR-B et AR-D, ces derniers sont les moins affectés par les bris par rapport au reste des arrondissements. On voit également que le nombre des bris produits est plutôt variable dépendamment des années. La moyenne annuelle enregistrée pour ces arrondissements est de 35, 23 et 14 bris/année, respectivement.

5.2.1.2 Calcul du taux de bris

Il est important de considérer aussi la superficie de l'arrondissement ou, de manière plus précise encore, la longueur des conduites d'aqueduc impliquées pour le calcul du taux de bris. Pour cette fin, on a procédé à la détermination du taux de bris des différents arrondissements pour les années répertoriées. Dans cette approche, on s'est basé sur les données enregistrées par le service de la Ville, soit la longueur des conduites et la portion que représentent ces conduites en fonte grise et ductile considérées par rapport à la longueur totale du réseau.

Lors du calcul du taux de bris, on a émis comme hypothèse que les bris sont principalement produits sur les conduites en fonte. Ainsi, la longueur impliquée tient uniquement compte des conduites en fonte ductile et en fonte grise sans considérer les conduites en PVC.

Le taux de bris est déterminé comme étant le rapport du nombre de bris par kilomètre de conduite. Les taux ainsi obtenus sont représentés dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3 Chronologie du taux de bris par arrondissement

Arrondissement	Taux de Bris par année											
	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
AR-A					0,02	0,19	0,34	0,41	0,32	0,39	0,23	0,14
AR-B					0,28	0,15	0,12	0,17	0,09	0,58	0,17	0,18
AR-E								0,02		0,63	0,40	0,20
AR-F	0,73	0,56	0,69	0,61	0,71	0,59	0,81	0,83	0,79	0,91	0,70	0,37
AR-C										0,93	0,59	0,29
AR-G					0,41	0,32	0,50	0,43	0,71	0,67	0,65	0,41
AR-D					0,06	0,10	0,07	0,16	0,13	0,18	0,11	0,27

Afin de faciliter l'analyse de l'évolution du taux de bris dans le temps, les données recueillies dans le tableau sont illustrées sous forme d'un histogramme (Figure 5.14).

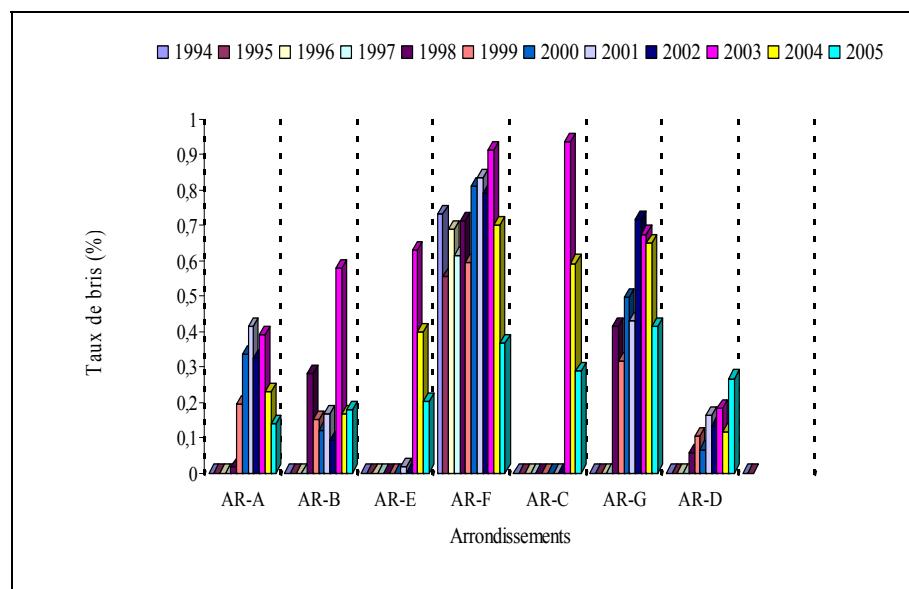


Figure 5.14 Étude comparative de l'évaluation des taux de bris dans les arrondissements.

D'après l'allure du graphique, il est établi que la situation est critique pour l'arrondissement AR-F qui enregistre un taux de bris moyen relativement élevé. La valeur moyenne du taux de bris pour cet arrondissement se situe autour de 0,7 bris/km de conduite pour la période allant de 1994 à 2004.

Il est également à noter que l'arrondissement AR-G vient en second ordre après l'arrondissement AR-F avec un taux de bris d'environ 0,5 bris/km de conduite. Quant à l'arrondissement AR-C, celui-ci manifeste un taux assez élevé de bris tout comme les arrondissements AR-E et AR-A.

Parmi les arrondissements ayant subi un faible taux de bris, il y a l'arrondissement AR-D qui se distingue par un taux de bris moyen inférieur à 0,1 bris/km de conduite réparti sur la période allant de 1998 et 2004. Concernant l'arrondissement AR-B, ce dernier a subi une nette diminution du taux de bris entre 2003 et 2004 en passant de près de 0,58 bris/km à près de 0,17 bris/km de conduite. Cette réduction peut s'expliquer par le système de protection cathodique mis en œuvre dans cet arrondissement. En récapitulant uniquement les données du tableau 5.3 relatives à 2003 et 2004, on fait ressortir la répartition exprimée à la figure 5.15.

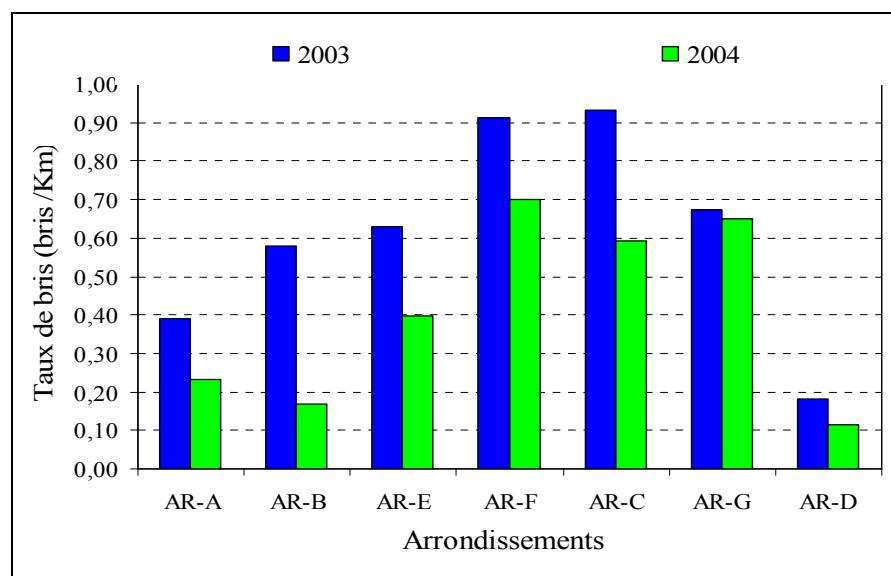


Figure 5.15 Évolution du taux de bris aux arrondissements entre 2003 et 2004.

Cherchant à cerner un éventuel effet de la résistivité sur l'évolution du taux de bris des conduites, on a trouvé opportun de rapporter les bris enregistrés en 2003 et 2004 en fonction de ce paramètre comme le montre la figure 5.16. Une prédition d'une corrélation entre ces paramètres peut ainsi en être tirée.

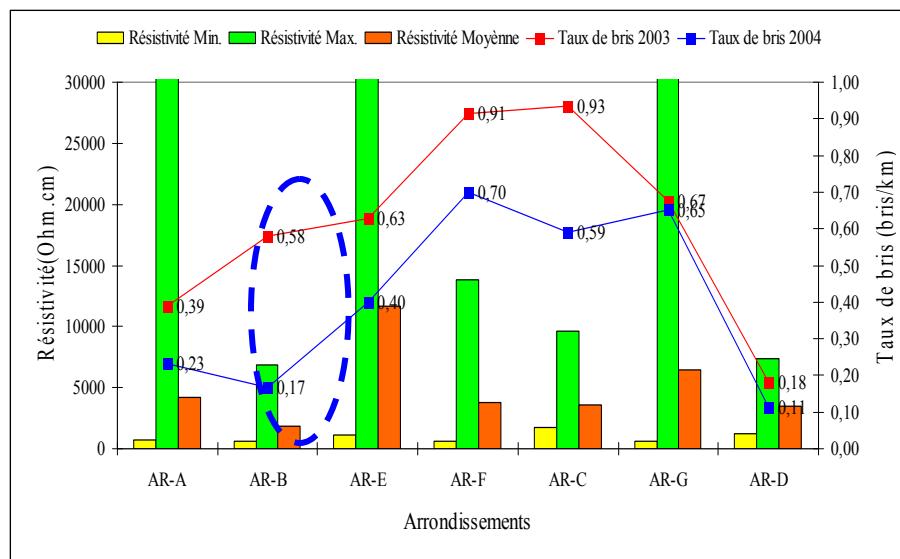


Figure 5.16 Corrélation entre le degré de corrosivité et le taux de bris entre 2003 et 2004.

Il s'avère que le taux de bris des conduites en fonte se concentre beaucoup plus dans les arrondissements où la résistivité du sol est basse (1500-3000 Ohm.cm) à l'exception de l'arrondissement AR-B qui possède un système de protection cathodique. Ce dernier a réduit significativement le taux de bris dans cette région en le faisant chuter de 0.58 à 0.17 bris/km.

Ainsi, il est clair que la corrosivité du sol exerce un effet remarquable sur le processus du développement de bris sur les conduites métalliques.

5.2.2 Effet de la résistivité du sol et l'âge des conduites sur l'évolution des bris

Afin d'illustrer l'effet de la résistivité du sol et l'âge des conduites sur l'évolution du nombre de bris, on a procédé dans la première étape à intégrer sur une carte toutes les conduites d'aqueduc se trouvant au niveau de chaque arrondissement, et ce en prenant soin de différencier les conduites en fonte de celles en d'autres matériaux. Tous les bris ont également été illustrés sur cette carte. En procédant ainsi, la première carte élaborée va nous permettre de faire une corrélation entre la localisation des bris et le matériau de la conduite

La deuxième étape consiste à préparer une seconde carte où, cette fois-ci, apparaît l'âge des conduites d'aqueducs en fonte. Cette carte permet de prédire s'il y a un lien entre les bris et l'âge des conduites. Par la suite, on a procédé à la construction d'une cartographie relative à chaque arrondissement et où l'on présente un profil des résistivités prises à deux mètres (2m) de profondeur. Cette carte va être superposée sur la seconde carte de manière à déterminer s'il existe une corrélation entre les bris, l'âge des conduites et aussi la résistivité du sol qui les entoure.

En dernier lieu, la carte présentant le profil des résistivités à 2 m de profondeur est de nouveau superposée sur une autre carte qui illustre le taux de bris évalué à tous les 100 m de longueur des conduites d'aqueduc. De ce fait, une corrélation peut être déduite entre les taux de bris et la résistivité du sol à 2 m de profondeur.

5.2.2.1 Constitution d'une base de données

L'ensemble des cartographies conçues à partir de cette approche de design est présenté dans l'annexe I. En fait, quatre (4) figures ont été tirées pour chacun des six arrondissements, soit au total 24 cartographies désignées comme suit :

- Figure AI-1, Figure AI-2, Figure AI-3, Figure AI-4, pour l'arrondissement AR-A;
- Figure BI-1, Figure BI-2, Figure BI-3, Figure BI-4, pour l'arrondissement AR-C;
- Figure CI-1, Figure CI-2, Figure CI-3, Figure CI-4, pour l'arrondissement AR-D;

- Figure DI-1, Figure DI-2, Figure DI-3, Figure DI-4, pour l'arrondissement AR-E;
- Figure EI-1, Figure EI-2, Figure EI-3, Figure EI-4, pour l'arrondissement AR-F;
- Figure FI-1, Figure FI-2, Figure FI-3, Figure FI-4, pour l'arrondissement AR-G.

5.2.2.2 Analyse statistique des données cartographiques

On tient d'abord à signaler que l'ensemble des figures AI-1, BI-1, CI-1, DI-1, EI-1 et FI-1 de l'annexe I portent sur les cartographies représentant la corrélation entre le nombre de bris et le matériau des conduites pour les six arrondissements.

L'établissement des dites corrélations révèle que la quasi-totalité des bris sont apparus sur les conduites d'aqueduc en fonte. Les bris qui se sont produits sur les autres types de conduite (Ciment, PVC, Amiante) sont considérés négligeables.

A) Arrondissement AR-A

A1) Effet de la résistivité du sol sur l'évolution du nombre de bris

La présentation cartographique de la résistivité du sol (Figure AI-2, Annexe I) démontre clairement que la partie Nord de l'arrondissement présente moyennement un sol plus corrosif que le reste du territoire. En fait, cette région comporte la proportion la plus importante en bris. Néanmoins, une seconde concentration de bris se présente au centre de l'arrondissement dont la résistivité du sol est classée dans la catégorie moyenne à faible corrosivité.

En référence à la cartographie illustrée sur la figure AI-2 (Annexe I), on a établi une distribution statistique pour le nombre de bris produits dans chaque catégorie de sol comme le présente la figure 5.17.

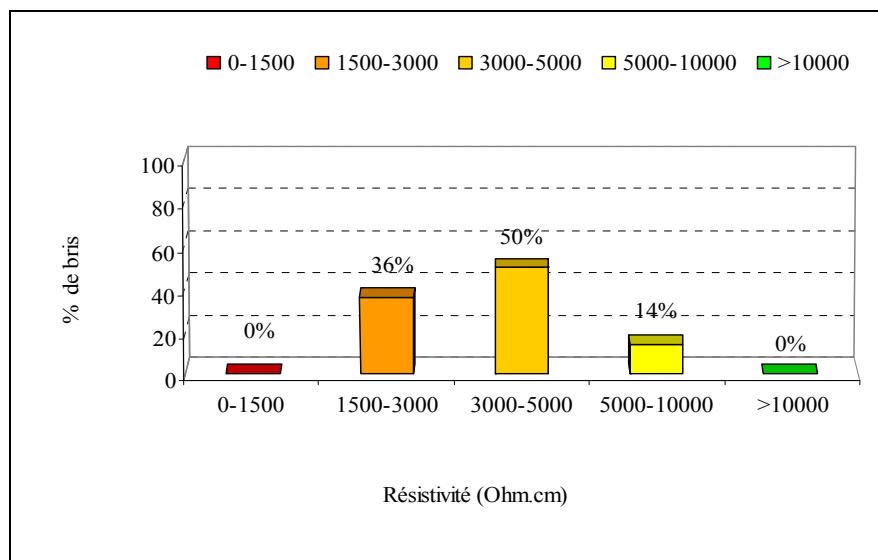


Figure 5.17 Distribution statistique des bris selon la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-A.

Le graphique ainsi obtenu montre d'une façon plus évidente l'effet de la résistivité du sol sur l'accroissance de bris dans cet arrondissement. En effet, on voit que 86% des bris de cet arrondissement sont produits sur les conduites de fonte enfouies dans le sol corrosif (1500-3000 Ohm.cm) et moyennement corrosif (3000-5000 Ohm.cm) alors que ceux produis dans le sol à faible corrosivité (5000-1000 Ohm.cm) représentent seulement 14% du nombre de bris total enregistré.

Ainsi, le nombre de bris semble être lié à la corrosivité du sol qui tend à décroître avec l'augmentation de la résistivité du sol.

A2) Effet de l'âge de conduites sur l'évolution du nombre de bris

Relativement à la cartographie de la figure AI-3 (Annexe I), les statistiques des bris établis en fonction de l'âge des conduites (Figure 5.18) montrent que :

- 20 % de bris sont produits sur les conduites installées entre 1955 et 1964 ;
- 55% de bris sur les conduites datant de 1965 à 1974 ;
- 25 % de bris sur les conduites datant de 1975-2003.

D'autre part, on constate, sur la même cartographie, que la majorité des conduites du réseau de cet arrondissement sont installées entre 1975 et 2003 et enfouies dans des sols majoritairement qualifiés de corrosif et, parfois, de moyennement corrosif. De même, il en ressort que l'âge des conduites exerce un effet majeur sur la production des bris. Cet effet devient encore plus accentué avec le caractère corrosif de cet arrondissement ce qui stimule davantage le processus de vieillissement des conduites.

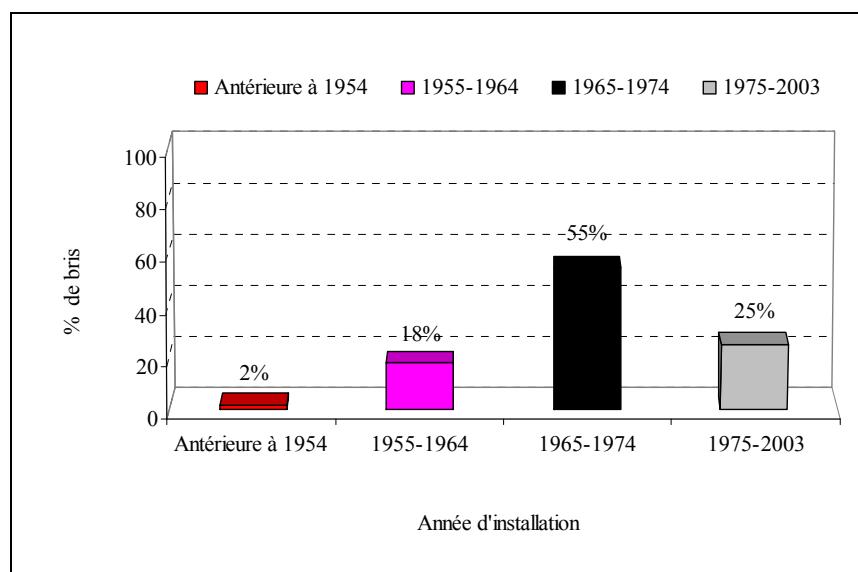


Figure 5.18 Distribution statistique des bris en fonction de l'âge des conduites dans l'arrondissement AR-A.

A3) Effet de la résistivité du sol sur l'évolution du taux de bris

En référence à la cartographie de la résistivité du sol en fonction du taux des bris (Figure AI-4, Annexe I) et à la distribution statistique des bris illustrée à la figure 5.19, il apparaît que les taux de bris sont principalement concentrés dans la région à sol corrosif (1500-3000 Ohm.cm) et moyennement corrosif (3000-5000 Ohm.cm). Or, la concentration des taux de bris dans ces deux plages de résistivité est élevée et elle varie de 0.75 à plus de 2.25%. D'autre part, les taux de bris enregistrés sur les sols faiblement corrosif (5000-10000 Ohm.cm) présentent une concentration variant de 0.75 à 1.75%.

Par ailleurs, le taux de bris est d'une concentration nulle dans le sol peu agressif dont la résistivité est supérieure à 10000 Ohm.cm.

À la lumière des résultats obtenus, il est clair que la corrosivité du sol exerce un effet important sur le processus de développement des bris. Cette influence s'avère plus importante une fois que la conduite est vieille.

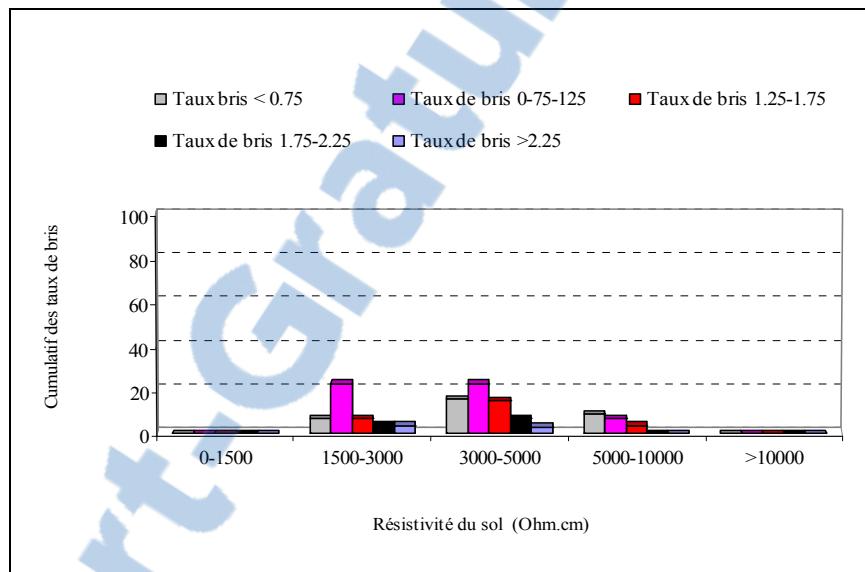


Figure 5.19 Taux de bris cumulatif en fonction de la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-A.

B) Arrondissement AR-C

B1) Effet de la résistivité du sol sur l'évolution du nombre de bris

En rapport à la cartographie (Figure BI-2, Annexe I) et à la distribution statistique des bris illustrée à la figure 5.20, on remarque que la concentration la plus importante des bris est localisée dans les sols corrosifs (1500-3000 Ohm.cm) et moyennement corrosifs (3000-5000 Ohm.cm) avec des pourcentages de l'ordre de 35 et 43% respectivement.

La faible portion de bris a été repérée dans les sols faiblement corrosifs (5000-10000 Ohm.cm) où l'on compte seulement 22% du nombre total de bris. Il en résulte que le pourcentage important de bris, soit 22% qui est produit sur les conduites enfouies dans le sol faiblement corrosif est dû principalement à l'effet de l'âge de ces dernières comme il est souligné dans la section suivante (B2).

Ainsi, le nombre de bris semble être affecté par la corrosivité du sol qui tend à décroître avec l'augmentation de la résistivité du sol.

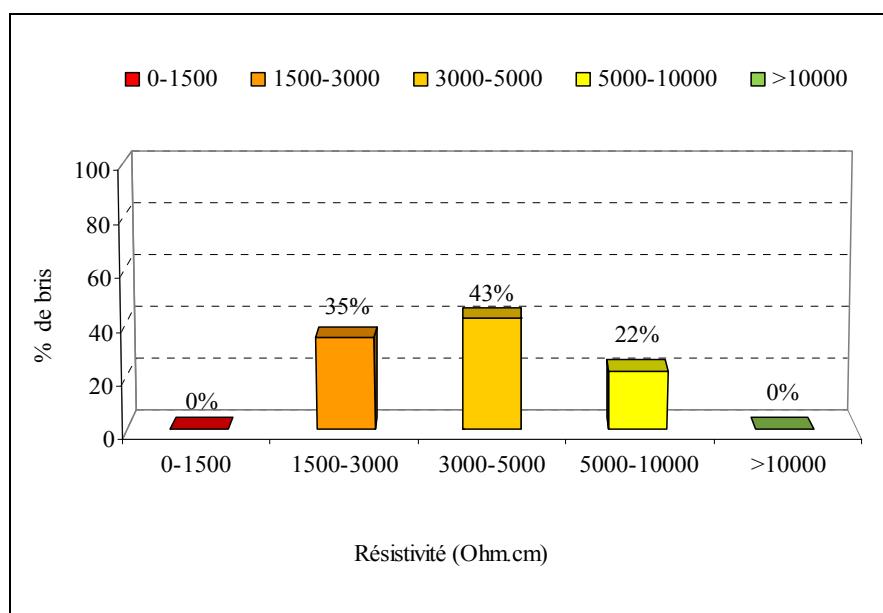


Figure 5.20 Distribution statistique des bris en fonction de la résistivité du sol dans l'arrondissement AR- C.

B2) Effet de l'âge de conduites sur l'évolution du nombre de bris

Relativement à la cartographie présentée dans la figure BI-3 (Annexe I) et aux résultats statistiques présentés ci-après (Figure 5.21), on souligne le fait que les conduites les plus sujettes aux bris sont celles installées avant 1964 et enterrées dans des sols de résistivité comprise entre 1500 et 10000 Ohms.cm. Pour celles datant de 1965 à 1974, les bris se sont manifestés dans les sols corrosifs (1500 – 3000 Ohm.cm).

En conséquence, il s'avère que l'effet combiné de l'âge des conduites et de la corrosivité du sol demeure toujours le premier critère responsable des bris et de l'état des conduites.

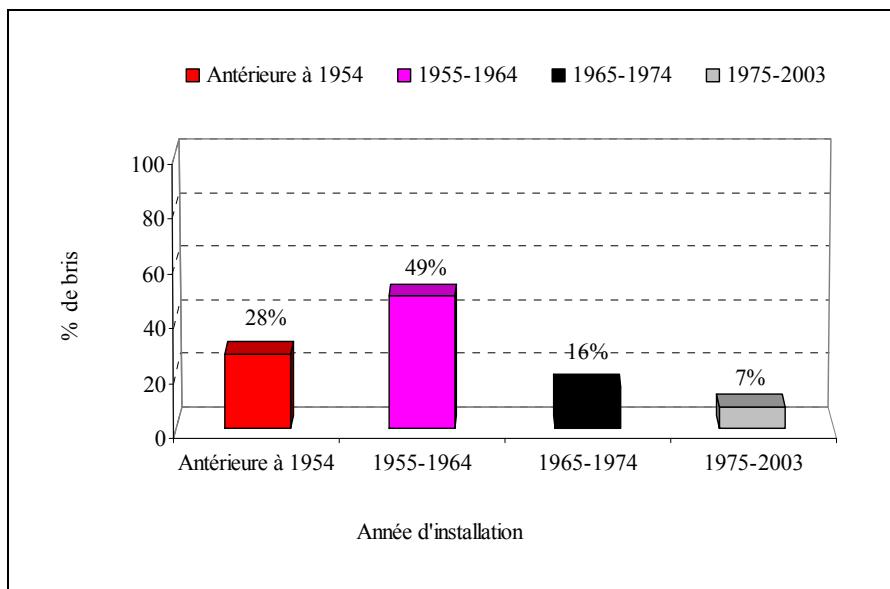


Figure 5.21 Distribution statistique des bris en fonction de l'âge de conduite dans l'arrondissement AR-C.

B3) Effet de la résistivité du sol sur l'évolution du taux de bris

La cartographie illustrée dans de la figure BI-4 (Annexe I) et la distribution statistique (Figure 5.22) montrent que le cumul des taux de bris enregistrés est faible. Dans ce cas, on enregistre une concentration quasiment similaire et variable de 0.75 à plus de 2.25% au niveau des sols corrosifs (1500-3000 Ohm.cm), moyennement corrosifs (3000-5000 Ohm.cm) et faiblement corrosif (5000-1000 Ohm.cm).

La particularité à souligner dans cet arrondissement est le fait que l'ensemble des conduites du réseau d'aqueduc date d'avant 1965. Ceci fait que la quantité importante des taux de bris développés dans les sols à faible corrosivité est causée par le vieillissement de ces conduites.

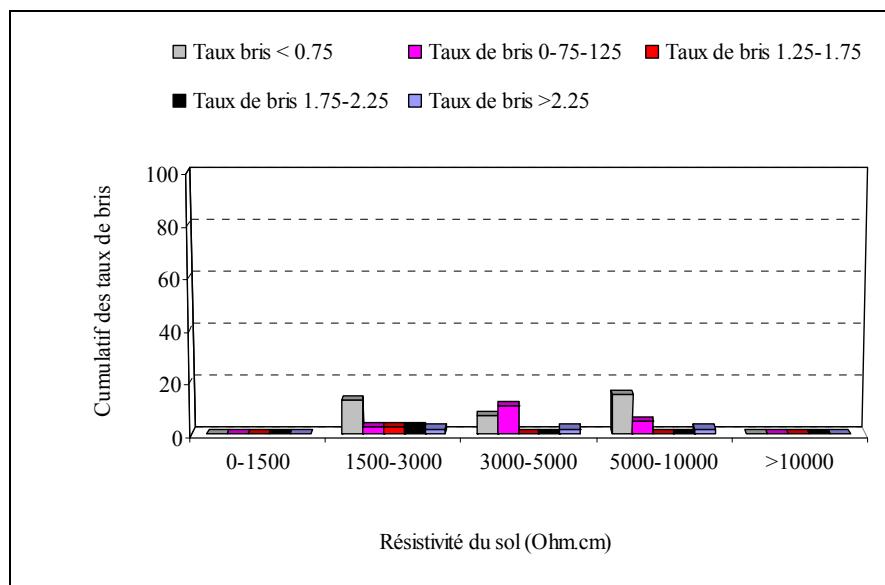


Figure 5.22 Taux de bris cumulatif en fonction de la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-C.

C) Arrondissement AR-D

C1) Effet de la résistivité du sol sur l'évolution du nombre de bris

La corrélation cartographique établie par la figure CI-2 (Annexe I) met en évidence le comportement du sol de cet arrondissement à la fois moyennement corrosif (3000-5000 Ohm.cm) et corrosif (1500-3000 Ohm.cm). La distribution statistique présentée à la figure 5.23 montre que le sol moyennement corrosif et corrosif représentent le siège privilégié des bris avec des pourcentages de 13 et 87% respectivement.

Il en résulte que seulement la présence de deux plages de résistivité n'aide pas suffisamment à élucider l'effet de l'agressivité du sol sur l'évolution du nombre de bris dans cet arrondissement.

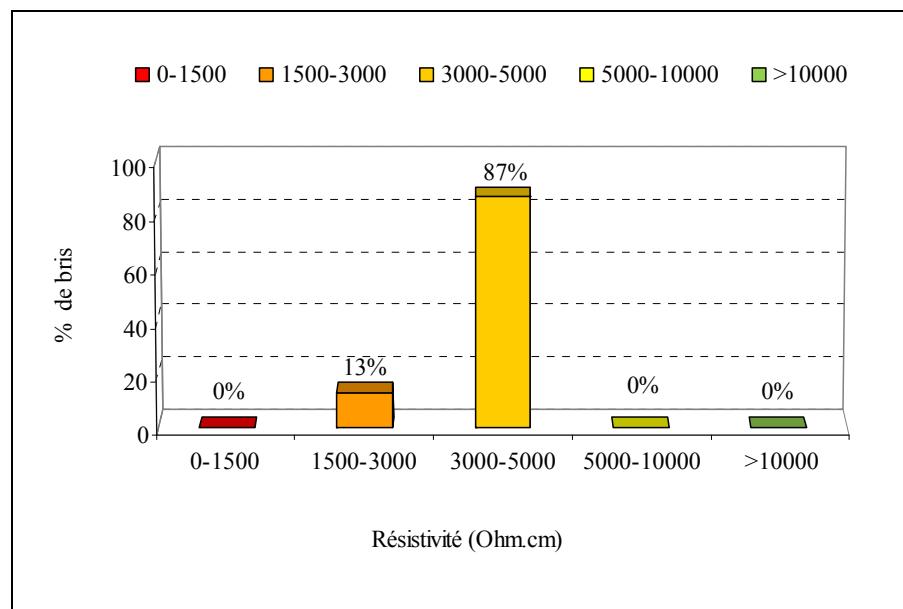


Figure 5.23 Distribution statistique des bris en fonction de la résistivité du sol dans l’arrondissement AR-D.

C2) Effet de l’âge de conduites sur l’évolution du nombre de bris

La cartographie CI-3 (Annexe I) montre que la plupart des bris se situent sur les conduites installées avant 1965. De plus, on constate que chaque secteur de l’arrondissement renferme aussi quelques tronçons de conduites qui ont été mis en fouille avant 1954. Chacun de ces derniers s’est vu attribuer un minimum d’un bris, et ce quelque soit sa longueur. Concernant les conduites datant de 1965 à 2003 de la partie Est de l’arrondissement, ces dernières enregistrent les plus faibles quantités de bris.

La distribution statistique des bris (Figure 5.24) montre que les bris se sont produits comme suit:

- 71% sur les conduites installées avant 1965 ;
- 13% sur les conduites datant entre 1965 et 1974 ;
- 16% sur les conduites d’entre 1975 et 2003.

Il en ressort donc que l'âge des conduites reste le premier critère responsable de l'évolution des bris. De plus, l'effet combiné de l'âge des conduites et de la corrosivité du sol est plus accentué sur le processus de vieillissement.

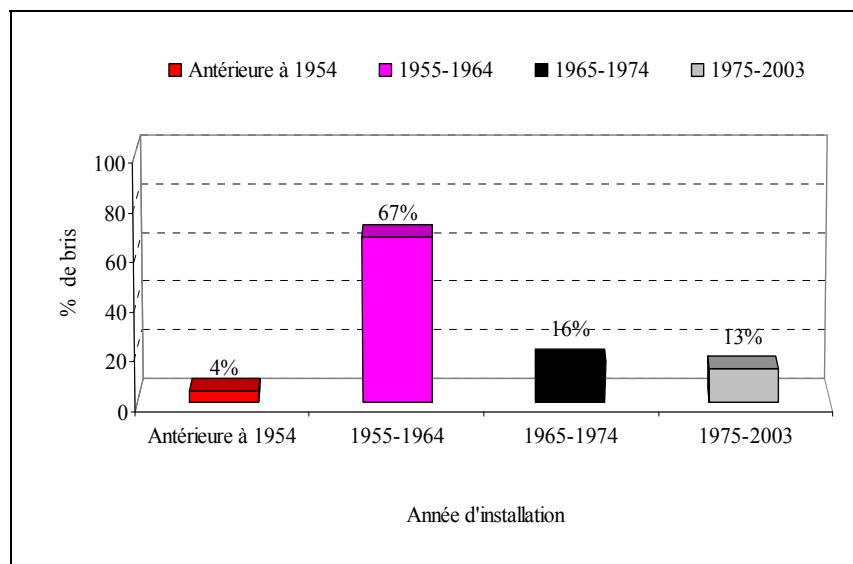


Figure 5.24 Distribution statistique des bris en fonction de l'âge de conduite dans l'arrondissement AR-D.

C3) Effet de la résistivité du sol sur l'évolution du taux de bris

Au vu de la cartographie CI-4 (Annexe I), on peut noter le faible taux de bris enregistré au niveau de cet arrondissement. Quant à la distribution statistique illustrée sur la figure 5.25, celle-ci révèle que la majorité des taux de bris sont localisés sur les conduites enfouies dans les sols moyennement corrosifs (3000 - 5000 Ohm.cm) avec une concentration variable de 0.75 à plus de 2.25%. L'autre fait à mettre en relief consiste au taux de bris quasiment nul au niveau des sols faiblement ou peu corrosifs.

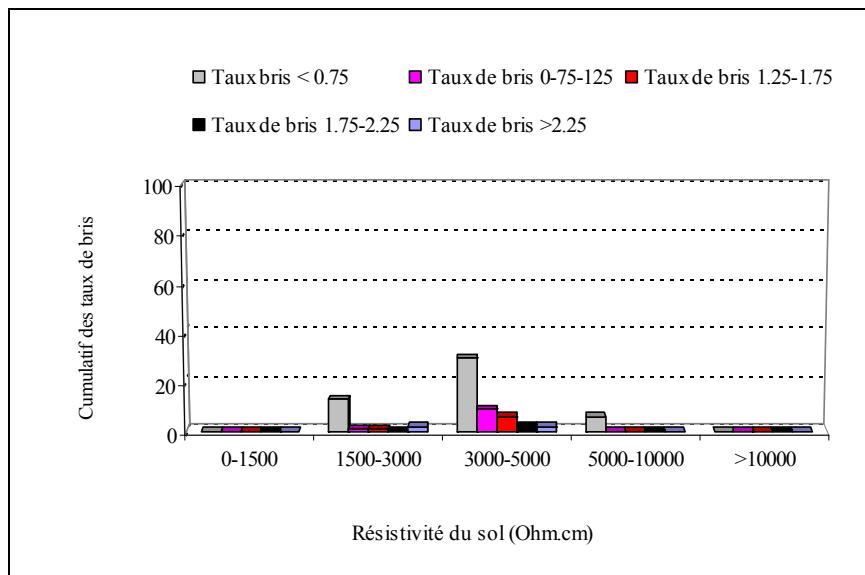


Figure 5.25 Cumulatif des taux de bris en fonction de la résistivité du sol dans l’arrondissement AR-D.

D) Arrondissement AR-E

D1) Effet de la résistivité du sol sur l’évolution du nombre de bris

D’après la cartographie DI-2 (Annexe I) et la distribution statistique (Figure 5.26), la grande quantité des bris produits est située dans les sols faiblement corrosifs (5000-10000 Ohm.cm) et moyennement corrosifs (3000-5000 Ohm.cm) avec des pourcentages de l’ordre de 34 et 42% respectivement. De même, on enregistre aussi une quantité non négligeable de l’ordre de 16% de bris sur les conduites enfouies dans le sol peut corrosif (plus de 10000 Ohm.cm). Ainsi, l’apparition d’une quantité considérable en bris dans le sol peut corrosif est due principalement au facteur d’âge des conduites comme il est discuté dans la section suivante (D2).

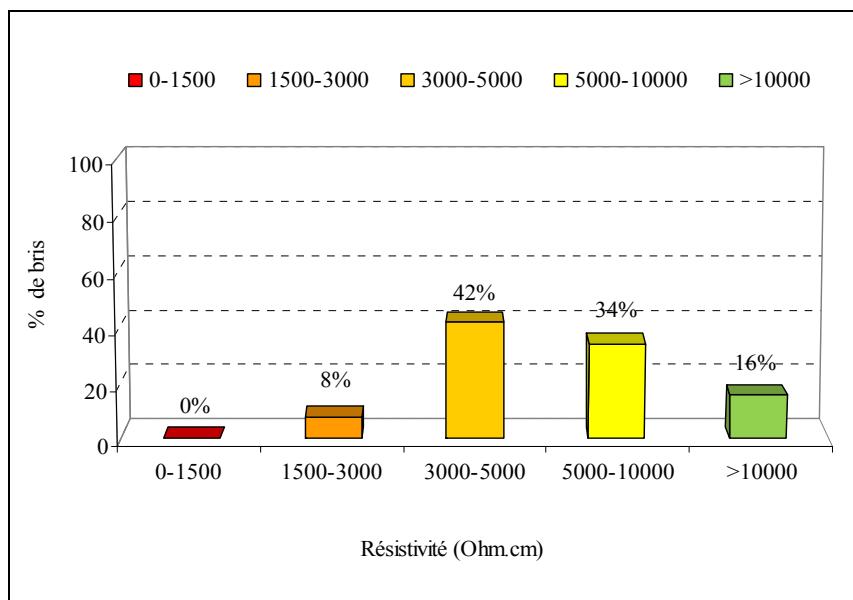


Figure 5.26 Distribution statistique des bris selon la résistivité du sol dans l’arrondissement AR-E.

D2) Effet de l’âge de conduites sur l’évolution du nombre de bris

En référence à la cartographie illustrée sur la figure DI-3 (Annexe I), les bris sont localisés sur les conduites enterrées entre 1955 et 1974.

De même, la figure 5.27 montre que les bris sont répartis comme suit:

- 48% sur les conduites datant de 1965-1974;
- 40% sur les conduites enfouies entre 1955 et 1964 ;
- 12% sur les conduites datant de 1975 à 2003.

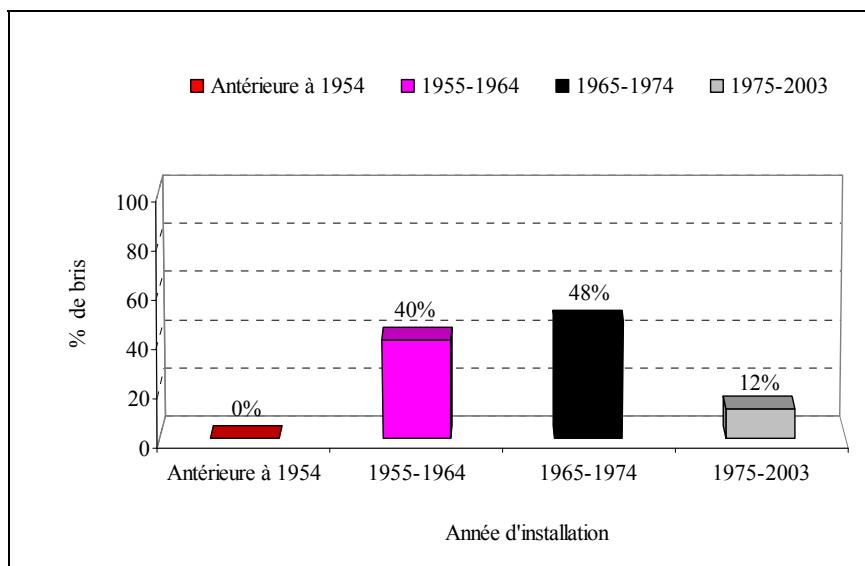


Figure 5.27 Distribution statistique des bris selon l'âge de conduite dans l'arrondissement AR-E.

D3) Effet de la résistivité du sol sur l'évolution du taux de bris

En référence à la figure DI-4 (Annexe I) et aux statistiques des taux de bris (Figure 5.28), il apparaît que les taux de bris sont regroupés d'une façon décroissante à partir de la plage de résistivité 3000-5000 Ohm.cm correspondant au sol moyennement corrosif.

En se basant sur une échelle de comparaison du cumul des taux de bris enregistrés par plage de résistivité, on constate que ce dernier décroît au fur et à mesure de l'augmentation de la résistivité du sol.

À la lumière des résultats évoqués, il est retenu que la corrosivité du sol a un impact significatif sur l'évolution des bris à y rajouter le facteur d'âge qui demeure aussi prépondérant dans la survenance du dommage de la conduite.

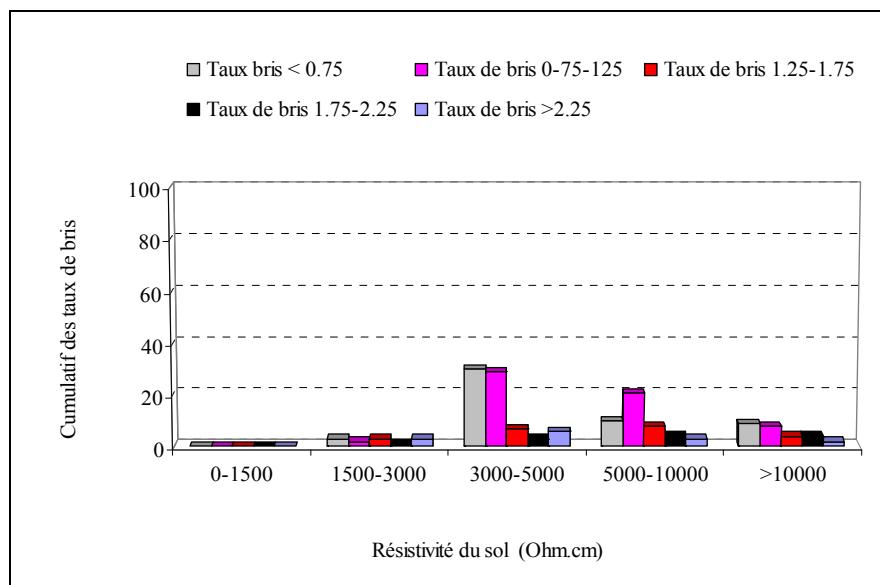


Figure 5.28 Taux de bris cumulatif en fonction de la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-E.

E) Arrondissement AR-F

E1) Effet de la résistivité du sol sur l'évolution du nombre de bris

À la lecture de la distribution statistique (Figure 5.29) et de la cartographie corrélative (Figure EI-2, Annexe I), on trouve que la plus grande concentration des bris est localisée dans les sols corrosifs (1500-3000 Ohm.cm) et moyennement corrosif (3000-5000 Ohm.cm) avec des pourcentages de l'ordre de 37 et 45% respectivement. La faible fraction de bris a été signalée dans les sols faiblement corrosifs (5000-10000 Ohm.cm) où l'on dénombre seulement 17% de cas du nombre total de bris.

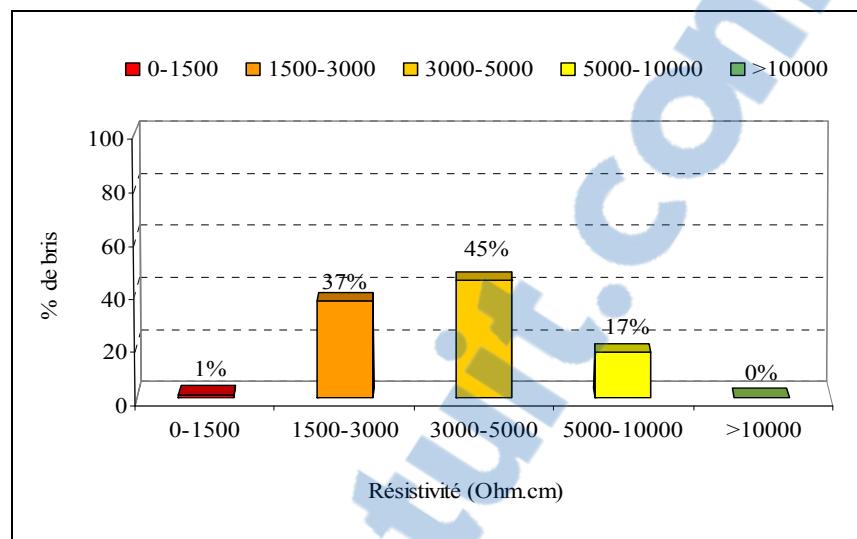


Figure 5.29 Distribution statistique des bris en fonction de la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-F.

E2) Effet de l'âge de conduites sur l'évolution du nombre de bris.

En référence à la cartographie corrélative (Figure EI-3, Annexe I) et aux résultats de la figure 5.30, on trouve que les bris sont répartis comme suit :

- 48% sur les conduites en fonte datant avant 1965 ;
- 48% sur les conduites installées entre 1965 et 1974 ;
- 4% sur les conduites installées entre 1975 et 2003.

La grande part des bris a été observée au Centre et au Sud de l'arrondissement où la résistivité du sol est inférieure à 3000 Ohm.cm. Ainsi, l'âge des conduites est jugé comme un facteur critique de défaillance. Toutefois, l'effet exercé par la corrosivité du sol devient crucial dans le cas des vieilles conduites.

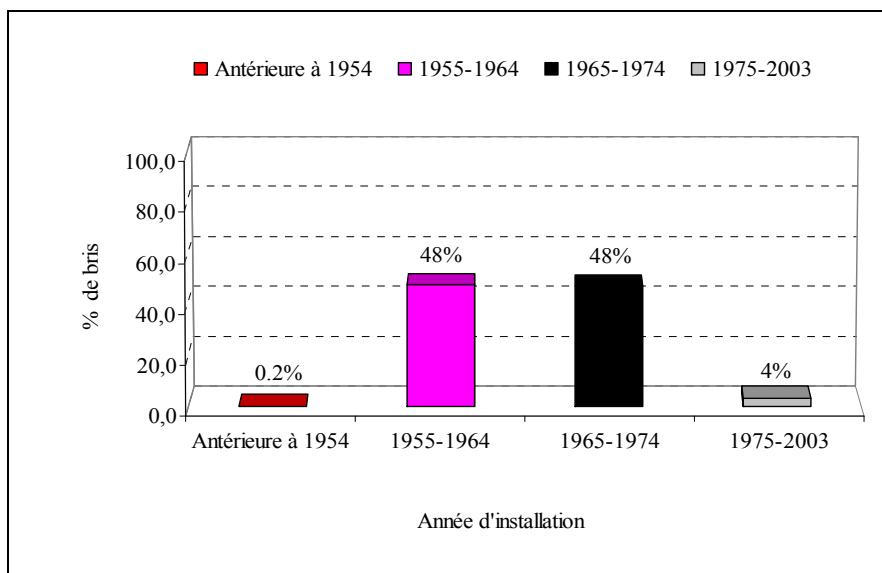


Figure 5.30 Distribution statistique des bris en fonction de l'âge de conduite dans l'arrondissement AR- F.

E3) Effet de la résistivité du sol sur l'évolution du taux de bris

D'après le cumul des taux de bris présenté sur la figure 5.31 et relativement à la cartographie (Figure EI-4, Annexe I), on constate que la grande partie des bris a eu lieu dans les sols corrosifs (1500-3000 Ohm.cm) et moyennement corrosifs (3000-5000 Ohm.cm). Or, la concentration des taux de bris pour ces deux plages de résistivité est élevée et elle varie de 0.75 à plus de 2.25%. Par ailleurs, les taux de bris enregistrés dans les sols faiblement corrosifs (5000-10000 Ohm.cm) sont aussi considérés importants avec une concentration allant de 0.75 à 2.25%. Quant aux sols peu agressifs (plus de 10000 Ohm.cm), les taux de bris sont nuls.

Suite aux résultats obtenus, il est clair que la corrosivité du sol joue un rôle important dans le processus de production des bris. Cette influence s'avère plus importante une fois que la conduite est vieille.

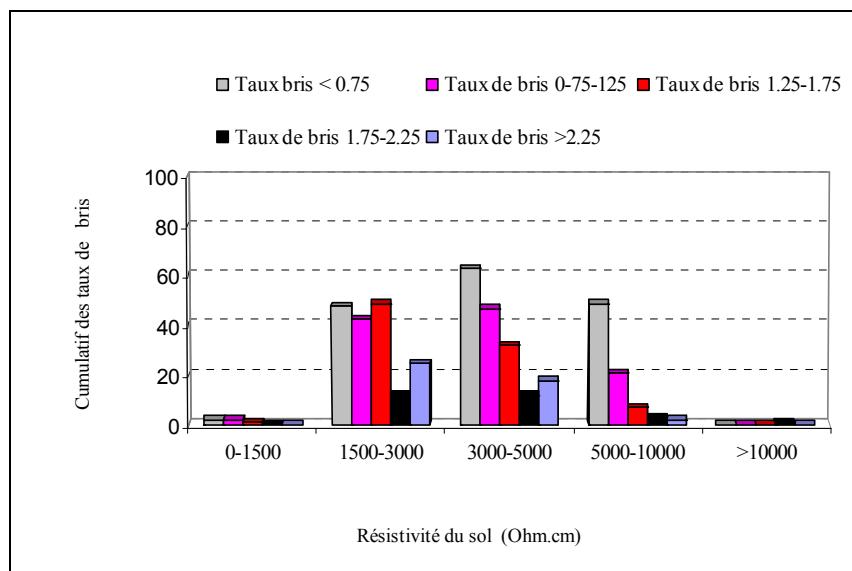


Figure 5.31 Taux de bris cumulatif en fonction de la résistivité du sol dans l’arrondissement AR-F.

F) Arrondissement AR-G

F1) Effet de la résistivité du sol sur l’évolution du nombre de bris

La cartographie illustrée sur la figure FI-2 (Annexe I) dévoile la nature très corrosive du sol de la partie Nord de l’arrondissement or que l’ensemble des conduites d’aqueduc est concentré dans la partie Sud.

Les statistiques déterminées sur la figure 5-32 démontrent qu’environ 66% des bris sont localisés dans les sols corrosifs (1500-3000 Ohm.cm) et moyennement corrosifs (3000-5000 Ohm.cm) alors que le reste, soit 35% de bris, sont enregistrés dans des sols de faible corrosivité. Dans cet arrondissement, il apparaît clairement que la corrosivité du sol a un impact considérable sur l’évolution des bris.

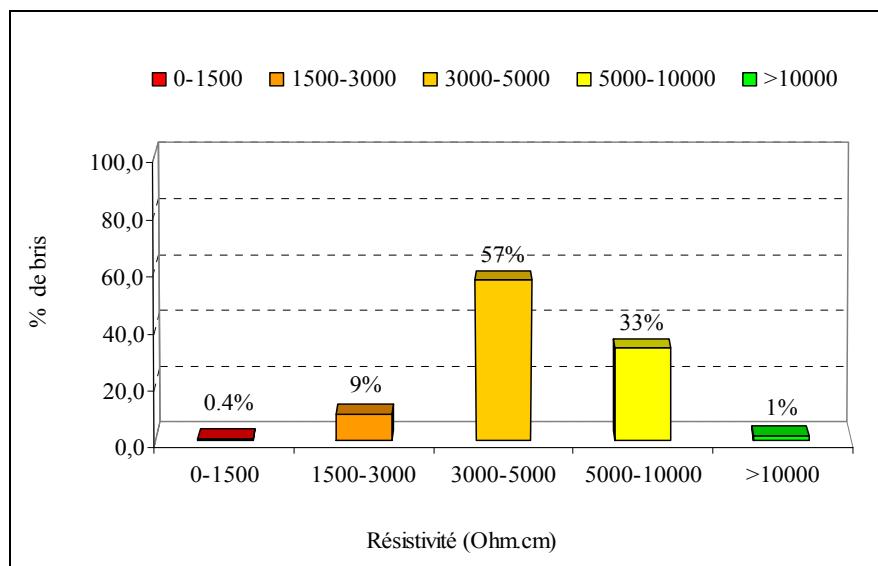


Figure 5.32 Distribution statistique des bris selon la résistivité du sol dans l’arrondissement AR- G.

Il en découle que la proportion importante de bris 33% (Figure 5.32) qui est subie par les conduites enfouies dans le sol faiblement corrosif (5000-10000 Ohm.cm) est due particulièrement à l’effet de l’âge de ces dernières comme il est discuté dans la section subséquente (F2).

F2) Effet de l’âge de conduites sur l’évolution du nombre de bris

La cartographie FI-3 (Annexe I) et la distribution statistiques des bris en fonction de l’âge des conduites (Figure 5.33) montrent que:

- 48% de bris sur les conduites datant de 1955 à 1964;
- 33% de bris sont produits au niveau des conduites installées avant 1955;
- 15% de bris sur les conduites datant de 1965 à 1974 ;
- 5% de bris sont enregistrés sur les conduites installées entre 1975 et 2003.

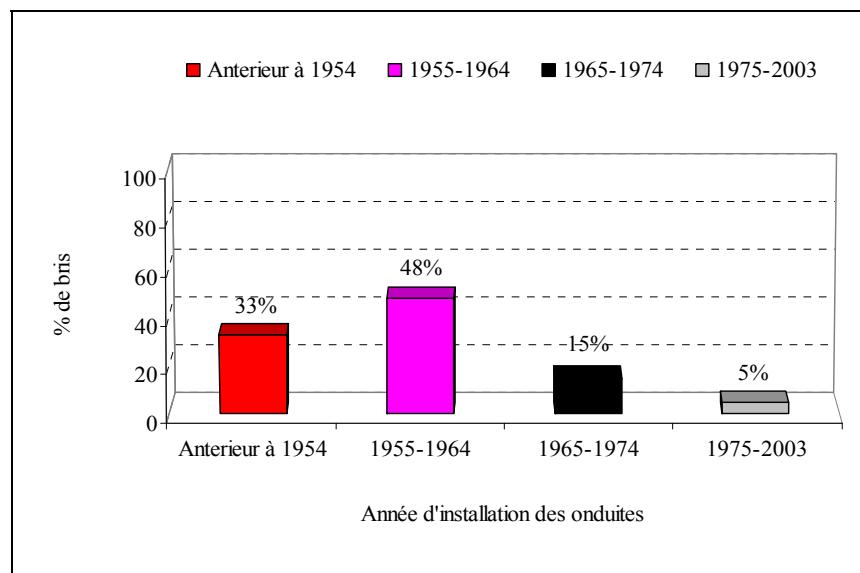


Figure 5.33 Distribution statistique des bris en fonction de l’âge de conduite dans l’arrondissement AR- G.

L’historique des bris nous renseigne ici que les conduites les plus sujettes aux bris sont celles datant avant 1964 et qui sont enterrées dans des sols de résistivité comprise entre 3000 et 10000 Ohms-cm. Pour celles datant de 1965 à 1974, les bris se sont manifestés dans les sols moyennement corrosifs. En conséquence, on constate clairement que l’effet combiné de l’âge des conduites et de la corrosivité du sol reste les premiers critères responsables des bris et de l’état des conduites.

F3) Effet de la résistivité du sol sur l’évolution du taux de bris

Relativement à la cartographie (Figure FI-4, Annexe I) et à la distribution statistique des bris illustrée à la figure 5.34, on remarque que les taux de bris les plus élevés se concentrent en général dans le sol moyennement corrosif pour une résistivité comprise entre 3000 à 5000 Ohms.cm. La concentration du taux de bris dans cette plage varie de 0.75% à plus de 2.25%. Il est à y rajouter qu’une seconde localisation assez importante du taux de bris, de 0.75% à plus de 2.25%, est repérée dans une catégorie de sol faiblement corrosif (5000-10 000 Ohm.cm). De là, il s’avère encore une fois que l’âge demeure le premier critère responsable des bris produits dans le réseau de cet arrondissement.

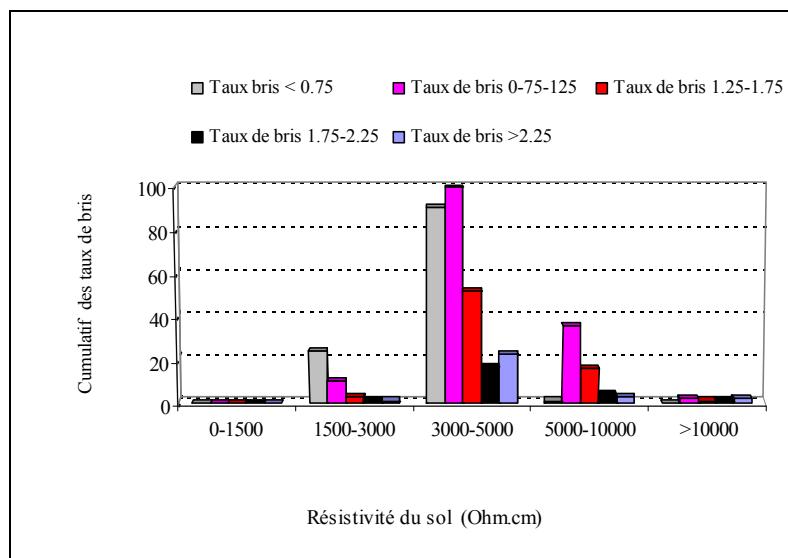


Figure 5.34 Taux de bris cumulatif en fonction de la résistivité du sol dans l'arrondissement AR-G.

5.2.2.3 Analyse corrélative des paramètres physiques.

L’analyse des résultats cartographiques a permis d’établir différentes corrélations entre l’historique du matériau des conduites, les propriétés du sol et le dommage qui en résulte.

D’après l’analyse des données, il en ressort que l’évolution du nombre de bris pour chacun des arrondissements, à l’exception de l’arrondissement AR-B, est soit stable ou faiblement croissante dans le temps. Ceci est le cas des arrondissements AR-D, AR-C et AR-E. Ce constat permet de prédire que l’état de performance du réseau pourra demeurer stable même si aucun moyen de protection n’est prévu. Or, pour l’ensemble du territoire de la Ville, la régression linéaire (Figure 5.35) relative aux nombres de bris total enregistrés au cours des années d’exploitation (1994-2004) est marquée par une tendance croissante. Selon cette régression, on décompte environ 43 bris par année à travers l’ensemble du réseau de la Ville.

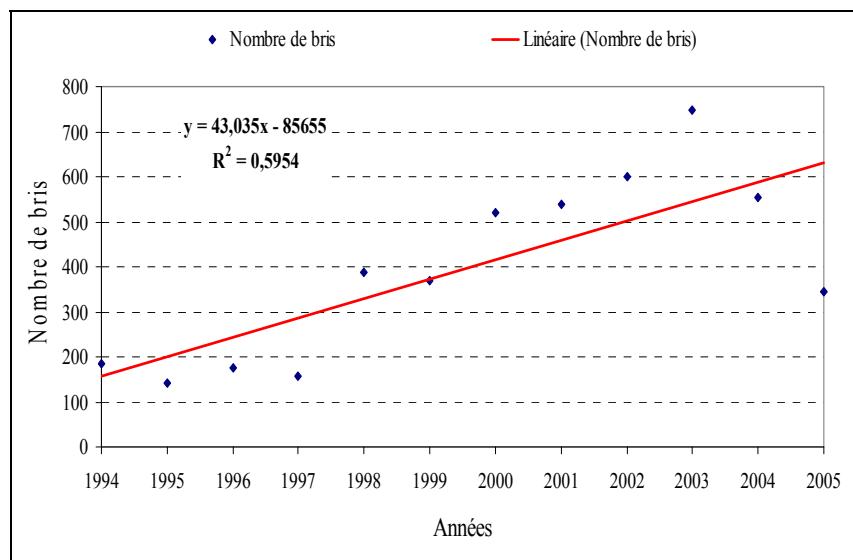


Figure 5.35 Évolution du nombre de bris en fonction des années répertoriées.

En référence au taux de bris sommaire déjà présenté au tableau 5.3, une corrélation est déterminée pour exprimer la variation des taux de bris moyens durant la période s'étalant de 1994 à 2004 (Figure 5.36).

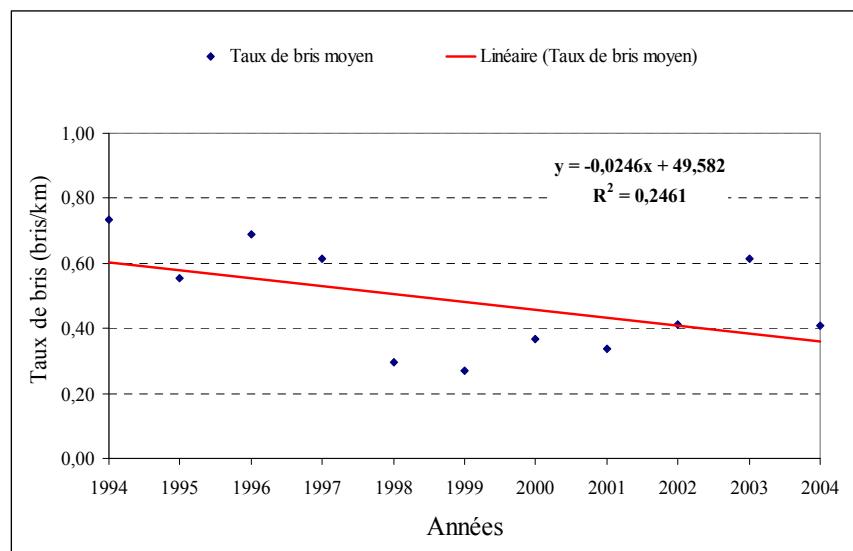


Figure 5.36 Évolution du taux de bris en fonction des années répertoriées.

L'allure décroissante des taux de bris dans cette plage de temps n'est pas due uniquement à l'âge du réseau mais plutôt à d'autres facteurs tels que les conditions climatiques et opérationnelles. Cependant, la valeur moyenne du taux de bris reste élevée (48%).

Le nombre de bris a également été rapporté en fonction des différents niveaux de résistivité du sol (Figure 5.37) pour l'ensemble du territoire de la Ville. La tendance révèle que les sols dont la résistivité est inférieure ou égale à 5000 Ohm.cm sont les plus assujettis aux bris. En effet, la diminution de la résistivité du sol donne l'opportunité d'activation aux cellules de corrosion ce qui donne lieu à l'accélération du processus de vieillissement des conduites.

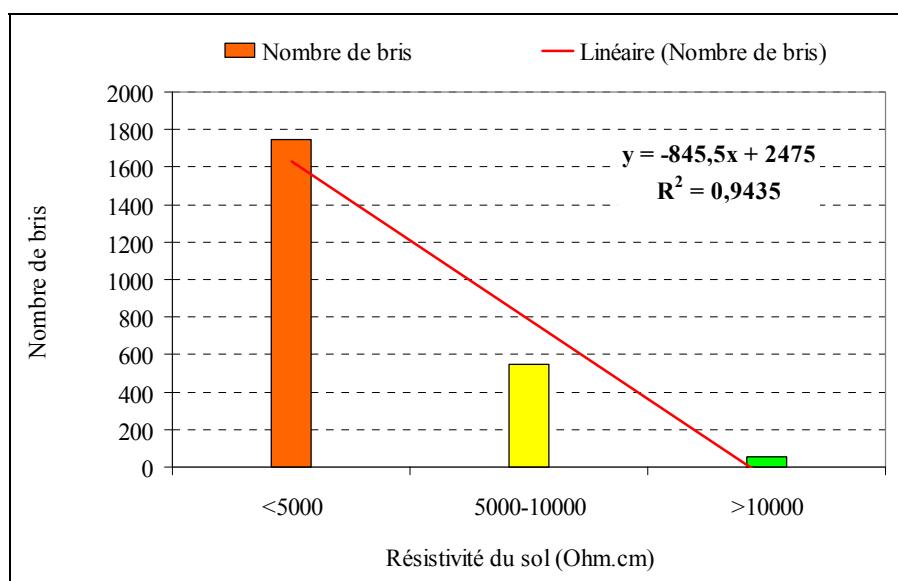


Figure 5.37 Évolution du nombre de bris en fonction de la résistivité du sol.

En ce qui concerne le facteur d'âge des conduites, ce dernier a une influence majeure sur la production des bris. De surcroît, cette influence devient prépondérante sur le processus de défaillance du matériau en présence d'un sol de résistivité inférieure ou égale à 5000 Ohm.cm. Les conduites les plus affectées par les bris étant d'ailleurs celles installées avant 1965 comme le montre la figure 5.38.

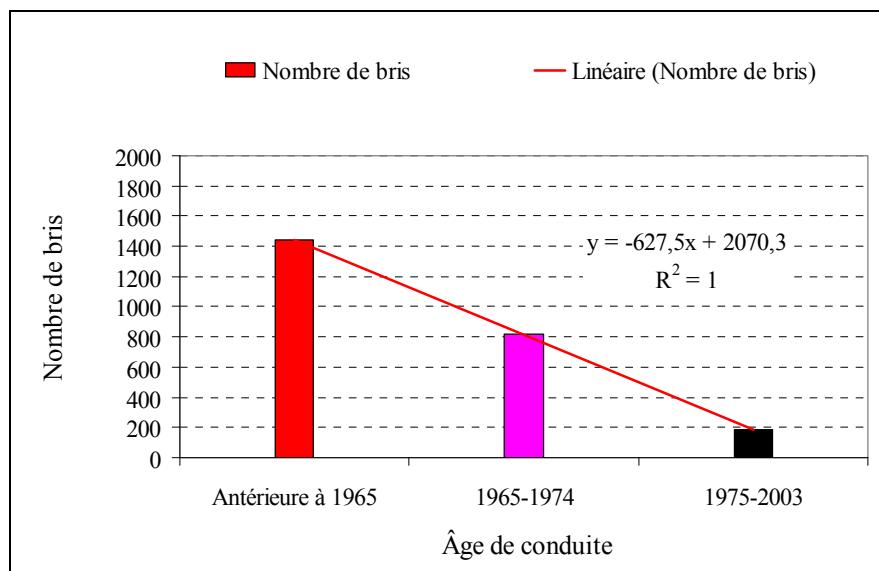


Figure 5.38 Évolution du nombre de bris en fonction de l'âge des conduites.

5.2.3 Synthèse

Il en ressort que l'évolution des bris des conduites du réseau d'aqueduc au niveau des arrondissements est considérée stable dans le temps. Néanmoins, il s'avère que les réseaux des arrondissements AR-F et AR-G sont les plus susceptibles aux bris. Cette situation fait que ces derniers doivent faire l'objet d'une intervention immédiate qui consiste en l'installation d'un système préventif pour réduire le taux du dommage.

Le système de protection cathodique a fait montrer son avantage de contrôle de la corrosion au niveau du réseau d'aqueduc de l'arrondissement AR-B où il a été constaté une nette diminution du taux de bris entre 2003 et 2004. Il est à souligner également que cette chute de bris ne serait pas due uniquement à l'âge du réseau mais plutôt à d'autres facteurs tels que les conditions atmosphériques et opérationnelles.

Les résultats d'analyses des données cartographiques montrent que les conduites en fonte les plus âgées demeurent les plus exposées aux défaillances. D'autre part, la courbe corrélative établie entre l'âge des conduites et l'évolution du nombre de bris (Figure 5.38) montre que

près de 60% des bris sont produits sur les conduites installées avant 1965.

Par ailleurs, on conclut que le taux de défaillance des conduites devient très élevé lorsque la conduite est enfouie dans un sol de résistivité inférieure à 5000 Ohm.cm. Comme le montre la figure 5.37, environ 75% de la totalité des bris sont produits dans cette plage de résistivité. De même, l'effet de ce paramètre est crucial lorsque l'âge des conduites est avancé.

5.3 Relevés de potentiel

5.3.1 Cueillette des données

La présente étape d'investigation consiste à appliquer la technique du relevé de potentiel à espace rapproché sur les deux types de sections de conduites à savoir:

- Conduites en fonte non protégées, soit les arrondissements AR-A, AR-C, AR-D, AR-E, AR-F et AR-G.
- Conduites en fonte protégées par le système de protection cathodique, soit l'arrondissement AR-B.

Le but de cette technique est d'évaluer l'état d'activité de corrosion au niveau des tronçons non protégés d'une part, et de la performance de la protection cathodique sur les conduites protégées d'une autre part.

5.3.1.1 Relevé de potentiel des conduites non protégées

Les résultats du relevé de potentiel sont présentés en forme de graphiques (Figure 5.39 à 5.44) où la variation des mesures de potentiel est rapportée en fonction du chaînage pour chacune des traçons de rues expertisés.

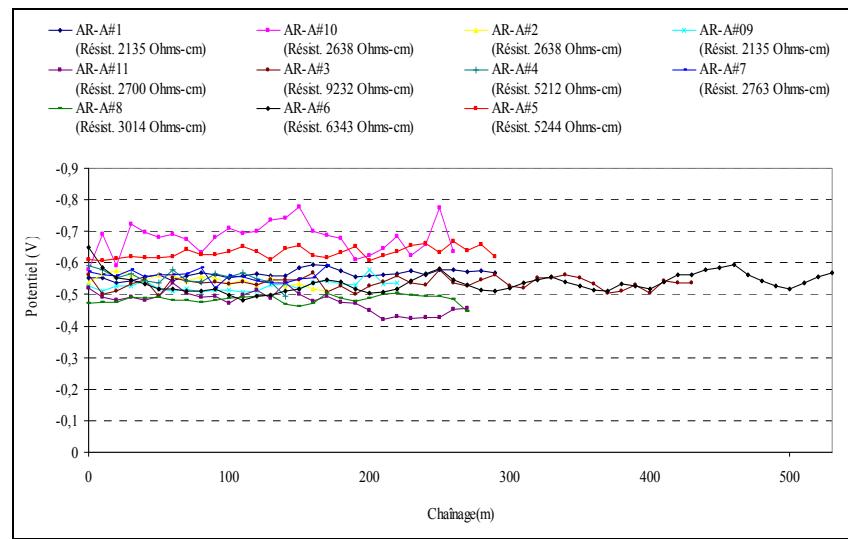


Figure 5.39 Potentiel statistique des conduites dans l’arrondissement AR-A.

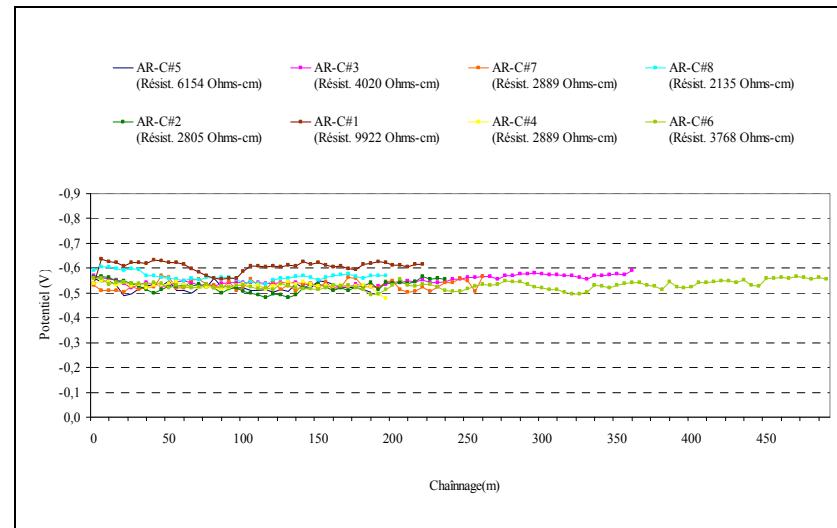


Figure 5.40 Potentiel statistique des conduites dans l’arrondissement AR-C.

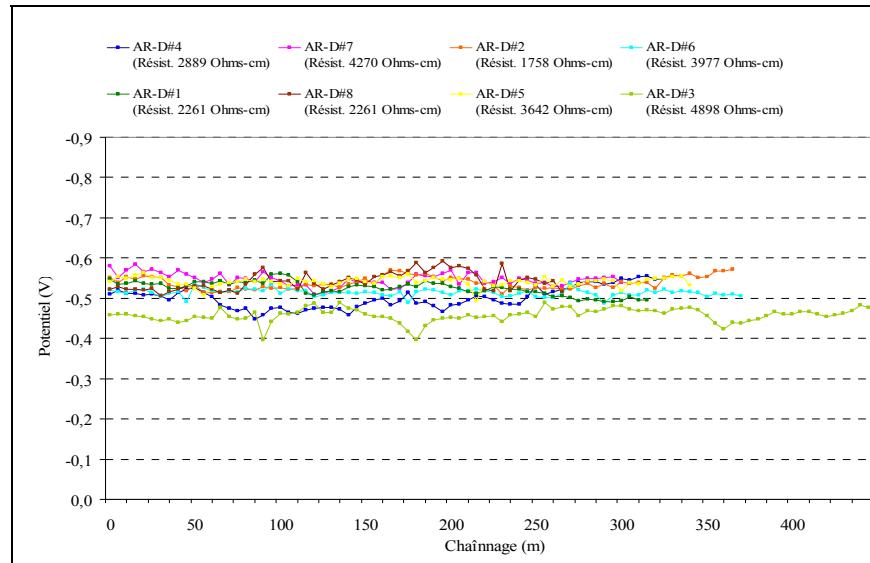


Figure 5.41 Potentiel statique des conduites dans l'arrondissement AR-D.

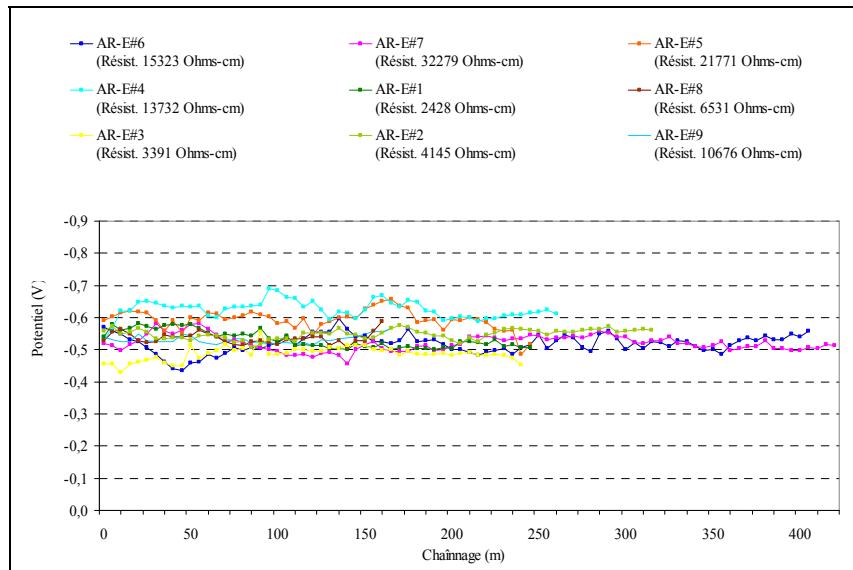


Figure 5.42 Potentiel statique des conduites dans l'arrondissement AR-E.

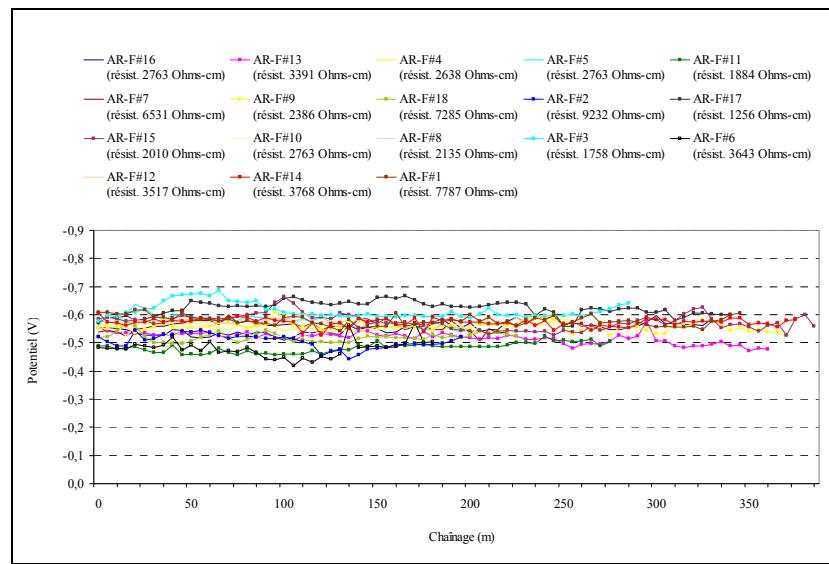


Figure 5.43 Potentiel statique des conduites dans l'arrondissement AR-F.

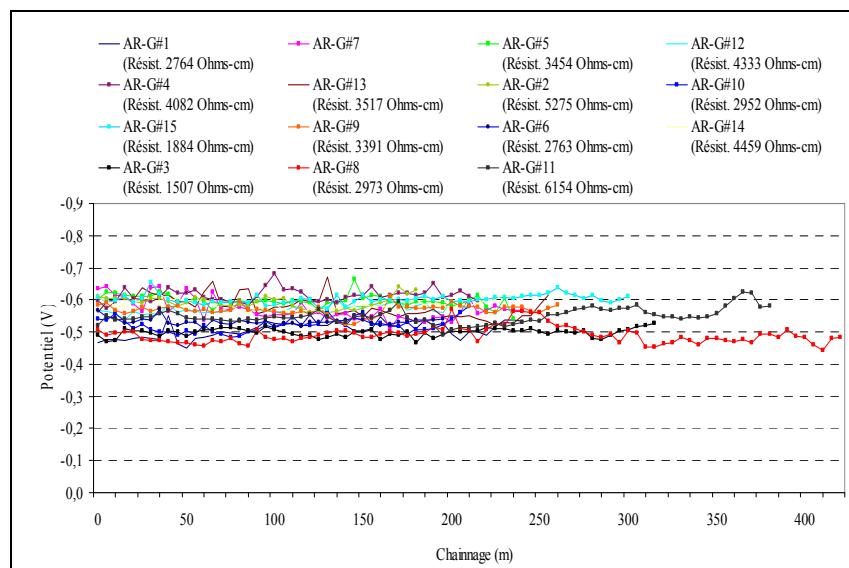


Figure 5.44 Potentiel statique des conduites dans l'arrondissement AR-G.

5.3.1.2 Relevé de potentiel des conduites protégées

Le relevé du potentiel réalisé sur les tronçons de rues de l'arrondissement AR-B a été effectué après avoir procédé à une investigation préliminaire au niveau des points de vérification existants, et ce afin de localiser les sections de conduites affectées.

La technique consiste à effectuer sur le terrain une collecte d'informations nécessaires au niveau de tous les points de vérification (PV) existants. Les informations recherchées portent sur :

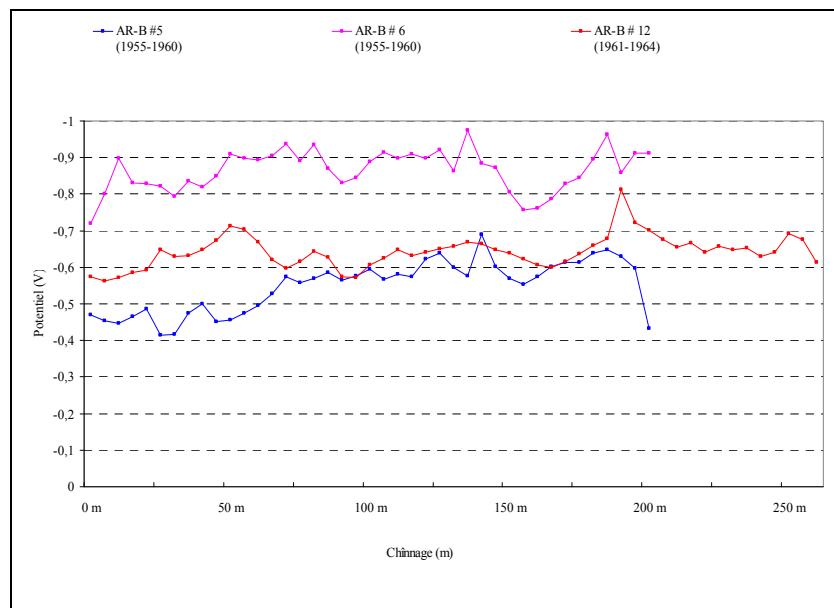
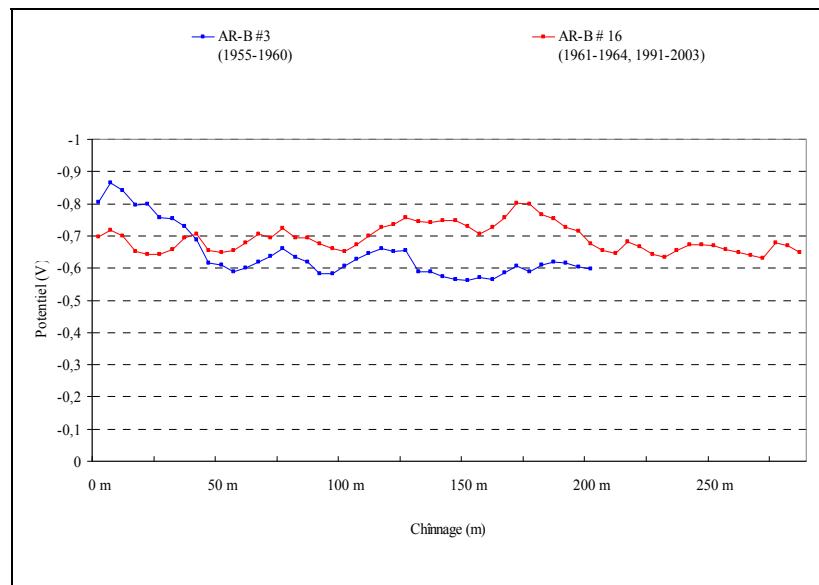
- Localisation du PV.
- Lecture du potentiel « On » et « instant off » de la conduite à l'aide du câble « négatif » #1 et # 2. Deux câbles négatifs étant généralement présents au niveau des PV.
- Lecture du potentiel de l'anode sacrificielle.
- Lecture du courant circulant entre l'anode et le câble « négatif ».

Au total, 220 points de vérification (PV) ont été localisés alors que 48 PV n'ont pu l'être. Le tableau 5.4 résume l'information relative aux points de vérification.

Tableau 5.4 Informations relatives aux PV

Item	Quantité
PV localisés	220
PV non localisés	48
PV non accessible	3
Total	271

Les relevés de potentiel des tronçons d'aqueduc de cet arrondissement AR-B sont présentés aux figures 5.45 à 5.49.



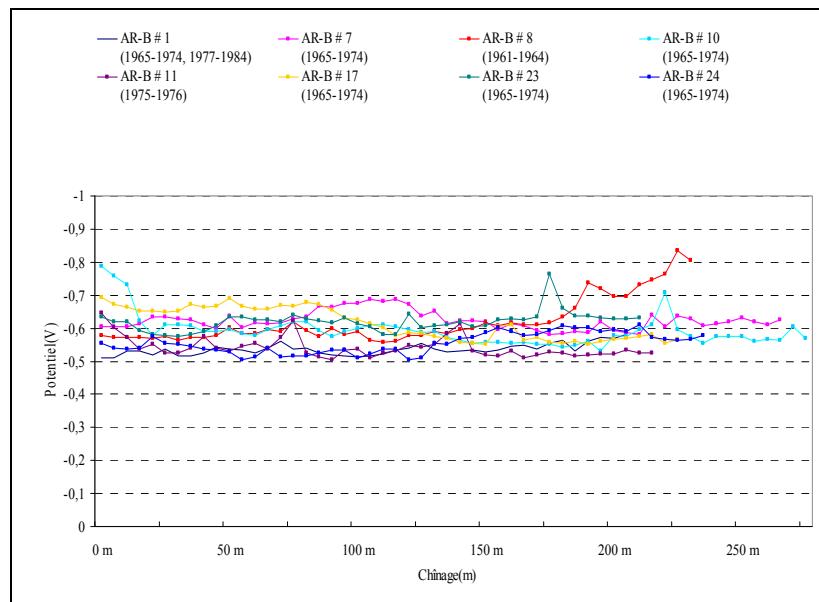


Figure 5.47 Potentiel des sections de conduites protégées depuis 1998 dans l'arrondissement AR-B.

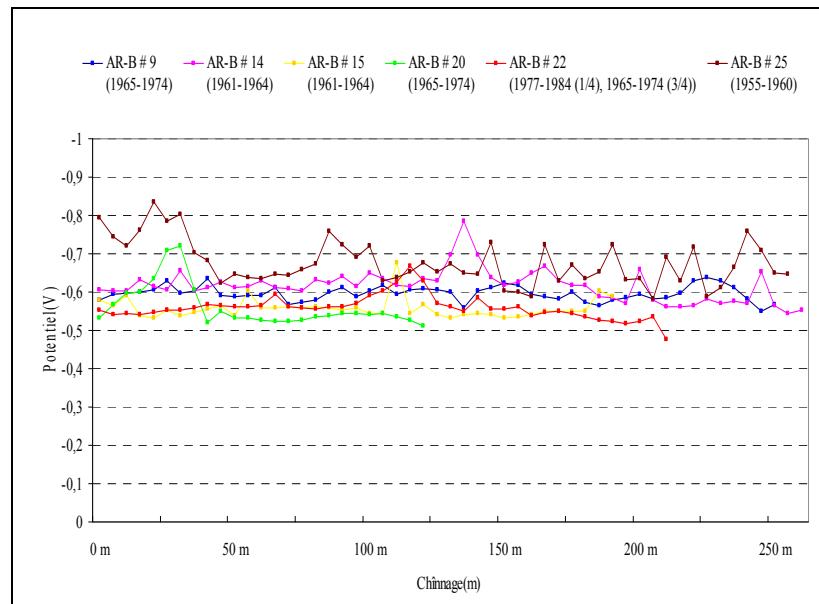


Figure 5.48 Potentiel des sections de conduites protégées depuis 1999 dans l'arrondissement AR-B.

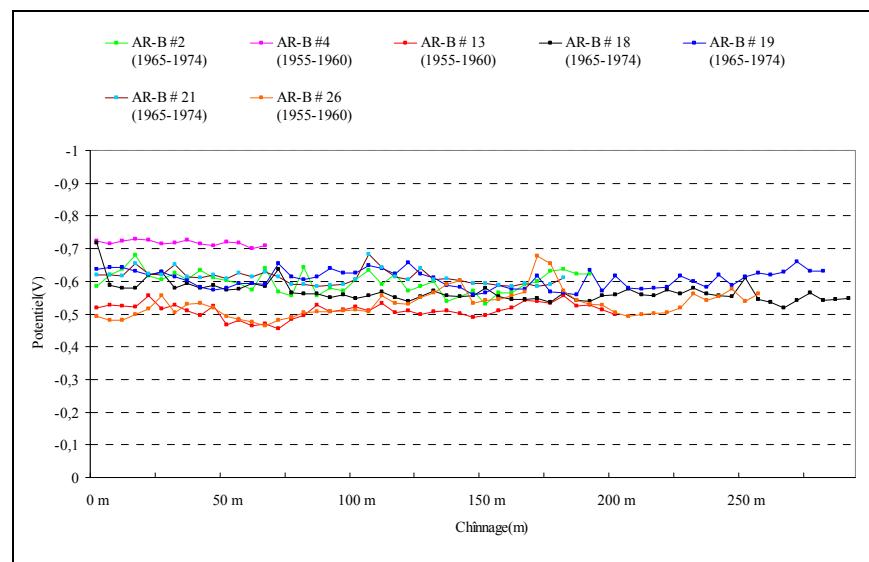


Figure 5.49 Potentiel des sections de conduites protégées depuis 2000 dans l’arrondissement AR-B.

Le tableau 5.5 présente l’année d’installation de la protection cathodique pour chaque tronçon de rue ainsi que les valeurs mesurées du potentiel moyen, minimum et maximum.

En fait, comme mentionné dans la dernière colonne du tableau, la polarisation moyenne de la conduite correspond à la différence entre le potentiel « ON » moyen mesuré et le potentiel « Statique » moyen considéré. Toutefois, le potentiel naturel (Statique) moyen considéré au niveau des points de vérification est de -550 mV (potentiel naturel par rapport à une électrode de référence Cu/CuSO₄).

Tableau 5.5 Synthèse du relevé de potentiel

N°	Nom de la rue	Année d'installation de la P.C.	Potentiel mesuré (V)			Polarisation moyenne (mV)
			Moyen	Minimum	Maximum	
1	AR-B#3	1994	-0.646	-0.864	-0.563	96
2	AR-B#16	1994	-0.692	-0.803	-0.632	142
4	AR-B#12	1997	-0.642	-0.812	-0.563	92
5	AR-B#5	1997	-0.548	-0.690	-0.414	< 0
3	AR-B#6	1997	-0.865	-0.974	-0.720	315
7	AR-B#1	1998	-0.536	-0.581	-0.509	< 0
11	AR-B#10	1998	-0.594	-0.789	-0.531	44
12	AR-B#11	1998	-0.542	-0.647	-0.505	< 0
9	AR-B#17	1998	-0.614	-0.693	-0.552	64
6	AR-B#23	1998	-0.620	-0.765	-0.576	70
8	AR-B#24	1998	-0.555	-0.611	-0.504	5
13	AR-B#7	1998	-0.623	-0.686	-0.580	73
10	AR-B#8	1998	-0.620	-0.834	-0.557	70
18	AR-B#15	1999	-0.558	-0.677	-0.532	8
15	AR-B#20	1999	-0.561	-0.720	-0.512	11
14	AR-B#22	1999	-0.560	-0.667	-0.477	10
16	AR-B#25	1999	-0.677	-0.835	-0.582	127
17	AR-B#14	1999	-0.615	-0.784	-0.543	65
19	AR-B#9	1999	-0.596	-0.637	-0.550	46
23	AR-B#13	2000	-0.510	-0.555	-0.456	< 0
24	AR-B#18	2000	-0.567	-0.717	-0.520	17
14	AR-B#22	1999	-0.560	-0.667	-0.477	10
16	AR-B#25	1999	-0.677	-0.835	-0.582	127
19	AR-B#9	1999	-0.596	-0.637	-0.550	46
23	AR-B#13	2000	-0.510	-0.555	-0.456	< 0
24	AR-B#18	2000	-0.567	-0.717	-0.520	17
25	AR-B#19	2000	-0.607	-0.660	-0.558	57
20	AR-B#2	2000	-0.598	-0.681	-0.529	48

5.3.2 Analyse et discussion

5.3.2.1 Sections de conduites non protégées

A) Arrondissement AR-A

Selon la figure 5.39, les valeurs du potentiel statique mesuré sont relativement homogènes pour la majorité des tronçons de rues. De plus, les rues AR-A#10 et AR-A#5 possèdent toutes deux les valeurs de potentiel moyennes les plus électronégatives alors que la rue AR-A#8 possède la valeur la moins électronégative. Pour l'ensemble des rues, les valeurs mesurées varient entre -422 et -608 mV pour le potentiel minimum, de -506 et -778 mV pour le potentiel maximum alors que celles du potentiel moyen se situent entre -479 et -633 mV.

B) Arrondissement AR-C

D'après la figure 5.40, les valeurs du potentiel statique minimum, maximum et moyen sont situées entre -479 et -537 mV, entre -550 et -638 mV et entre -523 et -606 mV respectivement. Les relevés du potentiel présentent généralement la même allure pour l'ensemble des rues expertisées. Il y a lieu de souligner que seule la rue AR-C#1 possède des valeurs de potentiel plus électronégatives pour une moyenne de -606 mV.

C) Arrondissement AR-D

La figure 5.41 relative aux mesures du potentiel statique montre que le potentiel des sections de rues est relativement homogène avec des moyennes très similaires. Ainsi, les valeurs du potentiel minimum sur les conduites expertisées dans cet arrondissement varient entre -396 et -509 mV tandis que celles du potentiel maximum se situent entre -447 et -510 mV. Les rues AR-D#3 et AR-D#4 font l'exception à cause de leurs potentiels les moins électronégatifs, soit -458 et -501 respectivement.

D) Arrondissement AR-E

La majorité des sections de rues expertisées présentent des niveaux de potentiel homogènes variant dans la plage de -500 à -600 mV (Figure 5.42). Les valeurs de potentiel minimum, maximum et moyen sont de -430 à -514 mV, de -556 à -690 mV et de -487 à -624 mV respectivement.

E) Arrondissement AR-G

Les tracés du relevé de potentiel (Figure 5.43) renseignent de l'homogénéité des valeurs prélevées pour l'ensemble des rues de l'arrondissement. Les valeurs de potentiel minimum, maximum et moyen sont de -443 et -575 mV, de -528 et -681 mV et de -491 et -614 mV respectivement.

F) Arrondissement AR-F

Les relevés de potentiel présentés à la figure 5.44 présentent la même tendance. Néanmoins, la rue AR-F#17 possède la valeur de potentiel moyen la plus électronégative, alors que les rues AR-F#6 et AR-F#11 possèdent les valeurs les plus électropositives.

En général, les valeurs du potentiel des sections se situent entre -420 et -578 mV, entre -523 - 688 mV et entre -480 et -623 mV respectivement pour le seuil minimum, maximum et moyen.

5.3.2.2 Sections de conduites protégées

A) Évaluation de l'efficacité de la protection cathodique aux points de vérification

Il a été constaté qu'au moins 17 points de vérification n'ont pu être localisés à cause de leur emplacement sur des terrains gazonnés qui ont caché les repères. De plus, on dénombre un minimum de 14 points de vérification qui ne sont pas repérables ni accessibles en raison des couches d'asphalte appliquées sur les rues.

L'évaluation de la protection cathodique au niveau des points de vérification (PV) a permis d'établir quatre situations distinctes:

- **Protection conforme :** Cet état correspond au cas où les lectures de potentiels démontrent que l'un des deux critères de protection décrits au paragraphe 6.2.2 de la norme NACE SP0169 est respecté. De ce fait, soit le potentiel « instant off » de la conduite est inférieur à -850 mV, soit la différence entre les potentiels « statique » et « instant off » est supérieure à 100 mV.
- **Protection non négligeable mais insuffisante :** Cet état correspond au cas où les lectures de potentiels démontrent qu'aucun des deux critères de protection décrits au paragraphe 6.2.2 de la norme NACE SP0169 n'est respecté. Or, cette norme exige une différence supérieure ou égale à 100 mV entre les potentiels « On » et « statique ».
- **Protection faible à nulle :** Cet état correspond au cas où les lectures de potentiels démontrent qu'aucun des deux critères de protection décrits au paragraphe 6.2.2 de la norme NACE SP0169 n'est pas respecté et que la différence entre les potentiels « On » et « statique » est inférieure à 100 mV. Dans ce cas, la protection de la conduite au PV est réellement faible.
- **Protection non fonctionnelle:** Cet état correspond au cas où la protection cathodique est non fonctionnelle pour diverses raisons à savoir câbles « négatifs » coupés, câble de l'anode coupé, anode consommée, connecteurs oxydés, câbles non connectés, bornier arraché ou cassé, PV non ouvrable, etc.

Suite à ces quatre situations soulevées, une classification des points de vérification (PV) a été élaborée comme le présent le tableau 5.6.

Tableau 5.6 Classification des PV selon la catégorie de protection

État de la protection	Quantité de PV
Protection conforme	32
Protection non négligeable mais insuffisante	45
Protection faible à nulle	19
Protection non fonctionnelle	124
Total	220

Les résultats illustrés sur la figure 5.50 démontrent que pour plus de la moitié des PV, soit 56%, la protection est non fonctionnelle. Cependant, cette protection est considérée conforme pour 15%, non négligeable mais insuffisante pour 20% et faible à nul pour seulement 9% du total des points de vérification.

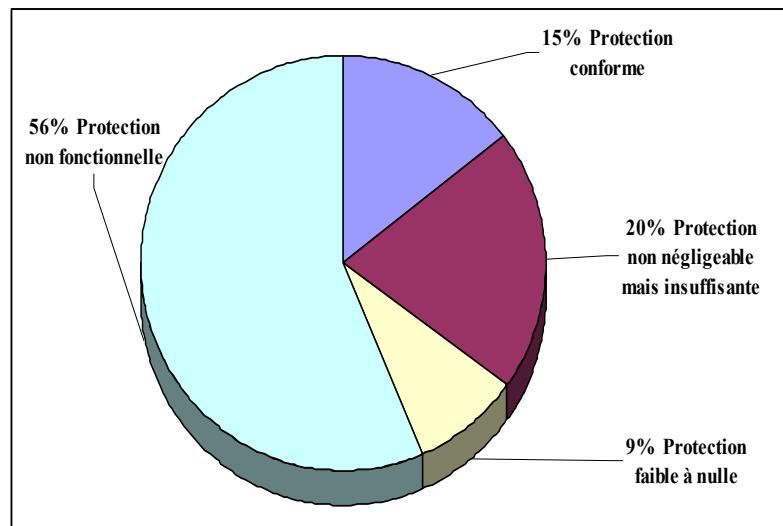


Figure 5.50 État de protection des points de vérification.

Dans le but de mieux évaluer la performance de la protection cathodique au niveau des points de vérification, on a également procédé à quantifier les points de vérification en terme du niveau de protection et de l'année d'installation (Tableaux 5.7 et 5.8).

Tableau 5.7 Répartition des PV par niveau de protection et année d'installation

État de la protection	1994	1997	1998	1999	2000
Protection conforme	1	15	1	8	7
Protection non négligeable mais insuffisante	1	3	2	23	16
Protection faible à nulle	0	0	0	10	9
Protection non fonctionnelle	0	10	62	30	22
Total	2	28	65	71	54

Tableau 5.8 Classification des PV par catégorie de protection et année de protection

État de la protection	1994	1997	1998	1999	2000
Protection conforme	0.5 %	7%	0.5 %	3.5 %	3%
Protection non négligeable, mais insuffisante	0.5 %	1.5 %	1%	10.5 %	7%
Protection faible à nulle	0%	0%	0%	4.5 %	4%
Protection non fonctionnelle	0%	4.5 %	28.5 %	13.5 %	10%
Total	1%	13%	30%	32%	24%

Les résultats obtenus démontrent que le niveau de protection des PV installés en 1994, donc les premiers à avoir été installés, est relativement bon dans le sens qu'il est conforme ou tout au moins non négligeable. Les PV ayant montré une protection non fonctionnelle sont très nombreux particulièrement pour l'année d'installation 1998.

Il s'avère donc évident que la performance des PV varie suivant l'année d'installation et la qualité d'installation. Ce constat est d'autant plus intéressant que les PV installés la première année, soit lors des premiers essais de la Ville, semblent être performants. Ceci porte à croire que la performance de ces PV datant de 1994 est peut être due à une conception et surtout à une installation rigoureuse du fait que les rues à protéger étaient peu nombreuses. De plus, l'entrepreneur aurait fourni l'effort nécessaire pour prouver sa compétence à la Ville pour les premiers essais réalisés en 1994.

B) Diagnostic de la défaillance de la protection cathodique

Les points de vérification localisés comme non fonctionnels sont nombreux pour diverses raisons. Afin de simplifier l'analyse, les causes du dysfonctionnement constatées sur les points de vérification expertisées ont été résumées dans le tableau 5.9.

Tableau 5.9 Causes des dysfonctionnements de la protection cathodique

N	Causes de dysfonctionnement	Nombre de PV	Taux (%)
1	Anode consommée ou câble d'anode coupé	38	30.7 %
2	Câbles « négatifs » coupés	23	18.5 %
3	Câble « négatif » #1 coupé mais câble « négatif » #2 potentiellement fonctionnel	10	8.1 %
4	Connecteur ne permettant pas le débranchement de l'anode	44	35.5 %
5	Câbles présents mais non reliés car trop courts	5	4 %
6	PV non ouvrable	2	1.6 %
7	Câbles non présents et bornier arraché	2	1.6 %
Total		124	100 %

Les données recueillies du tableau 5.9 montrent que la cause #4 concerne une proportion élevée de PV non fonctionnels, soit 35.5%. Si l'on considère que les causes #3, #4, #5, #6 et #7 correspondent à des situations réparables, 50% des PV pourront faire l'objet de réhabilitation.

Quant aux PV dysfonctionnels (causes #1 et #2) dont la proportion s'élève à près de 50%, leur réhabilitation est problématique. La remise en fonction de ces PV nécessite soit l'installation d'une nouvelle anode ou d'un nouveau « câble » négatif. Cette intervention requiert le recours à des excavations pour atteindre la conduite.

D'autre part, le fait que 86.5% des dysfonctionnements sont relatifs aux constats #1, #2 et #4 démontre que cette situation peut être attribuée à la qualité de l'installation et des matériaux choisis pour la mise en place des PV. Le non fonctionnement de l'anode s'explique par le fait que l'anode soit non durable, que le câble d'anode soit mal soudé au lingot de l'anode en magnésium ou qu'une manipulation non adéquate de l'anode sur le terrain ait affaibli ce câble.

C) Évaluation de la protection des conduites protégées

La représentation graphique (Figure 5.51) met en relief les niveaux de potentiel de polarisation des conduites des rues de l'arrondissement AR-B. Il en ressort que le degré de polarisation est inférieur à 100 mV pour environ 85% des rues inspectées de l'arrondissement. Ce constat fait en sorte que le système de protection cathodique mis en place ne devienne plus efficace contre l'évolution de la corrosion. Cependant, il est important de rappeler qu'une polarisation se situant entre 0 et 100 mV indique que le niveau de protection n'est pas nul mais plutôt insuffisant par rapport au seuil décrit par NACE SP1069. De même, il est aussi question de souligner l'exception pour le reste des rues inspectées, soit 4 du total des 26 rues, où le potentiel de polarisation moyen excède le seuil de 100 mV. Cet état procure une protection conforme pour les conduites.

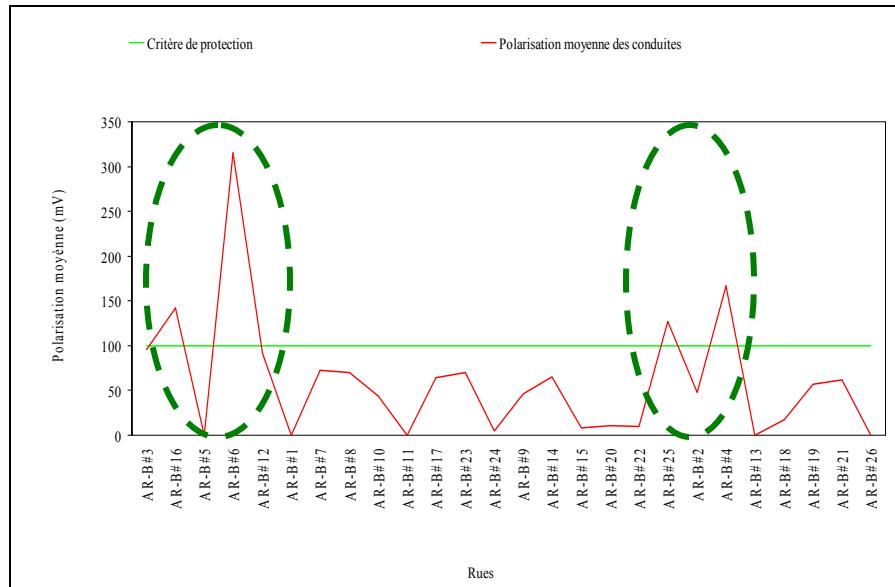


Figure 5.51 Potentiel de polarisation moyen des sections de conduite.

5.3.3 Synthèse

Pour les sections de conduite non protégées du réseau, le relevé de potentiel statique montre une faible dispersion des valeurs autour du potentiel standard caractérisant le matériau de fonte qui est de -550 mV. La variation du niveau de potentiel statique entre les différentes sections de conduites est provoquée par l'effet des interférences et l'activité des cellules de corrosion. Le potentiel statique de la conduite non protégée sert donc d'indicateur principal de l'activité de corrosion sur les conduites métalliques. Du point de vue électrochimique, ce potentiel est d'autant plus électronégatif que les cellules de corrosion sont fortement actives. En fait, les mesures du potentiel statique prises sur les conduites constituent une base fiable de données à des fins d'élaboration d'un éventuel plan de protection sur le réseau non protégé.

Concernant les sections de conduites du réseau protégé, il en ressort que l'état de performance de la protection cathodique des conduites est hétérogène dans la plupart des sections de conduites inspectées.

La variation des niveaux de protection est principalement due par l'insuffisance du courant débité par les systèmes installés. Ceci tend également à faire baisser le niveau de polarisation à des niveaux inférieurs à 100 mV, soit le seuil requis par la norme NACE SP0169. D'après ce critère, il apparaît clair que seul les systèmes de protection cathodique installés en 1994 et 1997 sont considérés efficaces.

Néanmoins, une performance insuffisante ne doit aucunement remettre en cause l'efficacité du système mis en œuvre mais c'est plutôt l'aspect design et le suivi de fonctionnement du système qu'il faut améliorer.

Concernant les relevés de potentiel «ON» présentés, on réalise que les valeurs de potentiel obtenues sont relativement constantes si l'on exclut les quelques fluctuations qui surviennent dans certains endroits. Ces fluctuations sont dues notamment aux deux phénomènes suivants :

- la présence d'une anode près de l'endroit de prélèvement. Auquel cas, une augmentation de la valeur de potentiel est généralement observée.
- la présence d'autres conduites avoisinantes qui influencent le résultat de la mesure. Ce cas est généralement relatif aux points d'intersection des rues.

5.4 Évaluation de l'activité de corrosion

5.4.1 Constitution d'une base de données

A) Arrondissement AR-A, Rue AR-AX1

Dans ce site, la conduite expertisée a été installée en 1965. Comme le montre la figure 5.52, la conduite présente un état visuel généralement bon avec une présence de graphitisation superficielle assez localisée.

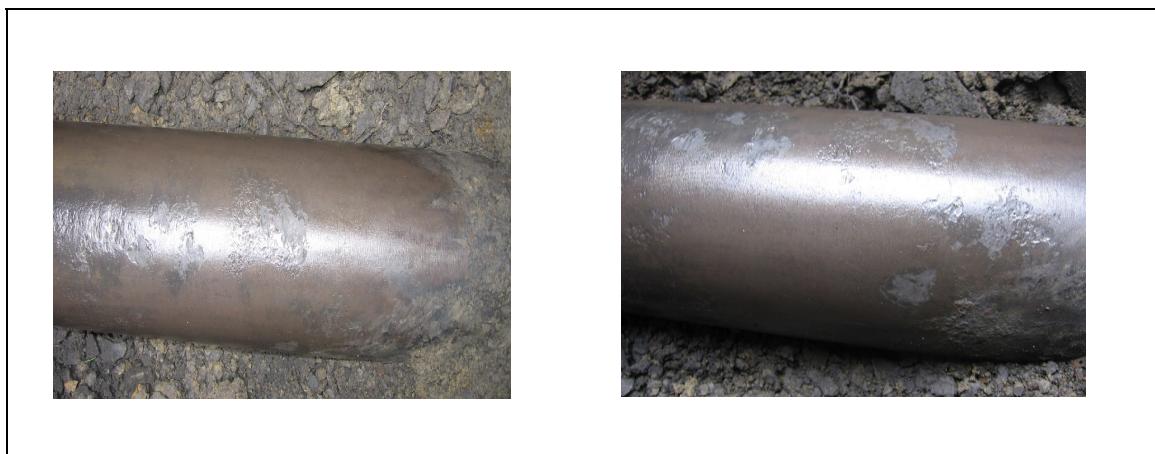


Figure 5.52 Phénomène de graphitisation de la conduite- Rue AR-AX1.

Concernant l'épaisseur résiduelle de la conduite, les mesures sur les quatre axes de la conduite (12h-12h, 3h-3h, 6h-6h et 9h-9h) correspondant aux quatre endroits considérés (A, B, C et D) donnent des valeurs qui s'échelonnent de 6.78 à 7.09 mm (Figure 5.53). Considérant les profondeurs des piqûres mesurées et présentées ci-dessous (Figure 5.54), l'épaisseur de la conduite peut diminuer jusqu'à une valeur moyenne de 5.98 mm. Cet état correspond à l'épaisseur moyenne moins la profondeur maximale de la piqûre.

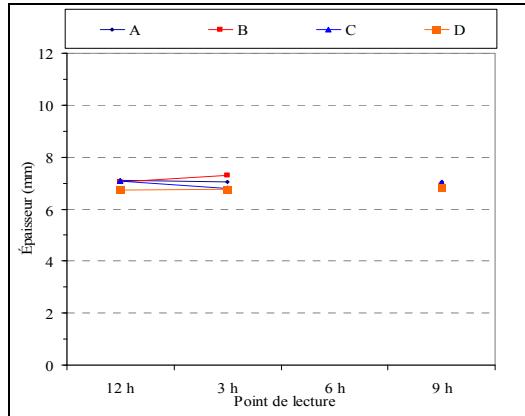


Figure 5.53 Épaisseur résiduelle de la conduite- Rue AR-AX1.

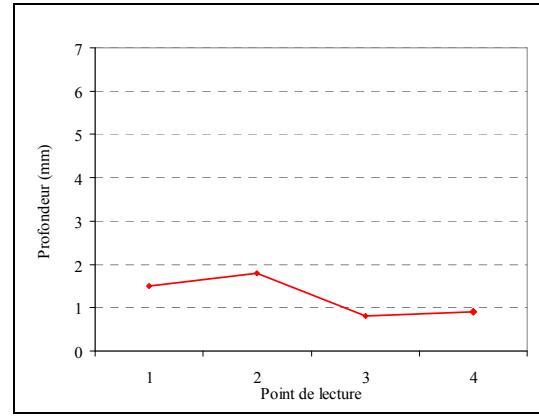


Figure 5.54 Profondeur des piqûres dans la conduite- Rue AR-AX1.

Selon la figure 5.54, la graphitisation a engendré des piqûres dont la profondeur varie entre 0.8 et 1.8 mm. De même, l'analyse du sol présentée à l'annexe II a permis de révéler ce qui suit:

- le sol entourant la conduite est moyennement corrosif;
- le taux de chlorures à la mi- profondeur de la conduite est de 117 ppm ;
- le taux de chlorures à pleine profondeur est de 10 ppm.

Le sol au-dessus de la conduite a donc une concentration en ions chlorures supérieure à 100 ppm ce qui laisse présager une contamination à moyen terme du sol entourant la conduite. En effet, il est important de considérer qu'avec le temps, les ions chlorures ont tendance à migrer plus profondément dans le sol avant de le rendre plus agressif envers la conduite. De plus, il est également pertinent de noter que la présence du gazon au-dessus de la conduite facilite également l'infiltration des ions chlorures dans le sol.

D'une manière générale, la conduite est confrontée à la corrosion qui se manifeste par le phénomène de graphitisation. Toutefois, l'état de corrosion de la conduite examinée est jugée comme étant moyen à faible.

B) Arrondissement AR-G

Deux excavations ont été effectuées sur le territoire de l'arrondissement AR-G, soit au niveau des rues AR-GX1 et AR-GX2.

B-1) Rue AR-GX1

La conduite a été installée en 1983 et l'inspection visuelle décèle simplement une graphitisation assez localisée. Cependant, cette graphitisation s'avère très prononcée en un point en particulier comme le montre la photo de droite de la figure 5.55.



Figure 5.55 Phénomène de graphitisation de la conduite- Rue AR-GX1.

L'épaisseur résiduelle de la conduite est relativement stable pour les 5 zones considérées (A, B, C, D et E) avec des valeurs allant de 5.63 à 5.81 mm comme le montre la figure 5.56. Concernant le phénomène de piqûre de corrosion, leur profondeur varie entre 1.0 et 5.6 mm comme le présente la courbe sur la figure 5.57.

En ce qui a trait au sol entourant la conduite, l'analyse présentée en Annexe II le classe dans la catégorie des sols corrosifs sans tenir compte de la faible concentration en ions chlorures. En fait, l'analyse a donné un taux de l'ordre de 62 ppm en ions chlorures à la mi-profondeur et 13 ppm à la pleine profondeur. Ces taux sont inférieurs à 100 ppm.

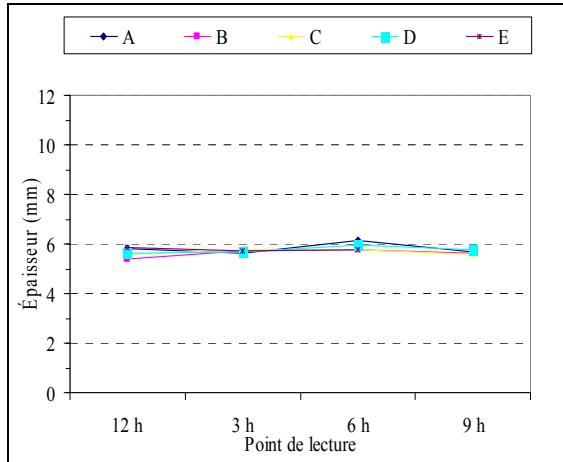


Figure 5.56 Épaisseur résiduelle de la conduite- Rue AR-GX1.

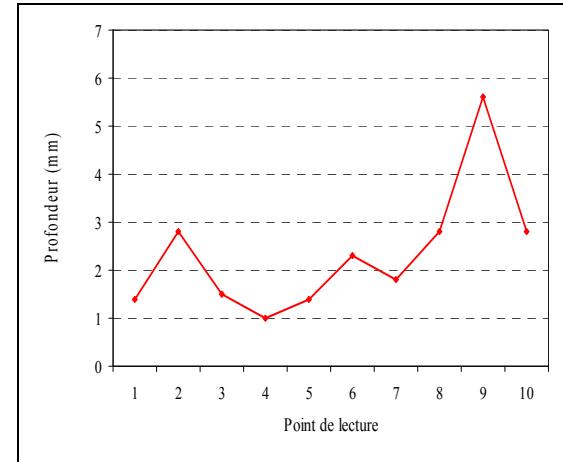


Figure 5.57 Profondeur des piqûres dans la conduite- Rue AR-GX1.

Ainsi, la corrosion se manifeste par une graphitisation très localisée dans certaines zones sur la surface de la conduite. L'allure du dommage renseigne du fait que le degré de corrosion peut être moyen comme sévère.

B-2) Rue AR-GX2

La conduite en question, installée en 1957, présente un aspect corrodé marqué par une graphitisation généralement superficielle (Figure 5.58) à l'exception de quelques endroits où l'altération est plus ou moins accentuée.

La mesure d'épaisseur de la section de conduite révèle une épaisseur résiduelle comprise entre 10.22 et 11.04 mm pour les 4 points considérés, A, B, C et D (Figure 5.59).



Figure 5.58 Phénomène de graphitisation de la conduite- Rue AR-GX2.

La profondeur des piqûres est de 0.5 mm au niveau des zones légèrement graphitisées et elle atteint un maximum de 5.3 mm aux endroits les plus affectés (Figure 5.60).

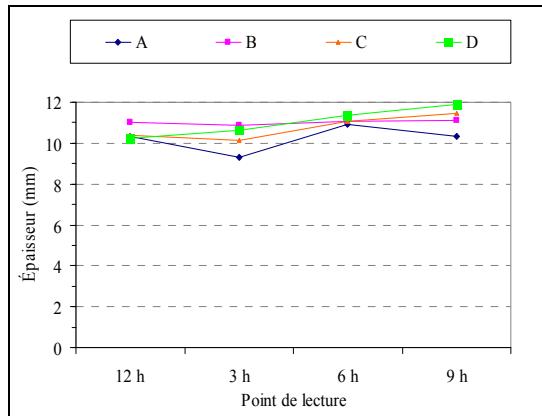


Figure 5.59 Épaisseur résiduelle de la conduite- Rue AR-GX2.

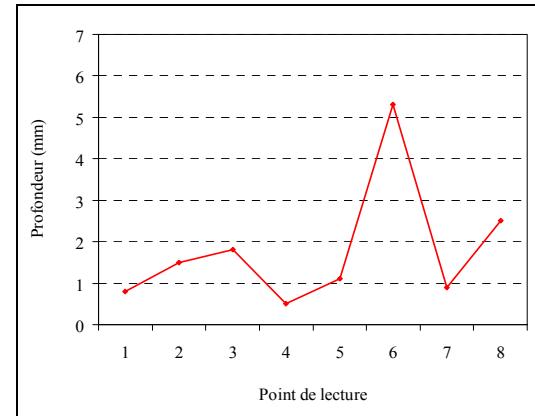


Figure 5.60 Profondeur des piqûres dans la conduite- Rue AR-GX2.

Les résultats d'analyse du sol présentés en annexe II mettent en évidence le caractère corrosif du sol. En plus, les taux de chlorures obtenus sont très élevés avec des valeurs de 182 ppm à la demi-profondeur et 159 ppm à la pleine profondeur.

La conduite présente des signes de corrosion se manifestant sous la forme de graphitisation. Le degré d'endommagement de la conduite varie de moyen à sévère.

C) Arrondissement AR-F

Pour cet arrondissement, deux excavations ont été effectuées, soit sur les rues surnommées AR-FX1 et AR-FX2.

C-1) Rue AR-FX1

La conduite a été installée en 1973. La figure 5.61 présente l'état corrodé de la section examinée où l'on observe une graphitisation généralisée et profonde. L'état d'endommagement de la conduite est donc très sévère.



Figure 5.61 Phénomène de graphitisation de la conduite- Rue AR-FX1.

Les épaisseurs résiduelles le long de la section de la conduite sont moins uniformes. La lecture des mesures donne des épaisseurs variables de 6.11 à 7.97 mm (figure 5.62). Si l'on compare la profondeur maximale de la piqûre (6.9 mm, voir figure 5.63) à l'épaisseur résiduelle de la conduite, certaines zones seront à la limite de la perforation.

L'état avancé de la graphitisation constatée sur la section de la conduite (Figure 5.61) vient appuyer les conclusions tirées sur l'état des conduites de l'arrondissement AR-F. En effet, comme l'illustre bien la figure 5.61, le raccordement des deux sections de la conduite par le moyen d'une barrette en cuivre assure la continuité électrique et par conséquent le développement d'un couple galvanique au niveau du joint.

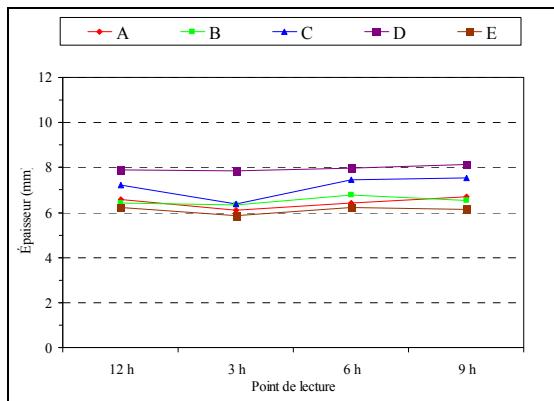


Figure 5.62 Épaisseur résiduelle de la conduite- Rue AR-FX1.

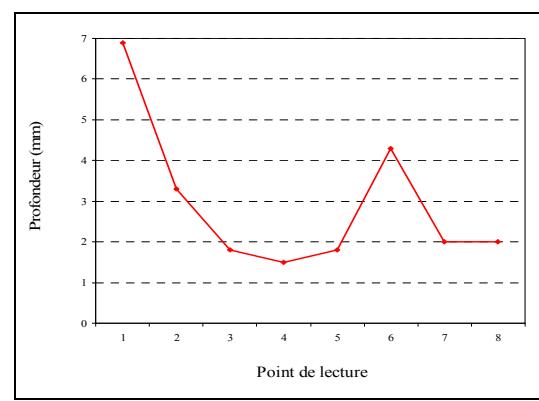


Figure 5.63 Profondeur des piqûres dans la conduite- Rue AR-FX1.

Les analyses du sol présentées en annexe II indiquent que celui-ci est peu corrosif. À propos des ions chlorures, leur concentration est faible, soit 11 ppm, et ce aussi bien à la mi-profondeur qu'à la pleine profondeur.

C-2) Rue AR-FX2

L'installation de la conduite date de 1972 et présente un état d'endommagement sévère caractérisé par une graphitisation généralisée sur l'ensemble de la surface. La figure 5.64 illustre l'état corrodé de la section examinée.



Figure 5.64 Phénomène de graphitisation de la conduite- Rue AR-FX2.

Selon le graphique de la figure 5.65, l'épaisseur résiduelle de la conduite se situe en moyenne entre 6.98 et 7.31 mm. Cependant, les piqûres sur la conduite présentent une profondeur allant de 1.5 à 4.2 mm comme le montre la figure 5.66.

D'après les analyses du sol (Annexe II) effectuées sur les deux échantillons, on constate que le sol est corrosif en dépit de la très faible concentration en ions chlorures. En effet, le taux de ces derniers n'étant que de 18 ppm à la demi-profondeur et de 10 ppm à la pleine profondeur de la conduite.

On conclut par les résultats d'analyse et l'inspection visuelle que la conduite est soumise à une corrosion sévère.

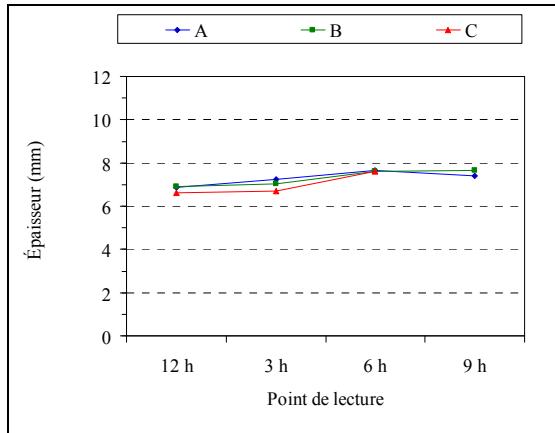


Figure 5.65 Épaisseur résiduelle de la conduite- Rue AR-FX2.

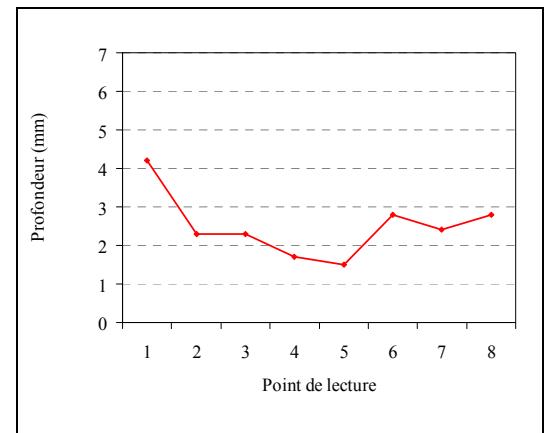


Figure 5.66 Profondeur des piqûres dans la conduite- Rue AR-FX2.

D) Arrondissement AR-D

D-1) Rue AR-DX1

La surface de la conduite installée en 1964 présente un état corrodé dû à une graphitisation généralisée très profonde comme le montre la figure 5.67.



Figure 5.67 Phénomène de graphitisation de la conduite- Rue AR-DX1.

Comme le montre la figure 5.68, l'épaisseur résiduelle de la conduite varie, en moyenne, entre 10.98 et 11.30 mm. Pour les piqûres localisées sur la surface, leur profondeur varie entre 1.8 et 3.8 mm selon le tracé de la figure 5.69.

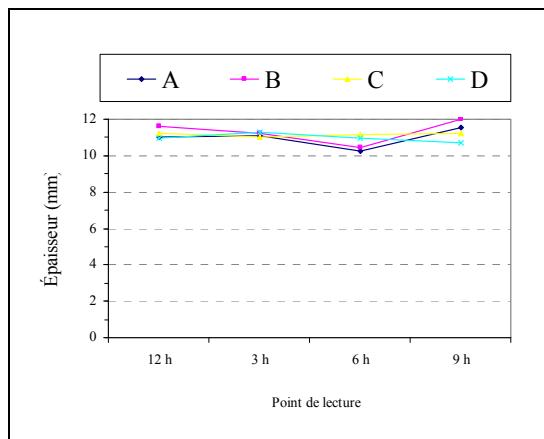


Figure 5.68 Épaisseur résiduelle de la conduite- Rue AR-DX1.

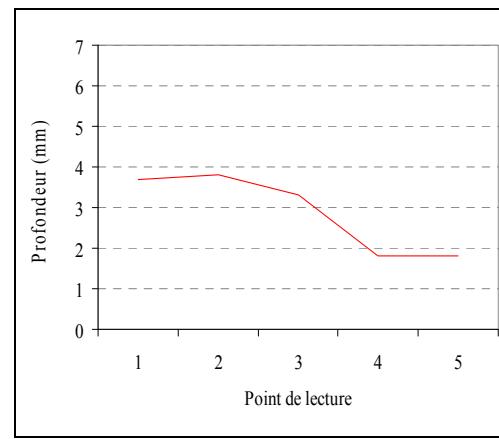


Figure 5.69 Profondeur des piqûres dans la conduite- Rue AR-DX1.

D'après les résultats de l'analyse du sol (Annexe II), le sol entourant la conduite est peu corrosif alors que celui situé à la mi- profondeur est agressif. De plus, l'analyse a relevé des concentrations respectives de 189 ppm et de 49 ppm en ions chlorures dans les sols prélevés à la mi- profondeur et à la pleine profondeur. D'après la norme California Test 422, la concentration des ions chlorures à la mi- profondeur du sol excède le seuil d'influence. Ainsi, il est important de considérer le fait que les ions chlorures ont tendance à s'infiltrer en profondeur dans le sol avant de le rendre agressif envers la conduite.

5.4.2 Analyse statistique des données

Il est important de rappeler que les résultats d'analyse des six (06) échantillons du sol prélevés à pleine profondeur aux endroits excavés sur une longueur de 1000 m sont présentés en annexe AII. Ces analyses portent sur le taux d'agressivité du sol et la concentration en ions chlorures.

À la lumière des données d'inspection directe, il en résulte que l'épaisseur résiduelle peut être servie comme indicateur d'évaluation de la vie résiduelle de la conduite. La figure 5.70 permet de juger de l'état de dégradation des différentes conduites en se basant sur le rapport de la profondeur max de la piqûre sur l'épaisseur moyenne. Or, un ratio supérieur à l'unité correspond à une conduite qui requiert un remplacement immédiat.

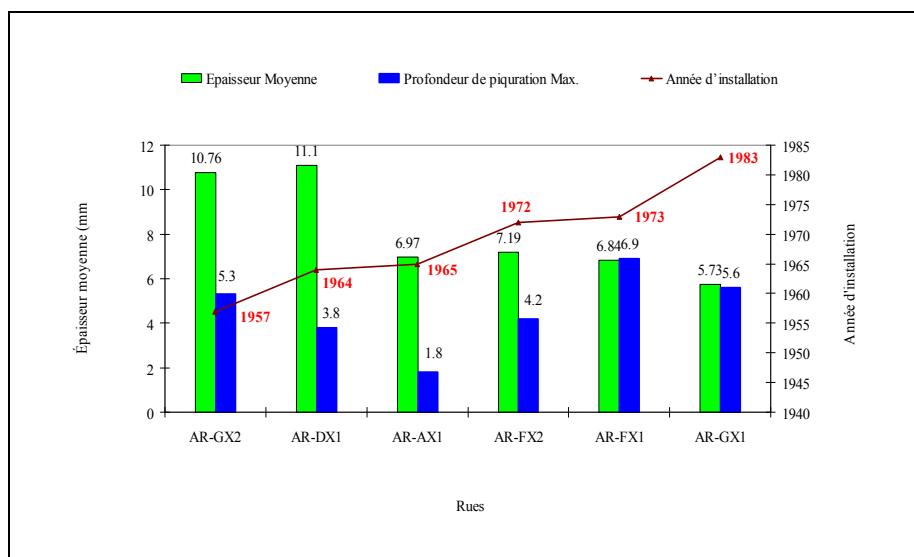


Figure 5.70 Épaisseur résiduelle et profondeur maximum des piqûres en fonction de l'âge des conduites.

À partir de ce critère d'évaluation, il s'avère clair que les conduites AR-FX1 et AR-GX1 doivent faire l'objet d'une réhabilitation immédiate. Dans la même logique d'analyse, un suivi préventif est de mise pour les sections AR-FX2 et AR-GX2. Cependant, les sections AR-AX1 et AR-DX semblent être les moins endommagées.

Dans ce qui suit, on procède à la compilation des résultats provenant de l'inspection in-situ (épaisseur résiduelle, profondeur des piqûres et âge) et ceux obtenus dans le laboratoire (résistivité du sol, pH, ions chlorures) afin de pouvoir établir l'effet pertinent de ces paramètres sur la vitesse de corrosion. Cette dernière est désignée par MPPR (vitesse de pénétration maximum de la piqûre).

5.4.2.1 Effet de la résistivité du sol sur la vitesse de corrosion

La vitesse maximum de corrosion (MPPR) est définie comme étant le rapport entre la profondeur maximum de la piqûre sur la conduite et l'âge de celle-ci. D'après les résultats présentés au tableau 5.10, une courbe de régression a été calculée comme le montre la figure 5.71 où l'on constate que la vitesse de corrosion décroît avec l'augmentation de la résistivité du sol.

Tableau 5.10 Effet de la résistivité du sol sur la vitesse de corrosion

Rue d'excavation	Résistivité du sol à 02 m (Ohm.cm)	Vitesse de pénétration max (mm/année)
AR-AX1	1800	0.04
AR-FX1	3000	0.20
AR-FX2	1300	0.20
AR-GX1	790	0.23
AR-GX2	1500	0.11
AR-DX1	3800	0.09

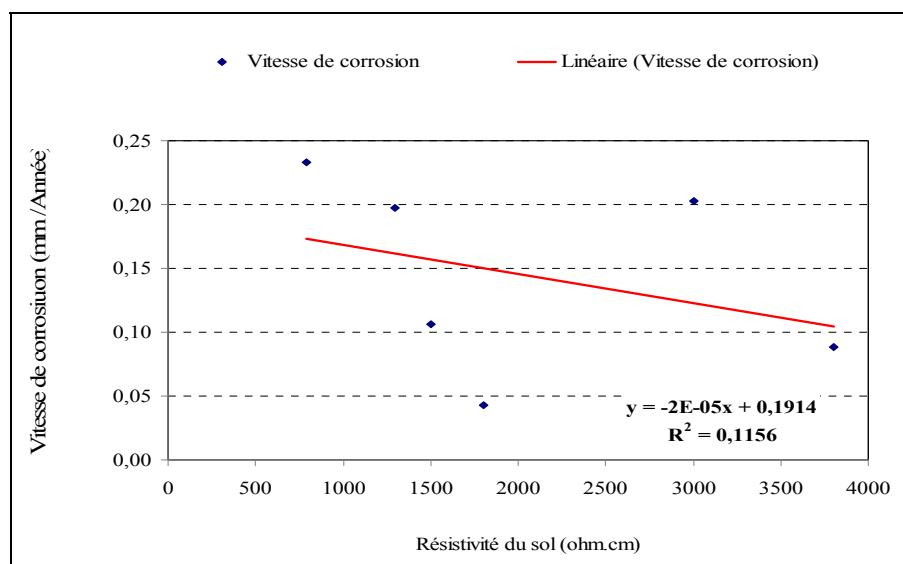


Figure 5.71 Effet de la résistivité du sol sur la vitesse de corrosion.

Étant donnée la faible valeur du coefficient de détermination R^2 , l'équation de régression linéaire déterminée ne peut représenter adéquatement la relation entre la résistivité du sol et la vitesse de corrosion. D'autant plus que la taille de l'échantillon est très limitée. Cependant, qualitativement la courbe de variation montre clairement que la vitesse de corrosion décroît avec la résistivité du sol.

D'ailleurs, la vitesse de corrosion maximum déterminée pour les six sections examinées est de 0.23 mm/année (tableau 5.10). Cette valeur est attribuée à la conduite AR-GX1 installée en 1983 dans un sol très corrosif où la résistivité est très basse, soit de 790 Ohm.cm. Cette remarque contribue à corroborer le fait que l'agressivité du sol a un effet prononcé sur la vitesse de corrosion et ce malgré que la conduite est considérée comme relativement récente.

Cependant, on observe que la vitesse de corrosion décroît nettement avec l'augmentation de la résistivité du sol dans la plage de 500 à 2000 Ohm.cm. Pour nous en convaincre, nous avons calculé une équation de régression entre la vitesse de corrosion et les valeurs de résistivité du sol en écartant les deux valeurs de résistivité supérieures à 3000 Ohm.cm.

Les résultats de calcul sont présentés à la figure 5.72 ci-après. Comme l'indique le coefficient de régression, la corrélation entre la vitesse de corrosion et la résistivité du sol a été nettement améliorée avec un coefficient de régression $R^2 = 0.8875$.

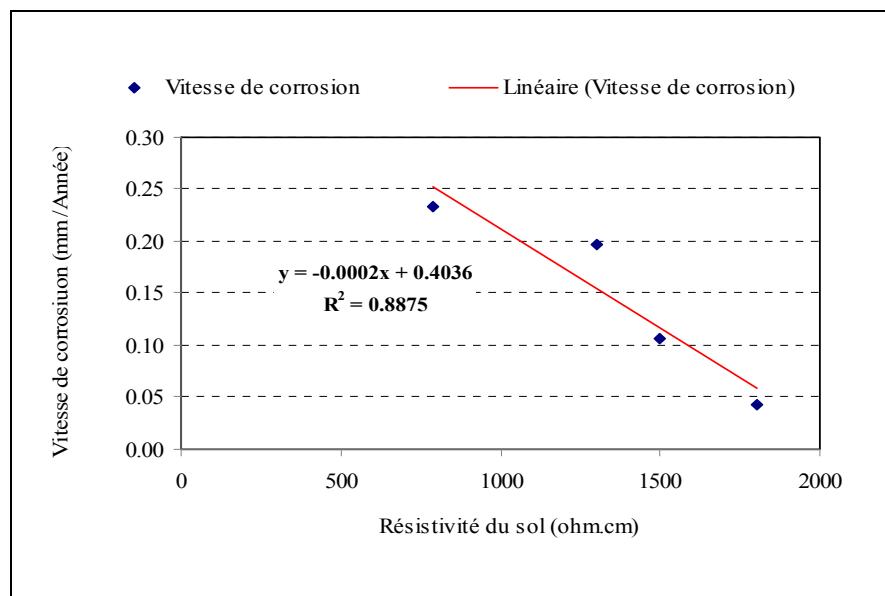


Figure 5.72 Effet corrigé de la résistivité du sol sur la vitesse de corrosion.

5.4.2.2 Effet des ions chlorures sur la résistivité du sol

En référence aux données du tableau AII-1 et AII-2 de l'annexe AII, les concertations obtenues en ions chlorures sont inférieures à 100 ppm à l'exception de la section AR-FX2 où l'on signale une concentration de l'ordre de 158.844 ppm à la pleine profondeur de 2 m. Or, d'après la norme California 422, le sol commence à développer un caractère agressif à partir d'une concentration supérieure ou égale à 100 pm en ions chlorures.

Pour le secteur AR-FX2 où la concentration maximale a été enregistrée (158.844 ppm), on a obtenu une résistivité de 1300 Ohm.cm et une vitesse de corrosion maximum MPPR de 0.20 mm/année.

5.4.2.3 Effet du pH sur la résistivité du sol

La variation de la résistivité du sol en fonction du pH a été approchée pour les six (6) échantillons de sol. Les résultats présentés au tableau 5.11 sont extraits du tableau AII-1 en annexe.

L'allure de la courbe présentée à la Figure 5.73 permet de constater que la résistivité du sol est influencée par l'augmentation du pH. Quoique, le coefficient de détermination R^2 obtenu soit relativement faible, il demeure statistiquement significatif.

Tableau 5.11 Variation du pH et résistivité du sol à 2 m

Rue d'excavation	pH	Résistivité du sol à 2 m (Ohm. Cm)
AR-AX1	7.79	1800
AR-FX1	8.08	3000
AR-FX2	7.86	1300
AR-GX1	6.92	790
AR-GX2	7.85	1500
AR-DX1	7.93	3800

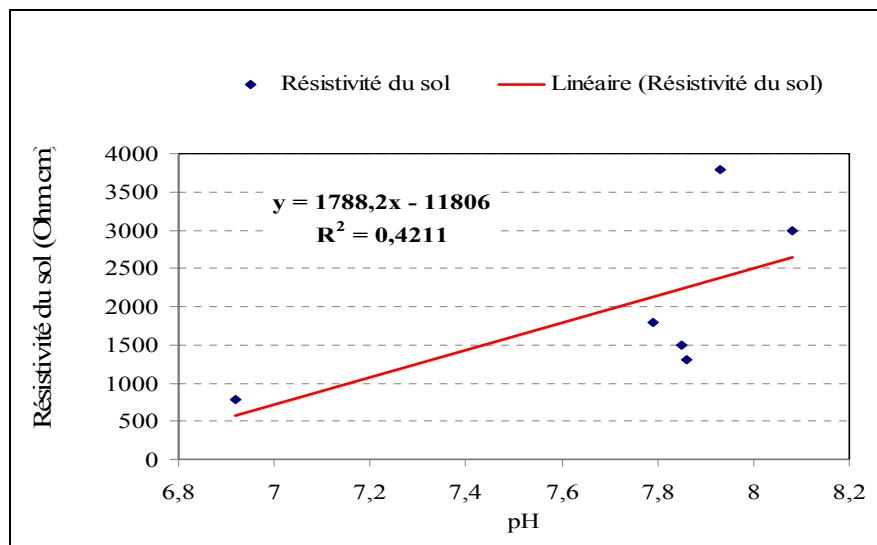


Figure 5.73 Effet du pH sur la résistivité du sol à 2 m.

D'après le graphe, on remarque que la plus basse résistivité du sol mesurée, soit 790 Ohm.cm, correspond au plus bas pH qui est de 6.92. Cette condition donne lieu à une vitesse de corrosion maximale (MPPR) de 0.23 mm/année. Il faut souligner là encore que le nombre de point d'échantillonnage est relativement limité et que d'autres mesures sont nécessaires pour préciser davantage la relation entre le pH et la résistivité du sol.

5.4.2.4 Effet de la résistivité du sol sur la corrosivité du sol

L'objectif, dans ce paragraphe, est d'analyser la cohérence entre la résistivité du sol et l'effet cumulé d'un ensemble de facteurs déterminant la corrosivité du sol. Cet effet est défini par le système de pointage de 10 points (AWWA C105). Ce dernier, abordé au chapitre 3 (Tableau 3.2), inclut la contribution des paramètres suivants : résistivité du sol, pH, potentiel Rédox, présence de sulfures et le taux d'humidité.

D'après le graphique 5.74, une grande harmonie est observée au niveau de l'allure des deux aires correspondant respectivement au pointage attribué à l'effet cumulé de l'ensemble des paramètres et à celui relatif à l'effet de la résistivité du sol. Cette illustration permet de démontrer que la résistivité du sol représente le paramètre le plus explicatif du phénomène de la corrosion, soit près de 75%, dans l'effet total cumulé de l'ensemble des paramètres sur l'agressivité du sol. Ainsi, on peut conclure que la résistivité du sol à l'état saturé constitue le meilleur indicateur de corrosivité du sol.

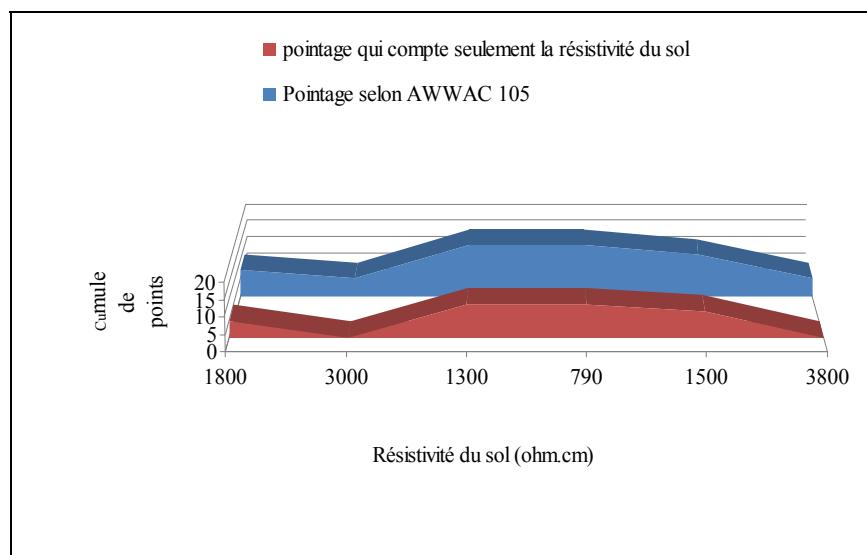


Figure 5.74 Contribution de la résistivité du sol dans le système de pointage selon la norme AWWAC 105.

5.4.2.5 Effet cumulé des paramètres de pointage sur la vitesse de corrosion

Selon la norme AWWA C 105, l'échelle de mesure de la corrosivité du sol est traduite par le cumulatif du nombre de points cumulatifs attribué aux différents facteurs d'influence. Dans le but de valider cette méthode de pointage (10 points), on a procédé à représenter graphiquement la variation de la vitesse de corrosion en fonction du nombre de points cumulatif pour chaque échantillon du sol. La figure 5.75 montre la tendance dégagée des données du tableau 5.12.

Tableau 5.12 Vitesse de corrosion en rapport avec le cumul des points

Rue d'excavation	Cumul des points d'après AWWAC105	Vitesse de pénétration max (mm/année)
AR-AX1	8	0.04
AR-FX1	5,5	0.20
AR-FX2	15,5	0.20
AR-GX1	15,5	0.23
AR-GX2	12,5	0.11
AR-DX1	5,5	0.09

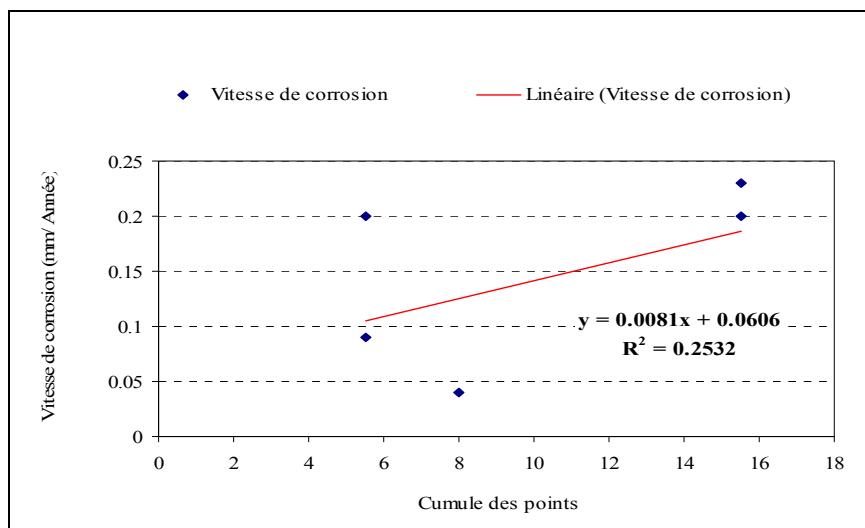


Figure 5.75 Effet cumulé des paramètres de pointage sur la vitesse de corrosion.

Le coefficient de détermination $R^2 = 0.25$, ainsi obtenu étant faible, il est difficile d'établir une relation univoque entre la vitesse de corrosion et les points cumulatifs des paramètres de corrosion. On remarque cependant que les vitesses de corrosion correspondant à des points cumulatifs supérieurs à 8 sont bien alignées selon une droite de régression bien identifiée. Pour nous en convaincre, nous avons calculé une équation de régression entre la vitesse de corrosion et les points cumulatifs en écartant les deux points inférieurs à 8. Les résultats d'un tel calcul sont présentés à la figure 5.76. Comme on s'y attendait, la corrélation entre la vitesse de corrosion et les points cumulatifs a été nettement améliorée avec un coefficient de détermination approchant 0.94.

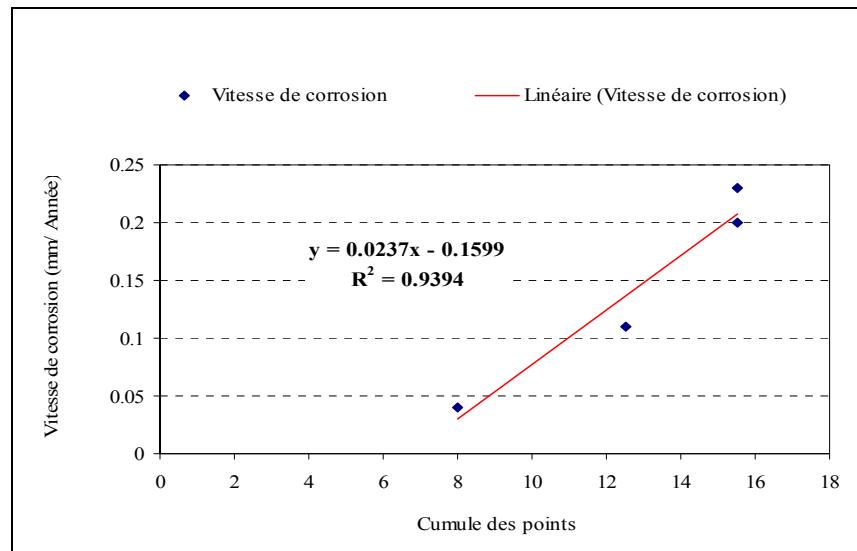


Figure 5.76 Effet cumulé corrigé des paramètres de pointage sur la vitesse de corrosion.

Il en résulte que la corrosivité du sol exerce un effet important sur la vitesse de corrosion. Autrement dit, la vitesse de corrosion augmente au fur et à mesure de l'augmentation des points cumulatifs. Ce constat valide l'applicabilité de la norme AWWAC105 qui souligne le fait que le sol est jugé corrosif à partir d'un seuil de points cumulatifs supérieurs ou égal à 10.

5.4.3 Synthèse

5.4.3.1 État de la corrosion sur les conduites

Le premier constat qui résulte des différentes analyses d'inspection directe réside dans la présence active de la corrosion sous forme graphitisation sur l'ensemble des six (06) sections de conduites. Il est cependant important de noter que les conduites des différents arrondissements ne sont pas toutes corrodées avec le même degré d'intensité. En effet, certaines sections ont conservé un état relativement bon alors que d'autres sont très endommagées comme c'est le cas des AR-FX1 et AR-FX2. Ces deux conduites présentent une graphitisation généralisée sur l'ensemble de la surface avec des attaques très profondes dans certains endroits.

Il ressort également que l'âge des conduites ne semble pas forcément être le seul facteur influent sur l'état d'avancement de la corrosion pour les cas observés. Suite aux résultats présentés par la figure 5.70, on remarque que certaines conduites plus âgées conservent une meilleure tenue à la corrosion que d'autres conduites relativement récentes.

5.4.3.2 Causes de la corrosion des conduites

Il est important de souligner que toutes les mesures de résistivité du sol à la pleine profondeur sont basses pour favoriser la manifestation de la corrosion par graphitisation sur les conduites considérées.

Il s'ensuit que les mesures de la résistivité des échantillons prélevés du sol et celles obtenues par la méthode de Wenner sont comparables. Ce constat permet donc de démontrer la validité des mesures de résistivité réalisées.

Les sites d'excavation ont été préalablement sélectionnés sur les zones à plus forte concentration de bris. Ce choix valide également l'influence considérable de la très faible résistivité du sol sur le taux de bris observés.

L'analyse du sol a montré que le sol à 1 m de profondeur est plus agressif que celui à 2 mètres. Cette différence d'agressivité est due principalement à la contamination du sol par les sels de déglaçage. Néanmoins, les ions chlorures s'infiltrent avec le temps dans le sol pour atteindre la conduite et rendre ainsi le sol environnant plus agressif.

Concernant les corrélations établies entre les facteurs structuraux et environnementaux, il a été établi que :

- La technique des dix (10) points décrite par la norme AWWAC105 est très fiable dans la mesure qu'elle offre une assurance précise dans l'évaluation du caractère du sol entourant les conduites en fonte.
- La vitesse de corrosion augmente avec le degré de corrosivité du sol.
- La réduction de pH du sol réduit la résistivité du sol et augmente la vitesse de corrosion.
- La présence du sel (ion chlorures) dans le sol avec des concentrations supérieures à 100ppm fait baisser la résistivité du sol et accélère la vitesse de corrosion sur les conduites en fonte.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les techniques d'investigations réalisées sur le chantier ainsi que les analyses établies au laboratoire par le modèle de diagnostic et d'évaluation proposé ont permis de faire ressortir les conclusions ci-après :

Il est admis que le taux de corrosion par piqûres externes sur les matériaux ferreux non protégés est régi principalement par la corrosivité de l'environnement. Cette corrosion par piqûration est considérée comme étant le mode de défaillance principal des tuyaux en fonte.

Dans le processus de corrosion, il est évident que la corrosion est stimulée dans les électrolytes à faible résistivité. Ce postulat est bien validé par la corrélation établie entre les valeurs de la vitesse de corrosion calculée (MPPR) et celles de la résistivité des sols mesurées en laboratoire. De plus, les résultats d'analyse révèlent que de la vitesse de corrosion décroît à mesure que la résistivité du sol augmente. À ce sujet, ce dernier paramètre est considéré comme le meilleur indicateur pour la corrosivité du sol. Ainsi, on retient que 75% des points cumulés du système de pointage sont attribués à la résistivité dont l'influence sur la vitesse de corrosion est typiquement linéaire. En addition, la plus grande concentration du taux de bris ($> 2.75 \%$) a été localisée au niveau de sols très faiblement résistifs.

En se basant sur les statistiques de résistivité, les résultats d'inspection visuelle ainsi que la mesure des profondeurs de piqûres de corrosion, on trouve que l'état du réseau de conduites non protégées est caractérisé comme suit :

- 67% de sections nécessitent une implantation immédiate d'un système de réhabilitation. Ceci est d'autant plus nécessaire que l'épaisseur résiduelle de ces dernières ne représente plus que 75 voire 50% dans certains cas de l'épaisseur initiale.
- 33% des sections nécessitent un remplacement immédiat suite à leur état de dégradation avancée comme c'est particulièrement le cas du réseau de l'arrondissement AR-F et AR-G.

L'analyse statistique des bris dans le réseau de conduites a mis en évidence que le premier critère responsable des bris d'aqueduc est l'année de pose de la conduite. Cependant, les travaux d'excavation réalisés ont démontré que la corrosivité d'un sol de très faible résistivité, soit inférieure à 3000 Ohm.cm, exerce un effet crucial sur la vitesse de corrosion de la conduite et ce indépendamment de l'année d'installation de celle-ci.

Il est conclu que la résistivité du sol peut également être influencée par un certain nombre de facteurs environnants tel que le pH. À cet effet, il a été démontré que les sols à pH inférieur à 7 présentent une résistivité d'environ 35% plus faible que celle des sols où le pH est supérieur à 7. En plus de l'effet du pH, il s'avère également que les ions chlorures restent un facteur de contrôle important dans la résistivité du sol. En effet, quand la concentration de ces derniers excède le seuil de 100 ppm, la résistivité du sol diminue ce qui fait augmenter la vitesse de corrosion.

Concernant l'évaluation de la performance du système de protection cathodique déjà mis en place dans l'arrondissement AR-B, celui-ci a permis de démontrer la pertinence de la protection dans le contrôle de la corrosion et la diminution des bris dans ce lieu où la corrosivité du sol est très élevée. L'utilité de ce système de protection peut être aisément évaluée en terme d'atténuation du taux de bris qui a baissé de 0.58 à 0.17% entre 2003 et 2004. Cependant, il en ressort d'après le relevé du potentiel que le niveau de polarisation calculé est inférieur à 100 mV pour environ 85% des sections de conduites inspectées. Ce constat fait en sorte que le système de protection cathodique mis en place ne devienne plus efficace contre l'évolution de la corrosion. Dans ce cadre, il est à rappeler qu'une polarisation se situant entre 0 et 100 mV indique que le niveau de protection n'est pas nul mais plutôt insuffisant par rapport au seuil décrit par NACE SP1069. En se conformant à ladite norme, seulement les systèmes de protection cathodique installés en 1994 et 1997 sont considérés comme efficaces du fait qu'ils ont atteint le seuil de polarisation de 100 mV.

À la lumière de ce travail de recherche, il s'avère que chacun des arrondissements analysés a des caractéristiques propres. Ainsi, il est possible d'établir une orientation menant à un plan de gestion efficace basé sur les priorités déterminées pour chaque territoire.

ANNEXE I

RESULTATS DES CORRELATIONS CARTOGRAPHIQUES

Cette annexe contient les figures cartographiques établies pour chacune des arrondissements suivantes :

1. Arrondissement AR-A (Figure AI-1 à AI-4);
2. Arrondissement AR-C (Figure BI-1 à BI-4);
3. Arrondissement AR-D (Figure CI-1 à CI-4);
4. Arrondissement AR-E (Figure DI-1 à DI-4);
5. Arrondissement AR-F (Figure EI-1 à EI-4);
6. Arrondissement AR-G (Figure FI-1 à FI-4).

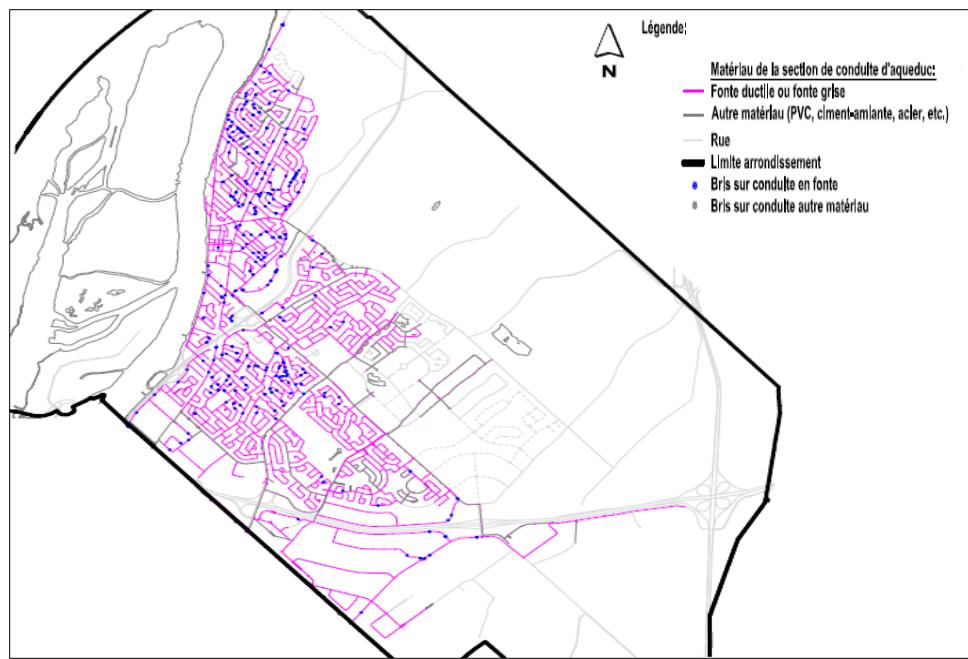


Figure AI - 1 Corrélation: matériaux de conduites – bris;
Arrondissement AR-A.

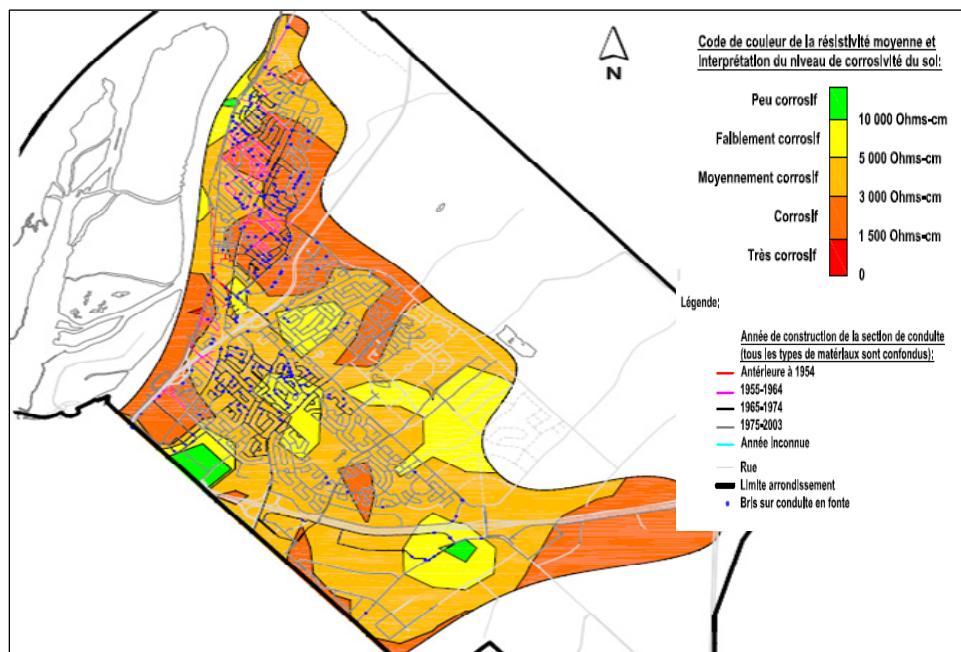


Figure AI - 2 Corrélation: résistivité du sol –bris;
Arrondissement AR-A.

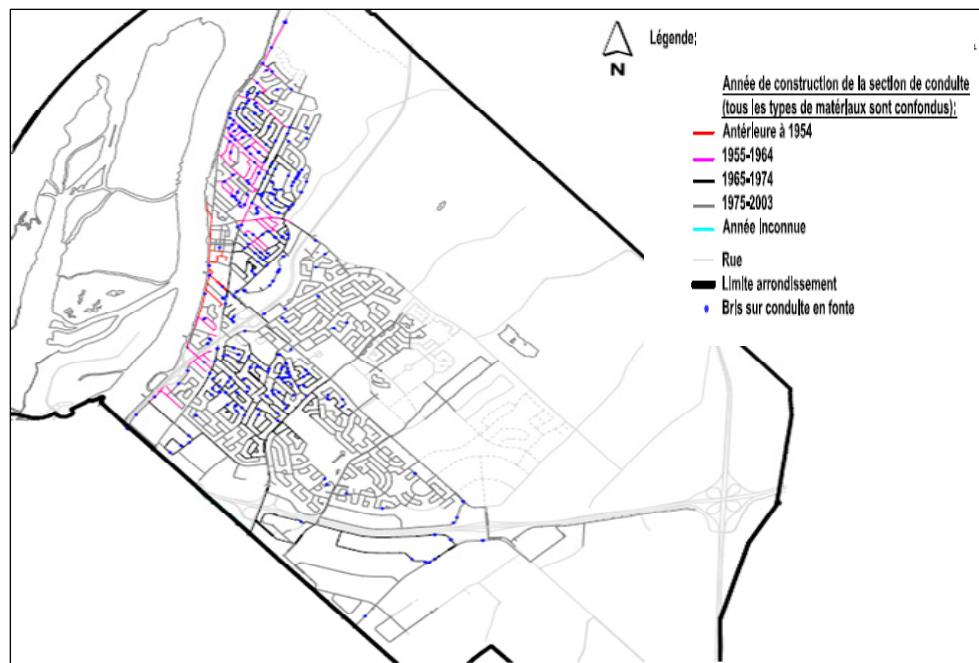


Figure AI - 3 Corrélation: âge de conduite – bris;
Arrondissement AR-A.

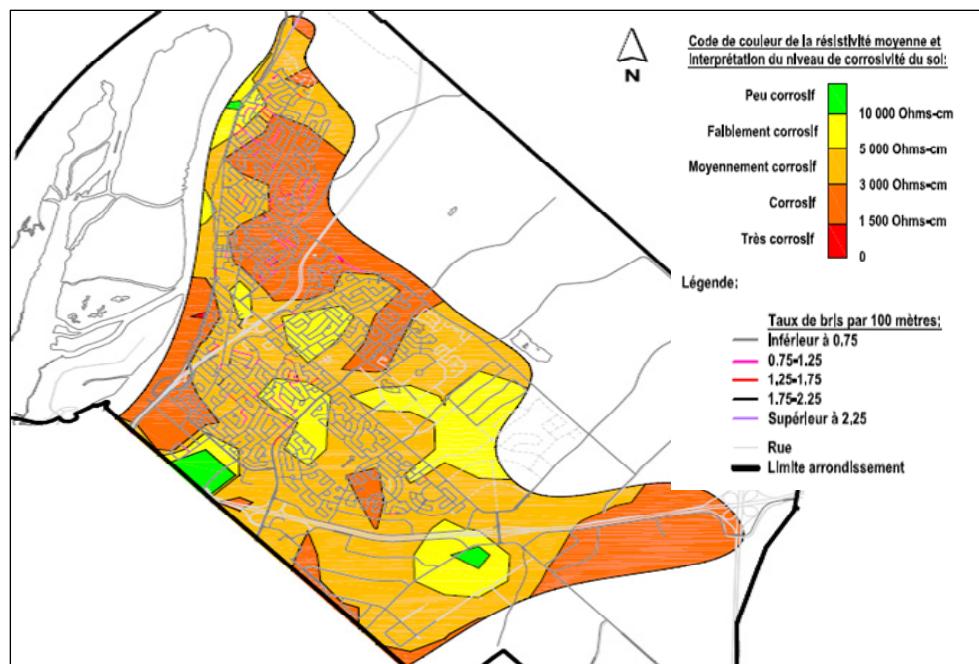


Figure AI - 4 Corrélation: résistivité du sol -taux des bris par 100 m;
Arrondissement AR-A.

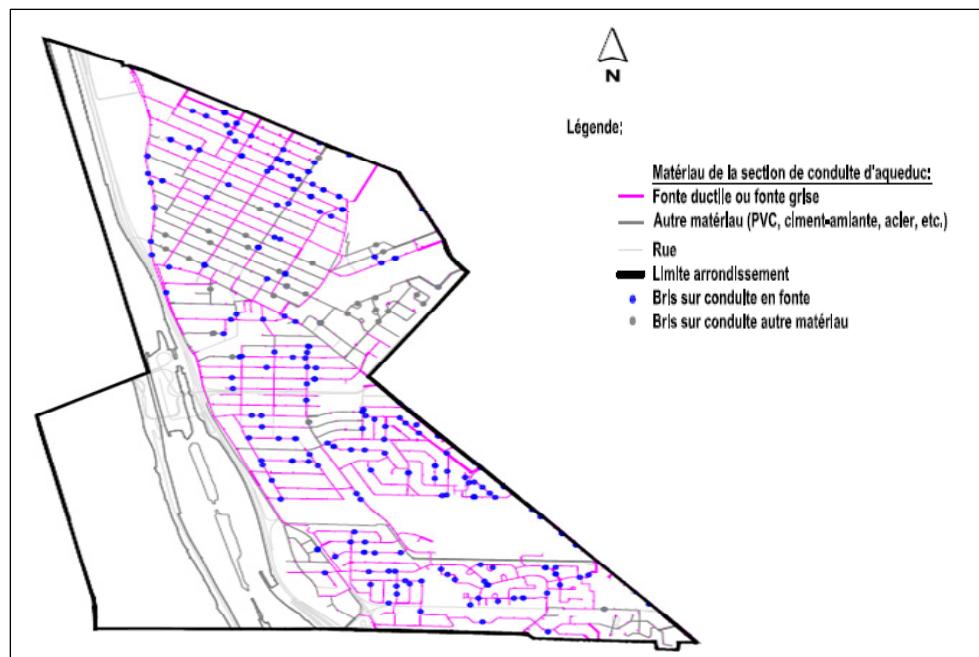


Figure BI - 1 Corrélation: matériaux de conduites – bris;
Arrondissement AR-C.

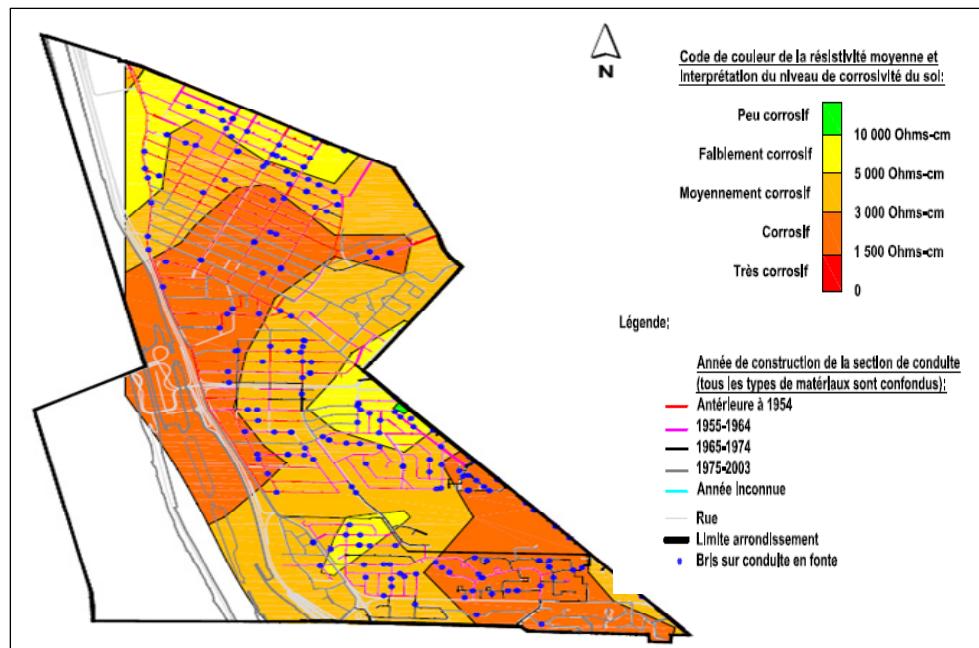


Figure BI - 2 Corrélation: résistivité du sol –bris;
Arrondissement AR-C.

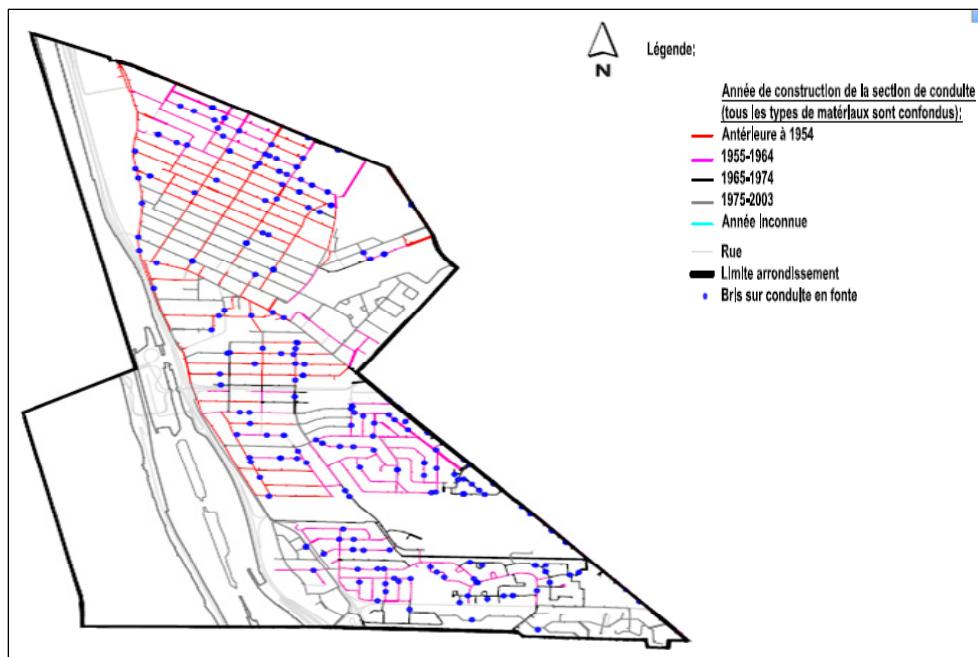


Figure BI - 3 Corrélation: âge de conduite-bris;
Arrondissement AR-C.

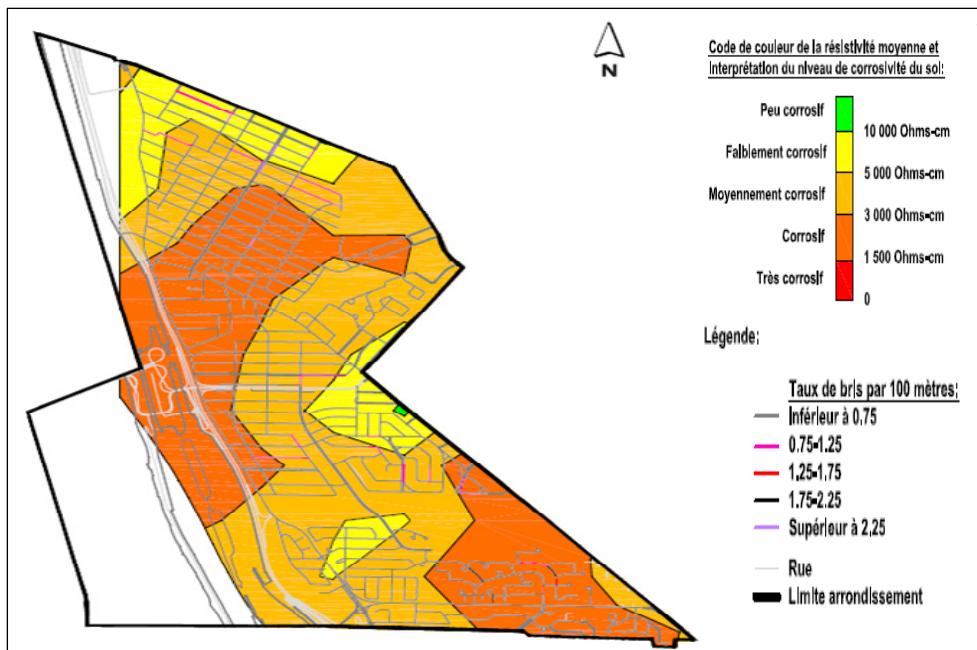


Figure BI - 4 Corrélation: résistivité du sol -taux des bris par 100 m;
Arrondissement AR-C.

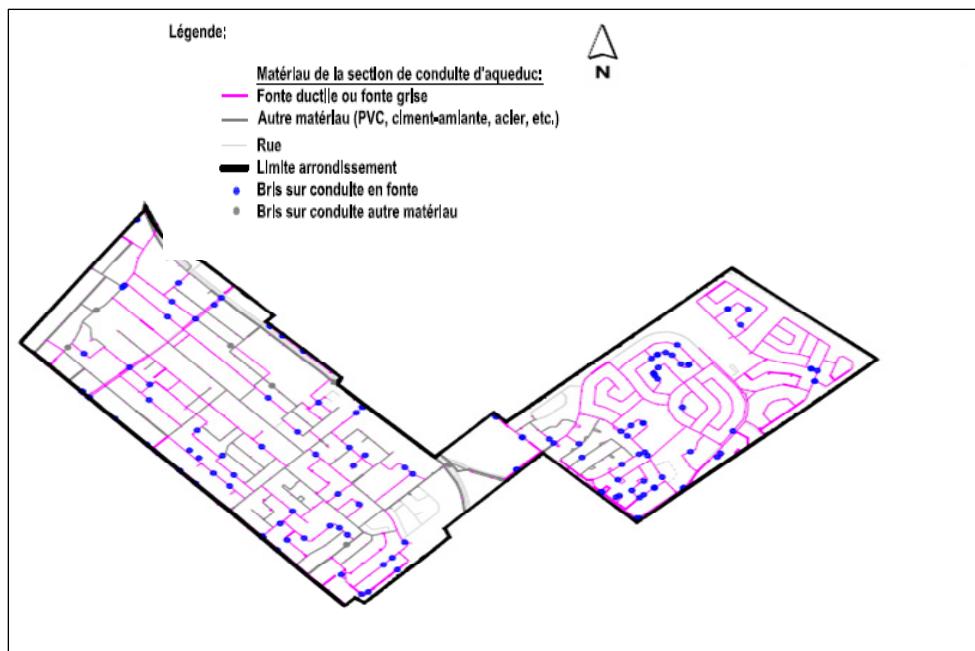


Figure CI - 1 Corrélation: matériaux de conduites – bris;
Arrondissement AR-D.

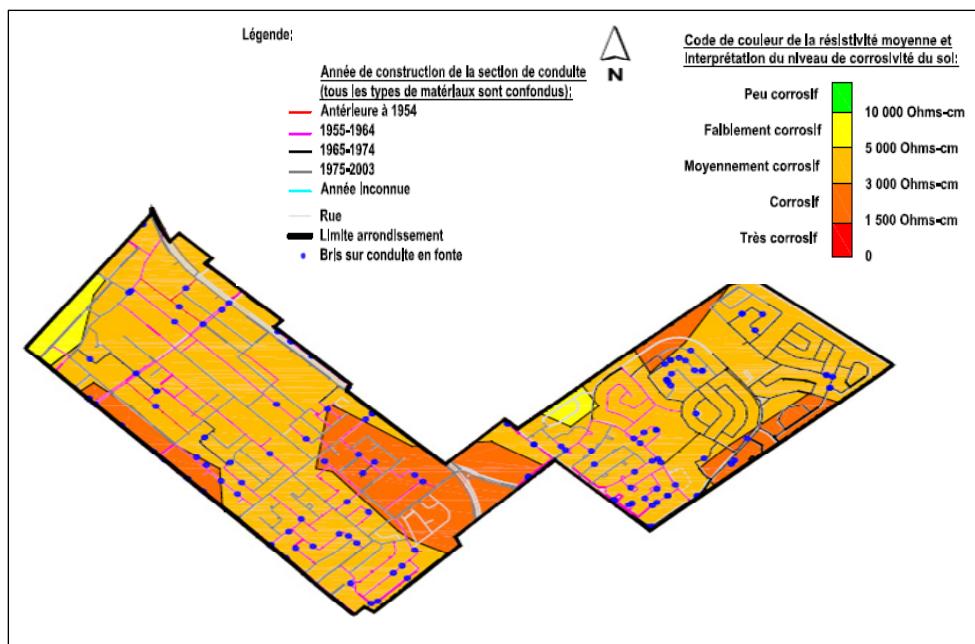


Figure CI - 2 Corrélation: résistivité du sol –bris;
Arrondissement AR-D.



Figure CI - 3 Corrélation: âge de conduite – bris;
Arrondissement AR-D.

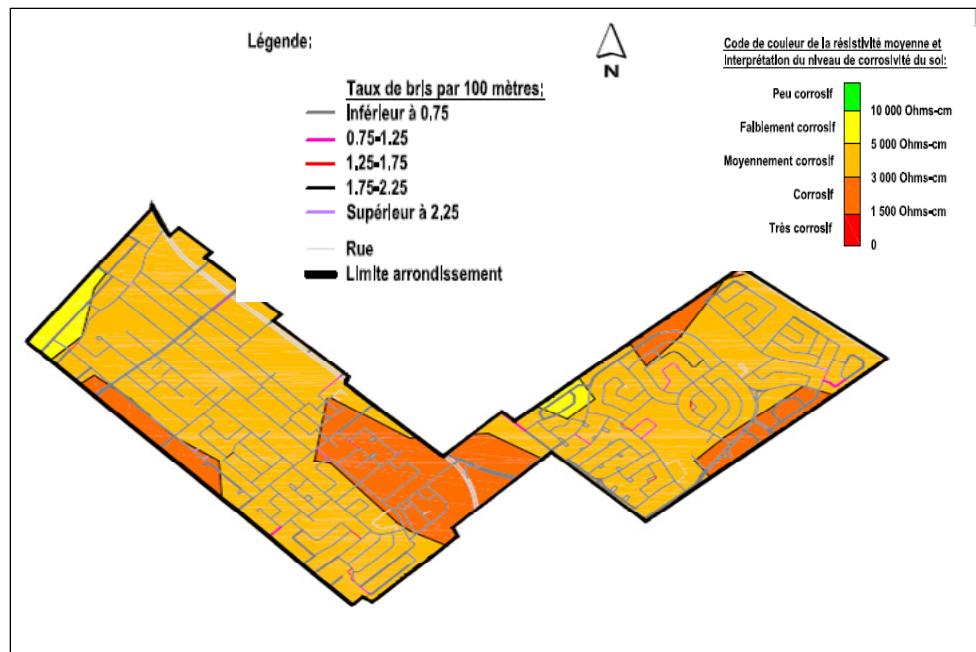


Figure CI - 4 Corrélation : résistivité du sol –taux des bris par 100 m;
Arrondissement AR-D.

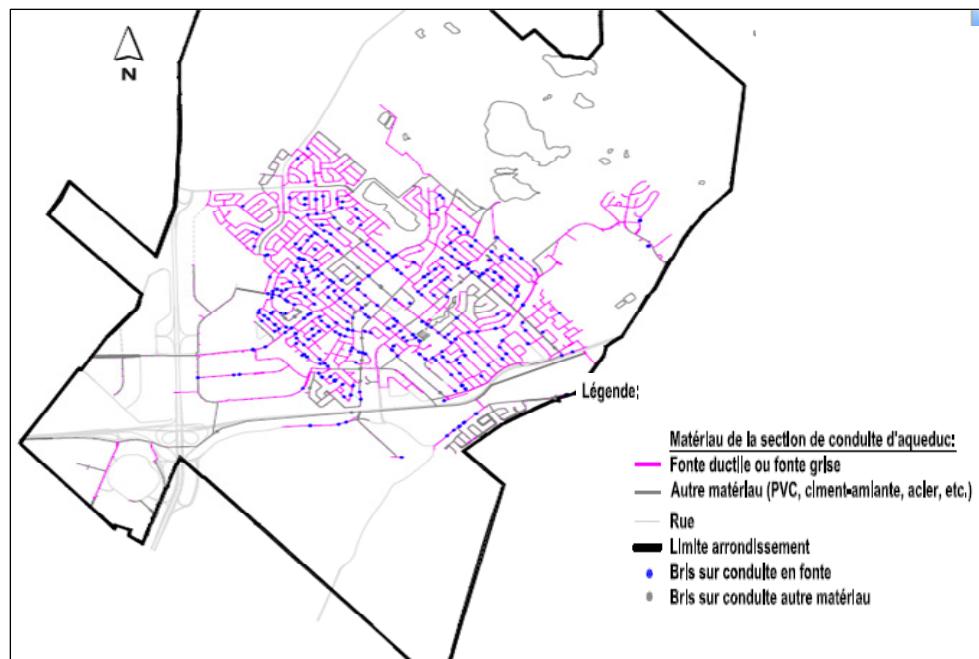


Figure DI - 1 Corrélation: matériaux de conduites – bris;
Arrondissement AR-E.

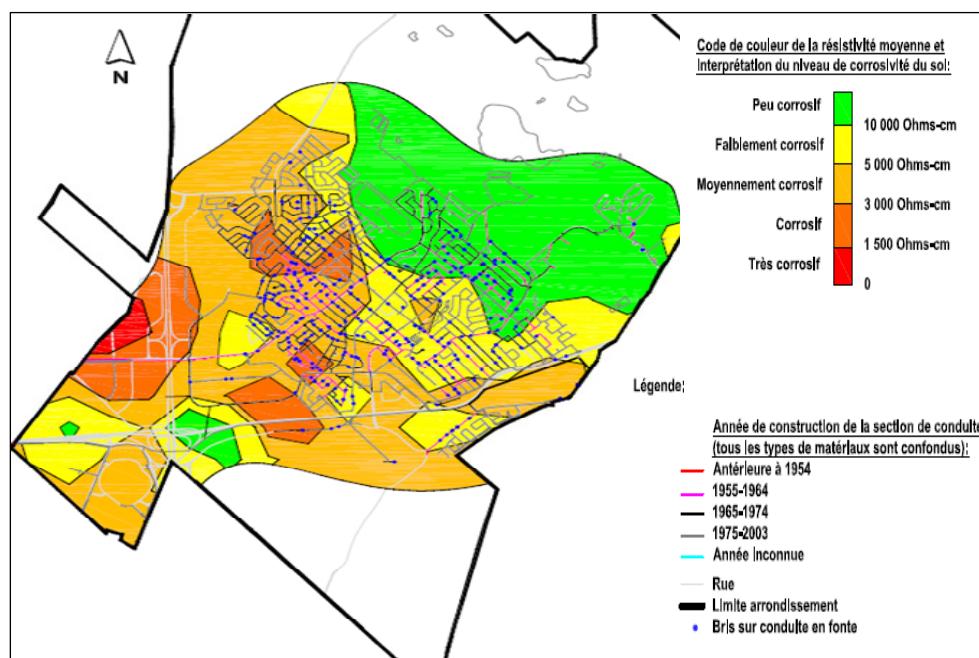


Figure DI - 2 Corrélation: résistivité du sol –bris;
Arrondissement AR-E.

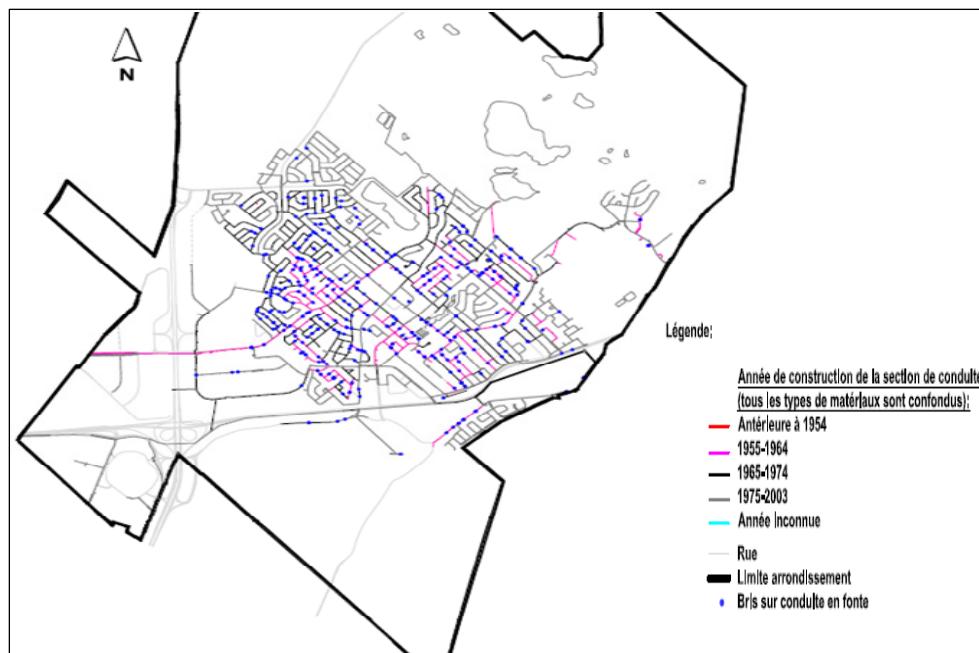


Figure DI - 3 Corrélation: âge de conduite – bris;
Arrondissement AR-E.

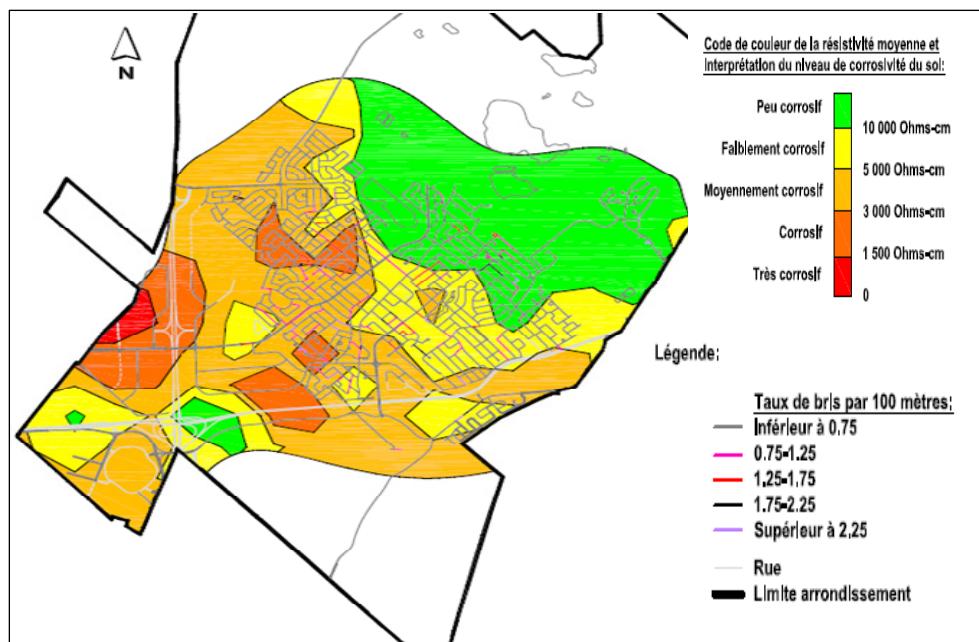


Figure DI - 4 Corrélation: résistivité du sol -taux des bris par 100 m;
Arrondissement AR-E.



Figure EI - 1 Corrélation: matériaux de conduites – bris;
Arrondissement AR-F.

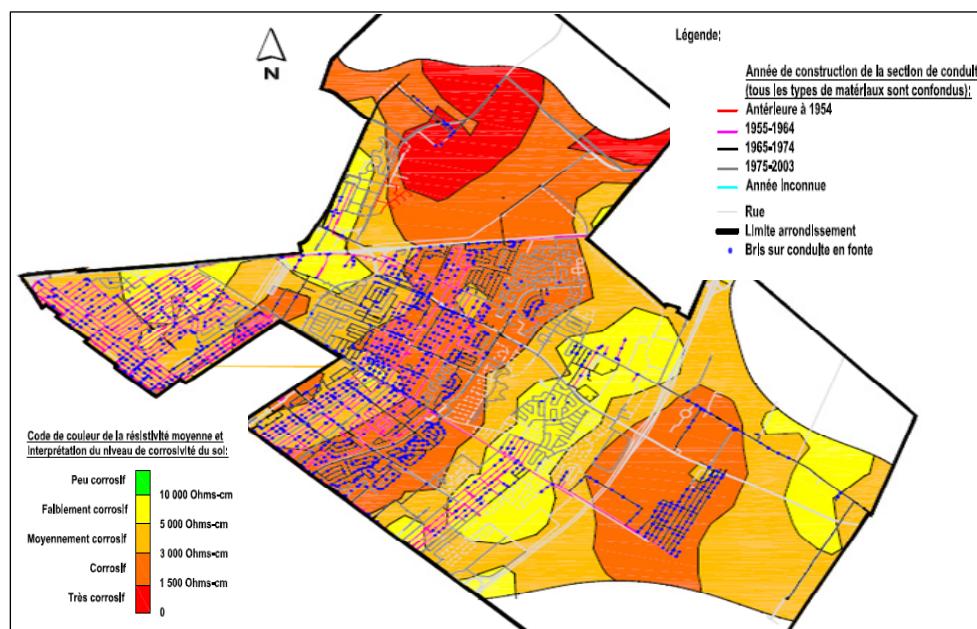


Figure EI - 2 Corrélation: résistivité du sol –bris;
Arrondissement AR-F.

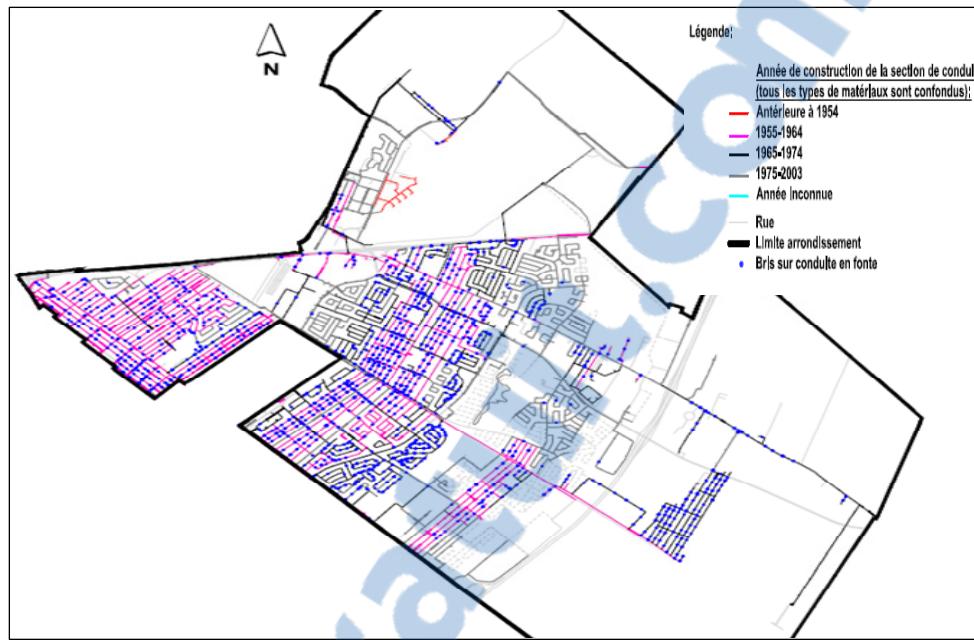


Figure EI - 3 Corrélation: âge de conduite – bris;
Arrondissement AR-F.

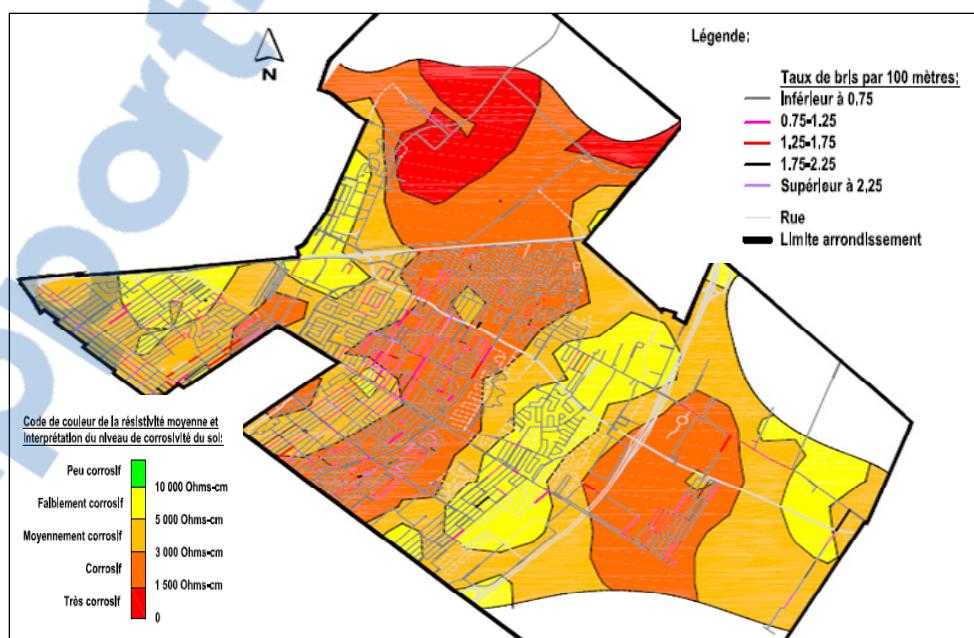


Figure EI - 4 Corrélation: résistivité du sol -taux des bris par 100 m;
Arrondissement AR-F.

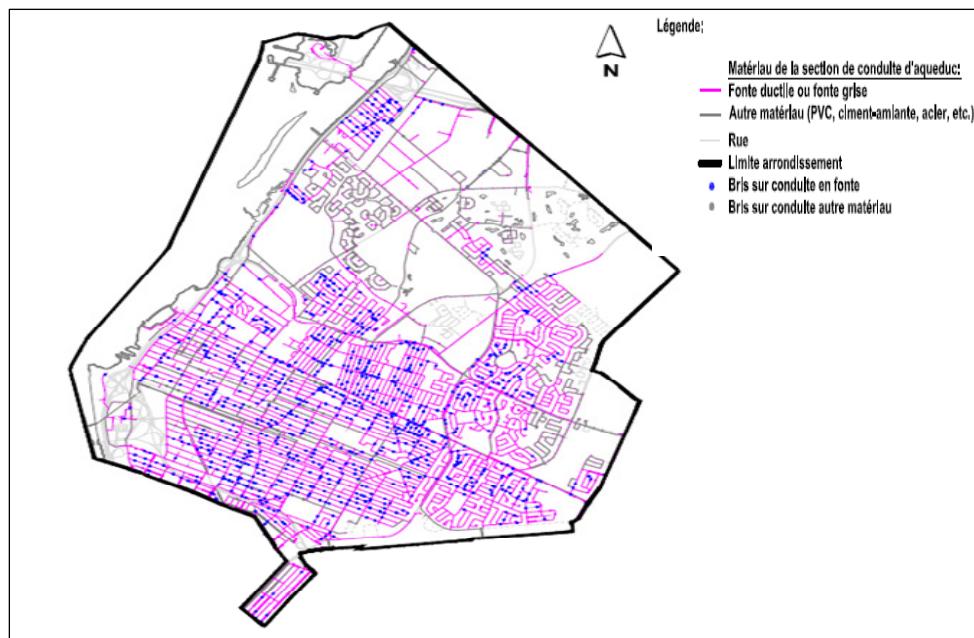


Figure FI - 1 Corrélation: matériaux de conduites – bris;
Arrondissement AR-G.

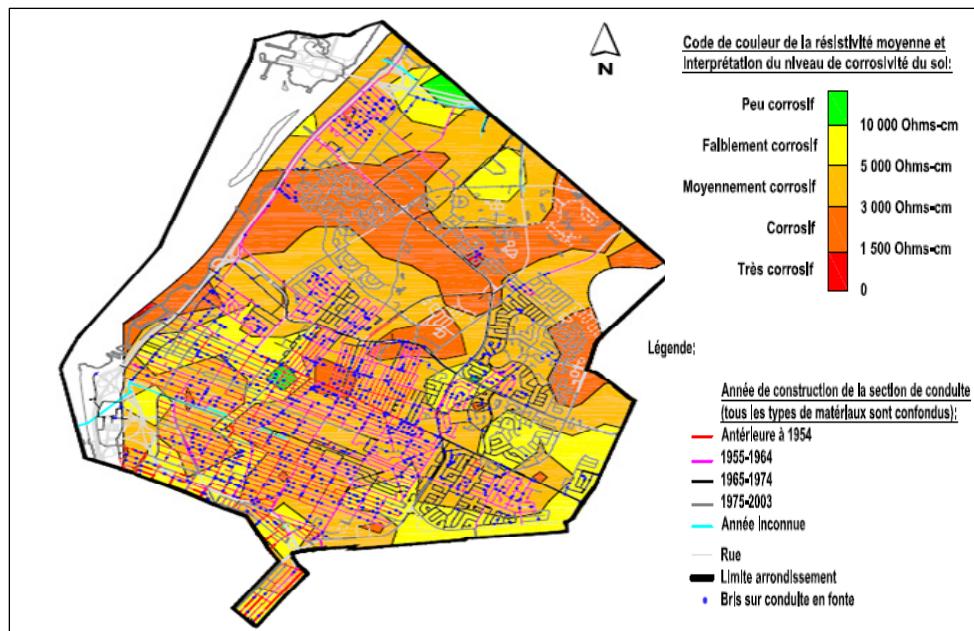


Figure FI - 2 Corrélation: résistivité du sol –bris;
Arrondissement AR-G.

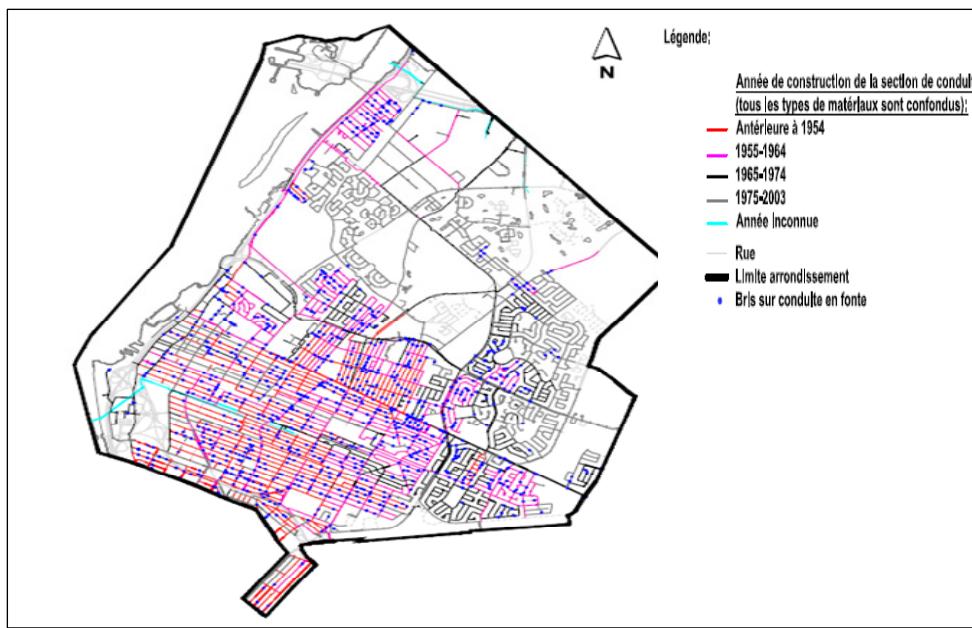


Figure FI - 3 Corrélation: âge de conduite – bris;
Arrondissement AR-G.

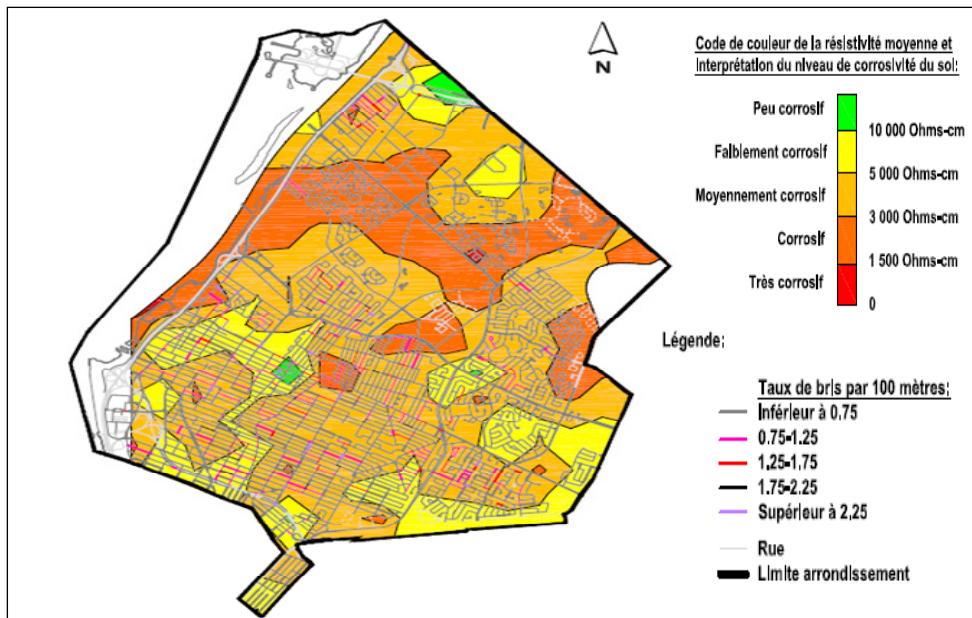


Figure FI - 4 Corrélation: résistivité du sol -taux des bris par 100 m;
Arrondissement AR-G.

ANNEXE II

RESULTATS D'ANALYSE EN LABORATOIRE

Cette annexe contient les résultats d'analyse du taux d'agressivité du sol et de chlorures des six échantillons de sol prélevés des sites excavés.

Tableau AII - 1 Résultats d'analyse de l'agressivité du sol
selon AWWA C105

	Rue AR-AX1	Rue AR-GX1	Rue AR-GX2	Rue AR-FX1	Rue AR-FX2	Rue AR-DX1						
Profondeur d'excavation	1m	2m	1m	2m	1m	2m	1m	2m	1m	2m	1m	2m
Données d'analyse												
Résistivité	2900	1800	1100	790	500	1500	9500	3000	1200	1300	510	3800
pH	8	7,79	7,45	6,92	7,11	7,85	8,3	8,08	8,08	7,86	7,97	7,93
Rédox	175,7	178,2	216,1	178,2	226	165,9	179,8	117,9	143,2	111	138,4	148
Sulfures	Négatif	Trace	Négatif	Positif	Trace	Positif	Trace	Positif	Trace	Positif	Positif	Positif
Humidité	Myenne	Myenne	Élevé	Élevé	Myenne	Myenne	Myenne	Myenne	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé
Points attribuables aux taux d'agressivité du sol												
Résistivité	1	5	10	10	10	8	0	0	10	10	10	0
pH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rédox	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sulfures	0	2	0	3,5	2	3,5	2	3,5	2	3,5	3,5	3,5
Humidité	1	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2
Points cumulatifs	2	8	12	15,5	13	12,5	3	5,5	14	15,5	15,5	5,5
Constats	Sol moyennement agressif		Sol agressif		Sol agressif		Sol peu agressif		Sol agressif		Sol moyennement agressif	

Tableau AII - 2 Résultats d'analyse du taux de chlorure dans le sol selon California Test 422

# Site	Concentration à mi-profondeur (ppm)	Concentration à pleine profondeur (ppm)
AR-AX1	117 307	9 959
ARFX1	62 236	13,33
AR-FX2	182 316	158 844
AR-GX1	10 987	11 009
AR-GX2	17 789	10 325
AR-DX1	189 088	49 165

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agostinis, N. 2008. «Corrosion Control of Ductile Iron Pipe with Polyethylene Encasement». In *Protecting Our Water–60 years of Service: 60th Annual WCWWA Conference and Trade Show* (Delta Regina Hotel, 23 – 26 septembre 2008). p. 1-7. Ductile Iron Pipe Research Association.
- ANSI/AWW C105/A21.5-99. 1999. *American National Standard for Polyethylene Encasement for Ductile-Iron Pipe Systems*. Denver, (CO): American Water Works Association, p. 11-15.
- ASTM E797-95. 1998. *Annual Book of ASTM Standards*. 03.03. West Conshohoken, (PA) American National Standard. p. 361-366.
- ASTM G57-95a. 1997. *Annual Book of ASTM Standards*. 03.02. West Conshohoken, (PA) American National Standard. p. 211-215.
- Barlo, Thomas J.and Berry,We. 1984. «An Aassesment of The Current Criteria for Cathodic Protection of Buried Steel Pipelines». *Materials Performance: Corrosion Prevention and Control Worldwide Nace International*, vol. 23, n° 9, p.9-16.
- Benjamin M.and John F. Fergusson. 1996. «Internal Corrosion of Water Distribution Systems ». In *AWWA Research Foundation.,DVGW-Technologiezentrum Wasser*, 2nd ed., 586 p. Denver, CO: AWWA Research Foundation.
- Bennis, S. 2008. *Cours MGC865, Égouts et aquaducs : notes de cours MGC 865*. Coll. «Programme de Maîtrise en génie de la construction». Montréal, (Qc) École de technologie supérieur. 256 p.
- Bofardi and Bennet P. 1987. «Control of Environmental Variable in Water Recirculating Systems». In *ASM Handbook: vol.13: Corrosion of Metals Handbook*, 9th ed., p.387-397. Metals Park, Ohio: ASM International.
- CACE & NRC. 2008. «Assessment of Corrosion Education», En ligne. Committee on Assessing Corrosion Education, National Research Council.
<http://books.nap.edu/openbook.php?record_id=12560&page=32>. Consulté le 26 octobre 2010.
- Cast Iron Soil Pipe Institute. 2006. *Cast Iron Soil Pipe History: Uses and Performance of ASTM Standards*, 10th éd. Coll. « Cast Iron Soil Pipe and Fetting Handbook ». United States of America: Cast Iron Soil Pipe Institute, 552 p.

- C.C.C.J. 2001. «Survey of Corrosion Cost in Japan.». En ligne. Committee on Cost of Corrosion in Japan. <http://www.nims.go.jp/corrosion/corrosion_cost.pdf>. Consulté le 26 octobre 2010.
- CERIU. 2010. *Guide pour l'évaluation des coûts socio-économiques des travaux de renouvellement des conduites d'eau potable et d'égout: Guide destiné au milieu municipal québécois*. Coll. « Rapport technique du CERIU ». Montréal (Québec): Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines, 53 p..
- C.S.R.P.P.G. 1986. « La protection cathodique : Guide pratique », Chambre Syndicale de la Recherche et de la Production du Pétrole et du Gaz Naturel, Comité des Techniciens. 1st ed., 234 p. Paris, (FR): Technip.
- Departement of Transportation. 2000. *Method of Testing Soils and Water for Chloride Content*. California Test 422. Sacramento, (California): Engineering Service Centre: Transportation Laboratory, 2 p.
- Dieter L. 1993. *Traité des matériaux:Corrosion et chimie de surfaces des métaux* 12, 1er ed. Coll. « École polytechnique de lausanne ». Lausanne: Presses Polytechnique et Universitaire Romandes, 564 p.
- Doyle, G., Seica, M. V. and Grabinsky, M. W. F. 2003. « The Rol of Soil in The External Corrosion of Cast Iron Water Mains in Toronto, Canada». *Journal/ Canadian Geotechnical*, vol. 40, n°2. p. 225-236.
- Édgard, B. 1998. « Conduite du diagnostic et évaluation des collecteurs des infrastructures urbaines de l'assainissement ». Thèse de doctorat en conception des batiment et technique urbaines, Lyon, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 187 p. Consulté le 26 octobre 2010.
- Gummow, R. A. 1999. « Corrosion Control of Municipal Infrastructure Using Cathodic Protection ». In *The NACE International Northern Area Eastern Conference* (Otawa, October 24-27 1999). p. 1-7. Houston (TX): NACE International
- Hart, P. 2009. *The Cost of Corrosion*. En ligne. <<http://anz.theoildrum.com/node/5215>>. Consulté le 26 octobre 2010.
- Judy Thomson, L., Barry, E., Scheetz, M. R. Schock, D., A. Lytle and Patrick J. Delaney. 1979. «Sodium Silicate Corrosion Inhibitors: Issues of Effectiveness and Mechanism ». In *Water Quality Technology Conference* (Denver, 9-12 novembre 1997). Valley Forge: PQ Corporation.
- Klopfer, D. J. and Schramuk J. 2005. « A Sacrificial Anode Retrofit Program for Existing Cast-Iron Distribution Water Mains ». *Journal / American Water Works Association*, vol. 97. p. 50-55.

- Koch G. H. and Ruschau G. R. 2002. *Appendix C: Corrosion Control Methods and Services*. Coll. « Rapport technique de CC Technologies Laboratories Inc». Dublin,(Ohio): CC Technologies Laboratories Inc, 25 p.
- Koehl, S. 2000. *Cathodic Protection: Knowing When and Where it Will be Most Effective Important for Extending System Lifespans*. Coll. « Rapport technique de CNRC – IRC », IRC-VISI-294. Ottawa,(ON): Journal of Commerce, 5 p.
- Laver J. A., H. Griffiths. 2001. « The Variability of Soils in Earthing Measurements and Earthing System Performance». En ligne. <<http://www.cder.dz/download/upec-7.pdf>>. Consulté le 26 octobre 2010.
- M A M R. 2005. *Guide d'élaboration d'un plan d'intervention pour le renouvellement des conduites d'eau potable et d'égout*. Coll. « Rapport technique du Ministère des Affaires municipales et des Régions ». Québec (Québec): Service de l'information et de l'édition, 31 p..
- Mars, G. Fontana. 2004. « Virtually All Corrosion Failures Results from Carelessness on The Part of The User or Poor Choice of Material or Configuration by The Designer ». In *Session on Corrosion Education and Training: 16 th International Corrosion Congress (16 ICC)* (Beijing, 19–24 septembre 2005). P.1. Chinese Society for Corrosion and Protection.
- Mc Neil Laurie S., Edwards M. Marc. 2000. « Phosphate Inhibitors and Red Water in Stagnant Iron Pipes ». En ligne. <<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-07102000-12010045/unrestricted/ch2.pdf>>. Consulté le 26 octobre 2010.
- NACE. 2007. *Cathodic Protection Technologist: notes de cours CP3*. Coll. « Programme de certification de technologise en protection cathodique.». Houston: Nace International, 352 p.
- NACE SP0169. 2007. *Standard Practice: Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping*. Houston, (Tx): Nace International. 29 p.
- Nguyen-Thuy, LE. 2008. *Badoris-document de synthèse relatif à une barrière technique de sécurité (BTS): Protection cathodique*. Coll. « Rapport technique de l'INERIS», INERIS-DRA-PREV-01/2008. Paris, (FR) Institut National de l'environnement industriel et des risques, p.41
- Nigel J. and Booth, P. 2006. «Earthing Manual Section E3: Soil Resistivity- Measurements». En ligne <<http://www.eon-uk.com/distribution/CiCdocs/01%20Technical%20-Documents/CN%20Combined/Earthing%20Manual/E3%20Earthing%20Manual%20Soil%20Resistivity.pdf>>. Consulté le 27octobre 2010.

- Paul, S. 1990. «Minimizing Infrastructure Corrosion ». *Technical Articles Providing Total Corrosion Control Solution*. Peabody, Arland Wentworth. 1976. *Control of Pipeline Corrosion*. Houston, Tex: National Association of Corrosion Engineers, 190 p.
- Pourbaix, M. 1974. *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*, 2sd ed. English. Houston, Tex.: National Association of Corrosion Engineers, 644 p.
- Pruckner, F. 2001. «Corrosion and Protection of Reinforcement in Concrete Measurement and Interpretation ». Vienna, University of Vienna, 224 p.
- Rajani, B. and Kleiner, Y. 2003. *Protection of Ductile Iron Water Mains Against External Corrosion: Review of Methods and Case Histories*. Coll. «Rapport technique de NRCC», NRCC-45225. Ottawa, (ON) Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, 45 p.
- Rim-rukeh, A. and J. Kehinde A. 2006. *Investigation of Soil Corrosivity in The Corrosion of Low Carbon Steel Pipe in Soil*. Coll. « Rapport technique de Journal of Applied Science Research», 466-469. College of Education: Agbor (Delta State): Department of Integrated Science & Department of Chemistry, 4 p.
- Scott P. and O'connor, P. 2003. « Corrosion Control of Large Diameter Piping Cathodic Protection a Proven Method ». En ligne <http://www.corrttech-inc.com/technical_articles/waterpipe.pdf>. Consulté le 22 décembre 2010.
- Shiwei W. G. 2001. «Corrosion Protection by Coatings for Water and Wastewater Pipeline ». In *Water and Wastewater Program*. p. 1-28. Milton, (ON): West Virginia University, PA.
- Silverman, David C. and Ari L. Silverman. 2007. « Potential-pH (Pourbaix) Diagrams as Aids for Screening Corrosion Inhibitors and Sequestering Agents ». In *Corrosion 2007, March 11, 2007 - March 15, 2007*. p. 076161-0761619. Coll. « NACE - International Corrosion Conference Series ». NashVille, TN, United states: National Assoc. of Corrosion Engineers International. p.1-12
- Stresstel Ultrasonic Testing Equipment. 1998. «T MIKE E/P/B Operation Manual: The Velocity and Acoustic Impedance Chart ». En ligne. Stresstel Ultrasonic Testing Equipment.<<http://www.geinspectiontechnologies.com/stresstel/download/stresstel-velocity-acoustic.pdf>>. Consulté le 28 octobre 2010.
- Subramanian N. 2010.«Subsustainability of RCC Structures Using Basalt Composite Rebars».Enligne.<<http://www.sefindia.org/?q=system/files/Subsustainability+of+RCC+using+basalt+composite+Rebars-masterBuilder-Sep2010.pdf>>. Consulté le 15 Decembre 2010.

- Tuyauterie Canada Ltée. 2009. «Tuyau de fonte ductile», En ligne.<http://www.-canadapipe.com/English/Brochure_EN/BrochureEN.pdf>. Consulté le 28 octobre 2010.
- U.S. Army Corps of Engineers. 2003. *Unified Facilities Criteria: Operation and Maintenance: Cathodic Protection Systems*. Coll. « Rapport technique de USA Department of Defense », UFC 3-570-06. Washington, United States: USA Departement of Defense, 220 p.
- U.S. Army Corps of Engineers. 2004. *Electrical Engineering Cathodic Protection*. Coll. «Rapport technique de USA Department of Defense », UFC 3-570-02N. Washington, United States USA Departement of Defense, 319 p.
- Virmani Y. Paul. 2002. *Corrosion Costs and Prevention Strategies in the United States*. Coll. «Rapport technique de Federal Highway Administration», FHWA-RD-01-156. Washington, (DC): US Department of Transportation, 16 p.
- Wakelln, Robert G. et Gummow Robert A. 1994. *Résume des conclusions d'études récentes sur la corrosion des conduites d'eau principales en Ontario*. Coll. « Rapport technique de CNRC & IRC », TD491 W149f. Ottawa, (ON) Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, 21 p.
- Zhao Jack Q., S. Kuraoka, T.H.W. Baker, P. G y, J-F. Masson, S. Boudreau, et R. Brousseay. 1998. *Durabilité et performance des conduites à écoulement libre : étude documentaire approfondie*. Coll. « Rapport technique de CNRC-IRC ». Ottawa, (ON) Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, 47 p.