

UNIVERSITE de STRASBOURG I - LOUIS PASTEUR
U.F.R. de SCIENCES PHYSIQUES

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR de L'UNIVERSITE STRASBOURG I - LOUIS PASTEUR
Discipline : Sciences de l'Eau
présentée et soutenue publiquement
par
Philippe ARNOUX
le 26 novembre 1998

Titre :
MODELISATION DU VIEILLISSEMENT D'UN RESEAU D'EAU POTABLE EN FONTE
ET APPLICATION AUX STRATEGIES DE RENOUVELLEMENT

Directeur de thèse : Alain CORNET

JURY

François LAISNEY :	Rapporteur interne
Marcel MIRAMOND :	Rapporteur externe
Bernard BREMOND :	Rapporteur externe
Alain CORNET :	Directeur de thèse
François GUERBER :	Examineur

AVANT-PROPOS

Cette étude n'a pu être réalisée que grâce à la participation conjointe des partenaires suivants :

- l'ENGEES dont le Laboratoire « Réseaux d'Eau Potable » m'a accueilli pendant la réalisation de la thèse,
- l'ENSAIS dont le Laboratoire « Mécanique, Corrosion et Matériaux » a assuré l'encadrement de cette thèse,
- le Ministère de l'Education Nationale, de la Recherche et de la Technologie et l'Association Nationale pour la Recherche Technologique (ANRT), qui ont assuré le financement de la Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE),
- la Société d'Aménagement Urbain et Rural (SAUR) qui a assuré mon salaire et mon encadrement technique,
- le Service de l'Eau de la Communauté Urbaine de STRASBOURG (CUS) qui amené une participation technique et financière et qui a fourni ses données de réseau, sans lesquelles l'étude n'aurait pas eu lieu,
- la société PONT A MOUSSON S.A. (PAM S.A.) qui a amené une participation technique et financière et qui a fourni de précieux renseignements sur l'histoire de la production des fontes, sur la métallurgie et la corrosion.

A Michèle, Lothaire et Sébastien,

A ma famille,

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du Laboratoire Réseaux d'Eau Potable de l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de STRASBOURG (ENGEES) et de l'Agence Lorraine Franche-Comté de la Société d'Aménagement Urbain et Rural (SAUR) en collaboration avec le Laboratoire Mécanique, Corrosion et Matériaux de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de STRASBOURG (ENSAIS). Il a été réalisé en partenariat avec le Service de l'Eau de la CUS, PAM S.A. et l'ANRT qui a concrétisé cette collaboration par une Convention CIFRE entre SAUR et ENGEES.

Je tiens à remercier SAUR et ENGEES pour leurs engagements ainsi que l'ANRT qui a soutenu ce programme.

Mes remerciements vont particulièrement à Bernard DEVALAN, Directeur de SAUR, qui m'a engagé dans cette entreprise et à Philippe JOURDARD, et Philippe CHARPENTIER, Directeurs successifs de l'Agence Lorraine Franche-Comté de SAUR, pour m'avoir intégré dans leurs équipes.

Je remercie également le travail de suivi réalisé par Gilbert COQUELET, Claude ROUSSILHON, Jacques BESSON et François GUERBER dans leur Directions Techniques.

Je tiens à exprimer mes remerciements à Alain CORNET, Professeur à l'ENSAIS, pour avoir accepté de diriger ce travail de thèse et à Denis GILBERT et Philippe DENIER, enseignants-chercheurs à l'ENGEES et l'ENSAIS, pour le suivi et l'organisation quotidienne de mon travail.

J'exprime ma gratitude à Jean LAPIERRE et Yves CONGRETTEL, Directeurs successifs du Service de l'Eau de la Communauté Urbaine de STRASBOURG, ainsi qu'à Jean KUGLER et Daniel HOCHMUTH, Adjoints au Directeur, pour leur soutien dans ce travail novateur et leurs précieux conseils.

J'adresse ma reconnaissance à Michel LANGENFELD, Directeur au Service Marketing de PAM et Gérard NOUAIL, Ingénieur de Recherche de PAM, pour leur assistance et leur suivi.

Je remercie également Monsieur François LAISNEY, Professeur à l'Université Louis Pasteur, Monsieur Bernard BREMOND, Directeur de Recherches au Cemagref, Monsieur Marcel MIRAMOND, Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon pour avoir accepté de rapporter ce travail. Mes remerciements vont également à Monsieur François GUERBER, Directeur Technique Adjoint du groupe SAUR, pour avoir accepté de participer au jury.

Je remercie toutes les personnes, collègues et amis qui ont participé d'une manière ou d'une autre à ce travail et particulièrement Catherine GAMET, Frédéric DABOVAL et Grégory SCHUNK ainsi que Jean-Luc JANEL pour sa relecture instructrice. J'y associe les personnels de l'ENGEES, de SAUR et du Service de l'Eau de la CUS.

Je remercie Maurice LAMBERT, ingénieur, pour ses conseils instructifs dans le domaine de la protection cathodique.

Je remercie tout particulièrement ma femme Michèle pour son soutien et sa patience tout au long de ces trois années.

RESUME

Cette thèse a pour objet la compréhension et la modélisation de la détérioration du réseau d'eau potable en fonte de Strasbourg. Son originalité réside dans la comparaison des approches statistique, probabiliste et physique pour décrire la détérioration d'un réseau. Le vieillissement a été mesuré par l'enregistrement des défaillances entre 1983 et 1997 et l'analyse de l'état de corrosion d'échantillons de conduites. Les modèles statistiques ont permis de classer les facteurs significatifs de détérioration. Ces facteurs sont l'âge, la longueur, l'épaisseur et le moment d'inertie des conduites, complétés par le nombre de défaillances antérieures quand on raisonne sur les durées de survie. La mesure de la corrosion, processus essentiel du vieillissement du réseau, a été réalisée sur 83 échantillons. L'exploitation des résultats montre que la corrosion joue un rôle limité dans le processus de défaillance, comparativement aux contraintes mécaniques (charges sur les conduites, mouvements de sol, etc.).

Le travail a d'abord consisté à collecter les données, à savoir :

- les variables d'âge, de dimension, de localisation et de métallurgie des conduites,
- l'enregistrement des défaillances entre 1983 et 1997,
- la mesure quantitative de l'état de corrosion et l'analyse métallurgique de 83 échantillons.

Une base de données a ensuite été construite et les données y ont été progressivement introduites. Les tronçons, définis comme des segments continus du réseau, homogènes pour les variables d'âge, de diamètre, de calibre de rue et de tronçon hydraulique, ont servi de base à l'analyse statistique ; une recherche bibliographique sur la nature métallurgique des conduites en fonte du réseau a permis d'améliorer l'information descriptive et de classer les tronçons pour l'analyse statistique.

L'analyse des données a d'abord été réalisée au moyen de statistiques descriptives : l'influence de chacune des variables sur le taux de défaillances a été mesurée, afin de classer les tronçons à risque et les variables pertinentes. Puis des régressions ont été calculées avec l'ensemble des variables suivant 2 techniques dont les résultats ont été comparés : la régression linéaire multiple et l'analyse probabiliste (modèle des risques proportionnels). Enfin, on a réalisé la mesure de l'état de corrosion des échantillons.

Les différentes équations de modélisation ont ensuite été appliquées avec des seuils critiques pour établir des programmes de renouvellement. Les stratégies diffèrent suivant le modèle retenu et la valeur du seuil critique. Les programmes les plus simples désignent comme conduites à risque des catégories déjà existantes ; les programmes plus élaborés désignent de nouvelles catégories de conduites à partir d'une équation de régression multiple. Les modèles obtenus à partir de la durée de survie sont les plus pertinents car ils prennent en compte à la fois l'année de pose et le nombre de défaillances antérieures ; ils fournissent les résultats les plus réguliers en volumes annuels de renouvellement, ce qui est intéressant pour la programmation budgétaire.

MOTS-CLES

Réseau d'eau potable, Conduites en fonte, Défaillances, Corrosion, Modèles de vieillissement, Stratégies de renouvellement.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to understand and to model the ageing process of the cast iron drinking water network administrated by the Strasbourg Urban Community. Its originality lies in the comparison between statistical, probabilist and physical analysis to describe the deterioration of the network. It was measured by recording of failures between 1983 and 1997 and analyzing of corrosion on 83 main samples. Statistical models have allow to classify the significant factors of deterioration. These factors are the age, the length, the thickness and the moment of inertia, completed with the number of previous failures concerning the survival analysis. Measurement of corrosion, essential deterioration problem on this network, has been performed on 83 samples. The processing of the data allowed to determine that corrosion have a limited part in the failure process, compared to the mechanical constraints (loads on the pipes, soils movement, etc.).

The work has begun with the collection of this data :

- factors : age, dimension, localization, metallurgy,
- recording of failures between 1983 and 1997,
- quantitative measurement of corrosion and metalurgical analysis of 83 samples.

A database has then been build, and the data have been gradually introduced. The trunks, defined as continuous segments of network, homogenous for the factors as age, diameter, street traffic and hydraulical truncature, have served to the statistical analysis. A bibliographical research on the metallurgical nature of the pipes helped us to improve descriptive information and to classify the trunk for the statistical analysis.

Data processing was first performed with descriptive studies, in order to improve the knowledgc on the pipes population. Influence of each variable on the failure process has then been measured, which allowed us to classify the hazardous trunk and the relevant variables. Then, regressions have been calculated on all the variables with two techniques which results were compared ; linear regression and probabilistic analysis (proportional hazards model). Finally, the analysis of the corrosion state of the samples was performed.

The different models have been applied with critical thresholds to establish renewal programmes. The strategies are varying with the choice of the model and of the threshold. The simplest programmes designate as hazardous mains existing categories. More elaborate programmes designate new categories of hazardous mains, calculted from a multivariate regression analysis. The failure-time models are the most relevant because they calculate the regression with the laying year and the number of previous failures. They give the more stable results for renewal volumes, which is interesting for a financial programming.

KEY-WORDS

Drinking water network, Cast iron pipes, Failures, Corrosion, Models of ageing, Renewal strategies

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	15
1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	17
1.1 LA PROBLEMATIQUE DU RENOUELEMENT	17
1.1.1 Les manifestations du vieillissement	17
1.1.2 Les causes des défaillances	18
1.1.3 Les types de défaillances	19
1.1.4 Les variables de modélisation	20
1.1.5 La durée de vie des conduites	21
1.2 LES PRATIQUES DE RENOUELEMENT	23
1.2.1 En France	23
1.2.1.1 Les petits services	23
1.2.1.2 Les agglomérations	24
1.2.2 En Allemagne	24
1.2.2.1 Acquisition des données descriptives du réseau	24
1.2.2.2 Classification des conduites	24
1.2.2.3 Programmation à long terme	24
1.2.3 Au Royaume-Uni	25
1.2.4 Aux Etats-Unis	25
1.3 LA MODELISATION DU VIEILLISSEMENT	25
1.3.1 Les études statistiques descriptives	26
1.3.2 Les modèles prédictifs	26
1.3.2.1 Les modèles agrégés	27
1.3.2.2 Les modèles de régression multiple	27
1.3.2.3 Les modèles probabilistes	29
1.3.3 Les modèles physiques	30
1.3.3.1 Le modèle de Vancouver [O'Day et al, 1987]	30

1.3.3.2 Le modèle de l'US Army Corp of Engineers Construction Engineering Research Laboratory [O'Day et al, 1987]	31
1.4 LA METALLURGIE ET LA CORROSION DES CONDUITES EN FONTE	32
1.4.1 La métallurgie des fontes	32
1.4.1.1 Les fontes à graphite lamellaire (fontes GL)	32
1.4.1.2 Les fontes à graphite sphéroïdal (fontes GS)	35
1.4.2 Les types de conduites en fonte du réseau CUS	35
1.4.3 La corrosion des conduites en fonte	37
1.4.3.1 Corrosion interne	39
1.4.3.2 Corrosion par les sols	40
2. METHODOLOGIE D'ETUDE	41
2.1 PRÉSENTATION DU RESEAU CUS	41
2.2 CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNEES	44
2.2.1 Sélection des variables de détérioration	44
2.2.2 Collecte des données	45
2.2.2.1 Les données géographiques	45
2.2.2.2 Les données cartographiques	45
2.2.2.3 Les années de pose	46
2.2.2.4 Les défaillances	47
2.2.2.5 Les données métallurgiques	47
2.2.3 Conception et création de la base de données	48
2.2.4 Préparation des données de survie	50
2.3 ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES DE DEFAILLANCES	52
2.3.1 Statistiques descriptives	52
2.3.2 Régression multiple	52
2.3.3 Analyse probabiliste	53
2.3.3.1 Modèles strictement probabilistes	53
2.3.3.2 Modèle des risques proportionnels	55
2.4 METHODE PHYSIQUE DE MESURE DE LA CORROSION	56

2.4.1 Prélèvement de l'échantillonnage	56
2.4.2 Analyse métallurgique	57
2.4.3 Mesure de la corrosion par un examen destructif	58
2.4.4 Exploitation des résultats	59
2.5 BILAN DE LA METHODOLOGIE	61
3. DESCRIPTION DES DONNEES EXPERIMENTALES	62
3.1 LES VARIABLES EXPLICATIVES	62
3.1.1 L'année de pose	62
3.1.2 Le diamètre	63
3.1.3 La nature de fonte	64
3.1.4 L'épaisseur de paroi	64
3.1.5 La teneur en phosphore	66
3.2 LES VARIABLES A EXPLIQUER	67
3.2.1 Le nombre de défaillances	67
3.2.2 La durée de survie	68
3.3 DESCRIPTIONS COMPLEMENTAIRES	73
3.3.1 Age moyen du réseau	73
3.3.2 Histogrammes mixtes	73
4. RESULTATS DE MODELISATION	77
4.1 ETUDES STATISTIQUES DESCRIPTIVES	77
4.1.1 Influence de l'année de pose	77
4.1.2 Influence du diamètre nominal	78
4.1.3 Influence de la nature de fonte	79
4.1.4 Influence de l'épaisseur	80
4.1.5 Influence de la localisation	81
4.1.6 Influences mixtes	82
4.1.7 Conclusion sur les études statistiques descriptives	82

4.2 MODELES PREDICTIFS	85
4.2.1 Modèles agrégés	85
4.2.1.1 Avec l'âge	85
4.2.1.2 Avec l'épaisseur	88
4.2.1.3 Avec le moment d'inertie	90
4.2.1.4 Conclusion sur l'utilisation des modèles agrégés	91
4.2.2 Régression multiple	92
4.2.2.1 Nombre de défaillances des tronçons	92
4.2.2.2 Taux de défaillances des tronçons	94
4.2.2.3 Durée de survie des individus	96
4.2.2.4 Conclusion sur la régression multiple	98
4.2.3 Modèles probabilistes	99
4.2.3.1 Modèles strictement probabilistes	99
4.2.3.2 Modèle des risques proportionnels	103
4.2.4 Conclusion sur l'utilisation des modèles prédictifs	105
4.3 METHODE PHYSIQUE DE MESURE DE LA CORROSION	106
4.3.1 Description de l'état de corrosion des échantillons	106
4.3.1.1 Profondeurs maximales d'attaque	107
4.3.1.2 Vitesses maximales de corrosion	108
4.3.1.3 Epaisseurs résiduelles minimales	109
4.3.1.4 Les durées de vie	110
4.3.2 Cinétiques de corrosion	111
4.3.3 Relations avec les caractéristiques d'eau et de sol	115
4.3.3.1 Analyse de la qualité de l'eau	115
4.3.3.2 Mesure de la résistivité du sol	116
4.3.4 Relations avec les caractéristiques des tronçons d'origine	118
4.3.4.1 Relation entre l'épaisseur moyenne et l'épaisseur nominale	118
4.3.4.2 Dispersion des mesures d'épaisseur	118
4.3.4.3 Relation entre les processus de corrosion et de défaillance	119
4.3.4.4 Comparaison des échantillons défailants et non défailants	121
4.3.4.5 Conclusion sur la comparaison des échantillons et des tronçons	121
4.3.5 Conclusion sur la modélisation physique	122

4.4 CONCLUSION SUR LA MODELISATION	122
5. STRATEGIES DE RENOUVELLEMENT	123
5.1 CRITERE DU TAUX DE DEFAILLANCES A PARTIR DU MODELE AGREGÉ	123
5.2 CRITERE DE LA DUREE DE SURVIE	124
5.2.1 A partir du modèle de régression multiple	125
5.2.2 A partir du modèle des risques proportionnels	126
5.3 CRITERE PHYSIQUE DE CORROSION PERFORANTE	127
5.4 COMPARAISON DES DUREES DE VIE DES MODELES STATISTIQUE, PROBABILISTE ET PHYSIQUE	128
5.5 CONCLUSION SUR LES STRATEGIES DE RENOUVELLEMENT	132
CONCLUSION GENERALE	133
BIBLIOGRAPHIE	135

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1.1 : Facteurs mécaniques et de corrosion des conduites [extrait d'EISENBEIS, 1994]</i>	18
<i>Figure 1.2 : Contraintes mécaniques subies par une conduite [extrait d'EISENBEIS, 1994]</i>	19
<i>Figure 1.3 : Types de défaillances des conduites d'eau potable [extrait d'EISENBEIS, 1994]</i>	19
<i>Figure 1.4 : Modèle cinétique de corrosion externe [extrait d'EISENBEIS, 1994]</i>	31
<i>Figure 1.5 : Teneurs en carbone et en silicium des aciers et de différents types de fonte [extrait de PAM, 1986]</i>	33
<i>Figure 1.6 : Microstructure d'une fonte GLM [Pont A Mousson, 1986]</i>	34
<i>Figure 1.7 : Microstructure d'une fonte GLC [Pont A Mousson, 1986]</i>	34
<i>Figure 1.8 : Microstructure d'une fonte GS [Pont A Mousson, 1986]</i>	35
<i>Figure 1.9 : Répartition de l'anhydrique carbonique dans les eaux</i>	39
<i>Figure 2.1 : Plan du réseau d'eau potable CUS</i>	43
<i>Figure 2.2 : Structure de la base de données</i>	49
<i>Figure 2.3 : Décomposition d'un tronçon en individus</i>	50
<i>Figure 2.4 : Présentation des types d'individus suivant les variables de censure</i>	51
<i>Figure 3.1 : Histogramme des années de pose en linéaire</i>	62
<i>Figure 3.2 : Répartition par diamètre en pourcentage du linéaire</i>	63
<i>Figure 3.3 : Répartition par nature de fonte en linéaire</i>	64
<i>Figure 3.4 : Relation entre épaisseur et diamètre pour 3 natures de fonte</i>	65
<i>Figure 3.5 : Histogramme des épaisseurs de paroi en linéaire.</i>	65
<i>Figure 3.6 : Relation entre la teneur en phosphore de la fonte et l'année de pose</i>	66
<i>Figure 3.7 : Histogramme du nombre de défaillances en % du linéaire total</i>	67
<i>Figure 3.8 : Présentation détaillée des 6 types d'individus GL</i>	70
<i>Figure 3.9 : Histogramme des durées de vie des individus 11</i>	71
<i>Figure 3.10 : Histogramme des durées de vie des individus 10 et 01.</i>	71
<i>Figure 3.11 : Relation entre la durée de survie et le nombre de défaillances antérieures</i>	72
<i>Figure 3.12 : Evolution de l'âge moyen du réseau en fonction du temps</i>	73
<i>Figure 3.13 : Histogramme mixte de l'épaisseur et de la nature de fonte</i>	74
<i>Figure 3.14 : Histogramme de l'année de pose et de la nature de fonte en linéaire</i>	75
<i>Figure 3.15 : Histogramme de l'année de pose et de l'épaisseur en linéaire</i>	76
<i>Figure 4.1 : Influence de l'année de pose sur le taux de défaillances</i>	77
<i>Figure 4.2 : Influence du diamètre sur le taux de défaillances</i>	78
<i>Figure 4.3 : Influence de la nature de fonte sur le taux de défaillances</i>	79
<i>Figure 4.4 : Influence de l'épaisseur sur le taux de défaillances</i>	80
<i>Figure 4.5 : Influence de l'épaisseur et de la nature de fonte sur le taux de défaillances</i>	82
<i>Figure 4.6 : Influence de l'année de pose et de la nature de fonte sur le taux de défaillances</i>	83
<i>Figure 4.7 : Influence de l'année de pose et de l'épaisseur sur le taux de défaillances</i>	84
<i>Figure 4.8 : Régression entre le taux moyen de défaillances et l'âge</i>	85

Figure 4.9 : Régression entre le taux moyen de défaillances des fontes moulées et centrifugées et l'âge	86
Figure 4.10 : Relation entre le taux moyen de défaillance et l'épaisseur des conduites	89
Figure 4.11 : Relation entre le taux moyen de défaillance et le moment d'inertie des conduites	90
Figure 4.12 : Durées de vie observée et calculée par l'analyse de survie	104
Figure 4.13 : Représentation des profondeurs maximales d'attaque	107
Figure 4.14 : Représentation des vitesses maximales d'attaque	108
Figure 4.15 : Représentation des épaisseurs résiduelles	109
Figure 4.16 : Représentation des durées de vie	110
Figure 4.17 : Relation entre la profondeur interne et l'âge	112
Figure 4.18 : Relation entre la profondeur externe et l'âge	113
Figure 4.19 : Relation entre la profondeur équivalente et l'âge	113
Figure 4.20 : Relation entre la vitesse interne et l'âge	114
Figure 4.21 : Relation entre la vitesse externe et l'âge	114
Figure 4.22 : Relation entre la vitesse équivalente et l'âge	115
Figure 4.23 : Distribution des mesures de résistivité minimale	117
Figure 4.24 : Relation entre les épaisseurs nominales et moyennes des fontes GLM	118
Figure 4.25 : Ecart-type des mesures d'épaisseur en fonction de l'année de pose	119
Figure 4.26 : Relation entre durée de vie observée et calculée	120
Figure 4.27 : Comparaison de l'épaisseur résiduelle des échantillons	121
Figure 5.1 : Programme de renouvellement - Modèle agrégé.	124
Figure 5.2 : Programme de renouvellement - Modèle de régression multiple.	125
Figure 5.3 : Programme de renouvellement - Modèle des risques proportionnels.	126
Figure 5.4 : Programme de renouvellement - Critère physique de corrosion perforante.	128
Figure 5.5 : Comparaison des durées de vie (modèles statistique, probabiliste et physique)	129
Figure 5.6 : Comparaison des durées de vie (modèles statistique, probabiliste et physique)	129
Figure 5.7 : Comparaison des durées de vie résiduelles (modèles régressif et probabiliste)	130
Figure 5.8 : Comparaison des durées de vie résiduelles (modèles régressif et de corrosion)	131
Figure 5.9 : Programme optimal - Durée de vie minimale parmi les 3 modèles	132

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1.1 : Variables de défaillance et de détérioration</i>	20
<i>Tableau 1.2 : Exemples de seuils de défaillances retenus comme critères de renouvellement [ALEXANDRE et al., 1994]</i>	22
<i>Tableau 1.3 : Evolution des paramètres des conduites en fonte depuis 1878</i>	37
<i>Tableau 2.1 : Présentation des zones CUS</i>	41
<i>Tableau 2.2 : Variables de détérioration potentiellement disponibles sur le réseau CUS</i>	44
<i>Tableau 2.3 : Variables de détérioration retenues dans l'analyse du vieillissement</i>	44
<i>Tableau 2.4 : Répartition des rues et des tronçons par zone CUS</i>	46
<i>Tableau 2.5 : Taux par zone CUS représentant le linéaire dont l'âge est connu</i>	47
<i>Tableau 3.1 : Répartition des individus GL en fonction du nombre de défaillances</i>	68
<i>Tableau 3.2 : Répartition des individus en fonction de n et de Ndéf (fontes GL)</i>	69
<i>Tableau 3.3 : Répartitions des individus en fonte GL suivant les variables de censure.</i>	69
<i>Tableau 4.1 : Influence de la nature de fonte sur le taux de défaillances</i>	79
<i>Tableau 4.2 : Taux de défaillances par zone CUS</i>	81
<i>Tableau 4.3 : Synthèse des calculs de régression linéaire et logarithmique</i>	92
<i>Tableau 4.4 : Synthèse des calculs de régression linéaire et logarithmique</i>	94
<i>Tableau 4.5 : Synthèse des calculs de régression linéaire et logarithmique</i>	96
<i>Tableau 4.6 : Ajustement de la distribution du nombre de défaillances avec $P(\lambda)$</i>	99
<i>Tableau 4.7 : Ajustement de la distribution du nombre de défaillances avec $BN(v,p)$</i>	100
<i>Tableau 4.8 : Ajustement de la distribution de la durée de survie avec $E(\lambda)$</i>	101
<i>Tableau 4.9 : Ajustement de la distribution de la durée de survie avec $W(\lambda,p)$</i>	102
<i>Tableau 4.10 : Paramètres de l'analyse de survie</i>	103
<i>Tableau 4.11 : Analyse de la qualité de l'eau</i>	116

SIGLES ET NOTATIONS

Abréviations

AGHTM	Association des Hygiénistes et Techniciens Municipaux
ANRT	Association Nationale de la Recherche Technologique
CIFRE	Convention Industrielle de Formation par la Recherche
CUS	Communauté Urbaine de STRASBOURG
DVGW	Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches
ENGEES	Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg
ENSAIS	Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg
EPA	Environmental Protection Agency
Fonte GLM	Fonte à graphite lamellaire, moulée
Fonte GLC	Fonte à graphite lamellaire, centrifugée
Fonte GL	Fonte à graphite lamellaire
Fonte GS	Fonte à graphite sphéroïdal
LPCM	Laboratoire de Mécanique, Corrosion et Matériaux
LREP	Laboratoire Réseaux d'Eau Potable
MIT	Massachusetts Institute of Technology
PAM	PONT A MOUSSON S.A.
SAUR	Société d'Aménagement Urbain et Rural
SEDIF	Syndicat des Eaux d'Ile de France
SIG	Système d'Information Géographique

Variables et unités

r	coefficient de corrélation linéaire
ANPOSE	année de pose
AGE	âge en années
DN	diamètre nominal en mm
LONG	longueur en m
EP	épaisseur nominale en mm
MT	moment d'inertie en cm^4
PHOS	teneur en phosphore en %
Ndéf	nombre de défaillances antérieures d'un individu
n	nombre de défaillances d'un tronçon
Taux	Taux de défaillances d'un tronçon en nombre par km et par an
Dsurvie	Durée de survie d'un individu en jours
Pi, e, éq	Profondeur d'attaque (interne, externe, équivalente)
Vi, e, éq	Vitesse de corrosion (interne, externe, équivalente)
P	Loi de Poisson
BN	Loi Binômiale Négative
E	Loi Exponentielle
W	Loi de Weibull
σ	paramètre d'échelle du modèle des risques proportionnels
β_0	paramètre d'origine du modèle des risques proportionnels
$\mu\text{m}/\text{an}$	micromètre par an
ohm.cm	ohm centimètre
ft ²	feet ² (pied carré)

INTRODUCTION

560 000 kilomètres, quatorze fois le tour de la terre : c'est environ le cumul des longueurs de canalisations d'eau potable en France. Ces infrastructures publiques représentent un patrimoine d'une valeur considérable qu'il faut maintenir en état, et adapter aux besoins. Ceci est difficile car les réseaux sont enterrés, donc difficilement visibles ou réparables.

Le problème n'est pas nouveau mais devient, à l'aube du 21^{ème} siècle, de plus en plus d'actualité en raison de la proportion de canalisations qui ont dépassé l'âge de 50 ans. Mais aussi en raison des exigences de qualité de service que se fixent les gestionnaires sur les limitations des pertes et sur la permanence de qualité de l'eau distribuée, ainsi que sur la pression d'alimentation des clients. Tout ceci justifie des recherches méthodologiques sur l'évaluation du vieillissement et l'élaboration de stratégies de renouvellement.

La SAUR a testé des modèles de régression multiple appliqués aux données de défaillances du réseau de la Communauté Urbaine de Strasbourg [AGHTM, 1994]. L'ENGEES, en collaboration avec l'Institut de Recherche pour l'Ingénierie de l'Agriculture et de l'Environnement (Ccmagref) a développé les modèles probabilistes de prévision des défaillances sur 2 réseaux urbains (Bordeaux et banlieue de Paris) et 2 réseaux ruraux en Alsace [EISENBEIS, 1994]. Ces 2 partenaires se sont rapprochés dans le cadre d'une convention CIFRE avec l'objectif d'utiliser ces modèles sur le réseau d'eau potable de la CUS et de les comparer. Pour compléter les modèles statistiques, des mesures de corrosion des conduites en fonte ont été réalisées, en vue d'établir un modèle physique. Ce travail (modélisation, expérimentation) a concerné exclusivement le matériau fonte, le seul représenté sur le réseau strasbourgeois.

Le Service de l'Eau de la Communauté Urbaine de STRASBOURG (CUS) réfléchit au problème du renouvellement et s'est naturellement associé au projet. Des plans de renouvellement, traduisant l'avancement du travail, lui ont été fournis périodiquement comme outils d'aide à la décision pour établir une politique de renouvellement.

PONT A MOUSSON S.A. (PAM) et le Laboratoire de Mécanique, Corrosion et Matériaux (LMCM) de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg (ENSAIS) ont apporté leur contribution et leur savoir-faire à l'étude, en matière de métallurgie et de corrosion des conduites en fonte.

Ce travail concerne le vieillissement du réseau d'eau potable et les stratégies de renouvellement permettant d'y faire face ; il vise à répondre aux questions suivantes :

- comment expliquer l'apparition des défaillances sur un réseau d'eau potable ?
- peut-on prévoir les défaillances futures ?
- quel relation existe-t-il entre le processus de défaillance des tronçons et l'état de corrosion des échantillons prélevés sur ces tronçons ?
- une fois constaté le vieillissement d'un réseau, comment établir des stratégies de renouvellement optimales vis à vis de sa dégradation ?

Les principales attentes des gestionnaires en matière de renouvellement concernent :

- le classement hiérarchique des conduites à risque : on ne fixe pas de critère décisionnel ; on procède au renouvellement en fonction d'un risque décroissant de défaillances des conduites et du budget annuel disponible,
- la détermination d'un critère de renouvellement généralement lié à un objectif technique (rendement, taux de défaillances, etc.) ; le critère impose un volume de renouvellement annuel qui dépend de la configuration du réseau ; ce volume est arrêté pour plusieurs années et il est pris en compte dans la programmation des besoins du service.

La modélisation du vieillissement permet d'établir :

- des méthodes de classification hiérarchique des conduites à risque,
- des critères statistiques ou physiques de durée de vie des conduites.

Le premier chapitre introduit la problématique du renouvellement et décrit l'état des connaissances en matière d'étude de vieillissement et de renouvellement des réseaux. Le second chapitre détaille la méthodologie employée pour l'acquisition des données et les différents types d'analyses (statistique, probabiliste, physique). La présentation des données fait l'objet du troisième chapitre. La modélisation est décrite pour chaque type d'analyse dans le quatrième chapitre. Le cinquième chapitre utilise les résultats de la modélisation pour établir et comparer les stratégies de renouvellement.

1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 LA PROBLEMATIQUE DU RENOUVELLEMENT

1.1.1 Les manifestations du vieillissement

Le vieillissement des conduites est l'altération dans le temps de leurs caractéristiques et des fonctions qu'elles doivent assurer :

- transporter l'eau avec un débit et une pression suffisants,
- fournir une qualité répondant aux réglementations en vigueur,
- assurer la continuité du service.

Les principales manifestations du vieillissement sont :

- le colmatage par les produits de corrosion,
- l'altération de la qualité de l'eau transportée,
- l'augmentation des fuites diffuses et des ruptures.

Dans cette étude, le terme « **défaillance** » représente une rupture ou une fuite d'une conduite ou d'un joint de conduites ayant entraîné une intervention du gestionnaire du réseau ; les fuites de branchement, de robinetterie (robinets-vannes, hydrants, poteaux d'incendie) ou des appareils de régulation n'ont pas été prises en compte. Les défaillances ont été comptabilisées en nombre ou taux de défaillances par tronçon et par longueur de 100 km.

Nous nous sommes intéressés au caractère défaillant des conduites parce qu'il constitue une manifestation visible et facilement enregistrable du vieillissement. Les défaillances caractérisent le vieillissement par leur intensité et leur caractère irréversible. Elles fournissent une indication temporelle, ce qui représente un avantage pour la programmation de futurs travaux de renouvellement. Des travaux de recherche ont été menés sur l'influence du vieillissement sur la qualité de l'eau [HOUILLO, 1995]. Dans cette thèse, le vieillissement est considéré sous l'angle du caractère défaillant des conduites.

1.1.2 Les causes des défaillances

Une défaillance est principalement causée par l'existence d'une action mécanique qui dépasse les caractéristiques nominales de la conduite, ou d'une action corrosive qui atteint la totalité de l'épaisseur de la conduite. La figure 1.1 décrit un ensemble de variables qui déterminent ces contraintes.

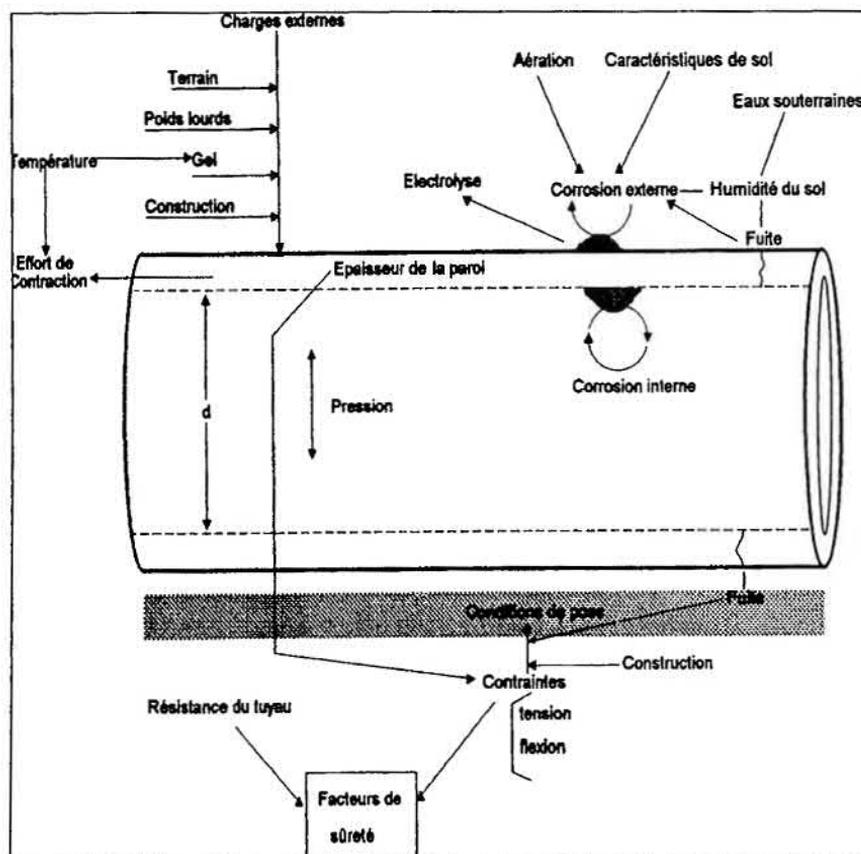


Figure 1.1 : Facteurs mécaniques et de corrosion des conduites [extrait d'EISENBEIS, 1994]

La figure 1.2 récapitule les différentes contraintes mécaniques subies par une conduite.

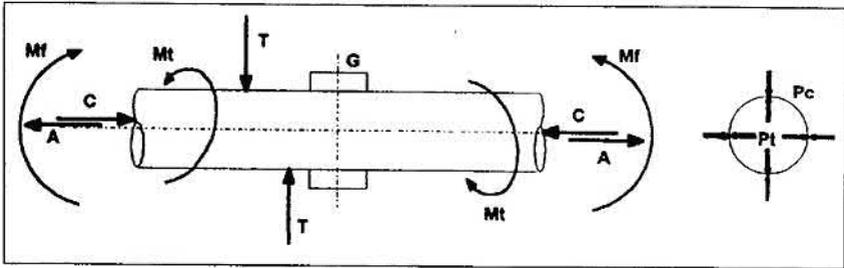


Figure 1.2 : Contraintes mécaniques subies par une conduite [extrait d'EISENBEIS, 1994]

Les actions mécaniques sont décrites par les contraintes suivantes :

- moment de flexion (Mf) susceptible de provoquer une courbure de la conduite
- moment de torsion (Mt) susceptible de tordre la conduite autour de son axe
- contrainte de cisaillement (T)
- effort de traction axiale (A)
- contrainte de compression axiale (C)
- surpression interne (Pt) susceptible d'entraîner l'éclatement de la conduite
- dépression interne (Pc) ou surpression externe pouvant provoquer un écrasement

1.1.3 Les types de défaillances

Les défaillances sur les conduites se manifestent respectivement par (figure 1.3) :

- les ruptures transversales
- les ruptures longitudinales (éclatements)
- les perforations
- les défaillances aux joints

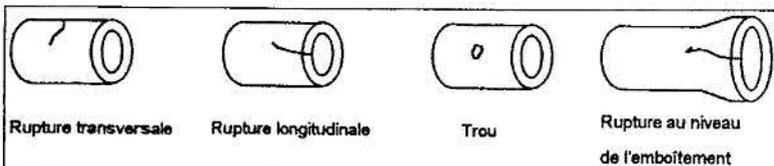


Figure 1.3 : Types de défaillances des conduites d'eau potable [extrait d'EISENBEIS, 1994]

Les ruptures transversales sont principalement causées par des actions mécaniques (moment de flexion, contrainte de traction ou de compression, contrainte de cisaillement, etc.) Les régimes transitoires créent des surpressions internes qui sont à l'origine des ruptures longitudinales. Les perforations sont principalement causées par des corrosions internes et externes qui atteignent la totalité de l'épaisseur des conduites. En pratique, les actions mécaniques et corrosives sont imbriquées ; on pense que les actions corrosives fragilisent la conduite et que les actions mécaniques déclenchent les défaillances [O'DAY, 1982].

1.1.4 Les variables de modélisation

Nous qualifierons les variables qui conditionnent les actions mécaniques et corrosives de « variables de détérioration ». On peut les classer en 3 familles [EJSW, 1997] :

- variables structurelles caractérisant la conduite,
- variables d'environnement,
- variables d'exploitation.

Le tableau 1.1 propose une liste non exhaustive de variables décrivant les défaillances et de variables de détérioration.

Tableau 1.1 : Variables de défaillance et de détérioration

Variables décrivant les défaillances	Variables de détérioration		
	Variables structurelles	Variables d'environnement	Variables d'exploitation
Date	Diamètre nominal	Corrosivité du sol	Vitesse d'écoulement
Localisation	Epaisseur nominale	Charges(trafic + sol)	Variations de pression
Type de défaillance	Pression nominale	Niveau de nappe	Agressivité de l'eau
Type de réparation	Année de pose	Lit de pose	Rugosité
Temps de réparation	Matériau	Taux de fuite	Coups de bélier
Coût de réparation	Type de joint	Courants vagabonds	
	Profondeur de pose	Sel de déneigement	
	Revêtement interne	Température	
	Revêtement externe	Blocs durs	
	Métallurgie	Mouvements de terrain	

La réparation des défaillances est l'occasion de renseigner certaines variables de détérioration (profondeur de pose, nature de sol, humidité du sol) ainsi que l'état de corrosion de la conduite.

A partir de l'enregistrement des défaillances pendant une période d'observation, on calcule pour chaque conduite :

- le nombre de défaillances observée,
- le taux de défaillances observé (nombre par 100 km et par an),
- la durée de survie (durée entre deux défaillances).

Ces variables constituent les variables à expliquer de l'analyse statistique.

1.1.5 La durée de vie des conduites

L'estimation, même approximative, de la durée de vie des conduites, est un élément nécessaire à la programmation du renouvellement des canalisations. Elle peut s'appuyer sur 2 types de modèles :

- les modèles statistiques fondés sur l'historique des défaillances,
- les modèles physiques fondés sur un diagnostic direct de l'état des conduites.

La corrosion est considérée comme la manifestation principale du vieillissement des conduites en métal ; c'est pourquoi il est intéressant de la prendre en compte dans le cadre d'un modèle physique.

Il convient de souligner la relativité de cette notion de durée de vie et la difficulté de l'analyse. Un tuyau peut avoir effectivement une durée de vie physique (par exemple, rupture longitudinale non réparable) mais la plupart des modèles raisonnent sur des tronçons de longueur bien supérieure à un tuyau standard [PONT A MOUSSON, 1989].

Dans le cadre des contraintes d'exploitation, la durée de vie correspond à l'âge de la conduite lors de son renouvellement. Les motifs de renouvellement sont variés et pas toujours liés au vieillissement (voir chapitre 1.2. : les pratiques de renouvellement). Ce critère de la durée de vie d'exploitation est utilisé dans la méthode allemande ; celle-ci consiste à programmer les futurs travaux en se fondant sur les pratiques adoptées par le passé.

Certains services ont adopté un critère de durée de vie spécifiquement lié au vieillissement (voir tableau 1.2). Ils décident de renouveler à partir du moment où un certain taux de défaillances critique est atteint. Ce taux est défini soit de façon arbitraire (lorsque la

gène occasionnée par la conduite dépasse le service rendu), soit à la suite d'un calcul technico-économique.

La durée de vie technico-économique est calculée en fonction des coûts relatifs des réparations et du renouvellement, du taux d'actualisation, du taux de défaillances et de sa loi d'évolution.

Tableau 1.2 : Exemples de seuils de défaillances retenus comme critères de renouvellement [ALEXANDRE et al., 1994]

Service	Seuil retenu
Compagnie Générale des Eaux	2 défaillances / km.5 ans soit
Syndicat des Eaux d'Ile de France	40 déf / 100km.an
Divers services aux U.S.A.	2 à 5 défaillances / km.an soit 200 à 500 déf / 100km.an
Southern Water Authority (U.K.)	6 interruptions de 3 heures en 18 mois

L'espérance de vie dans les modèles de prévision de défaillances correspond uniquement à une estimation statistique (régressive ou probabiliste) du temps entre l'installation et la première défaillance ou entre deux défaillances et ne préjuge en rien du renouvellement de la conduite. La modélisation statistique développée sur les réseaux de New Haven et Cincinnati [ANDREOU, 1986] a permis de définir 2 stades successifs de détérioration des réseaux :

- un stade peu défaillant (détérioration initiale),
- un stade de défaillances multiples (détérioration avancée) se produisant selon un rythme régulier et avec une grande variabilité parmi les tronçons.

Ce deuxième stade, quand il est bien caractérisé, peut être considéré comme le stade de fin de vie pour les conduites concernées.

La durée de vie physique d'un tronçon intervient quand son état de corrosion généralisée conduit à la perforation. La corrosion s'applique sur les faces interne et externe, avec des cinétiques qui peuvent être différentes en fonction de l'environnement (eau et sol).

Finalement, les critères de durée de vie peuvent être regroupés en 4 catégories :

- exploitation (motifs de renouvellement divers incluant le vieillissement),
- technico-économique (coût de maintenance > coût de renouvellement),
- statistique (passage du stade peu défaillant au stade de défaillances multiples),
- physique (perforation de la conduite).

1.2 LES PRATIQUES DE RENOUVELLEMENT

Les conduites constituent un patrimoine qui vieillit et qu'il est nécessaire de renouveler, quand il a atteint un seuil de vétusté limite. Ce seuil limite dépend de nombreux paramètres locaux et de la politique du gestionnaire. Pour qu'une politique de renouvellement soit économiquement viable, il faut qu'elle soit liée le plus directement possible au vieillissement ; dans la pratique, c'est rarement le cas du fait du poids des critères politiques ou budgétaires, des impératifs de nécessité absolue ou de santé publique. La modélisation du vieillissement des réseaux est fonction à la fois des données disponibles dans le service et de l'objectif que s'est assigné le gestionnaire en matière de renouvellement. Dans ce chapitre, le terme « réhabilitation » désigne les opérations de maintenance (réparations), de rénovation et de renouvellement.

1.2.1 En France

L'Association des Hygiénistes et Techniciens Municipaux (AGHTM) a réalisé en 1993 une enquête sur les pratiques de renouvellement des services d'eau [AGHTM, 1993]. Les réponses ont été analysées en distinguant les petits services des grandes collectivités.

1.2.1.1 Les petits services

Dans les petits services, le renouvellement est généralement lié au renforcement hydraulique des conduites (accroissement des besoins, défense-incendie), aux travaux de voirie, à l'augmentation des pertes et à l'âge des conduites.

46 % de ces services procèdent au renouvellement sans politique liée au vieillissement des conduites. Le taux moyen annuel de renouvellement est de 0,64%, soit une moyenne de durée de vie des conduites de 156 ans.

1.2.1.2 Les agglomérations

Dans les agglomérations, des stratégies de renouvellement liées au vieillissement se mettent en place avec l'émergence des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et des bases de données urbaines. Cependant, le nombre d'agglomérations qui pratiquent une politique volontariste reste minoritaire ; l'enquête AGHTM montre que seuls 3 services sur 13 pratiquent une telle politique avec chacune un objectif différent, à savoir : diminution de l'âge moyen, limitation de l'âge maximum des conduites et augmentation du rendement du réseau.

1.2.2 En Allemagne

L'approche allemande consiste à programmer les futurs travaux de renouvellement à partir des durées d'exploitation adoptées par le passé ; elle est décrite dans la recommandation W401 du Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches : « aides à la décision pour la réhabilitation des réseaux d'eau potable » [DVGW, 1997]. Le professeur HERZ de l'Université de Dresde propose un modèle statistique de survie par cohorte fondé sur cette approche [HERZ, 1996]. Le diagnostic se déroule en plusieurs étapes :

1.2.2.1 Acquisition des données descriptives du réseau

Il s'agit de recenser les informations relatives aux conduites, branchements, vannes et hydrants, réparations, données sur l'état des conduites, réclamations de la clientèle, analyses de qualité d'eau, résultats de modélisation hydraulique ou de mesures de pression et données économiques d'exploitation et de maintenance.

1.2.2.2 Classification des conduites

La classification est établie sur le critère de la durée de vie ; l'estimation des durées de vie est fondée sur des critères d'exploitation, dont l'âge n'est pas le principal ; parmi ces critères, on peut citer : le matériau, les conditions de pose, les conditions de sol, le taux de défaillances. La classification des conduites obtenue à partir de l'expérience du gestionnaire fournit une estimation sommaire des besoins de réhabilitation.

1.2.2.3 Programmation à long terme

Elle se déroule en trois étapes à partir de l'analyse descriptive du réseau, l'évaluation des durées de vie par classes de conduite, l'évaluation des durées de vie après une optimisation économique.

1.2.3 Au Royaume-Uni

Le Water Research Center a développé un guide de diagnostic physique des réseaux en fonte : « manuel de réhabilitation des conduites d'eau potable : estimation de l'état des tuyaux en fonte » [DEMPSEY P., MANOOK B. A., 1986]. L'objectif est de fournir des informations sur l'état structurel du réseau pour optimiser la réhabilitation. Des procédures décrivent l'inspection des conduites sur site, à partir d'examens visuels, de techniques magnétiques ou ultrasoniques. D'autres procédures décrivent le grenailage des échantillons et la mesure quantitative de la corrosion. L'objectif du guide est d'aider les services publics à développer une stratégie pour la réhabilitation des réseaux adaptée à leurs situations particulières. Le but général est de réduire au maximum le coût [AINSWORTH, 1985].

1.2.4 Aux Etats-Unis

Les agglomérations américaines disposent de base de données urbaines depuis une trentaine d'années [O'DAY, 1982] [CLARK & GOODRICH, 1989]. Les réseaux d'eau potable des ces collectivités dépassent l'âge de cent ans pour les plus anciens ; ces derniers sont principalement réalisés en fonte. La constitution de bases de données urbaines sur les réseaux vieillissants en fonte a permis le développement de recherches sur les modèles statistiques de détérioration [KARAA, 1984] [ANDREOU, 1986]. Les premières analyses sont fondées sur des statistiques descriptives, tandis que des modèles plus élaborés analysent la prédiction des défaillances.

1.3 LA MODELISATION DU VIEILLISSEMENT

La modélisation du vieillissement consiste à trouver des relations entre le taux de défaillances ou la durée de survie et les variables de détérioration. Les interactions entre les variables de détérioration sont si nombreuses qu'il est pratiquement impossible d'établir des modèles déterministes à l'échelle d'un réseau. Ces modèles ne peuvent être utilisés que dans des expérimentations localisées à quelques conduites, nécessitant un niveau d'instrumentation avancé (capteurs de contraintes physiques, mesure des charges corrosives dues à l'environnement). La plupart des modèles sont de nature statistique. On peut les classer en :

- modèles strictement statistiques si aucune variable ne décrit les actions mécaniques ou corrosives agissant sur la conduite,
- modèles statistiques physiques dans le cas contraire.

1.3.1 Les études statistiques descriptives

Les statistiques descriptives ont été utilisées à de nombreuses reprises pour analyser les défaillances des conduites. Elles consistent à établir des relations simples entre le taux de défaillances et les variables de détérioration. Les plus représentatives sont celles établies par O'DAY pour la ville de PHILADELPHIE et par le US Army Corps of Engineers pour les villes de BUFFALO et NEW YORK. Même si ces études révèlent les tendances habituelles du comportement des conduites détériorées, de nombreuses questions concernant le processus de défaillance restent en suspens [ANDREOU et al, 1987].

La question de l'influence de l'âge sur les défaillances, notamment, est une source de controverse. L'explication tient au fait que la relation entre l'âge et les défaillances est très complexe et qu'elle ne peut pas être mise en évidence avec des outils statistiques simples. Intuitivement, il semble que les variables relatives à l'âge, comme le matériau, la technique de pose, et la détérioration due à la corrosion, pourraient fournir une relation entre le vieillissement et le taux de défaillances, mais celle-ci n'a jamais été clairement établie dans la littérature. On observe parfois que des conduites récentes subissent des casses dues aux défauts de fabrication ou à des conditions défavorables localisées qui induisent une contrainte excessive sur la conduite. L'effet du vieillissement est attendu beaucoup plus tardivement dans la vie de la conduite. Finalement, la relation entre l'âge et le taux de défaillances prend une forme non-linéaire et parfois même non-monotone.

En résumé, les statistiques descriptives sur les réseaux de distribution détériorés fournissent des indications sur le processus de défaillance et sur les variables explicatives potentielles. Cependant, ce type d'analyse présente les inconvénients suivants [ANDREOU et al, 1987] : elles ne fournissent pas d'indications utiles pour le comportement individuel des conduites et elles ne montrent pas les interactions entre les variables explicatives.

1.3.2 Les modèles prédictifs

Trois types de modèles ont été développés à ce jour [ANDREOU et al, 1987] :

- les modèles agrégés, où le nombre de défaillances prévu est fonction d'une seule variable, généralement l'âge,
- les modèles de régression multiple, où le nombre de défaillances prévu ou la durée jusqu'à la prochaine défaillance est une fonction de plusieurs variables explicatives,
- les modèles probabilistes où les probabilités de défaillances futures sont estimées.

1.3.2.1 Les modèles agrégés

Les plus représentatifs de cette famille sont les modèles proposés par SHAMIR et HOWARD [SHAMIR & HOWARD, 1979]. Il s'agit d'une relation simple (linéaire ou exponentielle) entre le taux de défaillances et l'âge de la conduite :

$$N(t) = N(t_0)e^{A(t-t_0)} \quad \text{ou} \quad N(t) = N(t_0) + A(t - t_0)$$

avec :

N : nombre de défaillances par unité de longueur à l'instant t

t : temps en années

t_0 : année de base de l'analyse ou année de l'installation de la conduite

A : taux de croissance annuel des défaillances

Les valeurs de A proposées par SHAMIR et HOWARD sont comprises entre 0,05 et 0,15. Cette approche constitue la première tentative d'analyse statistique des défaillances comme outil d'aide à la décision pour le renouvellement. Son avantage principal est la simplicité. Cependant, on peut lui reprocher les défauts suivants :

- Les variables explicatives (structurelles, d'environnement et d'exploitation) ne sont pas prises en compte ; cela rend difficile l'utilisation du modèle puisque ces variables contribuent de manière interactive aux défaillances,
- En général, les études où ces modèles sont utilisés ne donnent pas d'informations sur la qualité des tests d'ajustement et sur la signification statistique des coefficients du modèle. La grande variabilité du taux de défaillances entre les conduites montre que les modèles où toutes les variables explicatives sont regroupées dans un paramètre peuvent donner des estimations très peu fiables.

1.3.2.2 Les modèles de régression multiple

Il s'agit d'équations de régression multiple entre une variable de maintenance (nombre ou taux de défaillances, durée entre 2 défaillances) et les variables descriptives de détérioration. Lorsqu'une variable descriptive de détérioration est significative pour la régression avec la variable de maintenance à expliquer, on parle de variable explicative de détérioration.

L'exemple qui représente le mieux ce type de modèle est celui développé par CLARK et al. avec l'Environmental Protection Agency (EPA) [CLARK et al., 1982]. Il propose 2

équations, l'une estimant la durée jusqu'à la première défaillance, l'autre estimant le nombre de défaillances de la conduite à la suite de la première.

Age à la première défaillance :

$$NY = 4,13 + 0,338D - 0,022P - 0,265I - 0,098RES - 0,0003LH + 13,28T \quad (r^2 = 0,23)$$

La variable expliquée est l'âge de la conduite en années lors de la première défaillance.

Les variables explicatives sont :

- D : diamètre de la conduite en pouces
- P : pression absolue dans la conduite en livres par pouce carré
- I : pourcentage de linéaire en zone industrielle
- RES : pourcentage de linéaire en zone résidentielle
- LH : linéaire en sol hautement corrosif
- T : type de conduite (0 pour le béton, 1 pour les matériaux métalliques)

Nombre de défaillances après la première :

$$REP = 0,172 e^{0,72T} e^{0,044PRD} e^{0,0865A} e^{0,0121DEV} SL^{0,014} SH^{0,069} \quad (r^2 = 0,49)$$

La variable expliquée est le nombre de défaillances.

Les variables explicatives sont :

- T : type de conduite (0 pour le béton, 1 pour les matériaux métalliques)
- PRD : pression différentielle
- A : durée écoulée depuis la première défaillance
- DEV : pourcentage de linéaire en zone développée
- SL : surface de conduite dans un sol faiblement agressif (en ft²)
- SH : surface de conduite dans un sol fortement agressif (en ft²)

Il est intéressant de noter la relation exponentielle entre le nombre de défaillances et la durée écoulée depuis la première défaillance ; la longueur du tronçon n'a pas été utilisée et la même équation est appliquée quel que soit le nombre de défaillances de la conduite. De nombreuses techniques statistiques ont été appliquées pour établir des modèles prédictifs ; avant 1986, seule l'analyse discriminante avait été appliquée aux données de défaillances. Une étude avait contribué à expliquer l'apparition des défaillances sur les réseaux, et à cerner les limites de cette technique que l'on peut résumer ainsi [ANDREOU et al, 1987] :

- l'analyse a été limitée par la classification des conduites en 2 groupes : celles ayant cassé et les autres. C'est insuffisant pour distinguer plusieurs stades de défaillances, par exemple un stade initial peu défaillant et un stade à défaillances multiples. L'analyse n'a pas pris en compte l'histoire du tronçon, ce qui aurait permis de prévoir les défaillances futures,
- la description de l'influence de l'âge sur les défaillances n'a pas été possible,
- l'analyse discriminante a été menée séparément pour chacun des diamètres et les covariables étaient très différentes selon les cas ; par conséquent, la détermination de variables de détérioration générales est rendue très difficile. Comme il est précisé dans l'étude, la précision de la fonction discriminante linéaire est fonction du diamètre et ne peut en aucun cas être assez précise pour servir de modèle prédictif.

1.3.2.3 Les modèles probabilistes

Ils sont appliqués aux durées de vie d'individus aussi divers que des composants électroniques, des bactéries ou des patients. La durée de vie représente la durée pendant laquelle l'individu fonctionne normalement entre un début et une fin de vie mesurés dans le temps. Le début est généralement représenté par une mise en service, une naissance ; la fin par une panne, une défaillance ou la mort. Pour les conduites d'eau potable, la durée de survie représente un laps de temps pendant lequel la conduite n'a pas subi de défaillances.

L'originalité de ces modèles est d'estimer une probabilité de défaillance pour un horizon donné. Ils sont calculés à partir d'une technique d'ajustement entre la durée séparant deux défaillances (durée de survie) et les variables descriptives de détérioration. L'objectif de ces modèles est de calculer, pour un horizon donné :

- la probabilité, pour une conduite, de ne pas subir de défaillance,
- l'espérance du nombre de défaillances (d'une partie ou de la totalité du réseau).

L'influence du temps sur la détérioration des conduites permet de distinguer le modèle des risques proportionnels, où le temps agit indépendamment des variables de détérioration du modèle des temps accélérés où il agit comme une covariable.

Le modèle des risques proportionnels a été appliqué aux réseaux d'eau potable lors de la thèse de Stephanos A. ANDREOU au Massachusetts Institute of Technology (MIT) en 1986. Il a été repris en France par le Cemagref et l'ENGEES [EISENBEIS, 1994]. Dans son étude, ANDREOU a mis en évidence l'existence de 2 stades successifs de détérioration :

- un stade peu défaillant, où l'âge influe sur l'apparition des premières défaillances (processus de Markov semi-homogène),
- un stade de défaillances multiples, où les défaillances suivent un processus poissonien, avec un taux de défaillances constant dans le temps mais variable parmi les tronçons.

1.3.3 Les modèles physiques

Ces modèles définissent l'évolution des paramètres physiques de la conduite en fonction du temps ou des variables de détérioration. On peut ensuite estimer une « durée de vie physique » des conduites en comparant les paramètres mesurés aux valeurs originelles.

1.3.3.1 Le modèle de Vancouver [O'Day et al, 1987]

Il est issu d'une étude de 1978 qui définit les durées de vie de 42 milles de conduites en fonte installés depuis le début du siècle. Le modèle décrit la profondeur maximale de corrosion externe en fonction du temps. Les résultats de l'étude et de l'analyse de 20 échantillons de conduite sont :

- la diminution moyenne d'épaisseur due à la corrosion est de 1,65 mm,
- la résistivité du sol varie entre 3400 et 900 000 ohm.cm,
- le pH du sol varie entre 4,6 et 9,4
- le sol est faiblement aéré,
- aucune trace de sulfure n'a été détectée,
- l'eau n'est pas entartrante et contient des taux d'oxygène dissous élevés.

Les données de sol ont été alors incorporées au modèle pour estimer la profondeur de piqûre externe de la paroi. Une trentaine de courbes correspondant aux différentes combinaisons des données de sol ont été ensuite établies (voir figure 1.4).

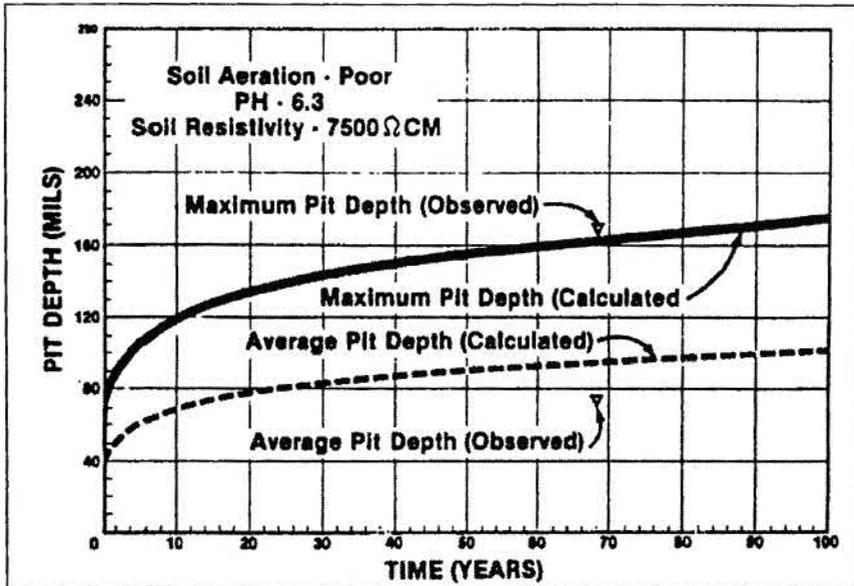


Figure 1.4 : Modèle cinétique de corrosion externe [extrait d'EISENBEIS, 1994]

1.3.3.2 Le modèle de l'US Army Corp of Engineers Construction Engineering Research Laboratory [O'Day et al, 1987]

Ce modèle a été développé sur des réseaux de distribution de gaz en fonte ; il estime l'influence de la corrosion externe sur la paroi de la conduite et calcule un index de corrosion variant de 1 à 100 ; une valeur de 100 correspond à une conduite sans corrosion externe, une valeur de 0 à une conduite entièrement corrodée. Il a été observé que la casse de la canalisation a lieu lorsque l'indice est de l'ordre de 30.

1.4 LA METALLURGIE ET LA CORROSION DES CONDUITES EN FONTE

1.4.1 La métallurgie des fontes

Les fontes constituent une large variété d'alliages Fer Carbone Silicium, dont la teneur minimale en carbone est de 1,7 %. En général, la teneur en carbone est telle qu'il puisse se former un eutectique lors de la solidification. Une classification peut être établie en fonction de la teneur en carbone dans le métal de base :

- fers : 0 à 0,1 % de carbone,
- aciers : 0,1 à 1,7 % de carbone,
- fontes : 1,7 à 5 % de carbone.

Le silicium est toujours présent en quantité significative, normalement de l'ordre de 1 à 3 %, afin de permettre la formation de graphite ; la figure 1.5 illustre la teneur en carbone et en silicium des différents types de fonte.

La ligne supérieure montre la variation de la composition eutectique des alliages fer-carbone-silicium ; la ligne inférieure montre la limite supérieure de la solubilité du carbone, qui varie avec la teneur en silicium ; cette ligne définit la limite entre les aciers et les fontes.

D'autres éléments sont présents dans les fontes dans des proportions très faibles, de l'ordre de quelques dixièmes de pour-cent, mais ils ont une part prépondérante sur la structure et les propriétés mécaniques et de fonderie du métal ; c'est la raison pour laquelle les fontes ne sont pas définies et normalisées selon leurs compositions chimiques, mais selon leurs propriétés mécaniques (résistance à la traction, allongement, dureté) et selon leurs types (qui dépendent de la présence et de la forme du graphite).

1.4.1.1 Les fontes à graphite lamellaire (fontes GL)

Dans cette famille, le carbone n'est que partiellement combiné à la matrice métallique ; la plus grande partie de celui-ci cristallise en graphite lamellaire pendant le processus de solidification, à condition que la composition du métal liquide soit appropriée et que la vitesse de refroidissement soit lente ou modérée. Ces fontes, dénommées fontes grises, doivent leur nom au fait que les lamelles de graphite sont des plans de faible résistance le long desquels la rupture se produit, exposant une grande quantité de graphite de couleur sombre à la surface de la fracture. Le graphite lamellaire confère aux fontes grises leurs caractéristiques spécifiques : bonne usinabilité, bon comportement aux frottements (effet lubrifiant du graphite), et une

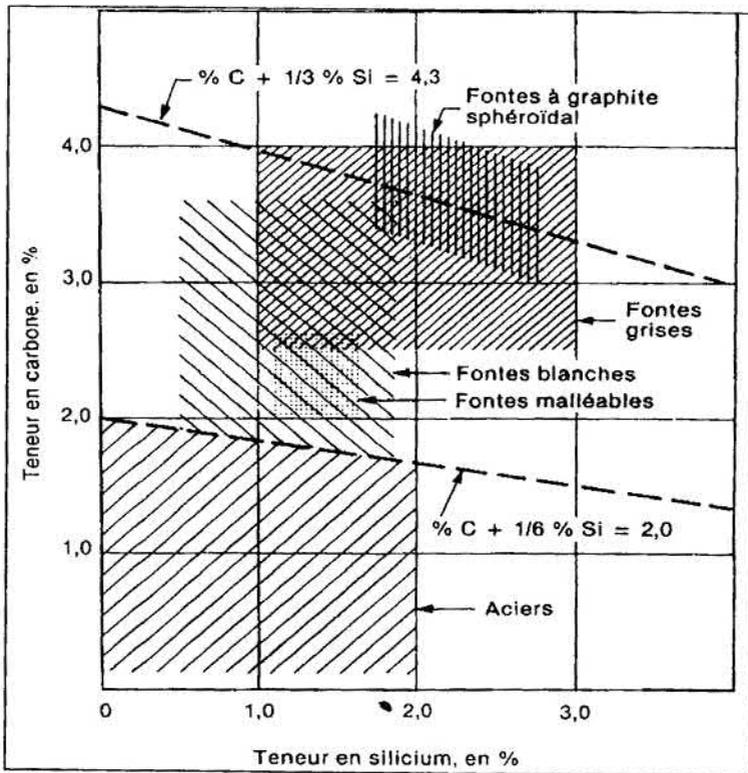


Figure 1.5 : Teneurs en carbone et en silicium des aciers et de différents types de fonte [extrait de PAM, 1986]

remarquable capacité à amortir les vibrations (due à l'absorption d'énergie le long des plans de graphite). Les fontes grises sont également connues pour leur excellente aptitude au moulage. La composition chimique, le procédé de coulée et la vitesse de refroidissement, ont tous une influence sur le nombre et la taille des lamelles de graphite ainsi que sur la microstructure de la matrice ; ils peuvent mener à une large gamme de combinaisons des propriétés mécaniques. Avant les années 1930, les fontes GL moulées (fontes GLM) étaient coulées verticalement dans des moules en sable. Après 1930, les métallurgistes ont cherché à diminuer ou à supprimer l'effet d'amorce de rupture en jouant sur la taille des lamelles ou leurs dispositions. La centrifugation a permis d'obtenir des lamelles plus fines et mieux

réparties qui augmentent sensiblement les qualités mécaniques des fontes GL centrifugées (fontes GLC). Les figures 1.6 et 1.7 décrivent la microstructure des fontes GLM et GLC.



Figure 1.6 : Microstructure d'une fonte GLM [Pont A Mousson, 1986]



Figure 1.7 : Microstructure d'une fonte GLC [Pont A Mousson, 1986]

1.4.1.2 Les fontes à graphite sphéroïdal (fontes GS)

Comme dans les fontes GL, une partie importante du carbone cristallise sous forme de graphite ; la différence principale vient de la forme sphéroïdale du graphite, obtenue par germination lors du traitement au magnésium du métal fondu (voir figure 1.8). Le développement rapide des fontes GS est dû à un ensemble incomparable de propriétés, telle qu'une grande résistance à la traction, un haut module d'élasticité et une grande capacité de déformation plastique (ayant pour conséquence un allongement à la rupture élevé et une grande ténacité). En raison de leur allongement à la rupture élevé, les fontes à graphite sphéroïdal sont également appelées « fontes ductiles ».

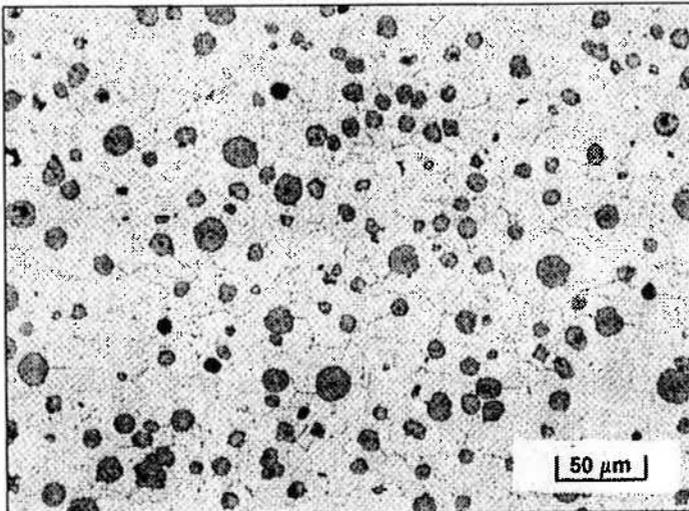


Figure 1.8 : Microstructure d'une fonte GS [Pont A Mousson, 1986]

1.4.2 Les types de conduites en fonte du réseau CUS

Les fontes posées durant la période d'annexion allemande de l'Alsace-Moselle (1870-1918) proviennent des fonderies de la Sarre, principalement de l'usine HALBERGERHÜTTE. Elles ont été élaborées avec un minerai et une technologie assez proches de celles de PAM S.A. qui prirent le relais de 1918 à nos jours. Nous nous sommes donc fondés sur les données de cette société pour étudier l'historique des conduites en fonte, même durant la période allemande.

La production de canalisations d'eau potable est réalisée à partir de métal élaboré en haut-fourneau. Après quelques essais de coulage à plat, les premiers tuyaux furent coulés verticalement, dans des moules en sable. L'origine locale de leurs constituants procurent aux premières fontes des teneurs élevées en phosphore et en soufre. Bien que le phosphore représente un élément fragilisant, il procure à la fonte de l'époque une excellente coulabilité. En 1934, un saut technologique important est franchi avec la mise en oeuvre de la centrifugation sur coquille refroidie en remplacement progressif du moulage en sable. Les premières conduites centrifugées sont produites en 1934. Du fait de l'existence de stocks au Service Municipal des Eaux, nous avons choisi 1936 comme année de transition entre la coulée en sable et la centrifugation.

En 1948, Keith MILLIS et Albert GAGNELIN découvrent au laboratoire américain de l'International Nickel la possibilité d'obtenir la graphitisation des fontes sous forme de sphères par ajout de Magnésium [PONT A MOUSSON S.A., 1984]. C'est le deuxième saut technologique important. La fabrication des canalisations en fonte ductile est passée de 5% en 1960 à pratiquement 100% en 1970. En se fondant sur la connaissance du réseau CUS, nous avons choisi 1968 comme année de transition entre la fonte à graphite lamellaire et la fonte ductile.

En parallèle du développement métallurgique, des progrès importants ont été enregistrés dans le registre des joints et des revêtements de canalisations. Les années quarante ont vu l'apparition des joints caoutchouc, qui ont progressivement remplacé les joints au plomb rigides et à l'origine de défaillances. Les revêtements ont évolué dans les années soixante, avec l'utilisation du mortier de ciment en interne et du zinc métallique en externe. Le tableau 1.3 recense toutes ces évolutions, avec des années charnières qu'il faut considérer avec prudence ; en effet, les évolutions se sont déroulées sur plusieurs années, voire dizaines d'années.

Tableau 1.3 : Evolution des paramètres des conduites en fonte depuis 1878

Année de pose	1878	1888	1898	1908	1918	1928	1938	1948	1958	1968	1978	1988	1998	
Fabrication	Moulage vertical en sable						Centrifugation							
Forme du graphite	Lamellaire									Sphéroïdale				
Revêtements internes	Noirs									Mortier de ciment				
Revêtements externes	Noirs									(1)			Zinc	
Joints	Plomb						Caoutchouc							
Type de matrice	Perlitique						Ferritique							
Forme des lamelles	Type A, B ou C						Type D ou E			Néant				
Taille des lamelles	Décroissant de 0,5 mm à 0,03 mm (2)									Néant				
Teneur en phosphore	Décroissant de 2 % à 0,02 % (2)													
Nature de fonte	GLM						GLC			GLCr	GS	GSr		

(1) : Limite variable suivant le diamètre

(2) : Valeurs observées sur les échantillons CUS

On obtient au cours du temps et au fil des évolutions technologiques cinq natures de conduites que l'on a abrégé de la manière suivante :

fonte à graphite lamellaire, moulée :	GLM
fonte à graphite lamellaire, centrifugée :	GLC
fonte à graphite lamellaire, centrifugée et revêtue :	GLCr
fonte à graphite sphéroïdal :	GS
fonte à graphite sphéroïdal, revêtue :	GSr

1.4.3 La corrosion des conduites en fonte

Le fer, comme tout métal industriel, est instable par rapport à son milieu environnant, et il cherche à retrouver son équilibre en revenant à l'état primitif stable qui est celui de minerai. La corrosion est le résultat des réactions chimiques ou électrochimiques entre le métal et son environnement au cours desquelles le métal passe de la forme élémentaire à la forme combinée, avec un composé plus stable (carbonates, oxydes, hydroxydes, sulfures etc.).

La corrosion des métaux en milieu humide est essentiellement électrochimique. Lorsque le métal est plongé dans un électrolyte, un certain nombre d'atomes métalliques

passent dans la solution sous forme d'ions chargés positivement et le métal prend une charge négative. La corrosion se traduit toujours par une perte de métal qui est fonction du métal, de la composition de l'électrolyte et de la température. La corrosion de la fonte à graphite lamellaire se manifeste par la formation de pustules qui correspond à l'expansion des produits de corrosion. En effet, la corrosion se manifeste sous deux formes :

- les résidus de corrosion représentent les éléments non altérés qui restent en place,
- les produits de corrosion, principalement oxydes et hydroxydes de fer, dont une partie est rejetée hors de la paroi, et peut constituer des pustules, ou bien diffuser dans le milieu extérieur, et une autre partie qui est enfermée dans les résidus.

Les résidus, restés en place et lieu du métal, sont constitués d'un enchevêtrement de lamelles de graphite, d'eutectique phosphoreux (si la fonte contenait du phosphore) et d'oxydes et d'hydroxydes de fer qui y sont enfermés. Ils permettent de conserver la forme d'origine du tuyau sans changement apparent des dimensions physiques, mais ils présentent un minimum de résistance qui ne permet pas d'assurer l'intégrité structurale de la conduite.

Il est possible que la corrosion pénètre à travers l'épaisseur totale de la paroi sans produire de fuites. Le résidu de corrosion, surtout dans le cas des fontes lamellaires phosphoreuses, est en général suffisamment résistant pour supporter des pressions assez élevées. La capacité du résidu de corrosion à remplir ce rôle structural est une propriété importante des canalisations en fonte à graphite lamellaire. Il y a néanmoins diverses formes de résidus, plus ou moins résistantes, dont quelques unes se détachent plus facilement laissant apparaître d'éventuelles perforations.

La formation des pustules correspond à la diffusion des produits de corrosion à l'intérieur des conduites sur les zones les plus attaquées. Elle est caractérisée par une augmentation du volume des produits de corrosion. La surface intérieure est généralement recouverte uniformément d'une couche de produits de corrosion de faible épaisseur, parsemée par des excroissances locales (pustules) là où il y a des attaques plus importantes ; ces pustules réduisent la section utile de la conduite. Elles sont formées d'une carapace plus ou moins dure d'oxydes et d'hydroxydes de fer, de carbonates contenant à l'intérieur des produits plus mous. Des excroissances de produits de corrosion peuvent se former également sur la surface extérieure de la conduite, mais elles sont plus rares et plus localisées.

La fragilisation générale des conduites corrodées a souvent pour conséquence des ruptures, bien que le résultat direct de la corrosion soit les perforations.

1.4.3.1 Corrosion interne

Pour expliquer les phénomènes d'interactions entre l'eau et la fonte de la conduite, il faut introduire les notions d'agressivité et de corrosivité des eaux.

L'agressivité de l'eau est l'action provoquée par la présence de CO_2 agressif. La figure 1.9 présente la répartition de l'anhydrique carbonique dans les eaux.

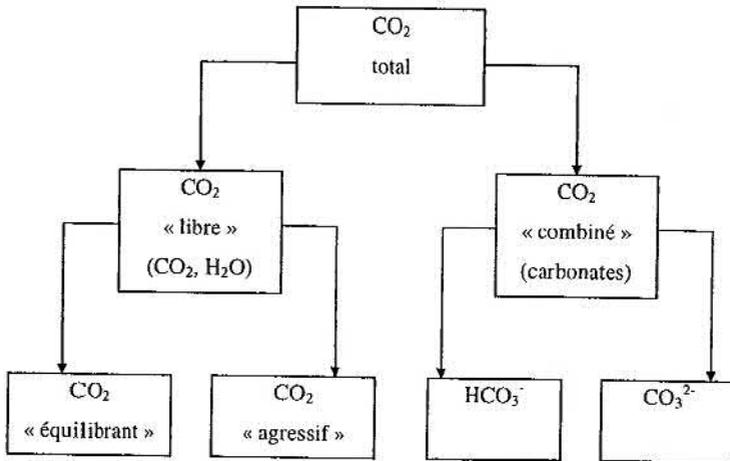
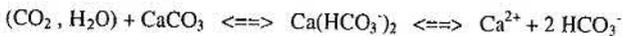


Figure 1.9 : Répartition de l'anhydrique carbonique dans les eaux

L'équilibre entre les différentes formes de CO_2 , désigné équilibre calco-carbonique, est régi par l'équation chimique :



La quantité d'anhydrique carbonique nécessaire pour éviter une décomposition des carbonates est désignée sous le nom de CO_2 équilibrant. L'excès de CO_2 par rapport à celui nécessaire à l'équilibre calco-carbonique s'appelle le CO_2 agressif. Ce dernier, en détruisant les carbonates, empêche le dépôt d'un film protecteur sur les parois métalliques en contact avec l'eau. L'eau est dite agressive.

Dans le cas contraire, lorsqu'il y a déficit en CO_2 équilibrant, l'eau est dite incrustante et peut provoquer un entartrage qui constitue souvent une barrière naturelle contre la corrosion. Pour éviter la corrosion du fer, il faut que la vitesse d'attaque soit inférieure à la

vitesse de formation du dépôt carbonaté protecteur. Différentes conditions doivent être satisfaites :

- l'eau ne doit pas contenir de CO₂ agressif,
- le pH doit dépasser 7,4 pour les eaux normalement minéralisées et 7,6 pour les eaux douces.

La corrosivité de l'eau est conditionnée par la présence de composés ionisés, principalement les chlorures et les sulfates. Le paramètre essentiel permettant de surveiller cette présence est la conductivité, mesurée en $\mu\text{S/cm}$. Une eau commence à être corrosive si les teneurs en ions Cl⁻ et SO₄²⁻ dépassent respectivement 100 et 250 mg/l. L'indice de Larson ($I_L = ([\text{Cl}^-] + 2[\text{SO}_4^{2-}]) / [\text{HCO}_3^-]$) fournit également une indication du risque de corrosivité vis à vis du fer.

1.4.3.2 Corrosion par les sols

Les facteurs régissant la corrosion par les sols sont très complexes, car les sols sont des électrolytes particuliers dans lesquels interviennent non seulement les espèces chimiques présentes, mais aussi la répartition des trois phases (solide, liquide, gazeuse) qui les composent. D'une façon générale, on peut accorder à la fonte un bon comportement face à la corrosion par les sols, et admettre les remarques suivantes :

- la corrosion est très lente dans les sols neutres, bien drainés, ayant une résistivité élevée, tels que les sables ou les graviers. Il n'apparaît alors qu'une corrosion superficielle, même sur de longues périodes.
- les sols acides, les sols lourds, mal drainés, les sols de basse résistivité provoquent une corrosion plus rapide. Dans les sols anaérobies, les bactéries sulfato-réductrices peuvent accélérer les processus d'attaque.

Les paramètres recensés comme influents sont :

- l'humidité du sol,
- la résistivité : forte influence en dessous de 1000 ohm.cm,
- le pH : forte influence en dessous de 6,
- la présence de composés ionisés, principalement les chlorures et les sulfates.

2. METHODOLOGIE D'ETUDE

La première étape de l'étude a consisté à créer une base de données des tronçons puis à l'alimenter. La seconde étape, menée en parallèle de la première, a concerné le prélèvement et l'analyse de 83 échantillons de conduites. Les résultats d'analyse ont été progressivement intégrés à la base de données. La dernière étape a consisté à traiter les données, avec deux objectifs :

- l'explication de l'apparition des défaillances sur le réseau,
- la mise en relation de l'état de corrosion avec les facteurs de risque statistiques.

Après une présentation du réseau CUS, nous décrivons chacune des étapes de ce travail.

2.1 PRESENTATION DU RESEAU CUS

La Communauté Urbaine de STRASBOURG a été créée par la loi 1069 du 31 décembre 1966 ; elle a la responsabilité du Service Municipal des Eaux qui existe depuis la création du réseau en 1878. Dans le texte, ce réseau sera désigné «réseau CUS». Il regroupe le réseau de distribution de la Ville et de 11 communes limitrophes sur les 27 communes que comprend la CUS (voir tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Présentation des zones CUS

Désignation	N° de FC	Nom de Faubourg ou Commune	Nom de commune
Centre-ville	11	CENTRE VILLE	STRASBOURG
Faubourgs	12	ROBERTSAU	STRASBOURG
	13	CRONENBOURG	
	14	KOENIGSHOFFEN	
	15	MONTAGNE VERTE	
	16	NEUDORF	
	17	MEINAU	
	18	NEUHOF	
Communes	1	BISCHHEIM	BISCHHEIM
	2	ECKBOLSHEIM	ECKBOLSHEIM
	3	HOENHEIM	HOENHEIM
	4	ILLKIRCH	ILLKIRCH
	5	LINGOLSHEIM	LINGOLSHEIM
	6	OBERHAUSBERGEN	OBERHAUSBERGEN
	7	OSTWALD	OSTWALD
	8	REICHSTETT	REICHSTETT
	9	SCHILTIGHEIM	SCHILTIGHEIM
	10	SOUFFELWEYERSHEIM	SOUFFELWEYERSHEIM
	20	WOLFISHEIM	WOLFISHEIM

Il s'agit des communes de : BISCHHEIM, ECKBOLSHEIM, HOENHEIM, ILLKIRCH-GRAFFENSTADEN, LINGOLSHEIM, OBERHAUSBERGEN, OSTWALD, REICHSTETT, SCHILTIGHEIM, SOUFFELWEYERSHEIM, STRASBOURG et WOLFISHEIM. Cet ensemble géographique constitue 19 zones qui sont les faubourgs de la Ville de STRASBOURG ou les communes et qui ont été désignées **zones CUS** dans la suite de l'étude.

Le réseau a été créé à partir de 1878 ; il s'étend sur 978 km au 31/12/97 ; il est commandé par 7 108 vannes et alimente 44 378 abonnés, soit 380 000 habitants ; la protection incendie est assurée par 1 946 poteaux et 7 259 hydrants ; le réseau est constitué presque exclusivement de conduites en fonte.

Quatre des communes ont été rattachées tardivement au Service de l'Eau (ILLKIRCH, OSTWALD, REICHSTETT, SOUFFELWEYERSHEIM). Elles ont été écartées de l'analyse car l'information sur les années de pose des conduites reste encore inconnue à ce jour. La zone du port de Strasbourg n'a pas été prise en compte pour une question de temps de saisie.

Le réseau est divisé en quatre secteurs (Nord, Ouest, Sud, Centre) ; les 15 zones CUS étudiées ont été regroupées suivant ces quatre secteurs.

La figure 2.1 présente un plan du réseau CUS.

COMMUNAUTÉ URBAINE
DE STRASBOURG

Alimentation en
eau potable



Figure 2.1 : Plan du réseau d'eau potable CUS

2.2 CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNEES

2.2.1 Sélection des variables de détérioration

Une première étude a permis le recensement de l'ensemble des variables de détérioration potentiellement disponibles sur le réseau CUS [CUS et SAUR, 1994]. Le tableau 2.2 décrit ces variables.

Tableau 2.2 : Variables de détérioration potentiellement disponibles sur le réseau CUS

Donnée	Origine	Commentaire
Diamètre	Plan des zones CUS	
Année de pose	Microfiches CUS	sauf sur 4 communes
Qualité d'eau	Analyses réglementaires Zones d'influence des forages	Evolution historique de la qualité
Vitesse Hydraulique	Modèle hydraulique sur une partie du réseau (à partir de 150 mm)	Temps de modélisation et calage important
Pression de desserte	Modèle hydraulique sur une partie du réseau (à partir de 150 mm)	Temps de modélisation et calage important
Nature du sol	Carte géologique au 1/50 000	Approche grossière
Présence de nappe phréatique	Zones de battements sur 15 piézomètres et 30 ans	Données DIREN Alsace
Taux de fuite	Campagne de quantification CUS	
Trafic	Piétonne, moyenne ou grand-axe	
Chaussée ou trottoir	Microfiches CUS	Temps de saisie important
Circulation Ancien Tramway	Plan des voies	Difficultés de mesure des courants vagabonds
Données sismiques	Institut de Physique du Globe	
Défaillances	sur fiches depuis 1982 sur tableur depuis 1993	

Parmi ces variables, nous avons retenu celles qui étaient rapidement disponibles sous forme brute et qui étaient susceptibles de fournir un maximum d'information vis à vis de l'état de maintenance et de corrosion du réseau. Le tableau 2.3 présente cette sélection de variables.

Tableau 2.3 : Variables de détérioration retenues dans l'analyse du vieillissement

Variables décrivant les défaillances	Variables structurelles de détérioration
Date de défaillance	Année de pose
Localisation de la défaillance	Diamètre nominal
DN conduite (pour contrôle)	Nature de fonte (GLM, GLC, GLCr, GS, GSr)
Nombre de défaillances	Epaisseur nominale
Taux de défaillances	Longueur
Durée de survie	Teneur en phosphore

2.2.2 Collecte des données

Les variables ont été collectées une à une et progressivement intégrées à la base de données.

2.2.2.1 Les données géographiques

Les 15 zones CUS comprennent 3168 rues dont la répartition par zone CUS est présentée dans le tableau 2.4. Le Service de l'Eau dispose d'une base de données répertoriant les noms de rues ; il nous a transmis ce fichier, ce qui nous a permis :

- d'éviter une saisie manuelle,
- de disposer du dernier fichier avec les noms de rues à jour.

2.2.2.2 Les données cartographiques

Les plans des zones CUS sont désignés plans « robinets-vannes » par le Service de l'Eau ; ils sont utilisés lors des interventions des fontainiers ; ils ont une fonction de plans de situation pour chaque faubourg ou commune. Ils représentent exclusivement le réseau d'eau potable avec le nom de la rue et le diamètre des conduites. Le découpage du réseau en tronçons a été réalisé sur un tirage papier de ces plans, qui ont servi de supports cartographiques à l'étude. Leurs échelles varient entre le 1/2000 (centre-ville) et le 1/5000.

Le découpage du réseau en tronçons a été réalisé assez tôt dans l'étude, en fonction des variables qui nous semblaient pertinentes ; **un tronçon** a été défini comme une portion continue de réseau, homogène pour les paramètres année de pose, diamètre, calibre de rue et

découpage hydraulique. De cette manière, nous avons obtenu 2209 tronçons d'âge connu représentant 519 km (voir tableau 2.5).

Les tronçons ont été repérés par une numérotation sous forme de segments ; chaque segment comprend deux noeuds correspondant aux 2 extrémités du tronçon. Les longueurs de chaque tronçon ont été mesurées sur ces plans. Un SIG est en cours de constitution au Service de l'Eau de la CUS. Le Service prévoit de reporter les informations concernant les tronçons et les défaillances sur ce support lorsqu'il sera opérationnel. Le tableau 2.4 présente la répartition des rues et des tronçons par zone CUS.

Tableau 2.4 : Répartition des rues et des tronçons par zone CUS

Zone CUS	Nombre de rues	Nombre de tronçons
BISCHHEIM	157	24
CENTRE VILLE	1001	995
CRONENBOURG	202	129
ECKBOLSHEIM	84	50
HOENHEIM	126	27
KOENIGSHOFFEN	102	65
LINGOLSHEIM	168	63
MEINAU	106	138
MONTAGNE VERTE	126	42
NEUDORF	251	222
NEUHOF	155	59
OBERHAUSBERGEN	79	30
ROBERTSAU	223	251
SCHILTIGHEIM	322	86
WOLFISHEIM	66	28
Total	3168	2209

2.2.2.3 Les années de pose

Le relevé des années de pose a été réalisé rue par rue sur des microfiches au 1/200 et 1/500. Depuis l'origine du réseau (1878), les années de pose des conduites du Service Municipal des Eaux ont été enregistrées ; les communes rattachées tardivement au Service ne disposent pas de cette information. L'information fait également défaut sur certains tronçons des zones CUS. Le tableau 2.5 présente par zone CUS le taux de linéaire dont l'âge est connu et qui a servi à l'analyse. On connaît l'âge de 78 % du linéaire saisi.

Tableau 2.5 : Taux par zone CUS représentant le linéaire dont l'âge est connu

Secteur	Zone CUS	Longueur étudiée	Age connu	Taux (%)
CENTRE	CENTRE VILLE	173090	173090	100%
NORD	BISCHHEIM	24655	9030	37%
NORD	HOENHEIM	15680	5420	35%
NORD	ROBERTSAU	55202	41343	75%
NORD	SCHILTIGHEIM	55468	30190	54%
OUEST	CRONENBOURG	47960	42950	90%
OUEST	ECKBOLSHEIM	20245	14790	73%
OUEST	KOENIGSHOFFEN	26320	23580	90%
OUEST	LINGOLSHEIM	39450	24225	61%
OUEST	MEINAU	41850	40646	97%
OUEST	MONTAGNE VERTE	28340	18505	65%
OUEST	OBERHAUSBERGEN	19230	10850	56%
OUEST	WOLFFISHEIM	12525	8925	71%
SUD	NEUDORF	68046	50668	74%
SUD	NEUHOF	35390	25030	71%
Total	Total	663451	519242	78%

2.2.2.4 Les défaillances

Les défaillances représentent des ruptures ou des fuites sur conduites ou sur joints ayant entraîné une intervention du Service de l'Eau ; cette intervention consiste à remplacer le morceau endommagé de la conduite ou à poser un manchon (cas d'une rupture transversale ou d'une perforation locale). Les défaillances ont été observées sur le réseau CUS du 1^{er} janvier 1983 au 31 décembre 1997 ; elles ont été enregistrées sur fiches papier jusqu'en 1992, puis sur un tableau à partir de 1993. La fréquence annuelle des défaillances du réseau est d'environ 140, ce qui porte à 1324 le nombre de défaillances saisies et analysées sur des conduites d'âge connu.

Les tronçons qui ont été renouvelés durant la période d'observation ont été saisis avec la mention « ancien tronçon ». Ces tronçons présentent les caractéristiques :

- la date de défaillance est comprise entre le 1/1/83 et le 31/12/97,
- seuls les tronçons déposés pendant la période d'observation sont étudiés.

Les tronçons neufs ont été posés en fonte ductile ; les branchements ont généralement été renouvelés à cette occasion en PEHD.

2.2.2.5 Les données métallurgiques

Connaissant l'historique de pose du réseau, nous avons recherché l'histoire de la fabrication des conduites en fonte du réseau CUS (voir chapitre 1.4.2.). Les données métallurgiques ont été attribuées aux conduites par l'intermédiaire de la variable année de

pose. Les variables structurelles concernent le diamètre nominal, l'épaisseur nominale, la présence de revêtements et la nature des joints. A partir des variables de diamètre et d'épaisseur, on a construit la variable moment d'inertie d'une conduite ; ce paramètre décrit la résistance à la déformation d'une conduite reposant sur deux appuis rigides vis à vis d'une charge uniformément répartie. Ce modèle mécanique est utilisé pour décrire l'effet de poutre. L'expression du moment d'inertie est donné par :

$$MT = \frac{\pi DN^3 EP}{8} \quad \text{avec :}$$

MT : Moment d'inertie de la conduite en cm⁴

DN : Diamètre nominal en cm

EP : Epaisseur nominale en cm

Les variables proprement métallurgiques concernent la technique de fabrication, la forme du graphite, le type de matrice et la teneur en phosphore (voir tableau 1.3).

2.2.3 Conception et création de la base de données

Pour concevoir la base, nous avons retenu le logiciel de gestion de base de données relationnelle ACCESS version 2.0 sous Windows. Ses formules de présentation des données, sa puissance d'interrogation et ses possibilités de connexion à des données extérieures sont ses atouts principaux. Il permet de créer des liens entre différentes tables.

Les tables sont des tableaux constitués de colonnes (variables) et de lignes (enregistrements) utilisés pour stocker les données. Chaque table peut posséder des données de type texte, numérique, mémo, date/heure, monétaire, compteur, binaire ou image. Toutes les variables d'une même famille doivent être regroupées dans la même table. Nous avons défini 6 tables principales, ainsi qu'une table des correspondances entre les tronçons en service et les anciens tronçons. Les tables principales s'intitulent :

- FAUBOURG / COMMUNE
- RUES
- TRONCONS
- CANALISATIONS
- DEFAILLANCES
- PRELEVEMENTS

La figure 2.2 représente à titre indicatif la structure finale de la base.

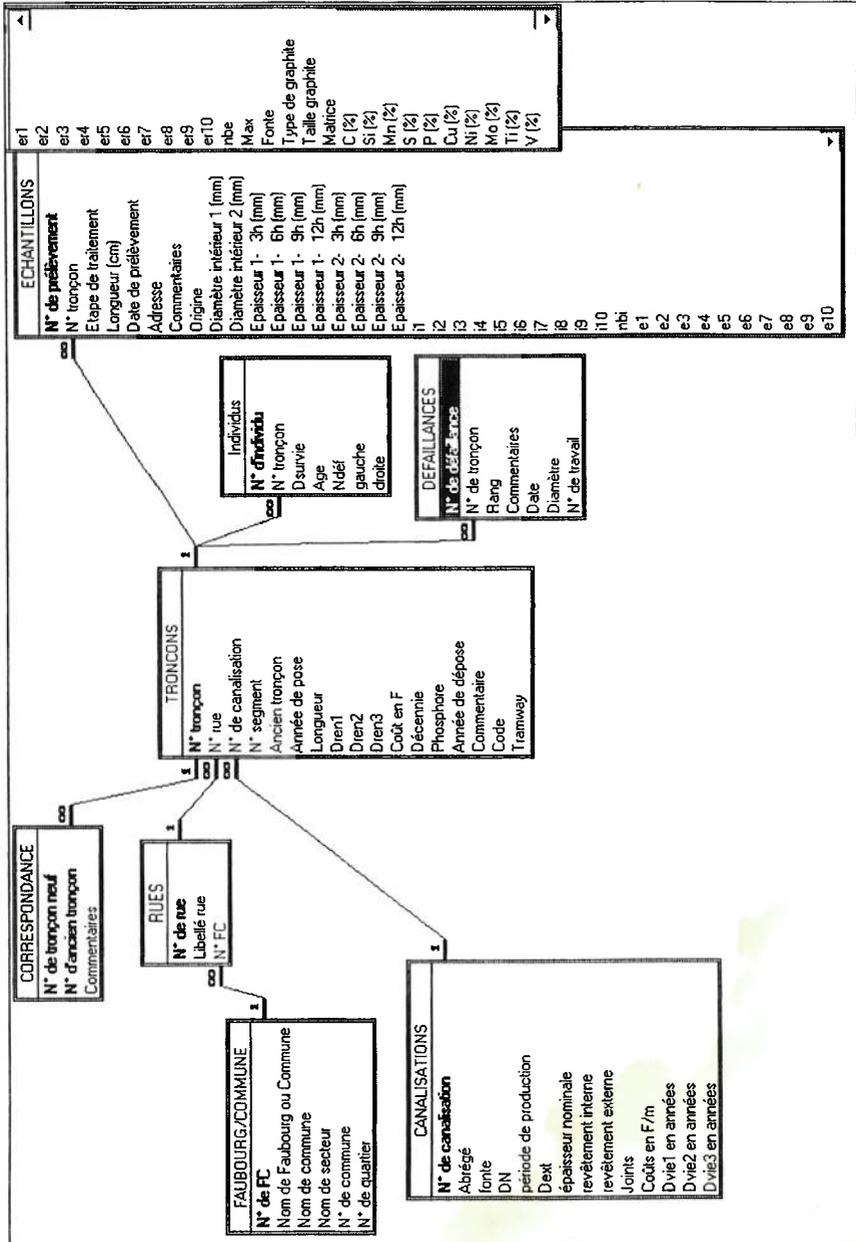


Figure 2.2 : Structure de la base de données

2.2.4 Préparation des données de survie

Un individu correspond au couple « tronçon, nombre de défaillances subies ».

On introduit 2 variables nécessaires à la définition des tronçons et des individus :

- n représente le nombre de défaillances total subi par le **tronçon**,
- $N_{\text{déf}}$ représente le nombre de défaillances antérieures subies par l'**individu**.

Chaque individu est délimité par une date de début de vie qui peut être une date de début d'observation, une date de pose ou une date de défaillance et une date de fin de vie qui peut être une date de fin d'observation, une date de dépose ou une date de défaillance.

La figure 2.3 présente la décomposition d'un tronçon en individus à partir du couple « tronçon, nombre de défaillances subies » (le carré noir représente une défaillance) :

Un tronçon sans défaillance ($n = 0$) donne naissance à un unique individu :



Un tronçon avec 1 défaillance ($n = 1$) donne naissance à 2 individus :



Un tronçon avec n défaillances donne naissance à $n+1$ individus :

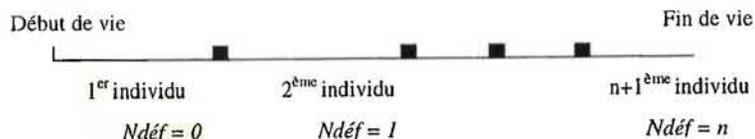


Figure 2.3 : Décomposition d'un tronçon en individus

La position chronologique des dates de début et de fin de vie par rapport à la période d'observation conditionne l'existence de censures sur la durée de vie de l'individu :

- censure à droite si la fin de vie est postérieure à la fin de l'observation,
- censure à gauche si le début de vie est antérieur au début de l'observation.

On introduit 2 variables de censure nécessaires à la définition des individus :

- **d** (censure à droite) vaut 0 si l'individu est censuré et 1 réciproquement,
- **g** (censure à gauche) vaut 0 si l'individu est censuré et 1 réciproquement.

La figure 2.4 décrit les 4 types d'individus possibles en fonction de la position de la durée de survie vis à vis de la période d'observation :

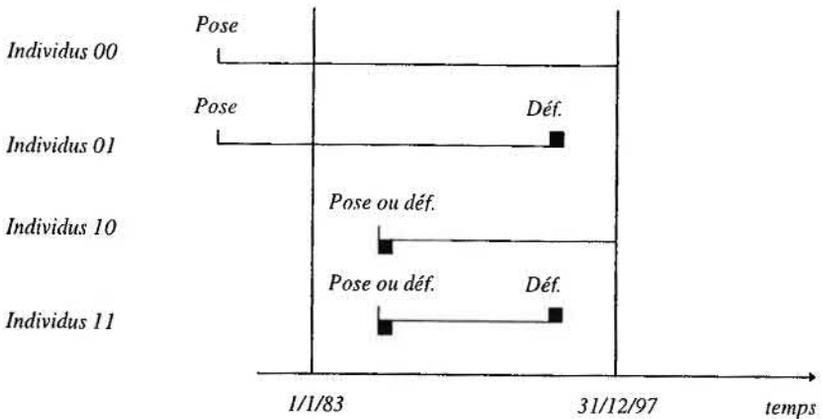


Figure 2.4 : Présentation des types d'individus suivant les variables de censure

2.3 ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES DE DEFAILLANCES

2.3.1 Statistiques descriptives

Les statistiques descriptives ont été établies en croisant le taux de défaillances des tronçons avec chacune des covariables. Les deux covariables principales, âge et diamètre, ont fait l'objet de représentations doubles (graphique en trois dimensions). L'analyse visuelle de ces représentations fournit les tendances des relations existant entre les variables à expliquer et les covariables.

2.3.2 Régression multiple

La régression est un modèle mathématique qui relie une variable Y, que l'on cherche à expliquer, à plusieurs variables X_1, X_2, \dots, X_n . L'ajustement de Y avec les covariables peut être obtenu par la méthode des moindres carrés. Après construction du modèle, si les données X_1, X_2, \dots, X_n évoluent au cours du temps, il est toujours possible d'appliquer le même modèle et ainsi de prédire les valeurs de Y avec un risque connu.

Quatre types de régressions ont été utilisés :

La régression standard : Le modèle est construit en prenant en compte toutes les variables explicatives. On supposera alors que chaque valeur de la variable expliquée Y peut être correctement reconstituée à partir des variables explicatives X_1, X_2, \dots, X_n à partir du moment où l'écart entre la réalité et le modèle n'est pas trop important.

La régression pas à pas descendante : On part de la régression où toutes les variables interviennent dans le modèle, puis, pas à pas, on élimine toute les variables qui n'entraînent qu'une faible augmentation de la variation résiduelle. On s'arrête lorsque l'augmentation de la variation résiduelle est trop importante.

La régression pas à pas ascendante : On part de la meilleure régression à une variable, puis, pas à pas, on introduit de nouvelles variables explicatives en examinant leur action sur le modèle déjà construit. On s'arrête lorsque les variables n'apportent plus de variation résiduelle suffisante.

La régression en stepwise (pas à pas) : C'est en fait une régression ascendante dans laquelle on regarde si l'introduction de nouvelles variables explicatives ne justifie pas l'élimination de variables déjà introduites dans le modèle. La régression stepwise a été utilisée pour expliquer respectivement le nombre, le taux de défaillances puis la durée de survie.

2.3.3 Analyse probabiliste

L'analyse des durées de survie a été réalisée d'abord à l'aide de modèles strictement probabilistes sur le nombre de défaillances et la durée de survie ; l'objectif est de vérifier si ces variables sont distribuées suivant des lois connues.

Elle s'est poursuivie par l'utilisation du modèle des risques proportionnels, qui comprend une loi de probabilité et un terme de régression. L'ajustement de ce modèle est obtenu par la méthode du maximum de vraisemblance.

2.3.3.1 Modèles strictement probabilistes

Nous avons utilisé les lois de probabilité courantes du domaine de la fiabilité. Elles s'expriment sous la forme de 4 fonctions interdépendantes :

- la fonction de densité : $f(t)$
- la fonction de répartition : $F(t) = P(T < t)$
- la fonction de survie : $S(t) = P(T \geq t)$
- la fonction de risque : $h(t) = f(t) / S(t)$

2.3.3.1.1 Loi de Poisson

La fonction de distribution de la loi de *Poisson* s'écrit $P(X = i) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^i}{i!}$

On a : $E(X) = Var(X) = \lambda$

Pour ajuster la loi, on approxime λ par la moyenne de l'échantillon, puis on minimise le $\text{Chi}^2(\lambda)$ par approximations successives et on retient la valeur de λ correspondante. On retient toutes les classes où la fréquence calculée dépasse cinq fois f , où f représente la proportion des classes de moins de 5 individus.

2.3.3.1.2 Loi Binômiale Négative

C'est une adaptation de la loi Binômiale où le paramètre entier est remplacé par un paramètre réel. Sa fonction de distribution s'écrit $P(X = i) = p_i = \frac{\Gamma(\nu + i)}{\Gamma(\nu) i!} p^\nu (1-p)^i$

où Γ représente la fonction Gamma

On a : $E(X) = \frac{\nu(1-p)}{p}$ et $Var(X) = \frac{\nu(1-p)}{p^2}$

Pour ajuster la loi, on approxime p et v par la moyenne et la variance de l'échantillon, on minimise le $\text{Khi}^2(\lambda)$ par approximations successives et on retient les valeurs de p et v correspondantes. On retient toutes les classes où la fréquence calculée dépasse cinq fois f , où f représente la proportion des classes de moins de 5 individus.

2.3.3.1.3 Loi Exponentielle

Les fonctions décrivant une loi exponentielle de paramètre λ sont :

- Fonction densité : $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$
- Fonction de survie : $S(t) = e^{-\lambda t}$
- Fonction de risque : $h(t) = \lambda$

Pour ajuster la loi, on approxime λ par l'inverse de la moyenne de l'échantillon, puis on minimise le $\text{Khi}^2(\lambda)$ par approximations successives et on retient la valeur de λ correspondante. On retient toutes les classes où la fréquence calculée dépasse cinq fois f , où f représente la proportion des classes de moins de 5 individus.

La loi exponentielle est un cas particulier de la loi de Weibull.

2.3.3.1.4 Loi de Weibull

Les fonctions décrivant une loi de Weibull de paramètre λ et p sont :

- Fonction densité : $f(t) = \lambda p (\lambda t)^{p-1} e^{-(\lambda t)^p}$
- Fonction de survie : $S(t) = e^{-(\lambda t)^p}$
- Fonction de risque : $h(t) = \lambda p (\lambda t)^{p-1}$

Pour ajuster la loi, on approxime λ et p par la moyenne et par la variance de l'échantillon, puis on minimise le $\text{Khi}^2(\lambda)$ par approximations successives et on retient la valeur de λ correspondante. On retient toutes les classes où la fréquence calculée dépasse cinq fois f , où f représente la proportion des classes de moins de 5 individus.

La modélisation probabiliste a permis de décrire le stade de détérioration actuel du réseau CUS (voir chapitre 4.2.3.).

2.3.3.2 Modèle des risques proportionnels

Dans ce modèle, la fonction de risque $h(t)$ est le produit d'une fonction de risque de base $h_0(t)$ et d'un terme exponentiel résumant l'effet des covariables [EISENBEIS, 1994] :

$$h(t, z_1, z_2, \dots, z_n) = h_0(t) \exp(\beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \dots + \beta_n z_n)$$

où les β_i sont les paramètres de régression inconnus du modèle.

Les covariables agissent multiplicativement sur le risque instantané de défaillances. h_0 représente la fonction de risque d'un individu pour lequel le vecteur des covariables z serait nul. Nous avons retenu comme fonction de risque de base la loi de Weibull ; nous sommes donc en présence d'un modèle complètement paramétrique qui est généralement utilisé pour décrire le stade de défaillance initial [ANDREOU, 1987]. Les fonctions décrivant ce modèle associé à une loi de Weibull de paramètre λ et p et à un vecteur de covariables z sont :

- Fonction de risque : $h(t) = \lambda p (\lambda t)^{p-1} \exp\left(\sum_i \beta_i z_i\right)$
- Fonction de survie : $S(t) = \exp\left[-(\lambda t)^p \exp\left(\sum_i \beta_i z_i\right)\right]$

où les z_i et les β_i représentent respectivement les covariables et leurs poids.

En posant $\sigma = p^{-1}$ et $\mu = \sum \beta_i z_i$, on obtient

$$S(t) = \exp\left(-\exp\left(\frac{-\mu}{\sigma}\right) t^{1/\sigma}\right)$$

L'ajustement du modèle est réalisé par la procédure LIFEREG de SAS [SAS, 1990]. L'algorithme calcule les valeurs β_i et σ (paramètre d'échelle) par la méthode du maximum de vraisemblance suivant l'algorithme de Newton-Raphson. La signification de chaque paramètre est vérifiée par un test de Wald ; le test revient à calculer la probabilité qu'une variable aléatoire distribuée suivant une loi du χ^2 dépasse la valeur calculée par le test de Wald. La

valeur limite de la probabilité est fixée à 0,05. On réalise un premier ajustement avec la procédure LIFEREG sur l'ensemble des variables et l'on retire celle ayant la plus forte des probabilités supérieures à 0,05 : elle n'influe pas de façon significative sur l'apparition des défaillances. La procédure LIFEREG est ensuite relancée sur les facteurs restants. On répète les étapes précédentes tant que cela est nécessaire, pour ne garder que les facteurs significatifs. On réalise ainsi une procédure de sélection des covariables significatives dite "descendante".

Les résultats du modèle ont été comparés à la régression linéaire multiple. Ils ont servi de base à l'élaboration d'un programme de renouvellement (voir chapitre 5.2.)

2.4 METHODE PHYSIQUE DE MESURE DE LA CORROSION

Sur le réseau CUS, la corrosion apparaît comme un facteur principal du processus de vieillissement des conduites en fonte. Nous avons adopté un programme de mesure de la diminution de l'épaisseur de paroi des canalisations. L'objectif est de quantifier les vitesses de corrosion interne et externe et d'estimer les durées de vie résiduelles pour des groupes homogènes de conduites présentant les mêmes caractéristiques de perte d'épaisseur ; le mode opératoire suivant a été appliqué à l'ensemble des échantillons :

- Prélèvement d'un échantillonnage
- Analyse métallurgique
- Mesure de la corrosion par un examen destructif
- Exploitation des résultats

Le laboratoire «Mécanique, Corrosion et Matériaux » (ENSAIS) a réalisé les analyses métallurgiques. Le laboratoire « Réseaux d'Eau Potable » (ENGEES) a réalisé le suivi des prélèvements et la mesure de la corrosion.

2.4.1 Prélèvement de l'échantillonnage

Les prélèvements ont été réalisés aléatoirement lors de défaillances ou d'interventions programmées sur les conduites, les branchements ou les pièces annexes (robinets-vannes, hydrants, poteaux d'incendie). Les interventions programmées ont consisté à poser ou à renouveler les branchements ou les pièces annexes. Une fiche de prélèvement a été établie en coordination avec les agents du Service de l'Eau ; elle a permis de sensibiliser les agents au programme de mesure de la corrosion et de faciliter l'identification des échantillons.

Les échantillons sont indépendants les uns des autres. Au fur et à mesure de la constitution de la base de données, nous avons vérifié la représentativité de l'échantillonnage vis à vis de la population des tronçons pour les paramètres année de pose, diamètre et nombre de défaillances. Il apparaît que :

- les fontes ductiles sont très peu représentées,
- les fontes lamellaires moulées sont trop représentées.

Dans l'exploitation, nous avons écarté les fontes ductiles. L'échantillonnage est composé d'éléments indépendants et représentatifs de la population des fontes GL ; une partie des résultats observés sur l'échantillonnage a été extrapolé à la population des tronçons qu'il représente.

2.4.2 Analyse métallurgique

Le Laboratoire Mécanique, Corrosion et Matériaux de l'ENSAIS a réalisé sur chaque échantillon un prélèvement d'une pastille de fonte de dix centimètres de diamètre environ. Le laboratoire a réalisé l'analyse chimique et métallographique de la fonte sur ces pastilles. Il a réalisé l'analyse cristallographique de produits de corrosion prélevés sur une dizaine d'échantillons.

L'analyse chimique de la fonte a été réalisée sur les pastilles par un analyseur de fluorescence X à dispersion en longueur d'onde (Analyseur SRS 200 de SIEMENS). Soumis à un rayonnement X, les éléments présents dans la matrice émettent à leur tour un rayonnement proportionnel à leur teneur. L'analyse chimique a été réalisée sur les éléments carbone, silicium, manganèse, soufre, phosphore, cuivre, nickel, molybdène, titane et vanadium.

L'analyse métallographique a été réalisée par microscopie optique d'abord à l'état brut de polissage, puis après attaque acide ; cette observation a permis de définir la forme du graphite et ainsi que la nature de la matrice.

L'objectif de ces analyses est la détermination précise de la nature de la fonte, en comparaison avec les indications de l'historique de production. Les résultats ont été saisis dans la base de données.

L'analyse des produits de corrosion a été réalisée par diffraction des rayons X sur les produits réduits à l'état de poudre (Diffractomètre D500 de SIEMENS). L'analyse du rayonnement diffracté fournit la composition des réseaux cristallisés présents dans ces dépôts.

L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs de corrosion interne (chimie de l'eau, corrosion bactérienne, anomalies de la fonte,...).

2.4.3 Mesure de la corrosion par un examen destructif

Il s'agit d'une mesure quantitative de la corrosion réalisée après un examen destructif des échantillons par grenailage. L'objectif de l'examen est la détermination des vitesses de corrosion puis, par extrapolation, des durées de vie jusqu'à la perforation de la conduite, considérée comme sa fin de vie. Le protocole de l'examen comprend les étapes suivantes :

- Réception des échantillons étiquetés et identification vis à vis du tronçon d'origine (l'échantillon a été rejeté quand il n'était pas clairement identifié, qu'il était trop petit pour l'exploitation statistique des mesures ou qu'il présentait des particularités intéressantes : empreintes de courants vagabonds notamment)
- Observations préliminaires et photographies couleur (vue générale de 3/4, particularités éventuelles,...)
- Prélèvement d'une pastille destinée à l'analyse métallurgique et éventuellement de produits de corrosion
- Coupes transversales perpendiculaires à l'axe du tuyau, distantes d'un mètre au maximum, de 50 cm au minimum
- Coupe longitudinale
- Photographies couleur des vues interne et externe sur 50 échantillons
- Grenailage interne et externe des deux demi-coupes au moyen de billes d'acier d'un millimètre de diamètre sous une pression de 7 bar
- Photographies couleur des vues interne et externe
- Mesure du diamètre aux extrémités des deux demi-coupes
- Mesure de l'épaisseur aux extrémités des deux demi-coupes ; la mesure est réalisée sur 4 points répartis toutes les trois heures soit à 12, 3, 6 et 9 heures
- Mesure de la profondeur des 10 attaques les plus profondes sur les faces interne et externe, soit 20 mesures par échantillon
(Nous avons fixé le seuil de mesure à 0,5 mm ; les profondeurs d'attaque se situant sous ce seuil ont été arbitrairement approximées à 0,5 mm)
- Mesure des 10 épaisseurs résiduelles minimales au moyen d'un compas

La mesure quantitative de la corrosion a permis d'obtenir :

- Les dimensions d'origine des tuyaux (diamètre et épaisseur de paroi)
- Les 10 profondeurs d'attaques maximales sur les faces internes et externes
- Les 10 épaisseurs résiduelles minimales de métal

L'épaisseur résiduelle minimale ne correspond pas toujours aux profondeurs d'attaques maximales, car les attaques internes et externes ne sont pas toujours en vis à vis.

2.4.4 Exploitation des résultats

Elle comprend quatre volets :

- Description de l'état de corrosion des échantillons (profondeurs d'attaque, vitesses de corrosion, épaisseurs résiduelles)
- Calcul des cinétiques de corrosion
- Comparaison de l'état de corrosion avec les caractéristiques d'eau et de sol
- Comparaison de l'état de corrosion avec le processus de défaillance sur les tronçons d'origine

Pour chaque échantillon, nous avons réalisé des calculs à partir des données brutes suivantes :

- 8 mesures d'épaisseur
- 10 mesures de profondeur interne
- 10 mesures de profondeur externe
- 10 mesures d'épaisseur résiduelle

La moyenne arithmétique et l'écart-type de l'épaisseur ont été calculés à partir des huit mesures d'épaisseur. A partir de l'épaisseur résiduelle minimale, on calcule une profondeur d'attaque équivalente :

Profondeur d'attaque équivalente = épaisseur nominale - épaisseur minimale résiduelle

Par exemple, un échantillon perforé a une épaisseur résiduelle minimale nulle ; sa profondeur d'attaque équivalente vaut l'épaisseur moyenne.

Le traitement statistique des profondeurs d'attaque peut être réalisé suivant différents modes de calculs [LANGENFELD & NOUAIL, 1998] :

- Utilisation des profondeurs maximales

Le paramètre retenu est la profondeur maximale d'attaque observée, sur l'une ou l'autre des faces interne ou externe du tuyau ; cette approche ne prend pas en

considération les attaques sur l'autre face de la paroi et conduit à un résultat optimiste. Le cumul des profondeurs maximales observées sur les deux faces de la paroi conduit, par contre, à un résultat pessimiste, la probabilité de voir se développer en regard l'une de l'autre les attaques les plus profondes est faible.

- Moyenne des n premières données

L'approche selon une moyenne de n données est conservatrice par rapport à un objectif de prévision de remplacement. L'opération de remplacement ayant pour objet principal de faire face à une recrudescence d'interventions à répétition sur un tronçon, la moyenne sur des données dont la dispersion est grande amène à une sous-estimation des risques.

- Utilisation des épaisseurs résiduelles

C'est l'approche à privilégier dans le cadre des défaillances par rupture mécanique qui sont le propre des tuyaux en fonte GL. Elle prend en compte la profondeur d'attaque équivalente. La littérature statistique appliquée aux données de corrosion fait référence à la loi des valeurs extrêmes et à la prise en compte des profondeurs maximales pour le calcul des durées de vie des matériels industriels [KOWAKA, 1994].

L'analyse a été réalisée à partir des trois valeurs suivantes :

- la profondeur maximale d'attaque interne,
- la profondeur maximale d'attaque externe,
- la profondeur équivalente.

La vitesse est obtenue en divisant la profondeur par l'âge de l'échantillon. Le calcul fournit trois valeurs de vitesse :

- la vitesse maximale d'attaque interne,
- la vitesse maximale d'attaque externe,
- la vitesse équivalente d'attaque, rapport de la profondeur équivalente par l'âge.

Ces vitesses ont été exprimées en microns par an, unité adoptée par les corrosionnistes.

On a retenu comme durée de vie physique de l'échantillon :

- son âge actuel quand l'échantillon était perforé,
- l'âge qu'il atteindra lors de la perforation en extrapolant linéairement dans le temps la vitesse de corrosion à l'épaisseur moyenne de l'échantillon.

Pour extrapoler les mesures de vitesses sur les échantillons à la population des tronçons, nous avons retenu un modèle cinétique du type at^n entre l'âge et la vitesse [THON & TONIGES, 1980] [WOLF & ZIEGLER, 1980]. La durée de vie résiduelle de l'échantillon s'obtient par différence entre la durée de vie et l'âge de l'échantillon.

L'agressivité de l'eau et la corrosivité des sols sont les paramètres principaux qui agissent sur la corrosion interne et externe ; nous avons réalisé des analyses d'eau (pour la corrosion interne) et des mesures de résistivité de sol (pour la corrosion externe). Ces dernières ont été comparées aux vitesses de corrosion externe.

2.5 BILAN DE LA METHODOLOGIE

La méthodologie a permis de mettre en évidence les variables explicatives et les méthodes qui seront utilisées dans la modélisation ; les variables ont été abrégées pour une écriture plus aisée des équations de modélisation.

Les abréviations des variables s'écrivent :

- nombre de défaillances : n
- taux de défaillances : Taux (en nombre par 100 km et par an)
- durée de survie : Dsurvie (en jours)
- année de pose : ANPOSE
- âge : AGE = 1998 - ANPOSE (en années)
- diamètre : DN (en mm)
- longueur : LONG (en m)
- épaisseur : EP (en mm)
- moment d'inertie : MT (en cm^4)
- teneur en phosphore : PHOS (en %)
- nombre de défaillances antérieures : NDEF

3. DESCRIPTION DES DONNEES EXPERIMENTALES

3.1 LES VARIABLES EXPLICATIVES

3.1.1 L'année de pose

La figure 3.1 représente l'histogramme des années de pose des tronçons.

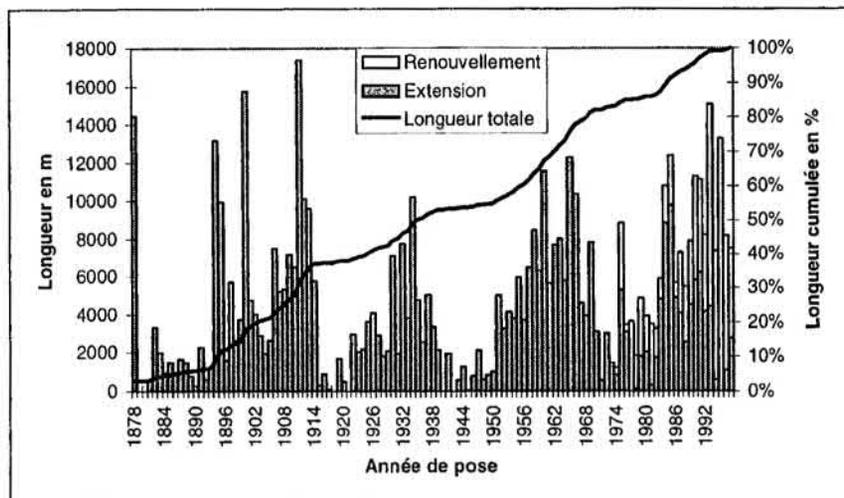


Figure 3.1 : Histogramme des années de pose en linéaire

On distingue 4 étapes de croissance : avant 1914, entre les deux guerres, de 1950 à 1970 et dans les années 1980 ; un tiers du réseau a été posé avant 1914. A part certains travaux ponctuels, les travaux de renouvellement démarrent en 1975 d'abord au centre-ville, puis après quelques années dans les secteurs périphériques. A partir de 1988, les travaux de renouvellement l'emportent, en linéaire, sur les travaux d'extension du réseau.

3.1.2 Le diamètre

La figure 3.2 représente la répartition des diamètres des tronçons.

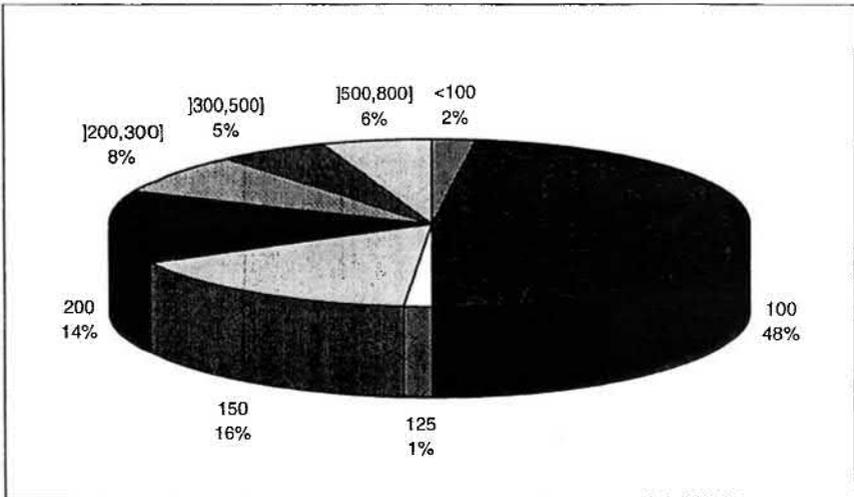


Figure 3.2 : Répartition par diamètre en pourcentage du linéaire

La répartition montre une prédominance des petits diamètres (inférieur ou égal à 100 mm) qui représentent la moitié du linéaire. Les conduites de diamètre inférieur à 100 mm ont été sous-estimées, car elles n'ont, pour la plupart, pas été saisies. Ce sont de petites antennes qui peuvent souvent être assimilés à des branchements et ne présentent pas un intérêt majeur vis à vis d'une stratégie de renouvellement. Les diamètres moyens (entre 150 et 250 mm) représentent 35 % du linéaire, tandis que les gros diamètres (> 250 mm) constituent 15 % du linéaire. Au centre-ville, la prédominance des petits diamètres (inférieur ou égal à 100 mm) est encore plus marquée (60 % du linéaire).

3.1.3 La nature de fonte

Le réseau CUS est constitué principalement de trois types de fonte dont les périodes de production sont approximativement :

- fonte GLM : de 1878 à 1935
- fonte GLC : de 1936 à 1968
- fonte GS : de 1969 à 1998

La figure 3.3 représente la répartition des tronçons par nature de fonte, en linéaire.

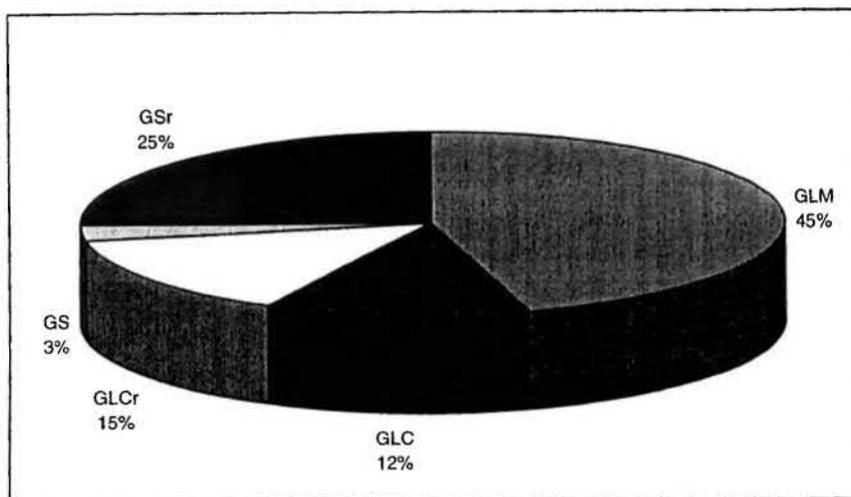


Figure 3.3 : Répartition par nature de fonte en linéaire

On constate la prédominance des fontes GL qui représentent 72 % du linéaire.

3.1.4 L'épaisseur de paroi

Les conduites ont été produites dans le temps avec une maîtrise croissante de l'épaisseur. L'augmentation des caractéristiques mécaniques a permis aux métallurgistes de diminuer cette valeur au cours du temps. La figure 3.4 décrit cette évolution pour les 3

principales familles de fonte, en relation avec le diamètre nominal. La figure 3.5. représente l'historgramme des épaisseurs en linéaire.

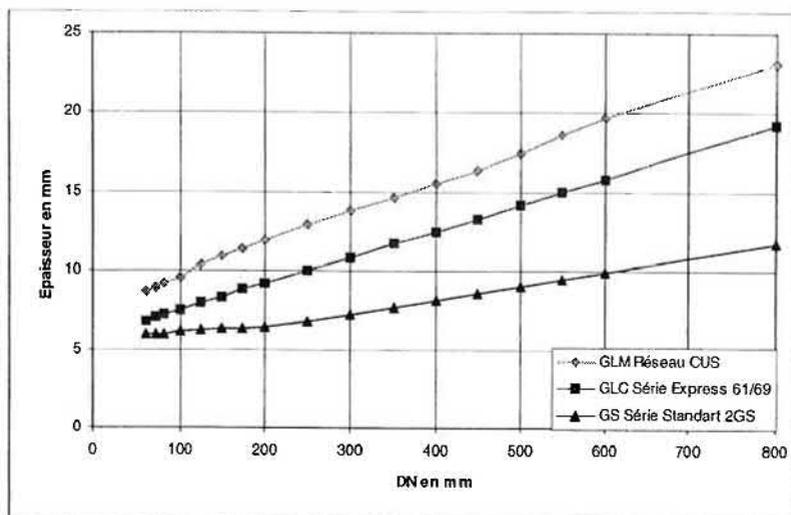


Figure 3.4 : Relation entre épaisseur et diamètre pour 3 natures de fonte

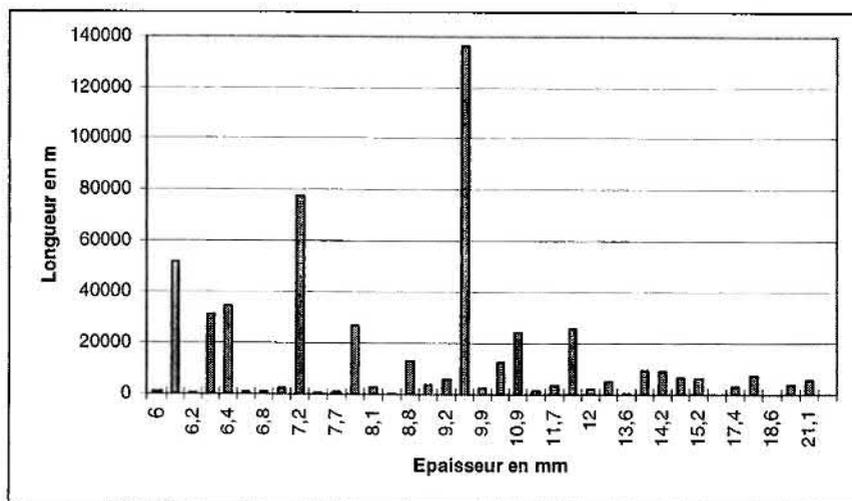


Figure 3.5 : Histogramme des épaisseurs de paroi en linéaire.

Les épaisseurs les plus représentées (7,2 et 9,6 mm) correspondent respectivement au diamètre 100 mm des fontes GLC et GLM.

3.1.5 La teneur en phosphore

Le phosphore représente une variable explicative de la fragilité des fontes ; les métallurgistes ont cherché à diminuer sa teneur au cours du temps. La figure 3.6 représente la relation entre la teneur en phosphore de la fonte et l'année de pose de la conduite, à partir des valeurs moyennes analysées sur les échantillons.

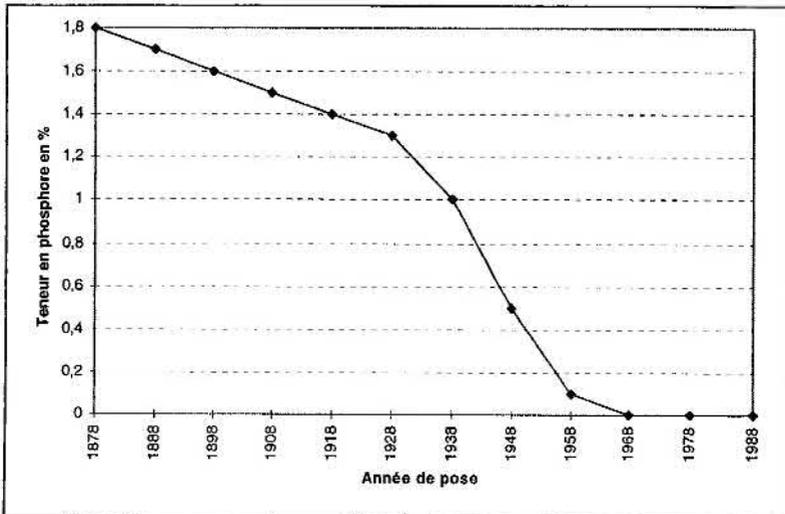


Figure 3.6 : Relation entre la teneur en phosphore de la fonte et l'année de pose

3.2 LES VARIABLES A EXPLIQUER

3.2.1 Le nombre de défaillances

La figure 3.7 présente l'histogramme du nombre de défaillances en pourcentage du linéaire total.

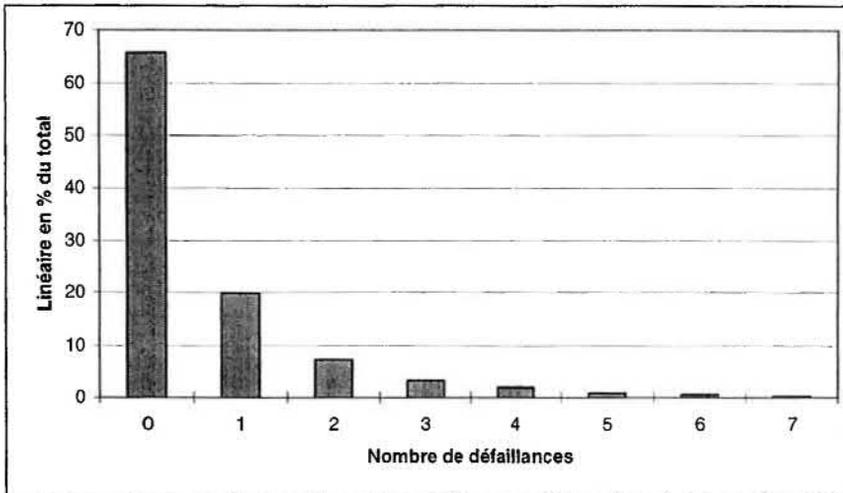


Figure 3.7 : Histogramme du nombre de défaillances en % du linéaire total

Les deux tiers des tronçons (66%) n'ont pas subi de défaillance durant la période d'observation du 1/1/1983 au 31/12/1997. 20 % des tronçons ont subi une seule défaillance. L'histogramme montre une répartition décroissante qui a été comparée aux lois de probabilité courantes (loi de Poisson, loi Binômiale Négative). (Voir 4.2.3.1).

3.2.2 La durée de survie

Un individu correspond au couple « tronçon, nombre de défaillances subies » ; chaque individu est défini par sa durée de survie. On a éliminé les individus dont la durée de survie était inférieure à six jours ; ces derniers proviennent de défaillances à répétitions fréquemment liées les unes aux autres ; ils ne peuvent pas être pris en compte dans l'analyse statistique ; on a également écarté de la réflexion sur le vieillissement les fontes ductiles qui, a priori, ne posent pas de problèmes du fait de leur jeunesse, leurs caractéristiques mécaniques et de leurs revêtements internes et externes. Le tableau 3.1 présente la répartition des individus GL en fonction du nombre de défaillances des tronçons d'origine.

Tableau 3.1 : Répartition des individus GL en fonction du nombre de défaillances

n	Individus censurés à droite	Individus censurés à droite analysés	Individus non censurés à droite	Individus non censurés à droite analysés	Nombre total d'individus	Nombre total d'individus analysés	Différence
0	1515	1515	0	0	1515	1515	0
1	461	460	461	459	922	919	3
2	173	165	346	331	519	496	23
3	79	77	237	230	316	307	9
4	30	29	120	115	150	144	6
5	18	15	90	84	108	99	9
6	12	11	72	69	84	80	4
7	3	3	21	19	24	22	2
8	1	1	8	8	9	9	0
9	1	1	9	9	10	10	0
Total	2293	2277	1364	1324	3657	3601	56

Le tableau permet de comparer le nombre d'individus total et analysé : la différence correspond aux individus éliminés (durée de survie inférieure à six jours).

Le tableau 3.2 présente la répartition des individus en fonction des variables définies au chapitre 2.2.5. :

- n : nombre de défaillances subies par le tronçon,
- $Nd\acute{e}f$: nombre de défaillances antérieures subies par l'individu,

Tableau 3.2 : Répartition des individus en fonction de n et de $Nd\acute{e}f$ (fontes GL)

Type d'individus	Remarques	n	$Nd\acute{e}f$	Fréquence	Fréquence (%)
Individus 00		0	0	1515	42%
Individus nn	$n \neq 0$	n	n	762	21%
Individus $n0$	$n \neq 0$	n	0	769	21%
Individus $nNd\acute{e}f$	$n \neq Nd\acute{e}f$	n	$Nd\acute{e}f$	555	15%
Total				3601	100%

Le tableau 3.3 présente la répartition des individus en fonction de g et d , variables de censure gauche et droite.

Tableau 3.3 : Répartitions des individus en fonte GL suivant les variables de censure.

Type d'individus	Censure gauche	Censure droite	Fréquence	Fréquence (%)
Individus 00	0	0	1515	42%
Individus 01	0	1	769	21%
Individus 10	1	0	762	21%
Individus 11	1	1	555	15%
Total			3601	100%

La décomposition des individus GL suivant les variables n et $Nd\acute{e}f$ ou les variables g et d est identique :

- les individus de type nn ou $d=0$ représentent les 2277 tronçons (1515 + 762)
- les individus de type $nNd\acute{e}f$ ($n \neq Nd\acute{e}f$) ou $d=1$ représentent les 1324 défaillances (769 + 555)

Cette caractéristique est due au fait qu'il n'y a pas de recouvrement entre la période de pose des conduites GL (1878-1935) et la période d'observation des défaillances (1983-1997). Cette spécificité renforce l'intérêt de ne pas prendre en compte les fontes ductiles dans l'analyse de survie ; en effet, leur présence imposerait l'ajout de 3 catégories d'individus supplémentaires et rendrait l'analyse plus complexe.

La figure 3.8 présente dans le détail les 6 types d'individus possibles :

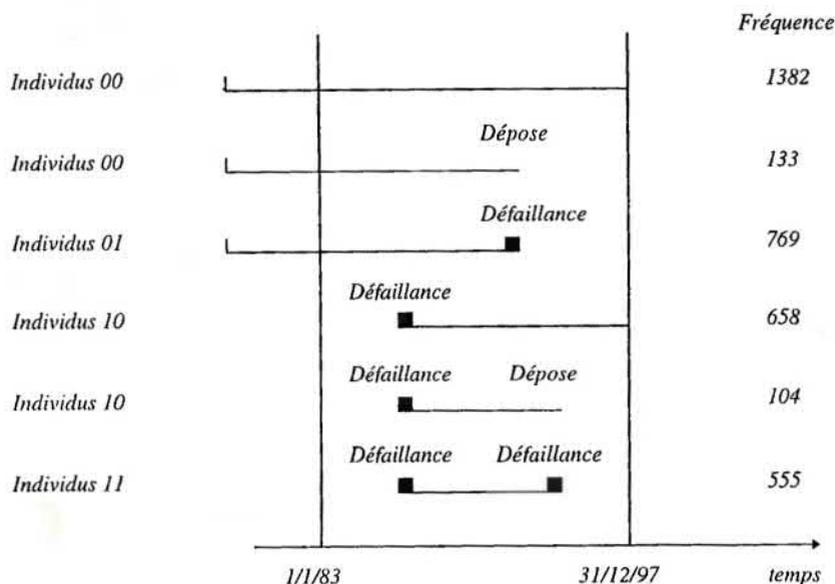


Figure 3.8 : Présentation détaillée des 6 types d'individus GL

Les figures 3.9 et 3.10 représentent les histogrammes des durées de survie pour les individus non censurés (individus 11) et pour les individus une fois censurés (individus 10 et 01). Les individus non censurés suivent une loi exponentielle (voir 4.2.3.1.). Les individus une fois censurés montrent une répartition décroissante mais qui ne suit pas de loi particulière, du fait de la troncature à droite ou à gauche.

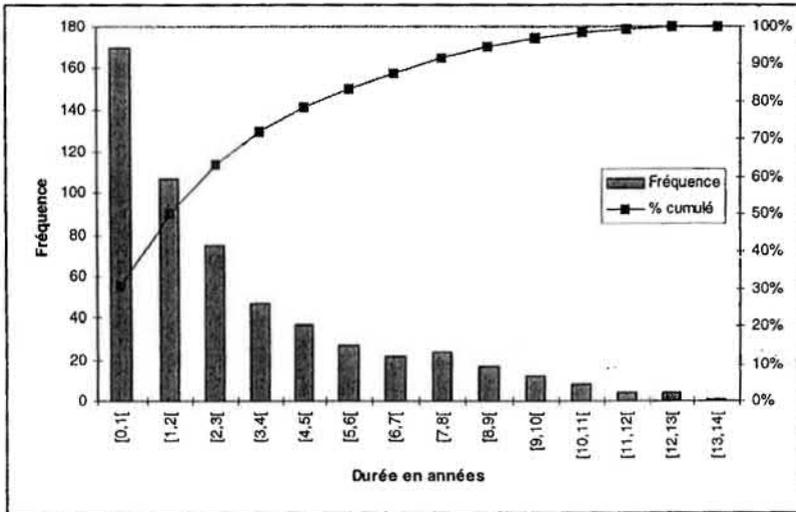


Figure 3.9 : Histogramme des durées de vie des individus 11

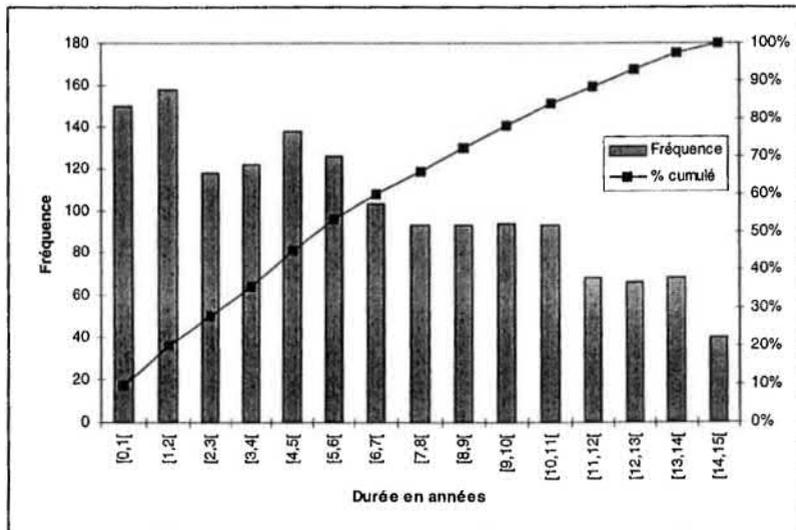


Figure 3.10 : Histogramme des durées de vie des individus 10 et 01.

La figure 3.11 présente la relation entre la durée de survie et le nombre de défaillances antérieures.

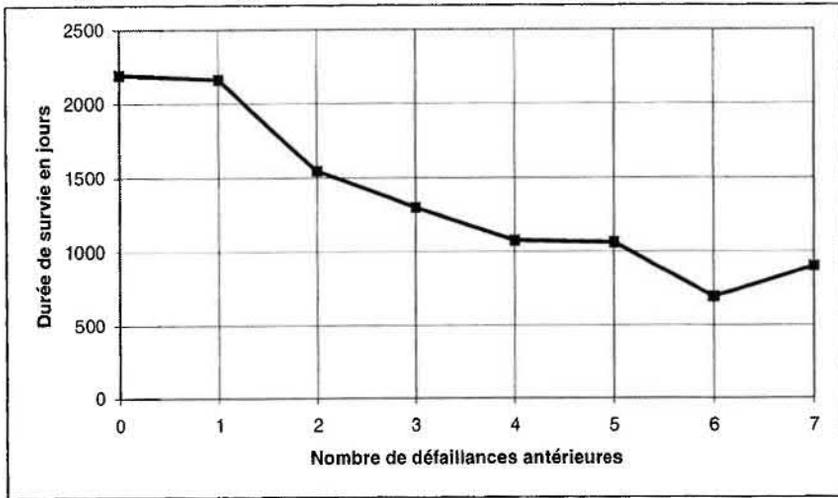


Figure 3.11 : Relation entre la durée de survie et le nombre de défaillances antérieures

La succession des défaillances sur un tronçon fait apparaître trois stades :

- les deux premières défaillances apparaissent avec un intervalle d'environ 2000 jours
- les troisième et quatrième défaillances avec un intervalle de 1500 et 1300 jours
- les défaillances suivantes avec un intervalle d'environ 1000 jours

Le dernier stade est assez stable autour de 1000 jours ; il correspond au stade de défaillances multiples décrit dans la littérature [ANDREOU , 1986].

3.3 DESCRIPTIONS COMPLEMENTAIRES

3.3.1 Age moyen du réseau

La figure 3.12 décrit l'évolution de l'âge moyen du réseau en fonction du temps.

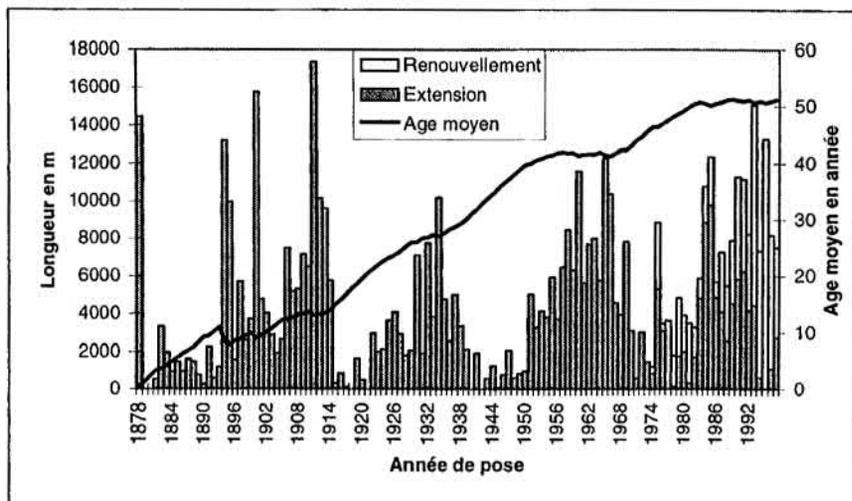


Figure 3.12 : Evolution de l'âge moyen du réseau en fonction du temps

On observe une progression quasi linéaire de l'âge moyen du réseau avec le temps avec quelques paliers correspondant aux périodes de forte croissance. A partir des années 1980, l'effort de renouvellement stabilise l'âge moyen du réseau à 50 ans environ.

3.3.2 Histogrammes mixtes

Les histogrammes mixtes présentent le linéaire des conduites en fonction des variables suivantes :

- épaisseur et nature de fonte,
- année de pose et nature de fonte,
- année de pose et épaisseur.

La figure 3.13 présente l'histogramme du linéaire en fonction de l'épaisseur et de la nature de fonte.

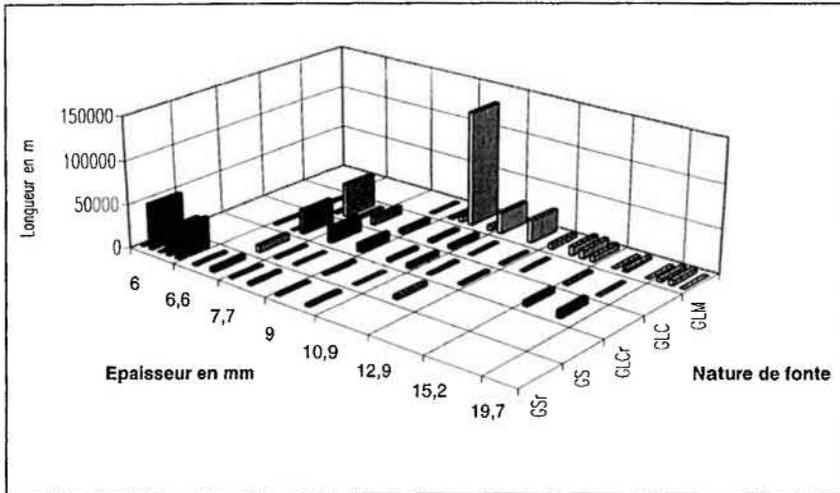


Figure 3.13 : Histogramme mixte de l'épaisseur et de la nature de fonte

On retrouve la prédominance des épaisseurs à 7,2 et 9,6 mm correspondant au diamètre 100 mm des fontes GLM et GLC. Les figures 3.14 et 3.15 présentent l'histogramme en linéaire de l'année de pose et respectivement l'épaisseur et la nature de fonte. On observe la dispersion importante des épaisseurs des fontes GLM comparées aux fontes GS.

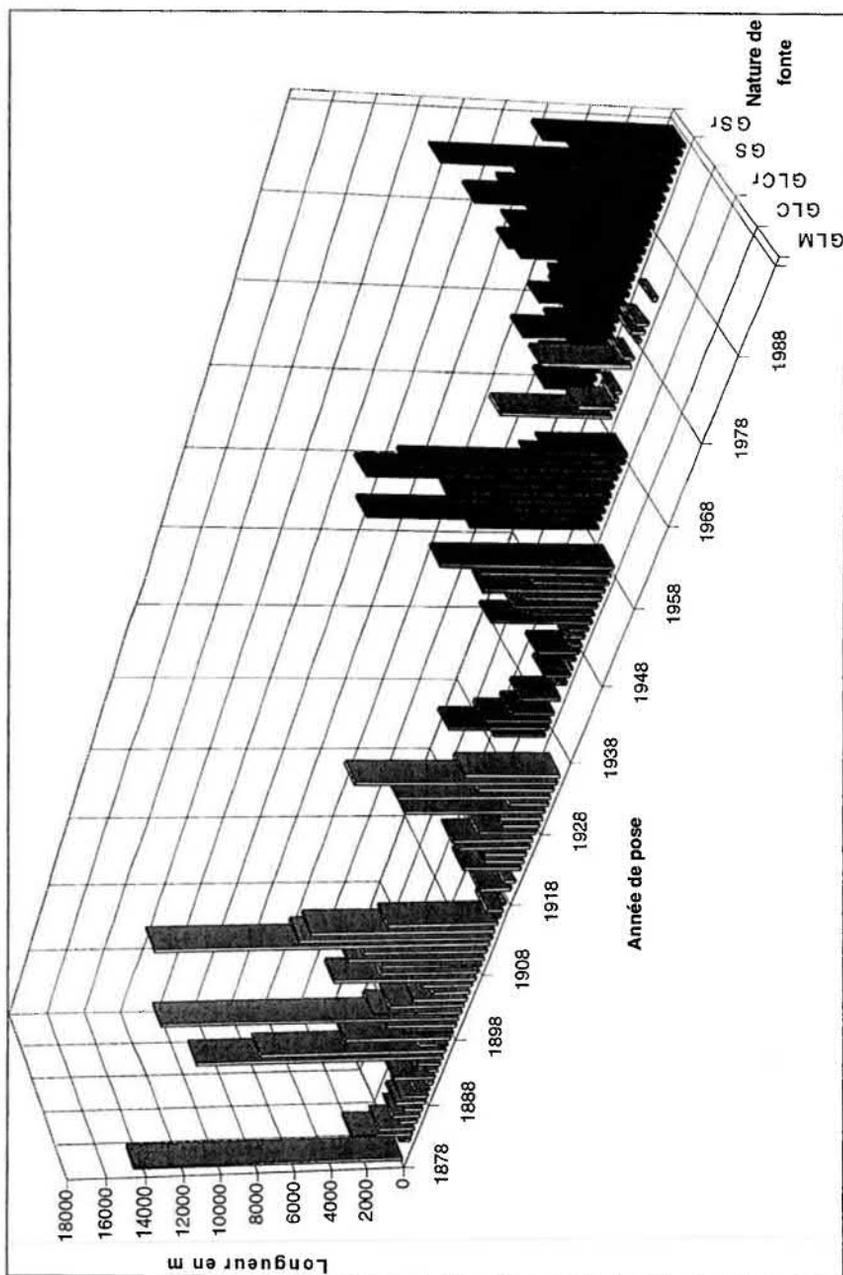


Figure 3.14 : Histogramme de l'année de pose et de la nature de fonte en linéaire

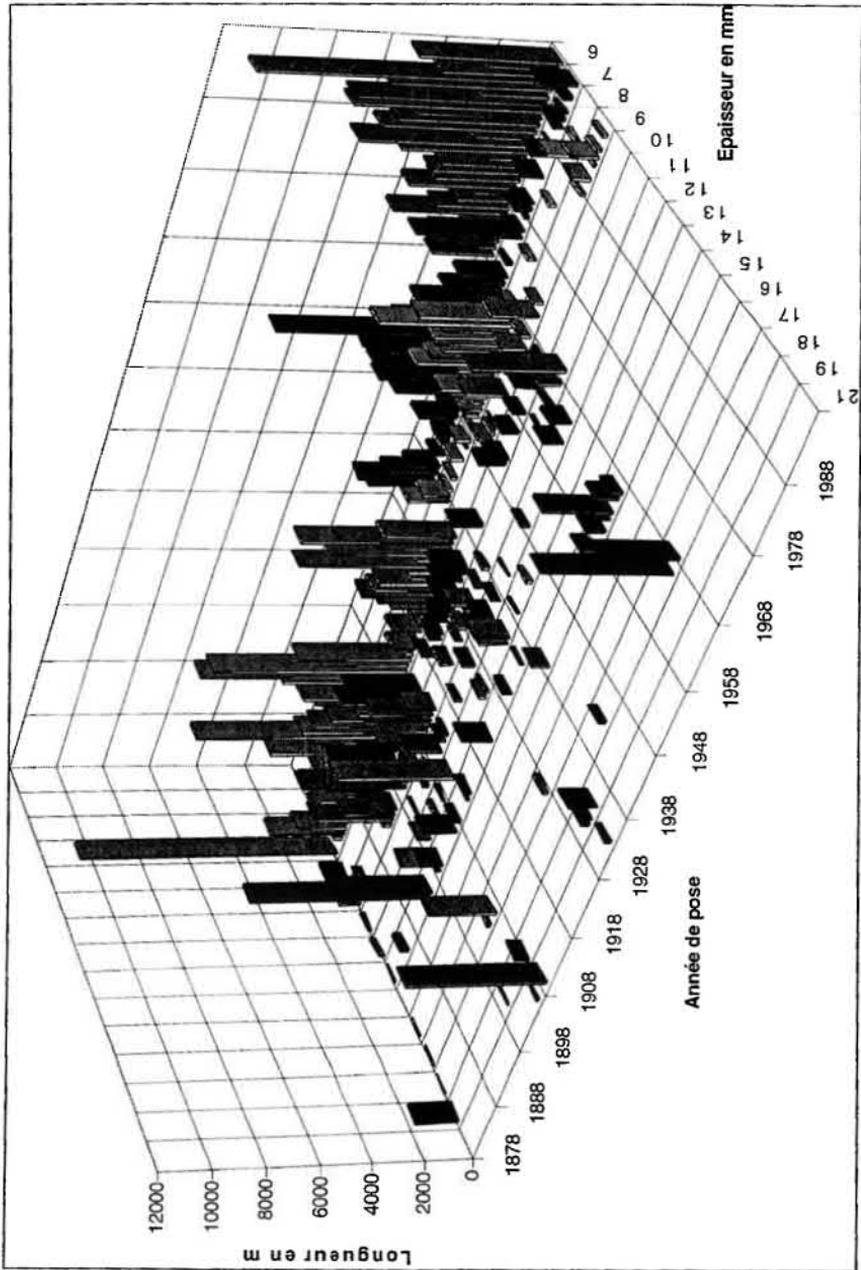


Figure 3.15 : Histogramme de l'année de pose et de l'épaisseur en linéaire

4. RESULTATS DE MODELISATION

Les approches suivantes ont été appliquées :

- les études statistiques descriptives,
- les modèles prédictifs (agrégés, régression multiple, analyse de survie),
- l'approche physique par mesure de l'état de corrosion.

4.1 ETUDES STATISTIQUES DESCRIPTIVES

4.1.1 Influence de l'année de pose

La figure 4.1 représente l'influence de l'année de pose sur le taux de défaillances.

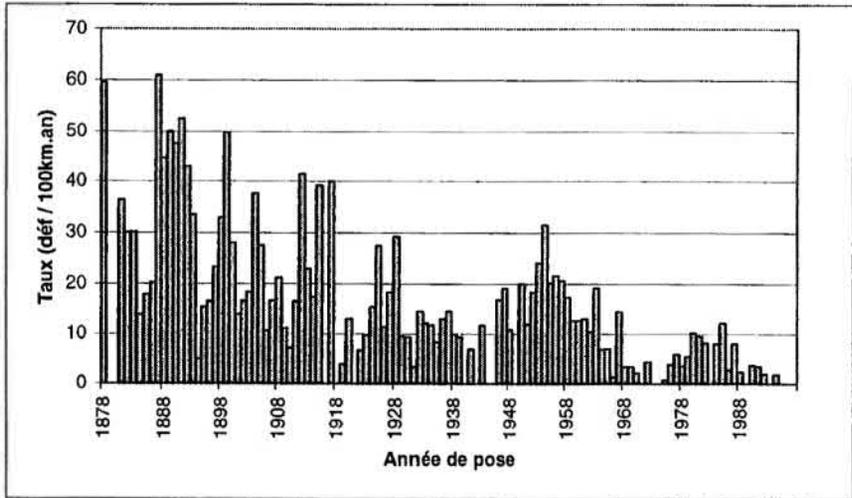


Figure 4.1 : Influence de l'année de pose sur le taux de défaillances

Le calcul du taux de défaillances par année de pose fait apparaître différentes tendances en fonction des natures de fonte : les fontes GLC (de 1936 à 1968) et les fontes GS (de 1969 à 1998) présentent une courbe en cloche avec un pic respectivement en 1954 et 1985. Les fontes GLM présentent une allure croissante du taux de défaillances avec l'âge ; le vieillissement est le plus perceptible sur les fontes moulées.

4.1.2 Influence du diamètre nominal

La répartition des données brutes montre la situation particulière du diamètre 100 qui subit à lui seul 80 % des défaillances du réseau. La figure 4.2 représente l'influence du diamètre sur le taux de défaillances.

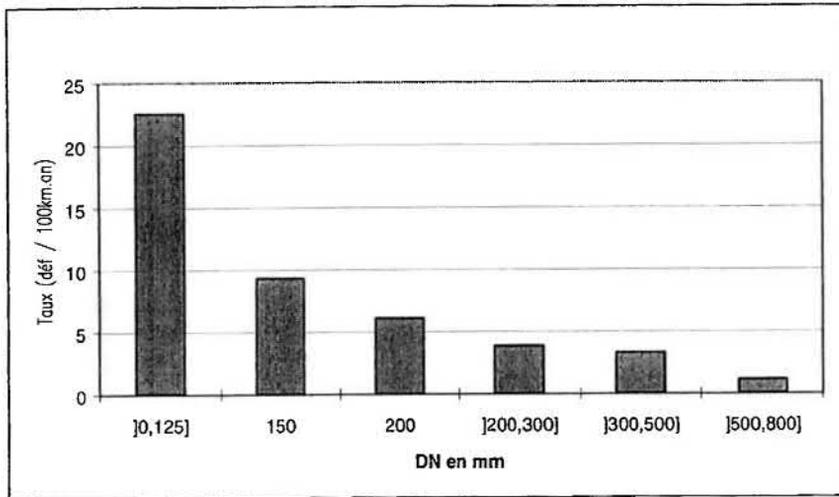


Figure 4.2 : Influence du diamètre sur le taux de défaillances

Les petits diamètres (inférieur ou égal à 100 mm) sont les plus défaillants ; l'explication est liée aux contraintes mécaniques et à la résistance à la déformation de la conduite, qui est proportionnelle à son moment d'inertie. Le moment est une fonction cubique du diamètre. Ceci explique que la relation déterministe entre le taux de défaillances d'une conduite exclusivement soumise à des actions mécaniques et son diamètre est de nature hyperbolique au cube.

4.1.3 Influence de la nature de fonte

Le tableau 4.1 et la figure 4.3 présentent les taux de défaillances par nature de fonte.

Tableau 4.1 : Influence de la nature de fonte sur le taux de défaillances

Type de fonte	Longueur en m	n	Taux (déf / 100km.an)
GLM	236475	772	22
GLC	63150	162	17
GLC revêtue	76191	113	10
GS	14492	5	2
GS revêtue	129400	72	4
Total	519708	1124	14

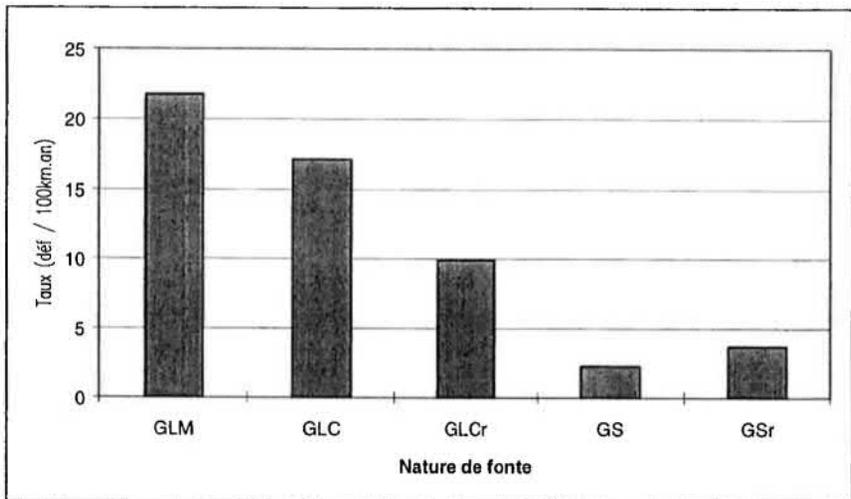


Figure 4.3 : Influence de la nature de fonte sur le taux de défaillances

La relation principale entre le taux de défaillances et la nature de fonte résulte de trois relations partielles :

- relation entre la nature de fonte et l'âge
- relation entre la nature de fonte et les caractéristiques mécaniques
- relation entre la nature de fonte et l'épaisseur

Les deux premières relations influent en faveur d'une meilleure fiabilité au fil du temps ; la dernière influe dans le sens opposé. La figure 4.3 décrit l'amélioration globale de la fiabilité au fil du temps ; les seules fontes GS font exception, car elles sont constituées de gros diamètres (supérieur ou égal à 300 mm).

4.1.4 Influence de l'épaisseur

La figure 4.4 représente l'influence de l'épaisseur sur le taux de défaillances.

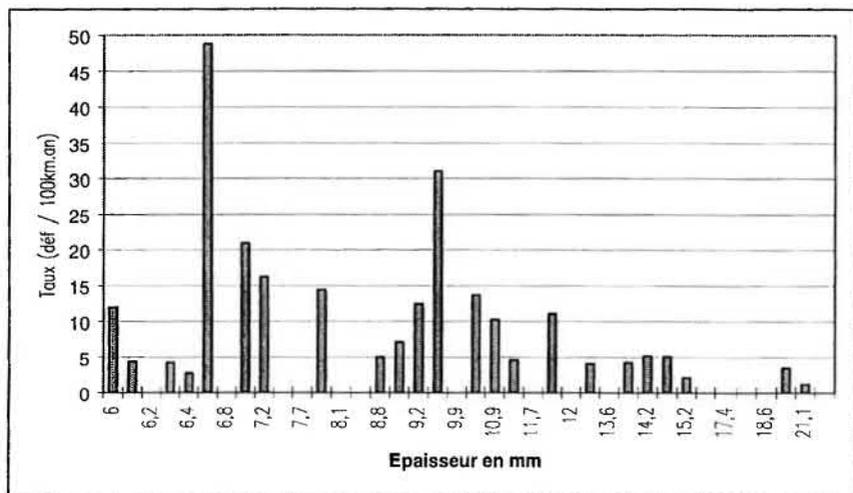


Figure .4.4 : Influence de l'épaisseur sur le taux de défaillances

L'épaisseur seule ne présente pas de relation linéaire avec le taux de défaillances ; elle doit être associée au diamètre et à la nature de la fonte, notamment aux caractéristiques mécaniques et à la présence de revêtements. Le moment d'inertie, synthèse des variables diamètre et épaisseur, représente la résistance à la déformation des conduites. C'est pourquoi nous avons étudié son influence sur le taux de défaillances (voir 4.2.1.3).

4.1.5 Influence de la localisation

Le tableau 4.2 représente le taux de défaillances par zone CUS ; le classement décroissant des zones à risque amène à définir trois secteurs, qui seront repris dans la modélisation :

- le secteur CENTRE,
- le secteur A qui représente la première couronne périphérique du centre,
- le secteur B qui représente la grande couronne.

Tableau 4.2 : Taux de défaillances par zone CUS

Secteur	Zone CUS	Longueur	Nombre de déf.	Taux
CENTRE	CENTRE VILLE	173090	760	29
Secteur A	MEINAU	41850	108	17
	NEUDORF	68046	175	17
	SCHILTIGHEIM	55468	120	14
	ROBERTSAU	55202	98	12
	BISCHHEIM	24655	42	11
Secteur B	HÖNHEIM	15680	22	9
	KOENIGSHOFFEN	26320	35	9
	MONTAGNE VERTE	28340	31	7
	ECKBOLSHEIM	20245	22	7
	NEUHOF	35390	33	6
	WOLFISHEIM	12525	11	6
	CRONENBOURG	47960	40	6
	LINGOLSHEIM	39450	28	5
OBERHAUSBERGEN	19230	4	1	
Total	Total	663451	1529	15

La classification décrit trois secteurs concentriques, à partir du centre-ville jusqu'à la grande couronne. Ils correspondent à la croissance urbaine et donc au développement du réseau au cours du temps ; la proportion des tronçons âgés décroît quand on se déplace du secteur centre vers le secteur B.

4.1.6 Influences mixtes

Le taux de défaillances a été calculé en fonction des couples de variables : épaisseur et nature de fonte, année de pose et nature de fonte, année de pose et épaisseur. La figure 4.5 représente l'influence de l'épaisseur et de la nature de fonte sur le taux de défaillances.

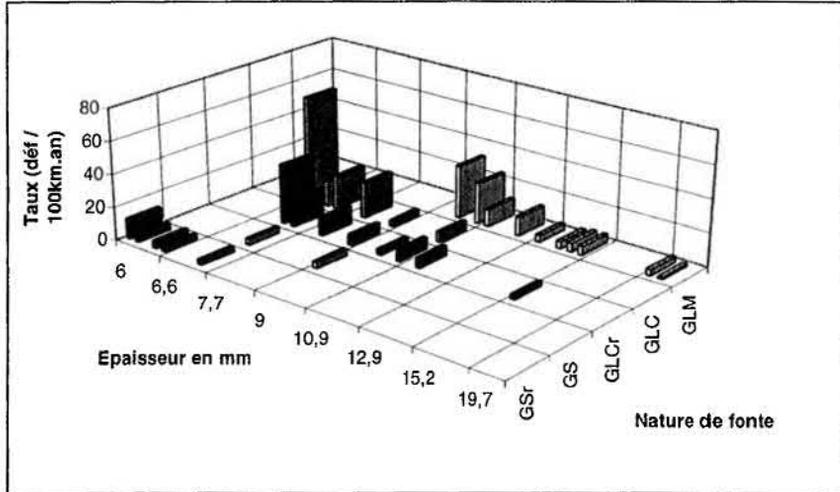


Figure 4.5 : Influence de l'épaisseur et de la nature de fonte sur le taux de défaillances

On observe, qu'à l'exception des fontes GS très peu représentées, le taux de défaillances semble présenter une relation de type at^n (n réel positif) avec l'épaisseur.

Les figures 4.6 et 4.7 présentent l'influence de l'année de pose et respectivement de la nature de fonte et de l'épaisseur sur le taux de défaillances. On retrouve l'influence de la nature de fonte déjà décrite avec l'année de pose.

4.1.7 Conclusion sur les études statistiques descriptives

L'influence des variables explicatives sur le taux moyen de défaillance est marquée par la nécessaire stratification de la population des tronçons par nature de fonte. On note un effet de vieillissement sur les fontes moulées alors que la distribution du taux sur les fontes centrifugées est plutôt symétrique.

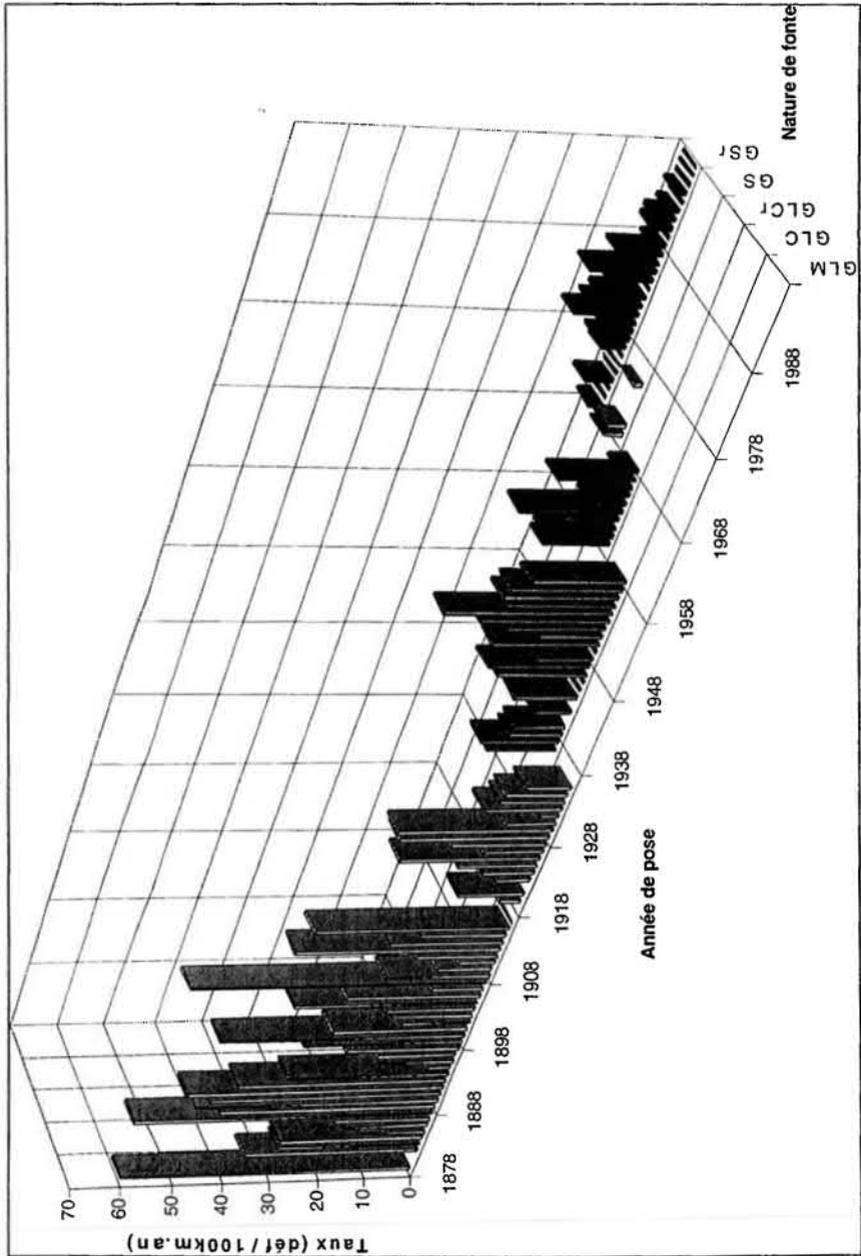


Figure 4.6 : Influence de l'année de pose et de la nature de fonte sur le taux de défaillances

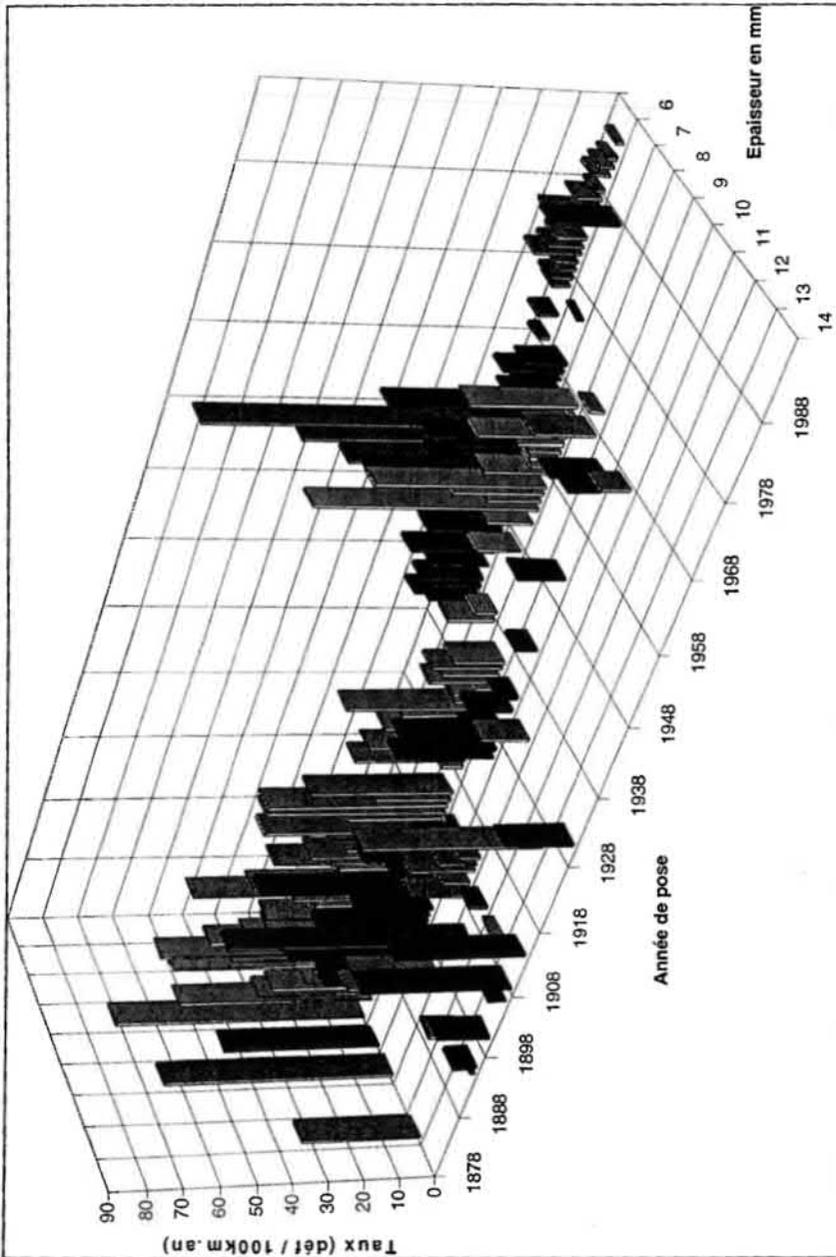


Figure 4.7 : Influence de l'année de pose et de l'épaisseur sur le taux de défaillances

4.2 MODELES PREDICTIFS

4.2.1 Modèles agrégés

4.2.1.1 Avec l'âge

Les modèles agrégés définis par SHAMIR & HOWARD n'ont pas été développés parce que la période d'observation des défaillances (15 ans) est trop courte par rapport à l'existence du réseau (120 ans). Deux calculs de régression entre le taux de défaillances moyen annuel et l'âge, l'un linéaire, l'autre exponentiel, fournissent les résultats suivants (les bêta représentent les coefficients de l'équation de régression) :

$$Taux = -0,54 + 0,28AGE (r^2 = 0,50) (n = 109)$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	-0.54	1.87	-0.29	0.77
AGE	0.28	0.03	10.42	0.00

$$\ln(Taux) = 0,93 + 0,0235AGE (r^2 = 0,54) (n = 109), \text{ donc } Taux = 2,53 * e^{0,0235AGE}$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	0.9286	0.1466	6.3340	0.0000
AGE	0.0237	0.0021	11.1054	0.0000

La figure 4.8 représente la relation entre le taux moyen annuel et l'âge :

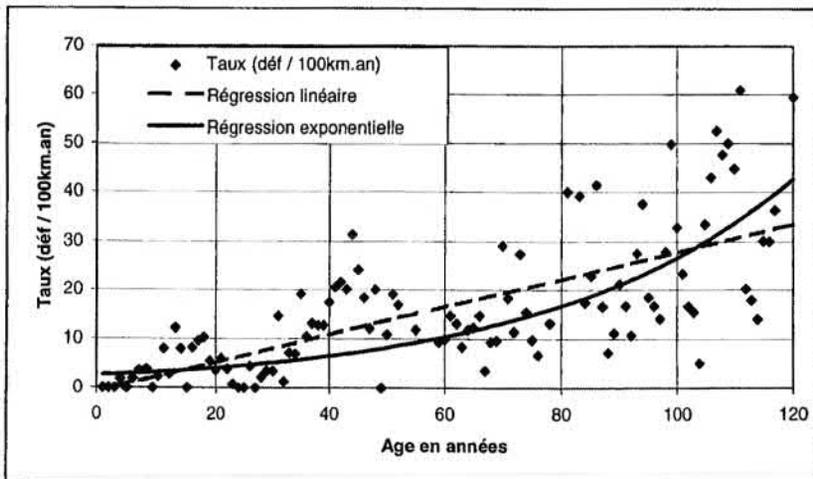


Figure 4.8 : Régression entre le taux moyen de défaillances et l'âge

Les calculs de régression exponentielle ont été réalisés entre le taux de défaillance et l'âge en distinguant les fontes moulées et centrifugées ; les fontes moulées fournissent les résultats suivants :

$$\ln(\text{taux}) = 1,09 + 0,022\text{AGE}(r^2 = 0,25)(n = 52), \text{ donc } \text{Taux} = 2,96 * e^{0,022\text{AGE}}$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	1.09	0.48	2.26	0.03
AGE	0.02	0.01	4.09	0.00

Les fontes centrifugées fournissent les résultats suivants :

$$\ln(\text{taux}) = 0,49 + 0,041\text{AGE}(r^2 = 0,40)(n = 57), \text{ donc } \text{Taux} = 1,63 * e^{0,041\text{AGE}}$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	0.49	0.23	2.16	0.04
AGE	0.041	0.01	6.09	0.00

La figure 4.9 décrit les taux moyens annuels de défaillances des fontes moulées et centrifugées.

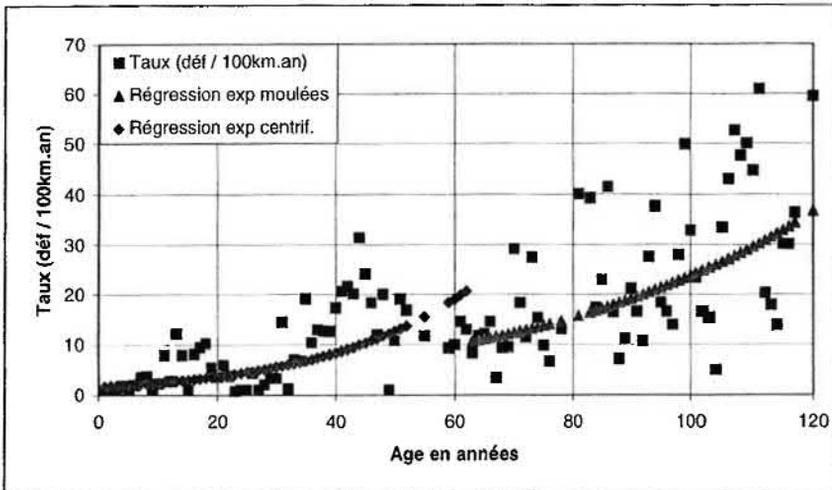


Figure 4.9 : Régression entre le taux moyen de défaillances des fontes moulées et centrifugées et l'âge

Les résultats montrent que les conduites moulées sont actuellement plus défaillantes que les conduites centrifugées ; cependant, l'extrapolation de la courbe décrivant les conduites centrifugées montre qu'à âge égal, les conduites centrifugées seraient plus défaillantes que les conduites moulées. Ces résultats sont conformes à d'autres décrits dans la littérature [O'DAY, 1982].

Quand la régression est calculée sur l'ensemble des tronçons, les résultats sont beaucoup moins bons, du fait de la grande dispersion des taux de défaillances. Les résultats des calculs de régression linéaire et exponentielle sur la population des tronçons sont :

$$Taux = 0,33 + 0,36AGE(r^2 = 0,10)(n = 2209)$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	0.33	1.55	0.22	0.82
AGE	0.36	0.02	15.33	0.00

$$Log(taux) = 0,20 + 0,017AGE(r^2 = 0,12)(n = 2209), \text{ donc } Taux = 1,22 * e^{0,017AGE}$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	0.2046	0.0648	3.1556	0.0016
AGE	0.0170	0.0010	17.3424	0.0000

Les résultats des calculs de régression linéaire et exponentielle sur l'échantillon des tronçons défaillants sont :

$$Taux = 32,8 + 0,442AGE(r^2 = 0,06)(n = 655)$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	32.8	5.44	6.06	0.00
AGE	0.442	0.07	6.47	0.00

$$Log(taux) = 3,36 + 0,0063AGE(r^2 = 0,05)(n = 655), \text{ donc } Taux = 28,6 * e^{0,0063AGE}$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	3.3609	0.0860	39.0952	0.0000
AGE	0.0063	0.0011	5.9190	0.0000

La mauvaise qualité des résultats illustre la difficulté de modéliser le taux de défaillances par l'âge. La même imprécision a été constatée lors du calcul de régression du taux de défaillances avec l'épaisseur.

4.2.1.2 Avec l'épaisseur

Les calculs de régression de type puissance entre l'épaisseur et le taux de défaillances ont été réalisés pour chaque nature de fonte à graphite lamellaire ; les résultats obtenus entre le taux moyen de défaillance et l'épaisseur pour les fontes GLM sont :

$$\ln(\text{taux}) = 10,86 - 3,45 \ln(EP) (r^2 = 0,83) (n = 10), \text{ donc } \text{Taux} = 51840 * EP^{-3,45}$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	10.86	1.45	7.51	0.00
Ln(EP)	-3.45	0.55	-6.23	0.00

Les résultats obtenus entre le taux moyen de défaillance et l'épaisseur pour les fontes GLC sont : $\ln(\text{taux}) = 10,15 - 3,66 \ln(EP) (r^2 = 0,84) (n = 11), \text{ donc } \text{Taux} = 25490 * EP^{-3,66}$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	10.15	1.25	8.15	0.00
Ln(EP)	-3.66	0.53	-6.89	0.00

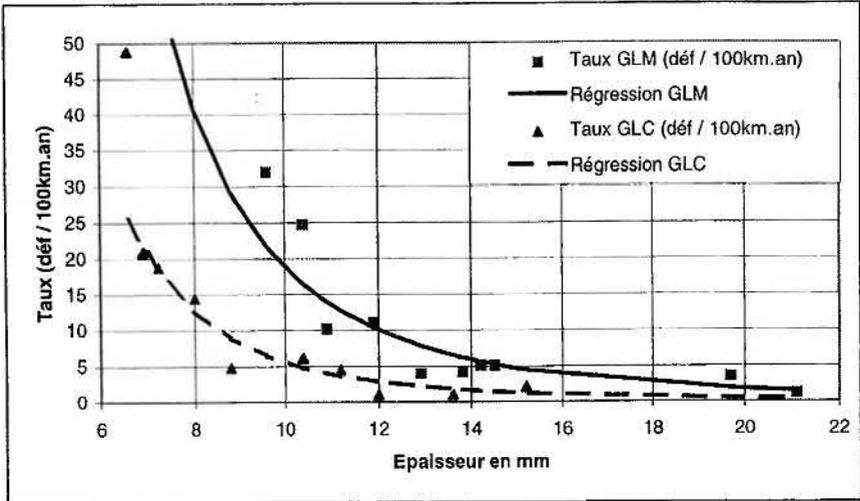


Figure 4.10 : Relation entre le taux moyen de défaillance et l'épaisseur des conduites

Les résultats obtenus sur tous les tronçons fournissent des coefficients de régression très faibles ($r^2=0,03$). Les résultats obtenus sur les tronçons défaillants sont légèrement meilleurs. Les résultats pour les fontes GLM sont :

$$\ln(\text{taux}) = 8,97 - 2,19\ln(EP)(r^2 = 0,09)(n = 438), \text{ donc } \text{Taux} = 7864 * EP^{-2,19}$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	8.97	0.76	11.77	0.00
Ln(EP)	-2.19	0.33	-6.58	0.00

Les résultats pour les fontes GLC sont :

$$\ln(\text{taux}) = 9,35 - 2,81\ln(EP)(r^2 = 0,14)(n = 156), \text{ donc } \text{Taux} = 11448 * EP^{-2,81}$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	9.35	1.12	8.36	0.00
Ln(EP1)	-2.81	0.55	-5.09	0.00

Le calcul entre le taux moyen de défaillances et l'épaisseur fournit une relation de nature hyperbolique, avec des coefficients supérieurs à trois. Cette relation est de bonne qualité, en raison du faible nombre de points. Le même calcul réalisé sur l'ensemble des tronçons présente une grande dispersion des résultats et donc une qualité médiocre, parce que

les covariables (âge, actions mécaniques, corrosion par les sols) n'ont pas été prises en compte.

4.2.1.3 Avec le moment d'inertie

Il apparaît judicieux d'utiliser le moment d'inertie de la conduite pour expliquer le taux de défaillances. Les calculs de régression entre le moment d'inertie et le taux de défaillances ont été réalisés par nature de fonte ; les résultats obtenus entre le taux moyen et le moment d'inertie pour les fontes GLM sont :

$$\text{Ln}(\text{taux}) = 5,6 - 0,4 \text{Ln}(\text{MT})(r^2 = 0,87)(n = 10), \text{ donc } \text{Taux} = 270 * \text{MT}^{-0,4}$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	5.60	0.51	10.99	0.00
Ln(MT)	-0.40	0.05	-7.47	0.00

Les résultats obtenus entre le taux moyen et le moment pour les fontes GLC sont :

$$\text{Ln}(\text{taux}) = 5,44 - 0,44 \text{Ln}(\text{MT})(r^2 = 0,89)(n = 11), \text{ donc } \text{Taux} = 230 * \text{MT}^{-0,44}$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	5.44	0.48	11.38	0.00
Ln(EP)	-0.44	0.05	-8.32	0.00

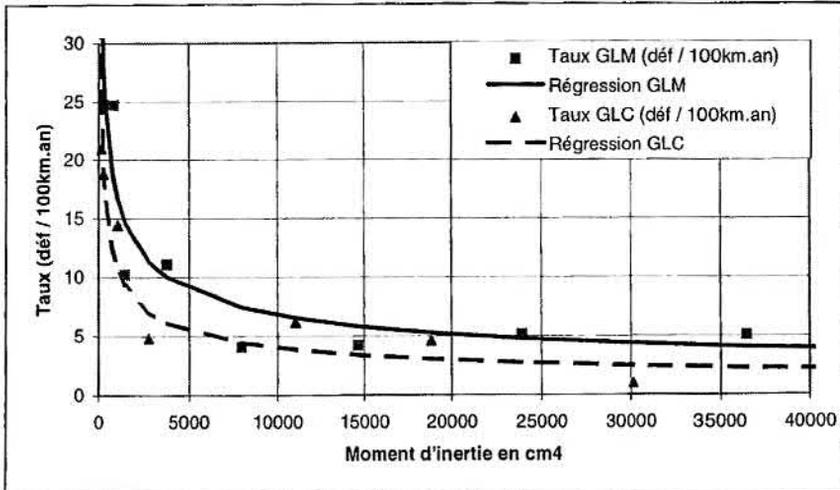


Figure 4.11 : Relation entre le taux moyen de défaillance et le moment d'inertie des conduites

Les caractéristiques mécaniques des conduites moulées sont inférieures, à épaisseur constante, à celles des fontes centrifugées, du fait de leur composition chimique (forte teneur en phosphore, matrice comprenant une forte proportion de perlite) et de leur structure (taille importante des lamelles de graphite). Par leurs plus grandes épaisseurs, les conduites moulées présenteraient, à égalité d'âge, une meilleure fiabilité que les conduites centrifugées. A cause de leur ancienneté, les conduites moulées présentent finalement une moins bonne résistance à la rupture que les conduites centrifugées.

4.2.1.4 Conclusion sur l'utilisation des modèles agrégés

Pour chaque variable explicative, la relation obtenue entre le taux moyen de défaillance et la variable est intéressante ; la relation linéaire ou exponentielle avec l'âge est croissante, avec une qualité comparable pour les deux types de régression. La relation avec la dimension (diamètre, épaisseur ou moment) est de nature hyperbolique, avec un coefficient réel. La précision décroît très rapidement quand on analyse le taux individuel des tronçons, car cette analyse prend en compte des facteurs de défaillance très locaux alors que ces facteurs sont lissés quand on utilise le taux moyen de défaillance.

Les résultats des calculs de régression montrent qu'actuellement, les conduites moulées présentent des taux de défaillances supérieurs à ceux des conduites centrifugées, mais qu'à âge égal, les conduites moulées seraient plus fiables. L'amélioration des caractéristiques mécaniques des fontes GLC vis à vis des fontes GLM ne suffit donc pas à équilibrer la perte correspondant à la diminution d'épaisseur.

4.2.2 Régression multiple

4.2.2.1 Nombre de défaillances des tronçons

Des calculs de régression multiple ont été réalisés sur plusieurs échantillonnages de la population des tronçons avec une stratification par nature de fonte et par nombre de défaillances (nul ou non nul). Trois strates de nature de fonte ont été utilisées : les tronçons GLM, les tronçons GL et tous les tronçons. Le tableau 4.3 présente une synthèse des calculs de régression linéaire et logarithmique ; r représente le coefficient de corrélation linéaire.

Tableau 4.3 : Synthèse des calculs de régression linéaire et logarithmique

Echantillonnage des tronçons	Nombre d'échantillons	r ² régression linéaire	r ² régression logarithmique
GLM	1007	0,10	0,12
GL	1544	0,09	0,10
Tous	2209	0,14	0,16
Défaillants GLM	426	0,04	0,06
Défaillants GL	601	0,03	0,04
Défaillants	656	0,04	0,04

Les meilleurs résultats sont obtenus sur l'ensemble des tronçons. Les calculs de régression logarithmique n'améliorent pas significativement les coefficients de corrélation par rapport à la régression linéaire. Sur la population des tronçons, nous avons réalisé une régression de type pas à pas ; les variables significatives retenues sont ANPOSE, EP, et LONG pour la régression linéaire, AGE, LONG, DN, PHOS pour la régression logarithmique.

Les équations de régression sur la population des tronçons s'écrivent :

$$n = 28,07 - 0,014 ANPOSE - 0,11EP + 0,00065LONG$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	28.07	1.64	17.10	0.00
LONG	0.00065	0.00	7.81	0.00
ANPOSE	-0.014	0.00	-17.08	0.00
EP	-0.11	0.01	-9.09	0.00

$$\ln(n+1) = 0,26 + 0,098 \ln(AGE) + 0,12 \ln(LONG) - 0,2 \ln(DN) + 0,033 \ln(PHOS)$$

$$\text{donc } n = 1,3 * AGE^{0,098} LONG^{0,12} DN^{-0,2} PHOS^{0,033} - 1$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	0.26	0.12	2.16	0.03
Ln(age)	0.098	0.02	6.26	0.00
Ln(long)	0.12	0.01	9.79	0.00
Ln(phos)	0.033	0.01	2.91	0.00
Ln(dn)	-0.20	0.02	-9.11	0.00

L'évolution du coefficient de corrélation linéaire au carré lorsque l'on ajoute une à une les variables les plus significatives est :

ANPOSE 0,10

ANPOSE, EP 0,12

ANPOSE, EP, LONG 0,14

La matrice des corrélations simplifiée s'écrit :

	ANPOSE	EP	LONG
EP	-0,69		
LONG	-0,01	0,25	
n	-0,31	0,11	0,11

Il faut noter la relation croissante entre le nombre de défaillances et l'épaisseur. Cette distorsion provient du poids des fontes moulées caractérisées par leurs fortes épaisseurs et leurs faibles caractéristiques mécaniques (du fait de leur composition chimique, teneur en phosphore notamment). L'équation de régression linéaire multiple propose un coefficient négatif pour l'épaisseur, plus conforme à la réalité.

4.2.2.2 Taux de défaillances des tronçons

On a utilisé la même procédure qu'avec le nombre de défaillances.

Le tableau 4.4 présente une synthèse des calculs de régression linéaire et logarithmique.

Tableau 4.4 : Synthèse des calculs de régression linéaire et logarithmique

Echantillonnage des tronçons	Nombre d'échantillons	r ² régression linéaire	r ² régression logarithmique
GLM	1007	0,09	0,09
GL	1544	0,09	0,08
Tous	2209	0,13	0,14
Défaillants GLM	426	0,10	0,14
Défaillants GL	601	0,08	0,14
Défaillants	656	0,11	0,14

La meilleure régression est obtenue sur l'ensemble des tronçons.

Sur la population des tronçons, nous avons réalisé une régression de type pas à pas ; les variables significatives retenues sont ANPOSE, EP, et MT pour la régression linéaire, AGE (1998-ANPOSE), DN, PHOS pour la régression logarithmique.

Les équations de régression s'écrivent :

$$Taux = 1325 - 0,65ANPOSE - 5,8EP + 0,00011MT$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	1325	87.90	15.07	0.00
ANPOSE	-0.65	0.04	-15.19	0.00
EP	-5.80	0.74	-7.86	0.00
MT	0.00011	0.00	2.89	0.00

$Ln(taux + 1) = 3,13 + 0,36Ln(AGE) - 0,56Ln(DN) + 0,1Ln(PHOS)$, donc

$$Taux = 22,9 * AGE^{0,36} DN^{-0,56} PHOS^{0,1} - 1$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	3.13	0.38	8.13	0.00
Ln(age)	0.36	0.05	6.83	0.00
Ln(dn)	-0.56	0.07	-8.20	0.00
Ln(phos)	0.10	0.04	2.70	0.01

Voici l'évolution du coefficient de corrélation linéaire au carré lorsque l'on ajoute une à une les variables les plus significatives dans la régression linéaire :

ANPOSE	0,10
ANPOSE, EP	0,12
ANPOSE, EP, MT	0,13

La matrice des corrélations simplifiée s'écrit :

	ANPOSE	EP	MT
EP	-0,69		
MT	-0,05	0,58	
Taux	-0,31	0,09	-0,07

On retrouve dans cette matrice la relation proportionnelle entre l'épaisseur et le taux de défaillances. L'équation de régression linéaire multiple fournit un coefficient négatif pour l'épaisseur, mais positif pour le moment (influence des fontes moulées).

4.2.2.3 Durée de survie des individus

Des calculs de régression multiple ont été réalisés sur plusieurs échantillonnages de la population des individus avec une stratification par nature de fonte et suivant la localisation. Trois strates de nature de fonte ont été utilisées : les individus GLM, les individus GL et tous les individus. La localisation a été décomposée en trois strates : le secteur centre, le secteur A représentant la première couronne, le secteur B représentant la grande couronne. Le tableau 4.5 présente une synthèse des calculs de régression linéaire et logarithmique.

Tableau 4.5 : Synthèse des calculs de régression linéaire et logarithmique

Echantillonnage des individus	Nombre d'individus	r ² régression linéaire	r ² régression logarithmique
GLM	2487	0,29	0,27
GL	3599	0,30	0,27
Tous	4313	0,25	0,28
Centre GLM	1302	0,26	0,24
Centre GL	1520	0,28	0,24
Tous Centre	1872	0,25	0,28
A GLM	727	0,29	0,25
A GL	1225	0,28	0,24
Tous A	1459	0,26	0,26
B GLM	458	0,34	0,28
B GL	854	0,35	0,31
Tous B	982	0,32	0,32

Globalement, les meilleures régressions sont obtenues sur les individus GL. Nous avons retenu l'échantillonnage des individus GL, tous secteurs confondus.

Sur cet échantillonnage, nous avons réalisé une régression de type pas à pas ; les variables significatives retenues sont NDEF, DN, EP, MT et PHOS pour la régression linéaire et NDEF, ANPOSE, LONG et MT pour la régression logarithmique.

Les équations de régression s'écrivent :

$$Dsurvie = 4215 - 879NDEF - 410PHOS + 3,6DN - 0,6LONG - 0,003MT$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	4215	94.71	44.51	0.00
LONG	-0.60	0.12	-4.89	0.00
MT	-0.003	0.00	-2.24	0.03
PHOS	-410	42.30	-9.70	0.00
NDÉF	-879	26.39	-33.31	0.00
DN	3.6	0.54	6.63	0.00

$$\ln(Dsurvie) = 9,61 - 1,11\ln(NDEF + 1) - 0,32\ln(AGE) - 0,1\ln(LONG) + 0,06\ln(MT)$$

donc $Dsurvie = 14913(NDEF + 1)^{-1,11} AGE^{-0,32} LONG^{-0,1} MT^{0,06}$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	9.61	0.23	41.32	0.00
Ln(Ndéf+1)	-1.11	0.03	-32.44	0.00
LnAge	-0.32	0.04	-7.36	0.00
LnLong	-0.10	0.02	-4.04	0.00
LnMt	0.06	0.01	4.75	0.00

Voici l'évolution du coefficient de corrélation linéaire au carré lorsque l'on ajoute une à une les variables les plus significatives dans la régression linéaire :

NDEF	0,27
NDEF, PHOS	0,29
NDEF, PHOS, DN	0,29
NDEF, PHOS, DN, LONG	0,30
NDEF, PHOS, DN, LONG, MT	0,30

Voici la même évolution sans le nombre de défaillances antérieures :

PHOS	0,05
PHOS, DN	0,07
PHOS, DN, LONG	0,09
PHOS, DN, LONG, MT	0,09

La présence de la variable NDEF permet d'améliorer la qualité de la régression (variance expliquée de 0,30 contre 0,09). Cette variable joue un rôle particulier car elle agglomère une grande partie de l'information contenue dans les autres variables (0,30 contre 0,27) et elle apporte une grande quantité d'information supplémentaire (0,30 contre 0,09).

On remarque que la régression linéaire n'exprime le vieillissement des individus qu'à travers la variable NDEF, alors que la régression logarithmique utilise les variable NDEF et ANPOSE, avantage appréciable qui permettra d'utiliser le modèle de régression logarithmique en programmation. On note également que la part de variance expliquée concernant les durées de survie se situent à environ 0,30 contre 0,15 en ce qui concerne les nombres ou taux de défaillances. Le passage des tronçons aux individus implique une amélioration significative de la qualité des modèles.

4.2.2.4 Conclusion sur la régression multiple

Les coefficients de corrélation relativement faibles obtenus sur les tronçons et les individus statistiques peuvent être expliqués par plusieurs processus :

- l'analyse à partir de variables non gaussiennes, ce qui implique des relations non linéaires entre les variables défaillances et les covariables,
- le défaut de certaines covariables (d'action mécanique ou d'action corrosive par les sols) pour décrire suffisamment le processus de défaillance.

Il ne faut cependant pas s'alarmer d'obtenir des coefficients trop moyens. En matière de fiabilité des réseaux d'eau potable, les études américaines réalisées sur des réseaux urbains ont montré que les coefficients r^2 se situaient entre 0,16 et 0,50 [CLARK et al., 1982][O'DAY, 1982].

Un point positif est l'amélioration de la qualité de la régression quand on analyse les individus plutôt que les tronçons ; les modèles de régression obtenus sur les tronçons retiennent comme variables significatives d'abord l'âge du tronçon, puis sa dimension ; les modèles obtenus sur les individus retiennent comme variable significative d'abord le nombre de défaillances antérieures de l'individu, puis son âge, puis sa dimension. Le poids de la variable nombre de défaillances antérieures est très important : les tronçons présentant le plus grand risque de défaillance sont les tronçons déjà défaillants.

4.2.3 Modèles probabilistes

4.2.3.1 Modèles strictement probabilistes

Les modèles probabilistes ont été ajustés en minimisant le Khi^2 , au lieu de maximiser la vraisemblance. La validité du calage a été contrôlée en utilisant le test du Khi^2 d'ajustement.

4.2.3.1.1 Nombre de défaillances des tronçons

Nous comparons d'abord la distribution de X : nombre de défaillances des tronçons en fonte GL avec une loi de Poisson de paramètre λ : $P(\lambda)$. Le paramètre est estimé à partir de la moyenne de l'échantillon, puis en minimisant le Khi^2 par approximations successives.

Tableau 4.6 : Ajustement de la distribution du nombre de défaillances avec $P(\lambda)$

X	Effectif observé	Pi	Effectif calculé	Khi^2
0	1515	0,55	1262	51
1	460	0,33	745	109
2	165	0,10	220	14
3	77	0,02	43	26
4	60	0,00	7	69
	2277	1,00	2277	601

On regroupe les individus en 5 classes d'effectifs suffisants, ce qui explique les fréquences nulles à partir de la cinquième défaillance, et on calcule :

$$\text{Khi}^2 = \sum \frac{(\text{effectif observé} - \text{effectif calculé})^2}{\text{effectif calculé}} = 601$$

La valeur du Khi^2 au seuil de 5%, à $5-1-1=3$ degrés de liberté est de 7,81.

La valeur du Khi^2 au seuil de 1%, à $5-1-1=3$ degrés de liberté est de 11,34.

Le nombre de défaillance des tronçons n'est pas distribué suivant une loi de Poisson au seuil de 1%. Le même test a été répété à partir de la première défaillance, puis de la seconde,

etc. Dans tous les cas, le test du Khi^2 rejette clairement l'hypothèse du processus poissonnien. Le réseau CUS n'est pas caractérisé par un processus poissonnien homogène.

Nous comparons ensuite la distribution de X : nombre de défaillances des tronçons en fonte GL avec une loi Binômiale Négative de paramètres v et p : $\text{BN}(v,p)$. Les paramètres sont estimés à partir de la moyenne et de la variance de l'échantillon, puis en minimisant le Khi^2 par approximations successives.

Tableau 4.7 : Ajustement de la distribution du nombre de défaillances avec $\text{BN}(v,p)$

X	Effectif observé	Pi	Effectif calculé	Khi^2
0	1515	0,67	1521	0
1	460	0,19	435	1
2	165	0,08	175	1
3	77	0,03	77	0
4	29	0,02	36	1
5	15	0,01	17	0
6	11	0,00	8	1
7	5	0,00	7	2
	2277	1,00	2276	5,14

On regroupe les individus en 8 classes d'effectifs suffisants et on calcule :

$$\text{Khi}^2 = \sum \frac{(\text{effectif observé} - \text{effectif calculé})^2}{\text{effectif calculé}} = 5,14$$

La valeur du Khi^2 au seuil de 5%, à $8-2-1=5$ degrés de liberté est de 11,07.

La valeur du Khi^2 au seuil de 1%, à $8-2-1=5$ degrés de liberté est de 15,09.

Le nombre de défaillances des tronçons est distribué suivant une loi Binômiale Négative $\text{BN}(0,55;0,48)$ au seuil de 5%. L'acceptation de la loi Binômiale Négative signifie l'existence d'un risque hétérogène de défaillance pour les tronçons en fonte GL. La population des tronçons du réseau CUS suit une loi de Poisson hétérogène, avec un paramètre λ distribué suivant une loi Gamma.

4.2.3.1.2 Durée de survie des individus

Nous comparons d'abord la distribution de Y : durée de survie en années des individus non censurés en fonte GL avec une loi exponentielle de paramètre $\lambda : E(\lambda)$. Le paramètre est estimé à partir de l'inverse de la moyenne de l'échantillon, puis en minimisant le Khi^2 par approximations successives.

Tableau 4.8 : Ajustement de la distribution de la durée de survie avec $E(\lambda)$

Y	Effectif observé	Pi	Effectif calculé	Khi ²
1	170	0,27	152	2
2	106	0,20	110	0
3	75	0,14	80	0
4	48	0,10	58	2
5	37	0,08	42	1
6	27	0,06	31	0
7	22	0,04	22	0
8	24	0,03	16	4
9	17	0,02	12	2
10	12	0,02	9	1
11	8	0,01	6	1
12	4	0,01	4	0
13	5	0,01	5	0
	555	0,99	549	14

On regroupe les individus en 13 classes d'effectifs suffisants et on calcule :

$$\text{Khi}^2 = \sum \frac{(\text{effectif observé} - \text{effectif calculé})^2}{\text{effectif calculé}} = 14$$

La valeur du Khi^2 au seuil de 5%, à $13-1-1=11$ degrés de liberté est de 19,68.

La valeur du Khi^2 au seuil de 1%, à $13-1-1=11$ degrés de liberté est de 24,73.

La durée de survie des individus est distribuée suivant une loi Exponentielle $E(0,3)$ au seuil de 5%. Si les individus étaient indépendants, on pourrait conclure à l'existence d'un processus poissonnien. Ce n'est pas le cas puisqu'un tronçon peut être à l'origine de plusieurs individus.

Nous comparons ensuite la distribution de Y : durée de survie en années des individus non censurés en fonte GL avec une loi de Weibull de paramètres λ et p : $W(\lambda,p)$. Les paramètres λ et p sont estimés à partir de la moyenne de l'échantillon et d'une valeur proche de 1 respectivement, puis en minimisant le Khi^2 par approximations successives.

Tableau 4.9 : Ajustement de la distribution de la durée de survie avec $W(\lambda,p)$

Y	Effectif observé	Pi	Effectif calculé	Khi ²
1	170	0,30	166	0,10
2	106	0,18	102	0,18
3	75	0,13	71	0,17
4	48	0,09	52	0,31
5	37	0,07	39	0,06
6	27	0,05	29	0,13
7	22	0,04	22	0,00
8	24	0,03	17	3,20
9	17	0,02	13	1,38
10	12	0,02	10	0,46
11	8	0,01	8	0,02
12	4	0,01	6	0,63
13	2	0,01	5	1,48
14	3	0,01	4	0,00
	555	0,98	542	8,12

On regroupe les individus en 13 classes d'effectifs suffisants et on calcule :

$$Khi^2 = \sum \frac{(\text{effectif observé} - \text{effectif calculé})^2}{\text{effectif calculé}} = 8,12$$

La valeur du Khi^2 au seuil de 5%, à $13-1-1=11$ degrés de liberté est de 19,68.

La valeur du Khi^2 au seuil de 1%, à $13-1-1=11$ degrés de liberté est de 24,73.

La durée de survie des individus est distribuée suivant une loi de Weibull $W(3,2 ; 0,89)$ au seuil de 5%. Le paramètre p de cette loi est proche de 1 (0,89), donc la loi de Weibull est proche d'une loi exponentielle.

4.2.3.1.3 Conclusion sur l'utilisation des modèles probabilistes

Les ajustements montrent que le réseau CUS dans son ensemble ne suit pas un processus poissonnien, mais qu'il est caractérisé par un risque hétérogène de défaillance. Les durées de survie sont ajustées par une loi de Weibull proche de la loi exponentielle. Il semble intéressant de coupler ce type de loi avec un terme de régression. Ce calcul a été réalisé au chapitre suivant avec le calage du modèle des risques proportionnels.

4.2.3.2 Modèle des risques proportionnels

4.2.3.2.1 Calage

Il a été appliqué sans stratification sur l'échantillonnage des individus en fonte GL.

Les variables soumises au modèle sont :

LN_NDEF : $\text{Ln}(\text{NDEF}+1)$

LN_AGE : $\text{Ln}(1998-\text{ANPOSE})$

LN_DN : $\text{Ln}(\text{DN})$

LN_LONG : $\text{Ln}(\text{LONG})$

LN_EP : $\text{Ln}(\text{EP})$

LN_PHOS : $\text{Ln}(\text{PHOS} + 0,1)$

LN_MT : $\text{Ln}(\text{MT})$

Le tableau 4.10 présente les variables significatives retenues et les coefficients β_i et σ .

Tableau 4.10 : Paramètres de l'analyse de survie

Variable	Degré de liberté	Estimation des paramètres β_i et σ	Valeurs des paramètres $-\beta_i / \sigma$	Erreur-type	Khi ²	Pr>Khi ²
β_0	1	10,45	-8,56	0,63	276,97	0,0001
LN_NDEF	1	-0,94	0,80	0,06	230,22	0,0001
LN_AGE	1	-0,82	0,70	0,09	79,15	0,0001
LN_LONG	1	-0,40	0,34	0,05	65,81	0,0001
LN_MT	1	0,30	-0,26	0,03	77,44	0,0001
σ	1	1,18		0,03		

L'équation de la fonction de survie s'écrit :

$$S(t) = e(-0.00014(NDEF + 1)^{0.8} AGE^{0.7} LONG^{0.34} MT^{-0.26} t^{0.85})$$

La figure 4.12 représente à titre indicatif les fonctions de survie de quatre conduites de 100 ans, 100 mètres de long et de diamètre 100 ayant subi respectivement 0, 2, 4 et 6 défaillances.

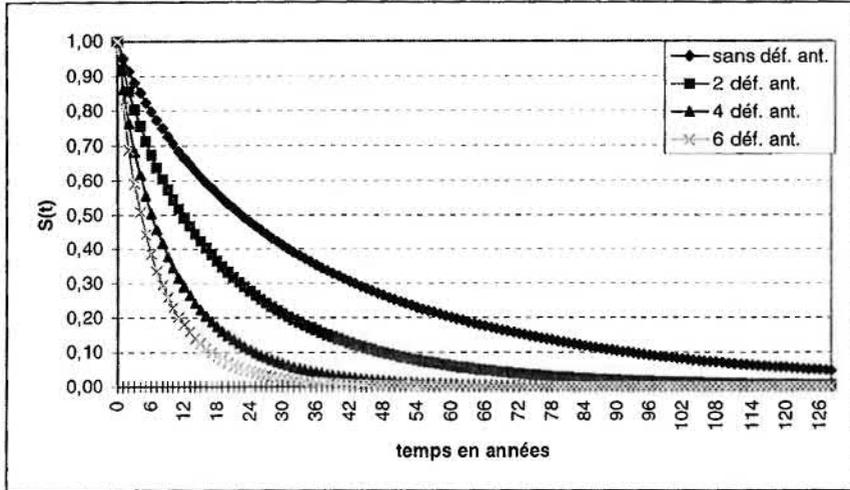


Figure 4.12 : Durées de vie observée et calculée par l'analyse de survie

P. EISENBEIS a mis en évidence les principaux facteurs explicatifs des défaillances lors de son travail de thèse [EISENBEIS P., 1994] ; il s'agit du nombre de défaillances antérieures, du diamètre et, dans une moindre mesure, du sol, de l'année de pose et du facteur croisé trafic-chaussée.

4.2.3.2.2 Conclusion sur l'utilisation du modèle des risques proportionnels

Le modèle des risques proportionnels prend en compte les covariables d'âge, de dimension (moment), de longueur et d'historique (Ndéf) ; il rejette les variables d'épaisseur, de diamètre et de teneur en phosphore qui sont dépendantes des covariables. La prise en compte de l'âge a permis d'utiliser la fonction de survie pour la programmation du renouvellement. Ces variables sont identiques à celles du modèle de régression multiple. Ces deux modèles proposent des résultats relativement voisins.

4.2.4 Conclusion sur l'utilisation des modèles prédictifs

Les modèles prédictifs décrivent correctement l'apparition des défaillances sur le réseau pris dans son ensemble, mais plus difficilement à l'échelle du tronçon ou de l'individu statistique. La précision des données et la qualité des modèles devra encore être améliorée pour obtenir une description plus fiable des défaillances observées, et par conséquent, une prévision plus fiable des défaillances futures.

Les modèles agrégés établissent les relations entre le taux de défaillances et les deux principales variables qui sont l'âge et la dimension (diamètre, épaisseur ou moment d'inertie) de la conduite. Les modèles de régression multiple désignent ces mêmes variables comme significatives vis à vis du processus de défaillance. Le modèle des risques proportionnels confirme l'importance de ces variables avec une formulation et des coefficients différents. La sélection des mêmes variables pour les modèles de régression et des risques proportionnels atteste de la stabilité de la modélisation.

4.3 METHODE PHYSIQUE DE MESURE DE LA CORROSION

8 mesures d'épaisseur et 20 mesures de profondeur ont été pratiquées sur 83 échantillons, ce qui représente 664 mesures d'épaisseur et 1660 mesures de profondeur. Lorsque les profondeurs étaient très faibles et difficilement mesurables (de l'ordre de 0,5 mm), nous avons affecté à la mesure la valeur seuil de 0,5 mm. Dans ces conditions, on peut distinguer 2 types de données parmi les 1660 résultats :

- les valeurs effectivement mesurées,
- les valeurs estimées à 0,5 mm.

Globalement, les valeurs effectivement mesurées sont au nombre de :

sur la face interne : 665 sur 830 soit 80%

sur la face externe : 496 sur 830 soit 60%

globalement : 1161 sur 1660 soit 70%

4.3.1 Description de l'état de corrosion des échantillons

Les différentes mesures ou résultats de calcul présentent des allures gaussiennes, avec présence parfois de sous-populations ; il nous a paru judicieux de les représenter sous la forme de graphique de fréquence cumulée. Les variables uniformes sont distribuées suivant une droite.

4.3.1.1 Profondeurs maximales d'attaque

La figure 4.13 présente les profondeurs maximales d'attaque interne, externe et équivalente.

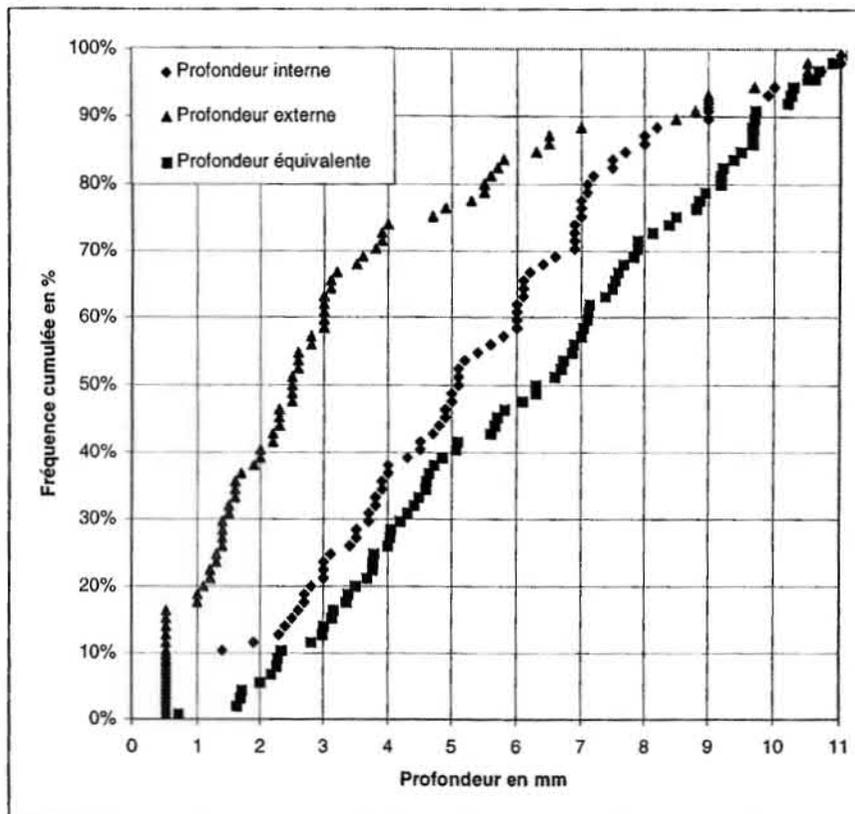


Figure 4.13 : Représentation des profondeurs maximales d'attaque

Les fonctions de répartition ont une allure de droite avec une distribution entre 1 et 11 mm ; cette allure régulière est vraisemblablement liée à la faible variation de la qualité d'eau au sein du réseau ainsi que durant l'histoire du réseau. La profondeur externe a une allure droite entre 1 et 4 mm, puis présente 2 sous-populations avec des valeurs plus élevées. Cette allure doit être mise en relation avec une l'hétérogénéité de la nature des sols enrobant les conduites du réseau.

4.3.1.2 Vitesses maximales de corrosion

La figure 4.14 représente les vitesses maximales d'attaque interne, externe et totale.

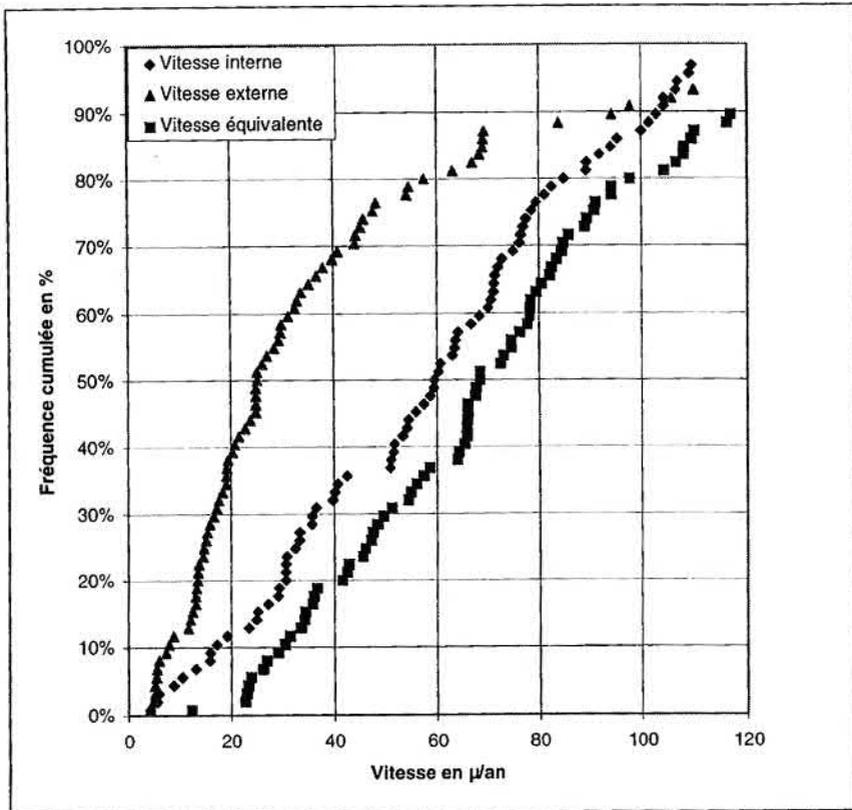


Figure 4.14 : Représentation des vitesses maximales d'attaque

Les vitesses sont distribuées de la même manière que les profondeurs : les vitesses interne et équivalente présentent une allure régulière, tandis que la vitesse externe fait apparaître des sous populations correspondant à des différentes natures de sols.

4.3.1.3 Epaisseurs résiduelles minimales

La figure 4.15 représente la distribution des épaisseurs résiduelles minimales.

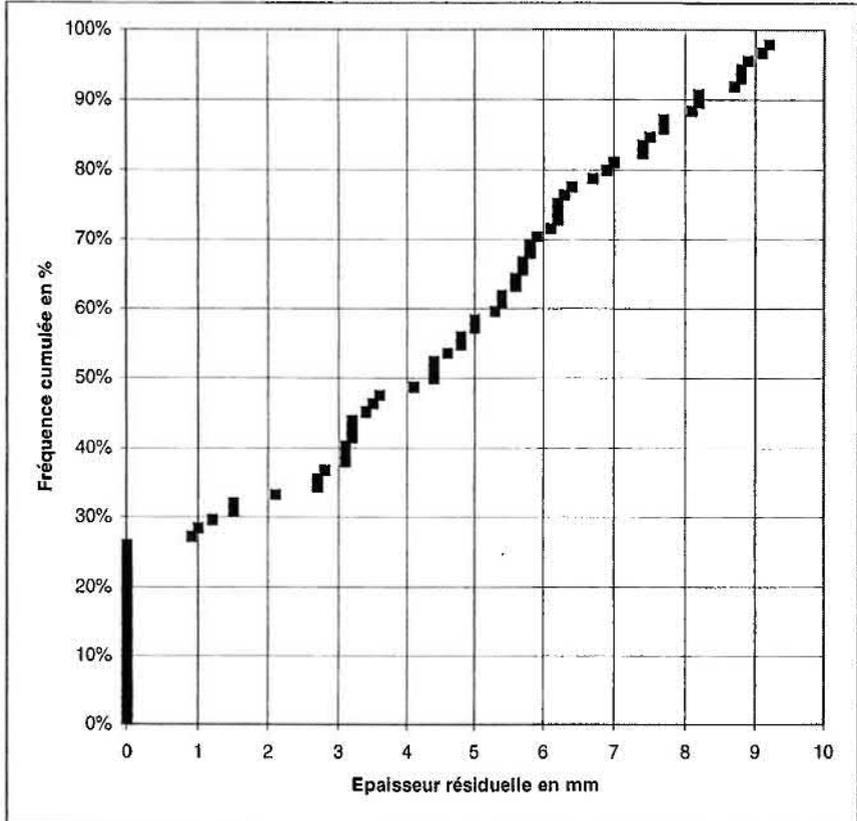


Figure 4.15 : Représentation des épaisseurs résiduelles

La distribution des épaisseurs résiduelles fait apparaître 2 sous-populations :

- les échantillons perforés d'épaisseur nulle représentent 27 %,
- les autres échantillons distribués uniformément.

4.3.1.4 Les durées de vie

Les durées de vie résiduelles ont été calculées en extrapolant linéairement la vitesse totale calculée sur chaque échantillon à l'épaisseur résiduelle.

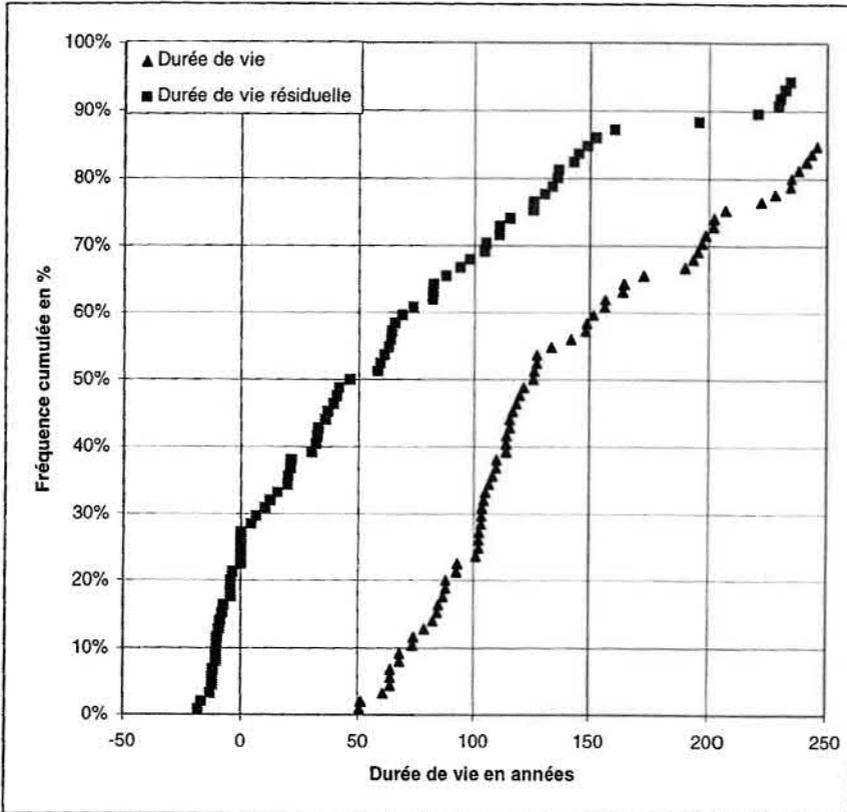


Figure 4.16 : Représentation des durées de vie

La distribution des durées de vie fait apparaître 3 sous-populations :

- celle des échantillons perforés dont la durée de vie résiduelle est négative ou nulle,
- celle des échantillons moyennement corrodés (durée de vie résiduelle < 150 ans)
- celle des échantillons faiblement corrodés (durée de vie résiduelle > 150 ans)

4.3.2 Cinétiques de corrosion

Les profondeurs et les vitesses de corrosion ont été modélisées avec une relation du type a^n . Les résultats des régressions, sur 83 échantillons, donnent les relations :

$$\ln(P_i) = -2,89 + 0,97 \ln(AGE), \quad \text{ce qui entraîne} \quad P_i = 0,055t^{0,97} (r^2 = 0,18)$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	-2.89	1.01	-2.85	0.01
LnAge	0.97	0.23	4.26	0.00

$$\ln(P_e) = -2,43 + 0,73 \ln(AGE), \quad \text{ce qui entraîne} \quad P_e = 0,083t^{0,73} (r^2 = 0,08)$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	-2.43	1.21	-2.00	0.05
LnAge	0.73	0.27	2.68	0.01

$$\ln(P_{éq}) = -1,08 + 0,62 \ln(AGE), \quad \text{ce qui entraîne} \quad P_{éq} = 0,34t^{0,62} (r^2 = 0,16)$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	-1.08	0.70	-1.54	0.13
LnAge	0.62	0.16	3.98	0.00

$$\ln(V_i) = 4 - 0,03 \ln(AGE), \quad \text{ce qui entraîne} \quad V_i = 56t^{-0,03} (r^2 = 0,01)$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	4.00	1.02	3.92	0.00
LnAge	-0.03	0.23	-0.12	0.90

$$\ln(V_e) = 4,46 - 0,26 \ln(AGE), \quad \text{ce qui entraîne} \quad V_e = 88t^{-0,27} (r^2 = 0,01)$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	4.46	1.22	3.66	0.00
LnAge	-0.26	0.27	-0.97	0.34

$$\ln(V_{éq}) = 5,82 - 0,37 \ln(AGE), \quad \text{ce qui entraîne} \quad V_{éq} = 340t^{-0,38} (r^2 = 0,06)$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	5.82	0.70	8.32	0.00
LnAge	-0.38	0.16	-2.39	0.02

P_i , P_e et $P_{éq}$ représentent respectivement les profondeurs interne, externe et équivalente, V_i , V_e et $V_{éq}$ les vitesses interne, externe et équivalente et t le temps.

Les coefficients n calculés pour les profondeurs sont légèrement inférieurs à 1. La profondeur interne évolue presque linéairement avec le temps ; la profondeur externe évolue moins vite ; la profondeur totale, qui conjugue indirectement les profondeurs interne et externe, évolue encore moins vite. Cette décroissance de la vitesse en fonction du temps est conforme à d'autres résultats expérimentaux [THON & TONIGES, 1980] [WOLF & ZIEGLER, 1980].

Les figures 4.17 à 4.22 représentent les valeurs observées et prédites par la régression, d'abord pour les profondeurs, puis pour les vitesses. On observe une grande dispersion des résultats, liée à l'influence de variables d'exploitation (débit et qualité d'eau) et d'environnement (nature de sol) dont nous ne disposons pas.

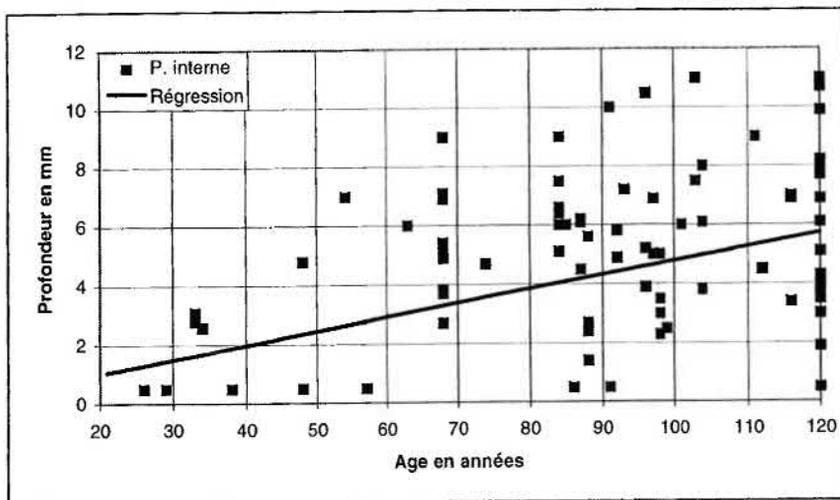


Figure 4.17 : Relation entre la profondeur interne et l'âge

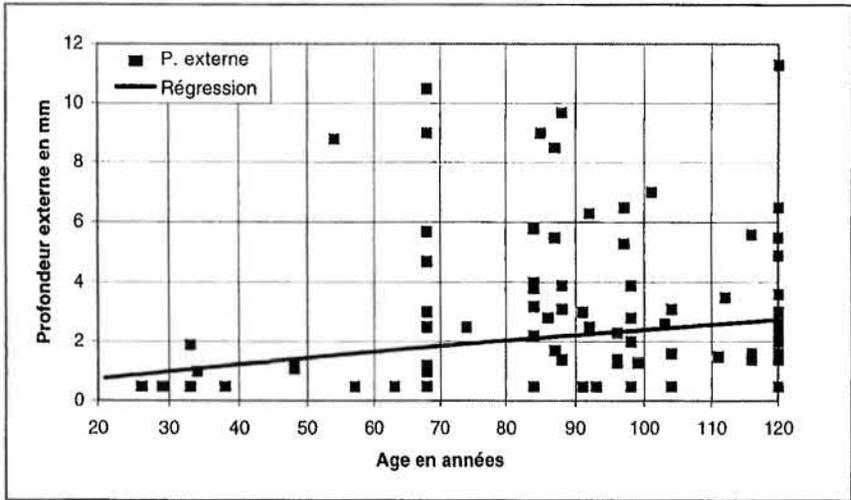


Figure 4.18 : Relation entre la profondeur externe et l'âge

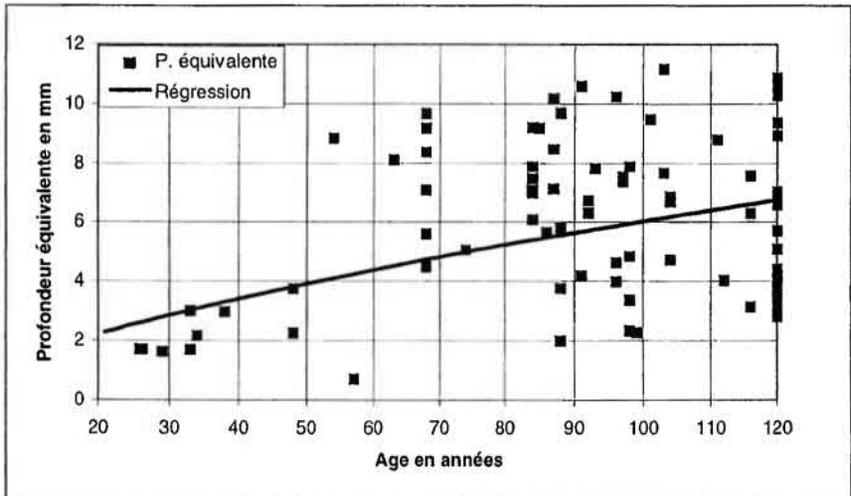


Figure 4.19 : Relation entre la profondeur équivalente et l'âge

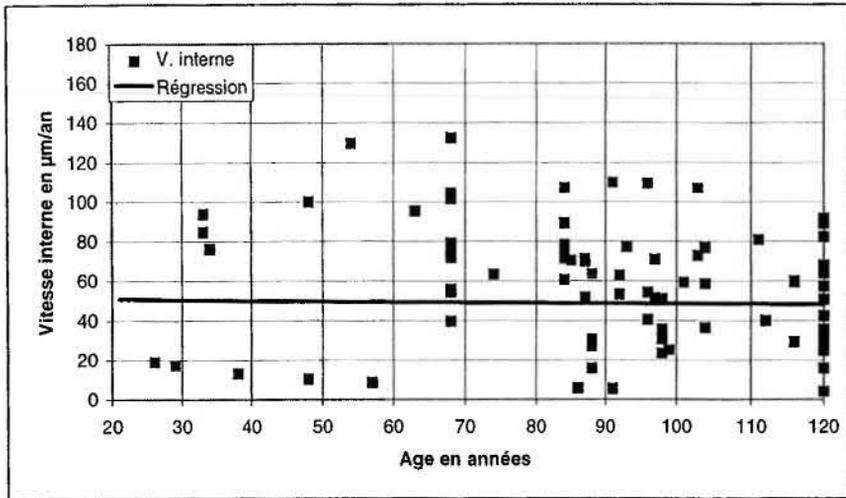


Figure 4.20 : Relation entre la vitesse interne et l'âge

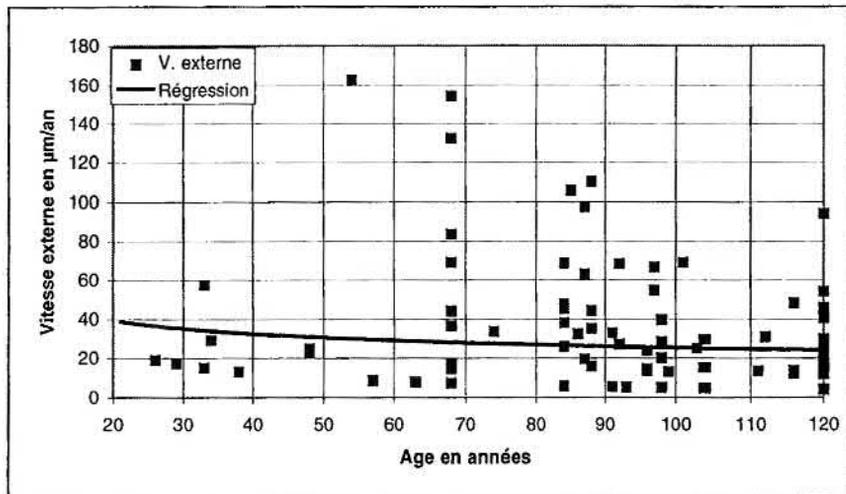


Figure 4.21 : Relation entre la vitesse externe et l'âge

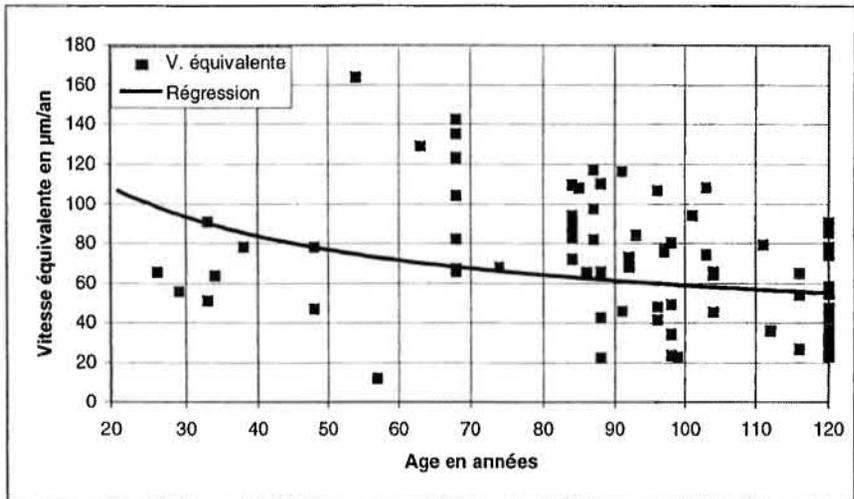


Figure 4.22 : Relation entre la vitesse équivalente et l'âge

4.3.3 Relations avec les caractéristiques d'eau et de sol

4.3.3.1 Analyse de la qualité de l'eau

Les principales caractéristiques de l'eau distribuée dans le réseau CUS sont présentées dans le tableau 4.11 [CUS, 1993].

On note la présence de chlorures qui proviennent du Rhin et plus amont des mines de potasse d'Alsace. Ces sels confèrent à l'eau un caractère corrosif ; l'indice de Larson vaut :

$$IL = \frac{[Cl^-] + 2[SO_4^{2-}]}{[HCO_3^-]} = 0,74$$

L'indice de Larson recommandé pour les réseaux métalliques est inférieur à environ 0,6 [AGHTM, CEOCOR, 1998]. L'équilibre calco-carbonique de l'eau a été calculée par la méthode graphique d'Hallopeau et Dubin. Les résultats montrent que l'eau est proche de l'équilibre ou légèrement entartrante [CUS & SAUR, 1994]. On est donc en présence d'une eau équilibrée, mais légèrement corrosive.

Tableau 4.11 : Analyse de la qualité de l'eau

Paramètres	Concentration maximale autorisée	Mini / Maxi	Moyenne	Unité
Température	25	11,6 / 12,7	11,8	°C
pH	9	7,10 / 7,55	7,35	
Dureté	non limité	23,8 / 28,5	25,8	°F
TA	non limité	0	0	°F
TAC	non limité	17 / 25	20	°F
Chlorures	200	91,4 / 110	101	mg/l
Sulfates	250	31,3 / 41,8	35,3	mg/l
Calcium	non limité	79,6 / 86,8	84	mg/l
Magnésium	50	10,1 / 12,7	11,5	mg/l
Sodium	150	44,2 / 61	53,2	mg/l
Potassium	12	2,5 / 3,7	2,8	mg/l
Nitrates	50	6,2 / 8,1	7,3	mg/l
Résidu sec	1500	414 / 454	423,4	mg/l

4.3.3.2 Mesure de la résistivité du sol

La résistivité a été évaluée par une mesure en cellule, à l'aide d'un résistivimètre UNILAP GEO de marque NORMA (VIENNE - AUTRICHE), selon la norme française A05-250 [NF A05-250, 1990]. La figure 4.23 représente les mesures de résistivité minimale.

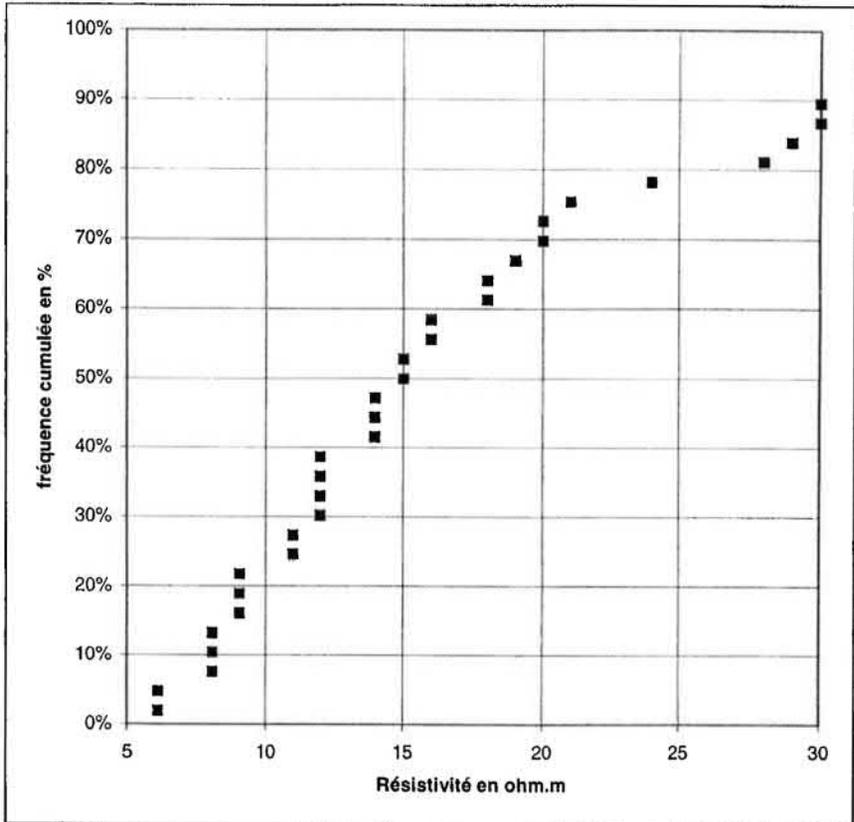


Figure 4.23 : Distribution des mesures de résistivité minimale

Les résistivités minimales sont distribuées entre 6 et 30 ohm.m. Ces valeurs correspondent à des vitesses de corrosion externes maximales comprises entre 30 et 70 $\mu\text{m}/\text{an}$ [STEINRATH, 1965]. Cette plage de vitesses externes de corrosion a effectivement été constatée par les mesures (voir chapitre 4.3.1) ; on remarque cependant que 50 % des valeurs de vitesse externe maximale se situe entre 0 et 30 $\mu\text{m}/\text{an}$. Ces échantillons préservés bénéficient certainement de conditions de sols secs et aérés, pour lesquels la résistivité minimale n'est pas atteinte dans les conditions climatiques normales.

4.3.4 Relations avec les caractéristiques des tronçons d'origine

4.3.4.1 Relation entre l'épaisseur moyenne et l'épaisseur nominale

La figure 4.24 présente pour les fontes GLM la relation entre l'épaisseur nominale et l'épaisseur moyenne mesurée.

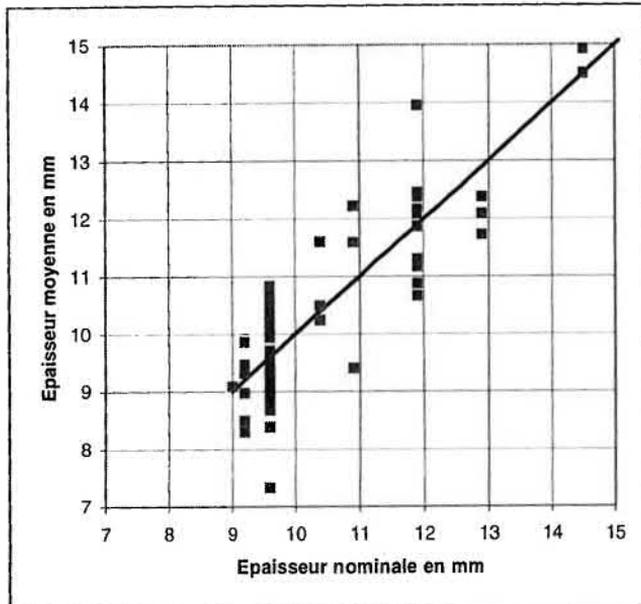


Figure 4.24 : Relation entre les épaisseurs nominales et moyennes des fontes GLM

On observe une dispersion importante des valeurs moyennes autour des valeurs nominales. L'écart s'élève à 1 mm, ce qui représente 10 % en moyenne.

4.3.4.2 Dispersion des mesures d'épaisseur

La figure 4.25 représente l'écart-type des 8 mesures d'épaisseur (voir 2.4.4) en fonction de l'année de pose de la conduite. Le graphique met en évidence la période d'utilisation de la méthode de coulée par centrifugation (après 1938) par opposition avec la méthode de coulée par moulage (avant 1938). La technique de moulage est caractérisée par une hétérogénéité des mesures d'épaisseurs alors que la technique de centrifugation fournit des épaisseurs plus homogènes.

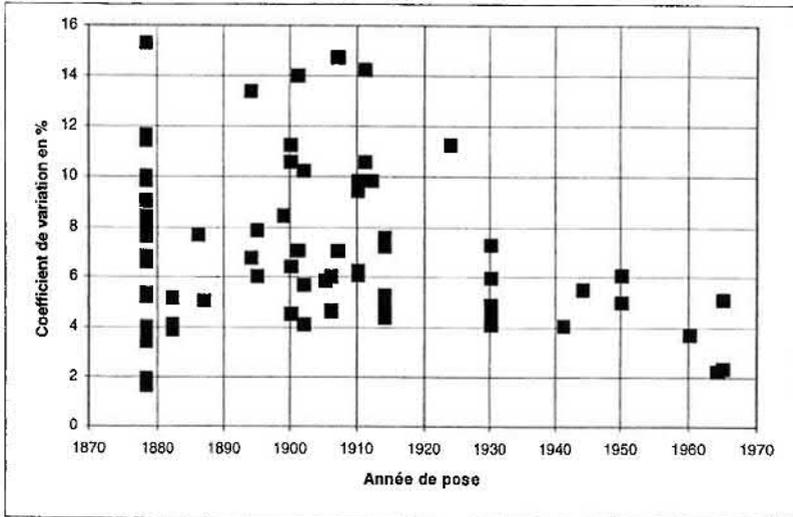


Figure 4.25 : Ecart-type des mesures d'épaisseur en fonction de l'année de pose

4.3.4.3 Relation entre les processus de corrosion et de défaillance

On a croisé les variables de corrosion Epr et $Dvie$ avec les variables de défaillances (ANPOSE, DN, EP, MT, LONG, PHOS, n, Taux, Dsurvie). Les meilleurs résultats obtenus sont :

$$E Pr = 0,76 + 0,024 DN$$

$$(r^2 = 0,35)(n = 83)$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	0.7571	0.5820	1.3009	0.1970
DN	0.0239	0.0036	6.5672	0.0000

et

$$Dvie = 2755 - 1,36 ANPOSE + 0,00026 MT$$

$$(r^2 = 0,36)(n = 83)$$

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
Constante	2755	728	3.7855	0.0003
ANPOSE	-1.3620	0.3812	-3.5726	0.0006
MT	0.0003	0.0001	5.1751	0.0000

Les variables de corrosion sont liées aux variables dimensionnelles et d'âge et peu liées aux variables de défaillance ; par exemple, la relation entre l'épaisseur résiduelle et le taux de défaillances est :

$$\begin{aligned} Taux &= 460 - 106E Pr \\ (r^2 &= 0,03)(n = 83) \end{aligned}$$

La figure 4.26 présente la relation entre durée de vie observée et calculée par régression entre la durée de survie et l'année de pose et le moment d'inertie.

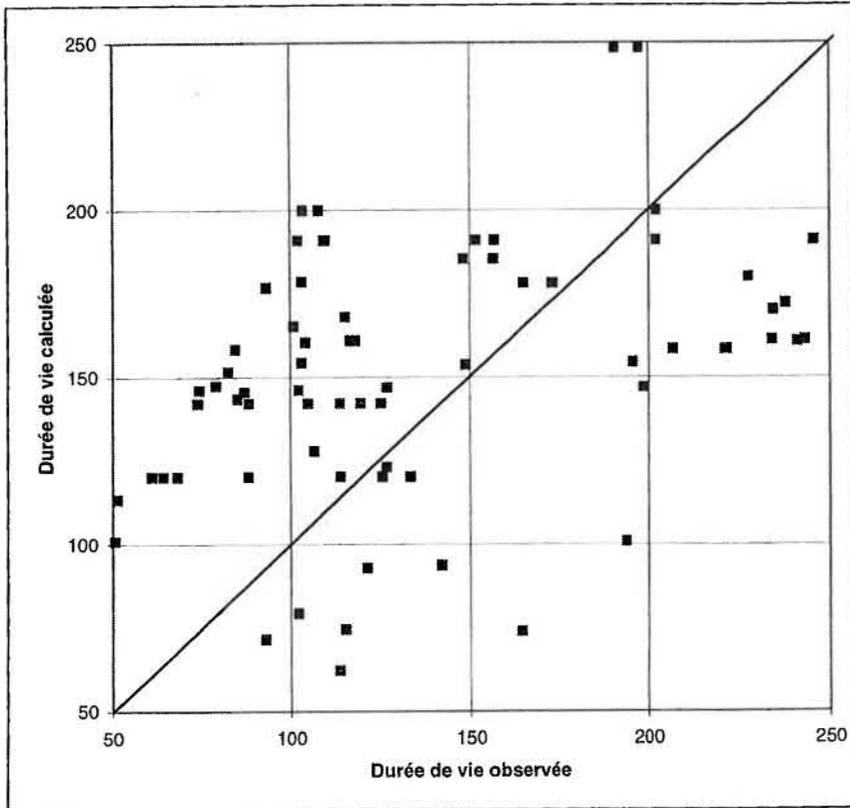


Figure 4.26 : Relation entre durée de vie observée et calculée

Cette relation décrit une tendance intéressante, dont la qualité devra être améliorée par l'utilisation d'autres covariables.

4.3.4.4 Comparaison des échantillons défailants et non défailants

18 échantillons ont été prélevés à la suite d'une défaillance ; la figure 4.27 décrit la comparaison entre l'épaisseur résiduelle de ces échantillons et celle des échantillons prélevés en l'absence de défaillances (échantillons aléatoires).

L'épaisseur résiduelle des échantillons défailants s'écarte de l'épaisseur résiduelle des échantillons aléatoires pour les faibles épaisseurs résiduelles (< 3 mm) ; les échantillons défailants sont caractérisés par ces faibles épaisseurs résiduelles.

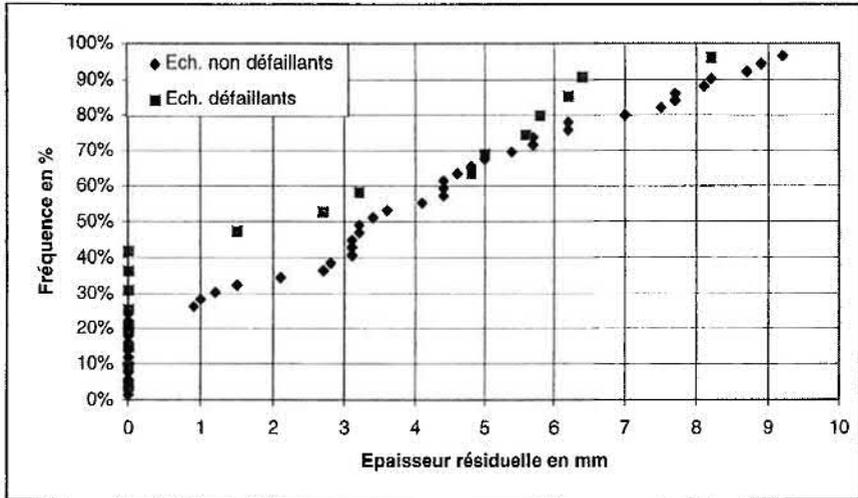


Figure 4.27 : Comparaison de l'épaisseur résiduelle des échantillons

4.3.4.5 Conclusion sur la comparaison des échantillons et des tronçons

La relation entre l'état de corrosion des échantillons et le processus de défaillance des tronçons n'a pas pu être explicitée ; ce constat peut s'expliquer par l'indépendance entre les actions mécaniques sur les conduites et les actions corrosives ; deux cas extrêmes sont possibles : celui d'une conduite complètement corrodée sans défaillance (le résidu de corrosion fait office de bouchon), celui d'une conduite saine au plan de la corrosion mais défailante, parce que soumise à une surcontrainte (coup de bélier par exemple). On remarque cependant que les tendances générales sont intéressantes : la diminution de l'épaisseur résiduelle est en relation avec l'augmentation du taux de défaillances ; l'épaisseur résiduelle des échantillons discrimine partiellement les tronçons défailants des tronçons aléatoires.

4.3.5 Conclusion sur la modélisation physique

Les résultats globaux obtenus par la modélisation de l'état de corrosion apportent plusieurs informations :

- la prédominance de la corrosion interne sur la corrosion externe, qui relate une prédominance de la corrosivité de l'eau sur la corrosivité moyenne des sols,
- la cinétique linéaire de la corrosion interne, qui diffère de la cinétique décroissance de la corrosion par les sols et de la corrosion équivalente,
- la relation partielle entre l'état de corrosion et le processus de défaillance.

Pour un petit nombre d'échantillons, l'action corrosive semble être le facteur limitant qui a produit une défaillance ; la majeure partie des défaillances est la conséquence des actions mécaniques, sans implication majeure de la corrosion.

4.4 CONCLUSION SUR LA MODELISATION

Le processus de défaillance a d'abord été décrit qualitativement au moyen de statistiques descriptives ; il a ensuite été quantifié par des modèles prédictifs (agrégés, régression multiple, risques proportionnels). Ils permettent de classer et de hiérarchiser les tronçons en fonte lamellaire présentant le plus de risque de défaillance. Cette étape constitue le premier stade de la programmation du renouvellement. Dans le chapitre 5, l'utilisation des modèles et l'emploi de seuils critiques en terme de taux de défaillances et de durée de survie a permis d'établir les durées de vie des tronçons en fonte lamellaire et par conséquent les programmes de renouvellement.

5. STRATEGIES DE RENOUVELLEMENT

Elles résultent des équations de modélisation développées dans le chapitre 4 et de seuils de fin de vie fondés sur une analyse technique. On propose 3 critères de fin de vie pour sélectionner les conduites à renouveler :

- le dépassement d'un taux de défaillances critique appliqué à tous les tronçons,
- le dépassement d'une durée de survie critique appliqué aux tronçons GL,
- l'existence d'un état de corrosion critique appliqué aux tronçons GL non revêtus.

Les programmes ont été calculés pour la période de 2000 à 2060 ; ils restent assez sommaires, puisque l'on a fait varier l'âge des tronçons en gardant le nombre de défaillances constant. En réalité, ces deux variables évoluent dans le temps et le calcul devrait prendre en compte les deux variations. D'autre part, nous avons considéré que les conduites actuelles en fonte ductile n'intervenaient pas dans la programmation, alors qu'elles subiront inévitablement le phénomène de vieillissement.

5.1 CRITERE DU TAUX DE DEFAILLANCES A PARTIR DU MODELE AGREGÉ

Les tronçons sont remplacés quand ils atteignent un taux de défaillances critique. On a retenu comme fin de vie le seuil critique du SEDIF en région parisienne, soit 40 déf / 100km.an [ALEXANDRE et al., 1994]. L'équation du taux moyen de défaillance obtenu par régression exponentielle avec l'âge est issue du modèle agrégé calé au chapitre 4.2.1.1. :

$$Taux = 2,53e^{0,0235Age}$$

La relation entre la durée de vie et le taux en découle et s'écrit :

$$40 = 2,53e^{0,0235Dvie}$$

$$Dvie = 42,5Ln \frac{taux}{2,53}$$

Un taux critique de 40 déf / 100km.an donne une durée de vie de 117 ans. La figure 5.1 présente le programme de renouvellement obtenu à partir de ce critère du taux de défaillances. On suppose constant le linéaire total du réseau (pas d'extension ni d'abandon de canalisations).

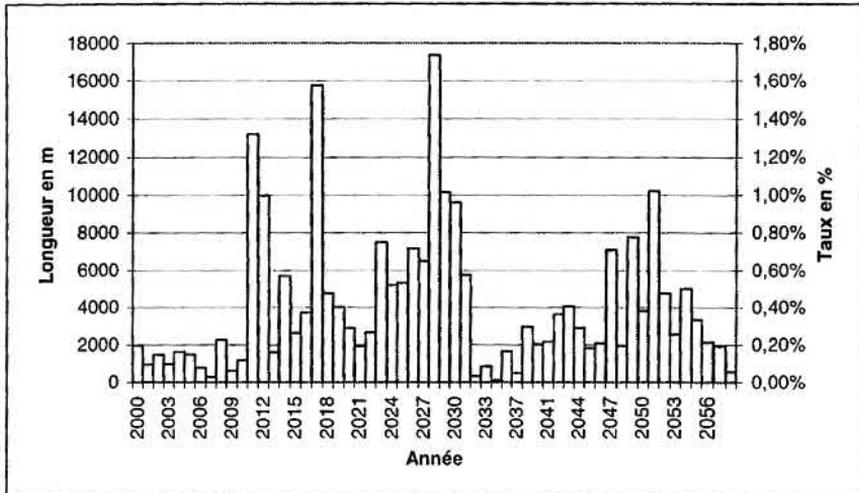


Figure 5.1 : Programme de renouvellement - Modèle agrégé.

Ce programme correspond à une translation de 117 ans de l'histogramme des années de pose. On retrouve les deux premiers pics de croissance du réseau avant la première guerre, puis entre les deux guerres mondiales. Ils correspondent aux fontes moulées.

5.2 CRITERE DE LA DUREE DE SURVIE

Les tronçons sont remplacés quand ils ont atteint le stade de défaillance multiple décrit par ANDREOU [ANDREOU, 1986]. La relation entre durée de survie et nombre de défaillances antérieures fait apparaître l'existence d'un stade à partir duquel la durée de survie ne décroît plus, à partir de la troisième défaillance. On a retenu une durée de survie critique de 1000 jours, c'est à dire qu'on renouvelle les tronçons à partir du moment où leur durée de survie devient inférieure à 1000 jours.

5.2.1 A partir du modèle de régression multiple

L'équation du nombre de défaillances calculé est issu du modèle de régression logarithmique multiple calé au chapitre 4.2.2.3.:

$$D_{survie} = 14913(NDEF + 1)^{-1,11} AGE^{-0,32} LONG^{-0,1} MT^{0,06}$$

L'acceptation d'une durée de vie de 1000 jours donne l'équation :

$$1000 = 14913(Ndé f + 1)^{-1,11} AGE^{-0,32} LONG^{-0,1} MT^{0,06}$$

$$D_{vie} = 4646(Ndé f + 1)^{-3,5} LONG^{-0,31} MT^{0,19}$$

La figure 5.2 présente le programme de renouvellement obtenu par ce calcul.

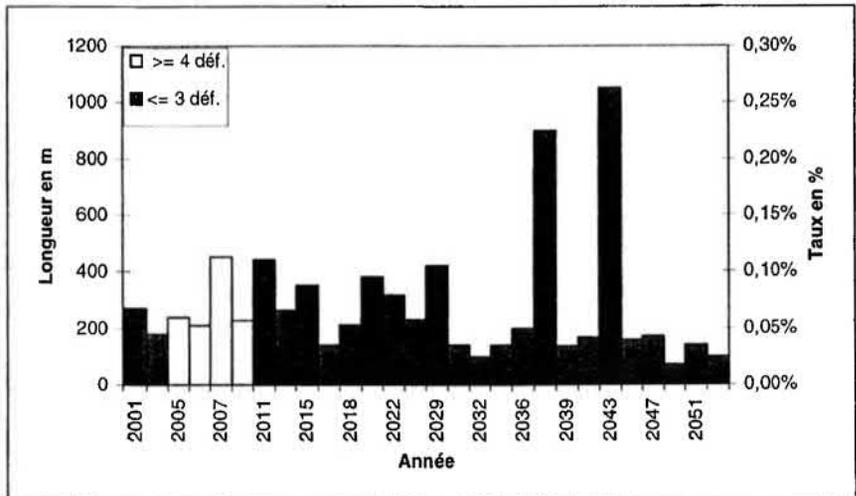


Figure 5.2 : Programme de renouvellement - Modèle de régression multiple.

Les premières conduites à renouveler sont celles ayant subi plus de 4 défaillances, puis celles ayant subi au moins 3 défaillances. Toutes les conduites ayant subi plus de 4 défaillances

ne figurent pas sur le graphique, car une partie affiche une date d'échéance inférieure à l'an 2000 : le critère des 1000 jours impose qu'elles auraient déjà dû être remplacées par le passé. Le taux de renouvellement annuel préconisé, proche de 0,1 %, doit être majoré par la prise en compte de ce culot ce qui porte le taux annuel effectif à 0,5 %.

5.2.2 A partir du modèle des risques proportionnels

L'équation de la fonction de survie obtenue dans le modèle des risques proportionnels est issue du calcul du chapitre 4.2.3.2. :

$$S(t) = e^{(-0.00014(NDEF + 1)^{0.8} AGE^{0.7} LONG^{0.34} MT^{-0.26} t^{0.85})}$$

L'acceptation d'une durée de vie médiane de 1000 jours donne l'équation :

$$0,5 = e^{(-0.00014(NDEF + 1)^{0.8} AGE^{0.7} LONG^{0.34} MT^{-0.26} 1000^{0.85})}$$

$$Dvie = 43,16(NDEF + 1)^{-1.14} LONG^{-0.49} MT^{0.37}$$

La figure 5.3 présente le programme de renouvellement obtenu par ce calcul.

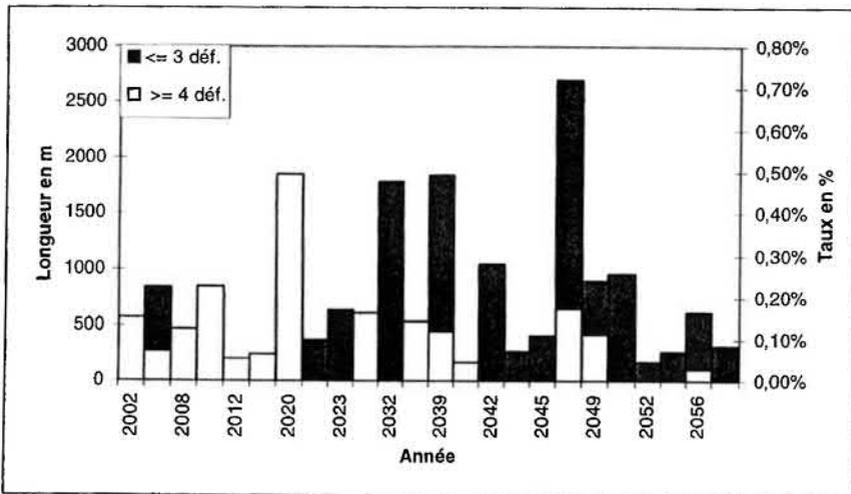


Figure 5.3 : Programme de renouvellement - Modèle des risques proportionnels.

On retrouve le même classement des conduites qu'avec le modèle de régression multiple : d'abord les conduites ayant subi plus de 4 défaillances puis celles ayant subi au moins 3 défaillances.

Les deux modèles fournissent des résultats proches, dont les échéances de renouvellement sont très dispersées. Les taux moyens de renouvellement se situent à seulement 0,1 %, très faible valeur. Cependant, ces deux méthodes ciblent précisément les quelques conduites concernées de manière critique par le processus de défaillance ; c'est en cela qu'elles fournissent un diagnostic utile au gestionnaire du réseau. Si ce dernier veut augmenter le volume annuel de renouvellement, il lui suffit de majorer le seuil critique de durée de survie.

5.3 CRITERE PHYSIQUE DE CORROSION PERFORANTE

On a retenu pour le calcul de la durée de vie physique une corrosion de la totalité de l'épaisseur de la conduite. L'équation de la profondeur équivalente de corrosion est issue du modèle de régression avec une fonction puissance du temps, calculé au chapitre 4.3.1.4. :

$$Pé q= 0,34t^{0,62}$$

La relation entre la durée de vie physique et l'épaisseur s'écrit :

$$EP = 0,34Dvie^{0,62}$$

$$Dvie = 5,74EP^{1,62}$$

La figure 5.4 présente le programme de renouvellement obtenu obtenu par ce calcul.

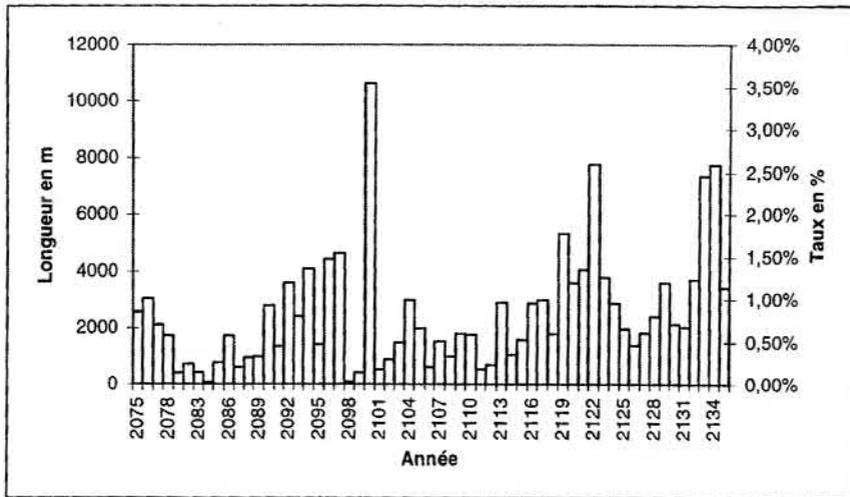


Figure 5.4 : Programme de renouvellement - Critère physique de corrosion perforante.

Le programme de renouvellement ne débute qu'en 2075 avec un taux moyen de 0,8 % ; le processus de corrosion est en retard par rapport au processus de défaillance (cf. 5.4). Ce programme de renouvellement est optimiste, car fondé sur l'hypothèse de la corrosion de l'intégralité de l'épaisseur. En choisissant une durée de vie à 70 % de corrosion de l'épaisseur, on obtient un programme analogue, mais qui débute en l'an 2000.

5.4 COMPARAISON DES DUREES DE VIE DES MODELES STATISTIQUE, PROBABILISTE ET PHYSIQUE

Les durées de vie calculées à partir des 3 principaux modèles présentés dans ce chapitre (régression multiple logarithmique sur les durées de survie, risques proportionnels, cinétique de corrosion) ont été comparées. Les figures 5.5 et 5.6 (zoom) comparent les durées de vie.

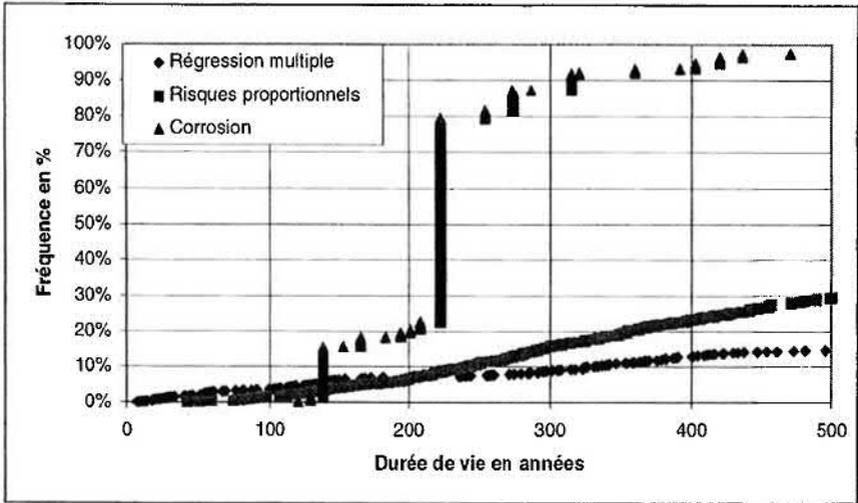


Figure 5.5 : Comparaison des durées de vie (modèles statistique, probabiliste et physique)

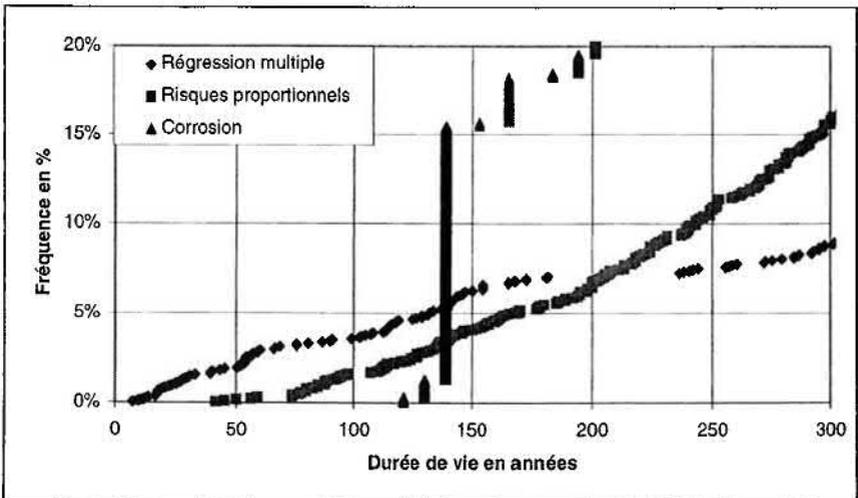


Figure 5.6 : Comparaison des durées de vie (modèles statistique, probabiliste et physique)

Les plages de durée de vie calculées par les deux modèles statistiques sont très larges et assez proches ; il importe surtout de prendre en compte les tronçons les plus à risque, donc les durées de vie pour les cinquante prochaines années. Le modèle physique calcule des durées de vie stratifiées suivant l'épaisseur des conduites ; dans un premier temps, la corrosion est en retard par rapport au processus de défaillance, puis elle se manifeste rapidement et devient prépondérante sur ce processus. Pour optimiser le renouvellement, il faut classer par ordre de priorité les conduites dont la durée de vie est minimale. La figure 5.5 montre que le premier facteur limitant est le processus de défaillance, modélisé en régression multiple (pour 5 % des conduites), puis le facteur limitant devient le processus de corrosion.

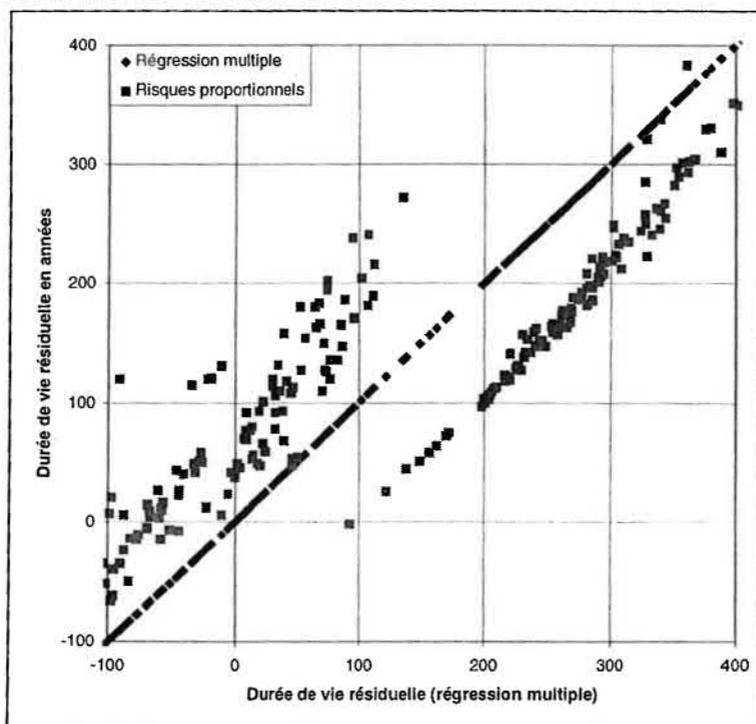


Figure 5.7 : Comparaison des durées de vie résiduelles (modèles régressif et probabiliste)

La figure 5.7 montre que les durées de vie issus des deux modèles statistiques sont proches : le modèle de régression multiple sous-estime d'abord les durées de vie par rapport au modèle des risques proportionnels, puis il les sur-estime.

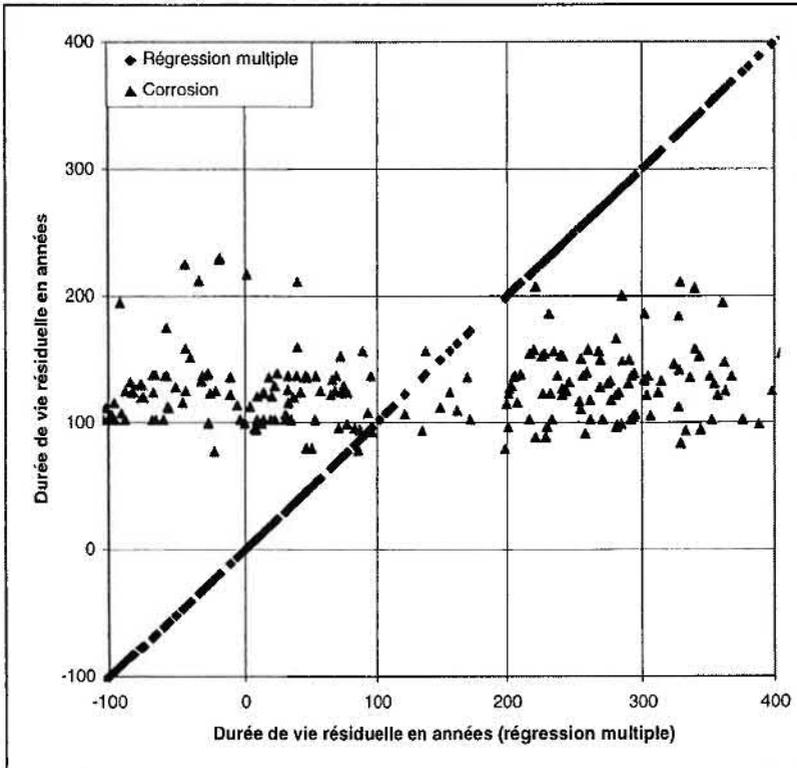


Figure 5.8 : Comparaison des durées de vie résiduelles (modèles régressif et de corrosion)

La figure 5.8 montre que le processus de défaillance (mis en évidence par le modèle de régression multiple) est le premier facteur limitant et que le processus de corrosion le devient ensuite. Si on respecte ce classement hiérarchique, on obtient un programme de renouvellement

optimal qui prend d'abord en compte le processus de défaillance, puis le processus de corrosion (cf. figure 5.9).

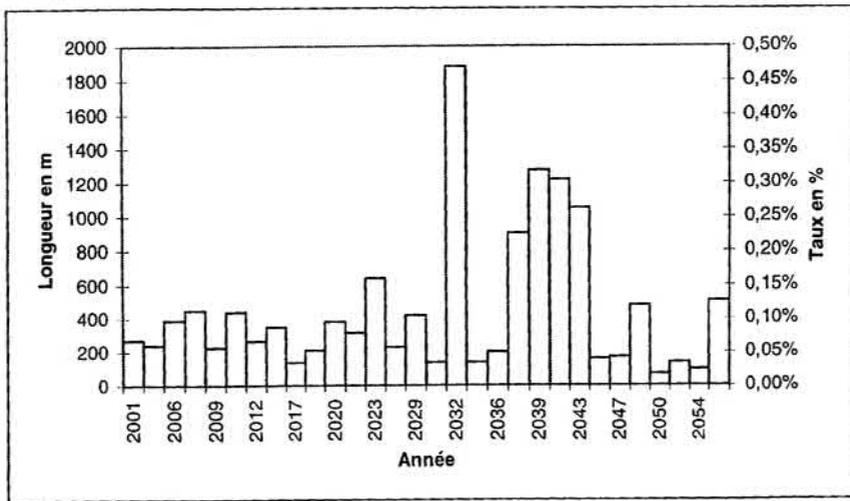


Figure 5.9 : Programme optimal - Durée de vie minimale parmi les 3 modèles

5.5 CONCLUSION SUR LES STRATEGIES DE RENOUVELLEMENT

Les programmes de renouvellement diffèrent assez largement suivant le critère de durée de vie retenu et suivant le choix du seuil critique. Deux types de programmes de renouvellement apparaissent : ceux où priment les catégories existantes de conduites et ceux où une analyse multiple crée de nouvelles catégories de conduites à risque. Le critère du taux de défaillances à partir du modèle agrégé et le critère de corrosion perforante se rangent dans la première catégorie ; ils mettent en évidence les conduites d'avant 1914, puis celles d'entre les deux guerres, d'une part, les conduites moulées et les conduites centrifugées d'autre part. Le critère de la durée de survie correspond à la deuxième catégorie ; il est plus pertinent car le risque est calculé à partir d'une équation de régression multiple. Les variables significatives sont respectivement le nombre de défaillances antérieures de l'individu, l'âge, la dimension (diamètre, épaisseur ou moment d'inertie), puis la longueur. Les programmes présentent l'avantage d'assurer des volumes annuels relativement réguliers, ce qui est appréciable d'un point de vue budgétaire.

CONCLUSION GENERALE

Bilan

L'analyse comparative du processus de vieillissement du réseau d'eau potable de Strasbourg par les modèles statistiques, probabilistes et physiques a permis un apport mutuel dans la construction des méthodes : par exemple, la classification métallurgique des conduites a été réalisée de façon très précise ; l'utilisation des variables d'épaisseur et de moment d'inertie a enrichi la modélisation statistique. Le calcul des durées de vie a été établi d'un point de vue spécifiquement technique, aspect novateur tant les approches technico-économiques occupent une large part dans la littérature. Les modèles obtenus constituent des résultats amonts et pourront alimenter les études technico-économiques d'optimisation.

L'apparition des défaillances sur le réseau est expliqué par les variables de nombre de défaillances antérieures, d'âge, de dimension, et de longueur des conduites. Le nombre de défaillances antérieures agglomère la majeure partie de l'information contenue dans les autres variables et il apporte une information supplémentaire : le risque de défaillance augmente avec le nombre de défaillances antérieures. La prise en compte de ces variables permet de prévoir les défaillances futures avec une qualité qui est celle obtenue par la modélisation. Il s'agit d'une qualité acceptable pour les taux moyens de défaillance ($r^2 > 0,50$) et d'une qualité moyenne pour les taux exprimés sur l'ensemble des tronçons ou individus ($r^2 < 0,30$). Néanmoins, les tendances exprimées par les modèles globaux sont significatives ; elles définissent des taux de renouvellement de manière pertinente. L'incertitude qui subsiste concerne le calcul individuel des durées de vie des tronçons. Les régressions obtenues sur les tronçons, en particulier, sont sujettes à caution, car elles désignent des tronçons non défaillants comme étant à risque. Ce constat est possible, mais il faut le corriger en laissant une chance à ces conduites et ne pas les renouveler trop rapidement (la qualité des modèles ne permet pas d'être impératif). Par contre, les résultats obtenus avec les durées de survie sont plus fiables en particulier grâce au poids du nombre de défaillances antérieures.

Les durées de vie des tronçons ont été calculées à partir des modèles prédictifs et des cinétiques de corrosion. Pour chaque modèle, le volume annuel de renouvellement est ajustable en fonction du seuil critique retenu (taux de défaillances, durée de survie, épaisseur résiduelle).

Le principal avantage de ces méthodes globales est qu'elles s'appliquent à l'ensemble ou à des sous-ensembles du réseau (fonte GL, fonte GL non revêtue).

Perspectives

Les enrichissements mutuels entre le travail de laboratoire et les attentes des partenaires industriels et du gestionnaire du réseau CUS ont orienté le travail vers des approches pragmatiques. Le gestionnaire du réseau a été sensibilisé à l'utilité de collecter et de valoriser ses données. Il dispose maintenant d'une méthode flexible qui lui permet d'aborder sereinement la problématique du renouvellement. La transposition des modèles statistiques, probabilistes et physiques à d'autres matériaux et d'autres sites constitue la prochaine étape de ce travail de recherche.

Sur le réseau strasbourgeois, une étape supplémentaire de la programmation des besoins de renouvellement consisterait à programmer les durées de vie des individus avec une variation simultanée de l'âge et du nombre de défaillances antérieures de l'individu.

L'acquisition de nouveaux échantillons permettra d'améliorer la qualité des modèles physiques, en complétant la relation cinétique avec des covariables (dimension, métallurgie). La gestion des tronçons et des échantillons à l'aide d'un système d'information géographique permettra de prendre en compte les facteurs qui présentent une continuité spatiale (sols, nappe phréatique).

BIBLIOGRAPHIE

Modélisation statistique de l'apparition des défaillances

- ALEXANDRE O., WEREY C., ELNABOULSI J., 1994.** Optimisation des échéances de renouvellement, Colloque sur le renouvellement des réseaux d'eau potable, AGHTM, POLLUTEC 94, oct 1994, 87-102
- ANDREOU S. A., MARKS D. H., CLARK R. M., 1987.** A new methodology for modelling break failure patterns in deteriorating water distribution systems : Theory and applications, Advanced Water Resources, Volume 10, mars 1987, 2-10 et 11-20
- ANDREOU S.A., 1986.** Predictive models for pipes breaks failures and their implications on maintenance strategies for deteriorating water distribution systems. Thesis report : civil engineering. Massachusetts Institute of Technology. CAMBRIDGE, Massachusetts - USA.
- ARNOUX P., KUGLER J., LAPIERRE J., BENADE M., 1994.** Analyse prédictive en vue du renouvellement d'un réseau d'eau potable, Colloque sur le renouvellement des réseaux d'eau potable, AGHTM, POLLUTEC 94, oct 1994, 9-24
- BAUR R., 1997.** Forecasting rehabilitation needs of water mains with KANEW, 10th EUROPEAN JUNIOR SCIENTIST WORKSHOP, TRONDHEIM, NORWAY, mai 1997
Deterioration of the built environment : buildings, roads and water systems, 84-99
- BREMOND B., EISENBEIS P., COMMENGES D., 1992.** Outil de prévision des défaillances des conduites d'eau potable, Aide à la programmation du renouvellement, TSM, oct 1992
- CLARK R.M., STAFFORD C.L., GOODRICH J.A., 1982.** Water distribution systems : a spacial and cost evaluation, Journal of Water Resources Planing and Management, ASCE, Volume 108, n°3, 243-256
- DABOVAL F., 1998.** Etude descriptive et prédictive des défaillances sur le réseau d'eau potable de la Communauté Urbaine de Strasbourg ; Maîtrise d'Ingénierie Mathématique, Université Louis Pasteur. ENGEES, Laboratoire Réseaux d'Eau Potable.
- EISENBEIS P., 1994.** Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable. Thèse : génie de l'environnement. Université Louis Pasteur - STRASBOURG I. 248 p
- HERZ R.K., 1996.** Ageing processes and rehabilitation needs of drinking water distribution networks, J Water SRT, Aqua Vol. 45, n°5, 221-231
- O'DAY D.K., 1982.** Organizing and analyzing leak and break data for making main replacement decisions, Journal AWWA, Research and Technology, nov 1982, 589-594

PONT A MOUSSON S.A., 1989. Modélisation du comportement des réseaux d'eau dans le temps, mars 1989, 28p.

SAS, 1990. SAS/STAT User's Guide
Vol 1 and 2, Version 6, Four Edition (1990)
SAS Institute Inc., SAS campus Drive, Cary, NC 27513 USA

SHAMIR U., HOWARD C. D., 1979. An analytic approach to scheduling pipe replacement
Journal AWWA, Management and Operations, mai 1979, Volume 10, n° 3, 2-10

Modélisation de l'état de corrosion des conduites en fonte

CEOCOR, 1998. Groupe de travail de CEOCOR - Secteur B, Interactions Eaux-Matériaux à base de ciment, 78ième congrès AGHTM, DIJON, 11-14 mai 98, Séance Corrosion, 287-302

DEMPSEY P., MANOOK B. A., 1986. Assessing the Condition of Cast Iron Pipes
WRC Source Document for Water Mains Rehabilitation, Water Research Center - Manual n°9, déc 1986

DIN 50 929 - Teil 3, 1985. Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äusserer Korrosionsbelastung - Rohrleitungen und Bauteile in Böden und Wässern, DIN sep 1985

GUILMIN A., 1997. Etude de la corrosion et de la dégradation des canalisations d'eau potable de la Communauté Urbaine de STRASBOURG. Projet de fin d'études, ENSAIS - LMCM, Génie Mécanique, Option : Matériaux et Procédés.

KOWAKA M., 1994. Introduction to life prediction of industrial plant materials. Application of the Extreme Value Statistical Method for Corrosion Analysis, ALLERTON Press, sep 1994

LANGENFELD M. & NOUAIL G., 1998. Méthodes d'examen et d'évaluation d'échantillons de tuyaux en fonte dans le cadre du diagnostic de réseaux en service, 78ième congrès AGHTM, DIJON, 11-14 mai 98, Séance Corrosion, 321-335

LE BAGOUSSE A., 1996. Etude de la corrosion et de la dégradation des canalisations d'eau en fonte. Projet de fin d'études, ENSAIS-LMCM, Génie Mécanique, Option : Matériaux et Procédés.

LEGRAND L., LEROY P., 1995. Prévention de la corrosion et de l'entartrage dans les réseaux de distribution d'eau, CIFEC, déc 1995.

LESOULT G., BELLOCCI R., GRANDPIERRE M., 1984. Les fontes à PONT A MOUSSON, Conférence du 18/09/84, Centre de Recherches de PONT A MOUSSON

NF A05-250, 1990. Corrosion par les sols, Evaluation de la corrosivité

Canalisations enterrées en matériaux ferreux non ou peu alliés, AFNOR, mars 1990

PONT A MOUSSON S.A., 1986. Canalisations en fonte ductile. COMPENDIUM, 271 p

STEINRATH H., 1965. Über die Beurteilung der Korrosiongefährdung von Eisen und Stahl im Erdboden, De l'évaluation des dangers de corrosion du fer et de l'acier dans les sols naturels, Das Gas- und Wasserfach, 106 Jahrgang, H. 49 (Gas), 1361-1365

THON J., TONIGES W., 1980. Untersuchung des Korrosionszustandes eines über 500 m langen Leitungabschnittes aus duktilen Gussrohren, Examen de la corrosion d'une section de conduite de plus de 500 m, constituée d'un tube en fonte ductile.
3R International, 19. Jahrgang, Heft 1/2, janvier-février 1980, 62-72

WOLF W., ZIEGLER M., 1980. Anmerkungen zum Aufsatz von J. Thon und W. Töniges « Untersuchung des Korrosionszustandes eines über 500 m langen Leitungabschnittes aus duktilen Gussrohren » Remarques sur l'article de J. Thon et W. Töniges : « Examen de la corrosion d'une section de conduite de plus de 500 m, constituée d'un tube en fonte ductile »
3R International, 19. Jahrgang, Heft 1/2, janvier-février 1980, 72-75

Stratégies de renouvellement et divers

AGHTM, 1993. Etude sur le renouvellement des réseaux d'eau potable, TSM n°11 bis, nov93

AINSWORTH, 1985. The Deterioration of Water Mains and Planning their Rehabilitation, Aqua n°5, 1985, 243-246

ARNOUX P., Drinking water network deterioration and renewal : the case of Strasbourg, 10th EUROPEAN JUNIOR SCIENTIST WORKSHOP, TRONDHEIM, NORWAY, mai 1997
Deterioration of the built environment : buildings, roads and water systems, 84-99

CUS & SAUR, 1994. Communauté Urbaine de Strasbourg, Service de l'Eau, SAUR
Etude du renouvellement du réseau d'eau potable, mai 1994, 115 p

CUS, 1993. L'eau, de la source au robinet

DVGW, 1997. Entscheidungshilfen für die Rehabilitation von Wasserrohrnetzen, Technische Mitteilung, (aides à la décision pour la réhabilitation des réseaux d'eau potable, communication technique), Hinweis W401, mars 1997

EJSW, 1997. Discussion Workshop, 10th EUROPEAN JUNIOR SCIENTIST WORKSHOP, TRONDHEIM, NORWAY, mai 1997, Deterioration of the built environment : buildings, roads and water systems, 150-162

GAMET C., 1997. Elaboration d'un plan de renouvellement des conduites d'eau potable dans trois quartiers de la Communauté Urbaine de Strasbourg. Mastère Eau Potable et Assainissement, ENGEES, Laboratoire Réseaux d'Eau Potable.

HOUILLON D., 1995. Caractérisation de la qualité du service des réseaux anciens d'eau potable en vue de leur renouvellement. Thèse : génie de l'environnement. Université Louis Pasteur - STRASBOURG I., 151 p.

KARAA F. A., 1984. A decision support model for the investment planning of the reconstruction and rehabilitation of mature water distribution systems. Thesis report : civil engineering. Massachusetts Institute of Technology. CAMBRIDGE, Massachusetts - USA.

MALANDAIN J., LE GAUFFRE P., 1997. Deterioration of the built environment : analyse the phenomena through a logic of maintenance, 10th EUROPEAN JUNIOR SCIENTIST WORKSHOP, TRONDHEIM, NORWAY, mai 1997, Deterioration of the built environment : buildings, roads and water systems, 134-148

O'DAY D.K. et al., 1987. Water Main Evaluation for Rehabilitation / Replacement, AWWA Research Fondation, 6666 West Quincy Avenue, DENVER, Colorado 80235, 182 p

PALOIS F., 1998. Le vieillissement des canalisations d'eau potable, prévision statistique des défaillances ; pistes pour l'évaluation de l'état des conduites. Mémoire de troisième année ENGEES. Cemagref, Division Ouvrages et Réseaux Hydrauliques.