



HAL
open science

Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable

P. Eisenbeis

► **To cite this version:**

P. Eisenbeis. Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable. Cemagref Editions, pp.248, 1995, Coll. Etudes du Cemagref, série Equipements pour l'eau et l'environnement, n°17, 2-85362-401-3. hal-02581933

HAL Id: hal-02581933

<https://hal.inrae.fr/hal-02581933>

Submitted on 21 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PUB 00012356

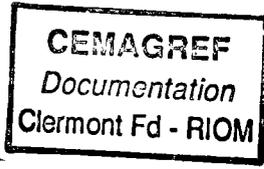
n°17



**Modélisation statistique
de la prévision des défaillances sur
les conduites d'eau potable**

Patrick Eisenbeis





Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable

P. Eisenbeis



**CENTRE NATIONAL
DU MACHINISME AGRICOLE
DU GÉNIE RURAL
DES EAUX ET DES FORÊTS**

GROUPEMENT DE BORDEAUX
50, avenue de Verdun Gazinet
BP 3 33610 Cestas Principal
Tél. : 56 36 09 40 • Téléc : 540 003 F
Télécopie : 56 36 75 11

THÈSE DE DOCTORAT

Présentée à
l'Université Louis Pasteur, Strasbourg I

Spécialité : Génie de l'Environnement

par Patrick Eisenbeis

Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable

Soutenue le 2 mai 1994,
à l'ENGEES devant le jury suivant :

| | |
|----------------------|------------------------------------|
| Président | André Colson |
| Rapporteur interne | François Laisney |
| Rapporteurs externes | Raimund Herz Paul Morel |
| Directeur de thèse | Henri Reitzer |
| Membres invités | Bernard Brémond Daniel Loudière |

Avec la participation de La Lyonnaise des Eaux et de Pont-à-Mousson SA

Les Études du Cemagref

Cette collection édite des travaux scientifiques du Cemagref, thèses, comptes rendus de recherches regroupés en quatre séries qui correspondent aux quatre nouveaux départements scientifiques du Cemagref :

- **Gestion des milieux aquatiques** (anc. série *Ressources en eau*),
- **Équipements pour l'eau et l'environnement** (anc. séries *Hydraulique agricole*, *Gestion des services publics*, *Montagne*),
- **Gestion des territoires** (anc. séries *Forêt*, *Montagne*, *Production et économie agricoles*),
- **Équipements agricoles et alimentaires** (anc. série *Équipement des IAA*).

Ces séries font suite aux publications ventilées en sept rubriques jusqu'à fin 1993.

■ Série Équipements pour l'eau et l'environnement

N°14 - *Modélisation, analyse et commande optimale LQR d'un canal d'irrigation* - 1994, 220 p. - 210 F.

N°15 - *Étude de la formation d'un lit torrentiel* - 1994, 538 p. - 380 F.

N°16 - *Instrumentation d'un site avalancheux* - 1995, 220 p. - 210 F.

Études déjà parues :

Hydraulique agricole (anc. série)

N°3 - *Secteurs de référence drainage. Recueil des expérimentations* - 1988, classeur 20x26, 92 fiches - 150 F.

N°4 - *Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : débits de pointe et modèle SIDRA* - 1989, 334 p. - 250 F.

N°5 - *Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement* - 1989, 322 p. - 250 F.

N°6 - *Réseaux collectifs d'irrigation ramifiés sous pression. Calcul et fonctionnement* - 1989, 140 p. - 150 F.

N°7 - *Géologie des barrages et des retenues de petites dimensions* - 1992, 144 p. - 200 F.

N°8 - *Estimation de l'évapotranspiration par télédétection. Application au contrôle de l'irrigation* - 1990, 248 p. - 250 F.

N°9 - *Hydraulique à l'interface sol/drain* - 1991, 336 p. - 250 F.

N°10 - *Le fonctionnement du drainage : approche pédo-hydraulique* - 1991, 248 p. - 200 F.

N°11 - *Mise en valeur des sols difficiles. Drainage et après-drainage des argiles vertes* - 1991, 140 p. - 150 F.

N°12 - *Colmatage des drains et enrobages : état des connaissances et perspectives* - 1991, 152 p. - 200 F.

N°13 - *Guide pour le diagnostic rapide des barrages anciens* - 1992, 100 p. - 150 F.

Gestion des services publics (anc. série)

N°1 - *Économie et organisation à l'échelle départementale du financement du renouvellement des réseaux d'eau potable* - 1991, 76 p. - 150 F.

Montagne (anc. série)

N°1 - *Éléments d'hydraulique torrentielle* - 1991, 280 p. - 300 F.

N°5 - *Rhéologie des boues et laves torrentielles - Étude de dispersions et suspensions concentrées* - 1993, 416 p. - 400 F.

A commander au Cemagref - Dlcova,
BP 22, 92162 ANTONY Cedex - Tél. (1) 40 96 61 32 - Télécopie (1) 40 96 61 64
joindre votre paiement à la commande

Le Cemagref est un établissement public de recherche sous la tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, et du ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

Ses équipes conçoivent des méthodes et des outils pour l'action publique en faveur de l'agriculture et de l'environnement. Leur maîtrise des sciences et techniques de l'ingénieur contribue à la mutation des activités liées à l'agriculture, à l'agro-alimentaire et à l'environnement.

La recherche du Cemagref concerne les **eaux continentales**, ainsi que les **milieux terrestres et l'agriculture**.

Elle permet d'élaborer des méthodes et des outils de **gestion intégrée** des milieux, de conception et d'exploitation d'**équipements**.

Les équipes qui rassemblent un millier de personnes réparties sur le territoire national, sont organisées en **quatre départements scientifiques** :

- **Gestion des milieux aquatiques**
- **Équipements pour l'eau et l'environnement**
- **Gestion des territoires**
- **Équipements agricoles et alimentaires**

En ce qui concerne le département *Équipements pour l'eau et l'environnement*, les programmes de recherche portent principalement sur :

- l'optimisation des équipements et aménagements hydro-agricoles ;
- le développement de méthodes de surveillance et de prévention, et d'ouvrages de protection pour les risques liés aux avalanches, à l'érosion des terres, aux ruptures de barrages ;
- la gestion des services publics : optimisation des réseaux d'eau potable et des installations de déchets municipaux.



Résumé

L'âge et surtout l'état actuel de certains réseaux d'eau potable laissent présager dans un proche avenir une nette augmentation des défaillances et risquent d'engendrer un surcoût économique lié à la nécessité de renouveler les conduites dégradées. Il convient dès à présent de mieux connaître le vieillissement des canalisations.

L'objectif de cette étude est d'élaborer un modèle de prévision des défaillances des conduites d'eau potable, critère prépondérant dans le choix des conduites à renouveler, en fonction de facteurs environnementaux propres à la conduite.

Des données provenant de services urbains et ruraux possédant des longs historiques de maintenance ont été utilisées. La durée de ces historiques est respectivement de 40, 53 et 17 ans, pour un linéaire total d'environ 700 Km. La spécificité de ces données a conduit à l'utilisation d'analyses statistiques particulières appelées analyse des données de survie.

Ce sont les modèles de Cox (semi paramétrique) et de Weibull (paramétrique) qui ont permis de bien caractériser l'apparition des défaillances des conduites d'eau potable. On a pu montrer que le facteur "nombre de défaillances déjà subies par la conduite" était prépondérant. Les autres facteurs significatifs sont le diamètre, puis le sol, l'année de pose (différenciation fonte ductile-fonte grise) et le facteur croisé trafic-chaussée. La comparaison de l'espérance du nombre de défaillances par rapport au nombre de défaillances réellement arrivées a permis de mettre en évidence un facteur propre à la conduite représentant sa disposition à un vieillissement accéléré.

Afin de pouvoir utiliser ce type de modèle dans un service ayant un historique de maintenance de durée faible, une méthode d'apprentissage a été proposée. Elle permet d'utiliser les résultats d'un modèle général pour créer un échantillon fictif de casses sur le service pour la période inconnue. Cet échantillon est alors rattaché aux défaillances connues pour créer un modèle propre au service.

Il est important que les services se dotent de bases de données informatisées répertoriant les conduites et leurs caractéristiques ainsi que les défaillances pour mettre en oeuvre efficacement ce modèle. On pourra alors mieux estimer la dégradation du réseau et, en relation avec une étude économique, il sera possible de prévoir à moyen ou long terme les dépenses futures en matière de renouvellement et d'entretien.

Mots clés : Réseau d'eau potable, canalisations, défaillances, fuites, analyse statistique, modèle probabiliste, prévision, renouvellement.

Abstract

The age and the present state of some networks augur economical overcosts due to the fact that failures are increasingly arising. It is now advisable to be versed in the ageing of mains.

The object of this survey is the creation of a predicting model of water mains failures, which are the preponderant criterion for the selection of mains to replace, according to environmental factors. Data from different urban and rural companies with long-standing water main repair (700 km) were collected.

The specificity of data prevail to use the analysis of survival data. In using both Cox and Weibull models, it is possible to characterize the emergence of failures. The preponderant factor is the number of failures already occurred on the mains. The other significant factors are the diameter, followed by the nature of soil, the material (grey cast iron, ductile cast iron), motor traffic, and the location of the drinking water pipes in the street.

Confronting the number of estimated failures and the one actually occurred, revealed a specific factor to each main : the main ability to an accelerated ageing process.

In order to use this model in a drinking water service with short-standing water main repair, a method of "apprentice-ship" is proposed. It use the results of a general model to create an artificial sample of failures on the network for the unknown period. Then, it is possible to create a proper model to the service.

For an efficiently application of this model, it is important to own a computerized data base indexing the mains, their characteristics and failures. Thus, it will be possible to estimate the deterioration of the main. An economical survey can easily complete this research, to predict the future expenses of renewal.

Key words : drinking water network, mains, failures, leaks, statistical analysis, probabilistic model, prediction, renewal.

Avant-propos

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

- la société **Lyonnaise des Eaux** qui a amené une participation technique et financière et qui a permis d'utiliser les archives concernant les travaux de maintenance du Service des Eaux de Bordeaux et de la CEB,
- la société **Pont-à-Mousson S.A.**, qui a amené une participation technique et financière et qui a donné de précieux renseignements sur les conduites d'eau potable et leur évolution technologique, ainsi que sur la corrosivité des sols,
- l'**Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES)**, qui m'a accueilli dans ses locaux et m'a apporté une aide scientifique,
- le **Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural et des Eaux et Forêts (CEMAGREF)** et plus particulièrement la Division Ouvrages et Réseaux Hydrauliques du Groupement de Bordeaux qui a apporté un encadrement scientifique essentiel,
- l'**Université Louis Pasteur** et plus particulièrement l'Institut de Mécanique des Fluides pour sa participation scientifique.

A Dorothee, Antoine et tous ceux qui me sont chers

Remerciements

Je tiens à remercier les personnes suivantes qui ont participé à l'élaboration de cette thèse :

- M. Henri REITZER chargé de recherche CNRS de l'Institut de Mécanique des Fluides de l'ULP, directeur de thèse,
- M. Franck TRIOL de la Compagnie des Eaux et de la Banlieue de Paris ainsi que toute l'équipe du service Eau Potable de la CEB,
- M. Michel LANGENFELD de Pont-à-Mousson S.A.,
- MM. Pierre ACHART et MADIEC de la Lyonnaise des Eaux Bordeaux, ainsi que l'équipe de M. PRIVAT,
- M. Daniel LOUDIERE, directeur de l'ENGEES,
- M. Jean DARBOUR de l'ENGEES,
- M. Daniel COMMENGES de l'INSERM Bordeaux,
- M. Christian GOURRIEROUX, de l'INSEE,
- M. MAHE du Service Départemental des Eaux et d'Assainissement du Bas-Rhin,
- M. Lahcen ZEDGUI, stagiaire en mastère à l'ENGEES,
- M. Pascal BOTZUNG, stagiaire de troisième année de l'ENGEES à la Lyonnaise des Eaux-Bordeaux,
- M. Olivier ALEXANDRE, du Laboratoire Gestion des Services Publics du CEMAGREF.

Je remercie également M. François LAISNEY Professeur à l'ULP, M. Paul MOREL Professeur à l'Université Bordeaux I et M. Raimund HERZ Assitant-Professeur à l'Université de Karlsruhe d'avoir accepté de prendre part à mon jury en tant que rapporteurs, ainsi que M. André COLSON, directeur de l'ENSAIS en tant que président du jury.

Mes remerciements vont également à toutes les personnes de l'équipe de la direction de la recherche de l'ENGEES, qui contribuent à son bon fonctionnement dans une ambiance chaleureuse.

Enfin je remercie tout particulièrement M. Bernard BREMOND, directeur de recherche à la division Ouvrage et Réseaux Hydrauliques du groupement de Bordeaux du CEMAGREF, qui a su répondre à mes nombreuses sollicitations, qui nous ont valu quelques Allers-Retours Strasbourg-Bordeaux. Ses précieux conseils ont fortement contribué à la réussite de cette étude.

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| RESUME | 7 |
| ABSTRACT | 8 |
| AVANT-PROPOS | 9 |
| SOMMAIRE | 11 |
| INTRODUCTION | 13 |
| CHAPITRE 1 : LA PROBLEMATIQUE DU RENOUVELLEMENT DES RESEAUX D'EAU POTABLE | 15 |
| 1.1. LES POLITIQUES DE RENOUVELLEMENT MENEES ACTUELLEMENT | 17 |
| 1.2. COMMENT LE VIEILLISSEMENT D'UN RESEAU SE MANIFESTE-T-IL?..... | 23 |
| 1.3. CONCLUSION..... | 28 |
| CHAPITRE 2 : LES DEFAILLANCES DES CONDUITES D'EAU POTABLE : CAUSES ET MODELES DE PREVISION DEJA EXISTANTS | 31 |
| 2.1. DESCRIPTION ET CAUSES DES DEFAILLANCES | 33 |
| 2.2. LES MODELES DE PREVISION DES DEFAILLANCES DES CONDUITES D'EAU POTABLE | 38 |
| 2.3. CHOIX DU MODELE | 46 |
| CHAPITRE 3 : LES DONNEES DISPONIBLES | 49 |
| 3.1. LES DONNEES RECHERCHEES..... | 51 |
| 3.2. PRESENTATION GENERALE DES RESEAUX..... | 52 |
| 3.3. LE RECUEIL DES DONNEES..... | 59 |
| 3.4. DESCRIPTION DES TRONÇONS ET DES DEFAILLANCES | 71 |
| 3.5. LA SPECIFICITE DES DONNEES | 74 |
| CHAPITRE 4 : APPLICATION DE L'ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES DE SURVIE A L'ETUDE DES DEFAILLANCES... | 77 |
| 4.1. INTRODUCTION A L'ANALYSE DES DONNEES DE SURVIE..... | 79 |
| 4.2. LES MODELES UTILISES EN ANALYSE DE SURVIE..... | 85 |
| 4.3. UTILISATION DU MODELE DES RISQUES PROPORTIONNELS - ESTIMATION DES PARAMETRES | 88 |
| CHAPITRE 5 : APPLICATION DES MODELES DE COX ET DE WEIBULL A LA PREVISION DES DEFAILLANCES DES CONDUITES D'EAU POTABLE | 93 |
| 5.1. PRESENTATION DU LOGICIEL EGRET..... | 95 |
| 5.2. TRANSFORMATION DES DONNEES POUR L'ANALYSE DES DONNEES DE SURVIE..... | 96 |

| | |
|--|------------|
| 5.3. LE MODELE DE COX..... | 99 |
| 5.4. APPLICATION DU MODELE DE WEIBULL | 117 |
| 5.5. CONCLUSIONS SUR L'APPLICATION DES MODELES..... | 124 |
| CHAPITRE 6 : ADEQUATION DU MODELE | 127 |
| 6.1. CALCUL DE L'ESPERANCE DU NOMBRE DE DEFAILLANCES | 129 |
| 6.2. COMPARAISON AVEC LES DONNEES REELLES | 131 |
| 6.3. MESURE DE L'INFLUENCE DE L'OUBLI D'UN FACTEUR | 147 |
| 6.4. CONCLUSION..... | 154 |
| CHAPITRE 7 : L'APPRENTISSAGE | 155 |
| 7.1. LA METHODE..... | 157 |
| 7.2. RESULTATS | 159 |
| 7.3. CONCLUSION..... | 166 |
| CHAPITRE 8 : UTILISATION DU MODELE PAR LES GESTIONNAIRES DE SERVICE | 167 |
| 8.1. METHODOLOGIE POUR LA CREATION D'UN MODELE..... | 169 |
| 8.2. UTILISATION POUR CONNAITRE L'ETAT DU RESEAU | 175 |
| 8.3. UTILISATION POUR LA PLANIFICATION DU RENOUVELLEMENT | 175 |
| 8.4. UTILISATION DANS L'ETUDE DE FIABILITE D'UN RESEAU..... | 184 |
| CONCLUSION | 185 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 187 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | 189 |
| ANNEXES | 191 |
| ANNEXE 1 | 193 |
| ANNEXE 2 | 195 |
| ANNEXE 3 | 207 |
| ANNEXE 4 | 211 |
| ANNEXE 5 | 215 |
| ANNEXE 6 | 225 |
| ANNEXE 7 | 239 |
| LISTE DES FIGURES..... | 241 |
| LISTE DES TABLEAUX | 247 |

Introduction

Selon une étude de l'Union des Industries et Entreprises de l'Eau et de l'Environnement [Union des Industries et Entreprises de l'Eau et de l'Environnement, 1991], 15 % des conduites d'eau potable existant actuellement en France ont une ancienneté supérieure à 50 ans et 25 % supérieure à 40 ans. Il est donc certain qu'à moyen terme se posera le problème du remplacement de ces conduites déjà âgées.

Connaissant le coût au mètre linéaire de la pose d'une canalisation (500 à 2000 F/ml), les services d'eau verront leurs dépenses augmenter de manière importante. Ces dépenses seront d'autant plus difficiles à supporter que les services sont petits. Il convient donc dès à présent d'essayer de prévoir ces dépenses futures.

Beaucoup de services travaillent actuellement dans l'urgence et ne remplacent que les conduites d'eau déjà malades. Ceci entraîne un financement irrégulier d'année en année. Une prévision du renouvellement à moyen ou long terme permettrait au contraire un financement plus régulier.

Avant toute étude économique, les services doivent organiser la connaissance de leur réseau (nature de la conduite, date de pose, environnement, incidents). Le traitement de ces données leur permettra ensuite d'élaborer des outils utilisables pour la prévision du renouvellement des canalisations.

L'objectif de cette étude est de créer un modèle de prévision du vieillissement des conduites d'eau potable et plus particulièrement de leurs défaillances. Ce modèle doit permettre de définir quels sont les facteurs les plus influents sur les casses et de prévoir sur une période donnée le nombre de casses probables que les conduites pourront subir en fonction de ces facteurs. Bien entendu il est indispensable que ce modèle puisse être applicable le plus largement possible.

Dans le chapitre 1, sont présentés diverses politiques de renouvellement déjà mises en place, ainsi que les critères de vieillissement habituellement pris en compte dans le choix des conduites à renouveler. Le chapitre 2 récapitule les facteurs influençant les défaillances ainsi que les modèles de prévision déjà existants. Les données utilisées pour l'élaboration du modèle sont présentées dans le chapitre 3. Le chapitre 4 présente les outils statistiques utilisés, qui sont appliqués aux conduites d'eau potable au chapitre 5. Dans le chapitre 6, nous étudierons

sont appliqués aux conduites d'eau potable au chapitre 5. Dans le chapitre 6, nous étudierons l'adéquation du modèle aux données réelles. Le chapitre 7 définit une méthode qui permettra aux services ayant de faibles historiques de maintenance d'utiliser le modèle. Enfin dans le chapitre 8, nous verrons comment les gestionnaires de services peuvent utiliser ce modèle pour la prévision du renouvellement en rapport avec des études économiques.

Chapitre 1

La problématique du renouvellement des réseaux d'eau potable

| | |
|--|----|
| 1.1. LES POLITIQUES DE RENOUVELLEMENT MENEES ACTUELLEMENT | 17 |
| 1.1.1. Les politiques de renouvellement menées en France | 17 |
| 1.1.2. Les politiques de renouvellement menées en Allemagne..... | 19 |
| 1.1.3. Les politiques de renouvellement menées aux États-Unis | 20 |
| 1.1.3.1. L'approche curative..... | 20 |
| 1.1.3.2. L'approche prédictive..... | 20 |
| 1.2. COMMENT LE VIEILLISSEMENT D'UN RESEAU SE MANIFESTE-T-IL? | 23 |
| 1.2.1. Définition du vieillissement d'une conduite d'eau potable | 23 |
| 1.2.1.1. Mauvais fonctionnements hydraulique du réseau engendrés par le vieillissement d'une conduite | 23 |
| 1.2.1.2. Dommages divers engendrés par le vieillissement d'une conduite | 25 |
| 1.2.2. Évaluation du vieillissement d'une conduite | 25 |
| 1.2.2.1. La qualité de l'eau | 26 |
| 1.2.2.2. La diminution de la capacité de transport | 26 |
| 1.2.2.3. Les fuites diffuses | 27 |
| 1.2.2.4. Les ruptures ou les fuites apparentes | 27 |
| 1.3. CONCLUSION | 28 |

Dans le paragraphe 1.1., sont présentées quelques politiques de renouvellement déjà menées en France et à l'étranger. Puis dans le paragraphe 1.2., sont définis les critères de vieillissement des conduites, critères souvent décisifs dans les stratégies de renouvellement.

1.1. Les politiques de renouvellement menées actuellement

A l'heure actuelle le renouvellement des réseaux d'eau potable n'est pas une priorité pour tous les services. Parmi ceux-ci ce sont les services les plus importants en taille qui sont le plus sensibilisés. Cependant les démarches suivies dans le choix des conduites à renouveler sont différentes d'un réseau à l'autre, d'un pays à l'autre.

1.1.1. Les politiques de renouvellement menées en France

Une enquête de l'Association Générale des Hygiénistes et des Techniciens Municipaux menée auprès de 1105 services [AGHTM,1993] a permis de faire le point sur les expériences de politique de renouvellement menées en France.

Parmi les petits services, sur 238 réponses, on a pu tirer les enseignements suivants :

- 46% de ces services réalisent des opérations de renouvellement, mais peu opèrent suivant un plan à plus ou moins long terme.
- Les services ne réalisant pas d'opérations de renouvellement sont essentiellement des services de petite taille sans doute parce qu'ils n'ont pas la structure ni l'assise financière leur permettant d'engager ce type de travaux.
- Le taux moyen de renouvellement des conduites est de 0,64% par an.
- Les motifs prioritaires pour engager des opérations de renouvellement de conduites sont :
 - * La réfection de voirie,
 - * L'augmentation de diamètre pour renforcement,
 - * La fréquence des fuites,
 - * L'âge des conduites.

Sur les 13 gros services interrogés, seuls trois annoncent une véritable politique de renouvellement de leur réseau répondant à un ou plusieurs objectifs précis.

Ces services envisagent le problème de la façon suivante :

- Le premier a divisé son réseau en deux parties, le réseau urbain plus ancien (62 ans d'âge moyen) et le réseau périphérique (32 ans). L'objectif principal est de rajeunir le réseau urbain, sans laisser vieillir le second. Les taux de renouvellement annuel est depuis 5 ans de 1,9% dans le centre et de 1% dans la périphérie.

L'installation d'un nouveau Système d'Information Géographique a permis de retrouver les âges des canalisations et donc de prévoir au rythme actuel l'âge moyen à moyen terme. Celui ci serait en 2016 de 24 ans pour le centre et de 30 ans pour la périphérie.

D'autre part la sélection des opérations se fait selon les critères suivants : la fragilité des conduites, la sensibilité à l'environnement, les opérations de voirie, la nécessité de renforcer le réseau.

- Le deuxième service tient un raisonnement similaire au précédent, basé sur la moyenne d'âge du réseau. L'objectif ici est de maintenir l'âge moyen du réseau inférieur à 100 ans, tout en cherchant à diminuer les nuisances (remplacement des tronçons fuyards), à améliorer le service (renforcements, remplacement de tronçons entartrés) et à coordonner les travaux sur le réseau avec les autres travaux.

- La politique du troisième est un peu différente. Elle a été mise en oeuvre il y a une quinzaine d'années afin de relever le rendement de réseau qui était assez médiocre. Elle s'intégrait en fait dans un plan plus vaste visant à limiter ou inverser l'évolution croissante de la production d'eau pour retarder l'obligation de construire une deuxième usine de production.

En conclusion de l'enquête certains conseils sont donnés aux gestionnaires de service, dans l'objectif du renouvellement :

- Il est tout d'abord important de bien connaître le réseau et son histoire, en créant par exemple des fichiers d'intervention et des fichiers de conduites qui faciliteront le traitement des informations.

- Il faut ensuite analyser les circonstances qui peuvent influencer sur la dégradation du réseau. Ce sont les facteurs de désordre, que nous verrons au chapitre 2.

- Puis il faut savoir ce qui doit déterminer la décision d'engager des travaux de renouvellement. Ce sont les facteurs déclenchants, qui correspondent aux critères de renouvellement.

Un autre service, le Syndicat des Eaux d'Ile de France [Halpern et Pascal, 1988], a défini cinq critères principaux pour évaluer ses besoins en renouvellement. Ce sont le maintien de la valeur du patrimoine, la fréquence des fuites, l'insertion dans les programmes de travaux municipaux, l'âge des canalisations et la qualité de l'eau dans le réseau.

Ces méthodes ne permettent cependant pas d'anticiper sur une éventuelle dégradation du réseau.

1.1.2. Les politiques de renouvellement menées en Allemagne

Le DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches E.V.) a sorti une fiche de recommandation en matière d'aide à la décision pour la planification du renouvellement et de la remise en état des conduites de distribution de gaz et d'eau [DVGW, 1989]. Cette fiche précise, entre autres, une méthode de planification du renouvellement.

Cette méthode se présente en deux étapes :

- détermination d'un taux de renouvellement annuel à partir de l'étude des données concernant les dommages et l'état des conduites, ainsi qu'à partir des ressources financières disponibles.
- puis prise en considération de critères dans le choix des conduites à renouveler à savoir :
 - le nombre de dommages, leur évolution, leurs conséquences économiques ;
 - le type et la cause des dommages ;
 - l'état de la conduite ;
 - la sécurité de la distribution ;
 - les mesures préventives (notamment pour ce qui concerne les risques tectoniques) ;
 - les pertes d'eau, sous l'aspect technique et sous l'aspect économique ;
 - la modification de la qualité de l'eau ;
 - les pertes de charge ;
 - les conditions économiques favorables en fonction d'autres travaux ;
 - les coûts de remplacement.

Cependant on se rend compte que, le plus souvent, la durée d'utilisation effective d'une conduite est déterminée par les travaux des tiers et rarement par des considérations de rentabilité.

Les Technische Werke der Stadt Stuttgart (TWS) [Kottmann, 1978] ont pu déterminer le taux de renouvellement nécessaire et les critères de choix des conduites à partir d'une banque de données. Ce sont :

- l'insuffisance de service,
- un nombre important de fuites aux raccordements des tuyaux,
- le nombre d'interventions pour la remise en état,
- la réfection de route,
- un mauvais état significatif de la conduite.

En résumé, les décisions de renouvellement sont prises selon quatre objectifs primordiaux :

- la rentabilité,
- la réputation du service auprès du public,
- la sécurité d'exploitation,
- le taux de renouvellement à long terme.

1.1.3. Les politiques de renouvellement menées aux États-Unis

Aux États-Unis, certains services ont déjà élaboré des politiques de renouvellement dès le début des années soixante, notamment en établissant des banques de données concernant les conduites et les dommages qu'elles ont pu subir. Deux approches différentes sont ou seront utilisées : une approche curative et une approche prédictive.

1.1.3.1. L'approche curative [O'day et al., 1989]

Cette approche s'apparente aux méthodes utilisées en France ou en Allemagne. Cependant l'existence de bases de données importantes permet de définir plus précisément les canalisations à problème. Les critères pris en compte dans l'évaluation des conduites à remplacer se trouvent dans le tableau 1.

On peut noter que les critères pris en compte sont différents selon les services, ceci étant dû pour une part à la spécificité géographique. Les services donnent ensuite un poids à chacun des critères de manière à déterminer une "note" pour chacune des conduites. Cette note permet alors de définir si la conduite doit être ou non remplacée.

L'approche curative générale suit en fait la démarche de la figure 1.

1.1.3.2. L'approche prédictive [O'day et al., 1989]

Certains services ne sont pas satisfaits de l'approche précédente car elle ne se limite qu'à l'évaluation des conduites ayant déjà subi des défaillances. Faisant face à une augmentation de la détérioration de leur système de distribution, ces services déjà anciens préfèrent mettre en

place un système de planification prédictif, qui prendrait en compte la nature du procédé de détérioration.

Tableau 1 : Critères de renouvellement pris en compte dans les services américains
[O'day et al., 1989]

| Facteurs | East Bay MUD | Philadelphia | Denver | Louisville |
|--|-----------------|--------------|--------|------------|
| Caractéristiques des conduites | | | | |
| Age | | X | X | X |
| Diamètre | | X | X | X |
| Profondeur | | | X | |
| Corrosion | | X | X | X |
| Conduite en antenne | | X | | X |
| Type de matériau ou de joint | | X | X | X |
| Historique de casses ou fuites | X | X | X | X |
| Caractéristiques du système | | | | |
| Qualité de l'eau | X | X | | X |
| Pression | X | X | X | X |
| Flexibilité opérationnelle | X | X | | |
| Coûts de pompage | X | | | |
| Conduite renforcée | | X | | |
| Capacité de transport | X | X | X | |
| Caractéristiques environnementales | | | | |
| Données de sol | | | X | X |
| Electrolyse | | X | | |
| Zone prioritaire | X | | | X |
| Zone de développement | X | X | X | X |
| Analyse du coût | | | | |
| Coût de maintenance | X | | | |
| Coût de remplacement | X | | | |
| Taux de rendement des investissements | X | | | |

Cette approche utilise un système d'inventaire et de bases de données concernant les conduites d'eau potable. La principale différence avec l'approche curative est qu'elle essaie de prédire les conditions physiques présentes et futures d'une canalisation ayant certaines caractéristiques propres et environnementales. Ensuite, une fois cette prédiction faite, il est possible de l'utiliser en y appliquant par exemple une méthode économique. Ceci permet donc aux services de mieux contrôler d'une année à l'autre la maintenance de leur réseau et de ne pas travailler uniquement en "urgence". La figure 2 montre la démarche employée pour cette approche.

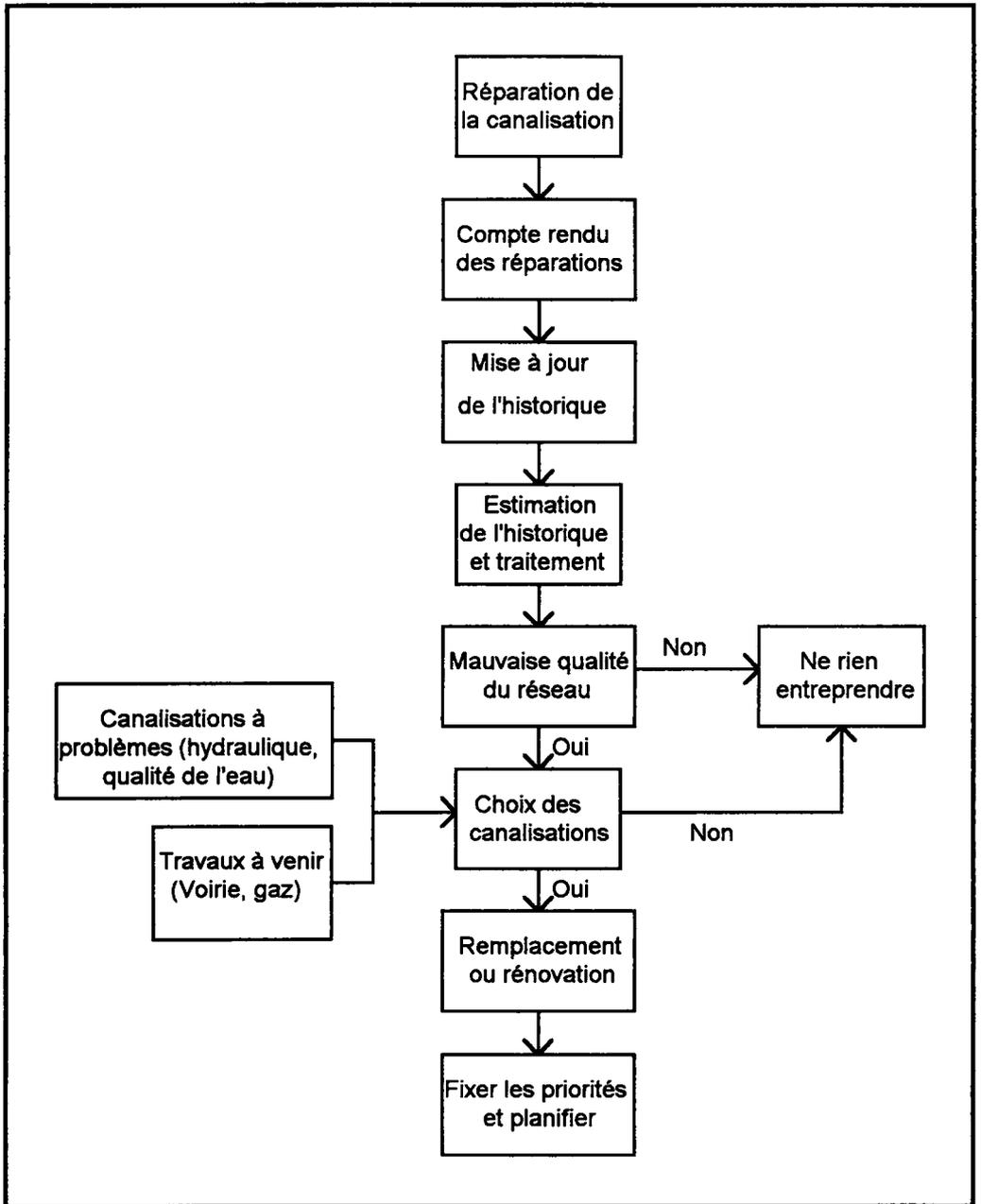


Figure 1 : Démarche employée dans le cadre de l'approche curative [O'day et al., 1989]

Nous verrons dans le chapitre II quels types de modèles de prévision de la détérioration des conduites peuvent être utilisés.

1.2. Comment le vieillissement d'un réseau se manifeste-t-il?

Comme on l'a vu au paragraphe 1.1.3.2. dans le chapitre précédent, notamment pour ce qui concerne l'approche prédictive, il est important d'essayer de créer des modèles de vieillissement des réseaux d'eau potable. Avant de créer ce type de modèle, il faut définir ce que l'on appelle "vieillissement d'une conduite". Notons que l'on ne tient compte ici que du vieillissement des conduites de distribution, et non des branchements.

1.2.1. Définition du vieillissement d'une conduite d'eau potable [Kremer, 1990]

Le vieillissement d'une conduite correspond à sa dégradation dans le temps, celle-ci donnant lieu, soit à certains dommages, soit au mauvais fonctionnement hydraulique du réseau.

1.2.1.1. Mauvais fonctionnements hydraulique du réseau engendrés par le vieillissement d'une conduite

- **Chute de pression**, lorsque la section utile de la conduite diminue à cause de l'entartrage ou de protubérances dues à la corrosion.

- **Fuites diffuses**, dues à la détérioration des joints ou à la corrosion des tuyaux. Une forte augmentation de leur nombre peut avoir une incidence directe sur le réseau et diminuer le rendement.

- **Ruptures** dues à l'action combinée de la corrosion sur la conduite et de mouvements de sols (vibrations, séismes, travaux divers). Une rupture peut entraîner une intervention sur le réseau de plusieurs heures, pendant laquelle les abonnés sont éventuellement privés d'eau ou subissent une chute de pression.

Chacune de ces détériorations engendre, outre certains dommages que nous verrons dans le paragraphe suivant :

- * des pertes d'eau, d'où augmentation de la production,
- * des pertes en énergie (augmentation du temps de pompage),
- * des interventions sur le réseau.

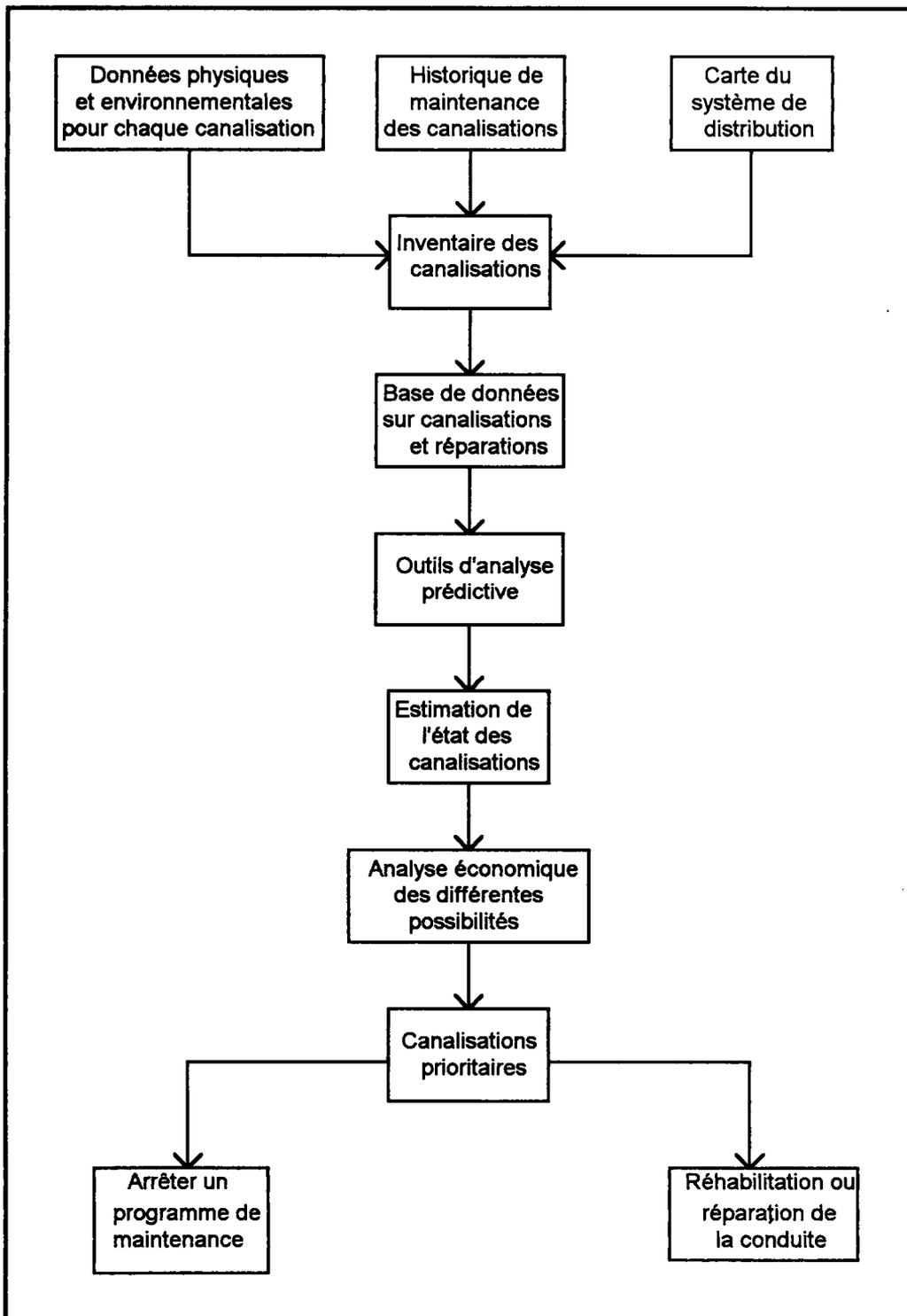


Figure 2 : Démarche employée dans le cadre de l'approche prédictive [O'day et al., 1989]

1.2.1.2. Dommages divers engendrés par le vieillissement d'une conduite

- Détérioration de la qualité de l'eau :

On peut distinguer deux types de dommages liés à la dégradation de la qualité de l'eau. Le premier est celui qui engendre la non potabilité de l'eau. Il faut alors élaborer un nouveau traitement rendant cette eau potable. Le deuxième concerne l'augmentation du nombre de plainte des abonnés dû à une apparence négative de l'eau. Ceci entraîne alors une baisse d'image de marque du service exploitant.

- Fuites diffuses :

Elles peuvent indirectement déstabiliser la conduite en érodant le lit de pose, d'où rupture au niveau des points fragiles du tuyau.

- Ruptures :

Elles peuvent avoir des incidences indirectes :

- inondation, d'où coupure du trafic sur la chaussée concernée, ou dommage chez un particulier,
- coupure d'eau, donc dommages causés notamment aux industries ou aux centres de santé,
- déstabilisation du lit de pose,
- plaintes des abonnés.

Chacun de ces dommages engendre des coûts indirects, qui peuvent être souvent nettement supérieurs aux coûts directs de main d'oeuvre pour effectuer la réparation.

Comme on le voit, le vieillissement d'une conduite ne correspond pas à un seul phénomène ayant lieu sur la conduite mais plutôt à l'action de plusieurs facteurs propres à la conduite et à son environnement. Nous allons voir dans le paragraphe suivant comment on peut évaluer effectivement le vieillissement à partir des différents phénomènes décrits précédemment.

1.2.2. Évaluation du vieillissement d'une conduite

Le phénomène de vieillissement ne peut être évalué en tant que tel, mais à partir des phénomènes par lesquels ils se manifestent.

1.2.2.1. La qualité de l'eau

La mesure de la dégradation de la qualité de l'eau peut permettre de caractériser l'état de la ou des conduites proches du point de mesure ou de l'endroit où a eu lieu la plainte d'un abonné.

Elle peut renseigner sur l'état de corrosion de la conduite pour ce qui concerne les conduites métalliques. C'est le cas lorsque des produits de corrosion sont transportés à travers le réseau. On a par exemple le phénomène d'eau rouge, la substance rouge correspondant à l'oxydation d'ions ferreux en ions ferriques principalement dans les eaux douces, acides ou désaérées. Certaines autres substances comme le manganèse peuvent également entraîner la coloration de l'eau (en noir cette fois).

On peut également être renseigné sur la corrosion bactérienne, en examinant les teneurs en bactéries du fer ou sulfatoréductrices.

Un mauvais état des joints ou des conduites en matière plastique peut également altérer la qualité de l'eau, du fait de l'introduction de substances provenant de l'extérieur, comme des hydrocarbures.

Afin de bien connaître le vieillissement, il est important d'étudier la corrélation entre l'âge de la conduite et l'apparition d'une mauvaise qualité de l'eau. Cependant il est très difficile d'identifier la conduite "malade", car on ne peut dire avec précision quelle est celle qui a détérioré la qualité de l'eau.

1.2.2.2. La diminution de la capacité de transport

Cette valeur correspond à la diminution du diamètre interne de la conduite ou à l'augmentation du coefficient de rugosité. Ceci est engendré par l'entartrage calcaire sur les conduites non-revêtues d'un revêtement interne mais aussi par l'apparition de protubérances dues à des produits de corrosion.

On peut la caractériser de différentes façons :

- soit par la mise en évidence de l'augmentation de pertes de charges sur le réseau ou sur une partie, augmentation non induite par l'augmentation de la consommation. Ceci peut se faire par exemple à partir de modélisation hydraulique du réseau.

- soit à partir d'échantillons de canalisations relevés directement sur le réseau, échantillons étudiés par la suite. Cependant ces relevés demeurent ponctuels et leur interprétation est difficilement généralisable.

Le nouveau diamètre ou le nouveau coefficient de rugosité estimés ou mesurés sur une conduite donne alors un état de son entartrage. Si cela est possible on peut essayer là aussi de définir la corrélation pouvant exister entre la dégradation de la conduite et certains facteurs comme son âge, sa nature, la qualité de l'eau à l'entrée dans le réseau.

1.2.2.3. Les fuites diffuses

Les fuites diffuses sont mises en évidence lors de mesures bien spécifiques ou lorsque la tranchée d'une conduite est ouverte. Elles n'entraînent pas en général de réparations sur la conduite. Ce sont elles qui en général abaissent le rendement d'un réseau et ne lui permettent pas d'avoir une valeur supérieure à 90 ou 95%.

Elles caractérisent, soit une fragilisation du tuyau par de petites ouvertures, soit un mauvais état des joints qui deviennent alors poreux. On peut les constater de différentes manières :

- soit par le constat d'une diminution importante du rendement de réseau,
- soit par une augmentation croissante de la consommation de nuit,
- soit par des campagnes de mesures sur le terrain, par des techniques de corrélation acoustique. Ce genre de mesures permet alors de retrouver précisément quelles sont les conduites les plus dégradées.

L'état de la conduite est alors déterminé par le nombre et la taille des fuites que l'on a pu détecter.

1.2.2.4. Les ruptures ou les fuites apparentes

Ces ruptures sont celles qui entraînent automatiquement une intervention sur le réseau. Dans toute la suite du mémoire c'est ce qu'on appelle "défaillance". Elles sont mises en évidence, soit parce qu'elles entraînent au niveau de la chaussée une inondation plus ou moins importante, soit parce que l'on constate une augmentation brutale de la consommation de nuit. Dans ce cas on peut alors retrouver avec précision l'endroit de la rupture ou de la fuite par un système de jeu de vannes.

Ces casses caractérisent bien sûr un mauvais état de la conduite et une certaine fragilisation. Elles peuvent avoir lieu à la suite d'une corrosion dans le temps de la conduite corrélée à un mouvement de sol ou à une augmentation de la pression interne. Elle correspond soit à une diminution de la paroi de la conduite, soit à la formation de trous.

En général ces ruptures sont différentes selon le diamètre. Elles peuvent également concerner les fuites au niveau des joints qui sont assez importantes pour devenir apparentes.

L'état de la conduite et son vieillissement peuvent être caractérisés par un taux de fuites sur un an ou sur une période plus longue, ou bien par un certain nombre de fuites pendant une année (Cf. figure 3).

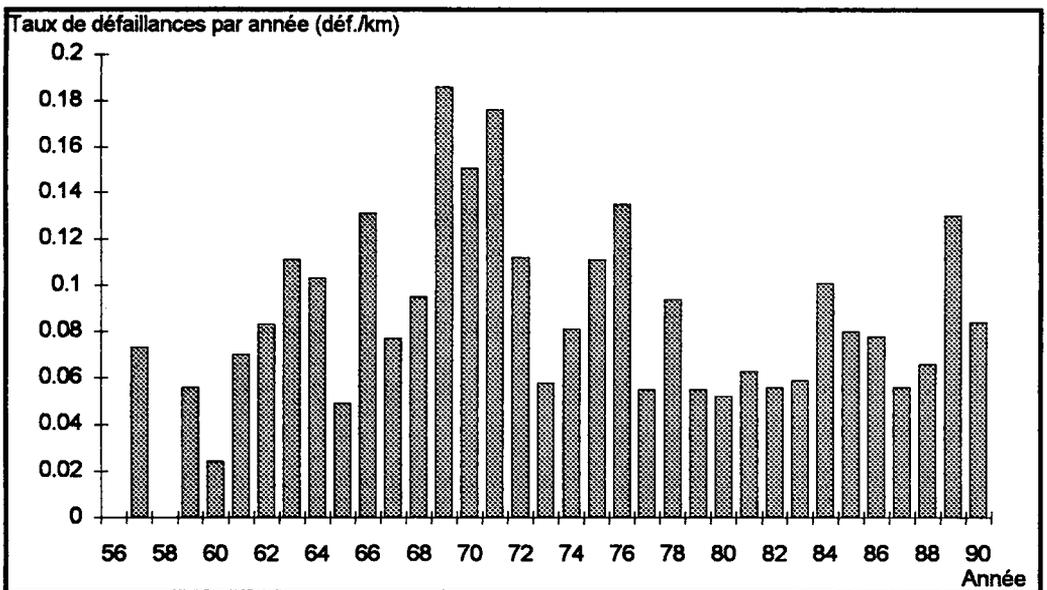


Figure 3 : Taux de défaillance annuel par unité de longueur (données LED-Bordeaux, 1991) [Eisenbeis, 1991]

Le tableau 2 présente les différentes manières d'estimer l'état de dégradation d'une conduite.

1.3. Conclusion

Dans toutes les politiques de renouvellement on essaie de définir un taux de dégradation des conduites. En général c'est le taux de ruptures qui semble prépondérant dans le choix des conduites à remplacer, même si certains services essaient de prendre en compte également la qualité de service offerte aux consommateurs. Ce taux de ruptures fait cependant partie de la qualité de service puisqu'une rupture peut entraîner une coupure d'eau chez l'abonné.

Tableau 2 : Manifestations et mesures de la dégradation des conduites d'eau potable

| Manifestations | - Dégradation de la qualité de l'eau | - Diminution de la capacité de transport | - Augmentation des fuites diffuses | - Ruptures ou fuites apparentes |
|---------------------------------|---|---|---|--|
| Origines | - Corrosions internes (chimiques ou biologiques) - Porosité de joints ou tuyaux en matière plastique | - Entartrage - Protubérance de produits de corrosion | - Corrosions internes et externes - Détérioration des joints | - Corrosions internes et externes - Dégradation du lit de pose - Mouvements de sol |
| Mesure du vieillissement | - Mesures chimiques - Plaintes des consommateurs | - Mesure de diamètre ou de coefficients de rugosité - Chutes de pression | - Nombre de fuites/km - Débit des fuites | - Taux de fuites ou de casses annuel |

D'autre part des services, aux Etats-Unis notamment, essaient de prévoir la dégradation des conduites afin d'établir des politiques de renouvellement basées sur des analyses économiques.

Parmi les méthodes d'estimation du vieillissement prises en compte, celle concernant les ruptures de conduites est la plus simple à mettre en oeuvre. En effet puisqu'elles entraînent obligatoirement une intervention sur le réseau, il suffit de décrire ces ruptures et de les caractériser (date, causes, réparation) pour pouvoir l'utiliser. Les autres méthodes le permettent plus difficilement, car elles nécessitent de faire des campagnes de mesure et ne sont pas toujours aussi précises quant à l'endroit exact de la dégradation.

Cette relative simplicité du recueil d'informations sur les ruptures permet d'avoir des données en nombre suffisant pour espérer les utiliser statistiquement et aboutir à des modèles de prévision de vieillissement. Certains services possèdent déjà ces données depuis un temps relativement important. C'est pourquoi cette étude concerne la prévision des défaillances, c'est à dire des fuites ou ruptures au niveau du tuyau ou du joint entraînant une réparation de la conduite.

Dans le chapitre suivant nous allons décrire les défaillances et leurs causes. Puis nous verrons quels résultats ont déjà été obtenus et quel modèle de prévision semble le mieux approprié.

Chapitre 2

Les défaillances des conduites d'eau potable : Causes et modèles de prévision déjà existants

| | |
|--|----|
| 2.1. DESCRIPTION ET CAUSES DES DEFAILLANCES..... | 33 |
| 2.1.1. Description des défaillances..... | 33 |
| 2.1.2. Causes de l'apparition des défaillances des conduites d'eau potable..... | 35 |
| 2.1.2.1. Phénomènes entraînant l'apparition des défaillances..... | 35 |
| 2.1.2.2. Eléments influençant ces phénomènes..... | 37 |
| 2.2. LES MODELES DE PREVISION DES DEFAILLANCES DES CONDUITES D'EAU POTABLE..... | 38 |
| 2.2.1. Les modèles physiques de prévision des défaillances..... | 38 |
| 2.2.1.1. Etude de Vancouver (Canada)..... | 38 |
| 2.2.1.2. Modèle de l' "US Army Corp of Engineers Construction Engineering Research Laboratory" (CERL) | 40 |
| 2.2.1.3. Etude du Philadelphia Water Department (P.W.D.) | 41 |
| 2.2.2. Les modèles statistiques de prévision des défaillances des conduites d'eau potable..... | 41 |
| 2.2.2.1. Modèle de l'EPA (Environmental Protection Agency)..... | 42 |
| 2.2.2.2. Des Moines Water Works Study..... | 44 |
| 2.2.2.3. Massachusetts Institute of Technology (MIT)..... | 44 |
| 2.3. CHOIX DU MODELE..... | 46 |

Le chapitre précédent nous a montré que les ruptures ou fuites apparentes peuvent donner des indications précises sur la dégradation des conduites, d'autant que leur prise en compte ne nécessite rien de plus que l'observation d'interventions déjà existantes.

Après avoir défini les défaillances, nous présenterons leurs causes possibles. Puis nous verrons quels modèles de prévision existent déjà.

2.1. Description et causes des défaillances

L'EPA (Environmental Protection Agency) a regroupé et utilisé des données sur les fuites ou ruptures dans plusieurs services américains. Les données recueillies ne sont pas toujours basées sur les mêmes définitions concernant les fuites. On peut distinguer [O'day et al., 1989] :

- les fuites (leak repair) ; ce sont tous les événements entraînant une réparation sur les conduites, les hydrants, les branchements.
- les fuites sur tuyau (main leak),
- les fuites sur joint (joint leak),
- les ruptures sur conduites (main breaks) ; elles représentent les défaillances structurelles du tuyau ou de l'emboîtement dues à une surcharge excessive, une détérioration du lit de pose, un contact avec les autres structures, la corrosion ou une combinaison entre ces conditions.

Comme on le voit les définitions données différencient surtout les fuites sur conduites de celles ayant eu lieu sur les différents organes du réseau (vannes, pompes, etc.). Ensuite on distingue aussi les fuites et les ruptures.

Sachant que la limite entre rupture et fuite n'est pas toujours bien définie (une rupture est une fuite, mais une fuite n'est pas obligatoirement une rupture), nous définirons de la façon suivante la défaillance : une défaillance est une rupture ou une fuite apparente nécessitant une intervention sur le réseau. Elle peut avoir lieu soit sur le tuyau, soit sur le joint. Ceci exclut les fuites ayant lieu sur les branchements, ainsi que celles ayant lieu sur les organes du réseau, tels que les pompes, les vannes, les hydrants et autres organes régulateurs.

2.1.1. Description des défaillances

Les défaillances au niveau du tuyau peuvent être de différentes natures.(Cf. figure 4).

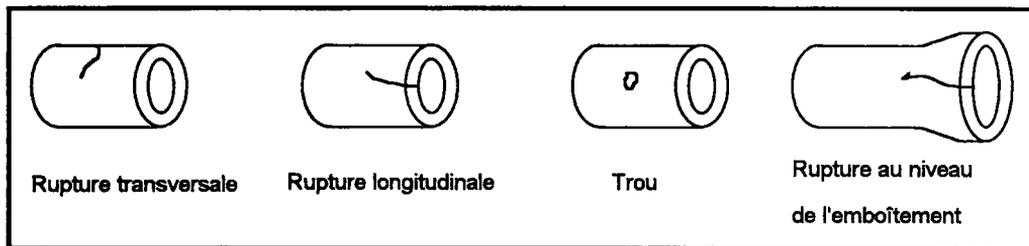


Figure 4 : Différents types de ruptures des conduites d'eau potable [O'day et al., 1989]

Elles peuvent également correspondre à un éclatement total du tuyau suite à une action violente qu'il a pu subir (Coup de bélier, mouvement de terrain...). On trouvera en annexes 2 des photographies de conduites ayant subi des éclatements.

Une rupture ou une fuite correspond à un affaiblissement de la conduite, c'est à dire soit à une diminution de la paroi, en un endroit précis (piquage) ou non (fissure) combinée à une augmentation de contraintes sur la canalisation, soit à une non-étanchéité du joint.

La figure 5 montre la fréquence des défaillances en fonction du diamètre et du type de défaillances, les ruptures transversales ont lieu surtout sur les petits diamètres alors que les gros diamètres subissent plutôt des ruptures longitudinales ou des piquages.

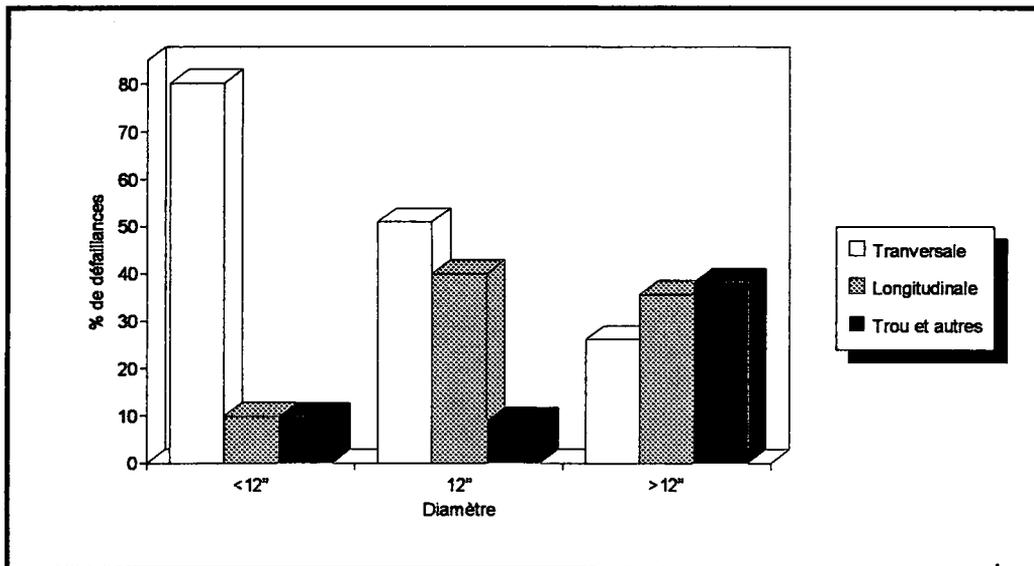


Figure 5 : Fréquence des types de ruptures en fonction du diamètre [O'day et al., 1989]

De même les fuites sur tuyaux ont surtout lieu sur les petits diamètres, alors que les diamètres plus élevés ont surtout des fuites au niveau des joints (Cf. fig. 6).

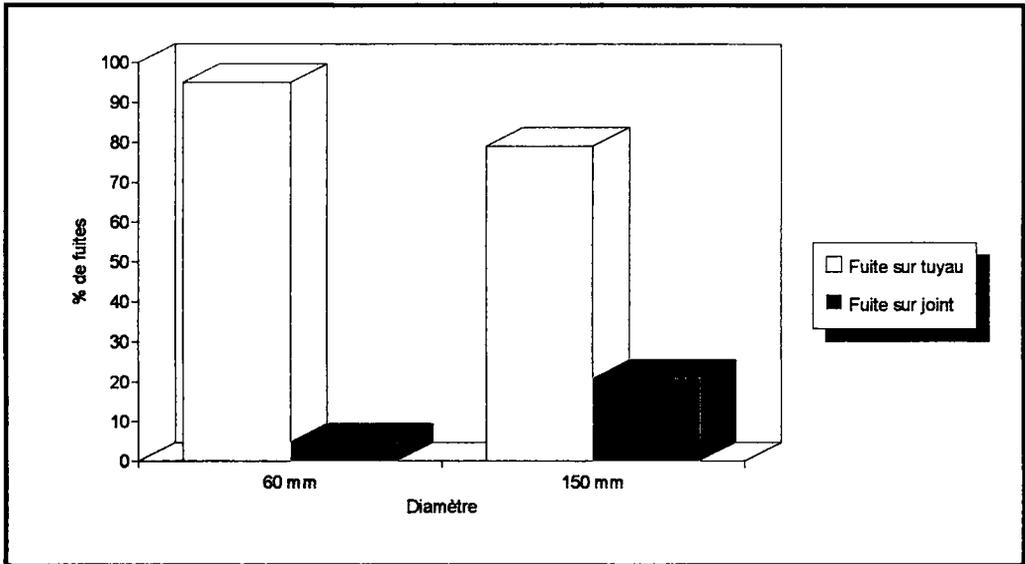


Figure 6 : Répartition des fuites sur tuyau et sur joint en fonction du diamètre (d'après les données recueillies sur la LED-Bordeaux) [Eisenbeis, 1991]

2.1.2. Causes de l'apparition des défaillances des conduites d'eau potable

2.1.2.1. Phénomènes entraînant l'apparition des défaillances

- Phénomènes mécaniques

La figure 7 récapitule les différentes contraintes mécaniques que peut subir une canalisation.

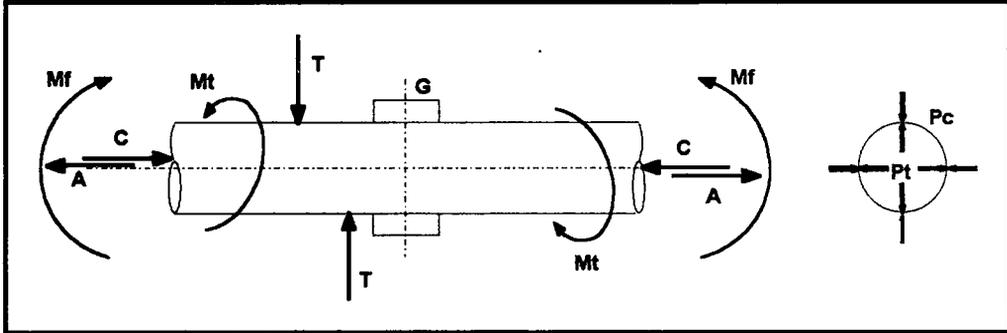


Figure 7 : Contraintes subies par une conduite d'eau potable [Moruzzi, 1984]

Ces contraintes sont les suivantes :

- moment de flexion (M_f) susceptible de provoquer une courbure de la canalisation,
- moment de torsion (M_t) susceptible de tordre la canalisation 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.

Les causes de variation de ces contraintes sont les suivantes :

- mouvement violent du sol (Mf, Mt, T, A, C, Pc),
- mouvement lent du sol (Mf, T, A),
- transmission directe excessive de charges accidentelles en surface (Mf, T, Pc),
- températures peu élevées (Pt, A),
- coup de bélier (Pc, Pt, A),
- travaux de voirie (Mf, Mt, T, A, Pc).

- Phénomènes chimiques ou biologiques

Ces phénomènes sont représentés principalement par la corrosion externe ou interne. Il s'établit dans ce cas un échange d'ions entre le milieu extérieur (sol ou eau) et la paroi de la conduite.

Cette corrosion est de deux types :

*** La corrosion interne**

Elle est liée à la qualité de l'eau et à ses différentes caractéristiques (pH, taux d'oxygène dissous, équilibre calco-carbonique, existences de bactéries du fer ou sulfato-réductrices). Elle entraîne une diminution de la paroi en certains points précis du tuyau, lié le plus souvent à l'existence de dépôts d'où diminution du diamètre interne.

*** La corrosion externe**

Elle correspond à un échange d'ions entre le sol et la paroi de la conduite et peut avoir diverses origines :

- Les courants vagabonds,
- Le sol,

- L'hétérogénéité de surface,
- L'hétérogénéité du sol,
- L'hétérogénéité par contact.

Tous ces facteurs de corrosion externe sont présentés plus précisément en annexe 2.

2.1.2.2. *Eléments influençant ces phénomènes*

La figure 8 nous montre les différentes causes qui peuvent entraîner l'affaiblissement d'une conduite d'eau potable et donc augmenter le risque d'apparition d'une défaillance. Elles sont regroupées en différentes classes [Kremer, 1990] :

- les éléments propres au type de la canalisation,
- les éléments liés à l'exploitation des réseaux,
- les éléments extérieurs aux réseaux.

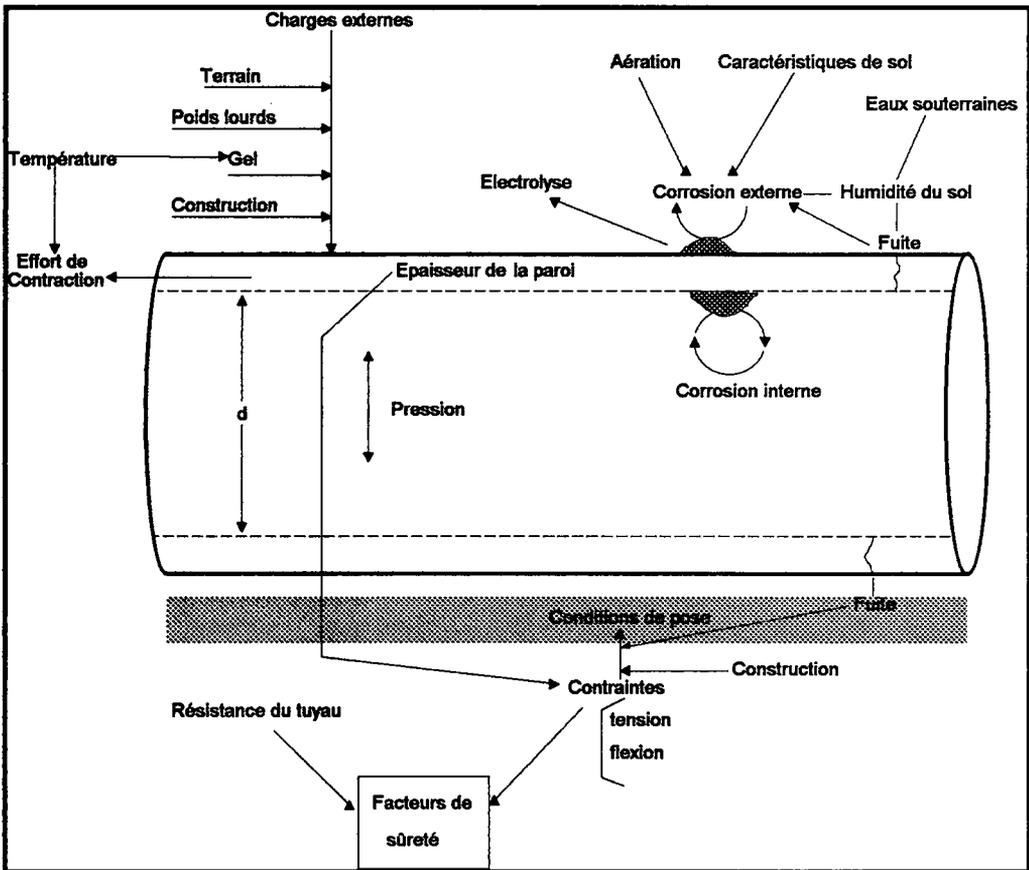


Figure 8 : Causes de l'affaiblissement d'une conduite d'eau potable [O'day et al., 1989]

Tous ces éléments sont présentés en annexe 2. Cependant une canalisation d'eau potable fait partie d'un ensemble de structures pouvant avoir des relations entre elles et pouvant subir des événements tout à fait fortuits. Il est donc impossible de lister toutes les causes agissant sur les défaillances.

Certains facteurs doivent cependant être prépondérants par rapport aux autres. C'est ce que nous allons essayer de déterminer dans la suite de l'étude (Cf. Chapitre 5). Mais auparavant il est important de connaître les modèles de prévision des défaillances sur les conduites déjà existants.

2.2. Les modèles de prévision des défaillances des conduites d'eau potable

Des études descriptives sur les défaillances des canalisations d'eau potable ont déjà eu lieu. Cependant si elles permettent de mettre en évidence des corrélations entre le nombre de défaillances et certains facteurs cités précédemment, elles n'ont pas permis de définir quels en étaient les facteurs les plus importants ni même de modéliser l'apparition des défaillances.

Pour l'instant seuls des modèles américains existent. Ils sont de deux types : des modèles physiques et des modèles statistiques.

2.2.1. Les modèles physiques de prévision des défaillances

Ces modèles permettent d'évaluer l'action des corrosions internes et externes, de la surcharge sur la canalisation et enfin les contraintes agissant sur ces canalisations. On peut alors estimer l'état structurel dans lequel se trouve la canalisation en comparant ces contraintes à la résistance originelle du tuyau.

Plusieurs études ont été réalisées et sont présentées ci-après.

2.2.1.1. Etude de Vancouver (Canada) [O'day et al., 1989]

En 1978, Vancouver avait entrepris une étude sur les "temps de défaillance" des conduites pour déterminer la durée de mise en service des 42 miles de conduites en fonte installées à partir de 1900. Le modèle permet de prédire la profondeur maximale de piquage due à la corrosion externe.

Le service a conduit son étude de la manière suivante :

- 1 - Surveillance des enregistrements des réparations puis discussions pour déterminer les problèmes de la zone,
- 2 - Evaluation des sources de courants vagabonds,
- 3 - Analyse de l'eau pour déterminer ses propriétés de corrosivité,
- 4 - Analyse d'échantillons de sol à la profondeur de la canalisation pour déterminer le pH, l'humidité, la résistivité, le potentiel redox et la teneur en sulfure,
- 5 - Examen physique de vingt canalisations en ce qui concerne l'uniformité et de la profondeur de piquage de la paroi.

Les résultats de cette enquête sont les suivants :

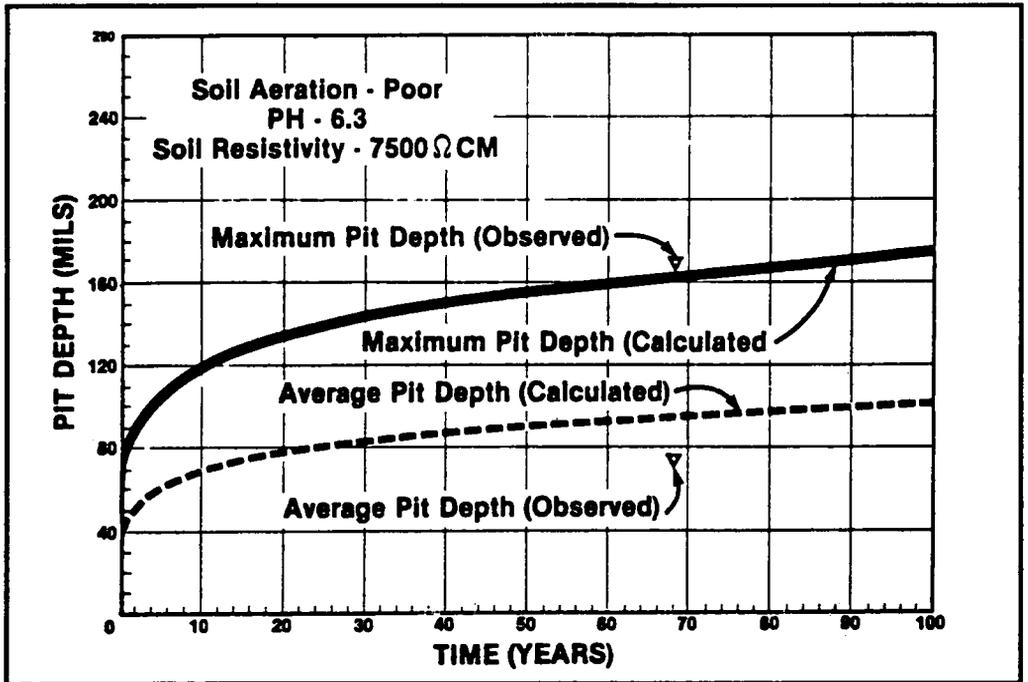
- 1 : La diminution moyenne d'épaisseur de la paroi due à la corrosion est de 1,65 mm sur toutes les conduites observées,,
- 2 : La résistivité du sol varie entre 3400 et 900000 ohm-cm, le pH entre 4.6 et 9.4, et le sol est faiblement aéré,
- 3 : Aucune trace de sulfure n'a été détectée,
- 4 : L'eau n'est en général pas entartrante et contient des taux d'oxygène dissous importants.

Les données de sol ont été alors incorporées au modèle pour estimer la profondeur de piquage de la paroi. A partir de là une trentaine de courbes correspondant aux différentes combinaisons des données du sol ont été établies. Une de ces courbes se trouve en figure 9.

Afin d'établir un modèle de prédiction des défaillances, il est nécessaire de connaître l'épaisseur minimale de la paroi qui provoque la casse de la canalisation. Cette donnée, non précisée dans la publication, est déterminée à partir des forces et contraintes qui s'appliquent sur la canalisation.

En résumé afin de pouvoir utiliser ce modèle il est nécessaire de connaître les informations suivantes concernant la canalisation et son environnement :

- La date de pose de la canalisation,
- L'épaisseur originelle de la canalisation,
- Le type de sol,
- La diminution de l'épaisseur de la paroi de la canalisation due à la corrosion interne.



"Pit depth" correspond à la profondeur de piquage de la paroi de la canalisation (1 mill = 0,0254 mm)
Figure 9 : Courbe présentant le modèle physique de Vancouver [O'day et al., 1989]

Le principal avantage de ce modèle est qu'il permet d'inclure des facteurs qui ont une influence directe sur la structure de la canalisation. Cependant il est à noter que les charges externes et les conditions de lit de pose ne sont pas prises en compte dans ce modèle.

2.2.1.2. Modèle de l' "US Army Corp of Engineers Construction Engineering Research Laboratory" (CERL) [O'day et al., 1989]

Le CERL a développé un modèle physique appliqué aux canalisations de distribution de gaz. Ce modèle estime également l'influence de la corrosion externe sur l'épaisseur de la paroi de la conduite et calcule un "index de corrosion" (CSI) variant de 1 à 100, une valeur de 100 correspondant à une conduite neuve et une valeur de 0 correspondant à une canalisation complètement détériorée. Le CSI est calculé par l'équation suivante :

$$CSI = 100 \left(1 - \frac{PAV}{T} \right)$$

avec : PAV = Valeur de la profondeur de piquage de la paroi
 T = épaisseur de la paroi de la canalisation

Il a été observé que la casse de la canalisation a lieu lorsque le CSI est de l'ordre de 30.

Pour chaque conduite celui-ci peut être estimé à partir de différentes méthodes telles que les mesures directes sur la canalisation, les techniques de polarisation électrique ou des modèles mathématiques. Ensuite sont estimées les influences de différents facteurs déjà vus précédemment, à savoir l'effet du sol (pH, résistivité), l'effet d'un revêtement extérieur sur la corrosion, l'effet des sulfates et l'effet de l'humidité.

Cette approche peut être appliquée aux canalisations d'eau potable, en tenant toutefois compte des différences existant entre les caractéristiques des réseaux, telles qu'une pression plus élevée pour les canalisations d'eau ou la possibilité de corrosion interne due aux caractéristiques chimiques de l'eau. Le CSI correspondant à l'apparition des casses n'est pas précisé dans la publication.

2.2.1.3. Etude du Philadelphia Water Department (P.W.D.) [O'day et al., 1989]

Le P.W.D. a développé un modèle d'évaluation de l'état des conduites d'eau potable. Ce modèle est destiné à évaluer les facteurs structurels de sécurité de conduites en fonte grise exposées à des variations de conditions environnementales. Il estime les charges internes et externes, les actions des corrosions internes et externes, puis prédit l'épaisseur de la paroi et calcule un taux de sécurité donnant l'état de la canalisation.

Notons que, comme les analyses techniques concernant les deux types de fonte (grise ou ductile) sont différentes, ce modèle ne peut être appliqué qu'aux conduites en fonte grise.

2.2.2. Les modèles statistiques de prévision des défaillances des conduites d'eau potable

Ces modèles appliquent des techniques statistiques aux données de réparations afin de définir les facteurs contribuant à l'apparition des défaillances. Ces techniques peuvent être des analyses de régression multivariable (Etude de l'Environmental Protection Agency ou du Des Moines Water Works) ou des analyses plus spécifiques comme la régression de Cox (Massachusetts Institute of Technology).

2.2.2.1. Modèle de l'EPA (Environmental Protection Agency) [Clark et al., 1982]

L'EPA a effectué une analyse sur les réparations des canalisations d'eau potable dans deux services d'eau (un petit et un grand). Les données recueillies dans ces deux services renseignaient sur les facteurs suivants :

- * Diamètre de la canalisation,
- * Longueur de la canalisation,
- * Nombre total de défaillances,
- * Type de canalisation,
- * Corrosivité du sol enrobant la canalisation,
- * Conditions de pression,
- * Age de la canalisation,
- * Réparations effectuées sur la canalisation.

Le tronçon de base défini pour cet inventaire est un tronçon séparé des autres soit par des raccordements hydrauliques, soit par des changements de diamètre. Au total 307 tronçons ont été répertoriés.

Cette analyse a permis de différencier les deux phénomènes suivants que l'on peut considérer comme les variables à expliquer :

- * l'intervalle de temps qui existe entre la pose de la canalisation et la première défaillance.
- * après cette première défaillance, le nombre de défaillances en fonction du temps écoulé qui semble croître de manière exponentielle.

L'équipe de l'EPA a donc développé deux équations, l'une estimant la période jusqu'à la première défaillance, l'autre estimant le nombre de défaillances à la suite de la première. Ces équations ont été développées pour chacun des deux services. Ce sont les suivantes :

- * Age à la première défaillance

$$NY = 2,9 + 0,442 D + 0,017 P + 0,412 I + 0,32 RES$$

(Coefficient de détermination, $R^2=0,34$)

pour le petit service d'eau

$$NY = 11 + 0,263 D - 0,006 P + 0,773 I + 0,253 RES - 0,00006 LH + 15,69 T$$

$$(R^2=0,34)$$

pour le grand service d'eau

$$NY = 4,13 + 0,338 D - 0,022 P + 0,265 I + 0,0983 RES - 0,0003 LH + 13,28 T$$

$$(R^2=0,23)$$

pour les deux services combinés

avec

NY = Nombre d'années entre la pose et première défaillance

D = Diamètre de la canalisation en pouces (= 0.3048 m)

P = Pression absolue dans la canalisation en livres par pouce carré (= 7,02 Pa)

I = Pourcentage de linéaire en zone industrielle

RES = Pourcentage de linéaire en zone résidentielle

LH = Longueur de canalisation en sol hautement corrosif

T = Type de canalisation (1=métallique, 0=béton armé)

* Nombre de défaillances à la suite de la première

$$REP = 0,386 e^{0,139 PRD} e^{0,0602 A} e^{0,0208 DEV} SL^{-0,016} SH^{0,025}$$

$$(R^2=0,49)$$

pour le petit service

$$REP = 0,386 e^{0,7198 T} e^{0,040 PRD} e^{0,0862 A} e^{0,0189 DEV} SL^{0,014} SH^{0,069}$$

$$(R^2=0,47)$$

pour le grand service

$$REP = 0,386 e^{0,7197 T} e^{0,044 PRD} e^{0,0865 A} e^{0,0121 DEV} SL^{0,014} SH^{0,069}$$

$$(R^2=0,47)$$

pour les deux services combinés

avec

REP = Nombre de défaillances

PRD = Pression différentielle

A = Période depuis la première défaillance

DEV = Pourcentage de canalisations se trouvant en zone développée

SL = Surface de canalisation en contact avec un sol faiblement corrosif

SH = Surface de canalisation en contact avec un sol corrosif

T = Type de canalisation (=1 pour canalisation métallique
=0 pour béton armé)

On peut noter que, dans ces équations de nombre de défaillances, le diamètre n'est pas pris en compte.

2.2.2.2. Des Moines Water Works Study [O'day et al., 1989]

Le "Des Moines Water Works Study" a mené une étude afin d'établir les causes principales d'augmentation du nombre de casses des canalisations par année. Basés sur une analyse descriptive, les résultats ont permis de conclure que 75% de toutes les défaillances étaient dus à l'action des sols corrosifs sur les canalisations en fonte.

D'autre part plusieurs modèles de régression multiple basés sur des modèles linéaires et logarithmiques ont été étudiés. L'équation de prédiction est la suivante :

$$\text{Age} = 65,78 + 0,028 \text{ SR} - 6,338 \text{ pH} - 0,049 r$$

avec

Age = Age de la canalisation à la première défaillance (en années)

SR = Résistivité du sol saturé (en Ohm-cm)

pH = pH du sol

r = Potentiel redox (en millivolts)

Cette équation montre bien l'influence du sol sur l'âge à la première défaillance. Ainsi une augmentation de résistivité du sol de 1000 Ohm-cm fait croître l'âge de première défaillance de 28 ans. Ici encore le diamètre n'a pas été pris en compte dans l'équation.

2.2.2.3. Massachusetts Institute of Technology (MIT) [Andreou et al., 1987][Andreou, 1986][Marks et al., 1987]

Le MIT a développé un modèle probabiliste de prédiction des défaillances à partir de réseaux situés à New Haven et Cincinnati. Pour cette étude des données informant sur les caractéristiques des canalisations et leur environnement ont été collectées. Au total 1391 tronçons de canalisations ont été répertoriés.

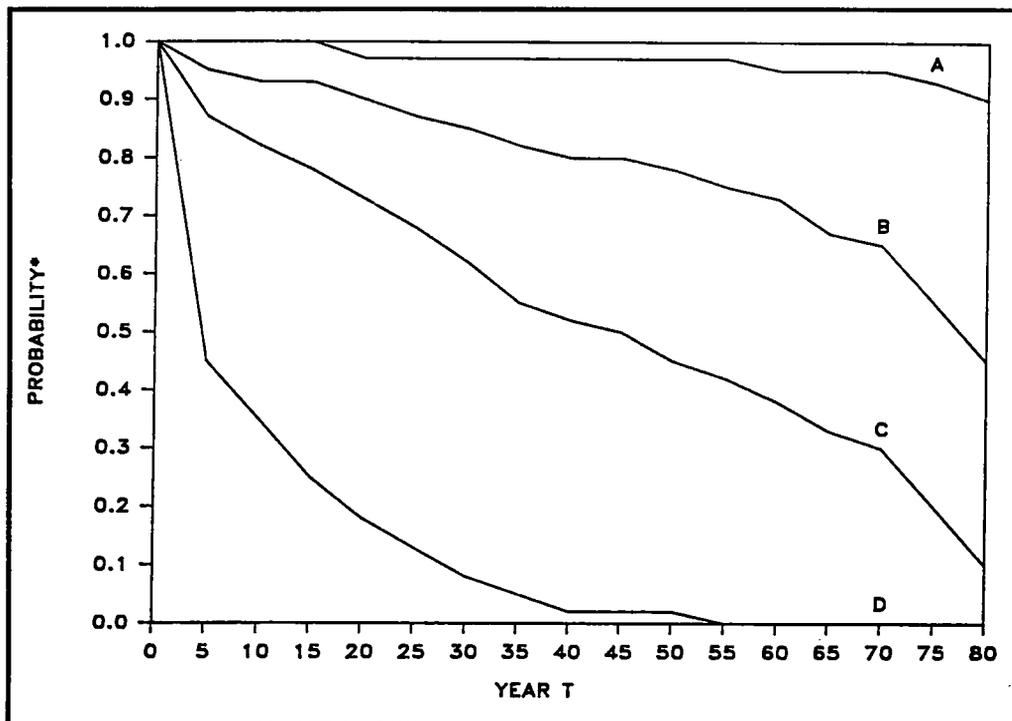
Le modèle utilisé est le modèle des risques proportionnels, appelé aussi modèle de Cox, qui permet de donner une "fonction de survie" de la canalisation ainsi qu'une fonction de risque, en fonction des différents facteurs recueillis.

Les relations suivantes ont pu être mises en évidence :

- * Une augmentation de pression est un bon indicateur de la fonction de risque lorsque la canalisation n'a pas eu de casse antérieure,
- * Un âge assez faible à la deuxième défaillance indique une forte probabilité de futures casses,
- * La période au cours de laquelle a été posée la canalisation est importante dans la détermination de la probabilité de défaillance.
- * Chaque défaillance qui a déjà eu lieu triple la probabilité d'apparition d'une nouvelle casse.
- * Un tronçon plus long a tendance à avoir proportionnellement moins de défaillances qu'un tronçon plus court, un tronçon étant homogène par le diamètre et séparé d'un autre tronçon par des particularités hydrauliques (pompes, vannes, croisements avec d'autres canalisations, ...).
- * Le risque de première casse diminue avec l'âge de la canalisation jusqu'à un âge d'environ 30 ans, puis augmente brutalement.

La figure 10 montre quatre courbes de survie différentes pour des canalisations de caractéristiques bien précises.

Ce modèle de prédiction semble être bien adapté à un modèle de prévision des défaillances des canalisations, car il permet de mettre en évidence l'influence des différents facteurs pris en compte et donne en plus des probabilités de défaillance. Ces probabilités pourront ainsi être utilisées dans des modèles économiques de prévision du renouvellement.



* Probabilité pour que la conduite n'ait pas de défaillance pendant T années depuis la dernière casse

Courbe A : 30m de canalisations installées entre 1930 et 1935, se trouvant dans une zone rurale et qui ont subi deux casses, la dernière ayant eu lieu au moins 77 ans après la date d'installation.

Courbe B : 30m de canalisations, sans casse antérieure, installée après 1950, se trouvant dans une zone rurale et subissant de très importantes pressions internes de l'ordre de 173 psi.

Courbe C : 30m de canalisations, se trouvant partiellement dans une zone de développement maximum, ayant subi deux casses antérieures la dernière casse ayant eu lieu 4 ans après la date de pose.

Courbe D : 4500m de canalisations, se trouvant entièrement dans une zone de développement maximal, ayant subi deux défaillances 4 ans après la date d'installation.

Figure 10 : Exemples de courbes de survie de conduites d'eau potable (New Haven) [Andreou et al., 1987]

2.3. Choix du modèle

Dans la suite de l'étude c'est un modèle statistique probabiliste qui a été choisi. Ce choix a été fait pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, comme on l'a vu précédemment les modèles statistiques permettent de prendre en compte un plus grand nombre de facteurs, ce qui est important, vu la longue liste des causes des défaillances. Ces facteurs peuvent d'ailleurs être qualitatifs, comme par exemple le type de développement en surface (industriel, résidentiel,...).

Ensuite un modèle physique trop théorique ne permettrait pas de prendre en compte la spécificité de certains services, tels que les facteurs géographiques, la façon de travailler dans la région, la pluviométrie, l'existence de nappes plus ou moins profondes. Au contraire un modèle statistique, par définition, utilise des données de terrain et permet de prendre en compte de type de facteur.

Parmi les modèles statistiques c'est un modèle du même type que celui du M.I.T. qui a été choisi et adapté aux réseaux français, ceci du fait des données bien spécifiques qui ont été recueillies. Ces données sont présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Les données disponibles

| | |
|---|----|
| 3.1. LES DONNEES RECHERCHEES | 51 |
| 3.2. PRESENTATION GENERALE DES RESEAUX..... | 52 |
| 3.2.1. Le réseau de la Lyonnaise des Eaux-Dumez à Bordeaux..... | 52 |
| 3.2.1.1. Les Ressources..... | 52 |
| 3.2.1.2. Structures de la distribution | 52 |
| 3.2.1.3. Caractéristiques du réseau..... | 54 |
| 3.2.2. Le réseau de la Compagnie des Eaux de la Banlieue de Paris (CEB) | 56 |
| 3.2.2.1. Les ressources | 56 |
| 3.2.2.2. Structure de la distribution..... | 56 |
| 3.2.2.3. Linéaire du réseau | 56 |
| 3.2.3. Les réseaux des syndicats d'eau du Kronthal et du Kochersberg..... | 57 |
| 3.3. LE RECUEIL DES DONNEES..... | 59 |
| 3.3.1. Le choix des conduites | 59 |
| 3.3.1.1. Réseau de la LED-Bordeaux..... | 59 |
| 3.3.1.2. Réseau de la CEB | 60 |
| 3.3.1.3. Syndicats du Kronthal et du Kochersberg | 61 |
| 3.3.2. Les données concernant les conduites..... | 61 |
| 3.3.3. Les données concernant les défaillances | 65 |
| 3.3.4. Création de fichiers de base de données : fichier "Tronçons" et fichier "Défaillances" | 68 |
| 3.3.4.1. Le fichier "tronçons" | 69 |
| 3.3.4.2. Fichier "défaillances" | 69 |
| 3.3.4.3. Contraintes conduisant à l'élimination de certains tronçons ou défaillances..... | 70 |
| 3.4. DESCRIPTION DES TRONÇONS ET DES DEFAILLANCES | 71 |
| 3.5. LA SPECIFICITE DES DONNEES | 74 |

Le chapitre précédent a permis de retenir un modèle statistique, car ce type de modèle semble le mieux approprié à la prévision des défaillances sur les réseaux d'eau potable. Après avoir défini quels types de données sont nécessaires, nous présenterons de manière générale les réseaux choisis, puis nous verrons quelles données ont été recueillies. Enfin nous montrerons que ces données ont une certaine spécificité d'un point de vue statistique.

3.1. Les données recherchées

Rappelons que l'objectif de l'étude est de connaître le vieillissement des conduites d'eau potable en rapport avec l'apparition des défaillances, puis de définir quels facteurs, définis dans le chapitre précédent, sont les plus influents sur ce vieillissement.

Les données que l'on recherche doivent donc concerner des services d'eau ayant conservé trace sur une période suffisamment longue de tous les travaux de maintenance et en particulier de toutes les casses et fuites réparées sur les conduites. Afin de bien comprendre le vieillissement, cette durée doit être du même ordre que la durée de vie d'une canalisation.

Enfin afin de bien connaître l'influence des facteurs de défaillances, les données concernant ces facteurs doivent pouvoir être recueillies assez facilement et doivent, sur les réseaux étudiés, avoir une certaine variabilité.

C'est en fait la première contrainte qui a guidé notre choix, car peu de réseaux possèdent des historiques de maintenance assez longs, alors que les données concernant les caractéristiques des conduites sont assez bien connues.

Le choix s'est donc porté sur deux réseaux urbains et deux syndicats ruraux du Bas-Rhin.

Les réseaux urbains sont le réseau de la Lyonnaise des Eaux-Dumez (LED) sur la Communauté Urbaine de Bordeaux et le réseau de la Compagnie des Eaux de la Banlieue de Paris (CEB) sur les communes de la Presqu'île de Gennevilliers. Pour ces deux services, les données concernant les défaillances sont conservées depuis 40 et 54 ans respectivement.

Les deux réseaux ruraux concernent les syndicats du Kronthal et du Kochersberg et sont gérés par le Service Départemental d'Eau et d'Assainissement du Bas-Rhin (SDEA). Les données y sont conservées depuis 17 ans. Même si elle peut paraître faible cette durée est relativement importante pour un réseau rural.

3.2. Présentation générale des réseaux

3.2.1. Le réseau de la Lyonnaise des Eaux-Dumez à Bordeaux [Eisenbeis, 1991]

Le Service des Eaux intervient dans 22 des 27 communes de la Communauté Urbaine de Bordeaux et la Lyonnaise des Eaux-Dumez en est le gestionnaire depuis 1969. La population desservie est de l'ordre de 580.000 habitants soit environ la moitié du département de la Gironde (Cf carte annexe 3).

3.2.1.1. Les Ressources

Les ressources sont disséminées en grande partie dans l'agglomération bordelaise et sont constituées de :

- **Sources et captages** : 12 unités dont le débit s'échelonne entre 120 et 1200 m³/h et qui sont situées à l'émergence de nappes issues de calcaires de l'oligocène supérieur.
- **Forages** : plus de 100 unités, sollicitant différents niveaux aquifères appartenant à trois grands étages stratigraphiques.

Une proportion importante de pompes de forage refoule directement dans le réseau, les sources et autres forages sont reprises par des usines élévatoires qui permettent notamment de pomper l'eau d'un étage inférieur à un étage supérieur du réseau.

Grâce à ces ressources, le Service des Eaux pourrait faire face à une demande de pointe de 350.000 m³ d'eau par jour.

3.2.1.2. Structures de la distribution

L'ensemble du réseau est naturellement divisé par la Garonne qui traverse la Communauté Urbaine de Bordeaux. On distinguera donc les deux rives de la Garonne.

- Rive gauche de la Garonne

Cette entité comprend la totalité de la ville de Bordeaux, y compris le quartier de Bordeaux-Bastide sur la rive droite, et toutes les communes situées à l'ouest du fleuve. Cette configuration nécessite la mise en place de trois étages de distribution.

** Cote 40-Ville de Bordeaux*

Deux aqueducs mis en service au 19^{ème} siècle amènent l'eau jusqu'à des usines de refoulement situées sur la commune de Bordeaux. Ces usines permettent le refoulement de 90.000 m³/j.

Une autre usine capte les eaux d'une galerie souterraine et refoule environ 15.000 m³/j. D'autre part des forages profonds de Bordeaux-Nord peuvent refouler directement dans le réseau.

** Cote 60-Périphérie et Nord-Ouest de Bordeaux*

L'aqueduc de Cap-Bos, construit au début du siècle, collecte des eaux de source et de captage et les amène gravitairement au réservoir de Gajac, d'où une usine refoule dans le réseau une moyenne de 12.000 m³/j. D'autre part certaines stations relèvent, suivant les besoins, de l'eau prélevée sur la cote 40.

Des châteaux d'eau assurent l'équilibre de l'ensemble.

** Cote 75-Grande périphérie au Sud-Ouest de Bordeaux*

L'usine de Cazeaux refoule les eaux de 4 forages tandis que l'usine de Cap-Roux peut relever l'eau de la cote 40.

- Rive droite de la Garonne

Cette partie est divisée en deux groupes de 3 communes.

** Groupe Floirac-Cenon-Lormont*

Ces trois communes sont alimentées uniquement par des forages profonds. Les fortes variations d'altitude ont nécessité la constitution de quatre étages de distribution : Cote 37, Cote 50, Cote 76, Cote 100.

** Groupe Ambès-Saint Louis de Montferrand-Saint Vincent de Paul*

Constituant la presqu'île du Bec d'Ambès, ces trois communes situées en terrain plat et bas sont alimentées par deux forages refoulant dans les trois réservoirs des trois communes.

3.2.1.3. Caractéristiques du réseau

- Longueur du réseau

La longueur totale du réseau était à la fin du mois de décembre 1990 de 2.960 km. Les tableaux 3 et 4 présentent la répartition des canalisations en fonction des diamètres et des différents secteurs.

Tableau 3 : Répartition des canalisations par diamètre (décembre 1990)

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-----|------|------|------|-------|------|------|
| Diamètre (mm) | ≤60 | 80 | 100 | 110 | 125 | 135 | 150 | 162 | 175 |
| Longueurs (km) | 528,7 | 199,1 | 787 | 56,9 | 79,8 | 32,9 | 461,1 | 25,7 | 16,1 |

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-------|-----|-----|-------|------|-----|------|-------|--------|
| Diamètre (mm) | 200 | 216 | 225 | 250 | 300 | 350 | 400 | >400 | Total |
| Longueurs (km) | 210,9 | 7,3 | 0,2 | 192,5 | 73,3 | 4,1 | 58,1 | 116,3 | 2903,9 |

Tableau 4 : Répartition des canalisations par secteur (décembre 1990)

| | | | | | |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| | Secteur 1 | Secteur 2 | Secteur 3 | Secteur 4 | Total |
| Longueurs (km) | 438,6 | 1030,4 | 371,7 | 1063,2 | 2959 |

- Date de pose

L'âge moyen des différentes conduites ne peut être déterminé de manière très précise pour tout le réseau. Les données concernant l'année de pose existent :

- Depuis 1970 pour les communes entrant dans la Communauté Urbaine de Bordeaux à cette date (Parempuyre, Saint Aubin du Médoc,...);
- Depuis 1951 pour celles faisant déjà partie du Service des Eaux appelé à l'origine Syndicat Intercommunal de l'Agglomération Bordelaise pour l'Adduction et la Distribution de l'Eau et déjà géré par la Lyonnaise des Eaux-Dumez;
- Depuis environ 1930 pour certaines communes de la proche banlieue de Bordeaux.

Cependant connaissant le développement de l'agglomération bordelaise et de sa banlieue on peut estimer selon les secteurs la date de pose des canalisations d'eau potable.

Ainsi, la plus grande partie du réseau situé au centre de Bordeaux est assez âgé et date de la fin du siècle dernier ou du début du vingtième. Les communes de proche banlieue telles Mérignac, Caudéran, le Bouscat, Bruges, Pessac ont commencé à se développer vers le début du siècle. Leur développement se prolonge d'ailleurs jusqu'à aujourd'hui en raison de la construction de nombreux lotissements, qui a entraîné dans ces communes l'extension du réseau.

Puis se sont développées des communes un peu plus éloignées de Bordeaux telles Saint Aubin du Médoc ou Parempuyre, qui étaient à l'origine plus rurales et dont l'extension a eu lieu vers la fin des années soixante-début des années soixante-dix.

Il est à noter qu'en général les canalisations de diamètre plus petit, comme le 60 ou le 80 mm, sont plus âgées car elles correspondent à une époque où la densité de population était plus faible. Malgré les importants travaux de renforcement, il en existe encore beaucoup. Le diamètre quatre-vingt n'est d'ailleurs plus utilisé et le soixante n'est actuellement posé que dans les nouveaux lotissements.

- Matériau

Le matériau des canalisations n'est accessible que dans les archives répertoriant les travaux de pose. Ces données sont présentées dans le chapitre suivant mais on peut d'ores et déjà remarquer que le réseau est constitué de canalisations en fonte dans une proportion proche de 100 % pour ce qui est des diamètres supérieurs à 80mm.

Seules les canalisations de diamètre inférieur ou égal à 60 sont depuis une quinzaine d'années en PVC.

On peut également distinguer les canalisations en fonte grise et en fonte ductile. D'après le fournisseur, la fabrication de la fonte ductile a commencé vers 1960. Cependant comme le Service des Eaux possédait à l'époque un stock important de canalisations, la date de passage de la fonte grise à la fonte ductile est beaucoup plus floue et se situerait aux environs des années 64-66.

3.2.2. Le réseau de la Compagnie des Eaux de la Banlieue de Paris (CEB)

La Compagnie des Eaux de la Banlieue de Paris gère le service public de la distribution d'eau du Syndicat des communes de la Presqu'île de Gennevilliers, soit au total neuf communes : Asnières, Bois-Colombes, Colombes, Courbevoie, Gennevilliers, La Garenne-Colombes, Nanterre, Suresnes et Villeneuve la Garenne. Elle est également concessionnaire de la ville de Rueil-Malmaison. La population desservie est de 500 000 habitants, ce qui correspond à environ 50 000 branchements pour 1000 km de canalisations.

3.2.2.1. Les ressources

L'eau distribuée dans la Presqu'île de Gennevilliers, soit environ 50 millions de m³ par an, provient de deux types de ressources :

- le captage d'eaux souterraines provenant de Aubergenville, Croissy et Villeneuve la Garenne,
- la Seine, prise au niveau de Suresnes.

3.2.2.2. Structure de la distribution

Les eaux provenant de la Seine, d'Aubergenville et de Croissy, sont traitées à l'usine du Mont-Valérien, située à Rueil-Malmaison. Elles sont ensuite distribuées :

- soit gravitairement vers Suresnes, Nanterre, Courbevoie, la Garenne et une partie de Colombes, Bois-Colombes et Asnières,
- soit par refoulement vers Rueil-Malmaison.

Les eaux provenant du captage de Villeneuve sont traitées puis refoulées vers Villeneuve, Gennevilliers et l'autre partie de Colombes, Bois-Colombes et Asnières.

3.2.2.3. Linéaire du réseau

La répartition des conduites par diamètre se trouve dans le tableau 5.

Tableau 5 : Répartition par diamètre sur le réseau de la CEB

| | | | | | | | | | | |
|------------------|------|------|------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|
| Diamètre | ≤60 | 63 | 80 | 100 | 125 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| Longueur (km) | 96,3 | 5,7 | 26,3 | 306,2 | 17,6 | 182,5 | 138,4 | 48,7 | 47,7 | 8,6 |
| Diamètre | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1200 | 1600 | Total |
| Longueur (km) | 18,2 | 36,7 | 17,4 | 2,5 | 22,0 | 0,9 | 5,8 | 3,6 | 1,5 | 986,5 |

Concernant la répartition par commune, on peut la retrouver dans le tableau 6.

Tableau 6 : Répartition par commune sur le réseau de la CEB

| | | | | | | |
|------------------|----------|---------------|-----------------------|------------|-----------------|---------------------|
| Commune | Asnières | Bois-Colombes | Colombes | Courbevoie | Gennevilliers | La Garenne-Colombes |
| Longueur (km) | 108,1 | 40,9 | 145,8 | 90,4 | 104,4 | 50,1 |
| Commune | Nanterre | Suresnes | Villeneuve la Garenne | Puteaux | Rueil-Malmaison | Total |
| Longueur (km) | 174,1 | 78,7 | 32,3 | 7,2 | 154,6 | 986,5 |

Là encore la distinction entre fonte grise et fonte ductile ne peut se faire qu'en fonction de la date de pose de la conduite. On peut évaluer la date limite comme se situant entre 1960 et 1966.

3.2.3. Les réseaux des syndicats d'eau du Kronthal et du Kochersberg [Zedgui, 1993]

Le syndicat du Kronthal regroupe 13 communes rurales du département du Bas-Rhin. Il se situe au pied des Vosges. La population concernée est de 9619 habitants (recensement 1990).

Le syndicat du Kochersberg est lui nettement plus grand. Il regroupe 39 communes du département, pour une population totale de 22119 habitants en 1990.

Le Syndicat du Kronthal est alimenté à partir de quatre puits implantés de part et d'autre de la rivière Mossig, qui ont produit en 1991 un peu plus de un million de m³. Le Syndicat du

Kochersberg est alimenté par 9 points d'eau (4 sources et 5 puits) qui ont fourni une production de deux millions de m³ en 1991.

Sur le Syndicat du Kronthal comme sur celui du Kochersberg, la distribution se fait gravitairement à partir de réservoirs principaux. Le linéaire de canalisations est de 90 km pour le Syndicat du Kronthal et de 190 km pour le Kochersberg. La répartition par diamètre se trouve dans le tableau 7. La répartition par matériau (PVC-Fonte) se trouve dans le tableau 8.

Tableau 7 : Répartition des diamètres sur les syndicats du Bas-Rhin

| Diamètre (mm) | Longueur (m) | | |
|------------------|-----------------|---------------|---------------|
| | Kronthal | Kochersberg | Total |
| ≤60 | 930 | 4700 | 5630 |
| 70 | 0 | 1425 | 1425 |
| 80 | 18066 | 28255 | 46321 |
| 90 | 4117 | 9440 | 13557 |
| 100 | 7444 | 30228 | 37672 |
| 110 | 18707 | 38786 | 57493 |
| 125 | 10863 | 36301 | 47164 |
| 140 | 140 | 0 | 140 |
| 150 | 21563 | 28425 | 49988 |
| 160 | 342 | 0 | 342 |
| 175 | 850 | 0 | 850 |
| 200 | 4100 | 4980 | 9080 |
| 250 | 2964 | 4980 | 7944 |
| 300 | 0 | 5630 | 5630 |
| Total | 90086 | 193150 | 283236 |

Tableau 8 : Répartition des matériaux sur les syndicats du Bas-Rhin

| Matériau | Longueur (m) | | |
|--------------|--------------|---------------|---------------|
| | Kronthal | Kochersberg | Total |
| PVC | 22854 | 50151 | 73005 |
| Fonte | 67232 | 138449 | 205681 |
| Total | 90086 | 188600 | 278686 |

3.3. Le recueil des données

3.3.1. Le choix des conduites

Vu le linéaire concernant ces trois réseaux (un peu plus de 4000 km), il n'était pas possible de recueillir les données sur les réseaux complets. Un choix a donc été fait concernant les différents services.

3.3.1.1. Réseau de la LED-Bordeaux

Pour le réseau de la LED-Bordeaux, l'étude a été réalisée sur l'ancien secteur 4, qui regroupe une dizaine de communes. Ces communes, toutes situées sur la rive gauche de la Garonne au Nord-Ouest de Bordeaux, sont les suivantes : Blanquefort, le Bouscat, Bruges, Eysines, le Haillan, Mérignac, Parempuyre, le Taillan-Médoc, Saint-Médard sur Jalles et Saint-Aubin du Médoc. La population concernée est d'environ 100.000 habitants.

Ce secteur a été choisi en raison de sa superficie (environ un tiers de celle de la Communauté Urbaine de Bordeaux), qui permet d'obtenir une certaine variabilité vis-à-vis de différents facteurs. On aura ainsi des sols marécageux près de la Garonne (Blanquefort, Parempuyre) et des sols sableux plus à l'ouest (Saint-Aubin, Saint-Médard). De même les densités de population ne sont pas les mêmes selon les communes, celles-là diminuant en s'éloignant de Bordeaux.

Le réseau concerné a une longueur totale de 1.063 km, les longueurs par commune se trouvant dans le tableau 9.

Tableau 9 : Répartition des canalisations par commune du secteur 4 (décembre 1990)

| | | | | | | |
|-------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| Communes Longueurs (km) | Blanquefort 115,4 | Le Bouscat 92,5 | Bruges 68,6 | Eysines 110,9 | Le Haillan 53,1 | Mérignac 293,1 |
| Communes Longueurs (km) | Parempuyre 43,6 | Saint-Aubin 50,8 | Saint-Médard 171,4 | Le Taillan 63,7 | Total 1063,2 | |

Sur ce secteur deux diamètres principaux ont été choisis. Ce sont les diamètres 60 et 150mm; tout d'abord parce que leur longueur n'est pas négligeable (125 km pour le premier, 215 pour le second), ensuite parce que selon le fournisseur, ces deux diamètres réagissent de manière différente aux contraintes, enfin parce que le diamètre 60 est composé de canalisations en fonte et en PVC, ce qui permettra éventuellement d'estimer l'influence du facteur matériau.

Deux autres diamètres ont également été pris en compte sur la commune de Mérignac, qui est la plus grande du secteur. Ces diamètres sont le 80 et le 100 mm.

3.3.1.2. Réseau de la CEB

L'étude sur la LED-Bordeaux avait été réalisée préalablement à celle de la CEB et des deux syndicats du Bas-Rhin. A la suite des résultats obtenus et présentés dans le chapitre 5, il a semblé opportun d'étudier sur un plus petit secteur tous les diamètres. C'est pourquoi le choix a été fait, concernant la CEB, d'étudier moins de communes, mais sur tous les diamètres.

L'étude a été réalisée sur quatre communes du réseau : Rueil-Malmaison, Colombes, Gennevilliers, Villeneuve la Garenne. Ces quatre communes ont été choisies en raison de leur variabilité vis-à-vis de l'origine de l'eau et du type de sol (remblais du côté de Gennevilliers et Villeneuve, sable pour Colombes et Rueil-Malmaison).

Le réseau concerné a une longueur totale de 440 km, les longueurs par commune étant représentées dans le tableau 10.

Tableau 10 : Répartition des conduites selon les communes étudiées sur la CEB

| COMMUNES | LONGUEURS (km) |
|-----------------------|----------------|
| Colombes | 145,9 |
| Gennevilliers | 116,9 |
| Rueil-Malmaison | 145,4 |
| Villeneuve-la-Garenne | 32,3 |
| TOTAL | 440,50 |

Pour cette étude tous les diamètres de canalisations, excepté le diamètre 40 qui peut être confondu avec un branchement, ont été pris en compte. La répartition par diamètre se trouve dans le tableau 11.

Tableau 11 : Répartition des conduites selon le diamètre sur la CEB

| Diamètre (mm) | Longueur (km) | Diamètre (mm) | Longueur (km) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 40 | 4,06 | 250 | 21,49 |
| 60 | 53,56 | 300 | 24,30 |
| 63 | 2,07 | 350 | 1,37 |
| 80 | 15,50 | 400 | 6,49 |
| 100 | 133,47 | 500 | 11,45 |
| 125 | 7,64 | 600 | 9,14 |
| 150 | 77,20 | 800 | 3,72 |
| 200 | 67,47 | 1000 | 1,19 |
| | | TOTAL | 440,50 |

Les données par matériau sont les suivantes :

Tableau 12 : Répartition des conduites selon le matériau sur la CEB

| Matériau | Longueurs (km) | % |
|--------------|----------------|-------|
| Acier | 0,63 | 0,14 |
| Fonte | 432,83 | 98,72 |
| Polyéthylène | 4,98 | 1,14 |

3.3.1.3. Syndicats du Kronthal et du Kochersberg

Etant donné le linéaire plus faible, la totalité des réseaux a été étudié, soit environ 280 km de conduites.

3.3.2. Les données concernant les conduites

La nature et l'origine des données sont différentes selon les services. On les retrouve dans les tableaux suivants :

- Le diamètre et la longueur des tronçons

| LED-Bordeaux | CEB | Bas-Rhin |
|--|---|-------------------------------|
| Plans de réseaux au 10.000 ^{ème} et au 1.000 ^{ème} | Plans au 200 ^{ème} et base de données informatisée | Plans au 2.000 ^{ème} |

- La date de pose

| LED-Bordeaux | CEB | Bas-Rhin |
|--|---|--|
| Classeurs répertoriant les travaux de pose existant depuis 1970 pour les communes de Parempuyre et de Saint Aubin et depuis 1951 pour les autres | Fichier de base de données informatisée sur les canalisations | Attechements des travaux de pose (depuis 1976) |

- Le matériau de canalisation

| LED-Bordeaux | CEB | Bas-Rhin |
|---|---|-----------------------|
| Plans ou classeurs répertoriant les travaux de pose | Fichier de base de données informatisée sur les canalisations | Plans ou attechements |

- Date de passage à des nouveaux matériaux

Cette date peut être importante car elle permettra de comparer les différents matériaux : fonte grise/fonte ductile, joint au plomb/joint express, revêtement intérieur, revêtement extérieur. Les dates d'apparition de ces nouveaux matériaux, données par Pont-à-Mousson, sont les suivantes :

* Joints

1 : Joints au plomb

Ce type de joint figurait encore au catalogue en 1963 et les derniers stocks ont été liquidés en 1969.

2 : Joints mécaniques (express)

Les premiers joints mécaniques sont apparus au catalogue en 1936 tandis que le joint EXPRESS n'apparaît qu'en 1948.

3 : Joints automatiques (STANDARD 2GS, RAPID)

La mise sur le marché date de 1958.

* Revêtements

1 : Revêtement intérieur en mortier de ciment

Ce type de revêtement a été introduit entre 1957 et 1961.

2 : Revêtement extérieur en zinc

Il a été utilisé pour la première fois en 1958 pour les tuyaux en fonte grise et en 1961 pour les tuyaux en fonte ductile.

* Fonte

Les tuyaux en fonte ductile (fonte GS) apparaissent au catalogue en 1963, tandis que la fabrication de la fonte grise (fonte GL) est totalement arrêtée à l'usine en 1971.

On peut donc voir que les changements de technologie ont surtout eu lieu au début des années 60. Cependant à l'époque les problèmes de stockage, déjà cités auparavant, ne permettent pas de donner une date bien précise. On peut cependant situer ce changement aux alentours des années 64-66.

- Le sol et sa corrosivité

| LED-Bordeaux | CEB | Bas-Rhin |
|--|---------------------------------|---|
| Carte de corrosivité des sols et avis du chef du secteur | Avis des inspecteurs de réseaux | Carte géologique au 50.000 ^{ème} |

La carte de corrosivité des sols de la LED-Bordeaux provient d'une étude concernant "les risques de corrosion des canalisations d'eau potable sur le territoire de la Communauté Urbaine de Bordeaux". Cette étude a été réalisée en août 1989 par la

Lyonnaise des Eaux-Dumez et avait pour objet de caractériser les différents sols de la Communauté Urbaine de Bordeaux selon leur corrosivité, soit par des caractéristiques évidentes de corrosivité, telles une inondabilité importante ou leur nature propre, soit à partir de campagnes de mesures de la résistivité.

Différentes classes de corrosivité de sol ont ainsi pu être établies et tracées sur un plan au 25.000^{ème}. Malheureusement les mesures de résistivité n'ont pu être prises sur tout le terrain de la Communauté Urbaine de Bordeaux, les relevés ayant eu lieu lors d'une période de forte sécheresse.

Les différentes classes de corrosivité sont les suivantes :

*** Risque de corrosion important :**

Sol tourbeux hydromorphe,

Tourbes,

Palus et bords de Garonne,

Zones de remblais et de décharge d'ordures ménagères,

Argiles bleues-grises de la nappe alluviale,

*** Risque moyen de corrosion :**

Argilo-calcaire tertiaire,

*** Risque faible de corrosion :**

Remblais sablo-graveleux.

Ces données ont donc pu être utilisées pour une partie du secteur étudié sur la LED-Bordeaux.

Sur les deux autres réseaux, ces données sont beaucoup moins précises car elles proviennent soit de cartes géologiques qui ne reflètent pas forcément la corrosivité du sol, soit des inspecteurs de réseaux, dont l'avis est forcément subjectif. Dans la suite de l'étude les sols seront caractérisés de la manière suivante :

* Sol à tendance argileuse, supposé corrosif,

* Sol à tendance sablo-graveleuse, supposé non corrosif.

- Trafic

| LED-Bordeaux | CEB | Bas-Rhin |
|--|---|--|
| Comptages du service voirie de la Communauté Urbaine de Bordeaux | Carte de comptage sur les routes départementales et nationales des Hauts de Seine provenant de la DDE | Carte de comptage sur les routes départementales et nationales du Bas-Rhin provenant de la DDE |

Les données sur Bordeaux n'ont pu être obtenues que pour un certain nombre de rues, qui ont fait l'objet d'études et pour lesquelles il y avait des problèmes de circulation et de signalisation. On peut supposer que les rues pour lesquelles les données sont disponibles correspondent à celles qui connaissent le plus fort trafic.

- Pressions de service

| LED-Bordeaux | CEB | Bas-Rhin |
|--|--|---|
| Mesures faites par les sapeurs-pompiers et calcul résultant de la modélisation hydraulique du réseau | Mesures de pression en quelques points du réseau | Calcul provenant de la modélisation hydraulique du réseau |

- Nature de l'eau

| LED-Bordeaux | CEB | Bas-Rhin |
|--------------------|--------------------|----------|
| Analyses chimiques | Analyses chimiques | ** |

** signifie que cette donnée n'a pu être recueillie sur le service.

Sur Bordeaux, les analyses chimiques des eaux provenant des différentes sources concernées par le secteur ont pu être obtenues, analyses contenant notamment le taux d'oxygène dissous, le pH et la conductivité de l'eau. Cependant les données entre les différents forages ne diffèrent que très peu notamment pour le taux d'oxygène dissous, qui, d'après certaines études, apparaît comme le facteur le plus influent. Il n'a donc pas été possible d'en tenir compte. D'autre part les eaux provenant des différents réservoirs se mêlent dans le réseau sans que l'on connaisse les zones limites.

Sur le secteur étudié de la CEB, les zones alimentées par les deux ressources sont plus nettes. La zone Nord (Villeneuve, Gennevilliers, une partie de Colombes) est alimentée par le captage de Villeneuve, la zone Sud (Rueil-Malmaison et l'autre partie de Colombes) par les autres captages et pour une partie par l'eau de Seine. Les eaux des deux origines se différencient surtout par leur teneur en sulfate.

- Nombre d'abonnés par unité de longueur

Cette donnée a pu être obtenue sur Bordeaux en comptant le nombre d'abonnés par rue à partir des fichiers d'abonnés du Service des Eaux et en mesurant la longueur de chaque rue, donnée qui semble bien caractériser l'environnement de la conduite, notamment le taux d'activité autour de celle-ci, ainsi que la densité de population.

- Emplacement de la conduite par rapport à la chaussée

| LED-Bordeaux | CEB | Bas-Rhin |
|---|---|------------------------|
| Carnets d'emplacement des vannes et autres organes hydrauliques | Plans au 200 ^{ème} et Système d'Information Géographique | Visites sur le terrain |

Ce facteur caractérise le fait que la conduite se trouve sous la chaussée ou le trottoir.

- Conditions de pose et protection

Des données concernant la profondeur de la canalisation et son lit de pose n'ont pu être obtenues.

Sur Bordeaux, on peut simplement dire que cette profondeur est de l'ordre de 1m et qu'un plus grand soin a été apporté au lit de pose et à sa profondeur à partir des années 70. Sur la CEB, on sait que depuis le début des années 80 toutes les conduites sont posées avec une protection extérieure en polyéthylène.

Comme on le voit les données obtenues sont différentes selon les services. De plus elles ne sont pas toujours obtenues de la même manière, notamment pour les deux services ruraux où les données sont moins précises.

3.3.3. Les données concernant les défaillances

Rappelons que les défaillances considérées ici sont les fuites ou casses ayant engendré une réparation au niveau du joint ou au niveau du tuyau, ce qui exclut les fuites diffuses.

Sur Bordeaux, la conservation des données concernant les défaillances s'est faite de deux manières différentes :

- dans des livres annuels de 1955 à 1969 dans lesquels les défaillances sont classées par commune ceci pour toutes les communes excepté Pempuyre et Saint Aubin,

- dans des fiches classées par rue et par commune depuis 1970 pour toutes les communes du secteur.

Sur la CEB, les données concernant les défaillances ont été obtenues à partir de différentes sources :

- un fichier informatisé répertoriant tous les travaux de maintenance existant depuis 1985, parmi lesquels sont différenciées les fuites sur branchement, fuites sur conduites, etc...

- des cahiers annuels de maintenance, classés par commune, depuis 1973,

- des dossiers de rue, dans lesquels sont gardés tous les événements de la vie de la conduite dans la rue (fuites, plaintes, travaux neufs,...) depuis 1938.

Sur les deux syndicats du Bas-Rhin, les défaillances sont conservées dans des récapitulatifs annuels classés par commune.

La figure 11 présente une des fiches conservées sur Bordeaux.

Dans ces livres et fiches sont conservées les défaillances à la fois sur les canalisations et sur les branchements, ainsi que les poses de compteur et tout autre travail d'entretien. Un premier tri a donc été nécessaire pour retrouver les données recherchées.

Comme on peut le voir sur la fiche, un vocabulaire spécifique et des abréviations ont été employés et les différentes défaillances ont été distinguées par les termes suivants : "Casse tuyau Ø 60", "fuite sur canalisation", "1 manchon 2 (ou 3) pièces", "1 manchon de réparation", "1 MR", "joint rematé sur diamètre 150", "remplacement joint sur canalisation", "1 MD", "1 coupe cylindrique", "1 CC", "1m de tuyau", etc.

Il n'existe apparemment aucune norme concernant la description des différents travaux d'entretien ou de réparation. C'est pourquoi il est parfois impossible de distinguer une réparation effectuée sur un tuyau ou sur un branchement ou même, lorsque deux conduites existent sur une même rue, de distinguer la canalisation touchée, le diamètre n'étant pas toujours indiqué.

En résumé, les fiches et cahiers donnent sur les défaillances les renseignements suivants :

- la rue et la commune où a eu lieu la défaillance (et éventuellement le numéro de rue ou l'emplacement de la défaillance),

Aristide Briand

Go. Edouard
1/2 font G
1/2 Eternit G

Rue Baudin - ff. J. Guéde

| Nos | Objet de la Réparation | Date d'exécution | Équipes | OBSERVATIONS |
|-----|------------------------|------------------|-----------|--|
| 15 | C. 22512 V. 14940 | 9.4.70 | Barrières | Chant. E. G. 476. 1 RACIS. 17.10.20 (LAVILLE) |
| 19 | V. 4964 | 14.4.70 | " | Tuyau canal. 4.60. Eternit |
| 19 | B. 2838 | 26.5.70 | Chiquet. | Fermeture - Payé |
| 97 | V. 8612 | 29.5.70 | Barrières | Revenez Gibault |
| 104 | V. 8773 | 11.6.70 | ménier | 17.10.20. DECOBNE. |
| 21 | V. 3475 | 15.7.70 | Barrières | 17.10.15. Candélon |
| | V. 8846 | 21.7.70 | " | 17.10.30. groupe Selsou J. James |
| 9 | V. 6001 | 28.7.70 | " | 1 RACIS. |
| 125 | V. 6078 | 7.8.70 | Fancon. | 2 Soudure. P. 40. Cie Ballarin |
| | T. V. 6309 | 18.9.70 | " | 1 Annuaire. 01. P. école Jean James. Filles |
| 5A | C. 14518 | 19.9.70 | " | dep. 50. Reuil. 11.30 - 87407191 m. 2149 |
| | B. 33032 | - | " | Reuil. p. 2. Main. S. Bouzat. Douce. H. S. Municipal |

- 67 -

Figure 11 : Exemple de fiches de maintenance (LED-Bordeaux)

- la date de la défaillance,
 - le diamètre (éventuellement),
 - le type de réparation (éventuellement),
 - la cause de la défaillance (lorsque celle-ci est due à une entreprise tiers).
- Présentation des types de réparation

Afin de mieux définir la notion de défaillance, il est utile de présenter les différents types de réparation, décrits dans les fiches.

- Réparations concernant le tuyau

* Coupe cylindrique, remplacement par une certaine longueur de tuyau, utilisation de deux joints gibault ou deux manchons deux pièces (ou droits) ; ceci correspond à une casse longitudinale du tuyau.

* Manchon de réparation (ou manchon 3 pièces) ; ce type de manchon peut également être utilisé lorsqu'il y a eu cassure longitudinale et remplacer la réparation précédente.

* Manchon 2 pièces ou manchon droit ou joint gibault ; ceci correspond à une cassure transversale du tuyau.

- Réparations concernant les joints

Ces réparations sont de deux types, selon le type de joint employé :

* Matage de joints; ceci ne concerne que les joints au plomb.

* Remplacement de joints, pour les autres types de joint.

3.3.4. Création de fichiers de base de données : fichier "Tronçons" et fichier "Défaillances"

Le recueil des différentes données s'est effectué dans deux fichiers, un fichier "tronçons" et un fichier "défaillances" établis à partir du logiciel de base de données Paradox 4.0. Les deux fichiers sont présentés dans les paragraphes suivants.

3.3.4.1. Le fichier "tronçons"

Ce fichier a permis de répertorier les différents tronçons de canalisations ainsi que leurs caractéristiques.

- Définition du tronçon de base

Chaque tronçon a été défini de manière homogène vis-à-vis de certains facteurs caractérisant les canalisations, à savoir le diamètre, la date de pose, le matériau, le type de sol et son environnement immédiat. Chaque tronçon est rattaché à une rue et à une commune, ceci afin de pouvoir l'identifier dans la recherche des défaillances.

Ainsi, tout tronçon est donc individualisé par le nom de la rue et de la commune, puis par un numéro d'identifiant.

- Structure du fichier

Une fois définis les tronçons composant les fichiers, le recueil des caractéristiques peut avoir lieu. Les caractéristiques de chaque tronçon de canalisations sont les suivantes :

- Longueur,
- Diamètre,
- Année de pose,
- Matériau,
- Type de sol,
- Trafic,
- Pression de service,
- Origine et qualité de l'eau,
- Nombre d'abonnés par unité de longueur.

Le tableau 13 représente les données disponibles dans chacun des services.

3.3.4.2. Fichier "défaillances"

Avant de commencer l'analyse il est utile de rappeler la définition du mot "*défaillance*" utilisé dans l'étude. Une défaillance correspond à une *fuite au niveau de la canalisation entraînant une réparation soit du joint de la conduite, soit du tuyau même.*

Tableau 13 : Caractéristiques des conduites prises en compte sur les différents services.

| FICHIER TRONCONS | | | |
|---------------------------|--------------|-----|----------|
| | LED-Bordeaux | CEB | Bas-Rhin |
| Numéro de tronçon | X | X | X |
| Rue | X | X | X |
| Commune | X | X | X |
| Année de pose | X | X | X |
| Diamètre | X | X | X |
| Matériau | X | X | X |
| Longueur | X | X | X |
| Sol et corrosivité | X | X | |
| Trafic automobile | X | X | X |
| Pression de service | X | X | X |
| Nombre d'abonnés/km | X | | |
| Sous trottoir ou chaussée | X | X | |
| Qualité de l'eau | | X | |

- Structure du fichier

Ce fichier répertorie toutes les défaillances recueillies avec chacune de leurs caractéristiques :

- Commune,
- Tronçon concerné,
- Emplacement dans la rue,
- Année de la défaillance,
- Type de réparation,
- Cause de la défaillance.

3.3.4.3. Contraintes conduisant à l'élimination de certains tronçons ou défaillances

Certains tronçons ont dû être éliminés en raison de l'absence de données. Ces contraintes sont les suivantes :

- Absence de données concernant l'année de pose de la conduite,
- Date de pose de la conduite connue, mais inférieure à la date du début d'observation des défaillances. Par exemple sur Bordeaux on sait pour certaines conduites qu'elles ont été posées avant 1930, ce qui entraîne une absence de données d'au moins 25 ans concernant les

défaillances, celles-ci n'étant répertoriées que depuis 1956. Cette absence de données aurait entraîné un biais beaucoup trop important,

- Absence de données concernant les différents facteurs.

La collecte des défaillances a également entraîné l'élimination de certaines données recueillies. Les raisons sont les suivantes :

- Absence de données concernant le diamètre de la canalisation défaillante, d'où impossibilité de définir cette canalisation lorsqu'il en existe plusieurs dans la même rue,

- Impossibilité de définir si la fuite a eu lieu au niveau d'un branchement ou de la canalisation,

- Impossibilité de définir l'emplacement exact de la défaillance dans la rue, ceci posant un problème pour les rues divisées en plusieurs tronçons.

3.4. Description des tronçons et des défaillances

Les caractéristiques des conduites étudiées après élimination des données incomplètes sont présentées dans le tableau 14.

Les conduites de la CEB sont en moyenne plus âgées, alors que celles du Bas-Rhin sont les plus jeunes. Celles de Bordeaux sont en moyenne plus longues. La figure 12 décrit la répartition des années de pose dans les échantillons.

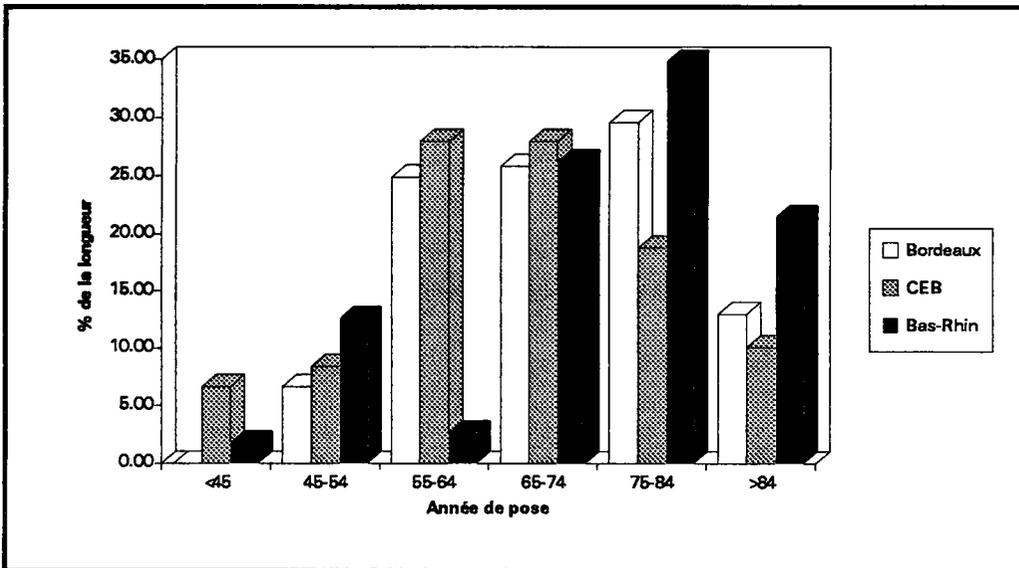


Figure 12 : Répartition des conduites par année de pose par service

On peut également remarquer que pour les deux réseaux urbains la fonte est le principal matériau utilisé. Les matériaux plastiques (PVC, Polyéthylène) commencent à se développer légèrement. Sur le Bas-Rhin, le PVC et la fonte sont réparties de manière à peu près égale. Notons que pour ces services, on a éliminé un grand nombre de conduites âgées en fonte, car on ne connaissait pas leur année de pose.

**Tableau 14 : Description des conduites recueillies par service
(** données non recueillies sur le service).**

| | | LED-Bordeaux | CEB | Bas-Rhin |
|-----------------------|----------------|--------------|---|----------|
| Nombre de tronçons | | 1334 | 1379 | 653 |
| Longueur totale (km) | | 347,6 | 261,8 | 94,3 |
| Longueur moyenne (m) | | 260,6 | 189,8 | 144,35 |
| Age moyen (années) | | 18 | 24 | 16 |
| Diamètre | Minimum | 60 | 60 | 50 |
| | Maximum | 150 | 800 | 250 |
| % Année de pose 66 | ≤66 | 35,2 | 47,1 | 21,3 |
| | >66 | 64,8 | 52,9 | 78,7 |
| % sol | Non corrosif | 64,8 | 73,0 | ** |
| | Corrosif | 35,2 | 27,0 | |
| % Trafic | Faible | 82,9 | 81,5 | 80,9 |
| | Fort | 17,1 | 18,5 | 19,1 |
| % Emplacement | Sous trottoir | 61,6 | 56,2 | ** |
| | Sous chaussée | 38,4 | 43,8 | |
| % Origine de l'eau | | ** | 35,4 (Villen.) 38,7 (Rueil) 25,9(Mélange) | ** |
| % Matériau | Acier | 0 | 0,3 | 0 |
| | Fonte | 92,7 | 98,6 | 54,7 |
| | PVC | 6,5 | 0 | 45,3 |
| | PE | 0 | 1,1 | 0 |
| | Amiante-Ciment | 0,8 | 0 | 0 |
| Pression moyenne(mce) | | 35,7 | ** | 43 |
| Nombre d'abonnés/km | | 48,1 | ** | ** |

La figure 13 précise la distribution des diamètres par service. Sur Bordeaux seuls quatre diamètres ont été observés. Sur la CEB les diamètres les plus fréquents sont les diamètres 100, 150 et 200 mm. Sur le Bas-Rhin, c'est le diamètre 110 qui est le plus fréquent. Sur ces deux syndicats du Bas-Rhin, certains diamètres non disponibles actuellement comme le 70, le 90 ou le 140 existent encore.

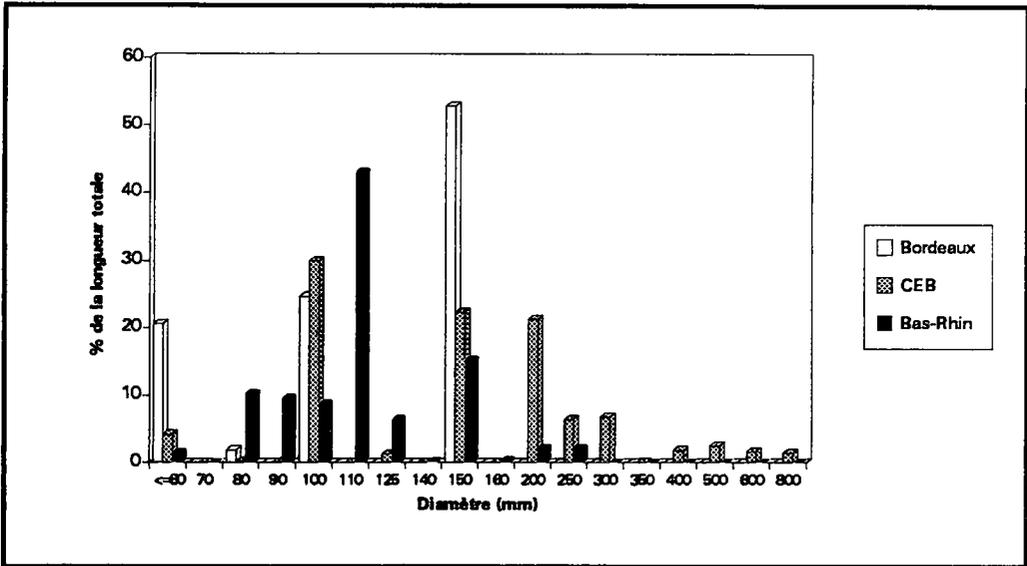


Figure 13 : Répartition des diamètres étudiés sur les trois services

Le nombre de défaillances par service se trouve dans le tableau 15. Le nombre de conduites ayant eu des défaillances est en fait très faible, entre 15 et 20 % du total (Cf. Figure 14). La proportion de celles en ayant eu au moins 6 est encore plus faible (moins de 1%).

Tableau 15 : Nombre de défaillances recueillies par service.

| | Bordeaux | CEB | Bas-Rhin |
|---------------------------------|----------|-----|----------|
| Nombre de défaillances relevées | 543 | 542 | 171 |

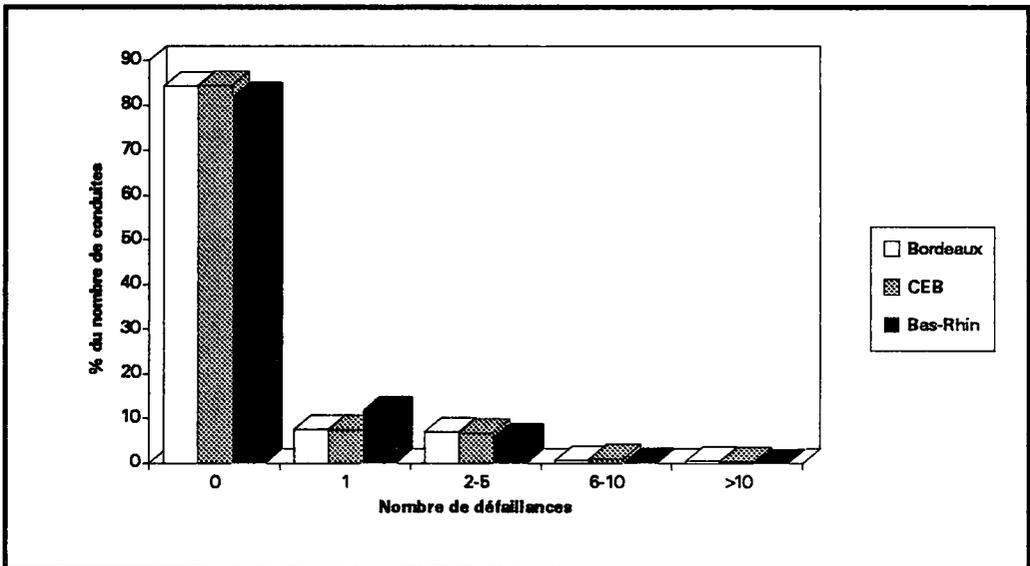


Figure 14 : Proportion des conduites selon le nombre de défaillances subies

On peut noter également que la répartition des défaillances est différente selon la saison (Cf. Figure 15). C'est lors des mois d'hiver (décembre, janvier, février) que les défaillances sont les plus nombreuses (près de 40 % du total). L'action conjuguée de la baisse de la température et d'une humidité plus importante peut l'expliquer. Sur les deux syndicats du Bas-Rhin, on peut également se rendre compte que le nombre de défaillances augmente en juin, juillet.

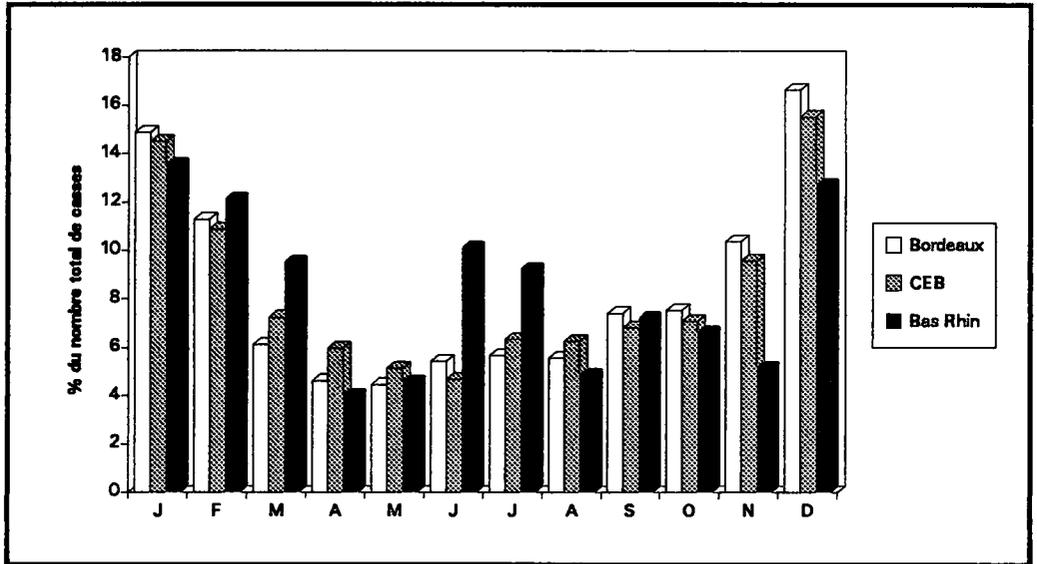


Figure 15 : Répartition des défaillances en fonction du mois

3.5. La spécificité des données

Sur les 3366 tronçons de canalisations répertoriés sur les trois services, soit environ 700 km, 2835 n'ont pas eu de défaillance, soit environ 540 km. Près de 8 tronçons sur dix n'ont donc pas eu de casses.

Faut-il pour autant les éliminer de l'échantillon d'observation puisque l'événement auquel on s'intéresse est l'événement "défaillance"? Ceci ferait perdre une quantité d'information trop importante puisque ces tronçons sans défaillance apportent l'information suivante : ils n'ont pas eu de défaillance entre l'année de pose et l'année de fin d'observation. Ces observations sont dites censurées à droite. La figure 16 représente les différents types de tronçons pouvant exister (en faisant l'hypothèse qu'un tronçon ne peut avoir qu'une seule défaillance).

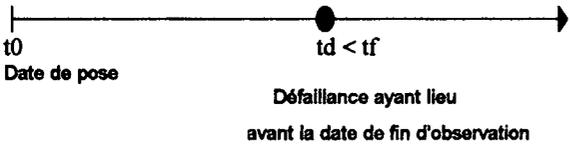
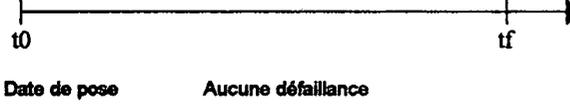
| TYPE DE TRONCONS | INFORMATION APPORTEE |
|---|---|
| <p>Tronçon non censuré à droite :</p>  <p>t_0 Date de pose</p> <p>$t_d < t_f$</p> <p>Défaillance ayant lieu avant la date de fin d'observation</p> | <ul style="list-style-type: none"> * Aucune défaillance entre t_0 et t_d * Une défaillance à t_d |
| <p>Tronçon censuré à droite :</p>  <p>t_0</p> <p>Date de pose</p> <p>Aucune défaillance</p> <p>t_f</p> | <ul style="list-style-type: none"> * Aucune défaillance entre t_0 et t_f |

Figure 16 : Description de la spécificité des données

Il est donc important d'utiliser des méthodes statistiques spécifiques adaptées à ce type de données. Ce sont les méthodes d'analyse de données de survie qui sont utilisées et qui vont être décrites dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Application de l'analyse statistique des données de survie à l'étude des défaillances

| | |
|--|----|
| 4.1. INTRODUCTION A L'ANALYSE DES DONNEES DE SURVIE..... | 79 |
| 4.1.1. Définitions et caractéristiques des données de survie | 79 |
| 4.1.1.1. Les données de survie [Hill et al., 1990] | 79 |
| 4.1.1.2. Définitions | 79 |
| 4.1.1.3. Application au cas des conduites d'eau potable | 80 |
| 4.1.2. Les fonctions étudiées en analyse de survie [Kalbfleisch et Prentice, 1980]..... | 81 |
| 4.2. LES MODELES UTILISES EN ANALYSE DE SURVIE | 85 |
| 4.2.1. Quelques modèles paramétriques | 85 |
| 4.2.2. Modèles de régression sur données de survie [Kalbfleisch et Prentice, 1980]..... | 86 |
| 4.3. UTILISATION DU MODELE DES RISQUES PROPORTIONNELS - ESTIMATION DES PARAMETRES | 88 |
| 4.3.1. Formulation de la vraisemblance | 89 |
| 4.3.2. Estimation des paramètres..... | 89 |
| 4.3.3. Propriétés des estimateurs du maximum de vraisemblance [Hill et al., 1990] | 90 |
| 4.3.4. Le test de Wald..... | 90 |
| 4.3.5. Estimation de la fonction de risque de base h_0 (Hill et al., 1990)..... | 91 |

4.1. Introduction à l'analyse des données de survie

Ces méthodes d'analyse statistique s'appliquent à des types de données bien particulières. Elles sont utilisées dans des secteurs tels que l'épidémiologie (mesure de la survie d'individus malades dans des essais cliniques), l'industrie (durée de vie de composants) ou les sciences socio-économiques (mesure de la durée de grève ou de la période de chômage selon les individus par exemple) les utilisent.

4.1.1. Définitions et caractéristiques des données de survie

4.1.1.1. Les données de survie [Hill et al., 1990]

Les données de survie mesurent la *durée de vie* ou le *date d'apparition* d'un événement critique pour chaque individu étudié. Cet événement critique peut être soit la mort de l'individu, soit une défaillance, soit une guérison, soit une rechute...

Cependant la principale caractéristique de ces données est que cet événement peut ne pas apparaître chez certains individus parce que sa durée de vie (ou durée de "non-défaillance") est trop longue pour l'étude : ce sont les individus censurés à droite.

La notion d'individu "perdu de vue", courante en épidémiologie, n'intervient pas dans la présente étude.

4.1.1.2. Définitions

Dans une étude de survie il faut pour chaque sujet connaître les renseignements suivants :

*** La date d'origine**

La durée de survie que l'on désire étudier ne correspond pas toujours au temps écoulé entre la naissance et la mort. En général on prend plutôt le temps écoulé depuis un diagnostic ou la mise en oeuvre d'un traitement.

Chaque sujet a donc une date d'origine différente sur le calendrier, mais qui définit le temps 0.

*** La date de dernières nouvelles**

Cette date correspond à la date la plus récente où l'on a recueilli les renseignements concernant l'état d'un sujet. Si pour un sujet l'événement attendu (mort ou défaillance) a été observé, la date de dernières nouvelles correspond à la date d'apparition de cet événement.

Connaissant ces dates il est alors possible de calculer le *temps de participation* t_i défini pour chaque sujet i . Ce temps correspond au délai entre la date d'origine et la date de dernières nouvelles.

D'autre part un sujet est défini comme "exclu-vivant" s'il vit encore (ou s'il n'a pas eu de défaillance) au moment de la date de dernières nouvelles. Ce type d'individu correspond aux données censurées à droite (Cf. fig. 16).

Les censures présentées dans cette figure sont des *censures "à droite"* car elles ne donnent plus de nouvelles de l'individu après une certaine date, sans que cet individu soit mort ou ait eu une défaillance. Un autre type de censure existe :

* *Les censures à gauche* : ceci correspond aux données dont la date du début d'observation est postérieure à la date d'origine.

Pour ces données censurées on ne peut donc pas dire qu'il n'y a pas d'information sur la durée de vie et l'événement étudié et il est difficile de les ignorer même si l'information apportée n'est que partielle. Les bonnes nouvelles comme les mauvaises doivent être prises en compte!

En général on affecte à chaque individu son temps de participation ainsi qu'une variable de censure égale à 0 pour les individus censurés et à 1 pour les individus défaillants.

En résumé l'analyse des données de survie présente les spécificités suivantes :

- * elle porte sur des variables aléatoires positives,
- * elle se fait en présence de données censurées,
- * elle peut prendre en compte des covariables (lorsque la population étudiée est hétérogène).

Ses objectifs sont de modéliser des lois de durée de vie (fiabilité), de comparer les durées de vie dans différents groupes (essais thérapeutiques) ou d'évaluer la valeur pronostique de facteurs à risques (études épidémiologiques).

4.1.1.3. Application au cas des conduites d'eau potable

Plusieurs défaillances peuvent survenir sur une même canalisation. Il faut alors distinguer l'événement " $k^{\text{ième}}$ défaillance".

Pour l'événement première défaillance, la date d'origine est la date de pose.

Pour l'événement $k^{\text{ième}}$ défaillance ($k > 1$), la date d'origine est la date d'apparition de la $k^{\text{ième}}$ défaillance.

Chacun de ces événements peut être étudié individuellement. Il a donc été choisi de différencier une même canalisation suivant le nombre de défaillances qu'elle a subies. Dans ce cas un individu correspond au couple "canalisation, nombre de défaillances subies" (Cf figure 17).

4.1.2. Les fonctions étudiées en analyse de survie [Kalbfleisch et Prentice, 1980]

Soit T une variable aléatoire positive représentant le temps de défaillance d'un individu d'une population homogène. La distribution de probabilité de T peut être représentée de différentes manières. Trois types de fonction sont le plus utilisés : la fonction de survie, la fonction de risque instantanée, la densité de probabilité.

* La fonction de survie

Cette fonction $S(t)$ correspond à la probabilité pour un individu d'avoir une durée de vie supérieure à un certain temps t .

On a donc :

$$S(t) = P(t \leq T), \text{ avec } t \in [0, +\infty]$$

S est une fonction décroissante et varie entre $S(0)=1$ et $\lim_{t \rightarrow +\infty} S(t) = 0$.

* La densité de probabilité de T

Cette fonction f est telle que :

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t)}{\Delta t} = - \frac{dS(t)}{dt}$$

* La fonction de risque (ou risque instantané)

Cette fonction h correspond au taux instantané de défaillance des individus qui, n'ayant pas eu de défaillance à un instant t , en ont une entre t et $t + \Delta t$. Elle est égale à :

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t / T \geq t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{S(t)}$$

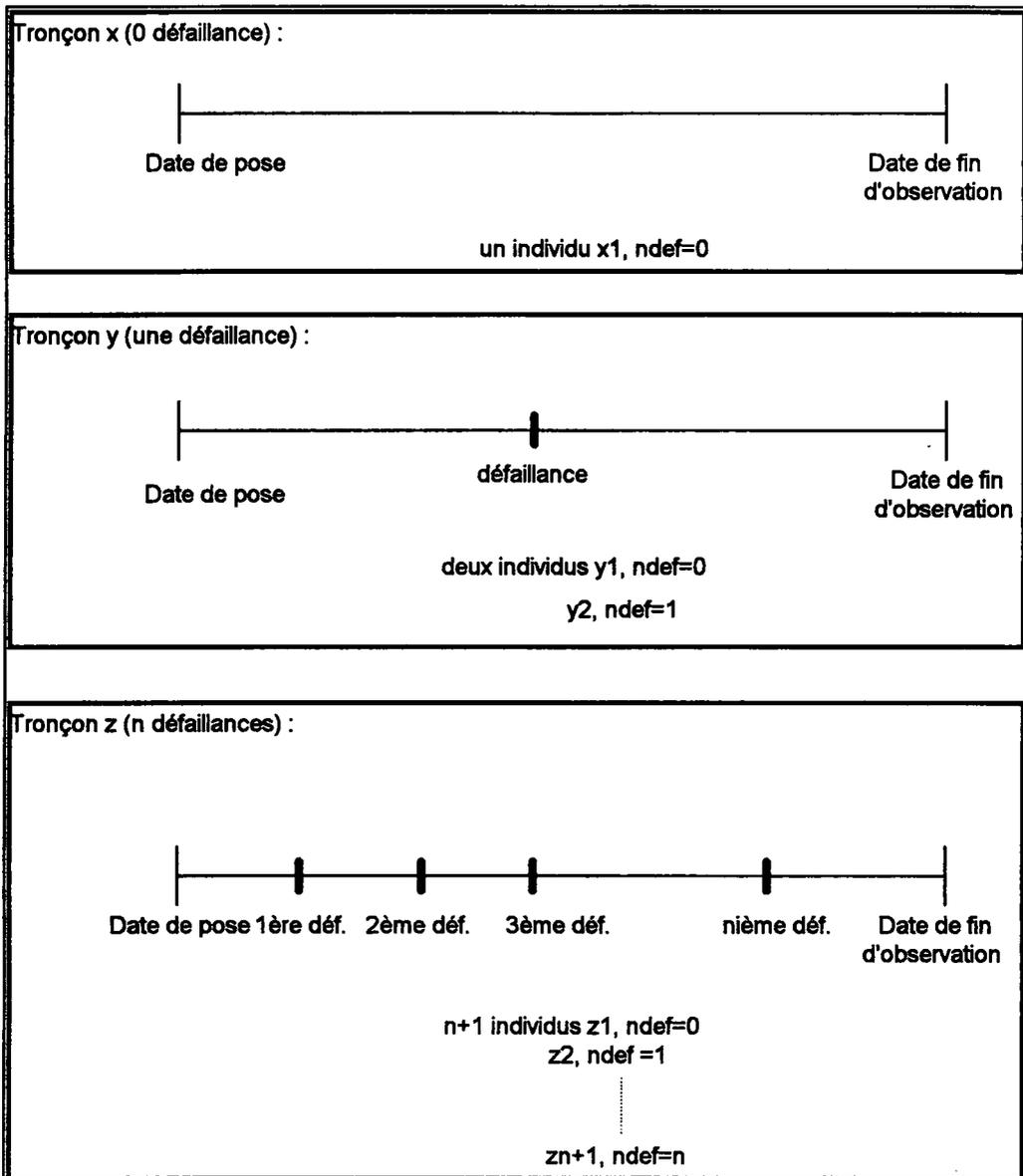


Figure 17 : Distinction des canalisations en individus (n_{def} correspond au nombre de défaillance).

On peut remarquer que la connaissance de h est équivalente à la connaissance de S ou de f . En effet d'après les définitions, on a :

$$h(t) = - \frac{d \log S(t)}{dt}$$

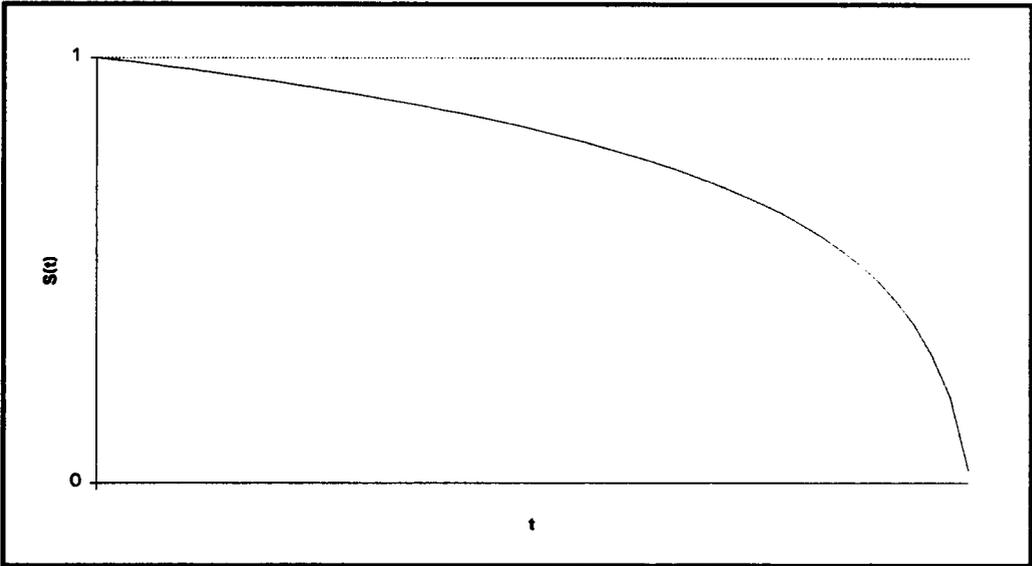


Figure 18 : Exemple de courbe de survie.

d'où, sachant que $S(0)=1$:

$$S(t) = \exp\left(-\int_0^t h(u) du\right)$$

et

$$f(t) = h(t) \exp\left(-\int_0^t h(u) du\right)$$

Les figures 19 et 20 représentent deux exemples de courbes de risque.

La figure 19 correspond au taux de mortalité chez l'Homme. Ce taux est d'abord élevé juste après la naissance (mortalité infantile), puis décroît jusqu'à un certain âge, avant de croître plus lentement (vieillesse).

La figure 20 représente le "taux de sortie de l'état de chômage". Celui-ci est d'abord croissant (effet de la recherche d'emploi) puis décroît (chômeurs de longue durée qui ont de plus en plus de mal à trouver un emploi).



Figure 19 : fonction de risque chez l'Homme

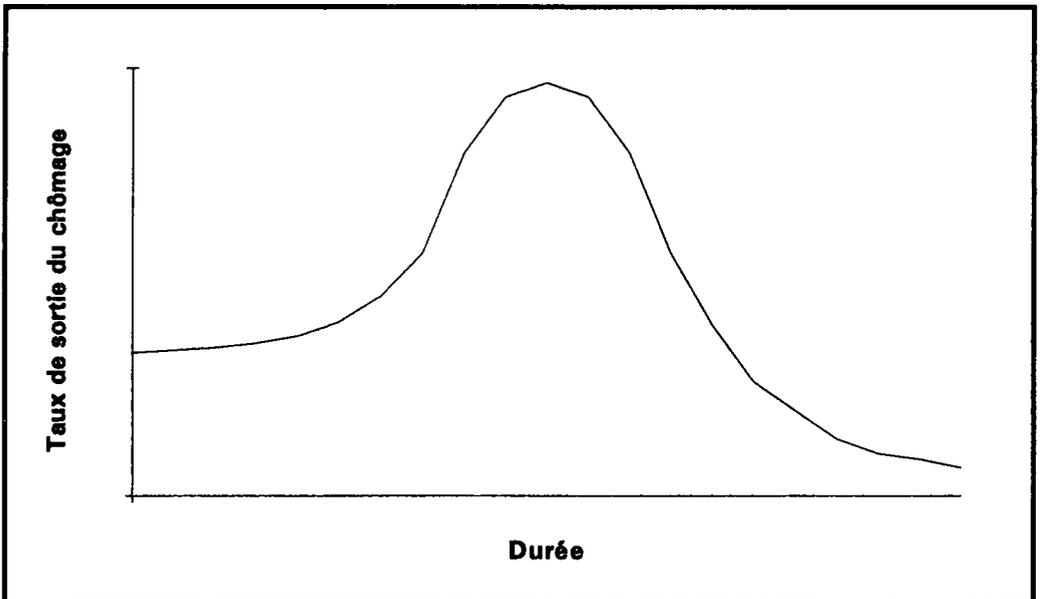


Figure 20 : fonction de risque (chômage)

Une dernière fonction est également utilisée, c'est la fonction de risque cumulée :

$$H(t) = \int_0^t h(u) du$$

On a alors :

$$S(t) = \exp(-H(t))$$

4.2. Les modèles utilisés en analyse de survie

4.2.1. Quelques modèles paramétriques

Il peut être utile d'examiner la fonction de risque dans l'étude des modèles probabilistes. Il est donc important de savoir comment elle évolue en fonction du temps au niveau de l'interprétation.

Voici quelques lois de probabilité souvent utilisées pour des populations homogènes.

* Le modèle exponentiel

Ce modèle est caractérisé par une fonction de risque constante (indépendance temporelle). On a donc :

$$\forall t > 0, h(t) = \lambda$$
$$\text{d'où } S(t) = \exp(-\lambda t)$$

Les défaillances surviennent donc de manière aléatoire au cours du temps. D'autre part on peut remarquer que le tracé de la fonction $\log[S(t)]$ est une droite passant par l'origine.

Ce modèle est un cas particulier du modèle de Weibull, décrit ci-après.

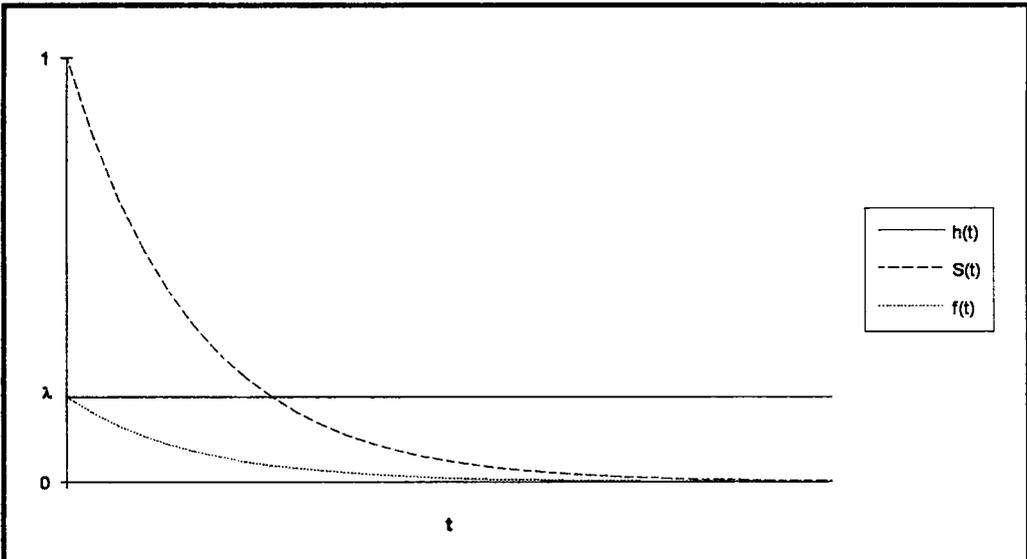


Figure 21 : Fonction de risque, densité et fonction de survie du modèle exponentiel

* Le modèle de Weibull

C'est une généralisation du modèle exponentiel, la fonction de risque étant une fonction puissance du temps.

$$h(t) = \lambda p (\lambda t)^{p-1}$$

et

$$S(t) = \exp[-(\lambda t)^p]$$

λ correspond au paramètre d'échelle (durée de vie caractéristique). p est le paramètre de forme.

Si $p < 1$, h est monotone décroissante.

Si $p = 1$, h est constante (modèle exponentiel).

Si $p > 1$, h est monotone croissante.

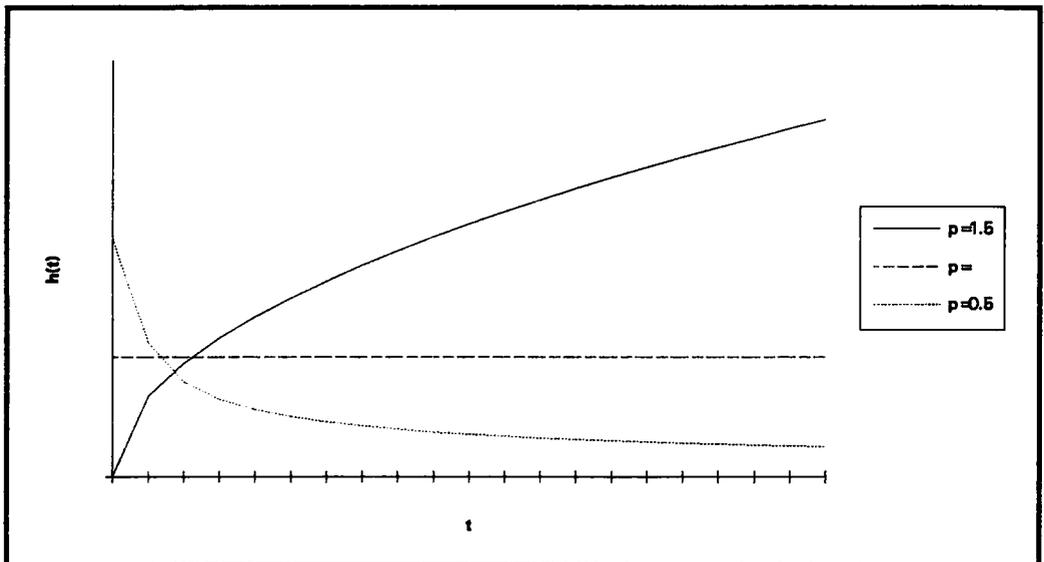


Figure 22 : Fonctions de risque du modèle de Weibull.

Le tracé de la fonction $\log[-\log(S(t))]$ en fonction de $\log(t)$ est une droite.

4.2.2. Modèles de régression sur données de survie [Kalbfleisch et Prentice, 1980]

* Introduction

Ces types de modèle permettent de généraliser les modèles univariés au cas de populations hétérogènes pour tenir compte de l'influence de variables explicatives.

La fonction de risque $h(t,z)$ dépend du temps et de covariables : on définit donc le vecteur z des variables explicatives, qui peuvent être soit qualitatives, soit quantitatives (constantes ou dépendant du temps).

L'objectif est de déterminer les *meilleures variables pronostiques*, de *tester et quantifier* l'effet d'une variable en tenant compte de certaines covariables ou de créer un *modèle prédictif*.

Les modèles sont basés sur la décomposition de la fonction de risque λ en :

- * une fonction de risque de base $h_0(t)$ exprimant la façon dont la fonction de risque dépend du temps et commune à tous les individus.
- * un *terme de régression* $\beta z = \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \dots + \beta_k z_k$ qui inclut l'effet des variables explicatives sur la survie par l'intermédiaire des paramètres de régression β_i du modèle.

L'effet des covariables peut agir multiplicativement soit sur la fonction de risque (Modèle des Risques Proportionnels ou, en anglais, Proportional Hazards Model) soit sur le temps de défaillance (modèles des temps accélérés ou, en anglais, Accelerated Failure Time Model).

* Le Modèle des risques proportionnels

Dans ce modèle, le risque instantané $h(t,z)$ est le produit d'une fonction de risque de base $h_0(t)$ et d'un terme exponentiel résumant l'effet des variables explicatives :

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

où les β_j sont les *paramètres de régression* inconnus du modèle.

Les covariables agissent donc multiplicativement sur le risque instantané de défaillance. D'autre part h_0 est une fonction arbitraire du temps, qui représente la fonction de risque d'un individu pour lequel toutes les covariables z_i seraient nulles.

Les β_j sont estimés suivant les méthodes que l'on verra au paragraphe suivant. Par contre la fonction h_0 peut être calculée de deux façons :

- soit elle est choisie parmi les modèles paramétriques déjà définis auparavant (Weibull, exponentiel,...) et est mise sous forme analytique. C'est alors un modèle complètement paramétrique.

- soit elle est laissée "libre" et on ne fait qu'estimer ses valeurs pour les différents temps de défaillance observés. C'est le modèle de Cox, qui est semi-paramétrique. Celui-ci n'impose pas de contraintes sur h_0 et semble, a priori, mieux adapté pour déterminer l'influence de facteurs.

La figure 23 résume les différentes approches en analyse de données de survie.

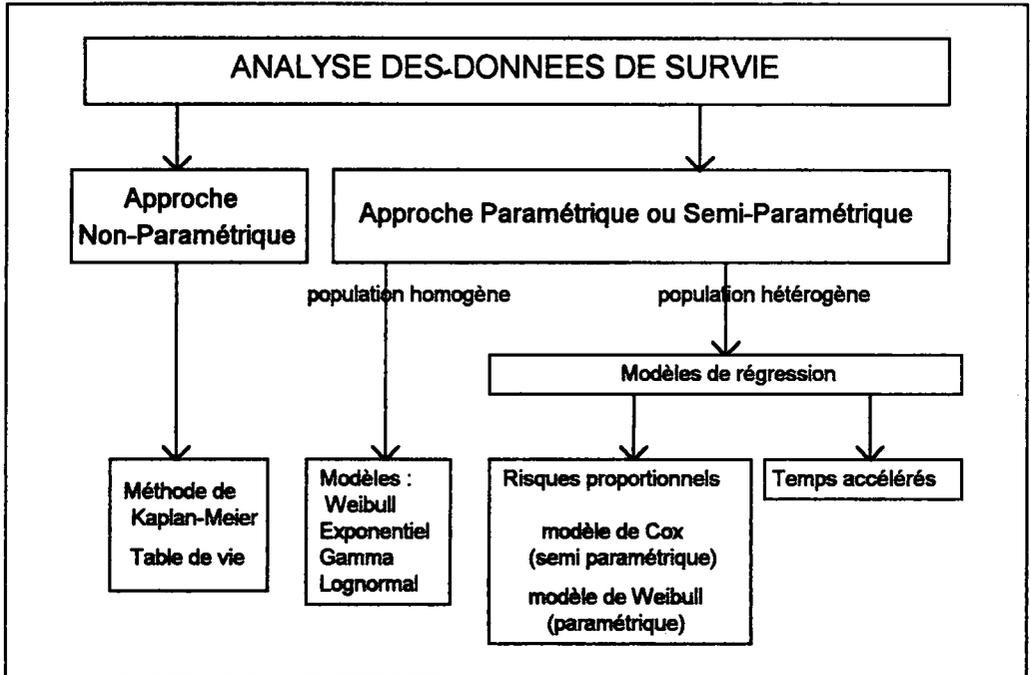


Figure 23 : Outils probabilistes en analyse de données de survie

4.3. Utilisation du modèle des risques proportionnels - Estimation des paramètres

Parmi les modèles vus précédemment, c'est le modèle des risques proportionnels qui a été choisi. En effet il permet tout d'abord de mesurer l'influence des différents facteurs grâce à l'estimation des β_j . Ensuite sa forme est simple, grâce à la séparation en deux fonctions h_0 et la fonction exponentielle d'influence des covariables.

L'estimation des paramètres β_j est réalisée par la méthode du maximum de vraisemblance. Cependant la vraisemblance utilisée ici est une vraisemblance partielle et permet de prendre en compte les données censurées.

4.3.1. Formulation de la vraisemblance

Les étapes de la construction de la vraisemblance sont données en annexe 4. La vraisemblance partielle de Cox est formulée de la manière suivante lorsqu'il n'y a pas d'ex-aequo en chacun des temps t_j :

$$V = \prod_{i=1}^k \frac{\exp[\beta' Z_i]}{\sum_{j \in R_i} \exp[\beta' Z_j]}$$

β étant le vecteur des paramètres à estimer et R_i l'ensemble des individus restant au temps t_i .

Dans le cas contraire sa formulation est plus complexe, c'est à dire :

$$V = \prod_{i=1}^k \frac{\exp(s_i \beta)}{\sum_{l \in R_{d_i}(t_i)} \exp(s_l \beta)}$$

avec :

$s_i = \sum_{p=1}^{d_i} Z_{i_p}$, s_i la somme des covariables associées aux d_i individus défailants au temps t_i ,

$R_{d_i}(t_i)$ l'ensemble des sous-ensembles de d_i éléments choisis parmi l'ensemble des individus à risque au temps t_i R_{t_i} . Cette vraisemblance partielle est d'autant plus difficile à mettre en forme que le nombre d'individus ex-aequo au temps t_i est important. Cependant une bonne approximation correspond à la formule de Breslow à savoir :

$$V = \prod_{i=1}^k \frac{\exp(s_i \beta)}{\left[\sum_{l \in R_{t_i}} \exp(Z_l \beta) \right]^{d_i}}$$

Le calcul de l'estimation des paramètres se trouve en annexe 4.

4.3.2. Estimation des paramètres

La méthode du maximum de vraisemblance consiste à rechercher la valeur de β qui maximise la fonction de vraisemblance (ou de façon équivalente son logarithme). On cherche donc β tel que :

$$\frac{\partial V(t_i, \beta)}{\partial \beta} = 0.$$

Les paramètres β_j sont estimés en résolvant le système d'équation :

$$U_j(\beta) = \frac{\partial \ln V(\beta)}{\partial \beta_j} = 0.$$

On trouvera en annexe 4 la méthode d'estimation des paramètres, de leur variance et le test utilisé pour mesurer leur significativité.

Les valeurs estimées de β sont obtenues à partir de la méthode de Newton-Raphson. Elle conduit au schéma itératif suivant :

$$\beta_{k+1} = \beta_k - U'(\beta_k)^{-1} U(\beta_k) \text{ (Cf. annexe 4).}$$

La méthode utilisée pour estimer les coefficients du modèle de Weibull est présentée au chapitre 5 (§ 5.4.2.).

4.3.3. Propriétés des estimateurs du maximum de vraisemblance [Hill et al., 1990]

Les estimateurs du maximum de vraisemblance ont les propriétés suivantes :

- Ils sont asymptotiquement sans biais.
- Ils sont asymptotiquement efficaces.
- Ils ont asymptotiquement une distribution normale.

4.3.4. Le test de Wald

Pour mesurer l'intérêt d'introduire β_i dans le modèle, on pourra tester l'hypothèse $H_0 : \beta_i = \beta_{i0}$. Plusieurs tests existent pour tester H_0 contre $H_1 : \beta_i \neq \beta_{i0}$. C'est le test de Wald (ou du maximum de vraisemblance) qui est utilisé. Il mesure l'écart entre $\hat{\beta}$ et β_0 .

La statistique de ce test est la suivante :

$$(\hat{\beta} - \beta_0)' I(\hat{\beta})(\hat{\beta} - \beta_0),$$

$I(\hat{\beta})$ étant la matrice d'information qui contient $p \times p$ éléments (p étant le nombre de composants du vecteur β) formulés de la manière suivante :

$$I_{hj}(\beta) = - \frac{\partial^2 \ln V}{\partial \beta_h \partial \beta_j} \text{ (calculé en } \beta \text{).}$$

Lorsque le vecteur β ne comprend qu'un seul paramètre, cette statistique se ramène à :

$$\frac{(\hat{\beta} - \beta_0)^2}{V(\hat{\beta})}$$

Cette statistique est distribuée selon une loi de χ^2 avec un nombre de degrés de liberté correspondant aux paramètres fixés par H_0 . Le calcul de cette statistique permet alors d'estimer une probabilité qui déterminera l'influence réelle ou non du facteur étudié. On prendra dans l'étude une valeur égale à 0,95, valeur correspondant à une probabilité d'erreur de 95% si l'on ne considère pas quel facteur étudié est influent.

4.3.5. Estimation de la fonction de risque de base h_0 (Hill et al., 1990)

Cette fonction est estimée à partir de la fonction de risque de base cumulée H_0 . Pour un modèle non stratifié cette fonction est estimée par Breslow en chaque pas de temps t_i :

$$\hat{H}_0(t_i) = \sum_{j=1}^i \left[\frac{m_j}{\sum_{s \in R_j} \exp(\hat{b}z_s)} \right],$$

m_j étant le nombre de défaillances au temps t_j , R_j l'ensemble des individus restant au temps t_j .

Pour un modèle stratifié et pour le groupe de stratification g , cette fonction sera égale à :

$$\hat{H}_0(t_{g_i}) = \sum_{j=1}^i \left[\frac{m_{gj}}{\sum_{s \in R_{gj}} \exp(\hat{b}z_s)} \right],$$

m_{gj} étant le nombre de défaillances au temps t_{gj} , R_{gj} l'ensemble des individus restant au temps t_{gj} .

Les outils présentés dans ce chapitre permettent donc de tenir compte de la spécificité des données utilisées. De plus des modèles paramétriques peuvent être élaborés à partir de ces outils. La présentation de leur application aux données de défaillance se trouve dans le chapitre 5.

Chapitre 5

Application des modèles de Cox et de Weibull à la prévision des défaillances des conduites d'eau potable

| | |
|--|-----|
| 5.1. PRESENTATION DU LOGICIEL EGRET | 95 |
| 5.2. TRANSFORMATION DES DONNEES POUR L'ANALYSE DES DONNEES DE SURVIE..... | 96 |
| 5.2.1. Transformation selon l'ordre d'apparition des défaillances..... | 96 |
| 5.2.2. Le codage des variables | 98 |
| 5.3. LE MODELE DE COX | 99 |
| 5.3.1. La stratification..... | 99 |
| 5.3.2. Résultats..... | 100 |
| 5.3.2.1. Estimation des facteurs influents | 101 |
| 5.3.2.2. Vérification de l'hypothèse de proportionnalité des risques..... | 102 |
| * Stratification suivant le groupe de défaillances | 103 |
| * Les autres facteurs..... | 105 |
| 5.3.2.3. Estimation des paramètres β_i | 105 |
| 5.3.2.4. Quelques courbes de probabilité de non-défaillance et de risque..... | 108 |
| * Courbes de fonctions de risque | 108 |
| * Courbes de probabilités de non-défaillances | 110 |
| 5.3.3. Un paramètre particulier : la longueur des tronçons..... | 112 |
| 5.3.4. Conclusion | 116 |
| 5.4. APPLICATION DU MODELE DE WEIBULL..... | 117 |
| 5.4.1. Choix et présentation du modèle..... | 117 |
| 5.4.2. La stratification avec le modèle de Weibull..... | 118 |
| 5.4.3. Résultats..... | 119 |
| 5.4.3.1. Estimation des paramètres β_i | 119 |
| 5.4.3.2. Estimation des paramètres de la fonction de risque de base..... | 120 |
| 5.5. CONCLUSIONS SUR L'APPLICATION DES MODELES | 124 |
| 5.5.1. Avantages et inconvénients des modèles de Cox et de Weibull..... | 124 |
| 5.5.2. Pistes pour l'utilisation future des modèles | 124 |

C'est tout d'abord le modèle de Cox qui a été utilisé afin de déterminer l'influence des facteurs, ainsi que la forme des différentes courbes de probabilité d'apparition des défaillances et de risque. Les différents calculs ont été faits à partir du logiciel EGRET, qui est présenté dans ce chapitre. Avant de présenter les résultats, nous exposerons comment les données ont été transformées, puis nous définirons la méthode de stratification. Enfin nous étudierons le modèle de Weibull.

5.1. Présentation du logiciel EGRET

Le logiciel utilisé pour l'analyse de ces données est le logiciel EGRET élaboré par le SERC (Statistics and Epidemiology Research Corporation à Seattle). Il est spécialisé dans les analyses de survie et les analyses épidémiologiques. Il permet donc, entre autres, de déterminer les paramètres des modèles de Cox, de Weibull et exponentiel à partir des méthodes présentées dans le chapitre précédent. Il utilise également des tests permettant de définir si un facteur est significatif ou non.

Les variables prises en compte sont, outre les caractéristiques des individus, les variables de censure d et de temps de défaillance ou de censure t .

Le tableau 16 présente les résultats donnés pour le modèle de Cox.

Tableau 16 : Exemple de résultats donnés par le logiciel EGRET

| TERM | COEFFICIENT | STDERROR | P-VALUE | RATERATIO |
|-----------|-------------|----------|---------|-----------|
| Facteur 1 | 0.4822 | 0.135 | <,001 | 1.62 |
| Facteur 2 | 0.331 | 0.198 | 0.013 | 1.39 |
| Facteur 3 | 0.273 | 0.272 | <,001 | 1.31 |
| Facteur 4 | -0.5957 | 0.112 | 0.001 | 0.55 |
| Facteur 5 | -0.4446 | 0.2 | 0.009 | 0.64 |

Les différentes valeurs correspondent aux définitions suivantes :

- * TERM : nom de la variable,
- * COEFFICIENT : valeur du paramètre β_1 calculé,
- * STDERROR : écart type du paramètre estimé,

* P-VALUE : valeur correspondant à la probabilité d'une distribution de χ^2 , comparable à la statistique du Test de Wald, calculé ici. Cette statistique est égale au carré du rapport entre la valeur du coefficient calculé et l'écart type.

* RATE RATIO : valeur correspondant au rapport des risques lorsque la variable change d'une unité.

Le logiciel donne également les valeurs des fonctions de risques de base h_0 et de fonctions de risques cumulées de base H_0 calculées aux différents temps de défaillances. Ces fonctions sont calculées à partir de la formule de Breslow citée dans le chapitre précédent.

D'autre part il est possible de stratifier sur le modèle de Cox suivant les valeurs prises par les variables. Le paragraphe 5.3.1. présente cette technique.

5.2. Transformation des données pour l'analyse des données de survie

Afin de pouvoir différencier les variables censurées des non censurées, le logiciel EGRET nécessite de créer :

- une variable de censure appelée d
- une variable t déterminant la durée d'observation entre la dernière défaillance (ou la date de pose) et la date de censure ou la date de défaillance.

Nous allons voir comment ces données ont été transformées sachant que l'on recherche également l'influence du nombre de défaillances déjà subies par la conduite.

5.2.1. Transformation selon l'ordre d'apparition des défaillances

Les tronçons de canalisation déterminés sont de plusieurs types (Cf. fig 24).

-soit ils n'ont subi aucune défaillance. Dans ce cas on les caractérise par les valeurs $d=0$ et t =date de dernière observation-date de pose

Par exemple un tronçon a été posé en 1957 et la date de fin d'observation est 1991. Les variables de censures sont alors : $d=0$ et $t=34$.

- soit ils ont eu une ou plusieurs défaillances. On les caractérise alors par plusieurs individus avec $d=1$ et $t=$ date de la défaillance-date de la défaillance précédente (ou date de pose) et pour le dernier individu, $d=0$ et $t=$ date de dernière observation-date de dernière défaillance).

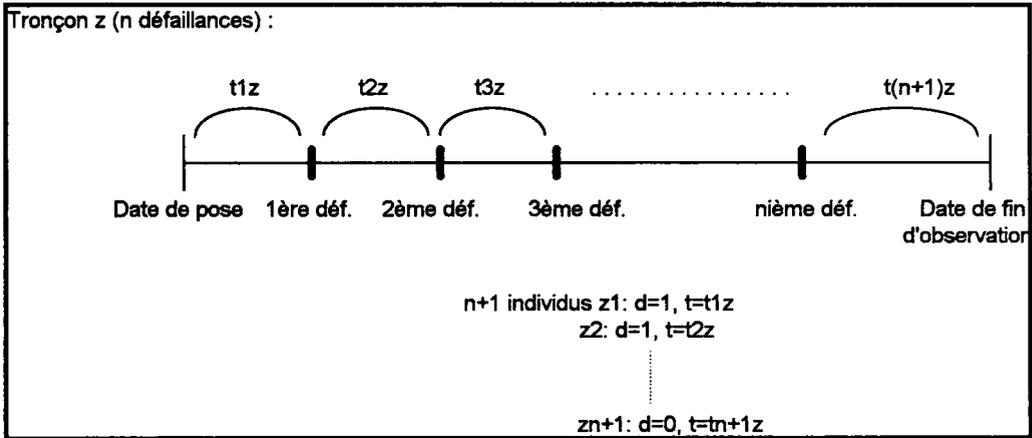


Figure 24 : Définition des "individus" vis-à-vis des tronçons de canalisations

Par exemple, un tronçon a été posé en 1964 et sa date de fin d'observation est 1991. De plus il a subi 3 défaillances en 1975, 1985 et 1988. Ce tronçon est transformé en quatre individus t_1, t_2, t_3, t_4 , tels que :

- pour $t_1, d=1$ et $t=(1975-1964)=11,$
- pour $t_2, d=1$ et $t=(1985-1975)=10,$
- pour $t_3, d=1$ et $t=(1988-1985)=3,$
- pour $t_4, d=0$ et $t=(1991-1988)=3.$

De plus ces individus se différencient par une variable supplémentaire "Nombre de défaillances antérieures" abrégée en "Ndef". Par exemple on a :

- pour $t_1, Ndef=0,$
- pour $t_2, Ndef=1,$
- pour $t_3, Ndef=2,$
- pour $t_4, Ndef=3,$

Le nombre d'individus étudiés dans EGRET est donc différent du nombre de tronçons.

Nous allons voir maintenant comment les variables ont été codées.

5.2.2. Le codage des variables

Les variables et leur codage sont les suivants :

*** Variable de censure d**

=0 : Individu censuré (défaillance non observée)

=1 : Individu défaillant

*** Temps de défaillance ou de censure T**

si d=0, date (en années) de fin d'observation de l'individu depuis, soit la date de pose
si l'individu n'a pas eu de défaillance, soit la date de la dernière défaillance, si l'individu en a eu,

si d=1, date de la défaillance depuis, soit la date de pose si l'individu n'a pas eu de défaillance, soit la date de la dernière défaillance, si l'individu en a eu.

*** Nombre de défaillance(s) déjà subie(s) par l'individu Ndef**

*** Emplacement de la conduite sous chaussée ou sous trottoir**

=0, si la conduite se trouve sous trottoir,

=0.5, si une partie se trouve sous trottoir et une partie sous chaussée,

=1, si elle se trouve sous chaussée.

*** Sol et sa corrosivité**

=0 : Sol non corrosif

=1 : Sol corrosif

La corrosivité des sols a été déterminée à partir soit de cartes de résistivité des sols (Bordeaux), soit de renseignements pris sur le terrain auprès d'inspecteur de réseaux (CEB).

*** Trafic automobile :**

= 0 : Trafic automobile faible

= 1 : Trafic automobile élevé

Le trafic automobile est considéré élevé dans une rue soit lorsque la mesure du trafic dans cette rue a été évaluée par les services de voirie, soit

*** Origine de l'eau (CEB)**

=0 : Origine de l'eau 1

=1 : Origine de l'eau 2

=0.5 : Eau provenant des deux ressources

*** Diamètre (en mm)**

*** Date de pose de la conduite (en années)**

*** Apnn**

=0 : Conduite posée avant 19nn

=1 : Conduite posée après 19nn

Dans la suite de l'étude, le facteur Ap66 sera appelé "Nature cana." car il concerne le passage technologique de la fonte grise à la fonte ductile, ainsi que l'apparition de nouveaux joints.

*** Longueur de la conduite (en m)**

*** Matériau :**

- =0 Acier
- =1 fonte
- =2 PVC ou Polyéthylène
- =3 Amiante-ciment

*** Facteur croisé Trafic-Chaussée (Trachau) :**

- =0 : Conduite se trouvant, soit sous trottoir, soit dans une rue à trafic faible
- =1 : Conduite se trouvant sous chaussée dans une rue à trafic élevé

5.3. Le modèle de Cox

5.3.1. La stratification

Le modèle des risques proportionnels est de la forme suivante :

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

Il fait donc l'hypothèse que les risques sont proportionnels lorsque la valeur d'un facteur de risque change. Par exemple, supposons que l'on ne tienne compte que du facteur z_1 avec

$z_1 = 0$ pour un trafic faible

$= 1$ pour un trafic élevé

Le risque pour un tronçon placé sous une route à trafic faible est de la forme :

$$h(t, 0) = h_0(t) \times \exp(\beta_1 \times 0) = h_0(t).$$

Pour un tronçon placé sous une route à trafic élevée, il est de :

$$h(t, 1) = h_0(t) \times \exp(\beta_1 \times 1) = h_0(t) \times \exp(\beta_1)$$

donc on a :

$$\forall t, \frac{h(t, 1)}{h(t, 0)} = \exp(\beta_1).$$

Le rapport entre les risques est donc le même quel que soit la durée t .

Il est donc important de vérifier l'hypothèse suivante pour chacun des facteurs z_i :

$$\forall t, \frac{h(t, z_i')}{h(t, z_i)} = \exp \left[\beta_i (z_i' - z_i) \right] = \text{constante.}$$

Ceci peut se vérifier graphiquement à partir de la fonction $\ln(H(t)) = \ln(-\ln(S(t)))$, H étant la fonction de risque cumulée. En effet la formule précédente donne :

$$\forall t, \frac{H(t, z'_i)}{H(t, z_i)} = \exp \left[\beta_i \left(z'_i - z_i \right) \right] = K.$$

D'où, en prenant le logarithme :

$$\forall t, \ln \left[H(t, z'_i) \right] - \ln \left[H(t, z_i) \right] = \left[\beta_i \left(z'_i - z_i \right) \right] = \ln K = K'.$$

Le logiciel EGRET permet de vérifier graphiquement cette hypothèse. La courbe de la figure 27 nous montre un exemple pour le facteur Trafic-Chaussée.

Si cette hypothèse n'est pas vérifiée, il est alors nécessaire de "stratifier" l'échantillon en fonction des valeurs prises par le facteur i. Par exemple si la variable j prend les valeurs binaires 0 ou 1, l'échantillon est divisé en deux groupes pour lesquels sont calculées deux fonctions de risque de base h_0 :

Le modèle pour les individus dont la valeur du facteur j $z_j=0$ est :

$$h^0(t, z_1, \dots, z_{j-1}, z_{j+1}, \dots, z_k) = h_0^0(t) \exp(\beta_1 z_1 + \dots + \beta_{j-1} z_{j-1} + \beta_{j+1} z_{j+1} + \dots + \beta_k z_k).$$

Lorsque $z_j=1$:

$$h^1(t, z_1, \dots, z_{j-1}, z_{j+1}, \dots, z_k) = h_0^1(t) \exp(\beta_1 z_1 + \dots + \beta_{j-1} z_{j-1} + \beta_{j+1} z_{j+1} + \dots + \beta_k z_k).$$

Les valeurs des paramètres β_i ($i \neq j$) sont communes aux deux modèles. Le logiciel EGRET permet de calculer les β_i pour le modèle de Cox. pour le modèle de Weibull, le logiciel ne calcule pas de modèle stratifié. Une méthode, expliquée au paragraphe 5.4.2., a été élaborée.

5.3.2. Résultats

Les résultats sont présentés suivant la chronologie des services étudiés. C'est à dire tout d'abord le service de la LED-Bordeaux, puis la CEB, enfin les deux syndicats du Bas-Rhin.

Concernant ces deux syndicats, les données de défaillances n'existaient que depuis 1976, alors qu'un certain nombre de conduites ont été posées bien avant cette date. Ne prendre que les conduites posées après 1976 aurait donné une taille d'échantillon trop faible. On a donc étudié les conduites posées avant 1976, conduites appelées "censures à gauche", en y appliquant les

modèles de Weibull de Bordeaux et de la CEB sur la période comprise entre la date de pose et 1976. La création d'un échantillon de défaillances à partir d'un modèle connu est présentée au chapitre 7.

5.3.2.1. Estimation des facteurs influents

Le test de Wald donne une statistique suivant une statistique du χ^2 . La probabilité (p-value dans EGRET) maximale définissant un facteur comme significatif a été prise égale à 0,05. Ceci signifie que l'on a plus de 95 chances sur 100 de faire en rejetant ce facteur.

Afin de définir les facteurs influents, on a tout d'abord établi le test d'influence en prenant en compte tous les facteurs, puis ont été retranché, un à un, les facteurs ne satisfaisant pas le test, c'est à dire ayant une "p-value" supérieure à 0,05.

Les résultats des tests sur l'influence des facteurs se trouvent dans le tableau 17.

Tableau 17 : Estimation des facteurs influents (test de Wald)

| Facteurs | "p-value" | | |
|-----------------|--------------|--------|------------------------|
| | LED-Bordeaux | CEB | Bas-Rhin |
| Longueur | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| Diamètre | <0,001 | 0,001 | 0,050 |
| Sol | <0,001 | 0,013 | |
| Trafic-Chaussée | 0,048 | 0,001 | 0,043 (Trafic seul) |
| Nature cana. | 0,040 | <0,001 | |
| Ap75 | 0,049 | 0,008 | |

Les facteurs significatifs pour chacun des trois services sont donc :

Pour la LED Bordeaux :

- la longueur de tronçon,
- le sol et sa corrosivité,
- la pose de la conduite avant ou après 1966 (Nature cana),
- la pose de la conduite avant ou après 1980,
- le diamètre,
- le nombre de défaillances subies par la conduite,
- le facteur croisé Trafic-Chaussée.

- Pour la CEB :
- la longueur de tronçon,
 - le sol et sa corrosivité,
 - la pose de la conduite avant ou après 1966 (Nature cana),
 - la pose de la conduite avant ou après 1975,
 - le diamètre,
 - le nombre de défaillances subies par la conduite
 - le facteur croisé Trafic-Chaussée.
- Pour les syndicats ruraux :
- la longueur,
 - le diamètre,
 - le nombre de défaillances subies par la conduite,
 - le trafic automobile,
 - le facteur croisé Trafic-Chaussée.

Entre les deux services urbains, les facteurs significatifs sont pratiquement les mêmes, excepté le trafic et les dates de pose seuil. Le facteur croisé trafic-chaussée (Trachau) est significatif sur les deux services.

Les dates de pose seuil correspondent à deux phénomènes différents. Pour la date se situant autour des années soixante, il s'agit de différencier les conduites en fonte grise des conduites en fonte ductile. Cette date n'est pas la même pour les deux services à cause des stocks de canalisations en fonte grise constitués par ces services à cette époque.

Pour les dates se situant à la fin des années soixante-dix, il pourrait s'agir d'un meilleur soin apporté à la pose et à l'entretien des conduites. Ceci est d'autant plus net pour la CEB, car depuis 1980 toutes les conduites sont posées avec une protection extérieure en polyéthylène.

Pour les syndicats ruraux le nombre de facteurs significatifs est plus faible, ceci pour plusieurs raisons. Tout d'abord l'échantillon observé est plus petit (935 tronçons). Ensuite certains facteurs n'ont pu être recueillis avec précision. Par exemple pour le sol, on a dû se baser sur les cartes géologiques au 50 000^{ème}.

5.3.2.2. Vérification de l'hypothèse de proportionnalité des risques

Une fois les facteurs influents déterminés, la vérification de la proportionnalité a permis de définir sur quels facteurs il était nécessaire d'introduire une fonction h_0 stratifiée (Cf § 5.3.). Cette vérification a eu lieu graphiquement à partir des courbes de la fonction $\ln(H(t))$.

*** Stratification suivant le groupe de défaillances**

La figure 25 représente l'écart moyen entre les différentes défaillances suivant leur ordre. Cette figure montre que le phénomène "première défaillance" se distingue des autres défaillances. En effet la première défaillance apparaît en moyenne 14 à 16 ans après la date de pose, pour les conduites qui en ont eu une.

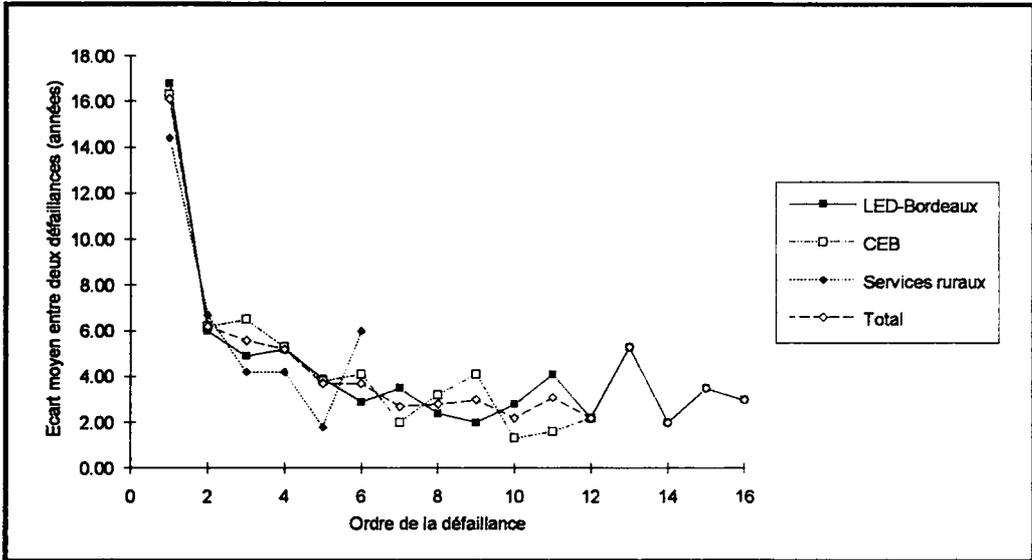


Figure 25 : Ecart moyen entre deux défaillances

Concernant les défaillances suivantes, deux phénomènes apparaissent. De la deuxième à la quatrième défaillance, l'écart entre deux défaillances diminue de 6 à 4 ans. Pour les défaillances suivantes à partir de la cinquième, cet écart reste constant autour de 3 à 4 ans.

Trois groupes de défaillances ont donc été distingués suivant l'ordre de la défaillance, présentés dans le tableau 18.

Tableau 18 : Groupes de défaillances

| | |
|----------|--------------------------------------|
| Groupe 1 | 1 ^{ère} défaillance |
| Groupe 2 | 2 à 4 ^{ème} défaillance |
| Groupe 3 | 5 ^{ème} défaillance et plus |

La figure 26 présente la courbe de la fonction $\ln(H(t))$ pour chacun des trois groupes de défaillances sur la CEB.

Cette réflexion est pertinente pour les services urbains et permet donc de conclure :

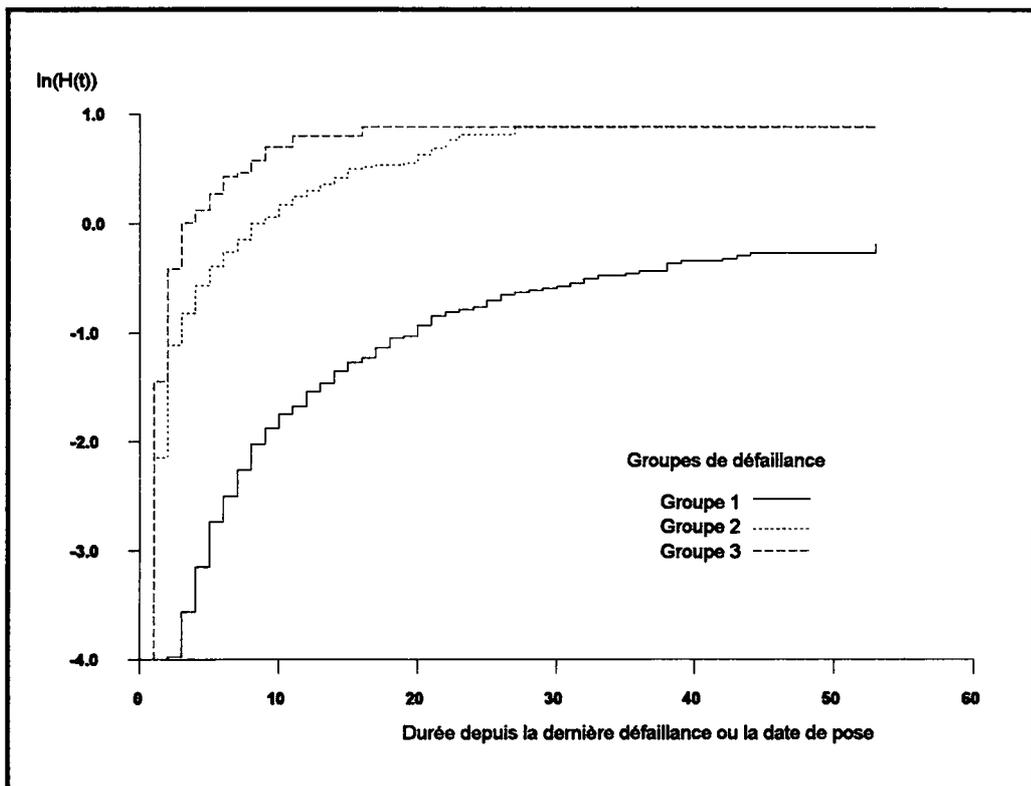


Figure 26 : Fonction $\ln(H(t))$ pour chacun des groupes de défaillance

- la première défaillance est un phénomène de vieillissement, car sa courbe de risque augmente avec le temps (action de l'âge) ;
- les trois défaillances suivantes sont moins dépendantes du temps;
- à partir de la 5ème, les défaillances sont indépendantes les unes des autres. Ce n'est plus un phénomène de vieillissement car le risque est le même quelque soit la défaillance.

Pour ce qui concerne le service rural, le phénomène est un peu différent, car on ne peut voir de différences entre les défaillances à partir de la deuxième. On a alors deux groupes de défaillances : celui représentant la première et celui représentant les suivantes. Ceci est dû à la faiblesse de l'échantillon pour les défaillances supérieures à la 4ème (uniquement deux individus).

Dans la suite de l'étude on stratifie sur le modèle de Cox, comme sur le modèle de Weibull, sur ces groupes de défaillance, pour ce qui concerne les deux services urbains. Les trois

groupes ont donc trois fonctions h_0 différentes. Par contre les paramètres des facteurs influençant les défaillances sont les mêmes quelque soit le groupe de défaillance.

* Les autres facteurs

Concernant les autres facteurs, le positionnement des courbes de la fonction $\ln(H(t))$ est satisfaisant et vérifie l'hypothèse. La figure 27 montre les courbes correspondant aux deux valeurs possibles du facteur croisé trafic-chaussée pour la CEB.

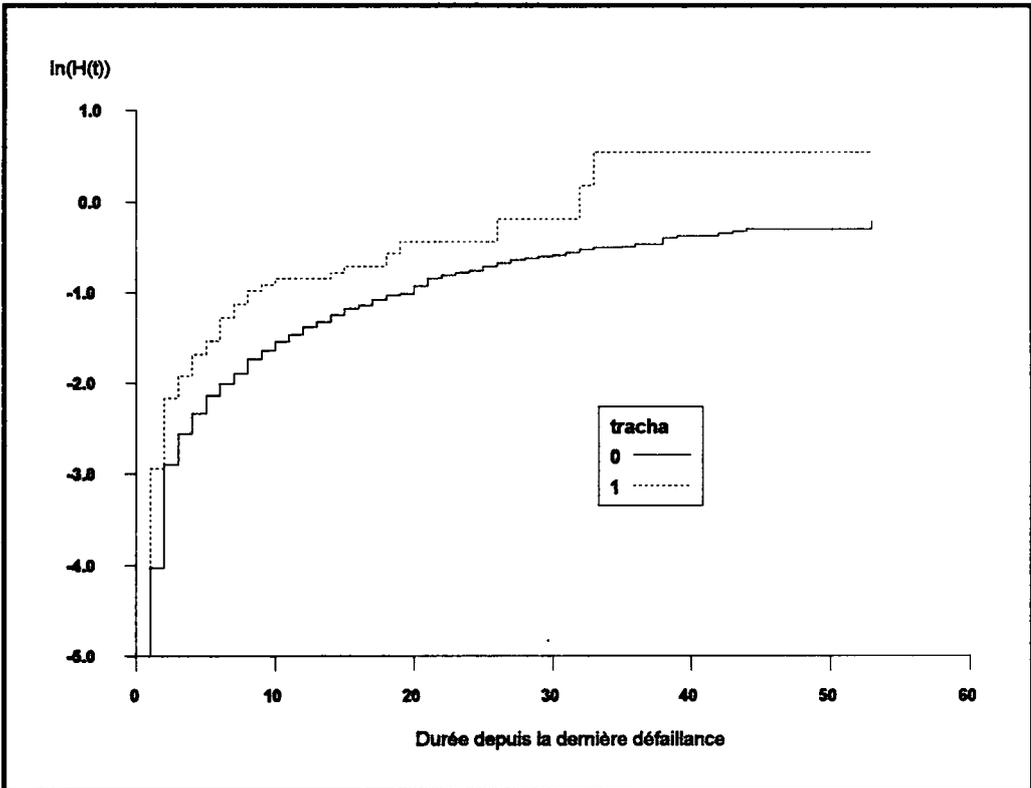


Figure 27 : Vérification de l'hypothèse de proportionnalité des risques pour le facteur Trafic-Chaussée.

La méthode de stratification est ainsi utilisée pour les groupes de défaillance. Pour les autres facteurs on estime les paramètres β_i comme cela avait été présenté dans le chapitre 4.

5.3.2.3. Estimation des paramètres β_i

Les résultats concernant l'estimation des β_i se trouvent dans le tableau 19.

Certains paramètres sont sensiblement identiques. Ce sont :

**Tableau 19 : Résultats de l'estimation des β_i du modèle de Cox
(le chiffre entre parenthèse correspond à l'écart type)**

| Facteurs | β_i | | | | | |
|-----------------|--------------|--------|--------------|--------|---------------|--------|
| | LED-Bordeaux | | CEB | | Bas-Rhin | |
| Longueur | 0,52 | (0,06) | 0,37 | (0,05) | 0,48 | (0,10) |
| Diamètre | -0,80 | (0,14) | -0,34 | (0,10) | -0,37 | (0,30) |
| Sol | 0,32 | (0,09) | 0,24 | (0,10) | | |
| Trafic-Chaussée | 0,23 | (0,12) | 0,58 | (0,18) | -0,45 | (0,22) |
| | | | | | (Trafic seul) | |
| Nature cana. | -0,31 | (0,15) | -0,64 | (0,15) | | |
| Ap75 | -0,36 | (0,27) | -1,39 | (0,52) | | |

- la longueur entre 0,37 et 0,52. Une réflexion concernant ce paramètre est présentée au paragraphe 5.5.1..

- le sol autour de 0,30.

Le paramètre diamètre est du même ordre entre la CEB et les syndicats ruraux, mais est très différent pour ce qui concerne le réseau de la LED-Bordeaux. Cette différence est due à l'échantillonnage. En effet sur la CEB et les syndicats ruraux, tous les diamètres avaient été utilisés de 60 à 300 mm. Sur Bordeaux ce sont les diamètres 60 et 150 mm qui avaient été d'abord choisis sur tout le secteur, puis les diamètres 80 et 100 mm sur la seule commune de Mérignac.

Si l'on utilise uniquement les données recueillies sur cette commune, le coefficient correspondant au diamètre est de $-0,4$, ce qui rapproche des valeurs établies sur la CEB et les syndicats ruraux.

Pour les autres paramètres les valeurs sont différentes. Pour le facteur "Ap75", cela peut s'expliquer par le fait que sur la CEB les conduites sont posées avec des manchons en polyéthylène depuis 1975, et non sur Bordeaux. Ceci explique également la différence concernant le facteur "pose avant ou après 1966" ou "Nature cana", qui correspond au passage entre la fonte grise et la fonte ductile. L'incertitude liée au stockage des conduites à cette époque doit également jouer un rôle important.

Concernant le facteur croisé trafic-chaussée, la différence ne peut être expliquée que par le trafic qui est plus important sur la CEB (secteur entièrement urbain) ou par la technique de pose. Sur les deux syndicats ruraux, c'est le trafic seul qui a été pris en compte. La valeur négative montre que les conduites cassent moins lorsque le trafic est élevé, ce qui est contraire au résultat auquel on aurait pu s'attendre. Ceci peut s'expliquer par un meilleur soin appliqué à la pose des conduites (profondeur plus importante, meilleur lit de pose) dans les rues à trafic élevé et notamment sur les routes nationales et départementales.

Le tableau 20 représente les bornes des intervalles de confiance, lorsque l'on prend une valeur de 95 % (les β_i étant considéré comme suivant une loi normale de moyenne la valeur $\hat{\beta}_i$ et d'écart type l'écart type estimé $\hat{\sigma}_i$). Ces valeurs sont donc calculées pour chacun des facteurs pris séparément. Cependant on peut également estimer un intervalle de confiance sur la valeur globale $\left(\sum_i \beta_i z_i \right)$ particulière à chaque conduite.

Tableau 20 : Bornes des intervalles de confiance (95 %)

| BORNES DES INTERVALLES DE CONFIANCE | | | | | | |
|-------------------------------------|--------------|-------|-------|-------|----------|-------|
| | LED-Bordeaux | | CEB | | Bas-Rhin | |
| Longueur | 0.40 | 0.64 | 0.27 | 0.47 | 0.27 | 0.68 |
| Diamètre | -1.08 | -0.52 | -0.55 | -0.14 | -0.98 | 0.24 |
| sol | 0.14 | 0.50 | 0.05 | 0.44 | ** | ** |
| trafic-chaussée | 0.00 | 0.46 | 0.22 | 0.93 | -0.89 | -0.01 |
| Nature cana | -0.62 | -0.01 | -0.94 | -0.34 | ** | ** |
| Ap75 | -0.89 | 0.16 | -2.42 | -0.36 | ** | ** |

Cette estimation se fait de la façon suivante. Comme l'on considère que les β_i suivent une loi normale $N(\hat{\beta}_i, \hat{\sigma}_i)$, la variable aléatoire $(\beta_i z_i)$ suit une loi normale $N(\hat{\beta}_i z_i, \hat{\sigma}_i z_i)$. En faisant l'hypothèse que les variables aléatoires $\hat{\beta}_i$ sont indépendantes les unes des autres, on aura la variable aléatoire $\left(\sum_i \beta_i z_i \right)$ qui suivra une loi normale $N\left(\sum_i \hat{\beta}_i z_i, \sqrt{\sum_i (\hat{\sigma}_i z_i)^2} \right)$.

On peut alors estimer l'intervalle de confiance à 95 % pour chacune des conduites. La courbe de la figure 28 présente le cas de la conduite ayant l'intervalle de confiance le plus

défavorable. On a dans ce cas un intervalle de 0,45 au bout de 40 ans. Pour les défaillances suivantes l'intervalle diminue en général de moitié.

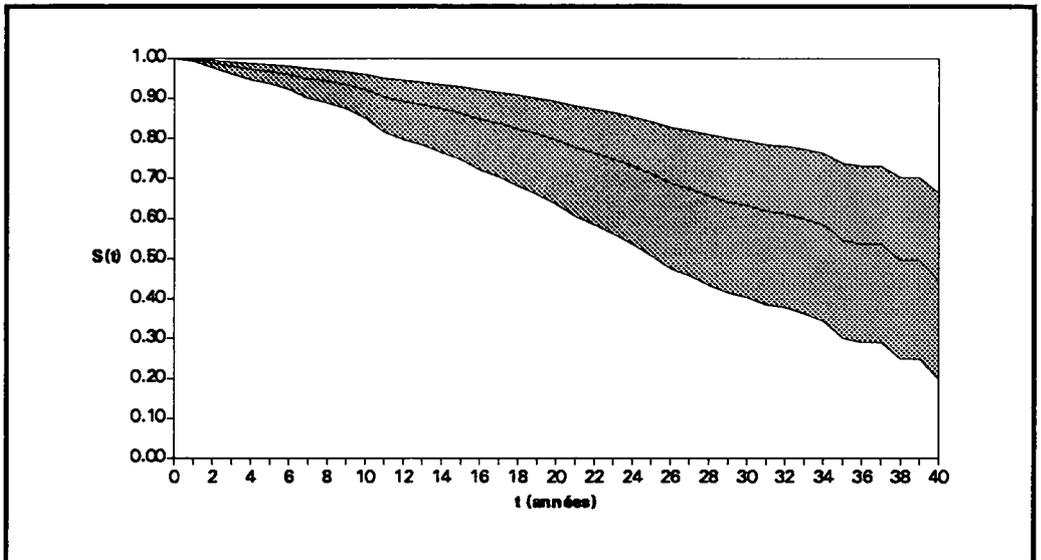


Figure 28 : Courbes de probabilité de non-défaillance (1^{ère} défaillance) avec intervalle de confiance à 95 % pour une conduite de 500 m de long, de diamètre 100, posée après 1975, dans un sol corrosif, dans une rue à trafic fort et sous chaussée.

La figure 29 représente une courbe dont l'intervalle de confiance est plus petit.

Dans le chapitre 6, nous verrons quelle influence a cet intervalle sur l'estimation du nombre total de défaillances.

5.3.2.4. Quelques courbes de probabilité de non-défaillance et de risque

Une fois les paramètres déterminés, il est possible de tracer les courbes de risque et de non-défaillance calculées par le logiciel EGRET.

*** Courbes de fonctions de risque**

La figure 30 représente le nuage de points de la fonction de risque de base h_0 de première défaillance sur le réseau de la LED-Bordeaux tous diamètres confondus. On peut se rendre compte que pour certaines durées supérieures à 35 ans depuis la date de pose, ce risque est nul. Ceci est dû à la faiblesse de l'échantillon pour ces durées.

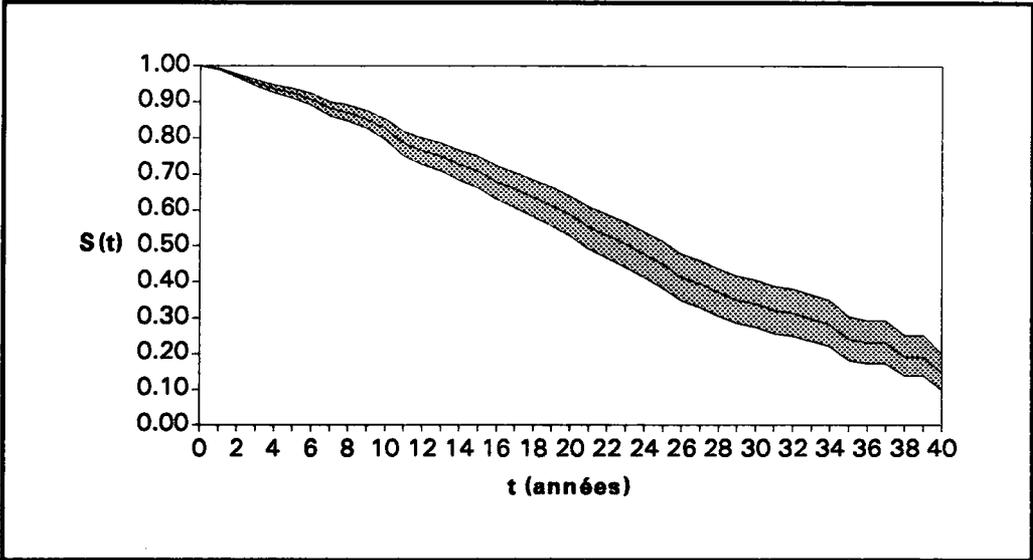


Figure 29 : Courbes de probabilité de non-défaillance (1^{ère} défaillance) avec intervalle de confiance à 95 % pour une conduite de 500 m de long, de diamètre 100, posée avant 1966 (fonte grise), dans un sol corrosif et dans une rue à trafic faible ou sous trottoir.

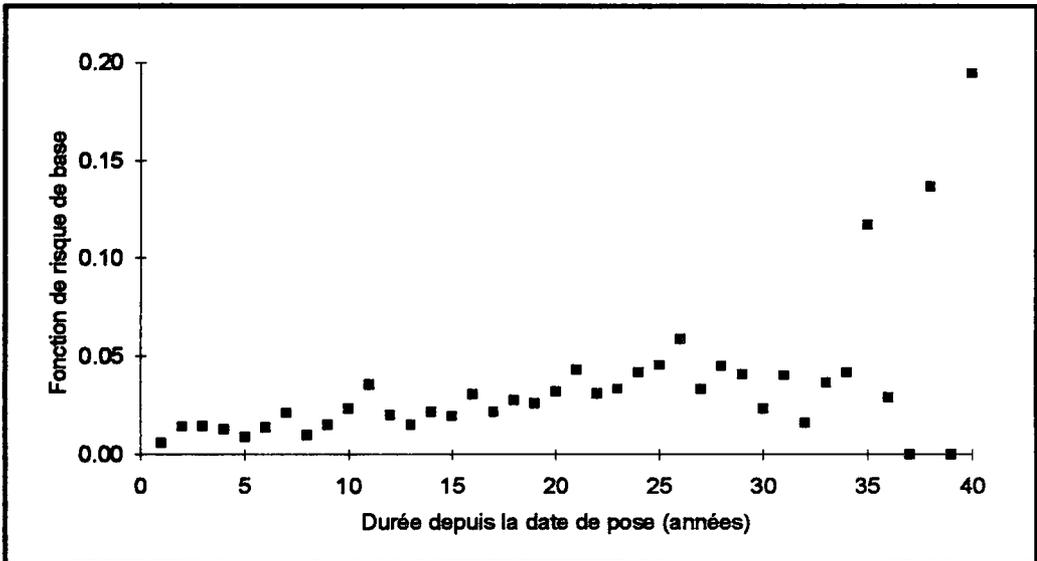


Figure 30 : Risque de défaillance (Modèle de Cox, LED-Bordeaux)

Plutôt que de calculer le risque de défaillance tous les ans, on peut aussi l'estimer tous les trois ans afin de mieux évaluer le phénomène de vieillissement. La formule utilisée est la suivante :

$$h_{moy}(t, Z) = \frac{\sum_{i \in \text{intervalle}} h(t_i, Z) * S(t_{i-1}, Z)}{S(t_j, Z)}$$

t_j étant le temps au début de l'intervalle.

Par exemple si l'on veut estimer le risque d'avoir une défaillance d'ici trois ans à partir de la date de pose, on calcule :

$$h_{moy}(t, Z) = \frac{h(1, Z) * S(0, Z) + h(2, Z) * S(1, Z) + h(3, Z) * S(2, Z)}{S(0, Z)}$$

La figure 31 présente les trois courbes de fonctions de risque sur la LED-Bordeaux. Pour la première défaillance, le risque est d'abord faible et croît avec l'âge. Il y a phénomène de vieillissement. Pour les 2 à 4^{ème} défaillances, le risque est tout de suite élevé, puis reste à peu près constant. Pour la 5^{ème} défaillance et plus, il est encore plus élevé dès le début. Pour ces deux dernières courbes, les valeurs se trouvant aux temps les plus élevés sont moins fiables que celles données aux temps les plus faibles car l'échantillon est beaucoup plus petit.

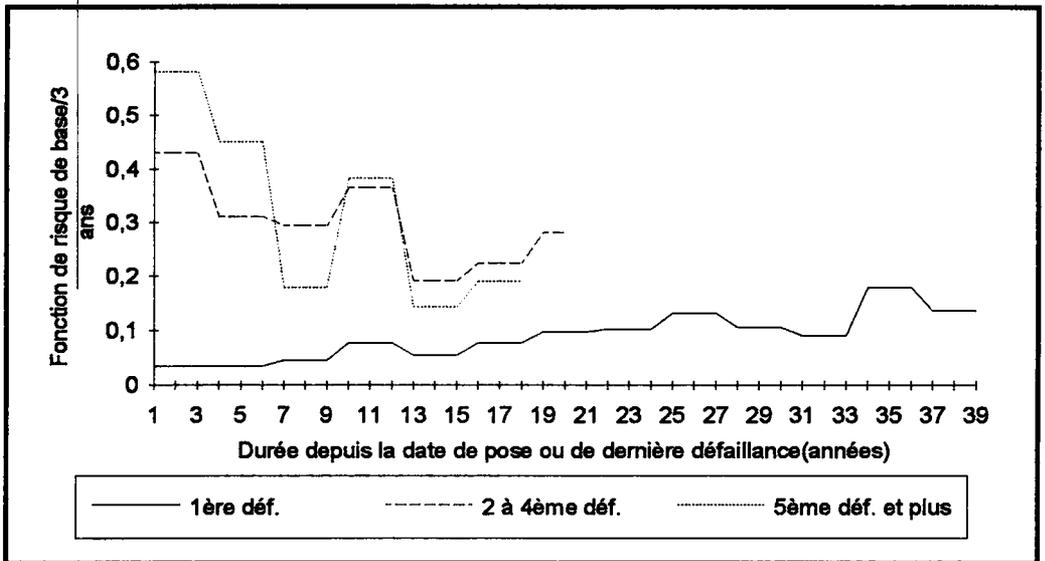


Figure 31 : Courbes des risques de défaillance selon les groupes de défaillances (LED-Bordeaux)

* Courbes de probabilités de non-défaillances

Les figures 32 et 33 présentent quelques courbes de probabilités de non-défaillance pour différents types de conduites.

Les autres courbes se trouvent en annexe 5.

Comme on le voit, les valeurs des différentes fonctions ne sont calculées que sur la période d'observation du fait que la fonction de risque de base h_0 n'est pas mise sous forme analytique.

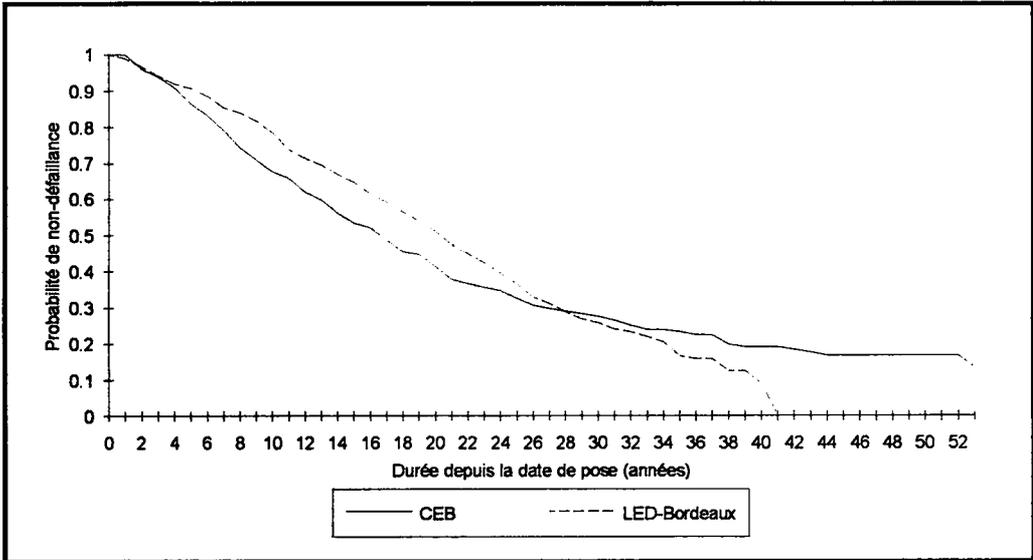


Figure 32 : Courbe de probabilité de non-défaillance (1ère défaillance d'une conduite de 150 mm, de 500 m de long, posée avant 1975, dans un sol corrosif, dans une rue à trafic élevé et sous chaussée)

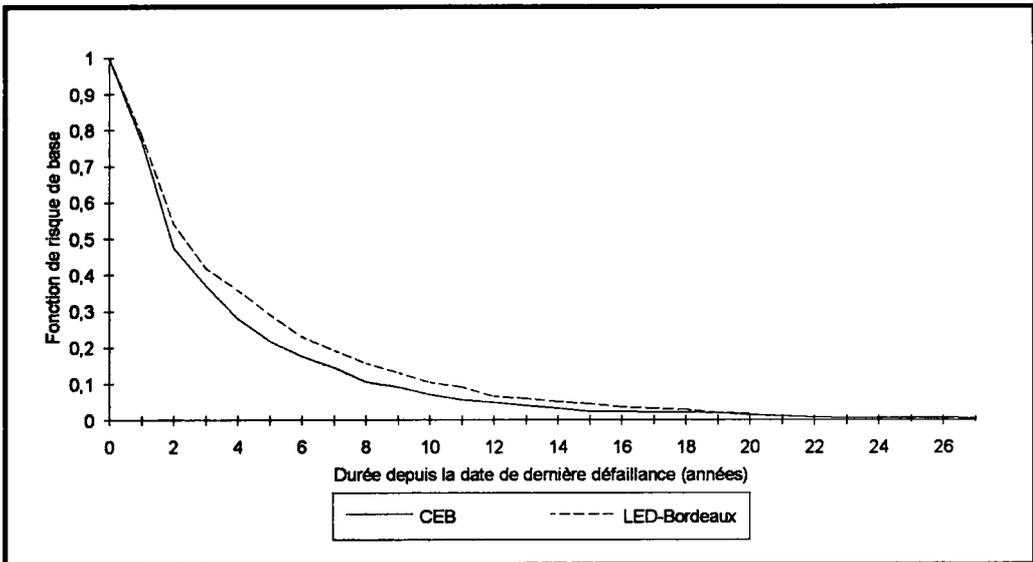


Figure 33 : Courbe de probabilité de non-défaillance (2 à 4ème défaillance d'une conduite de 60 mm, de 500 m de long, posée avant 1966 (fonte grise), dans un sol corrosif, dans une rue à trafic fort, sous chaussée)

Ceci n'est pas gênant pour les premières défaillances car l'observation a lieu, pour la CEB et Bordeaux sur 55 et 40 ans. Par contre pour les deuxièmes défaillances et plus, cette durée d'observation n'est au maximum que de vingt ans. C'est l'inconvénient des modèles semi-

paramétriques qui, s'ils estiment avec le minimum de contraintes les paramètres des facteurs influents, ne permettent pas de faire des prévisions plus longues que l'observation.

5.3.3. Un paramètre particulier : la longueur des tronçons

Les tronçons de canalisations échantillonnés pour l'étude n'ont pas tous la même longueur (entre 20 et 2000 m). Ceci est dû aux données disponibles qui ne permettent pas toujours d'identifier avec précision l'emplacement de la défaillance le long d'un tronçon.

Il est donc utile de prendre en compte la longueur comme un facteur influent. A priori il semblerait logique de considérer que le risque de défaillances varie proportionnellement à la longueur. Sachant que la fonction de risque h est de la forme :

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

nous avons pris comme facteur z_1 caractérisant la longueur, le logarithme népérien de la longueur. Ainsi le résultat attendu pour le paramètre β_1 doit être de l'ordre de 1 dans l'hypothèse de proportionnalité entre le nombre de défaillances et la longueur. En effet dans cette hypothèse on a :

$$h(t, Z) = h_0(t) \times \exp(\beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \dots + \beta_k z_k) \times l$$

$$h(t, Z) = h_0(t) \times \exp(\beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \dots + \beta_k z_k) \times \exp[\ln(l)]$$

$$h(t, Z) = h_0(t) \times \exp[1 \times \ln(l) + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \dots + \beta_k z_k]$$

Or le paramètre β_1 est de l'ordre de 0,52 pour la LED-Bordeaux, de 0,37 pour la CEB et de 0,48 pour les deux syndicats du Bas-Rhin. Le risque de défaillance serait donc plutôt proportionnel à la racine carrée de la longueur. L'étude du M.I.T. [Andreou, 1986] avait déjà permis de faire cette constatation.

Deux raisons principales pourraient expliquer cette valeur de 0,5 :

- les tronçons étudiés ne sont pas homogènes vis-à-vis des facteurs retenus, notamment pour les tronçons les plus longs,
- les défaillances ne sont pas indépendantes les unes des autres et ont souvent lieu en des endroits bien précis des tronçons.

Concernant la première explication, cela signifierait que s'il l'on prend uniquement les tronçons les plus courts, sur lesquels l'erreur est plus faible, ce coefficient β_1 serait plus grand. C'est le cas sur la CEB, mais non sur Bordeaux (Cf. figure 34). Même s'il est évident que l'on fait des erreurs lorsque l'on affirme qu'un tronçon de 2500 m est, par exemple, placé dans un sol corrosif sur toute sa longueur, l'hétérogénéité des tronçons ne constitue pas l'explication principale.

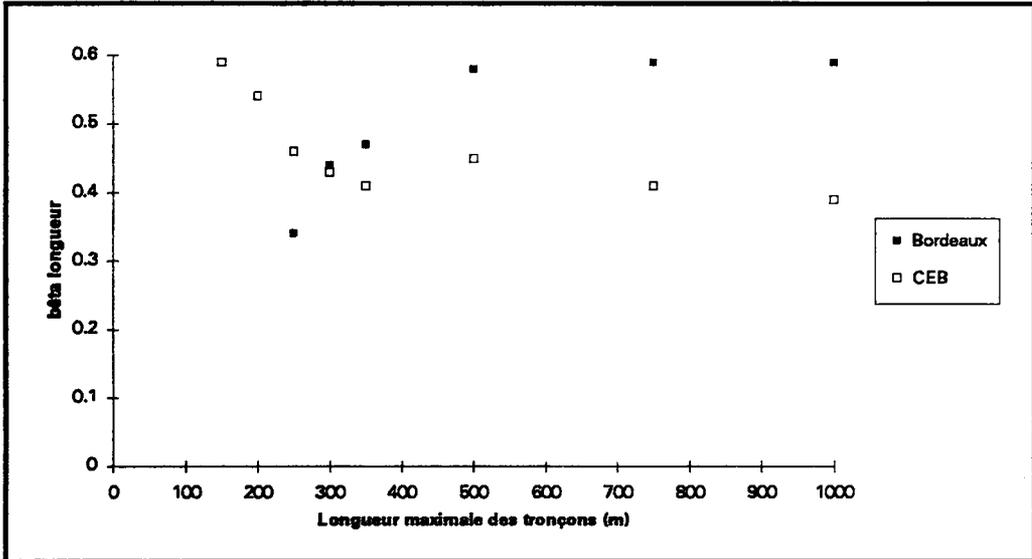


Figure 34 : Evolution du paramètre β_1 en fonction de la longueur maximale des tronçons de l'échantillon initial.

L'hétérogénéité peut également concerner des facteurs dont on ne tient pas compte, comme, par exemple, le passage de nombreux poids lourds à un certain endroit de la conduite du fait de la proximité d'une usine. Ceci affaiblit alors la canalisation à cet endroit et favorise l'apparition de défaillances. Un phénomène local a alors lieu. Là encore ce phénomène est difficile à observer, et même matériellement impossible au niveau d'un service.

Concernant la deuxième explication, plusieurs raisons permettent de l'avancer. Tout d'abord on a pu se rendre compte lors du recueil des données que, lorsqu'une conduite cassait en un endroit précis, la casse suivante, lorsqu'elle a lieu, se situe souvent dans la proximité de la précédente, et même quelquefois au même endroit. La longueur de la conduite importe de moins en moins au fur et à mesure de l'apparition des défaillances.

Ceci peut se constater lorsque l'on examine les trois groupes de défaillances séparément. Le tableau 21 montre que le coefficient β_1 diminue lorsque l'ordre de la défaillance augmente. Le facteur "nombre de défaillances subies par la conduite" devient donc le facteur prépondérant et la longueur n'est plus un facteur essentiel. Ce n'est donc plus le tronçon entier qui est malade mais seulement un endroit précis.

Tableau 21 : Coefficient β_1 en fonction du groupe de défaillances.

| Groupes de défaillances | β_1 | | |
|----------------------------|--------------|------|----------------|
| | LED-Bordeaux | CEB | Bordeaux + CEB |
| 1ère défaillance | 0,62 | 0,49 | 0,54 |
| 2 à 4ème défaillance | 0,37 | 0,21 | 0,30 |
| 5ème déf. et plus | 0,07 | 0,12 | 0,11 |

Ceci vient en fait de la difficulté à déterminer ce que peut être un individu dans ce type d'étude. Pour une étude épidémiologique, l'individu existe comme tel. Par contre pour cette étude un individu a été défini comme un tronçon de canalisations homogène suivants différents facteurs. En réalité un tronçon est ici un groupe d'individus, de tuyaux de 6m de longueur.

L'idéal serait d'utiliser les tuyaux de 6m. Là encore ceci est matériellement impossible, car on ne peut connaître mètre par mètre à quel endroit se trouvent les conduites et donc rattacher une défaillance à une conduite de 6 m.

Pour vérifier l'hypothèse du phénomène local, nous avons constitué artificiellement un échantillon de tronçons plus courts en divisant chaque tronçon en 11 parties égales. Cette façon de procéder a été adoptée essentiellement pour des raisons pratiques. Puis l'hypothèse suivante a été établie : chaque nouveau tronçon ne peut avoir plus d'une défaillance, ce qui ramène, cette fois, à l'étude de toutes les défaillances. Cette hypothèse peut se justifier du fait que la longueur moyenne des tronçons ainsi constitués est de 17 m (189 m pour les tronçons du fichier d'origine).

L'échantillon observé comporte cette fois 12551 individus, alors que dans l'échantillon de base il y en avait 1141 (échantillon sur les diamètres 100, 150, 200, 250 et 300 mm). Dans les deux

cas, les modèles établis prennent en compte les mêmes facteurs significatifs. On trouve les valeurs concernant β_1 dans le tableau 22 :

Tableau 22 : Valeurs du paramètre β_1 de la longueur selon l'échantillon.

| | Echantillon de base | Echantillon expérimental (longueur divisée par 11) |
|-----------|---------------------|---|
| β_1 | 0,48 | 0,60 |

La valeur de β_1 dans l'échantillon expérimental est supérieure à celle de l'échantillon de base. La longueur moyenne de l'échantillon est donc importante dans la détermination de ce facteur. De plus ceci montre que ce n'est pas la probabilité d'apparition de première défaillance qui est proportionnelle à la longueur du tronçon, mais plutôt l'apparition d'une défaillance quelle qu'elle soit.

Cependant la longueur moyenne des tronçons étudiés semble encore trop importante. Aussi pour mesurer l'effet de la longueur moyenne de l'échantillon sur l'estimation de β_1 , les tronçons les plus longs ont été éliminés. Plusieurs modèles ont été établis pour des échantillons pour lesquels a été fixée une longueur maximale de tronçon. La figure 35 présente ces résultats.

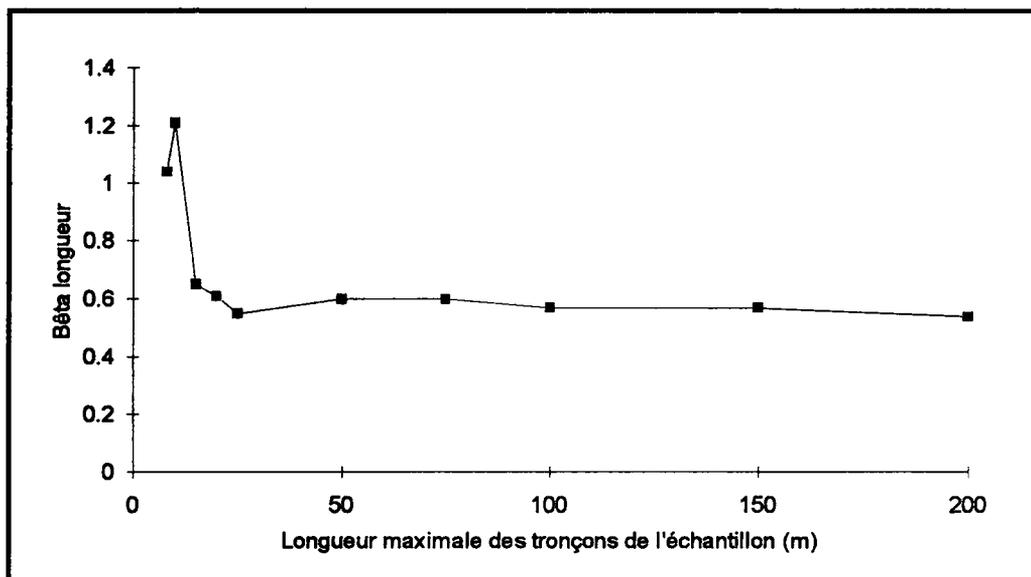


Figure 35 : Valeurs des coefficients β_1 en fonction de la longueur maximale des tronçons de l'échantillon élargi.

On constate que l'hypothèse de proportionnalité de la longueur dans l'expression de la fonction de risque se vérifie pour des tronçons de l'ordre de 10 m maximum, ce qui est proche

de la longueur d'un tuyau standard (6 m). L'hypothèse d'un phénomène local est la plus vraisemblable pour expliquer la valeur de β_1 voisin de 0,6.

Les valeurs de β_1 sont nettement supérieures pour les échantillons de longueur maximale 100 m, ce qui confirme bien la nécessité d'avoir, autant que possible, des tronçons de faible longueur.

En conclusion, si on veut obtenir une valeur de β_1 proche de 1, il est nécessaire de faire les mesures sur des tronçons de 10 m maximum. Il faut également homogénéiser au mieux la longueur des tronçons afin que dans la prévision future, le paramètre β_1 influe moins.

Cependant une valeur de 0,5 n'est pas gênante et il suffira d'en tenir compte dans le calcul du risque de défaillance. Par exemple si on a un risque de 0,01 pour qu'il y ait une casse sur une conduite de 500m, sur une conduite de 1000 m de mêmes caractéristiques ce risque n'est pas de 0,02 mais de $0,01 \times \exp\left[0,5 * \ln\left(\frac{1000}{500}\right)\right] = 0,01 \times \sqrt{2} = 0,014$.

5.3.4. Conclusion

En conclusion de cette partie, l'étude du modèle de Cox a permis de tirer divers enseignements :

- les facteurs influents sur les casses des conduites sont :

- * le nombre de défaillances déjà subies par l'individu,
- * sa longueur,
- * son diamètre,

et dans une moindre mesure,

- * le sol et sa corrosivité,
- * le facteur croisé trafic-chaussée,
- * le passage technologique de la fonte grise à la fonte ductile, ainsi que les conditions de pose (Ap75).

- ces facteurs ont une influence sensiblement identique dans les deux services urbains, ainsi que pour les deux syndicats ruraux, lorsque ces facteurs sont significatifs ;

- le risque de défaillance est proportionnel à la racine carrée de la longueur, ceci étant principalement dû au fait que les défaillances successives sont dépendantes les unes des autres.

- le modèle de Cox a l'avantage d'établir un minimum de contraintes dans l'estimation des paramètres (modèle semi-paramétrique), mais ne permet pas de faire des prévisions sur une durée supérieure à la durée d'observation des défaillances. Il renseigne cependant bien sur la forme des courbes de risque et de probabilités de non-défaillances.

Ce dernier point nous a conduit à élaborer un modèle complètement paramétrique, que nous présentons dans les paragraphes suivants.

5.4. Application du modèle de Weibull

5.4.1. Choix et présentation du modèle

L'étude du modèle de Cox montre que les courbes de risque sont différentes par leur forme et par leur niveau de risque selon les défaillances. La première défaillance voit son risque augmenter avec le temps, tandis que pour les suivantes le risque de défaillances est beaucoup plus fort et semble moins dépendant du temps.

Parmi les modèles utilisables, c'est le modèle de Weibull qui a été choisi. Les raisons sont les suivantes :

- selon les valeurs de ces paramètres, la fonction de risque peut être soit croissante, soit décroissante, soit constante.

- sa formulation est simple. La fonction de risque peut se calculer le plus facilement à partir des paramètres λ et p , ainsi que la probabilité de non-défaillance.

- la forme de ces fonctions s'adapte bien à la forme des fonctions de risque du modèle de Cox comme on le verra par la suite.

La fonction de risque est de la forme suivante :

$$h(t) = \lambda p (\lambda t)^{p-1} \times \exp \left(\sum_i \beta_i Z_i \right),$$

λ et p étant les deux paramètres de la fonction et β_i et Z_i le paramètre et la valeur des variables étudiées, déjà utilisés dans le modèle Cox.

p est le paramètre de forme de la fonction.

H, la fonction de risque cumulée est égale à :

$$H(t) = (\lambda t)^p \exp\left(\sum_i \beta_i Z_i\right)$$

La fonction de non-défaillance est la suivante :

$$S(t) = \exp\left[-(\lambda t)^p \exp\left(\sum_i \beta_i Z_i\right)\right]$$

La fonction densité de la variable T est :

$$f(t) = \exp\left[-(\lambda t)^p \exp\left(\sum_i \beta_i Z_i\right)\right] \lambda p (\lambda t)^{p-1} \times \exp\left(\sum_i \beta_i Z_i\right)$$

Si l'on fait le changement de variable suivant : $Y = \log T$, on a alors un modèle linéaire de la forme :

$$Y = \alpha + Z_i \beta_i^* + \sigma W,$$

où $\alpha = -\log \lambda$, $\sigma = p^{-1}$, $\beta_i^* = -\sigma \beta_i$ et W étant la variable d'erreur de densité :

$$f(w) = e^{(w - e^{-w})} \quad [\text{Kalbfleisch et Prentice, 1980}].$$

C'est sous cette forme que le logiciel EGRET estime les différents paramètres en utilisant également la méthode du maximum de vraisemblance.

5.4.2. La stratification avec le modèle de Weibull

Comme pour le modèle de Cox, il est nécessaire de stratifier en distinguant différentes fonctions $h(t)$ en fonction du groupe de défaillances. Cependant le logiciel EGRET ne permettant pas de pratiquer la méthode de stratification avec ce modèle, nous avons procédé de la manière suivante.

Dans un premier temps, les paramètres λ_j , p_j et β_{ij} sont estimés pour chacun des groupes j de défaillances. A l'issue de ce calcul, les vecteurs $\underline{\beta}_j$, vecteurs des paramètres estimés des

facteurs influents, sont connus ainsi que les matrices de variance-covariance associées $S_j = T_j^2$. On recherche alors le vecteur β des paramètres β_i tel que $\sum_j \langle T_j^{-1}(\beta - \bar{\beta}_j), T_j^{-1}(\beta - \bar{\beta}_j) \rangle$ soit minimum, " $\langle \rangle$ " correspondant au produit scalaire.

Cette méthode est utilisée car elle prend en compte la variance des différents échantillons, et indirectement leur taille. Cela revient donc à chercher le vecteur β au sens de la méthode des moindres carrés pondérés par T_j . Si l'on dérive par rapport à β on a alors :

$$\sum_j S_j^{-1}(\beta - \bar{\beta}_j) = 0$$

d'où :

$$\left(\sum_j S_j^{-1} \right) \beta = \sum_j (S_j^{-1} \bar{\beta}_j).$$

On a donc :

$$\beta = \left[\sum_j S_j^{-1} \right]^{-1} \sum_j (S_j^{-1} \bar{\beta}_j)$$

Cette méthode a été appliquée à l'aide du tableur Excel 4.

Dans le cas présent, comme on a trois groupes de défaillances on a :

$$\beta = \left[S_1^{-1} + S_2^{-1} + S_3^{-1} \right]^{-1} \left[S_1^{-1} \bar{\beta}_1 + S_2^{-1} \bar{\beta}_2 + S_3^{-1} \bar{\beta}_3 \right].$$

Les résultats sont donnés dans le paragraphe suivant.

5.4.3. Résultats

5.4.3.1. Estimation des paramètres β_i

Les paramètres β_i du vecteur β estimés selon la méthode du paragraphe précédent sont les paramètres définis comme significatifs sur le modèle de Cox. Là encore, comme il y a stratification, on fait l'hypothèse que les facteurs influent de la même façon quelle que soit la défaillance. Le tableau 23 représente les paramètres du modèle de Weibull calculés selon la méthode du paragraphe précédent.

Tableau 23 : Paramètres β_i du modèle de Weibull avec stratification (le chiffre entre parenthèse correspond à l'écart type)

| Facteurs | β_i | | | | | |
|-----------------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|---------------|
| | LED-Bordeaux | | CEB | | Bas-Rhin | |
| Longueur | 0,57 | (0,05) | 0,37 | (0,05) | 0,49 | (0,09) |
| Diamètre | -0,85 | (0,11) | -0,34 | (0,10) | -0,39 | (0,26) |
| Sol | 0,34 | (0,07) | 0,29 | (0,09) | | |
| Trafic-Chaussée | 0,47 | (0,09) | 0,57 | (0,17) | -0,45 | (0,20) |
| | | | | | | (Trafic seul) |
| Nature cana | -0,13 | (0,09) | -0,64 | (0,14) | | |

Le paramètre "Ap75" ne peut être pris en compte dans ce cas car les conduites ayant eu plus de cinq défaillances ont toutes été posées avant 1975. Il n'était donc pas possible de mesurer son influence.

Comparées au modèle de Cox, les valeurs des paramètres sont proches d'un modèle à l'autre, excepté sur Bordeaux où les facteurs "Trafic-Chaussée" et "Nature cana." sont différents. C'est ici dû à l'élimination du facteur "Ap75".

5.4.3.2. Estimation des paramètres de la fonction de risque de base

Les paramètres de la fonction de risque de base sont dans le tableau 24.

Concernant le troisième groupe de défaillance, c'est le modèle exponentiel qui a été choisi ($p=1$). Ceci signifie que, à partir de la 5ème défaillance, elles apparaissent à un taux constant. Notons que pour le deuxième groupe de défaillance, le paramètre p est également proche de 1. Il sera intéressant à l'avenir de regrouper les groupes 2 et 3 de défaillances.

Les différents paramètres λ et p sont assez différents d'un service à l'autre. Le paramètre d'intensité λ croît avec le groupe de défaillance. Le risque de base augmente donc avec le nombre de défaillances. Sur Bordeaux ceci est moins évident lorsque l'on compare les groupes 2 et 3 de défaillances. Le taux de casse est sensiblement le même.

Tableau 24 : Paramètres des fonctions de Weibull et exponentiel selon les services et les groupes de défaillances

| Groupe de défaillance | | LED-Bordeaux | CEB | Bas-Rhin |
|---------------------------------|-------------|--------------|------|----------|
| 1ère défaillance | λ_1 | 0,03 | 0,02 | 0,03 |
| | p_1 | 1,67 | 1,21 | 1,27 |
| 2 à 4 ème déf. | λ_2 | 0,15 | 0,10 | 0,07 |
| | p_2 | 1,06 | 0,99 | 1,08 |
| 5ème déf. et + (exponentiel) | λ_3 | 0,15 | 0,20 | |
| | p_3 | 1 | 1 | |

Les courbes des figures 36, 37 et 38 montrent les fonctions de risque de base pour les différents services.

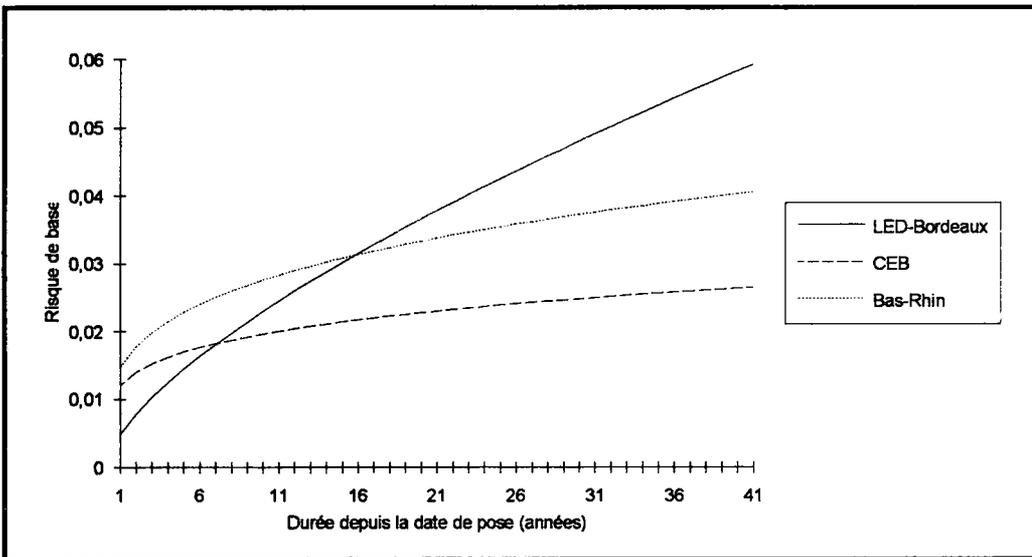


Figure 36 : Fonctions de risque de base pour la première défaillance.

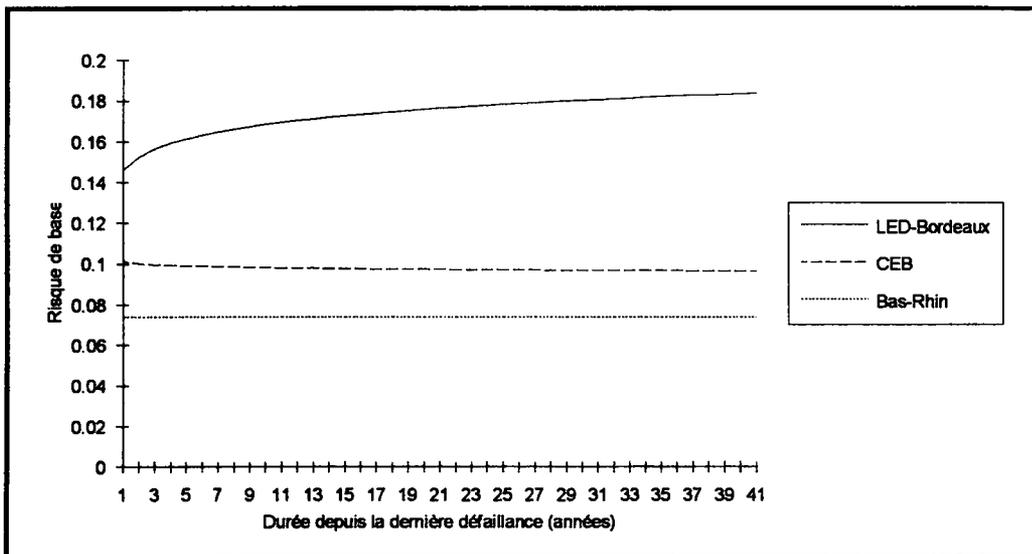


Figure 37 : Fonctions de risque de base pour les 2^{ème} et + pour le Bas-Rhin).

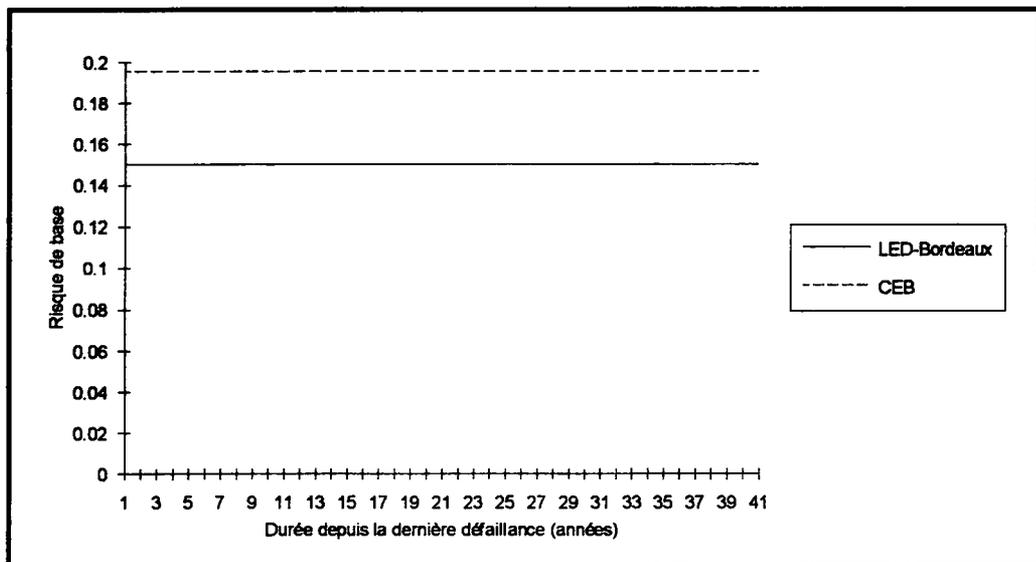


Figure 38 : Fonctions de risque de base pour les 5^{èmes} défaillances et +.

Les fonctions de risque du modèle de Weibull sont donc les suivantes :

Sur Bordeaux :

Première défaillance :

$$h(t) = 0,0048 t^{0,67} \times \exp \left[0,57 \ln \left(\frac{\text{longueur}}{500} \right) - 0,85 \ln \left(\frac{\text{diamètre}}{60} \right) + 0,34 \times (\text{sol}) \right. \\ \left. + 0,47 \times (\text{trafic-chaussée}) - 0,13 \times (\text{année de pose66}) \right]$$

Deuxième à quatrième défaillance :

$$h(t) = 0,1419 t^{0,06} \times \exp \left[0,57 \ln \left(\frac{\text{longueur}}{500} \right) - 0,85 \ln \left(\frac{\text{diamètre}}{60} \right) + 0,34 \times (\text{sol}) \right. \\ \left. + 0,47 \times (\text{trafic-chaussée}) - 0,13 \times (\text{année de pose66}) \right]$$

Cinquième défaillance et + :

$$h(t) = 0,15 \times \exp \left[0,57 \ln \left(\frac{\text{longueur}}{500} \right) - 0,85 \ln \left(\frac{\text{diamètre}}{60} \right) + 0,34 \times (\text{sol}) \right. \\ \left. + 0,47 \times (\text{trafic-chaussée}) - 0,13 \times (\text{année de pose66}) \right]$$

Sur la CEB :

Première défaillance :

$$h(t) = 0,0106 t^{0,21} \times \exp \left[0,37 \ln \left(\frac{\text{longueur}}{500} \right) - 0,34 \ln \left(\frac{\text{diamètre}}{60} \right) + 0,29 \times (\text{sol}) \right. \\ \left. + 0,57 \times (\text{trafic-chaussée}) - 0,64 \times (\text{année de pose66}) \right]$$

Deux à quatrième défaillance :

$$h(t) = 0,1013 t^{-0,01} \times \exp \left[0,37 \ln \left(\frac{\text{longueur}}{500} \right) - 0,34 \ln \left(\frac{\text{diamètre}}{60} \right) + 0,29 \times (\text{sol}) \right. \\ \left. + 0,57 \times (\text{trafic-chaussée}) - 0,64 \times (\text{année de pose66}) \right]$$

Cinquième défaillance et + :

$$h(t) = 0,20 \times \exp \left[0,37 \ln \left(\frac{\text{longueur}}{500} \right) - 0,34 \ln \left(\frac{\text{diamètre}}{60} \right) + 0,29 \times (\text{sol}) \right. \\ \left. + 0,57 \times (\text{trafic-chaussée}) - 0,64 \times (\text{année de pose66}) \right]$$

Sur le Kochersberg et le Kronthal :

Première défaillance :

$$h(t) = 0,0148 t^{0,27} \times \exp \left[0,49 \ln \left(\frac{\text{longueur}}{500} \right) - 0,39 \ln \left(\frac{\text{diamètre}}{60} \right) - 0,45 \times (\text{trafic}) \right]$$

Deuxième défaillance et + :

$$h(t) = 0,07 \times \exp \left[0,49 \ln \left(\frac{\text{longueur}}{500} \right) - 0,39 \ln \left(\frac{\text{diamètre}}{60} \right) - 0,45 \times (\text{trafic}) \right]$$

5.5. Conclusions sur l'application des modèles

5.5.1. Avantages et inconvénients des modèles de Cox et de Weibull

Comme on l'a vu, le modèle de Cox dépend de la durée d'observation des données. Il ne permet donc pas de faire des prévisions à plus long terme que la période d'observation. Pour la première défaillance ceci n'est pas gênant, car sur celle-ci la durée d'observation est suffisamment longue. Par contre sur les défaillances suivantes, la durée d'observation est de 10 à 15 ans en moyenne. Au contraire le modèle de Weibull permet de faire des prévisions à plus long terme, car il est sous forme analytique.

Le fait qu'il soit sous cette forme facilite également son utilisation. Le modèle de Cox est lui plus difficile à utiliser car la fonction de risque de base est sous forme de valeurs discrètes données à chacun des pas de temps.

Le principal avantage du modèle de Cox est qu'il n'établit qu'un minimum de contraintes dans l'estimation des paramètres β_i , qui sont alors plus précis. Cependant les paramètres estimés à partir du modèle de Weibull sont assez proches de ceux estimés par Cox.

Pour ces raisons, le modèle de Weibull semble plus opérationnel dans la prévision des défaillances sur un réseau. Cependant le modèle de Cox sera utilisé pour mettre en évidence les facteurs significatifs estimés pour le modèle de Weibull.

5.5.2. Pistes pour l'utilisation future des modèles

La comparaison des résultats selon les services permet de donner plusieurs tendances sur l'utilisation future de ces modèles dans des services d'eau potable (Cf figure 39).

Tout d'abord les facteurs influents sont les mêmes, exceptés sur les deux syndicats du Bas-Rhin, pour lesquels l'historique est plus petit. Les valeurs des paramètres β_i sont également assez proches les uns des autres. On pourra donc à l'avenir, dans un service sur lequel on a peu de données environnementales, affecter ces paramètres lors de la création d'un modèle de prévision des défaillances.

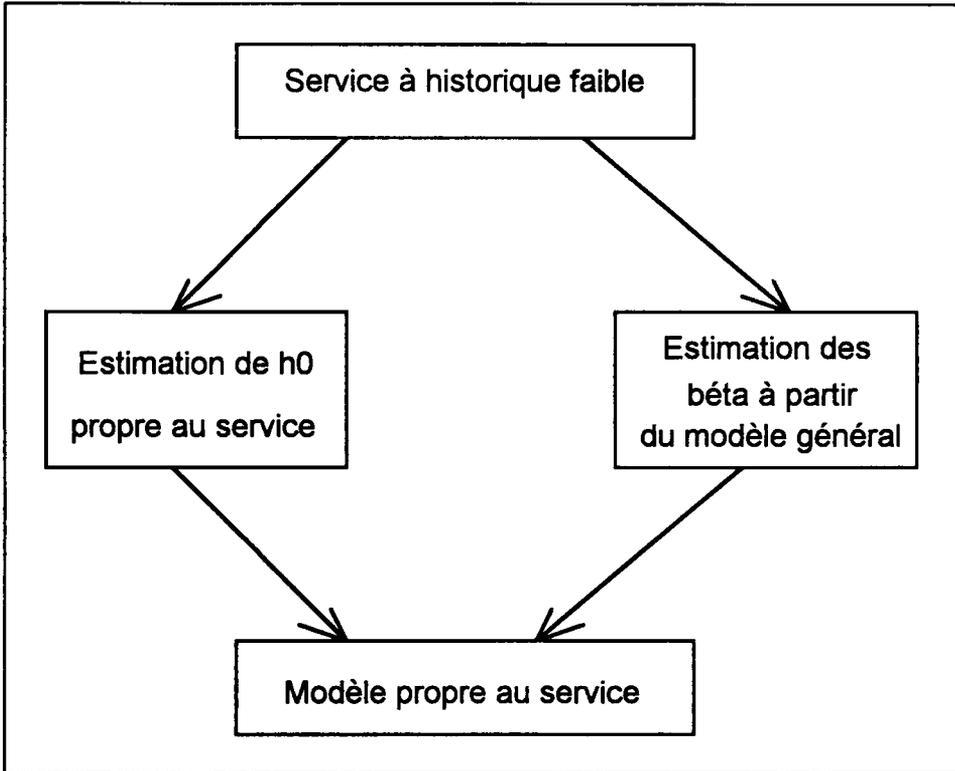


Figure 39 : Création d'un modèle sur un service à historique faible.

Par contre on a vu que les formes des courbes de risques sont bien différentes les unes des autres. La fonction h_0 exprime donc la spécificité du service (climat, service urbain-service rural, réseau âgé ou non) dans le modèle. Il est donc important de pouvoir estimer cette fonction.

La méthode utilisée pour ceci est la méthode appelée méthode d'apprentissage présentée dans le chapitre 7.

Chapitre 6

Adéquation du modèle

| | |
|--|-----|
| 6.1. CALCUL DE L'ESPERANCE DU NOMBRE DE DEFAILLANCES..... | 129 |
| 6.2. COMPARAISON AVEC LES DONNEES REELLES | 131 |
| 6.2.1. Comparaison des défaillances prévues et réelles sur 40 ans | 131 |
| 6.2.1.1. Retour sur l'hypothèse de même influence quelle que soit la défaillance..... | 133 |
| 6.2.1.2. Prise en compte des défaillances juvéniles | 136 |
| 6.2.2. Comparaison des défaillances réelles à une prévision sur 10 et 2 ans..... | 141 |
| 6.2.2.1. Prévision sur dix ans | 141 |
| 6.2.2.2. Prévision sur deux ans | 147 |
| 6.3. MESURE DE L'INFLUENCE DE L'OUBLI D'UN FACTEUR | 147 |
| 6.4. CONCLUSION | 154 |

L'estimation du modèle dans le chapitre précédent ne donne aucune information sur la prévision du nombre de casses sur chacune des conduites ou sur un réseau complet. Il est donc important de comparer le nombre de défaillances réelles obtenu au nombre théorique de défaillances estimé à partir du modèle. Nous verrons dans les paragraphes suivants comment le nombre de défaillances théorique est estimé, puis les résultats nous montreront quelle correction peut être appliquée au modèle afin de mieux le caler sur les données réelles. Enfin nous verrons dans quelle mesure l'oubli d'un facteur estimé comme influent peut faire varier l'espérance du nombre de défaillances.

6.1. Calcul de l'espérance du nombre de défaillances

Le nombre théorique de défaillances est estimé à partir de l'espérance de défaillances. La formule générale de l'espérance mathématique est :

$$E(N(t)) = \sum_{k=0}^{\infty} k P(N(t) = k),$$

$P(N(t)=k)$ étant la probabilité pour que k défaillances aient eu lieu au temps t .

Cette probabilité est égale à :

$$P(N(t) = k) = \int_0^t f_1(t_1) \int_{t_1}^t f_2(t_2 - t_1) \dots \int_{t_{k-2}}^t f_{k-1}(t_{k-1} - t_{k-2}) \int_{t_{k-1}}^t f_k(t_k - t_{k-1}) S_{k+1}(t - t_k) dt_k dt_{k-1} dt_2 dt_1$$

où f_i est la fonction de densité de l'apparition de la i -ième défaillance et S_i la probabilité de non-défaillance concernant la i -ième défaillance.

La démonstration se trouve en annexe 6. Les t_i correspondent au temps d'apparition des différentes défaillances (Cf. fig. 40).

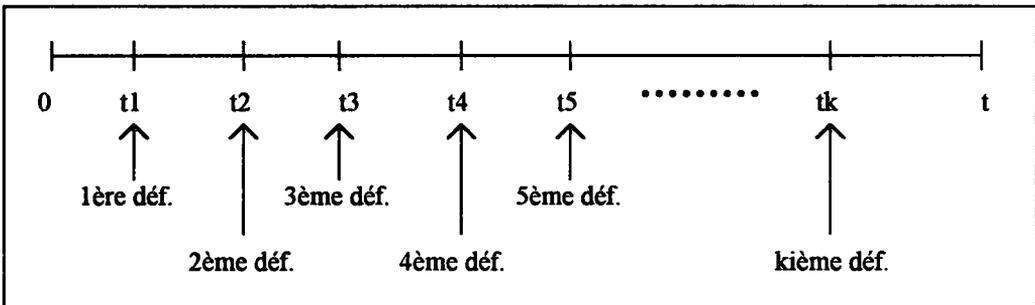


Figure 40 : Répartition de k défaillances entre 0 et t .

L'espérance sera donc égale à :

$$E(N(t)) = \sum_{k=0}^{\infty} k \left[\int_0^t f_1(t_1) \int_{t_1}^t f_2(t_2 - t_1) \dots \int_{t_{k-2}}^t f_{k-1}(t_{k-1} - t_{k-2}) \int_{t_{k-1}}^t f_k(t_k - t_{k-1}) S_k(t - t_k) dt_k dt_{k-1} \dots dt_2 dt_1 \right]$$

Si le modèle utilisé est un modèle de Cox (pas de temps discrets), cette espérance devient :

$$E(N(t)) = \sum_{k=0}^{\infty} k \left[\sum_{t_1=0}^t f_1(t_1) \sum_{t_2=t_1}^t f_2(t_2 - t_1) \dots \sum_{t_{k-1}=t_{k-2}}^t f_{k-1}(t_{k-1} - t_{k-2}) \sum_{t_k=t_{k-1}}^t f_k(t_k - t_{k-1}) S_{k+1}(t - t_k) \right]$$

Si l'on utilise un modèle de Weibull pour la 1ère défaillance, puis pour les 2 à 4ème et ensuite un modèle exponentiel à partir de la 5ème, la partie de l'intégrale concernant le modèle exponentiel pourra être simplifiée. Elle sera égale à :

$$A_{\text{exp}} = \lambda_3^{*(k-4)} \exp[-\lambda_3^*(t - t_4)] \frac{(t - t_4)^{k-4}}{(k-4)!}$$

λ_3^* étant le risque de défaillances du modèle exponentiel.

Si l'on partage l'espérance de la manière suivante :

$$E(N(t)) = \sum_{k=1}^4 kP(N(t) = k) + \sum_{k=5}^{\infty} kP(N(t) = k),$$

on obtient alors :

$$E(N(t)) = \sum_{k=1}^4 kP(N(t) = k) + \int_0^t \dots \int_0^t f_1^*(t_1) f_2^*(t_2 - t_1) f_2^*(t_3 - t_2) f_2^*(t_4 - t_3) \left[4 \times (1 - \exp[-\lambda_3^*(t - t_4)]) + \lambda_3^*(t - t_4) \right] dt_4 dt_3 dt_2 dt_1$$

f_i^* étant la fonction de densité du i-ème groupe de défaillances (Cf. annexe 6).

C'est cette formule qui a été utilisée dans le calcul de l'espérance. Cette espérance correspond à une conduite étudiée depuis sa date de pose, n'ayant donc jamais eu de défaillance.

Supposons maintenant que l'on connaisse de la conduite une partie de son passé, à savoir le nombre de défaillances et leur date d'apparition jusqu'à un temps t_d , date de début d'observation (Cf. figure 41). L'espérance à calculer sera différente de la précédente, puisqu'elle tiendra compte de la date de dernière défaillance ainsi que de la durée depuis celle-ci.

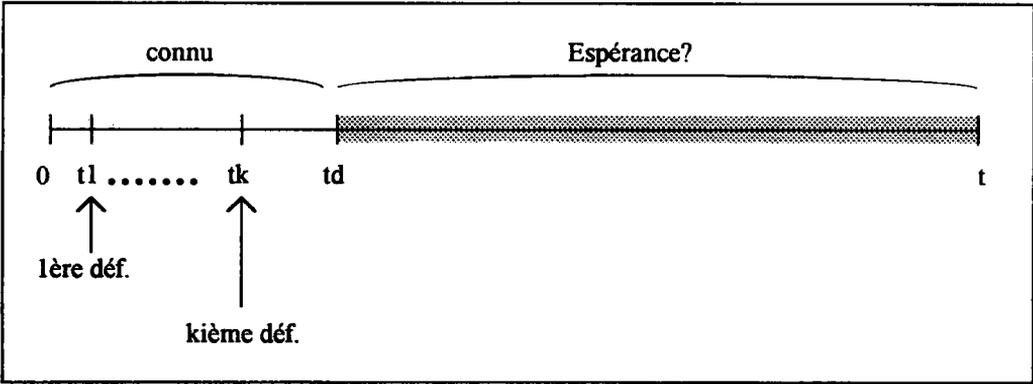


Figure 41 : Espérance de défaillance à partir de t_d à la suite de k défaillances.

On aura alors 5 espérances possibles selon le nombre de défaillances subies (Cf. annexe 6). Si aucune défaillance n'a eu lieu, l'espérance sera, par exemple, de :

$$E(N(t)) = \sum_{k=1}^4 kP(N(t) = k) + \int_{t_d}^t \dots \int_{t_3}^t \frac{f_1^*(t_1)}{S_1^*(t_d)} f_2^*(t_2 - t_1) f_2^*(t_3 - t_2) f_2^*(t_4 - t_3) \left[4 \times (1 - \exp[-\lambda_3^*(t - t_4)]) + \lambda_3^*(t - t_4) \right] dt_4 dt_3 dt_2 dt_1$$

Les autres espérances se trouvent en annexe 6. Dans les deux cas l'espérance a été calculée à partir d'un programme élaboré en langage Turbo-Pascal.

Nous allons voir maintenant comment ces espérances ont été utilisées.

6.2. Comparaison avec les données réelles

La validation a eu lieu sur le réseau de la LED-Bordeaux en deux étapes. Tout d'abord ont été comparées sur la période 1951-1990 les défaillances réelles et les défaillances que l'on aurait pu prévoir si l'on avait eu le modèle au début de l'observation en 1951.

Ensuite ont été comparées les défaillances réelles ayant eu lieu entre 1983 et 1992 aux défaillances prévues à partir d'un modèle établi sur les données entre le début de l'observation (1951) et 1982. Une autre comparaison a eu lieu sur la période 1991-1992.

6.2.1. Comparaison des défaillances prévues et réelles sur 40 ans

Pour chacun des tronçons posés avant 1990 sur Bordeaux, ont été comparés le nombre de défaillances apparues réellement depuis leur date de pose et le nombre de défaillances prévues sur la même période calculé à partir de l'espérance (Cf. Figure 42). Cette espérance a été

calculée à partir du modèle de Weibull stratifié provenant des données de Bordeaux de 1951 à 1990.

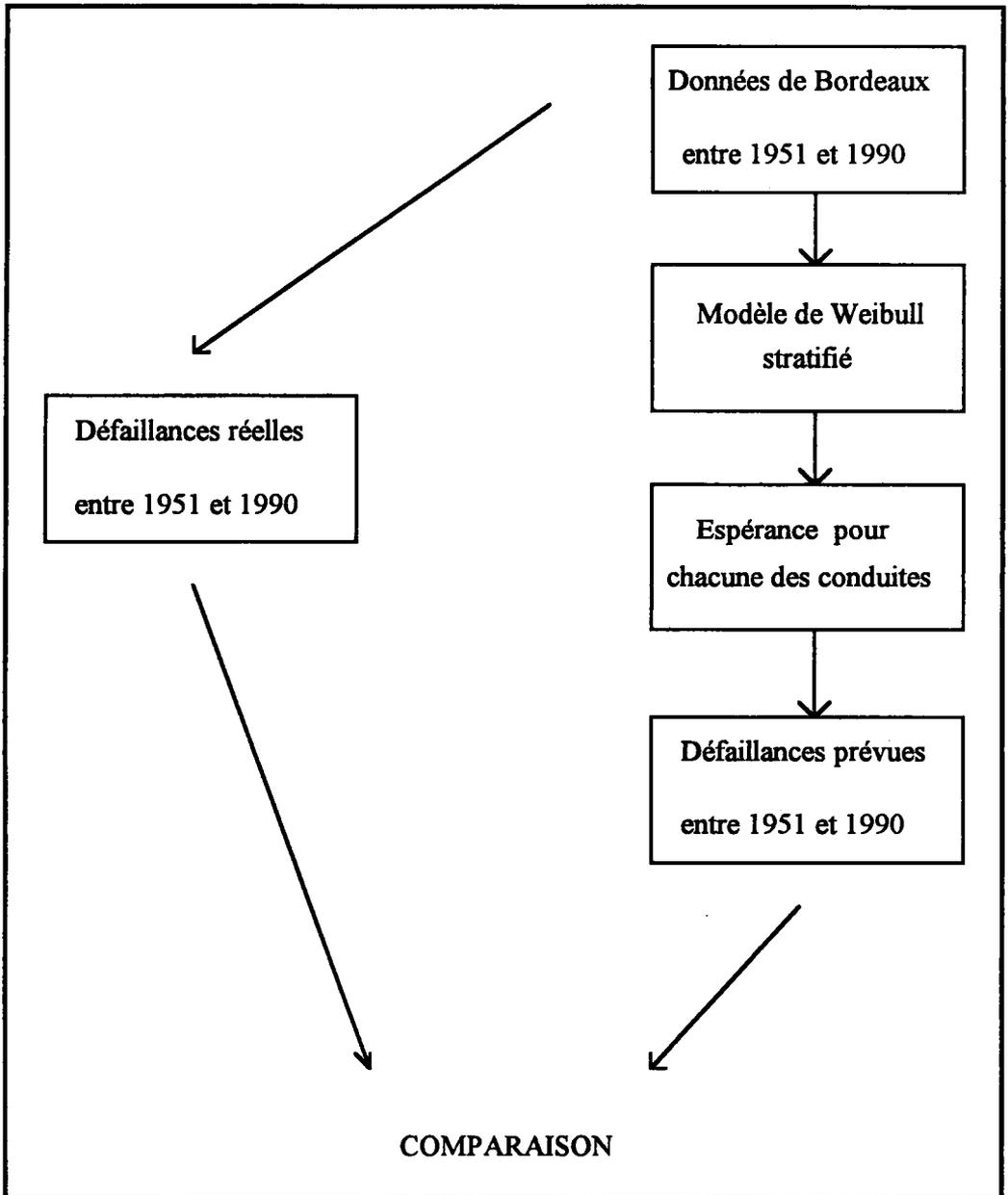


Figure 42 : Démarche utilisée pour la comparaison des défaillances prévues et réelles

Le nombre de défaillances prévues est alors de 434, pour 522 réelles sur la totalité de l'échantillon. Si l'on prend la méthode du chapitre 5 pour estimer l'intervalle de confiance à

95 % du nombre de défaillances prévues sur l'échantillon, les bornes de cet intervalle sont 346 et 546 défaillances.

Une autre comparaison peut se faire en classant les conduites par groupe de 30 par ordre décroissant des défaillances prévues (premier groupe : les trente plus défaillantes, deuxième groupe : les trente suivantes, etc...). Pour chacun des groupes est calculé le nombre moyen de défaillances prévues comparé au nombre moyen de défaillances réelles.

L'histogramme de la figure 43 représente cette comparaison.

Pour les premières classes, le nombre de défaillances est sous-estimé. C'est dans ces classes que l'erreur est la plus importante. Cependant les classes de défaillances prévues décroissent de la même manière que les classes de défaillances réelles. Cette erreur peut provenir des hypothèses que l'on a pu faire dans la construction du modèle :

- soit l'hypothèse de même influence quelle que soit la défaillance est trop forte,
- soit il existe un facteur que l'on a pu oublier.

6.2.1.1. Retour sur l'hypothèse de même influence quelle que soit la défaillance

Pour tester la première hypothèse, on calcule l'espérance à partir de trois modèles propres à chacun des groupes de défaillance. Pour chacun des groupes de défaillances on estime donc les facteurs influents et leurs paramètres β_j , ainsi que les paramètres λ et p du modèle de Weibull. Ces valeurs sont représentées dans le tableau 25.

Tableau 25 : Paramètres β_j estimés propres à chaque groupe de défaillance (signifie que le facteur n'est pas significatif).**

| | 1ère défaillance | 2 à 4ème défaillance | 5ème défaillance et + |
|-----------------|------------------|----------------------|-----------------------|
| λ | 0,03 | 0,15 | 0,14 |
| p | 1,65 | 1,06 | 1 |
| Longueur | 0,74 | 0,59 | ** |
| Diamètre | -1,01 | -1,01 | -0,51 |
| Sol | 0,51 | 0,21 | 0,56 |
| Trafic-chaussée | 0,84 | ** | ** |
| Nature cana | -0,34 | ** | 0,79 |

Le nombre de défaillances prévues est alors de 378, ce qui est plus faible que précédemment. De plus l'histogramme par classes de défaillances décroissantes n'est pas amélioré (Cf. Fig. 44).

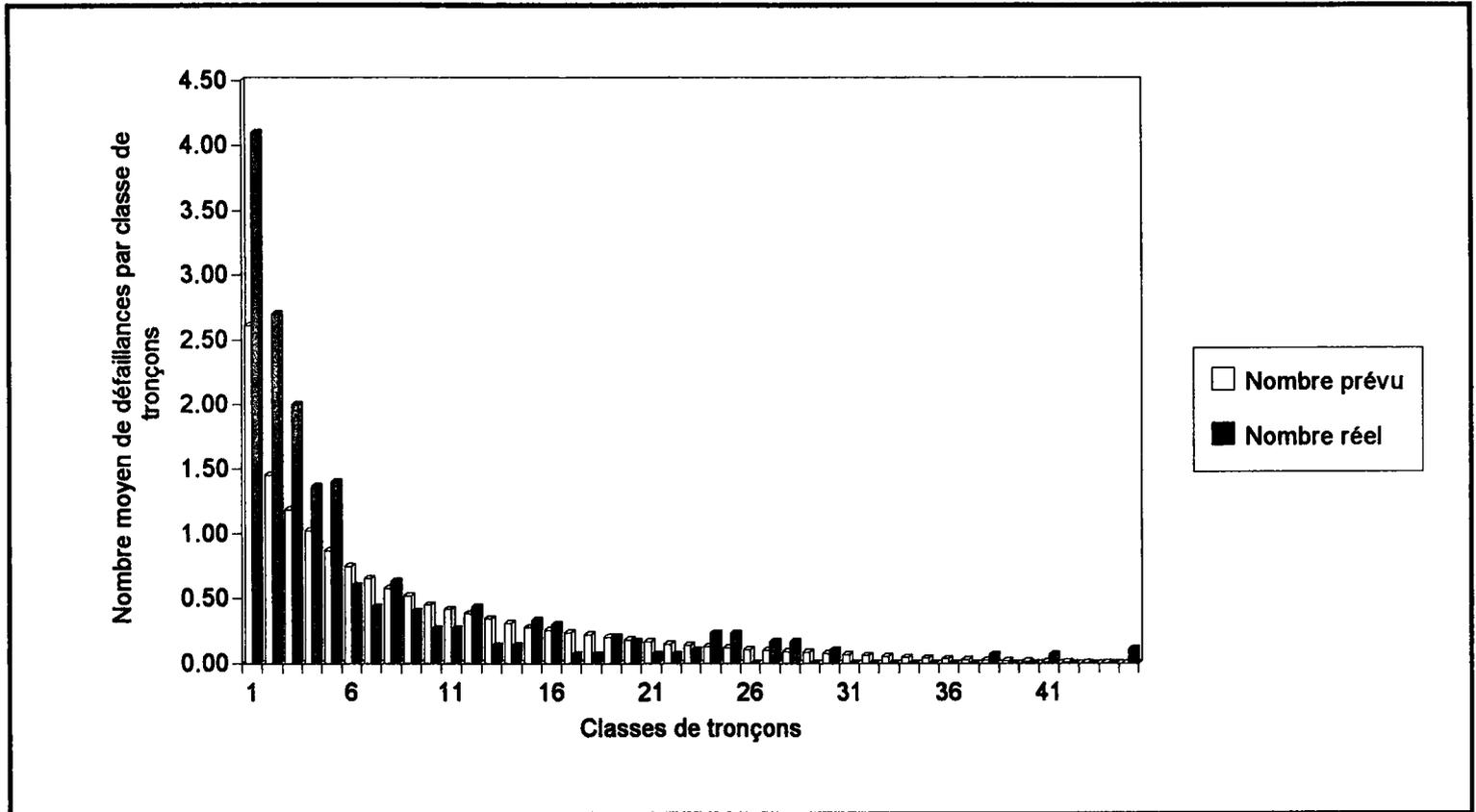


Figure 43 : Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons.

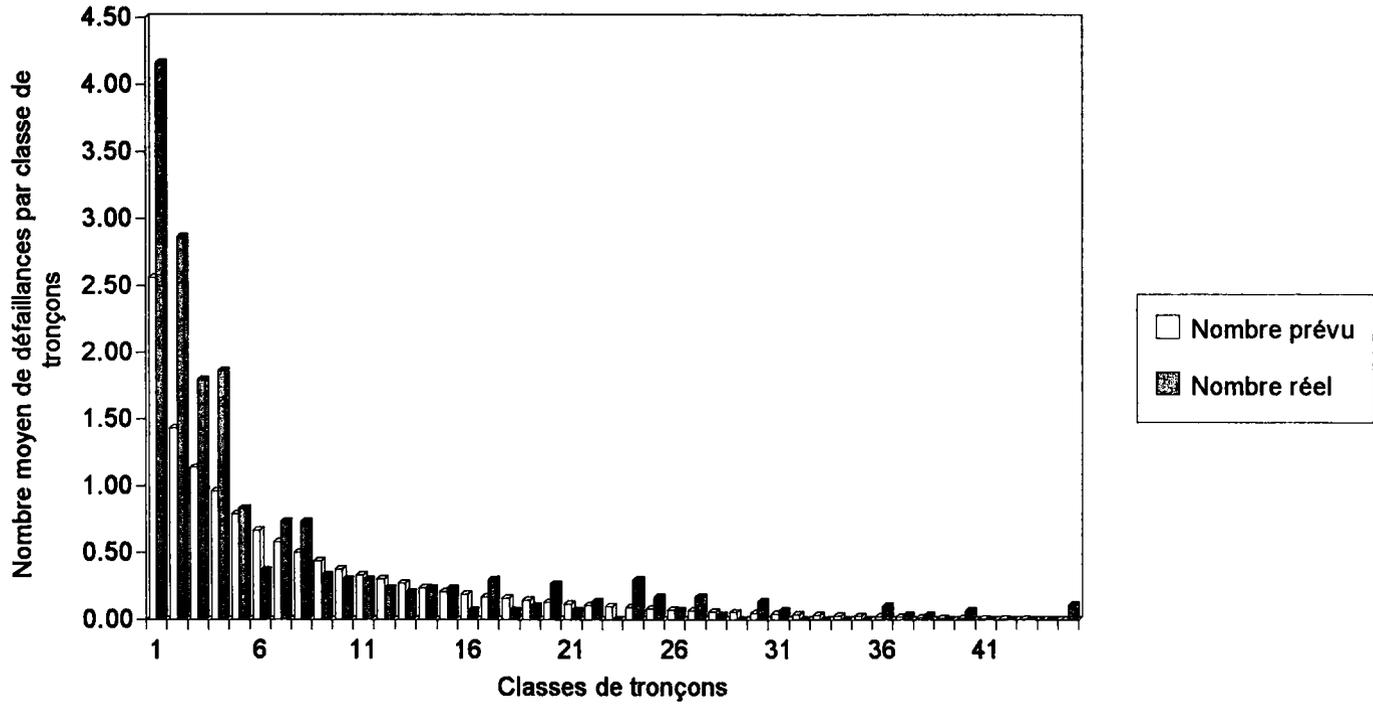


Figure 44 : Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (Influence différente des facteurs selon le groupe de défaillance).

Dans ce cas, ce n'est donc pas l'hypothèse de même influence quelle que soit le groupe de défaillance qui entraîne un biais aussi important.

6.2.1.2. Prise en compte des défaillances juvéniles

Si l'on examine les conduites qui ont eu des défaillances alors qu'elles ont été classées comme faiblement défaillantes, on peut constater que ce sont surtout les casses qui ont eu lieu après un certain âge qui ont une réelle influence sur les casses suivantes. Des casses ("défaillances juvéniles") ayant eu lieu en début de vie de la conduite ne seraient donc qu'un "péché de jeunesse" et ne traduiraient pas un mauvais état réel.

L'introduction d'un paramètre supplémentaire t_0 , à caler, dans la fonction de Weibull permettrait de ne considérer que les défaillances ayant eu lieu à partir de cette date t_0 . L'étude ne prendrait en compte que les défaillances correspondant à une réelle dégradation dans le temps de la conduite. Le modèle de Weibull serait alors de la forme suivante :

$$h(t) = \lambda p [\lambda(t - t_0)]^{p-1} \times \exp\left(\sum_i \beta_i Z_i\right)$$

Il serait alors nécessaire de prendre construire une nouvelle vraisemblance permettant de définir les paramètres des facteurs influents. Le facteur t_0 correspond en fait au paramètre c du modèle de Herz présenté au chapitre 8 (§ 8.3.2.2.).

Une deuxième méthode serait d'introduire a posteriori un nouveau facteur permettant de définir si la défaillance qui a eu lieu est une défaillance juvénile. Ce facteur exprimerait pour la conduite le risque de rentrer dans un état de vieillissement accéléré.

C'est cette deuxième méthode qui a été choisie. Le facteur "vieillessement" établi est défini de la manière suivante. Il est égal à 0 lorsque la conduite n'a pas eu de défaillance après 15 ans, et il est égal à 1 si la conduite a eu une défaillance après 15 ans.

Le tableau 26 représente les paramètres β_i calculés en incluant ce nouveau facteur. Le paramètre du facteur "vieillessement" est le paramètre le plus fort (2,42) ce qui montre sa grande influence. On peut remarquer que le facteur "Trafic-Chaussée" n'est alors plus influent. De plus le paramètre du facteur "Nature Cana" a un signe opposé au paramètre estimé au chapitre 5. Ceci s'explique par la forte influence du facteur vieillissement qui concerne principalement les conduites posées avant 1966. Enfin les paramètres du modèle de

Weibull (λ et p) sont complètement différents, encore une fois du fait de la forte influence du facteur "vieillessement".

Tableau 26 : Paramètres du modèle de Weibull stratifié avec le facteur correctif "Vieillessement".

| | | |
|-----------------------|------------------|-------|
| 1ère défaillance | λ | 0,009 |
| | p | 1,856 |
| 2 à 4ème défaillance | λ | 0,037 |
| | p | 1,161 |
| 5ème défaillance et + | λ | 0,061 |
| | p | 1 |
| β | Longueur | 0,36 |
| | Diamètre | -0,52 |
| | Sol | 0,29 |
| | Nature cana | 0,61 |
| | "Vieillessement" | 2,42 |

Le nombre de défaillances prévues est alors de 447, ce qui est meilleur. D'autre part l'histogramme des défaillances prévues est beaucoup plus proche des défaillances réelles. (Cf. Figure 45)

Si l'on regarde également les 90 premières conduites prévues comme ayant le plus de défaillances, on peut remarquer que le facteur "Vieillessement" apporte également de meilleurs résultats. En effet si l'on n'en tient pas compte, beaucoup de conduites prévues comme cassantes n'ont eu aucune défaillance (Cf. Fig. 46). Par contre si l'on en tient compte, uniquement deux tronçons n'ont pas de défaillance sur les 90 premiers (Cf. Fig. 47).

Le facteur "vieillessement" tel qu'on l'a pris ici a donc une influence importante sur l'apparition des défaillances. Il correspond en fait à une dégradation accélérée provoquée par un facteur de risque non-pris en compte dans le modèle (coups de bélier, choc au moment de la pose, etc.)

Dans cette partie ce facteur a été pris en compte a posteriori et on ne peut bien sûr pas prévoir sa valeur au moment de la pose. Cependant si l'on veut prévoir les défaillances sur une durée déterminée pour des conduites dont on connaît l'historique, il est possible d'en tenir compte. C'est ce que nous allons voir dans le paragraphe 6.2.2..

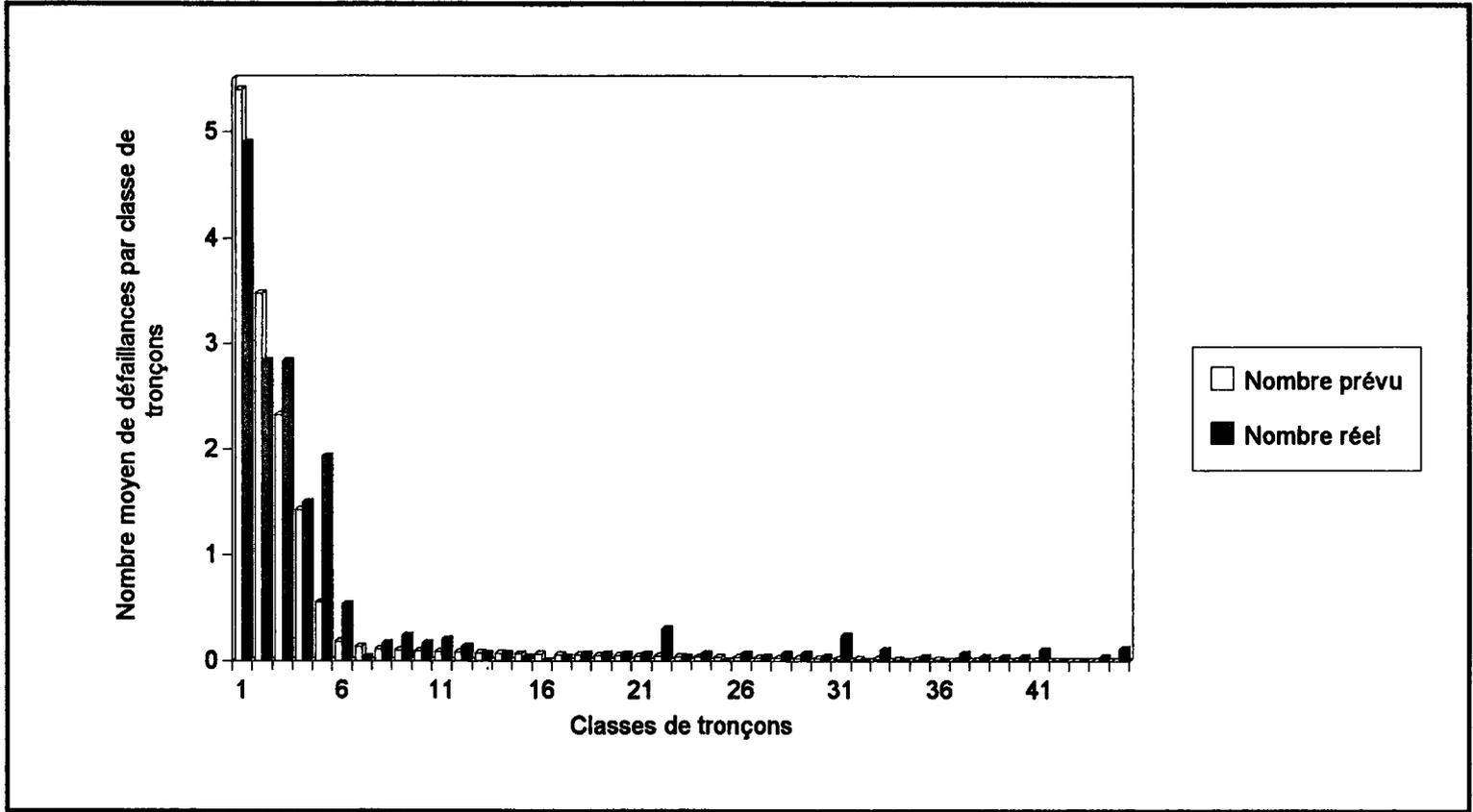


Figure 45 : Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (avec facteur "Vieillessement").

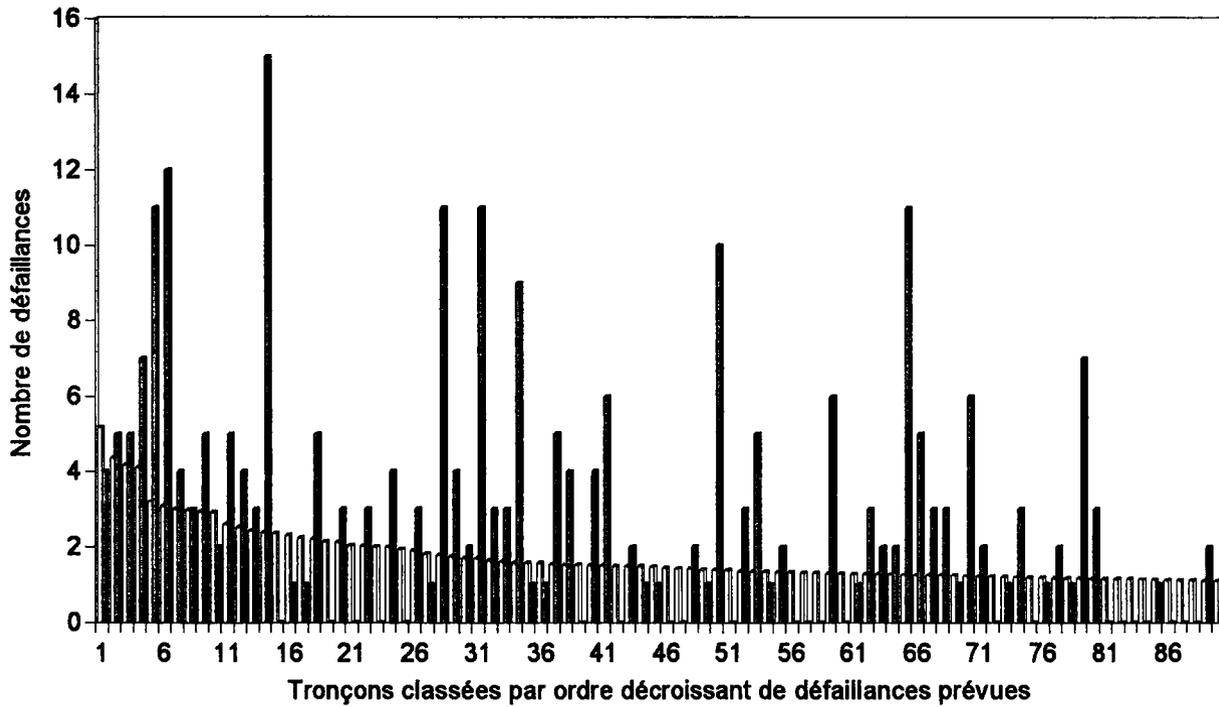


Figure 46 : Comparaison des nombres de défaillances sur les 90 premières conduites (sans facteur "vieillessement")

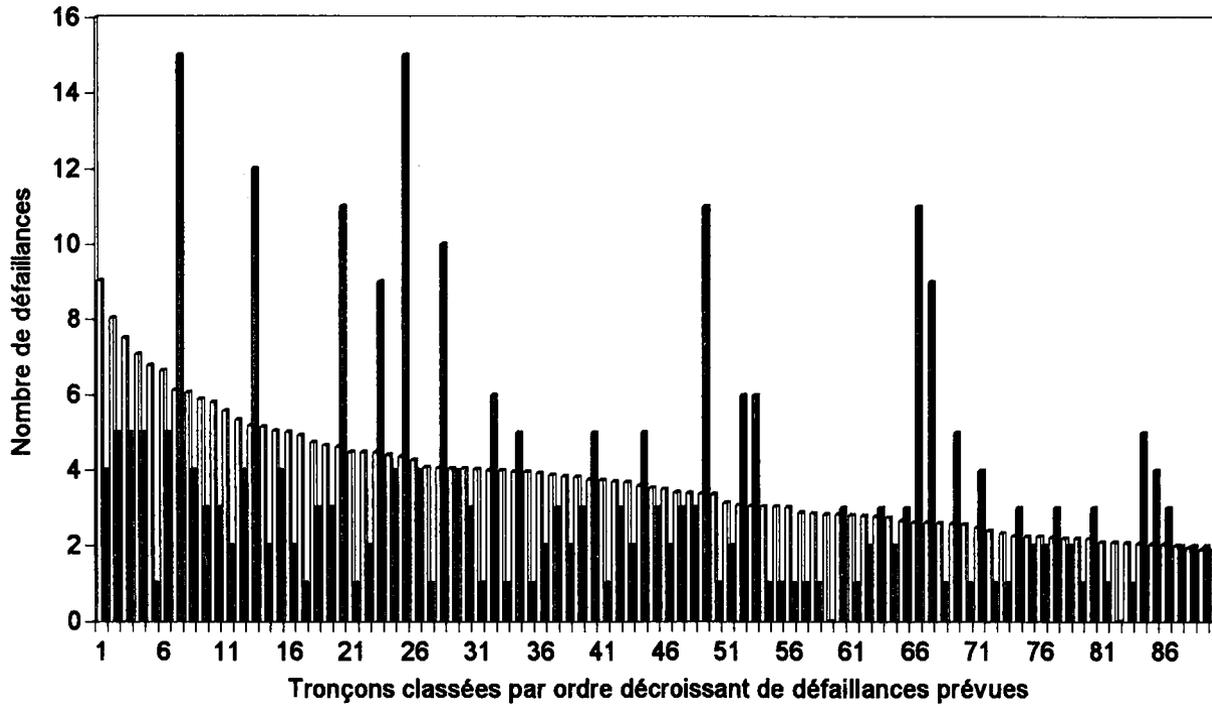


Figure 47 : Comparaison des nombres de défaillances sur les 90 premières conduites (avec facteur "vieillessement")

6.2.2. Comparaison des défaillances réelles à une prévision sur 10 et 2 ans

6.2.2.1. Prévision sur dix ans

Un modèle a été élaboré à partir des données de 1951 à 1982. Puis ont été comparées les défaillances prévues entre 1983 et 1992 à celles qui ont eu lieu réellement pendant cette période (Cf. fig. 48). La comparaison a eu lieu de la même manière que dans le paragraphe précédent.

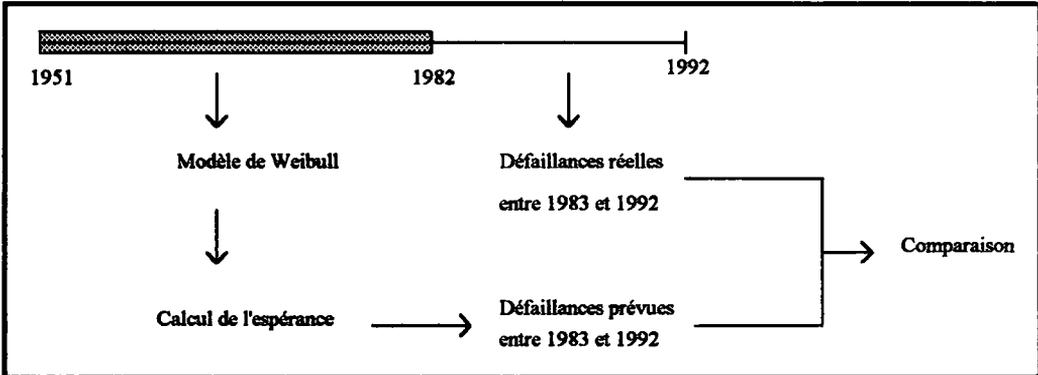


Figure 48 : Méthode employée pour la comparaison des défaillances prévues et réelles entre 1983 et 1992

Les coefficients estimés du modèle de Weibull sur la période 1951-1982 sont un peu différents de ceux estimés sur 1951-1990. Ils se trouvent dans le tableau 27.

Tableau 27 : Paramètres du modèle de Weibull stratifié sans facteur vieillissement (données 1951-1982)

| | | |
|-----------------------|-----------------|-------|
| 1ère défaillance | λ | 0,033 |
| | p | 1,664 |
| 2 à 4ème défaillance | λ | 0,178 |
| | p | 1,163 |
| 5ème défaillance et + | λ | 0,15 |
| | p | 1 |
| β | Longueur | 0,79 |
| | Diamètre | -1,17 |
| | Sol | 0,42 |
| | Nature cana | 0,13 |
| | Trafic-Chaussée | 0,32 |

Le nombre de défaillances prévues est de 339 alors qu'il y en a eu 267 sur cette période. La surestimation de cette valeur peut être due au fait que depuis une quinzaine d'années les travaux d'entretien ont lieu avec un plus grand soin.

Si l'on classe comme dans le paragraphe précédent les conduites par ordre décroissant des défaillances prévues, on obtient l'histogramme de la figure 49. La prévision est plus forte pour la première classe. Pour les autres classes les valeurs sont du même ordre.

Si l'on examine les 90 premières conduites prévues comme les plus défaillantes (Cf. Fig. 50), on se rend compte que parmi celles ci une vingtaine n'ont pas eu de défaillances.

Le modèle a alors été modifié en changeant les mêmes hypothèses qu'au paragraphe 6.2.1.. Le tableau 28 donne les valeurs des paramètres β_j , λ , et p des différents modèles et le tableau 29 donnent le nombre de défaillances prévues lorsque l'on crée des modèles soit non-stratifié (trois modèles par groupe de défaillances), soit tenant compte du facteur vieillissement.

Tableau 29 : Nombre de défaillances prévues selon les modèles choisis

| | Défaillances prévues | Défaillances réelles |
|--|----------------------|----------------------|
| Modèle stratifié sans facteur vieillissement | 339 | 267 |
| Modèle non stratifié sans facteur vieillissement | 329 | |
| Modèle stratifié avec facteur vieillissement | 757 | |
| Modèle non stratifié avec facteur vieillissement | 292 | |

Concernant le modèle stratifié avec le facteur vieillissement, on se rend compte que le nombre de défaillances prévues est beaucoup trop élevé. Par contre pour les deux modèles non-stratifiés, les deux valeurs sont meilleures. L'examen des histogrammes de classes de conduites montre de plus que c'est le modèle non stratifié avec le facteur vieillissement qui est le meilleur modèle pour la prévision. Les contraintes appliquées sur les paramètres β_j des facteurs entraînent donc un biais trop important, du fait de l'hypothèse de même influence quelque soit le groupe de défaillance. L'histogramme le représentant se trouve dans la figure 51. Les autres histogrammes se trouvent en annexe 6.

Tableau 28 : Coefficients estimés pour les différents modèles concernant la prévision sur 10 ans.

| | | Modèle stratifié | | | Modèle stratifié | | | Modèle non stratifié | | | Modèle non stratifié | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------------------|-------|--------|-----------------------------|-------|--------|-----------------------------|-------|--------|-----------------------------|-------|--------|
| | | sans facteur vieillissement | | | avec facteur vieillissement | | | sans facteur vieillissement | | | avec facteur vieillissement | | |
| Groupe de défaillance | | 1 | 2 à 4 | 5 et + | 1 | 2 à 4 | 5 et + | 1 | 2 à 4 | 5 et + | 1 | 2 à 4 | 5 et + |
| | λ | 0,03 | 0,18 | 0,15 | 0,01 | 0,09 | 0,30 | 0,03 | 0,20 | 0,22 | 0,01 | 0,10 | 0,22 |
| | p | 1,66 | 1,16 | 1 | 1,76 | 1,23 | 1 | 1,68 | 1,15 | 1 | 1,76 | 1,23 | 1 |
| β_i | Longueur | | 0,79 | | | 0,51 | | 0,93 | 0,65 | ** | 0,38 | 0,67 | ** |
| | Diamètre | | -1,17 | | | -0,86 | | -1,15 | -1,3 | ** | -0,45 | -1,43 | ** |
| | Sol | | 0,42 | | | 0,30 | | 0,61 | ** | ** | 0,44 | ** | ** |
| | Trafic-chaussée | | 0,32 | | | ** | | 0,63 | ** | ** | ** | ** | ** |
| | Nature cana | | 0,13 | | | 0,86 | | ** | ** | ** | 0,82 | 1,06 | ** |
| | Vieillessement | | | | | 1,62 | | | | | | 2,41 | 1,08 |

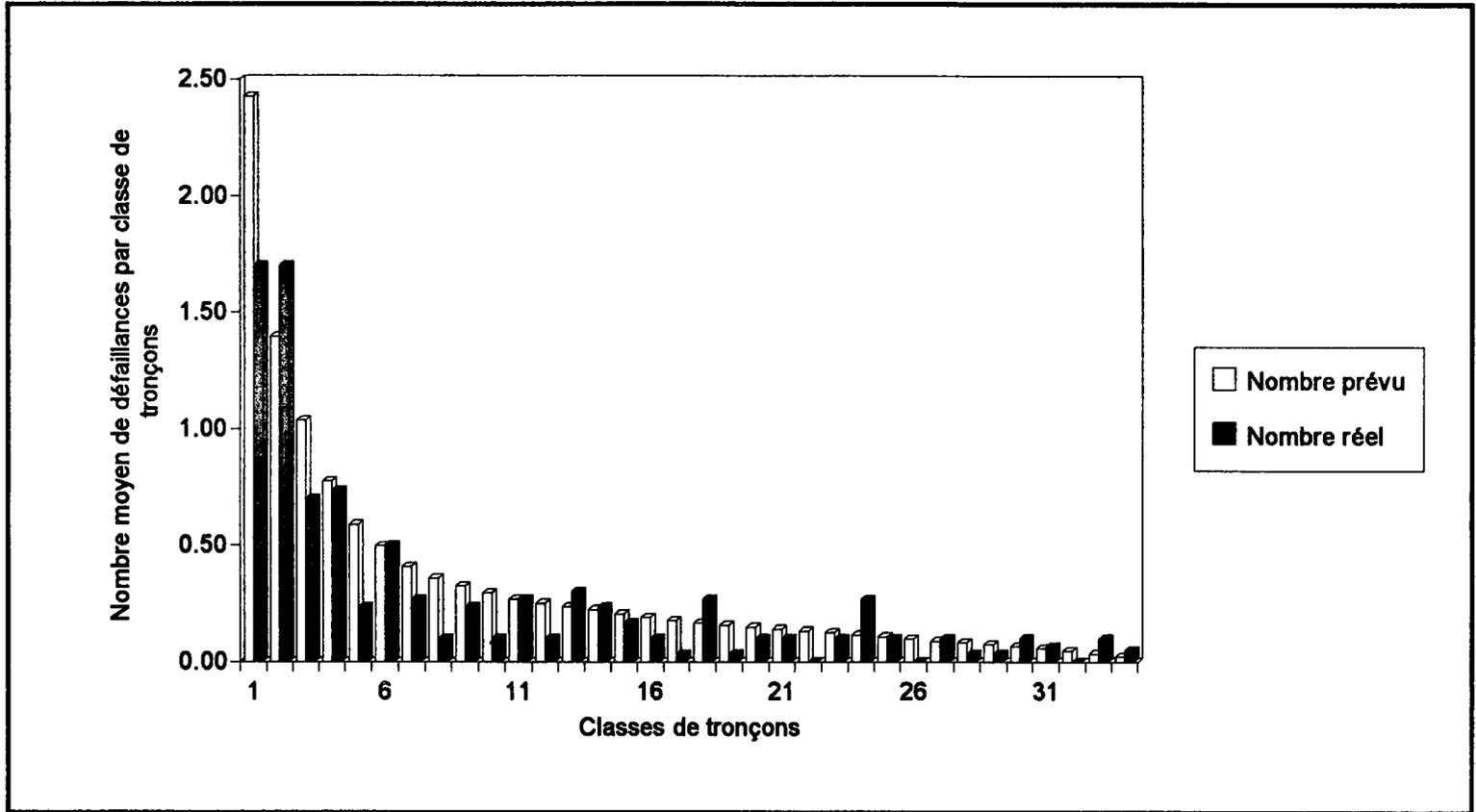


Figure 49 : Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (prévision entre 1983 et 1992).

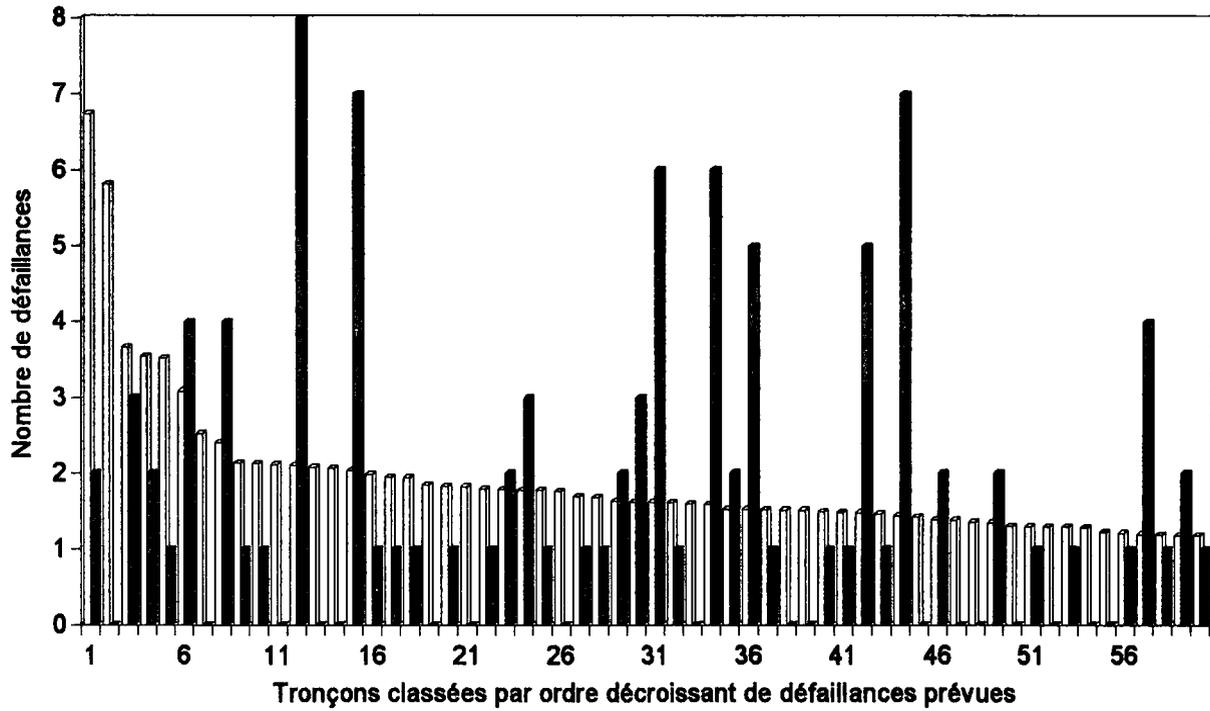


Figure 50 : Comparaison des nombres de défaillances sur les 60 premières conduites (prévision sur 10 ans)

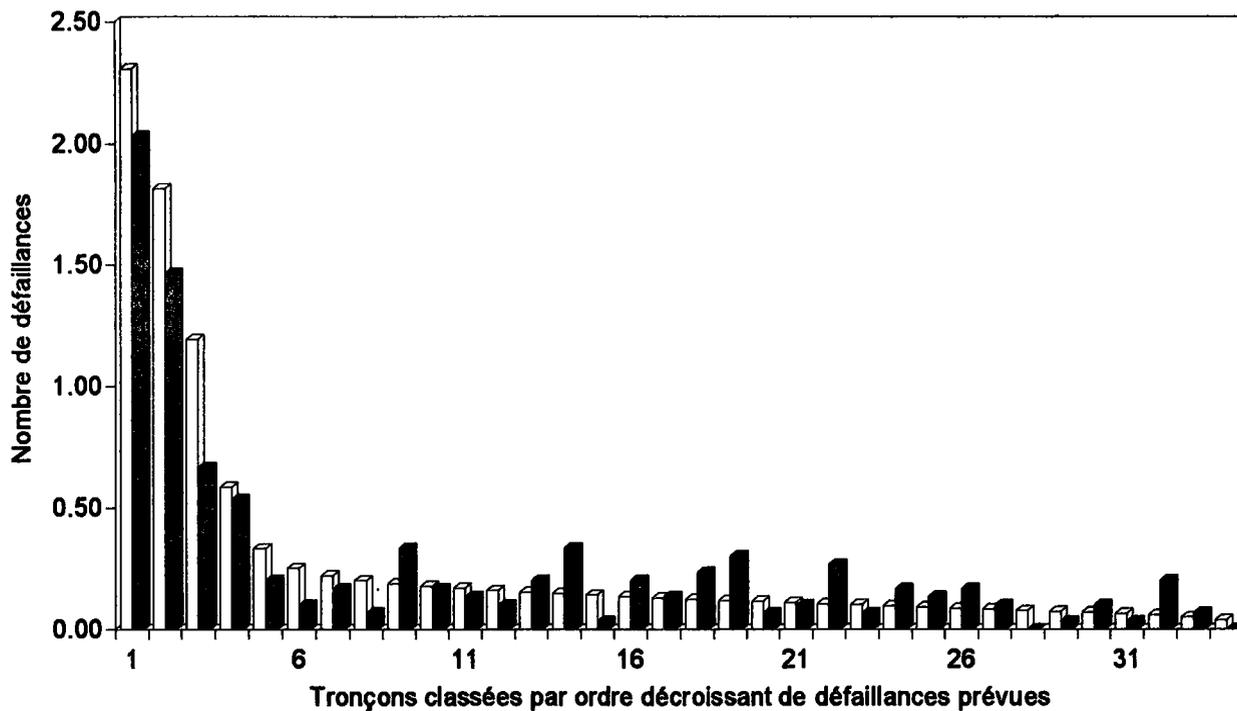


Figure 51 : Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (modèle non stratifié avec facteur "vieillessement", prévision entre 1983 et 1992).

La comparaison des défaillances des 90 premières conduites est également meilleure puisque celles qui cassent beaucoup se rapprochent du début de la liste. Cependant encore beaucoup de conduites prévues comme défaillantes ne le sont pas.

6.2.2.2. Prévission sur deux ans

La même étude a été menée en estimant un modèle à partir des données de 1951 à 1990 et en comparant les défaillances prévues entre 1991 et 1992 à celle ayant eu lieu sur la même période. Pour le modèle non-stratifié, on prévoit 101 défaillances au lieu de 56 réelles, ce qui est proche du double. En prenant comme dans le cas précédent, différents modèles stratifiés ou non, avec ou sans facteur "vieillissement", on a les résultats du tableau 30.

Tableau 30 : Nombre de défaillances prévues selon les modèles choisis (prévission sur deux ans.

| | Défaillances prévues | Défaillances réelles |
|--|----------------------|----------------------|
| Modèle stratifié sans facteur vieillissement | 101 | 56 |
| Modèle non stratifié sans facteur vieillissement | 87 | |
| Modèle stratifié avec facteur vieillissement | 173 | |
| Modèle non stratifié avec facteur vieillissement | 72 | |

C'est là encore le modèle non stratifié tenant compte du facteur "vieillissement" qui donne les meilleurs résultats. L'histogramme par classe de défaillances décroissantes se trouve dans la figure 52 et celui correspondant aux 90 premières conduites en figure 53.

On a ici des prévisions beaucoup moins précises que sur 10 ans. La durée de prévision de deux ans est en fait trop petite par rapport au pas de temps utilisé dans le modèle. Il est également possible que les deux années étudiées soient des années dont le climat ait été défavorable. Cependant près de la moitié des casses réelles se trouve parmi les 90 premières conduites classées à risque.

6.3. Mesure de l'influence de l'oubli d'un facteur

Dans certains services il est possible que les données concernant un facteur estimé comme influent ne puissent être mesurées ou ne puissent être retrouvées. D'autre part les paragraphes précédents nous ont montré que l'introduction d'un nouveau facteur, le facteur vieillissement, améliore la prévision. Quelles sont les conséquences de la non prise en compte d'un facteur

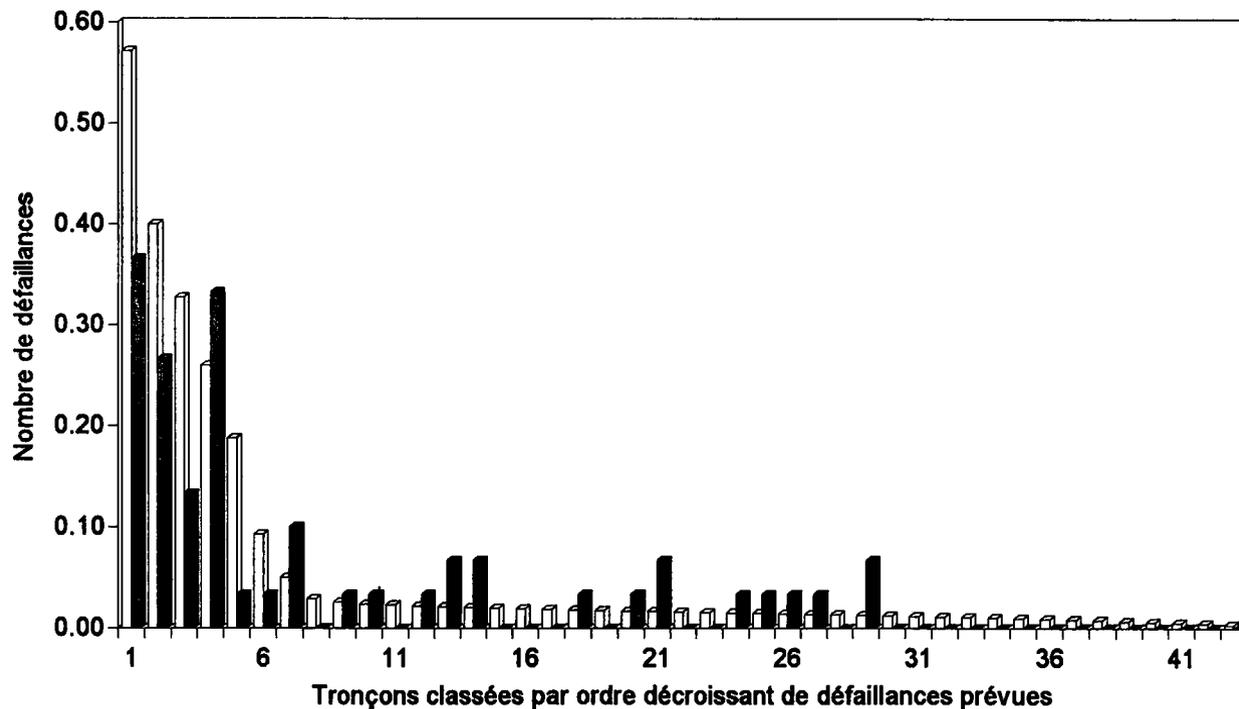


Figure 52 : Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (modèle non stratifié avec facteur "vieillessement", prévision entre 1991 et 1992).

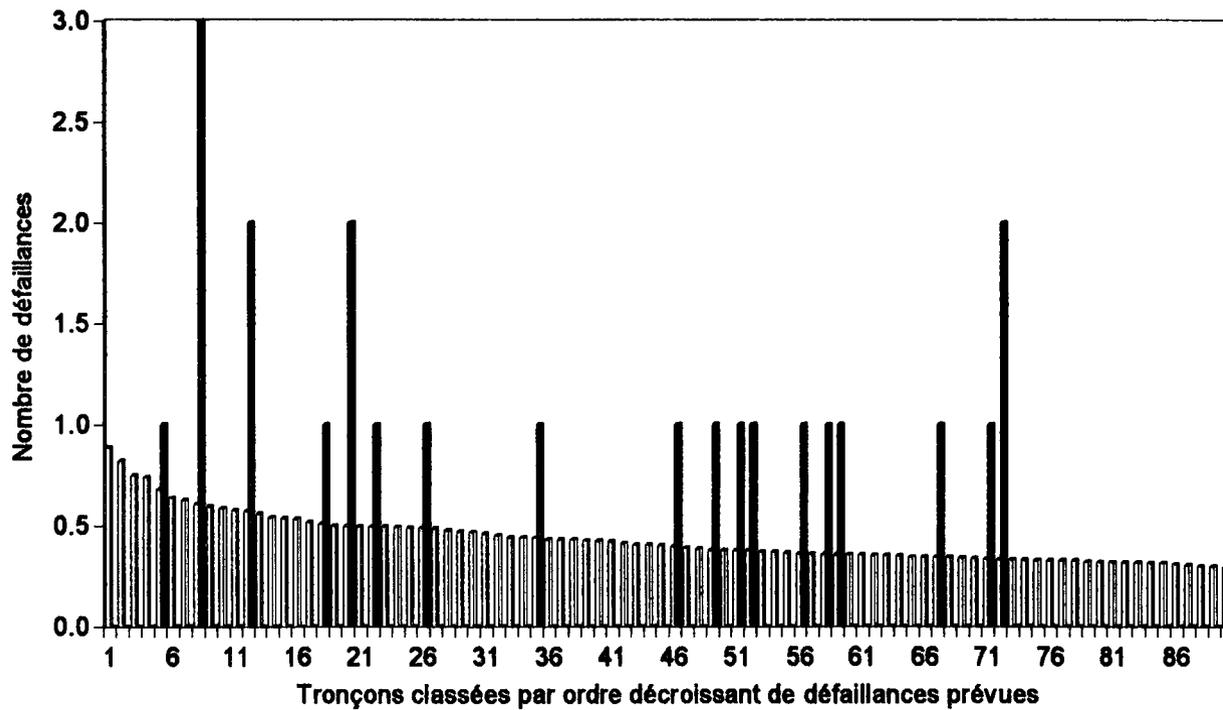


Figure 53 : Comparaison des nombres de défaillances sur les 90 premières conduites (prévision sur 2 ans)

sur les valeurs des paramètres β_i du modèle de Weibull, ainsi que sur l'espérance du nombre de défaillances pour un échantillon donné?

Le tableau 31 nous donne les coefficients de modèles de Weibull estimés sur Bordeaux en oubliant pour chacun de ces modèles un facteur différent et pour le dernier modèle en rajoutant le facteur vieillissement des paragraphes précédents.

Tableau 31 : Coefficients des modèles de Weibull selon les facteurs pris en compte dans le modèle.

| | Modèle complet | Modèle sans le facteur : | | | | | Modèle avec le facteur Vieillissement |
|-----------------|----------------|--------------------------|----------|-------|--------------|-------------|---------------------------------------|
| | | Longueur | Diamètre | Sol | Traf.-chaus. | Nature cana | |
| λ_1 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,01 |
| p_1 | 1,65 | 1,59 | 1,62 | 1,63 | 1,63 | 1,74 | 1,86 |
| λ_2 | 0,15 | 0,09 | 0,09 | 0,16 | 0,15 | 0,15 | 0,04 |
| p_2 | 1,06 | 1,01 | 1,02 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,16 |
| λ_3 | 0,13 | 0,14 | 0,12 | 0,22 | 0,14 | 0,13 | 0,06 |
| p_3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| β Longueu | 0,58 | | 0,42 | 0,57 | 0,61 | 0,60 | 0,36 |
| r | | | | | | | |
| Diamètre | -0,87 | -0,31 | | -0,84 | -0,81 | -0,92 | -0,52 |
| Sol | 0,37 | 0,39 | 0,34 | | 0,38 | 0,41 | 0,29 |
| Tr.-ch. | 0,49 | 0,64 | 0,39 | 0,49 | | 0,53 | |
| Nat. cana | -0,10 | -0,23 | -0,24 | -0,13 | -0,16 | | 0,61 |
| Vieillis. | | | | | | | 2,42 |

Les facteurs longueurs et diamètre ont une influence plus importante que les autres facteurs. En effet, lorsqu'on les oublie, les paramètres β_i des autres facteurs varient beaucoup plus. Cependant l'oubli d'un de ces facteurs est corrigé par le paramètre λ (paramètre d'intensité) qui est beaucoup plus faible, notamment pour le deuxième groupe de défaillance.

Concernant le facteur "vieillissement", toutes les valeurs des autres paramètres sont nettement différentes. Ceci peut se comprendre du fait de la définition même de ce facteur qui dépend du nombre et de la date des défaillances des conduites. Il est ainsi évident qu'il englobe en partie

le fait que la conduite soit dans des conditions défavorables ou non, comme par exemple dans un sol corrosif ou non. Il est donc normal qu'il y ait une certaine corrélation.

L'introduction de ce facteur fait également diminuer dans des proportions plus importantes les coefficients λ et p , ceci du fait de son poids important ($\beta=2,42$).

Le calcul de l'espérance du nombre de défaillances en fonction des différents modèles donne les résultats du tableau 32.

Tableau 32 : Espérances estimées sur la période de 1951 à 1990 selon les facteurs pris en compte dans le modèle.

| | Modèle complet | Modèle sans le facteur : | | | | | Modèle avec le facteur Vieillissement |
|-------------------------------|----------------|--------------------------|----------|---------|--------------|-------------|---------------------------------------|
| | | Longueur | Diamètre | Sol | Traf.-chaus. | Nature cana | |
| Espérance | 434 | 388 | 396 | 451 | 452 | 408 | 447 |
| Intervalle de confiance (95%) | 346-546 | 313-485 | 331-476 | 365-559 | 363-562 | 334-498 | 316-623 |

C'est le modèle tenant compte du facteur "vieillissement" qui apparaît comme le meilleur du point de vue du nombre de défaillances total (522 défaillances réelles). Paradoxalement l'oubli des facteurs "sol" et "trafic-chaussée" voit le nombre de défaillances prévues se rapprocher du nombre de défaillances réelles.

Si l'on examine les histogrammes comparant les quatre vingt-dix premières conduites prévues comme cassant le plus et leurs défaillances réelles, c'est encore le modèle avec le facteur vieillissement qui donne le meilleur résultat, puisque uniquement deux conduites parmi celles ci ne cassent pas (Cf. figure 47).

L'oubli des facteurs longueur, diamètre et trafic-chaussée augmente au contraire le nombre de conduites ne cassant pas alors qu'elles étaient prévues comme cassantes (Cf. figure 54). Par contre on peut se rendre compte que l'oubli des facteurs sol et Nature cana ne change pas fondamentalement les résultats par rapport au modèle complet même si certaines conduites qui ont eu beaucoup de casses n'apparaissent plus parmi les quatre-vingt-dix premières (Cf. figure 55).

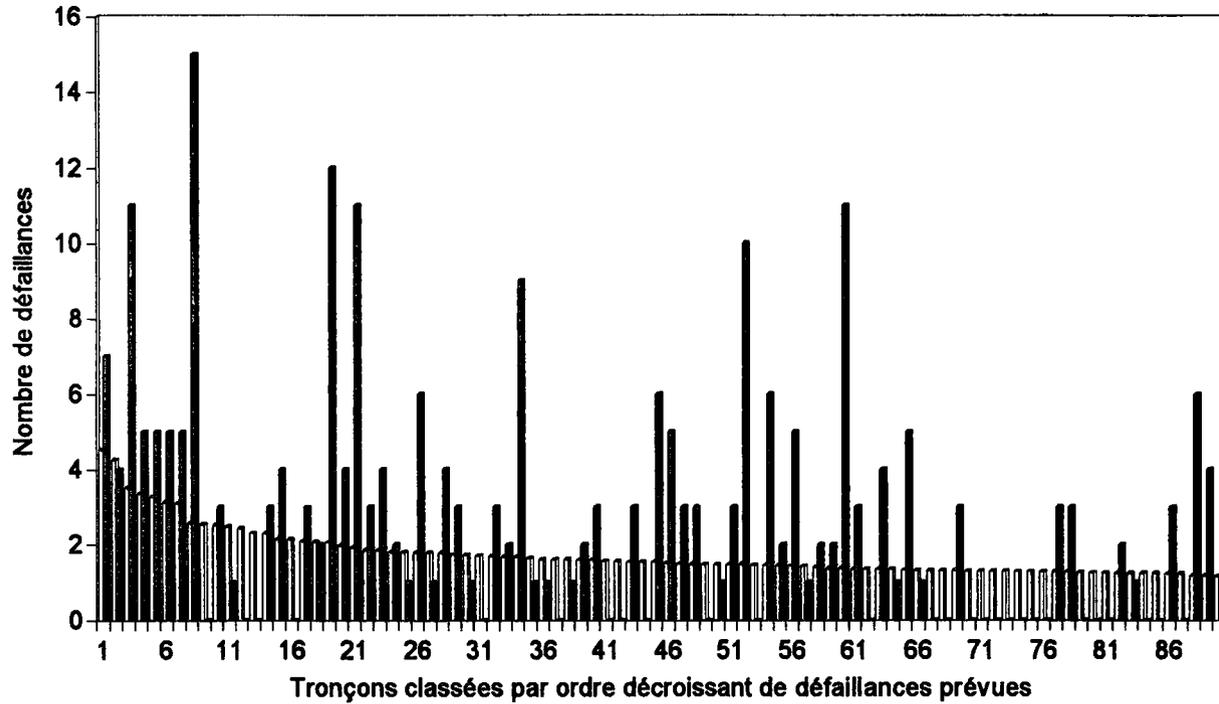


Figure 54 : Comparaison des nombres de défaillances sur les 90 premières conduites (prévision entre 1951 et 1990; oubli du facteur trafic-chaussée).

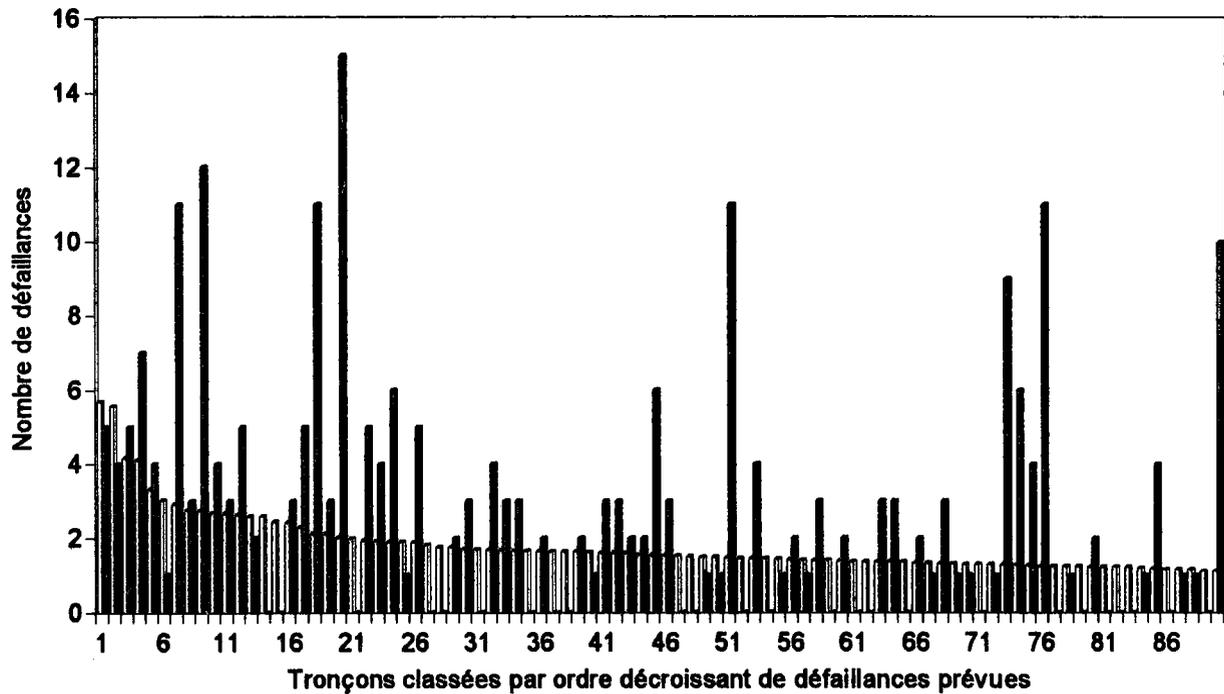


Figure 55 : Comparaison des nombres de défaillances sur les 90 premières conduites (prévision entre 1951 et 1990; oubli du facteur sol).

6.4. Conclusion

La comparaison des défaillances prévues et des défaillances réelles permet de faire les conclusions suivantes :

- Concernant le calage du modèle sur 40 ans, on sous-estime légèrement les défaillances. L'introduction du facteur "Vieillessement" donne un résultat plus proche et près des 3/4 des défaillances réelles se trouvent parmi les 100 premières conduites prévues comme les plus défaillantes.
- Le modèle stratifié n'entraîne pas de biais pour ce qui concerne le calage sur 40 ans. Par contre, pour la prévision le modèle non-stratifié donne des meilleurs résultats.
- Le fait de modéliser ne permet cependant pas de définir les conduites ayant un nombre de casses important. Par contre ces conduites se trouvent parmi celles prévues comme les plus défaillantes.
- Certaines conduites prévues comme non-défaillantes ont tout de même quelques casses. Cependant si l'on fait les prévisions année après année, ces conduites changeront de groupe de défaillances et leur espérance de casse sera plus grande. Elles se rapprocheront alors de la "tête" de liste.
- La prévision sur dix ans donne des résultats satisfaisants (pour le modèle non-stratifié incluant le facteur "vieillessement"). Ceci n'est cependant pas le cas de la prévision sur deux ans, même si près de la moitié des conduites qui ont eu des casses se trouvent parmi les 100 premières.
- L'oubli des facteurs longueurs, diamètre et trafic chaussée entraîne un biais important dans l'estimation des espérances. Pour les deux premiers, les informations les concernant sont souvent les mieux connues dans les services, alors que pour le facteur "Trafic-chaussée" ce n'est pas toujours le cas. Par contre l'oubli des facteurs sol et "nature cana." entraîne un biais plus faible.

Chapitre 7

L'apprentissage

| | |
|---|-----|
| 7.1. LA METHODE | 157 |
| 7.2. RESULTATS..... | 159 |
| 7.2.1. Echantillonnage à partir de l'espérance tirée du modèle général | 159 |
| 7.2.2. Echantillonnage à partir de la méthode dite d'anamorphose | 162 |
| 7.3. CONCLUSION | 166 |

L'estimation des modèles conçus dans le chapitre 5 a nécessité de collecter un volume de données assez important. Elle a pu se faire grâce à leur existence sur une assez longue durée dans les services étudiés. Malheureusement le cas de ces services est assez exceptionnel.

En effet les données concernant les historiques de maintenance sont rares ou n'existent que sur une durée trop courte. Dans certains services ce sont les personnes travaillant sur le réseau qui connaissent les casses ou les fuites qui ont eu lieu depuis leur arrivée. L'historique est alors perdu lorsqu'elles quittent le service. Pour d'autres services les données ont pu être perdues lors de la mise en concession du réseau, lors d'un regroupement en syndicat ou bien même lors d'un déménagement.

Certains services commencent à se doter de bases de données informatisées depuis quelques années. On peut donc espérer à l'avenir avoir des historiques suffisamment conséquents.

Afin de pouvoir créer dès à présent ce type de modèles dans des services à faible historique, il est tout de même important de concevoir une méthode permettant d'utiliser des données en faible quantité. C'est cette méthode qui est présentée dans le présent chapitre.

7.1. La méthode

Tout d'abord il est évident que, même si les données de maintenance sont en quantité plus faible, il est indispensable que le réseau soit connu, à savoir au minimum le diamètre des conduites, leur âge, et éventuellement certaines caractéristiques comme le sol, le trafic, l'emplacement sous chaussée ou sous trottoir.

Supposons que l'on veuille créer un modèle sur un service A ayant 5 ans (de 1988 à 1993) de données et dont la date de pose la plus ancienne est 1945.(Cf. Figure 56) Supposons de plus que l'on connaisse les données d'un modèle général.

Les données du service A seules ne permettraient pas d'estimer un modèle convenable. Cependant elles apportent une information non négligeable sur le réseau et ses défaillances. On va donc tenter d'élaborer un modèle à partir des données du service A et de celles du modèle général.

Rappelons que les résultats du chapitre 5 ont montré que l'influence des paramètres était sensiblement identique d'un service à l'autre alors que les fonctions de risques de base sont différentes et représenteraient le caractère local des services. Calculer la fonction de risque de

base à partir des seules données du service A donnerait là encore des résultats trop imprécis compte tenu de la faible longueur de l'historique.

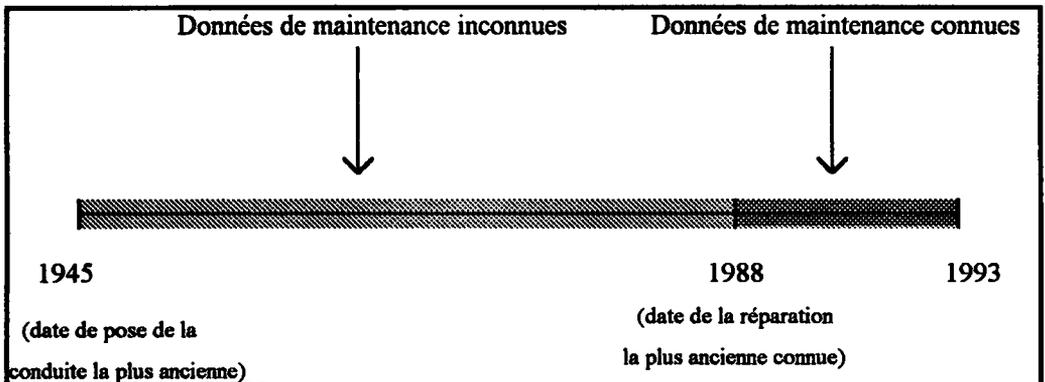


Figure 56 : Description des données du service A.

Deux méthodes sont alors possibles. On peut tout d'abord estimer un modèle à partir des données du modèle général et de celles du service (Cf. Figure 57). Ceci entraînerait cependant l'élimination de tous les tronçons du service A posés avant 1988, car sur une certaine période on ne connaît pas les travaux de maintenance les concernant. Les données du modèle général auraient alors une part trop importante.

Une autre méthode consiste à créer à partir du modèle général un échantillon de défaillances concernant les conduites censurées à gauche c'est à dire les conduites posées avant 1988. Cet échantillon de défaillances ajouté aux défaillances réelles apparues après 1988 permettrait alors de calculer un modèle local propre au service A. (Cf. Figure 58)

La principale difficulté dans cette méthode est de créer l'échantillon de défaillances pour les conduites posées avant 1988. On peut la résoudre de deux manières :

- Soit on calcule pour chacune des conduites l'espérance de défaillances en chaque année de la date de pose à 1988 et on retrouve alors la date d'apparition des défaillances. L'espérance est calculée de la même manière que dans le chapitre précédent.
- Soit on tire au hasard les défaillances de façon à obtenir la même fonction de non-défaillance que celle du modèle général. Cette méthode sera appelée "anamorphose".

Ce sont ces deux méthodes qui ont été expérimentées. Les paragraphes suivants en présentent les résultats.

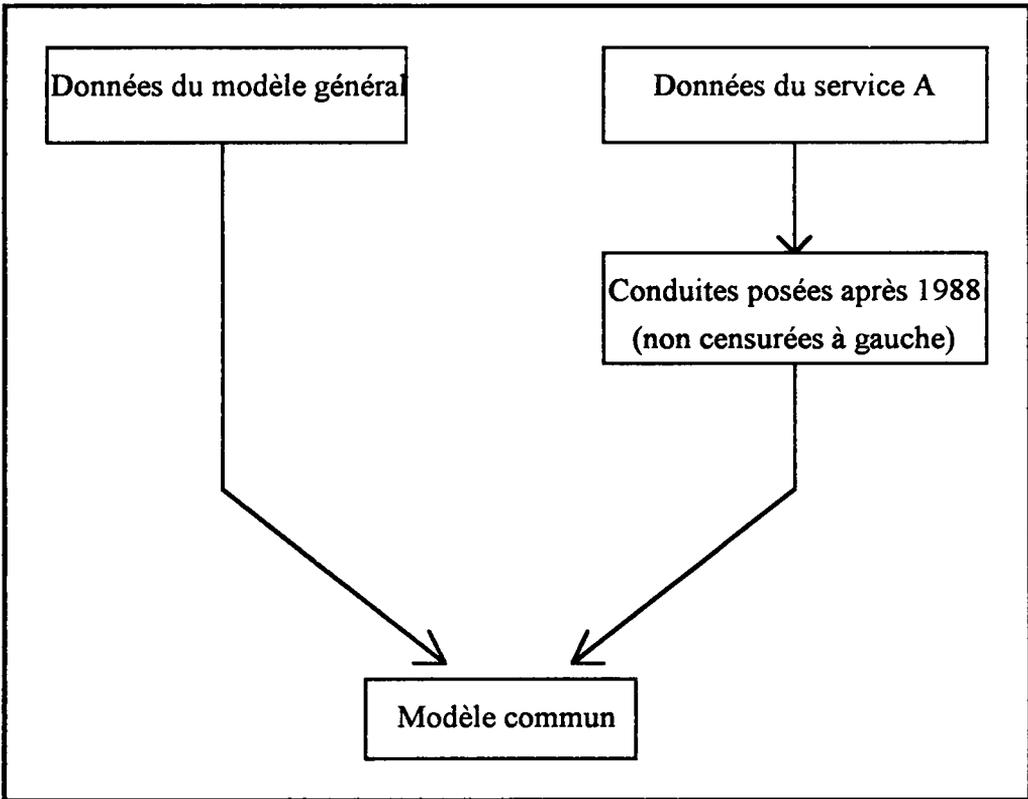


Figure 57 : Création d'un modèle à partir des données du service A et du modèle général.

7.2. Résultats

L'expérimentation a eu lieu à partir des données de la LED-Bordeaux et de la CEB. Le modèle de la CEB a été considéré comme étant le modèle général. Les données de la LED-Bordeaux ont été volontairement étudiées à partir de l'année 1989. On a donc deux ans de données de défaillances entre 1990 et 1991 et il faut créer un échantillon de défaillances pour les conduites posées avant 1989.

7.2.1. Echantillonnage à partir de l'espérance tirée du modèle général

C'est la première formule de l'espérance du chapitre 6 qui a été utilisée (calcul depuis la date de pose). Sur les 1296 tronçons posés avant 1989, 211 défaillances ont été prévues.

Une fois ces défaillances ajoutées à celles qui ont eu lieu après 1989, on peut calculer le modèle de Weibull. Les paramètres de ce modèle se trouvent dans le tableau 33.

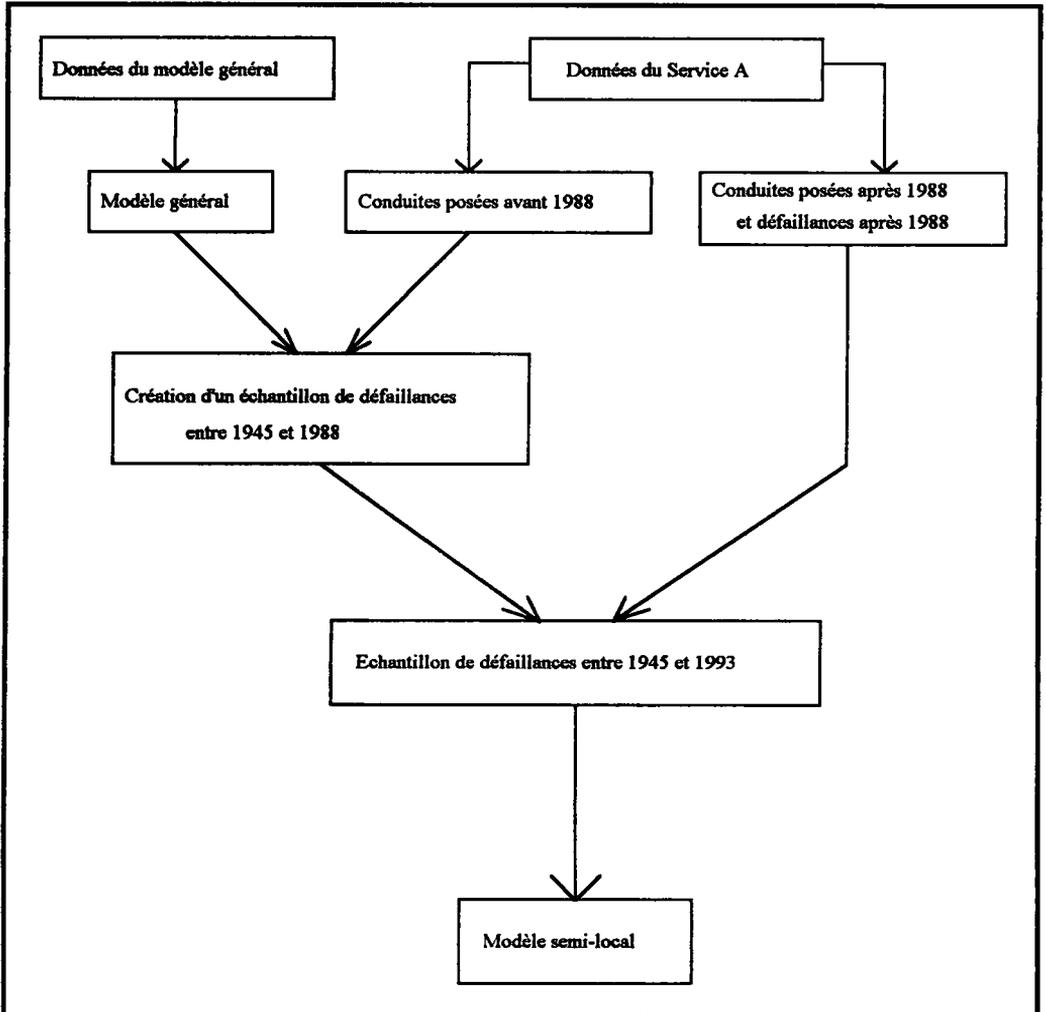


Figure 58 : Création d'un modèle à partir des données du service A après 1988 et d'un échantillon de défaillances construit à partir du modèle général pour les conduites posées avant 1988.

Ces résultats sont peu satisfaisants. En effet à chaque fois les valeurs absolues des β_i sont surestimées par rapport à celles obtenues avec l'ensemble des données. Ceci signifie que cette méthode accentue l'influence des facteurs. Les paramètres du modèle de Weibull sont également très différents.

Le calcul de l'espérance lisse beaucoup trop l'apparition des défaillances. Par exemple pour toutes les conduites, aucune défaillance n'aura lieu pendant une certaine période après la date de pose. Par contre les défaillances apparaîtront sur une courte période, ce qui donne une courbe de probabilité de non-défaillances de forme sigmoïde (Cf. fig. 59).

Tableau 33 : Coefficients du modèle semi-local en échantillonnant à partir de l'espérance

| | | Bordeaux | Apprentissage à partir de l'espérance sur 38 ans | CEB |
|-----------------------|-------------------|----------|--|-------|
| β | Longueur | 0.57 | 1.90 | 0.37 |
| | Nature cana | -0.13 | ** | -0.64 |
| | Diamètre | -0.85 | -2.11 | -0.34 |
| | Sol | 0.34 | 1.06 | 0.29 |
| | Trafic - chaussée | 0.47 | 2.97 | 0.57 |
| 1ère défaillance | λ_1 | 0.03 | 0.04 | 0.02 |
| | p_1 | 1.67 | 5.89 | 1.21 |
| 2 à 4ème défaillance | λ_2 | 0.15 | 0.08 | 0.10 |
| | p_2 | 1.06 | 2.17 | 0.99 |
| 5ème défaillance et + | λ_3 | 0.15 | 0.05 | 0.20 |
| | p_3 | 1 | 1 | 1 |

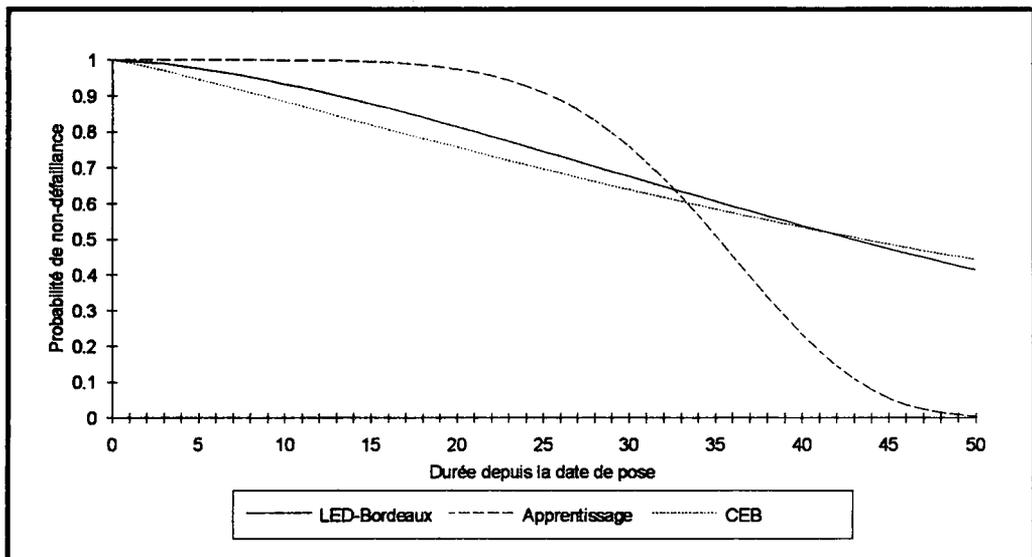


Figure 59 : Probabilités de non-défaillance pour une conduite n'ayant pas eu de défaillance, de diamètre 150, dans un sol non-corrosif, sous trottoir ou dans une rue à trafic faible (Apprentissage à partir de l'espérance).

Utiliser le calcul de l'espérance n'apparaît donc pas comme une solution satisfaisante pour compléter les données.

7.2.2. Echantillonnage à partir de la méthode dite d'anamorphose

La méthode dite d'anamorphose est une méthode tirant au hasard les individus de façon à obtenir une même fonction de répartition.

Il faut tout d'abord classer les conduites par facteur de risque identique. Pour cette opération il est indispensable de connaître pour chaque canalisation le diamètre, la nature et sa date de pose ainsi que les paramètres d'environnement comme le type de sol, l'emplacement sous chaussée ou sous trottoir, le trafic...

On suppose connue sur chaque classe la fonction de risque d'un modèle général établi sur un ou plusieurs réseaux (ici le modèle de la CEB) suivis depuis longtemps. Pour la classe k , comportant N_k elle est notée $h_{GENE}^k(t)$.

Puis on calcule par classe une longueur "moyenne" l_{moy}^k , de telle façon que le risque de casses ne soit pas affecté sur l'ensemble de la classe (Cf. annexe 7) :

$$\sum_{i=1}^{N_k} h_{GENE}^k(t, l_i^k) = N_k \times h_{GENE}^k(t, l_{moy}^k)$$

où l_i^k est la longueur du tronçon i de la classe k . La longueur moyenne est approximée sur l'échantillon maximum.

On reconstitue alors les dates probables t_j^k d'apparition de la première casse sur la classe k : pour chaque année a , comptée à partir de la date de pose, on évalue le nombre probable de casses n_{ka} :

$$n_{ka} = N_k(a) \times h_{GENE}^k(a, l_{moy}^k).$$

Le nombre probable de casses $n_{k(0,a)}$ depuis la date de pose est donc :

$$n_{k(0,a)} = \sum_{t=1}^a N_k(t) \times h_{GENE}^k(t, l_{moy}^k).$$

t_j^k est une date probable d'apparition de la première casse si par rapport à l'année $t_j^k - 1$ la partie entière du nombre cumulé de casses est incrémentée d'au moins une unité c'est-à-dire si :

$$\text{int}(n_{k(0,t_j^k)}) - \text{int}(n_{k(0,t_j^k-1)}) \geq 1.$$

Au cours des a premières années, on observe donc $n_{k(0,a)}$ casses sur la classe k . On tire au hasard la partie entière de $n_{k(0,a)}$ tronçons de la classe k du réseau, on leur affecte les temps t_j^k d'apparition des défaillances puis on corrige les dates en fonction des longueurs effectives des tronçons retenus. On obtient alors t_j^k tel que :

$$h_{GENE}^k(t_j^k, t_i) = h_{GENE}^k(t_j^k, t_{moy}^k).$$

Pour les deuxièmes défaillances la même méthode est employée en prenant comme échantillon de base les conduites tirées pour la première défaillance. La même méthode est poursuivie pour les défaillances suivantes.

Une fois cette opération réalisée, il est ensuite possible de regrouper les défaillances "reconstituées" aux défaillances réelles ayant été observées après la date de mise en place du suivi. Puis on construit le modèle statistique sur l'ensemble des défaillances.

Les coefficients et paramètres se trouvent dans le tableau 34.

Les coefficients sont, cette fois, du même ordre que les coefficients établis sur les modèles de la CEB et de la LED-Bordeaux. Ils sont plus proches de ceux de la CEB, mais non éloignés de ceux de Bordeaux. De ce fait les courbes sont beaucoup plus proches de celles établies sur Bordeaux et la CEB (Cf. Fig. 60, 61 et 62).

Cette méthode apparaît comme donnant de meilleurs résultats que la méthode d'apprentissage à partir de l'espérance. C'est elle que l'on utilisera à l'avenir.

Tableau 34 : Coefficients du modèle semi-local en échantillonnant à partir de la technique dite d'anamorphose.

| | | Bordeaux | Apprentissage à partir de l'anamorphose | CEB |
|-----------------------|-------------------|----------|---|-------|
| β | Longueur | 0.57 | 0.57 | 0.37 |
| | Nature cana | -0.13 | -0.63 | -0.64 |
| | Diamètre | -0.85 | -0.36 | -0.34 |
| | Sol | 0.34 | 0.28 | 0.29 |
| | Trafic - chaussée | 0.47 | 0.40 | 0.57 |
| 1ère défaillance | λ_1 | 0.03 | 0.03 | 0.02 |
| | p1 | 1.67 | 1.59 | 1.21 |
| 2 à 4ème défaillance | λ_2 | 0.15 | 0.07 | 0.10 |
| | p2 | 1.06 | 1.12 | 0.99 |
| 5ème défaillance et + | λ_3 | 0.15 | 0.14 | 0.20 |
| | p3 | 1 | 1 | 1 |

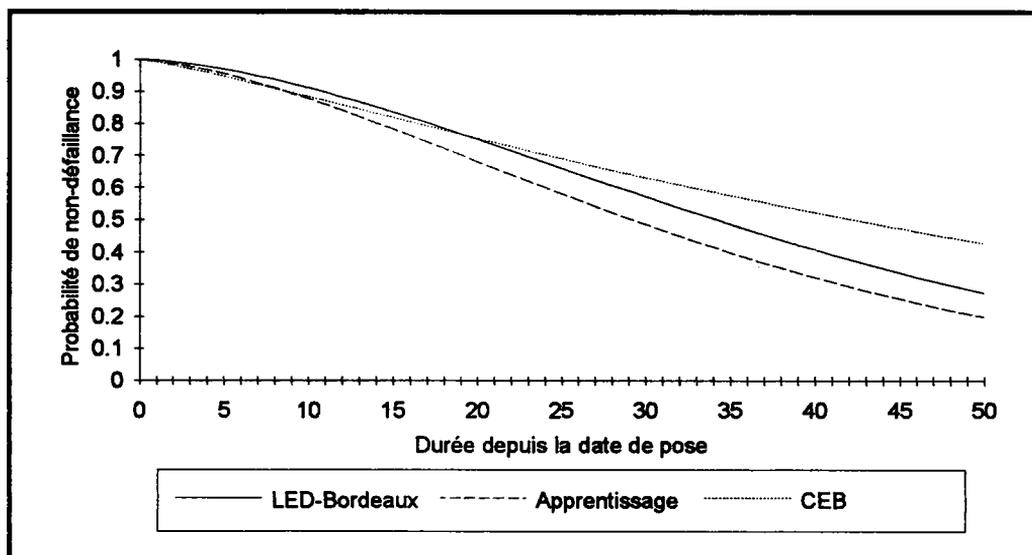


Figure 60 : Probabilités de non-défaillance pour une conduite n'ayant pas eu de défaillance, de diamètre 100, dans un sol non-corrosif, sous trottoir ou dans une rue à trafic faible (Apprentissage par anamorphose).

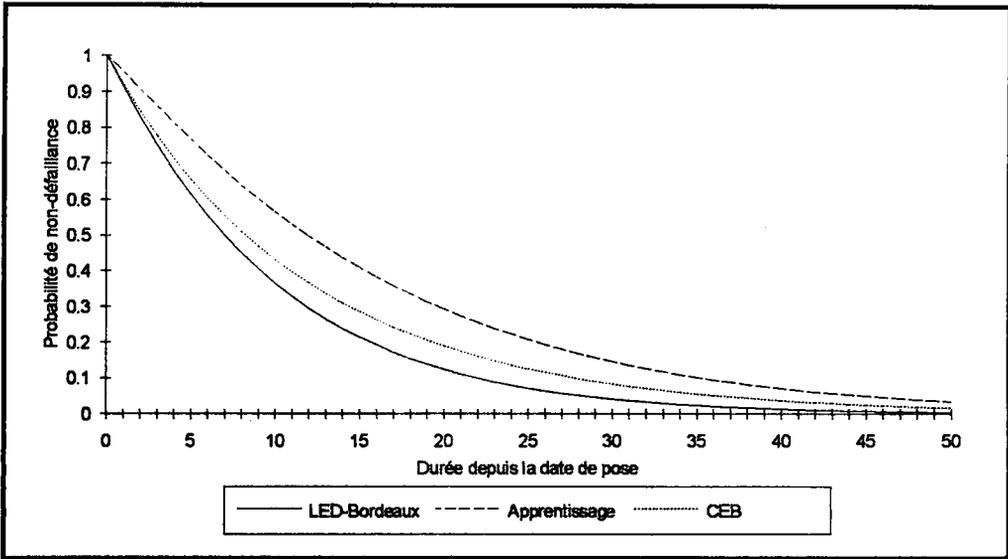


Figure 61 : Probabilités de non-défaillance pour une conduite ayant eu une à trois défaillances, de diamètre 100, dans un sol non-corrosif, sous trottoir ou dans une rue à trafic faible (Apprentissage par anamorphose).

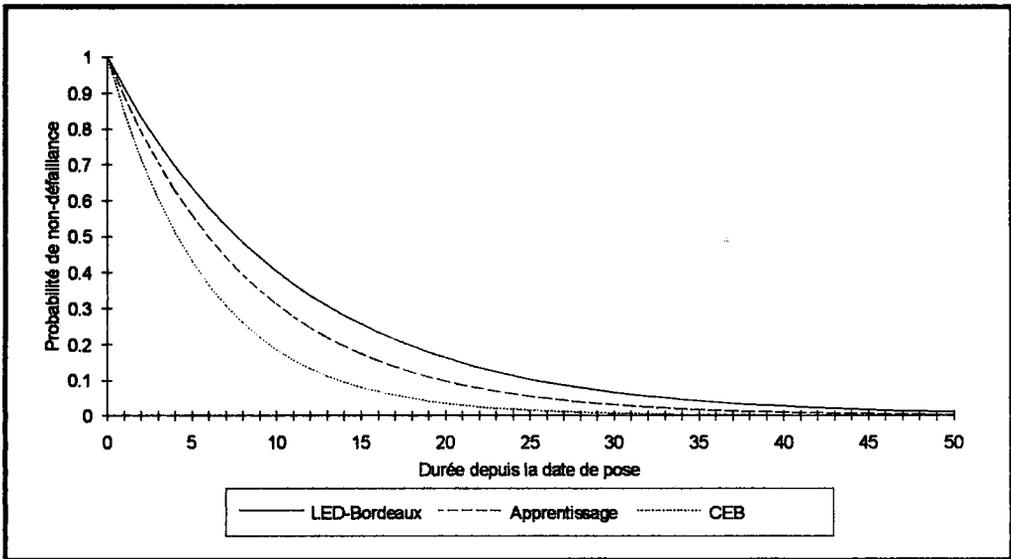


Figure 62 : Probabilités de non-défaillance pour une conduite ayant eu au moins quatre défaillances, de diamètre 100, dans un sol non-corrosif, sous trottoir ou dans une rue à trafic faible (Apprentissage par anamorphose).

7.3. Conclusion

Même avec des données de défaillances en faible quantité, la méthode d'apprentissage peut être utilisée pour le modèle de Weibull sans faire une erreur trop importante. L'anamorphose est donc une méthode très satisfaisante.

De plus d'année en année, le modèle pourra évoluer avec les données nouvelles recueillies. Les données locales auront donc un poids plus important au fil des années (Cf. Figure 63).

Il est cependant important de posséder les données sur les conduites sur la plus longue durée possible afin de probabiliser plus précisément les défaillances. Une gestion informatisée de ces données faciliterait bien entendu leur utilisation et leur manipulation en vue du calcul de l'espérance de défaillances.

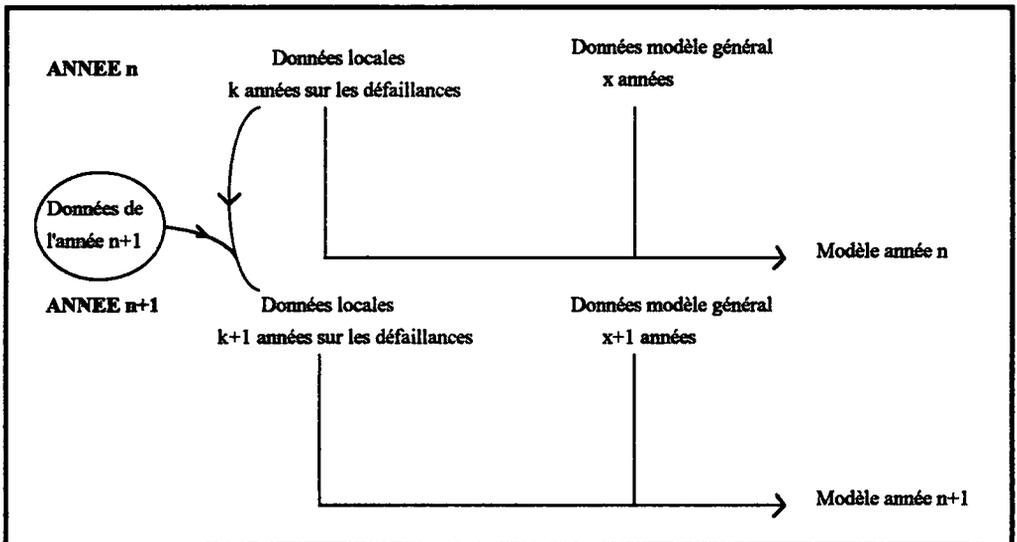


Figure 63 : Apprentissage année après année pour la création de modèles semi-locaux.

Chapitre 8

Utilisation du modèle par les gestionnaires de service

| | |
|---|-----|
| 8.1. METHODOLOGIE POUR LA CREATION D'UN MODELE | 169 |
| 8.1.1. Création de bases de données | 169 |
| 8.1.1.1 La base de données "Tronçons" | 169 |
| 8.1.1.2. La base de données "Défaillances" | 171 |
| 8.1.2. Application des données à l'étude statistique | 171 |
| 8.1.3. Création du modèle | 173 |
| 8.1.4. Estimation de la probabilité ou de l'espérance | 174 |
| 8.2. UTILISATION POUR CONNAITRE L'ETAT DU RESEAU | 174 |
| 8.3. UTILISATION POUR LA PLANIFICATION DU RENOUVELLEMENT | 174 |
| 8.3.1. Intégration dans le cadre d'une politique curative | 175 |
| 8.3.2. Intégration dans le cadre d'une politique prédictive | 175 |
| 8.3.2.1. Méthode de Shamir et Howard [Shamir et al., 1979] | 176 |
| 8.3.2.2. Utilisation dans la méthode de Herz [Herz, 1992] | 179 |
| 8.4. UTILISATION DANS L'ETUDE DE FIABILITE D'UN RESEAU | 183 |

Cette étude a permis d'élaborer un outil statistique de prévision des défaillances des réseaux d'eau potable. Cet outil doit pouvoir être utilisable par les gestionnaires de service. Nous rappellerons donc tout d'abord la méthodologie à suivre pour son application dans un service d'eau potable. Puis nous verrons de quelles manières les résultats de ce modèle peuvent être utilisés dans le service.

8.1. Méthodologie pour la création d'un modèle

Pour la création des modèles sur les services, une démarche décrite en figure 64 a été suivie. C'est cette même démarche qui pourra être utilisée avec certains changements selon la durée d'observation des données de défaillances.

Les différentes étapes sont décrites dans les paragraphes suivants.

8.1.1. Création de bases de données

Les bases de données sont de deux types : celle concernant les tronçons et celle concernant les défaillances.

8.1.1.1 La base de données "Tronçons"

Cette base de données doit contenir les caractéristiques des tronçons de canalisations du service. Un tronçon décrit ici est un ensemble de canalisations se trouvant dans la même rue, de même diamètre, posées la même année et homogènes vis-à-vis des facteurs étudiés. Les caractéristiques des tronçons seront donc :

- la rue,
- la longueur,
- le diamètre,
- le matériau,
- l'année de pose,
- l'année de remplacement ou de réhabilitation,
- le sol et sa corrosivité,
- le trafic,
- l'emplacement de la conduite sous chaussée ou sous trottoir.

A ces caractéristiques pourront être ajoutés d'autres facteurs qui semblent avoir une influence sur les défaillances sur ce réseau (après enquête, par exemple). Concernant la longueur, il sera important de déterminer des tronçons qui soient le plus court possible, afin d'atténuer son effet.

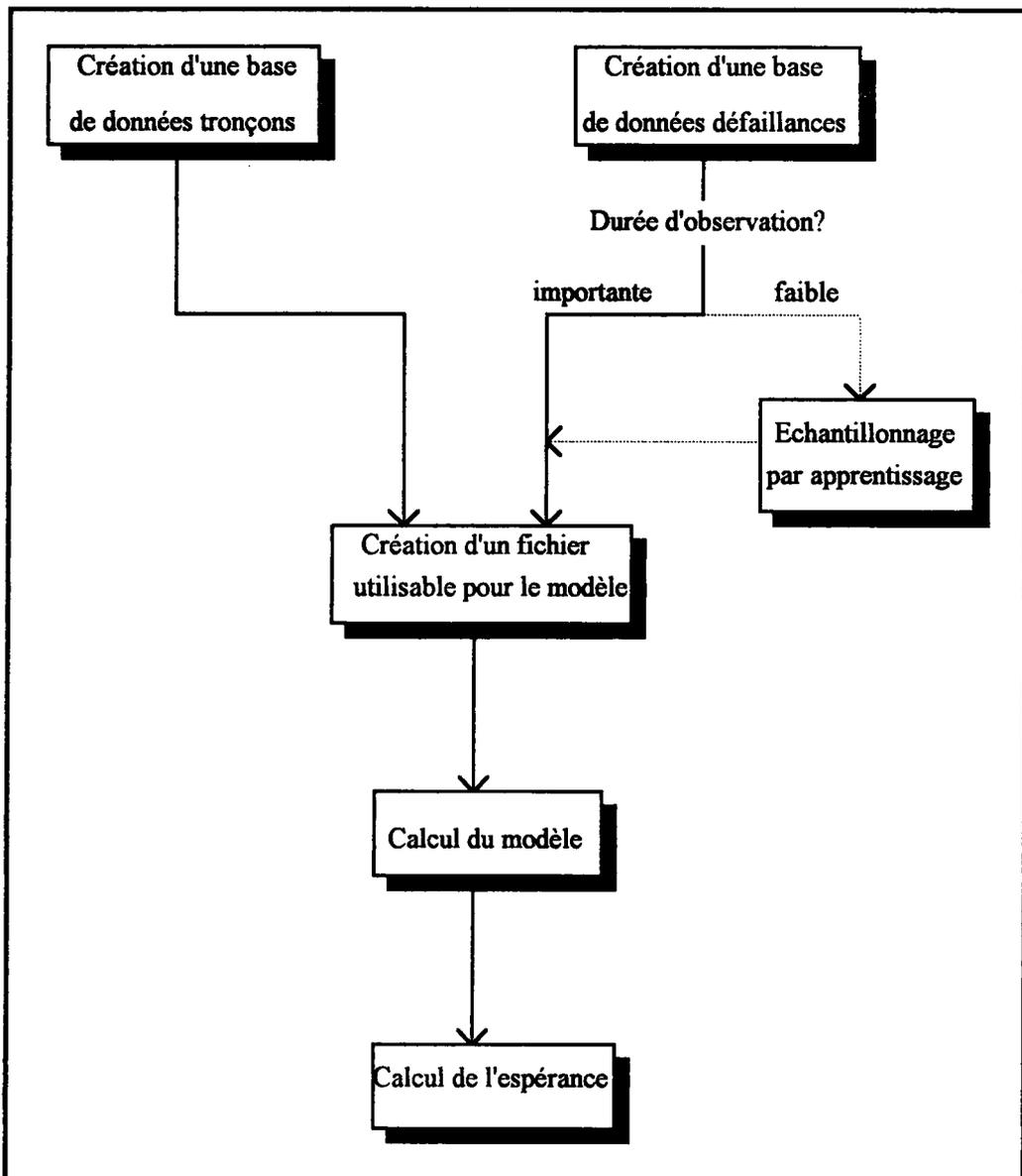


Figure 64 : Démarche à employer lors de l'élaboration d'un modèle de prévision des défaillances.

Cette mise en place de bases de données nécessite donc que les facteurs environnementaux cités soient connus. Ceci pourra entraîner la mise en place d'études les concernant, notamment pour le sol. Si un facteur manquait, un modèle pourrait également être élaboré, mais celui ci serait bien entendu moins précis.

Il est également important de noter les numéros de rues du début et de la fin du tronçon afin, par la suite, de bien déterminer quel tronçon est concerné par une défaillance.

Ce type de base de données est différent de bases de données existant déjà et qui déterminent les tronçons de canalisations en fonction des organes de régulation existant sur les réseaux.

8.1.1.2. La base de données "Défaillances"

Cette base de données peut être rattachée à une base de données concernant tous les travaux de maintenance. Rappelons qu'une défaillance est ici une réparation due à une fuite ou une casse sur le tuyau ou sur le joint de la canalisation.

La structure de cette base de données pourra être de la forme suivante :

- Nom de la rue,
- Diamètre,
- N° dans la rue,
- Date de la défaillance,
- Nature de la défaillance,
- Cause de défaillance,
- Type de réparation.

Il sera nécessaire de bien connaître la nature de la défaillance afin de bien différencier les fuites sur joints des fuites sur tuyaux, qui n'ont pas obligatoirement une même origine. Ceci n'avait pu être déterminé lors de l'étude, compte tenu de l'imprécision existant sur les fiches de maintenance.

Une fiche type remplie sur place faciliterait la saisie de cette base de données. Cette fiche permettrait également l'obtention de renseignements sur les tronçons pour lesquels certaines caractéristiques ne sont pas connues. Un exemple de ce type de fiche est représenté en figure 65.

8.1.2. Application des données à l'étude statistique

La durée d'observation des défaillances est importante pour la suite de l'opération. Si elle correspond à l'âge de la canalisation la plus ancienne, on n'aura alors aucun tronçon censuré à gauche. L'apprentissage ne sera alors pas nécessaire. Si par contre elle est nettement inférieure à l'âge de la canalisation la plus ancienne, on aura alors beaucoup de censures à gauche et il sera nécessaire de recréer un échantillon de défaillances sur ces conduites. Enfin si aucune donnée de défaillance existe, on devra alors utiliser un modèle général.

Une fois l'échantillon des défaillances complet, il est nécessaire de réunir les deux bases de données afin de créer un fichier utilisable pour le modèle. Ce fichier est constitué d'individus décrits dans la figure 24 du chapitre 5, un tronçon pouvant constituer plusieurs individus se différenciant par le nombre de défaillances (Cf. Figure 66).

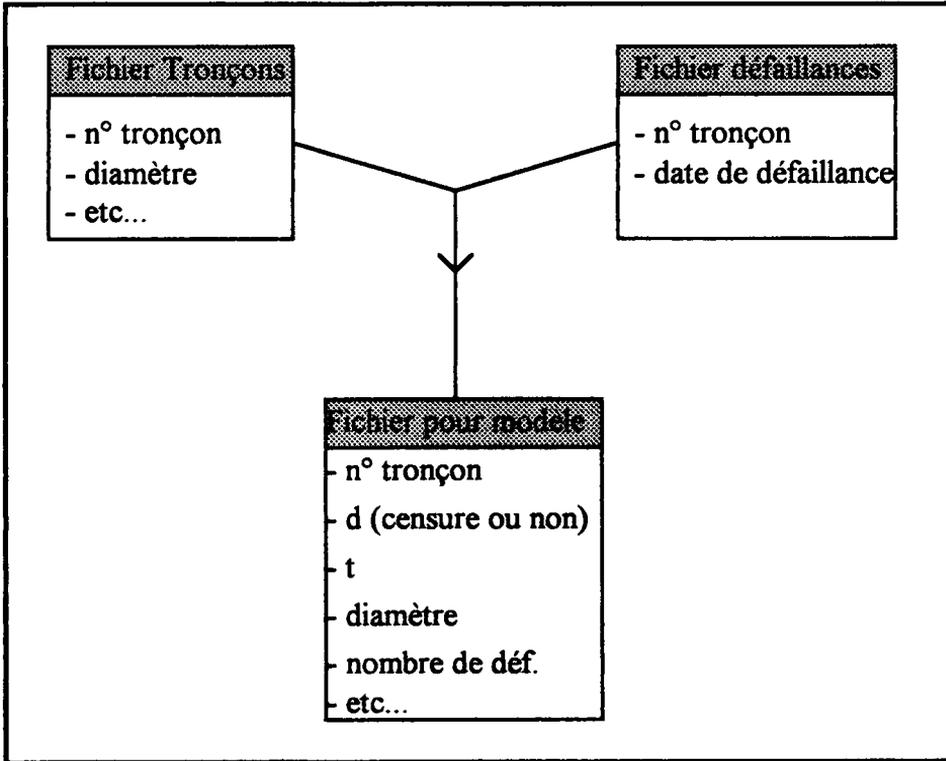


Figure 66 : Etablissement du fichier en vue du modèle.

Comme on l'a vu au chapitre 6, un facteur supplémentaire peut être introduit : le facteur vieillissement. Ce facteur correspond à l'apparition ou non de défaillances après 15 ans d'âge.

8.1.3. Création du modèle

Le modèle peut alors être estimé. Le choix peut se faire entre un modèle stratifié ou un modèle non-stratifié. La démarche à suivre est alors la suivante :

- 1) Estimation des facteurs influents (test de Wald) par le modèle de Cox
- 2) Estimation des paramètres β_i de ces facteurs (vraisemblance de Cox) avec stratification ou non et des paramètres de Weibull λ et p (modèle de Weibull).

Le logiciel utilisé pour l'estimation du modèle est le logiciel EGRET. D'autres logiciels statistiques (SAS, BMDP, NCSS par exemple) permettent également l'analyse de données de survie.

8.1.4. Estimation de la probabilité ou de l'espérance

Une fois le modèle établi, on peut alors définir pour chaque canalisation soit la probabilité d'apparition de la prochaine défaillance, soit l'espérance à une certaine échéance.

Pour une conduite ayant eu une troisième défaillance il y a 3 ans et si l'on veut faire une prévision sur dix ans, la probabilité d'apparition de la prochaine défaillance est de :

$$P_{10} = 1 - \frac{S_2^*(3+10)}{S_2^*(3)}$$

Pour l'espérance la formule utilisée est la même que celle décrite au chapitre 6. Il est alors possible de classer les conduites par risque de défaillance. Le listing du programme se trouve en annexe 6.

8.2. Utilisation pour connaître l'état du réseau

La démarche décrite précédemment permet de définir les conduites à risque. Le gestionnaire de service peut alors mieux connaître le réseau et définir les zones prioritaires à surveiller. Des campagnes de mesures de fuites pourront alors être axées plutôt sur ces conduites. Puis il pourra être décidé de remplacer, de réhabiliter ou de laisser telles quelles les conduites selon les résultats de ces campagnes.

Connaissant le nombre de défaillances prévues, le gestionnaire peut alors budgétiser sur cette période les travaux de maintenance futurs.

8.3. Utilisation pour la planification du renouvellement

Comme on l'a vu au chapitre 1, le taux de rupture sur les canalisations est un critère important dans le choix du remplacement d'une conduite. Cet outil est donc utilisable dans le cadre de la planification du renouvellement. Le chapitre 1 a montré les deux principales politiques de renouvellement existant : la politique curative et la politique prédictive. Ces deux politiques peuvent intégrer le modèle.

8.3.1. Intégration dans le cadre d'une politique curative

Dans ce type de politique, le taux de rupture entre en compte lorsque d'autres critères de renouvellement ont déjà été déterminés. Ce sont, par exemple, l'opportunité de travaux de voirie ou bien l'enveloppe financière prévue pour le renouvellement (Cf. Figure 67).

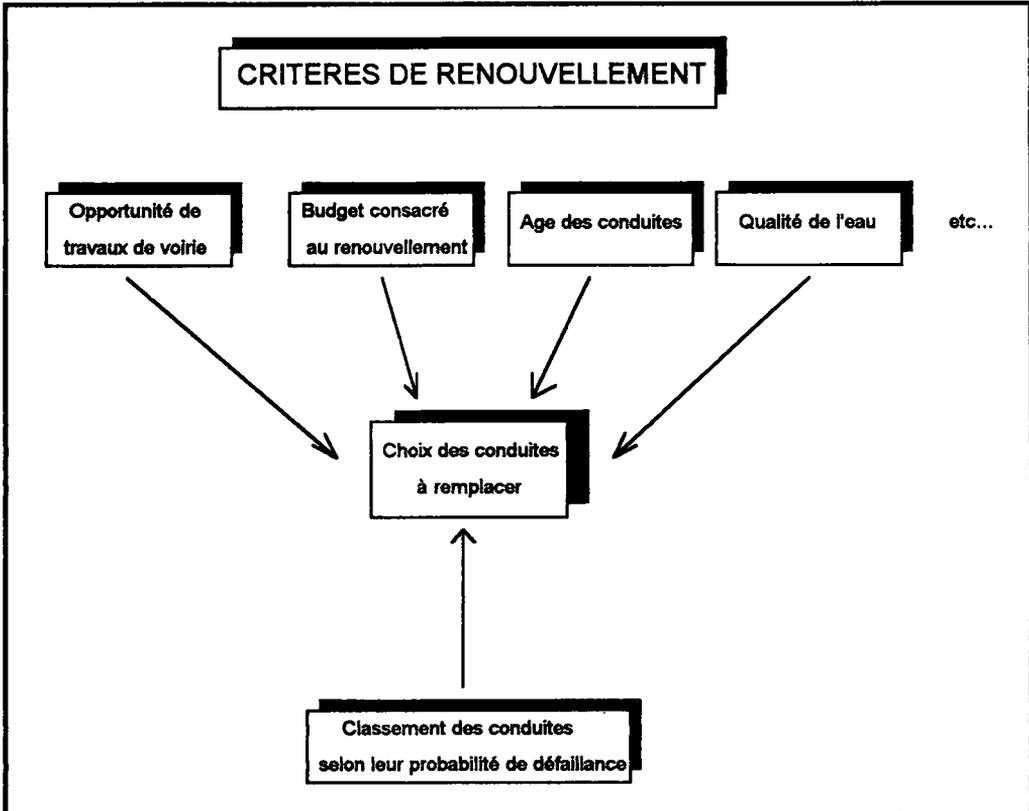


Figure 67 : Utilisation du modèle dans une politique curative de renouvellement

8.3.2. Intégration dans le cadre d'une politique prédictive

Dans une politique prédictive de renouvellement des conduites d'eau potable, seul rentre en compte dans le choix du renouvellement l'état futur de la conduite. L'estimation de cet état nécessite l'existence d'un outil d'analyse prédictive.

Cette prévision peut se faire à plus ou moins long terme. Elle peut concerner différentes représentations de l'état de la conduite, comme ceux déjà cités au chapitre 1 : le nombre de ruptures, les fuites diffuses, la qualité de l'eau, la diminution de la capacité de transport. Une politique complète devrait prendre en compte tous ces paramètres. Le modèle de Weibull mis

en place pour l'étude est un outil d'analyse prédictive des réparations sur les conduites, à savoir leurs ruptures.

Il peut être utilisé dans le cadre d'une étude économique afin de définir le coût de maintien en service futur de la canalisation.

8.3.2.1. Méthode de Shamir et Howard [Shamir et al., 1979]

La méthode de Shamir et Howard a pour but de déterminer la date optimale de renouvellement en essayant de prendre en compte tous les coûts pouvant entrer en compte dans le maintien de service. Deux hypothèses sont faites pour cette analyse :

- on suppose que les nouvelles canalisations ne présentent pas de défaillances.
- on prend en considération la vie future des nouvelles canalisations avec un taux de ruptures qui augmente exponentiellement.

Deux coûts sont déterminés :

- $C_r(t)$, qui est le coût de remplacement du tronçon,
- $C_m(t)$, qui est le coût de maintien en service du même tronçon accumulé de la pose au temps t .

La date optimale de renouvellement t_r est telle que :

$$C_r(t_r) + C_m(t_r) \text{ soit minimum,}$$

C'est à dire telle que :

$$\frac{d(C_r + C_m)}{dt}(t_r) = 0.$$

Dans les valeurs des coûts rentre en jeu l'actualisation. On aura donc :

$$C_r(t) = \frac{C_r^*(t)}{(1+R)^t}$$

et

$$C_m(t) = \frac{C_m^*(t)}{(1+R)^t}$$

où R correspond au taux d'actualisation.

La courbe de la figure 68 représente la courbe de Shamir et Howard.

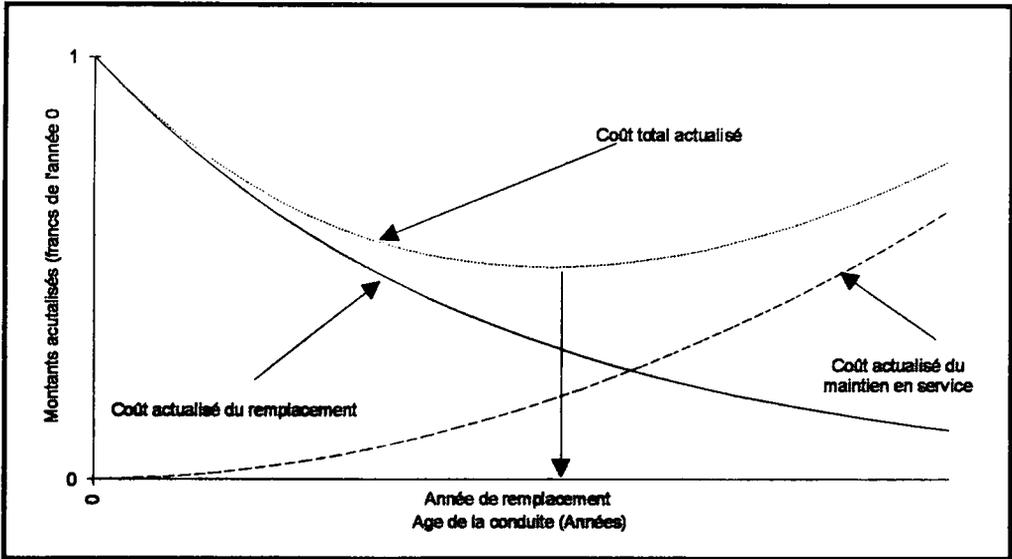


Figure 68 : Exemple de calcul de la date optimale de renouvellement (Méthode de Shamir et Howard) [Shamir et al., 1979]

Cette méthode a été utilisée dans le cadre d'une étude établie par J. El Naboulsi, en utilisant des coûts de réparation directs et indirects provenant de la Communauté Urbaine de Strasbourg. Le calcul du coût de maintien en service a été établi à partir du modèle de prévision tiré des données de la CEB et de la LED-Bordeaux.

Dans ce cas le coût de maintien en service a été calculé de la façon suivante :

$$C_m(t) = C_a \left[\begin{aligned} & \sum_{t_1=0}^t f_1(t_1) S_2(t-t_1) \left(\frac{1}{(1+r)^{t_1}} \right) \\ & + \sum_{t_1=0}^t \sum_{t_2=t_1}^t f_1(t_1) f_2(t_2-t_1) S_3(t-t_2) \left(\frac{1}{(1+r)^{t_1}} + \frac{1}{(1+r)^{t_2}} \right) \\ & + \sum_{t_1=0}^t \sum_{t_2=t_1}^t \sum_{t_3=t_2}^t f_1(t_1) f_2(t_2-t_1) f_3(t_3-t_2) S_4(t-t_3) \left(\frac{1}{(1+r)^{t_1}} + \frac{1}{(1+r)^{t_2}} + \frac{1}{(1+r)^{t_3}} \right) \\ & + \dots \end{aligned} \right]$$

C_a étant le coût d'une défaillance à l'année 0, r le taux d'actualisation.

Les courbes 69 et 70 représentent le calcul de la date optimale de renouvellement dans deux cas différents. Le premier inclut uniquement les coûts de la réparation (7000 F). Le second inclut les coûts indirects (174 000F), dont tous les coûts de dommages dus par exemple à la présence proche de cabinets médicaux.

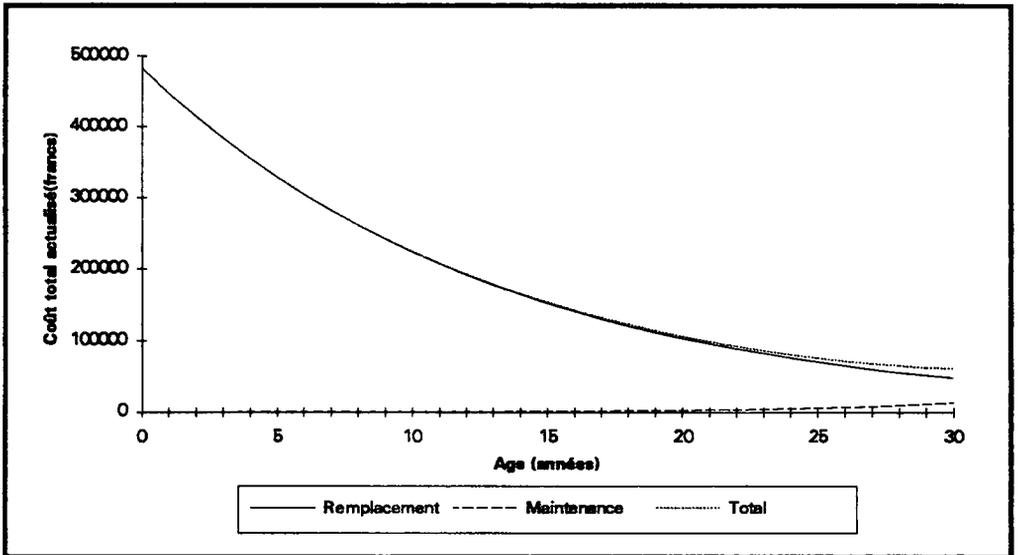


Figure 69 : Recherche de la date optimale de renouvellement (Rue du Vieux Marché aux Poissons, Hypothèse non favorable, sans coût indirect) [El Naboulsi, 1993]

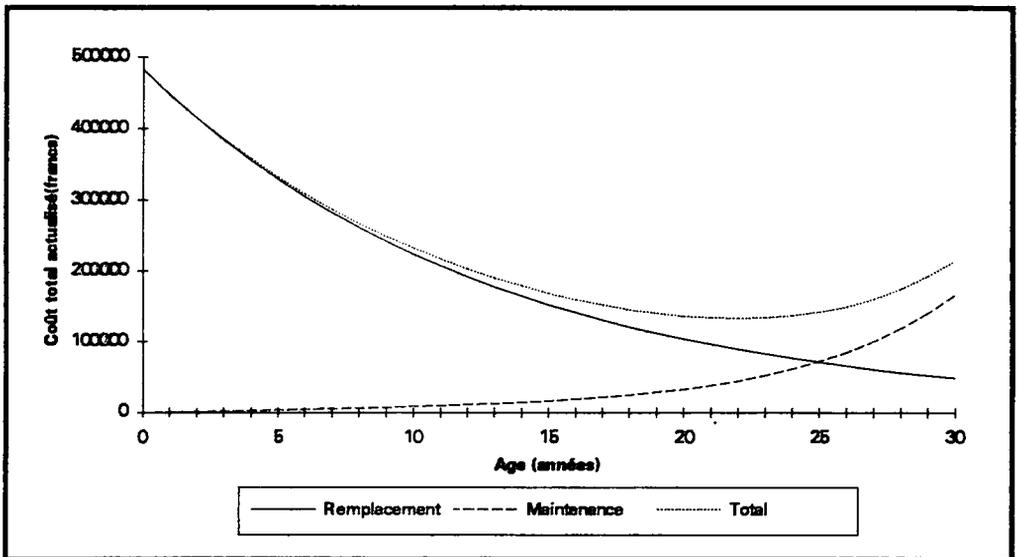


Figure 70 : Recherche de la date optimale de renouvellement (Rue du Vieux Marché aux Poissons, Hypothèse non favorable, avec coût indirect) [El Naboulsi, 1993]

Dans le premier cas la date optimale de remplacement se situe après 30 ans. Par contre dans le deuxième cas elle se situe autour de la 22ème année de la conduite. Ces cas concernent des conduites se trouvant dans les cas de défaillance les plus défavorables.

Cette méthode permet de calculer la date optimale de remplacement (Cf. Figure 71). D'autres coûts pourraient encore être pris en compte, notamment ceux concernant les autres facteurs de

vieillesse cités au chapitre 1 (qualité de l'eau, fuites diffuses, diminution de la capacité de transport).

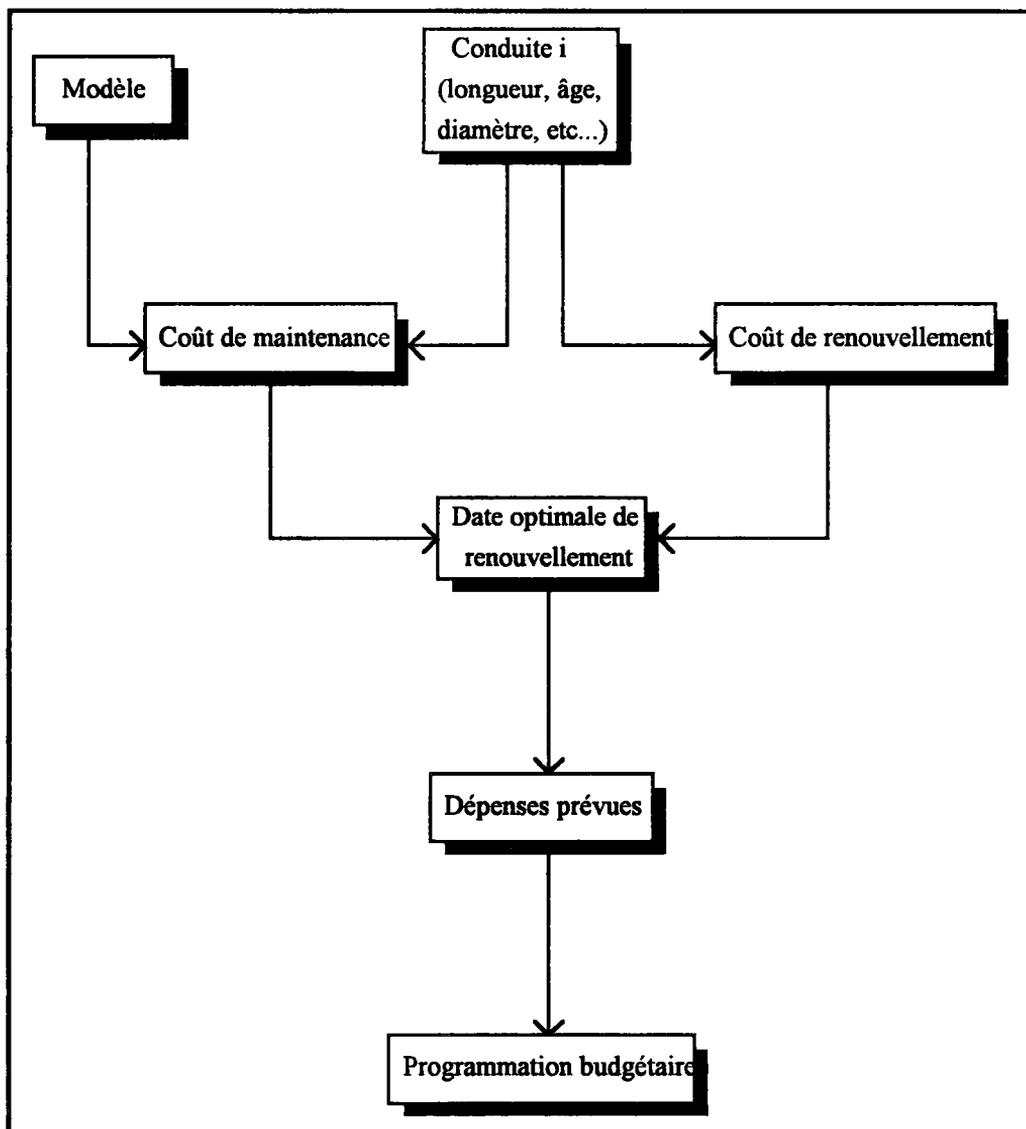


Figure 71 : Utilisation du modèle dans la méthode de Shamir et Howard.

8.3.2.2. Utilisation dans la méthode de Herz [Herz, 1992]

Cette méthode vise à établir un modèle prévisionnel de besoin de renouvellement des conduites servant de base à une programmation budgétaire à long terme. Sur la base de données techniques provenant du service d'eau de la ville de Stuttgart, une espérance de vie est calculée selon le type de matériau utilisé.

Une fonction de survie est élaborée. Elle est donnée par la formule suivante :

$$y(x) = \frac{a+1}{a+e^{b(x-c)}} \text{ avec } x \geq c$$

$$y(x) = 1 \text{ avec } x < c$$

y étant le pourcentage de canalisations encore en vie, x l'âge de la conduite, a le paramètre de vieillissement, b le facteur de défaillance et c le temps de résistance.

La loi de répartition des durées de vie est la suivante :

$$f(x) = \frac{(a+1)be^{b(x-c)}}{(a+e^{b(x-c)})^2} \text{ pour } x \geq c$$

$$f(x) = 0 \text{ pour } x < c$$

Le taux de défaillance correspondant au rapport entre la fonction de densité et la fonction de survie, on a :

$$z(x) = \frac{be^{b(x-c)}}{a+e^{b(x-c)}} \text{ pour } x \geq c.$$

Les courbes de la figure 72 représentent ces fonctions.

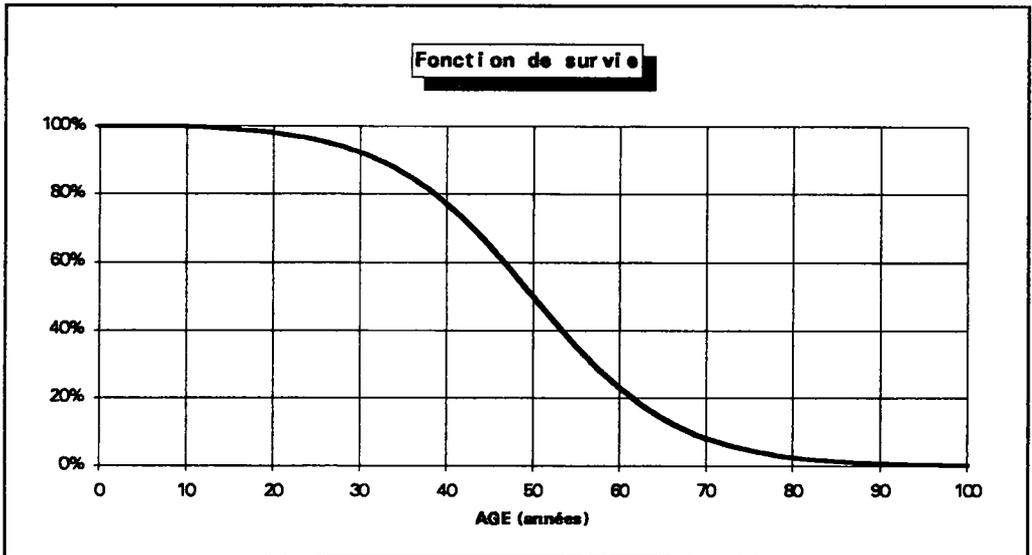


Figure 72 : Fonction de survie pour les paramètres a=120, b=0,12, c=10. [Herz, 1992]

Fonction de densité



Taux de défaillance

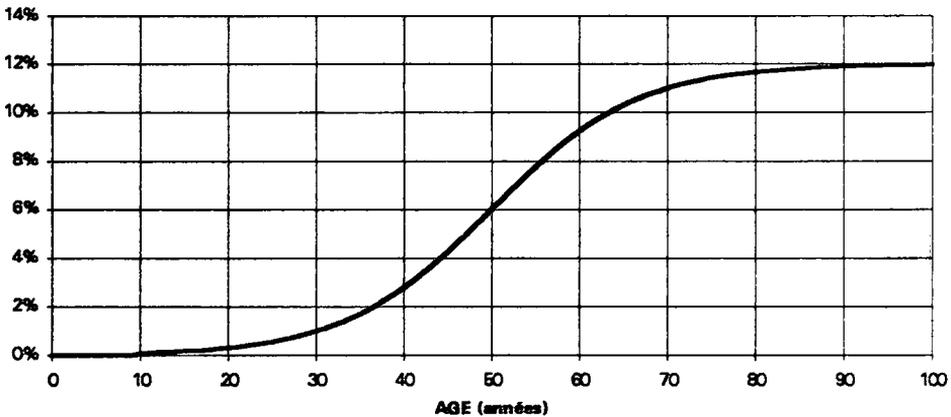


Figure 72 (suite) : Fonction de densité et taux de défaillances pour les paramètres $a=120$, $b=0,12$, $c=10$. [Herz, 1992]

Chaque canalisation est alors représentée selon ces trois paramètres a , b et c qui caractérisent sa durée de vie. Elle peut d'ailleurs voir varier ces paramètres le long de sa vie, lorsqu'elle passe d'une classe de vieillissement à une autre.

L'estimation de ces paramètres doit se faire en quatre temps :

- Mise en avant des connaissances empiriques,
- Utilisation de l'information stockée dans les banques de données,
- Utilisation d'un appareillage statistique,

- Correction des estimations par un apprentissage dynamique.

L'estimation de ces paramètres est encore en cours et pour l'instant une distinction n'a pu être réalisée que sur les matériaux.

Le modèle de Weibull pourrait fournir des indications intéressantes sur les paramètres a , b et c (Cf. Figure 73).

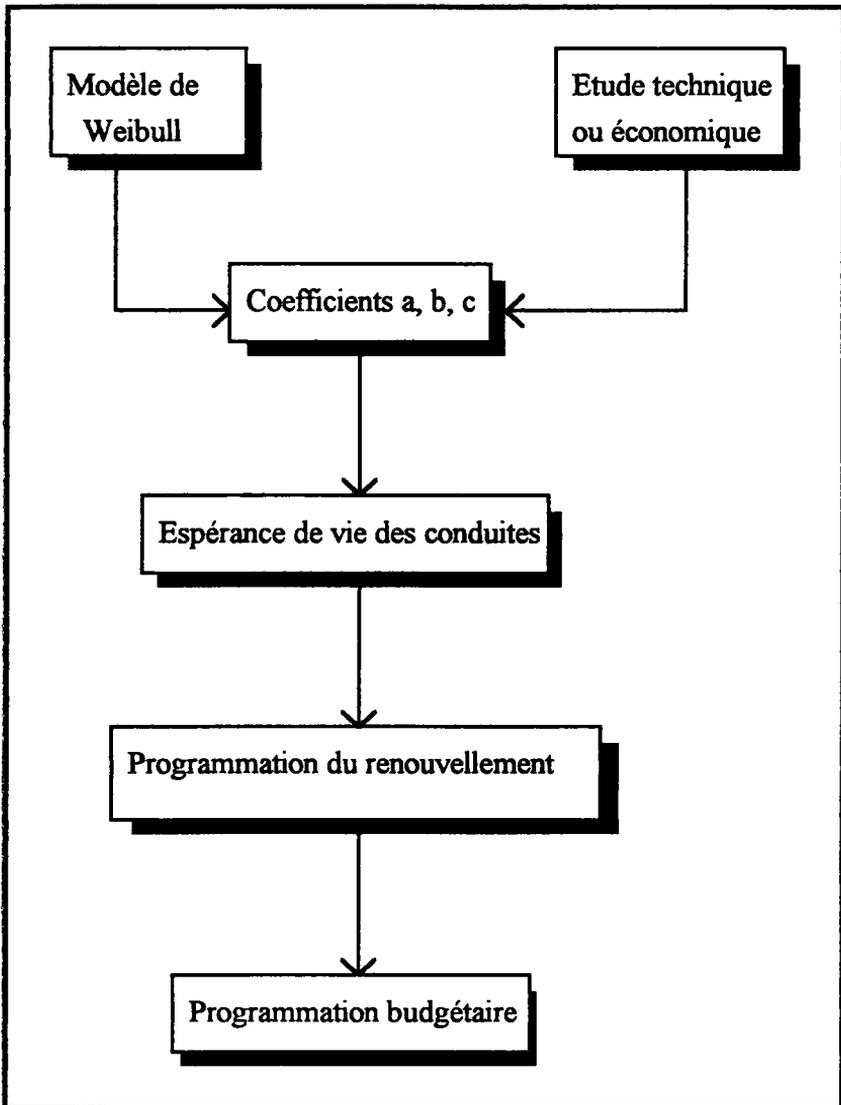


Figure 73 : Utilisation du modèle dans la méthode de Herz

Les services peuvent donc utiliser le modèle dans les différents types de politique de renouvellement, même si une politique prédictive semble préférable à une politique curative.

Cependant il est impératif pour ces services de suivre auparavant la démarche proposée au paragraphe 8.1..

8.4. Utilisation dans l'étude de fiabilité d'un réseau

A travers cette étude probabiliste, il sera possible de fixer un risque d'interruption de service sur une conduite. En estimant pour chacune des conduites un risque de ce type, rattaché à son importance dans le bon fonctionnement du réseau (adduction ou distribution? nombre d'habitants desservis? présence de services médicaux? débit? etc...), il sera possible de déterminer un indice de fiabilité d'un réseau du point de vue de la sécurité.

Bien entendu, d'autres critères de fiabilité liés aux autres organes du réseau (réservoirs, pompes, etc.) devront rentrer en compte dans l'estimation de cet indice de fiabilité.

Conclusion

Les casses ou défaillances des conduites d'eau potable apparaissent comme le critère caractérisant leur vieillissement le plus simple à prendre en compte. Le modèle choisi pour prévoir leur apparition est un modèle statistique car il permet de prendre en compte des variables explicatives quantitatives, comme qualitatives.

Les données recueillies sur trois services d'eau (LED-Bordeaux, CEB et Bas-Rhin) et leur spécificité ont déterminé le choix d'un modèle basé sur l'analyse des données de survie utilisée en épidémiologie. Ce sont les modèles de Cox et de Weibull qui ont été utilisés.

Le test qui les accompagne a permis de définir les facteurs les plus influents. Ce sont pour la CEB et la LED-Bordeaux, le nombre de défaillances déjà subies, le diamètre et dans une moindre mesure le sol, l'année de pose (différenciation fonte grise-fonte ductile) et le facteur croisé trafic-chaussée. Pour les deux syndicats ruraux, où l'historique de défaillance est plus faible, seuls le nombre de défaillances déjà subies, le diamètre et le trafic sont influents.

Parmi les deux modèles, le modèle de Weibull, complètement paramétrique, semble mieux adapté, car il permet de prévoir à plus long terme les défaillances. La comparaison des résultats de ce modèle avec les données réelles sur Bordeaux a permis de faire deux constatations :

- l'hypothèse d'une même influence des facteurs quelque soit l'ordre de la défaillance est trop forte ;
- les casses ayant lieu après 15 ans ont une plus grande influence que celles ayant lieu avant 15 ans ; un nouveau facteur caractérisant le vieillissement de la conduite peut alors être pris en compte.

Le modèle pourrait être amélioré sur deux points. Tout d'abord avec des données plus précises concernant les défaillances, il serait possible de différencier les fuites sur tuyaux de celles sur joints, ce qui n'était pas le cas dans cette étude. On pourrait alors créer deux modèles spécifiques aux deux types de fuites, qui dans l'objectif du renouvellement n'ont pas la même signification. Ensuite le facteur vieillissement pourrait être affiné en prenant en compte, par exemple, l'écart entre les deux défaillances précédentes. Il caractériserait alors de manière plus précise le processus de vieillissement.

La longueur de l'historique des défaillances des services étudiés est assez considérable (35 ans pour la LED-Bordeaux, 44 pour la CEB et 17 pour le Bas-Rhin), ce qui n'est pas le cas généralement. Cependant la méthode d'apprentissage permet avec un minimum de données et à partir d'un modèle général de construire un modèle semi-local. Les services ayant de faibles historiques de maintenance pourront ainsi créer leur propre modèle.

L'élaboration d'un tel modèle nécessite dès à présent la création de bases de données sur les conduites, leurs défaillances et sur les facteurs influents. L'étude a d'ailleurs permis de préciser quels sont les facteurs essentiels à retenir dans ce cas. Elle a également montré la nécessité d'exploiter des tronçons de canalisations de longueur minimale. Ceci serait facilité par l'utilisation d'un Système d'Information Géographique, qui permettrait une meilleure localisation des conduites et de leurs défaillances, à condition que les relevés sur le terrain soient suffisamment précis.

Dans le cadre d'une politique de renouvellement, ce modèle peut être associé à une étude économique dans laquelle rentreraient en compte d'autres critères tels que l'opportunité de travaux de voirie ou le mode de financement possible. D'un point de vue technique, il sera également intéressant de prendre en compte les autres critères de vieillissement que sont la diminution de la capacité de transport de la conduite, la dégradation de la qualité de l'eau ou les fuites diffuses.

Références bibliographiques

AGHTM-Commission "Distribution de l'eau", 1993 : "Etude sur le renouvellement des réseaux d'eau potable", TSM, n°11 bis, Novembre, pp. 1-37.

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", Adv. Water Resources, Mars, vol.10, pp. 2-20.

ANDREOU, S.A., 1986 : "Predictive models for pipe break failures and their implications on maintenance planning strategies for deteriorating water distribution systems", Massachusetts Institute of Technology, 291 p..

BOUDOURESQUE, P., 1985 : "La dégradation des réseaux d'eau potable. Préventions et remèdes.", T.S.M.- L'EAU, Octobre, n°10 , pp. 427-437

CLARK, R.M., STAFFORD, C.L., GOODRICH, J.A., 1982 "Water distribution systems : a spatial and cost evaluation", Journal of the water resources planing and management division, Octobre, vol.108, pp. 243-256.

DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES, 1989 : "Entwurf DVGW-Hinweis: Entscheidungshilfen für die planung der Erneuerung oder der gründlichen Instandsetzung von Gas- und Wasserleitungen".

EISENBEIS, P., 1991 : "Méthodologie de prévision des défaillances des conduites d'eau potable. Etude de faisabilité.", Mémoire de DEA "Sciences et techniques de l'eau" ENGEES-ULP Strasbourg, 112 p..

ELNABOULSI, J., 1993 : "Le renouvellement des réseaux d'eau potable - Approche économique d'optimisation", Mémoire de DESS "Economie industrielle et décentralisation", Laboratoire Gestion des Services Publics ENGEES-CEMAGREF, 171 p.

HALPERN, O., PASCAL, O., 1988 : "Le renouvellement des réseaux urbains de distribution d'eau", Colloque international sur le coût et le prix de l'eau en ville, Décembre, pp.108-116.

HERZ, R., 1992 : "Alterung und Erneuerung von Infrastrukturbeständen - ein Kohortenüberlebensmodell", Veröffentlichung in Jahrbuch für Regionalwissenschaft, 22 p.

HILL, C., COM-NOUGUE, C., KRAMAR, A., MOREAU, T., O'QUIGLEY, J., SENOUSI, R., CHASTANG, C., 1990 : "Analyse statistique des données de survie", INSERM, édition Médecine-Sciences Flammarion, 204 p..

KALBFLEISCH, J.D., PRENTICE, R.L., 1980 : "The statistical analysis of failure time data", John Wiley & Sons, 321 p..

KOTTMANN, A., 1988 : "Ist das Alter von Graugußrohren ein Kriterium für die Erneuerung einer Leitung?", 3R International, N°1, pp.55-58.

KOTTMANN, A., 1978 : "Über die Ursachen von Rohrbrüchen in Versorgungsleitungen", Dissertation, Stuttgart.

KREMER, M., 1990 : "Vieillessement des canalisations. Exemples de politiques de renouvellement en France et en RFA.", mémoire de DEA "Sciences et techniques de l'eau" ENGEES-ULP Strasbourg, 130 p..

MARKS, D.H., ANDREOU, S.A., JEFFREY, L., PARK, C., ZASLAVSKY A., 1987 : "Statistical models for water main failures", Water Engineering Research Laboratory, USEPA, 108 p..

MORUZZI, L., 1984 : "Reasons for pipe damage", Congrès de l'AIDE (Monastir, 1984) Water supply, N°3/4, pp.SS16-1-SS16-5.

O'DAY, D.K., WEISS, R., CHIAVARI, S., BLAIR, D., 1989 : "Water main evaluation for rehabilitation/replacement", Guidance manual of AWWA research foundation, 182 p..

SHAMIR, U., HOWARD, C.D.D., 1979 : "An analytic approach to scheduling pipe replacement", Journal of AWWA, Mai, vol.71, pp 248-258.

STALDER, F., HUNKELER, F., 1986 : "Korrosion durch Streuströme", Gaz-Eaux-Eaux Usées, n° 66, pp. 821-826.

UNION DES INDUSTRIES ET ENTREPRISES DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT, 1991 : "Les équipements de l'eau des collectivités locales", brochure, Mars, 4 p..

ZEDGUI, L., 1993 : "Diagnostic et étude des défaillances des réseaux d'eau potable des Syndicats de Kronthal et de Kochersberg", Mémoire de Mastère - ENGEES, 72 p..

BIBLIOGRAPHIE

AWWA, 1969 : "Replacement of water distribution mains-Committee report", Journal of AWWA, Septembre, vol.61, N°9, pp. 417-422.

BREMOND, B., EISENBEIS, P., COMMENGES, D., 1992 : "Outil de prévision des défaillances des conduites d'eau potable, aide à la décision du renouvellement", T.S.M.-L'EAU, Octobre, N°10, pp. 511-516.

BUTLER, D., WEST, J.W. 1987 : "Leakage prevention and system renewal", Symposium papers of Pipeline Management 87, pp. 2.1-2.17.

CARDER D.R., TAYLOR, M.E., 1983 : "Modelling the effects of traffic loading on small-diameter rigid pipelines", Pipe and pipelines international, Mars-Avril, pp. 12-14.

CLARK, R.M., STAFFORD, C.L., GOODRICH, J.A., 1984 : "Repair, replacement, and renovation of drinking water systems", ASCE water resources planning and management annual conference, Mai, pp 1-5.

CORLESS, J.P., 1982 : "Managing a comprehensive water main reconstruction program", Journal of AWWA, Novembre, pp.560-567.

DRESSLER, H., "Wasserverlustbekämpfung in einem Wasserwerk mittlerer Größe", Gas/Wasser/Wärme, pp. 83-88.

DROESBEKE, J.J., FICHET, B., TASSI, P., "Analyse statistique des données de survie", *Economica*, 282 p..

GOODRICH, J.A., ADAMS, J.Q., CLARK, R.M., 1985 : "Data base development and analysis for water distribution systems", *Hydraulics and Hydrology in the small computer age*, Août, vol.1, pp. 336-340.

GOURIEROUX, C., 1989 : "Econométrie des variables qualitatives", *Economica collection "Economie et statistiques avancées"*, 430 p..

GUMMOW, R.A., 1984 : "The corrosion of municipal iron water mains", National association of corrosion engineers, Mars, N°3, pp.39-42.

HERSCH, P., 1985 : "Deciding to rehabilitate, repair, or replace", *Water engineering and management*, Mai, vol.132, N°50-53.

HERZ, R., HOCHSTRATE, K., "Long term requirements and policies for water supply network renewal", *Water supply*, vol.6, pp. 63-70.

HOLTSCHULTE, H., 1983 : "The acquisition and evaluation of technical data and services, as decision aids for maintenance measures in pipe networks", *Water supply*, vol.2, pp. B157-169.

HUDSON, W.D., "Increasing water system efficiency through control of unaccounted-for water", *Journal of AWWA*, vol.70, N°7, pp.362-365.

KOTTMANN, A., GOCKEL, B., 1988 : "Planungsregeln für Wasserleitungen und Wasserrohrnetze", *Wasser-Abwasser*, N°129, pp. 701-702.

- MOYER, E.E., MALE, J.W., MOORE, I.C., HOCK, J.G., 1983 : "The economics of leak detection and repair- a case study", Janvier, vol.75, N°1, pp.29-34.
- NEWPORT, R., 1981 : "Factors influencing the occurrence of bursts in iron water mains", Aqua, N°3, pp. 274-278.
- O'DAY, D.K., 1987 : "Water distribution record keeping and planning approaches: current utility practices", Journal NEWWA, Juin, vol.101, N°2, pp. 145-168.
- O'DAY, D.K., FOX, C.M., HUGUET, G.M., 1980 : "Aging urban water systems: a computerized case study", Public Works, Août, pp. 61-64 + p.111.
- O'DAY, D.K., 1982 : "Organizing and analyzing leak and break data for making main replacement decisions", Journal of AWWA, Novembre, vol.74, N°11, pp.588-594.
- PONT-A-MOUSSON, 1989 : "Modélisation du comportement des réseaux d'eau dans le temps", Centre de recherche Pont-à-Mousson, Mars.
- REED, E.C., "Report on water losses", Aqua, pp. 178-191.
- REY, A., 1989 : "Alimentation en eau des communes rurales", Courants, Septembre-Octobre, N°5, pp. 37-40.
- STACHA, J.H., 1978 : "Criteria for pipeline replacement", Journal of AWWA, Mai, pp. 256-258.
- SULLIVAN, J.P., 1982 : "Maintaining aging systems - Boston's approach", Journal of AWWA, Novembre, vol.74, N°11, pp. 555-559.
- VAN DEN HOVEN, T.J.J., "Methods to determine quantitative and qualitative reliability of water distribution systems", Water Supply, vol.6, pp.13-16.
- WALSKI, T.M., PELLICCIA, A., 1982 : "Economic analysis of water main breaks", Journal of AWWA, Mars, vol. 74, N°3, pp. 140-147.
- WALSKI, T.M., 1982 : "Economic analysis of rehabilitation of water mains", Journal of the water resources planning and management division, Octobre, vol.108, pp. 296-308.
- WALSKI, T.M., 1984 : "Selecting an economical water main rehab", Civil engineering/ASCE, Septembre, pp.68-70.
- WALSKI, T.M., 1987 : "Replacement rules for water mains", Journal of AWWA, Novembre, vol.79, N°11, pp.33-37.

Annexes

| | |
|--|------------|
| ANNEXE 1 | 193 |
| ANNEXE 2 | 195 |
| PHOTOGRAPHIES DE CONDUITES DEGRADEES..... | 195 |
| LES ELEMENTS INFLUENÇANT L'APPARITION DES DEFAILLANCES DES CONDUITES D'EAU POTABLE | 198 |
| ANNEXE 3 | 207 |
| ANNEXE 4 | 211 |
| FORMULATION DE LA VRAISEMBLANCE..... | 211 |
| ESTIMATION DES PARAMETRES β_i | 213 |
| ESTIMATION DE LA VARIANCE | 214 |
| ANNEXE 5 | 215 |
| COURBES DE PROBABILITE DE NON-DEFAILLANCES (MODELE DE COX) ... | 215 |
| COURBES DE PROBABILITE DE NON-DEFAILLANCES (MODELE DE WEIBULL STRATIFIE) | 220 |
| ANNEXE 6 | 225 |
| CALCUL DE L'ESPERANCE DU NOMBRE DE DEFAILLANCES | 225 |
| LISTING DU PROGRAMME DE CALCUL DE L'ESPERANCE (TURBO PASCAL) | 229 |
| HISTOGRAMMES DE COMPARAISON DEFAILLANCES PREVUES- DEFAILLANCES (PREVISION SUR 10 ANS) | 233 |
| ANNEXE 7 | 239 |
| CALCUL DE LA LONGUEUR EQUIVALENTE | 239 |
| CALCUL DU TEMPS DE DEFAILLANCE RAPPORTE A LA LONGUEUR REELLE..... | 239 |

Annexe 1

BORDEAUX-BACALAN

Rupture de canalisation

A la suite d'une rupture de canalisation, hier matin, l'eau a envahi la chaussée de la rue Bourbon et a inondé une quarantaine de logements

Tout le monde a cru à l'orage, mais ça venait du cœur de la route. Pour une raison encore indéterminée, une canalisation souterraine — sous la chaussée de la rue Bourbon — a craqué et a laissé s'échapper des centaines de litres d'eau. Le liquide a soulevé le macadam et, comme si elle provenait d'une source, s'est très vite répandue tout autour.

Au petit matin, 2 500 mètres car-

rés de chaussée étaient recouverts d'eau et les occupants de tous les logements situés à proximité avaient les pieds mouillés. Les sapeurs-pompiers se sont rendus sur place avec un important matériel pour pomper l'eau en trop et aider les Bordelais concernés à vider leurs caves ou à éponger leurs logements. Les employés de la Lyonnaise des eaux, pour leur part, sont intervenus pour ouvrir la chaussée et colmater la brèche fautive.

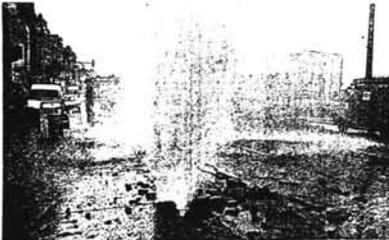
Figure A1 : Article de "Sud-Ouest" du 7/10/1993 relatant une défaillance sur une canalisation et ses conséquences

Un geyser géant

La rupture d'une canalisation condamnée a fait jaillir un spectaculaire geyser d'eau hier matin quai des Chartrons. La circulation a été perturbée



Les spécialistes de la Lyonnaise des Eaux à pied d'oeuvre. Le tuyau défaillant va être isolé du réseau



La force du geyser a éventrée la chaussée
(Photos : Sud-Ouest + Rodolphe Escher)

Jacques Ballarin

Un geyser d'eau impressionnant a jailli hier matin à 7 h 22 quai des Chartrons en face de la Capitainerie. C'est la corrosion de la pièce maîtresse d'une canalisation condamnée et obstruée depuis de nombreuses années qui a causé son « lâchage » et qui a provoqué cette péripétie de taille. On était en présence d'une grosse conduite, un tuyau de 40 centimètres, relié au collecteur qui alimente le centre de Bordeaux en eau potable.

Alerté en temps réel par son système de télécontrôle qui enregistre tout incident survenant sur le réseau la Lyonnaise des Eaux a immé-

diatement dépêché une équipe technique qui s'est employé à maîtriser le geyser avec l'assistance des sapeurs-pompiers de Bordeaux.

L'opération a consisté à isoler le tuyau défaillant en fermant les vannes de nature à le séparer du réseau. Ensuite les spécialistes de la Lyonnaise des Eaux ont creusé à l'endroit correspondant à la fuite avant de colmater et d'obstruer. Tout cela a été rondement mené puisqu'aussi bien à 8 h 24 tout était rentré dans l'ordre.

DES EMBOUTILLAGES

La circulation a été perturbée sur les quais le geyser d'eau ayant fait son apparition à l'heure de l'embauche et des rentrées massives sur



Un geyser haut, haut, haut, hier matin quai des Chartrons en face de la capitainerie

Bordeaux. Il y a eu des embouteillages et des retards inévitables dès lors qu'il a fallu dans un premier temps dévier le trafic par la partie

interne du port autonome. Une fois qu'il a été possible de rendre deux voies de circulation la gêne s'est amoindrie. Le CRICR de Mérignac

n'a d'ailleurs pas été assailli de coups de téléphone ce qui prouve que l'événement a été géré avec efficacité.

Figure A2 : Article de Sud-Ouest du 23/10/1992 relatant la défaillance d'une conduite de diamètre 400 mm et ses conséquences.

Annexe 2

Photographies de conduites dégradées



Figure A3 : Photographie représentant une conduite ayant subi une rupture.

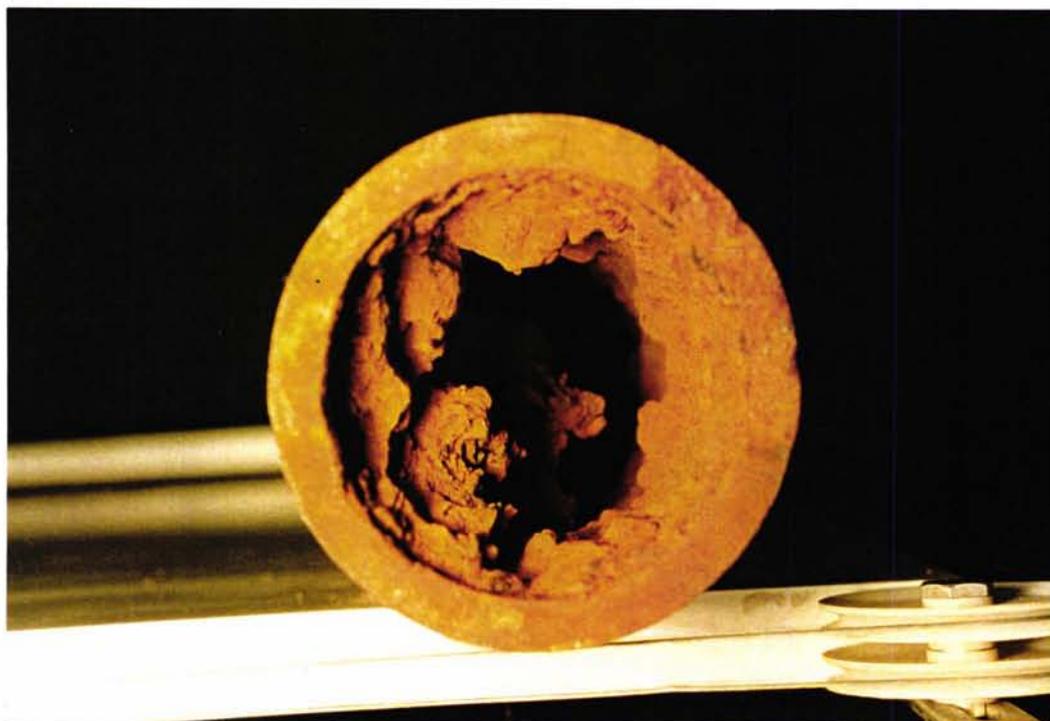


Figure A4 : Photographie d'une conduite de diamètre 80 mm ayant subi des dépôts ferriques de corrosion interne.



Figure A5 : Photographie d'une conduite de diamètre 80 mm ayant subi une corrosion externe localisée (courants vagabonds, hétérogénéité de sol, ...).



Figure A6 : Même conduite que la photographie précédente.



Figure a7 : Même conduite avec les deux points de corrosion.

Les éléments influençant l'apparition des défaillances des conduites d'eau potable

Ces éléments sont regroupés en différentes classes [Kremer, 1990] :

- les éléments propres au type de la canalisation,
- les éléments liés à l'exploitation des réseaux,
- les éléments extérieurs aux réseaux.

Les éléments propres au type de la canalisation

* *Le matériau*

Tout matériau de canalisation d'eau potable doit se conformer à certaines spécifications, de sorte qu'il puisse avoir une durabilité suffisante.

Cependant les différents matériaux ont chacun des caractéristiques propres, qui peuvent faciliter certains types de défaillances. Ces facteurs sont rassemblés dans le tableau A1 selon les deux grands types de conduite existant : les matériaux plastiques et les métaux.

Tableau A1 : Causes des défaillances selon le matériau des conduites

| Matériaux plastiques | Métaux |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">- Vieillessement du matériau : baisse de résistance, diminution de l'élasticité, de la tenue aux chocs avec le temps, action des rayons U.V.- Ténacité : propagation d'une fissure à partir d'un défaut externe ou interne, dans le cas de fluctuation de pression.- Fissuration sous tension : rupture fragile en milieu contenant des hydrocarbures.- Tenue aux chocs en particulier à froid.- Perméabilité à des polluants présents dans le terrain. | <ul style="list-style-type: none">- Anomalie de structure ou de santé métallurgique.- Comportement mécanique réduit : rupture sous tension (fonte grise).- Corrosion : nécessité d'une protection contre la corrosion, propagation de la corrosion externe à partir d'un défaut externe (rayure, endommagement) du revêtement, qualité de réalisation du revêtement, choix des revêtements en fonction de l'agressivité du sol.- Incrustations internes en fonction de la qualité de l'eau. |

**** Le diamètre***

Le diamètre peut jouer un rôle important dans le mécanisme d'apparition des défaillances. Ainsi un petit diamètre est plus sensible aux efforts de traction. Les tuyaux de diamètre inférieur à 100 mm ont presque toujours des ruptures transversales.

**** Les joints***

Les deux types de joint (au plomb et en caoutchouc) possèdent des caractéristiques bien différentes.

Les joints au plomb ne sont pas élastiques et transmettent donc les tensions d'un tuyau à l'autre. En outre leur mise en oeuvre était très délicate et nécessitait un travail précis. Ils ne sont plus utilisés depuis le début des années soixante.

Les joints en caoutchouc sont bien entendu élastiques. Cependant leur vieillissement est encore mal connu.

Pour les conduites en matière plastique, certains types de joints, les joints élastomères et les joints collés, installés à une époque, se sont avérés entraîner des fuites diffuses importante. Les services ayant posé ce type de joint ont d'ailleurs vu bien souvent le rendement de leur réseau diminuer.

**** Le comportement statique***

Un tuyau, encastré à une extrémité, peut subir une contrainte engendrant une casse en sa partie supérieure. Des charges supplémentaires, comme par exemple les charges dues au trafic, peuvent augmenter le risque de rupture.

D'autre part il est assez fréquent d'observer une rupture due à la contrainte de flexion (tuyau sur deux appuis), entraînant une rupture sur la partie inférieure de la canalisation.

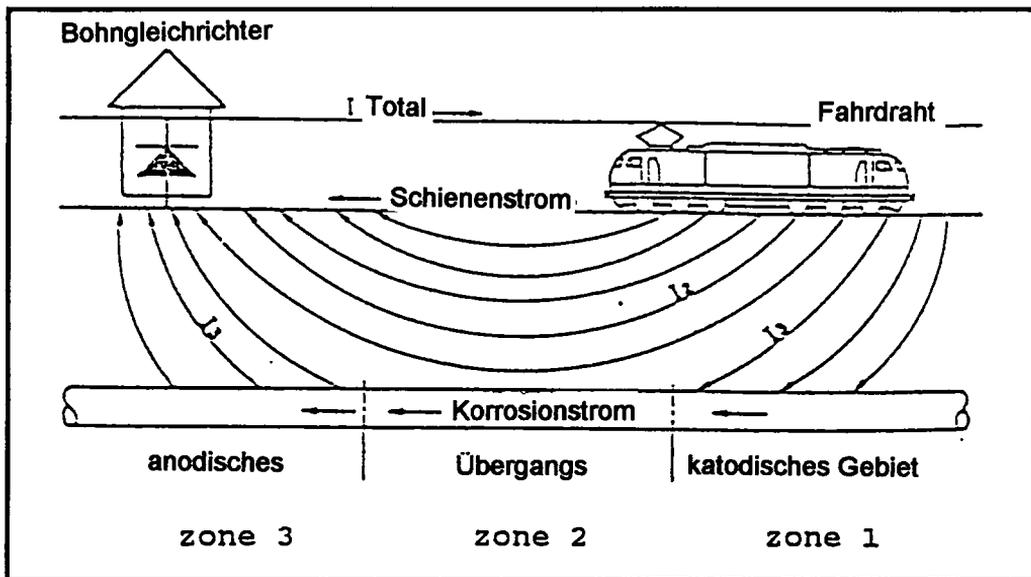
**** La résistance à la corrosion***

Cet élément a été placé parmi les éléments propres à la canalisation car il ne concerne que les canalisations métalliques non protégées. La corrosion externe peut avoir plusieurs origines :

- Les courants vagabonds

Les courants vagabonds générés par des installations électriques alimentées en courant continu peuvent augmenter les risques de corrosion des canalisations.

Ainsi une part importante de ces courants peut emprunter comme chemin de retour la canalisation en tant que conducteur, ce qui peut provoquer une corrosion au niveau des points de sortie des courants. (Cf. Fig. A8)



Korrosionsstrom signifie courant de corrosion, anodisches- Übergangs- et kathodisches- signifient respectivement zone anodique, neutre et cathodique, Schienenstrom signifie courant de surface.

Figure A8 : Corrosion par courants vagabonds [Stalder et al., 1986]

- Le sol

La résistivité est un bon indicateur de la corrosivité du sol. Ainsi un sol est d'autant plus corrosif que sa résistivité est faible (Cf. tableau A2). D'autres valeurs telles que le pH ou le potentiel redox peuvent également aider à définir la corrosivité. Ainsi une faible valeur du pH et une valeur du potentiel redox inférieure à 100 mV sont caractéristiques de sols agressifs.

-L'hétérogénéité de surface

Lors de la pose de la conduite il n'est pas rare de constater l'enlèvement, dû à un choc, d'une partie de la pellicule superficielle d'oxyde, entraînant une discontinuité locale et la création d'un phénomène de pile électrique.

-L'hétérogénéité du sol

Lorsqu'une canalisation traverse des sols différents, il peut se créer une pile géologique dans laquelle la partie de la canalisation se trouvant dans le terrain le moins aéré devient anodique et se corrode (pile d'aération différentielle).

Tableau A2 : Corrosivité du sol en fonction de sa résistivité [Boudouresque, 1985]

| | | | | | |
|--|-------------|--------|-----------------------------------|---------|--------|
| Résistance spécifique du sol ohm-m | < 5 | 5-10 | 10-20 | 20-100 | > 100 |
| Evaluation de l'agressivité du sol | Très élevée | Elevée | Peu élevée | Moyenne | Faible |
| Relation entre le nombre de perforations et la résistance électrique du sol | | | | | |
| Résistivité du sol ohm-mètre | | | Nombre de perforations % du total | | |
| < 5 | | | 50,2 | | |
| 5-10 | | | 18,0 | | |
| 10-20 | | | 20,5 | | |
| 20-50 | | | 9,6 | | |
| 50-100 | | | 0,3 | | |
| > 100 | | | 1,4 | | |

-L'hétérogénéité par contact

Cette corrosion a lieu au niveau des raccordements de canalisation de matériaux différents, comme par exemple l'acier et le béton armé, ce qui peut entraîner une différence de potentiel importante. Il est alors important de bien isoler les deux canalisations, par l'emploi de joints en caoutchouc, afin d'interdire le passage du courant.

Les éléments liés à l'exploitation des réseaux

**** Variation des conditions d'exploitation***

Une augmentation de la charge hydraulique peut avoir lieu, suite à une modification du régime hydraulique, telle que le passage d'une adduction gravitaire à une alimentation sous pression ou la réduction de section due à une réhabilitation de canalisations.

Cette surcharge hydraulique peut alors entraîner une augmentation du nombre de fuites ou de ruptures dans les semaines suivant le changement.

****Manoeuvres accidentelles sur le réseau***

Ces manoeuvres sont surtout caractérisées par le phénomène du coup de bélier, phénomène très violent due à la circulation d'une onde de pression ou de dépression dans la canalisation, suite à l'ouverture/fermeture d'une vanne ou la mise en route/arrêt d'une pompe.

Ce phénomène peut fragiliser dangereusement la canalisation, quelquefois jusqu'à la détérioration du joint, à la fêlure du tuyau ou même à la rupture.

**** Nature de l'eau***

La nature de l'eau peut être un facteur très important de corrosion interne de la canalisation. Ainsi on distingue surtout les différents types d'eau par leur taux d'oxygène dissous (corrosion par l'oxygène) et leur pH.

D'autre part l'eau doit être à l'équilibre calco-carbonique afin d'éviter soit une diminution de la paroi de la canalisation (eau agressive), soit une diminution de la section de la canalisation (eau incrustante).

De même il peut exister une corrosion bactérienne, due aux bactéries du fer ou aux bactéries sulfatoréductrices. Toutefois leur action est encore assez mal connue.

**** Température de l'eau***

En général la température de l'eau dans le réseau varie très peu, même dans des régions à périodes de gel importantes. Le risque le plus important de variation de température a lieu dans les branches mortes du réseau, où l'eau peut stagner.

Une rapide diminution de la température peut alors entraîner une contraction de la canalisation et une augmentation des contraintes longitudinales de traction, d'où une fragilisation des tuyaux.

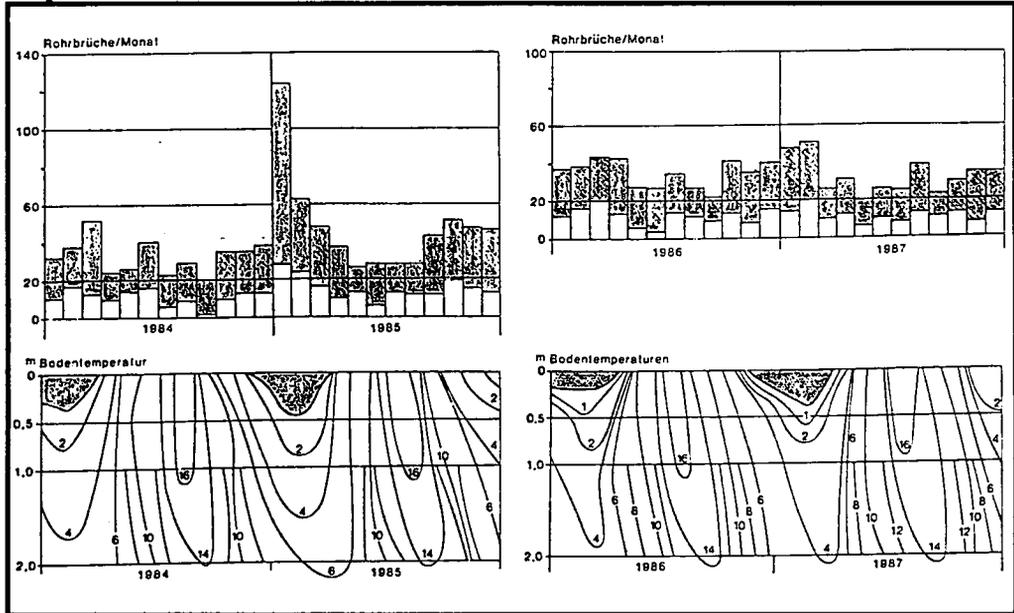
- Les éléments extérieurs aux réseaux

**** Le sol et son humidité***

Outre les phénomènes de corrosion externe, le sol peut avoir une action mécanique sur la canalisation suite à une variation de son humidité.

Ainsi lors de périodes de fortes précipitations sur un sol argileux sec, un gonflement de ce sol peut avoir lieu et entraîner une modification des contraintes sur la canalisation et de l'alignement de cette canalisation.

Ce phénomène est d'ailleurs accentué sur un sol gelé (apparition de lentilles de terrain gelé, d'où gonflement du sol). La figure A9 montre d'ailleurs une certaine corrélation entre la température du sol et le taux de casses de canalisations.



Rohrbrüche/Monat signifie nombre de casses par mois, Bodentemperatur signifie température du sol

Figure A9 : Corrélation entre la température du sol et le nombre de casses [Kottmann, 1988]

*** Les mouvements de sol**

Certains phénomènes peuvent engendrer des mouvements de sol plus ou moins importants, plus ou moins instantanés.

Ainsi un tassement peut avoir lieu à cause de pentes trop importantes ou de séismes. Des contraintes, d'autant plus élevées que la canalisation est attachée à des points fixes, peuvent alors apparaître et augmenter le risque de rupture.

De même une modification de l'hydrologie souterraine peut causer des affouillements et tassements, ainsi qu'une migration du lit de pose.

**** Les conditions de pose***

Le choix du matériau de remblai utilisé et le soin apporté lors de la pose ont une incidence primordiale sur le vieillissement des canalisations.

Il est tout d'abord nécessaire d'utiliser un matériau qui permet une meilleure stabilisation de la conduite, tels le sable ou le gravier. Le sable permet également de diminuer de moitié la charge par rapport à un matériau argileux à un mètre de profondeur.

Une grande attention apportée lors de la pose a également une grande importance. En effet ceci permet d'éviter certains chocs à la canalisation, chocs qui pourraient engendrer une dégradation du revêtement extérieur, d'où une fragilisation de la conduite vis-à-vis notamment de la corrosion.

**** Les fuites***

Une canalisation trop fuyarde peut entraîner une érosion du lit de pose, surtout si celui-ci est composé de particules fines. Cette détérioration peut alors modifier la portée du tuyau, rendant l'appui suffisamment irrégulier pour provoquer la cassure du tuyau, d'où un effet "boule de neige" qui facilite l'accentuation de l'érosion du lit.

**** L'influence de tiers***

Des travaux ne concernant pas obligatoirement la distribution d'eau peuvent détériorer la canalisation de manière directe ou indirecte.

Ainsi un creusement de tranchée contenant déjà une conduite d'eau potable peut soit la casser directement à cause d'une manoeuvre accidentelle, soit déstabiliser le lit de pose et provoquer des glissements, écrasements, déboîtements ou ruptures.

Une conduite peut aussi être fragilisée à cause d'engins utilisés lors des chantiers, tels les vibrateurs lourds utilisés pour la compression du remblai et du tapis routier. D'autre part les multiples creusements, en ville notamment, font que les matériaux existant dans les tranchées sont de plus en plus hétérogènes.

Il est évident que les zones à risque sont surtout les zones urbaines, où les réseaux autres que les réseaux d'eau (assainissement, câbles électriques, câbles téléphoniques) sont les plus nombreux.

**** Les sels pour le déneigement des routes***

L'infiltration de sels dans les lits de pose augmente considérablement le risque de corrosion des canalisations métalliques. Ce risque est d'ailleurs d'autant plus grand que dans certaines régions les routes sont salées régulièrement.

**** La circulation***

Dans certains services on a pu constater que le taux de ruptures était deux fois plus important pour les conduites traversant une route principale à fort trafic que pour des conduites placées dans des rues d'habitation. Il est donc évident que la densité de trafic est un facteur influençant le taux de défaillances.

Ceci est bien sûr lié à la surcharge causée par le trafic ainsi qu'à la résistance de la canalisation, qui, elle, dépend d'autres facteurs tels que la profondeur d'enfouissement, le diamètre et le matériau de la canalisation, l'alignement conduite-traffic, le matériau de remblai et l'assise du tuyau.

Annexe 3

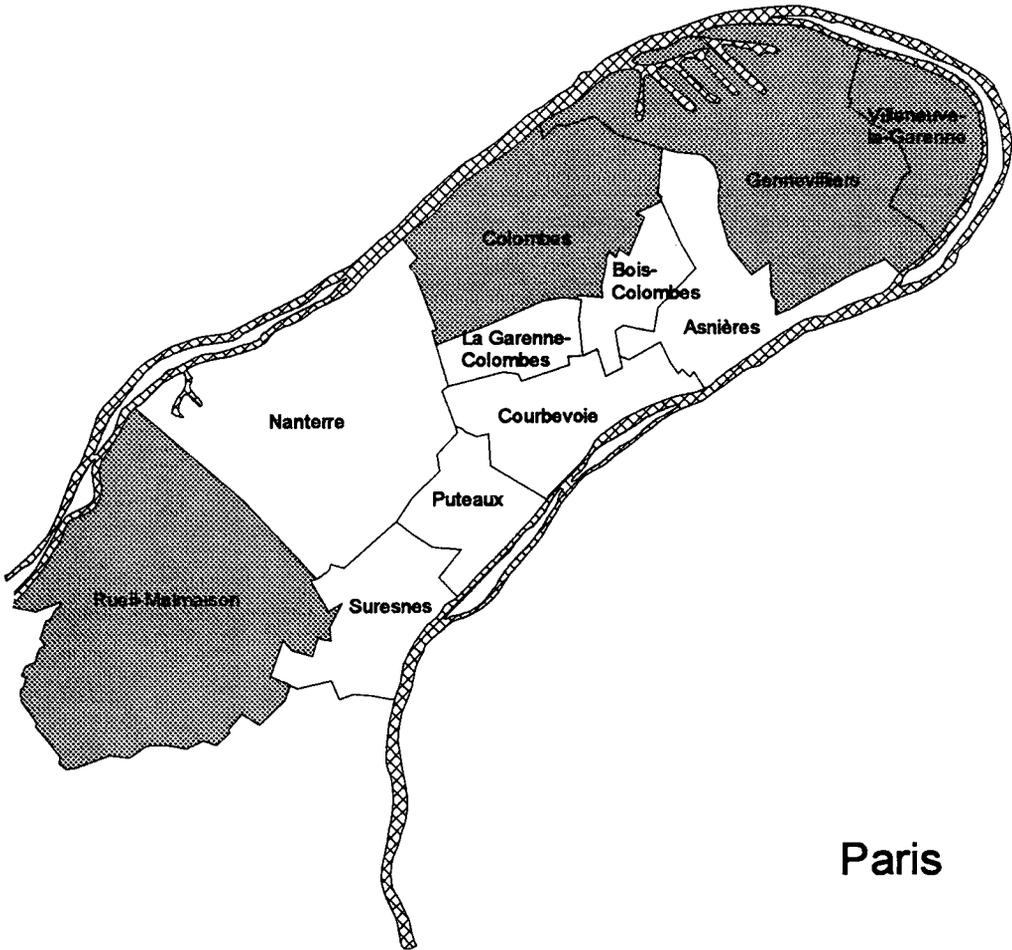


Figure A10 : Plan de situation de la Presqu'île de Gennevilliers (CEB)

LISTE DES COMMUNES DES SYNDICATS DU KRONTHAL :

| | | | |
|-----|-------------|-----|----------------------------|
| 018 | Balbronn | 335 | Nordheim |
| 030 | Bergbieten | 354 | Odratzheim |
| 081 | Dahlenheim | 442 | Irmstett-Scharrachbergheim |
| 085 | Dangolsheim | 473 | Soultz |
| 139 | Flexbourg | 492 | Traenheim |
| 240 | Kirchheim | 517 | Wangen |
| 282 | Marlenheim | | |

LISTE DES COMMUNES DES SYNDICATS DU KOCHERSBERG :

| | | | |
|-----|----------------------|-----|---------------|
| 034 | Berstett | 485 | Offenheim |
| 077 | Cosswiller | 361 | Olwisheim |
| 102 | Dassenheim | 363 | Osthoffen |
| 109 | Durningen | 374 | Pfettisheim |
| 138 | Fessenheim le Bas | 382 | Quatzenheim |
| 150 | Furdenheim | 383 | Rangen |
| 163 | Gougenheim | 406 | Rohr |
| 181 | Handschuheim | 452 | Schnersheim |
| 214 | Hurtigheim | 495 | Truchtersheim |
| 226 | Ittenheim | 520 | Wasselonne |
| 236 | Kienheim | 532 | Willgottheim |
| 253 | Kuttolsheim | 542 | Wintzenheim |
| 258 | Landersheim | 548 | Wiwersheim |
| 298 | Mittelschaeffolsheim | 556 | Zeinheim |
| 228 | Neugartheim | | |

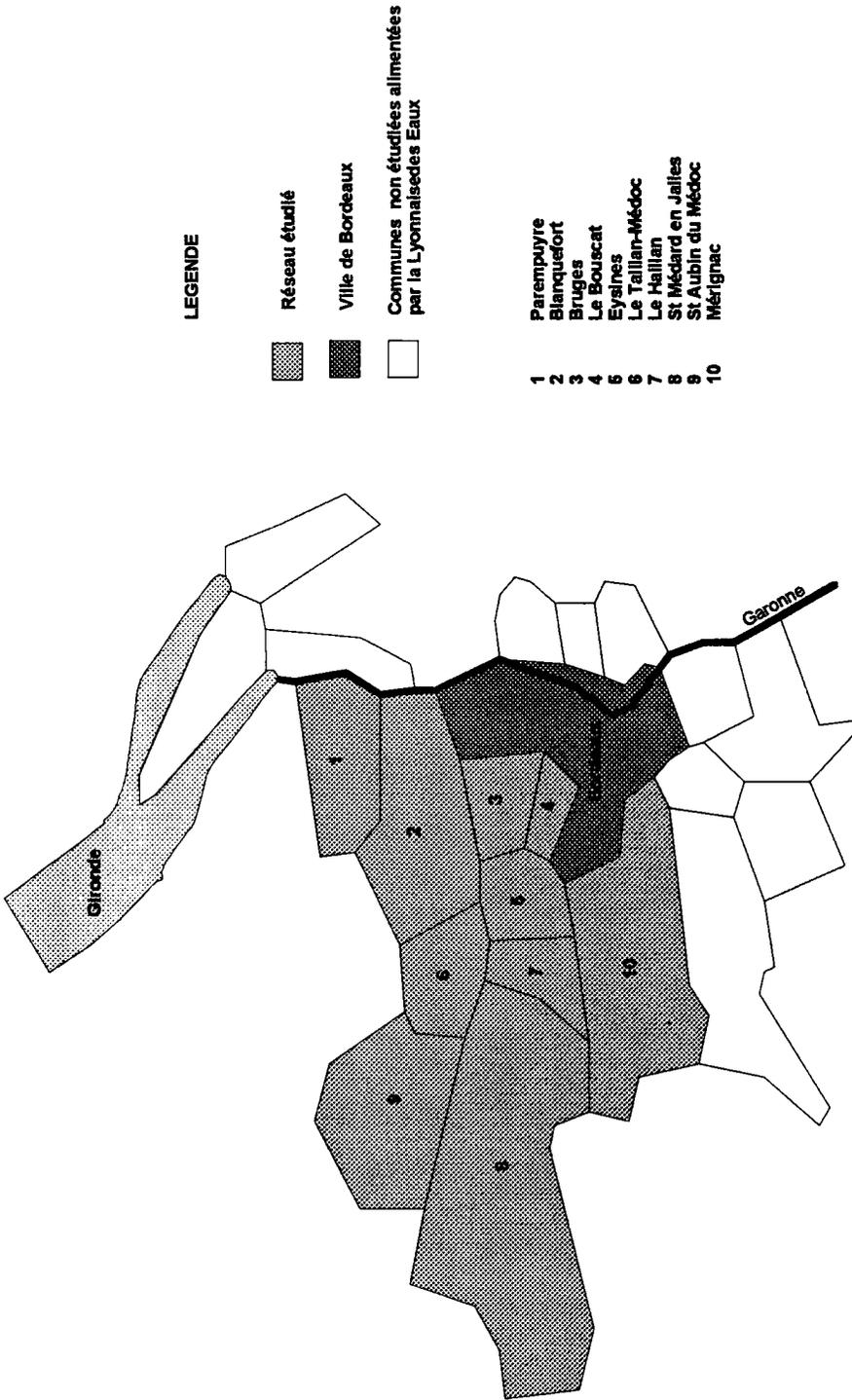


Figure A12 : Plan de situation du service des Eaux de la LED-Bordeaux

Annexe 4

Formulation de la vraisemblance

On appelle la vraisemblance V d'un échantillon la probabilité pour que cet échantillon soit observé. V est donc égale à :

$$V(t_1, t_2, \dots, t_n, \beta) = \prod_i f(t_i, \beta),$$

où β représente le vecteur des paramètres du modèle.

Dans le cas des données d'analyse de survie, la contribution à la vraisemblance dépend de la nature de l'événement pour l'individu concerné (censure ou défaillance).

Pour un sujet de caractéristique Z_i défaillant au temps t_i , cette contribution est égale à :

$$f(t_i, Z_i) = h(t_i, Z_i)S(t_i, Z_i)$$

Pour un sujet de caractéristique Z_j censuré au temps t_j^* , elle est égale à :

$$S(t_j^*, Z_j) = \exp \left[- \int_0^{t_j^*} h(t, Z_j) dt \right]$$

La vraisemblance s'écrit alors (en considérant qu'il n'y a pas d'ex-aequo) :

$$V = \prod_i f(t_i, Z_i) \prod_{i_j^*} S(t_j^*, Z_j)$$

Dans le cas d'un modèle à risques proportionnels, les fonctions f et S dépendent de la fonction h_0 . Pour l'éliminer, Cox a proposé de calculer une vraisemblance partielle qui a les mêmes propriétés que la vraisemblance complète. Considérant que seules les défaillances apportent de l'information sur S ou sur h , on calcule une contribution à la vraisemblance à chaque instant où se produit un décès. C'est la probabilité conditionnelle pour que le sujet de caractéristiques Z_i meure en t_i étant donnée la population à risque en cet instant. On a donc :

$$V = \prod_{i=1}^k \Pr(Z_i \text{ meurt en } t_i / R_i) = \prod_{i=1}^k P_i$$

R_i étant l'ensemble des individus à risque au temps t_i .

De manière intuitive, Cox a alors formulé cette probabilité conditionnelle comme le rapport entre le risque instantané du sujet Z_i d'avoir une défaillance au temps t_j et la somme des risques instantanés de chacun des sujets à risques présents qui auraient pu avoir une défaillance en t_j .

Soit :

$$P_i = \frac{h(t_i, Z_i)}{\sum_{j \in R_t} h(t_i, Z_j)}$$

et

$$P_i = \frac{h_0(t_i) \exp[\beta' Z_i]}{\sum_{j \in R_t} h_0(t_i) \exp[\beta' Z_j]}$$

β' étant le vecteur des paramètres de régression à estimer.

Comme, dans un modèle à risques proportionnels, la fonction h_0 ne dépend pas des Z_i , la vraisemblance partielle est égale à :

$$V^* = \prod_{i=1}^k \frac{\exp[\beta' Z_i]}{\sum_{j \in R_t} \exp[\beta' Z_j]}$$

Cette valeur correspond au cas où il n'y a pas d'ex-aequo. Dans le cas contraire sa formulation est plus complexe, c'est à dire :

$$V = \prod_{i=1}^k \frac{\prod_{j=1}^{d_i} h(t_i, Z_j)}{\sum_{l \in R_{d_i}(t_i)} \left[\prod_{p=1}^{d_l} h(t_i, Z_{lp}) \right]}$$

$$V = \prod_{i=1}^k \frac{\prod_{j=1}^{d_i} \exp(Z_j \beta)}{\sum_{l \in R_{d_i}(t_i)} \left[\prod_{p=1}^{d_l} \exp(Z_{lp} \beta) \right]}$$

$$V = \prod_{i=1}^k \frac{\exp(s_i \beta)}{\sum_{l \in R_{d_i}(t_i)} \exp(s_l \beta)}$$

avec :

$$s_i = \sum_{p=0}^{d_i} Z_{i_p}, \quad s_i \text{ la somme des covariables associées aux } d_i \text{ individus défaillants au temps}$$

t_i , $R_{di}(t_i)$ l'ensemble des sous-ensembles de d_i éléments choisis parmi l'ensemble des individus à risque au temps t_i R_{ti} . Cette vraisemblance partielle est d'autant plus difficile à mettre en forme que le nombre d'individus ex-aequo au temps t_i est important. Cependant une bonne approximation correspond à la formule de Breslow à savoir :

$$V = \prod_{i=1}^k \frac{\exp(s_i \beta)}{\left[\sum_{l \in R_{t_i}} \exp(Z_l \beta) \right]^{d_i}}$$

Estimation des paramètres β_i

La vraisemblance partielle de Cox est approximée à partir de la formule de Breslow :

$$V = \prod_{i=1}^k \frac{\exp(s_i \beta)}{\left[\sum_{l \in R_{t_i}} \exp(Z_l \beta) \right]^{d_i}},$$

où s_i est la somme des covariables associées aux d_i individus défaillants au temps t_i , R_{ti} l'ensemble des individus à risque au temps t_i .

Les paramètres β_j sont estimés en résolvant le système d'équation :

$$U_j(\beta) = \frac{\partial \ln V(\beta)}{\partial \beta_j} = 0,$$

soit, pour tout j :

$$\sum_{i=1}^k [s_{ji} - d_i A_{ji}(\beta)] = 0$$

où s_{ji} est le j ème élément du vecteur s_i et

$$A_{ji}(\beta) = \frac{\sum_{l \in R_{t_i}} Z_{jl} \exp(Z_l \beta)}{\sum_{l \in R_{t_i}} \exp(Z_l \beta)}$$

Notons que la matrice d'information contient $p \times p$ éléments (p étant le nombre de composants du vecteur β) formulés de la manière suivante :

$$I_{hj}(\beta) = -\frac{\partial^2 \ln V}{\partial \beta_h \partial \beta_j} = \sum_{i=1}^k d_i C_{hji} ,$$

où

$$C_{hji} = \frac{\sum_{l \in R_h} Z_{hl} Z_{jl} \exp(Z_l \beta)}{\sum_{l \in R_h} \exp(Z_l \beta)} - A_{hi}(\beta) A_{ji}(\beta) .$$

Les valeurs estimées de β sont obtenues à partir de la méthode de Newton-Raphson en utilisant les équations précédentes. Cette méthode est une technique itérative.

Considérons par exemple la fonction de vraisemblance $V(\beta)$ d'un vecteur colonne β . On utilise alors la série de Taylor d'ordre 1 de $U(\beta) = \partial \log V(\beta) / \partial \beta$. Dans ce cas on a :

$$U(\hat{\beta}) = U(\beta_0) - U'(\beta^*) (\hat{\beta} - \beta_0)$$

$$U(\hat{\beta}) = U(\beta_0) - I(\beta^*) (\hat{\beta} - \beta_0)$$

β^* étant une valeur prise entre β_0 et $\hat{\beta}$.

En supposant que β est suffisamment proche de $\hat{\beta}$, on pourra estimer que $I(\beta_0) \approx I(\beta^*)$. De plus comme $U(\hat{\beta}) = 0$, on aura :

$$\hat{\beta} = \beta_0 + I(\beta_0)^{-1} U(\beta_0)$$

La méthode conduit alors au schéma itératif suivant :

$$\beta_{k+1} = \beta_k - U'(\beta_k)^{-1} U(\beta_k)$$

Estimation de la variance

La matrice de variance-covariance est estimée à partir de la matrice d'information I . Elle est égale à :

$$\text{Var}(\beta) = I(\beta)^{-1} .$$

Annexe 5

Courbes de probabilité de non-défaillances (Modèle de Cox)

Légende des conduites (LED-Bordeaux et CEB) :

1 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 250, posée après 1975, dans un sol non-corrosif et dans une rue à trafic faible ou sous-trottoir

2 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 150, posée après 1975, dans un sol non-corrosif et dans une rue à trafic faible ou sous-trottoir

3 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 150, posée entre 1966 et 1975, dans un sol non-corrosif et dans une rue à trafic faible ou sous-trottoir

4 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 150, avant 1966, dans un sol non-corrosif et dans une rue à trafic faible ou sous-trottoir

5 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 150, avant 1966, dans un sol corrosif et dans une rue à trafic faible ou sous-trottoir

6 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 150, avant 1966, dans un sol corrosif et dans une rue à trafic fort et sous chaussée

7 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 60, avant 1966, dans un sol corrosif et dans une rue à trafic fort et sous chaussée

Légende des conduites (Bas-Rhin) :

1 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 250, dans une rue à trafic fort

2 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 150, dans une rue à trafic fort

3 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 250, dans une rue à trafic faible

4 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 60, dans une rue à trafic fort

5 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 150, dans une rue à trafic faible

6 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 60, dans une rue à trafic faible

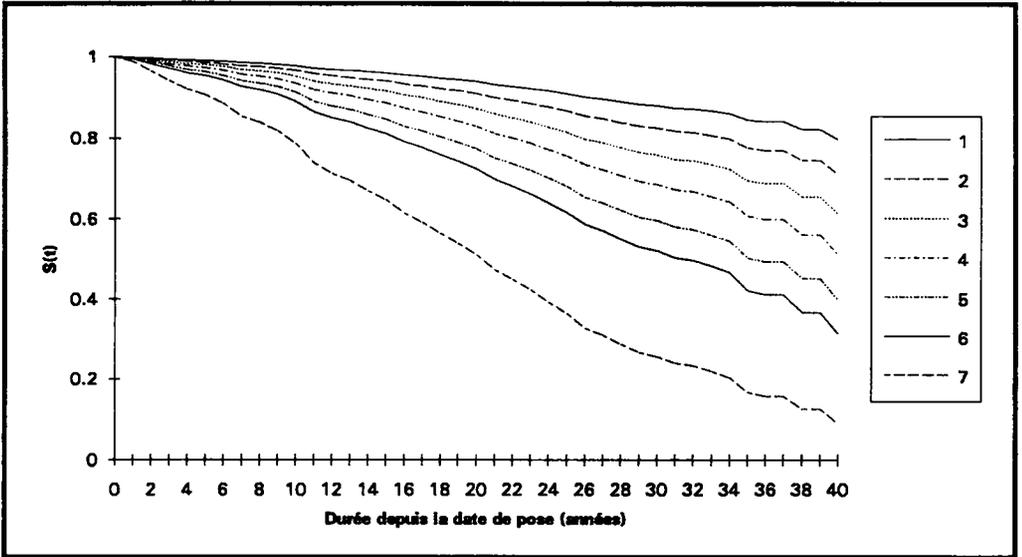


Figure A13 : Courbes de probabilité de non-défaillance (1^{ère} défaillance, LED-Bordeaux)

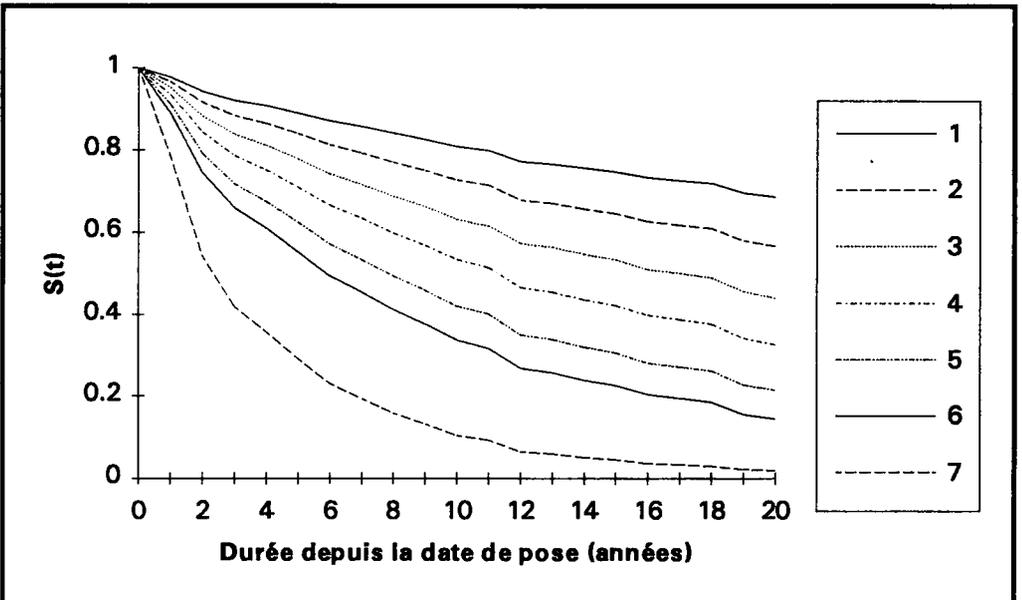


Figure A14 : Courbes de probabilité de non-défaillance (2 à 4^{ème} défaillance, LED-Bordeaux)

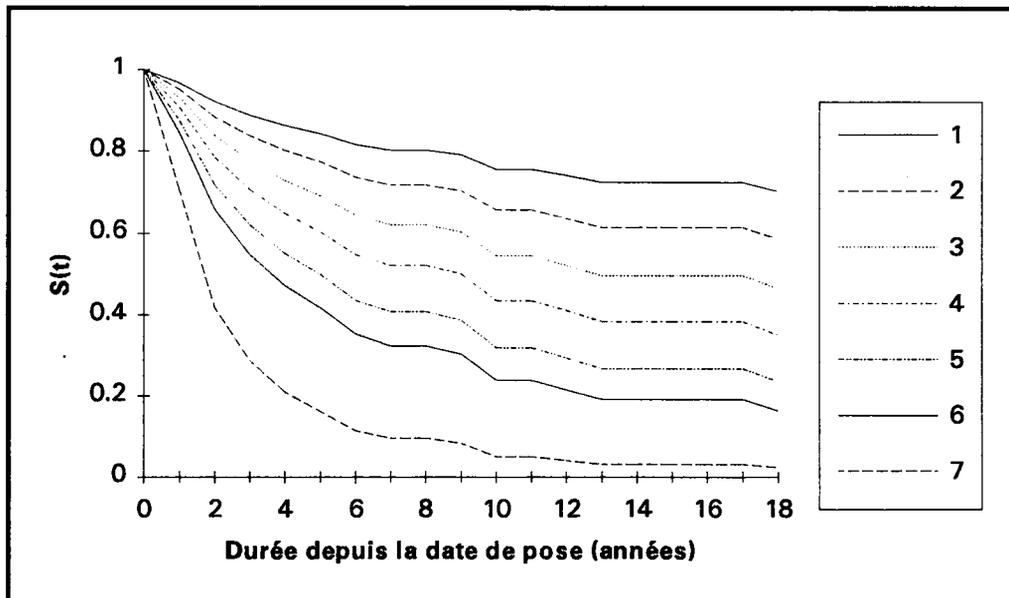


Figure A15 : Courbes de probabilité de non-défaillance ($5^{\text{ème}}$ défaillance et +, LED-Bordeaux)

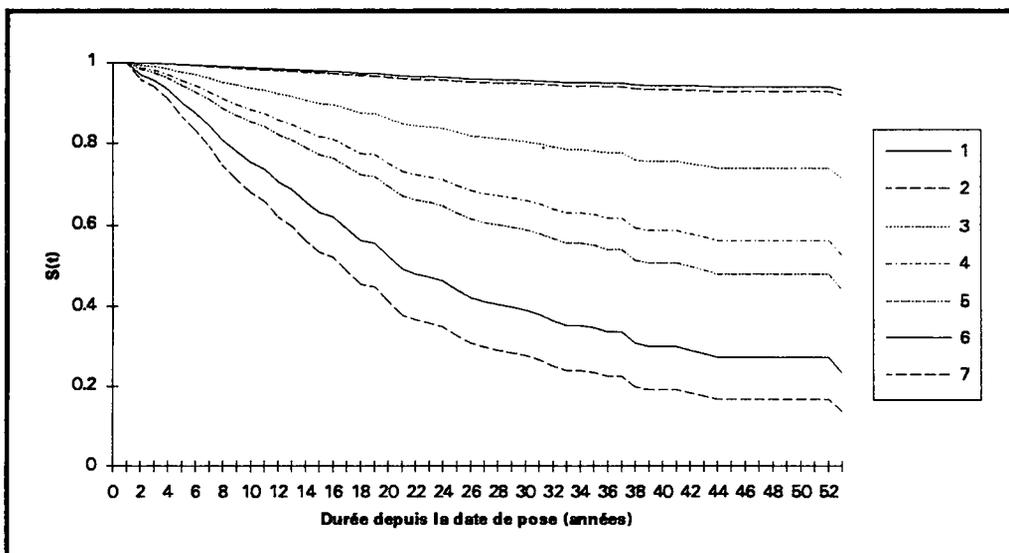


Figure A16 : Courbes de probabilité de non-défaillance ($1^{\text{ère}}$ défaillance, CEB)

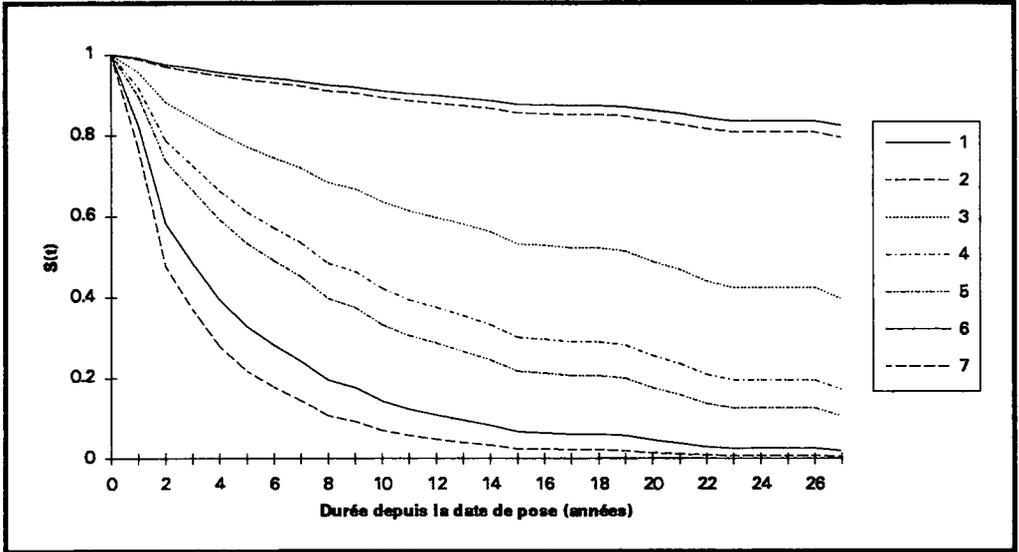


Figure A17 : Courbes de probabilité de non-défaillance (2 à 4^{ème} défaillance, CEB)

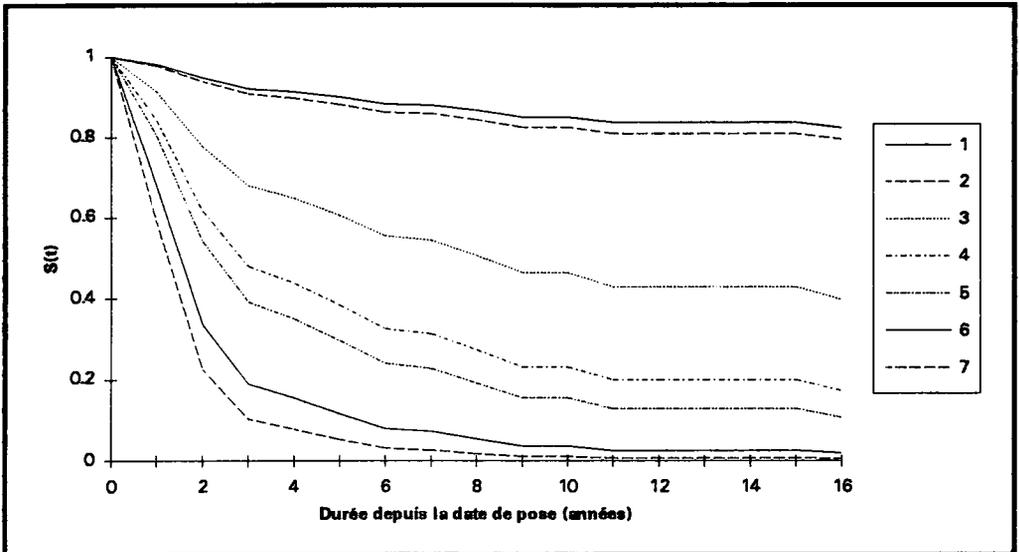


Figure A18 : Courbes de probabilité de non-défaillance (5^{ème} défaillance et +, CEB)

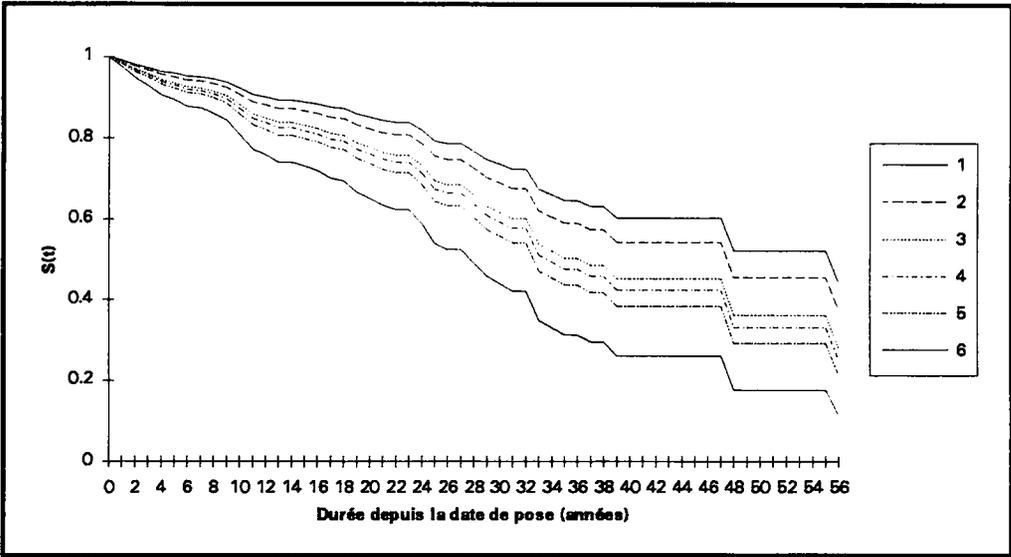


Figure A19 : Courbes de probabilité de non-défaillance (1^{ère} défaillance, Bas-Rhin)

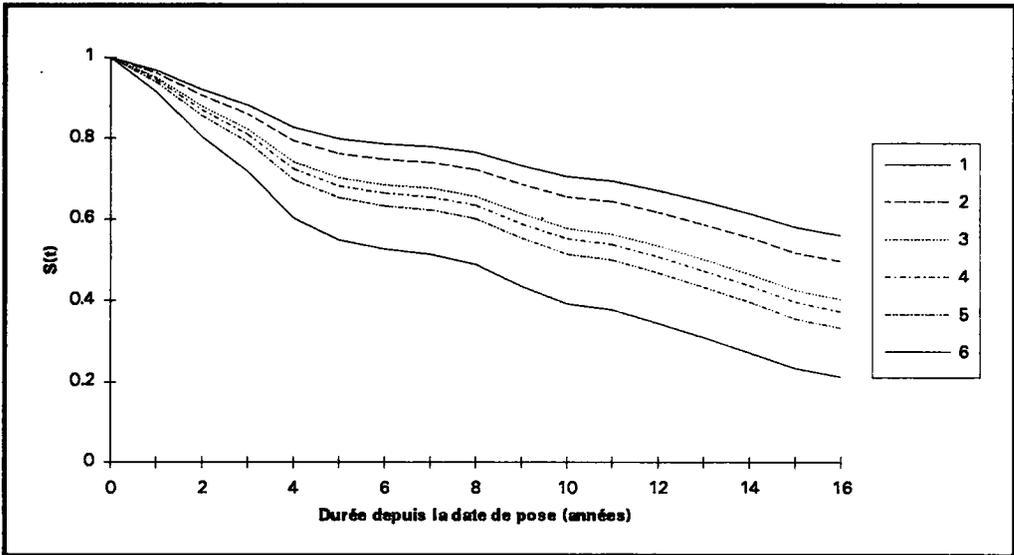


Figure A20 : Courbes de probabilité de non-défaillance (2^{ème} défaillance et +, Bas-Rhin)

Courbes de probabilité de non-défaillances (Modèle de Weibull stratifié)

Légende des conduites (LED-Bordeaux et CEB) :

1 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 250, posée après 1966, dans un sol non-corrosif et dans une rue à trafic faible ou sous-trottoir

2 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 150, posée après 1966, dans un sol non-corrosif et dans une rue à trafic faible ou sous-trottoir

3 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 150, avant 1966, dans un sol non-corrosif et dans une rue à trafic faible ou sous-trottoir

4 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 150, avant 1966 , dans un sol corrosif et dans une rue à trafic faible ou sous-trottoir

5 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 150, avant 1966 , dans un sol corrosif et dans une rue à trafic fort et sous chaussée

6 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 60, avant 1966 , dans un sol corrosif et dans une rue à trafic fort et sous chaussée

Légende des conduites (Bas-Rhin) :

1 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 250, dans une rue à trafic fort

2 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 150, dans une rue à trafic fort

3 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 250, dans une rue à trafic faible

4 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 60, dans une rue à trafic fort

5 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 150, dans une rue à trafic faible

6 : Conduite de 500 m de long, de diamètre 60, dans une rue à trafic faible

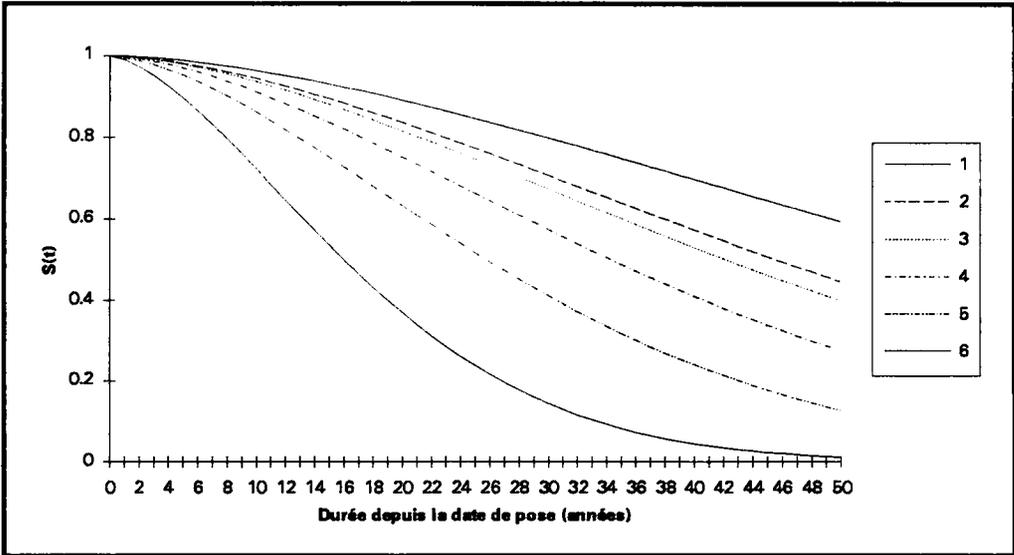


Figure A21 : Courbes de probabilité de non-défaillance (1^{ère} défaillance, LED-Bordeaux)

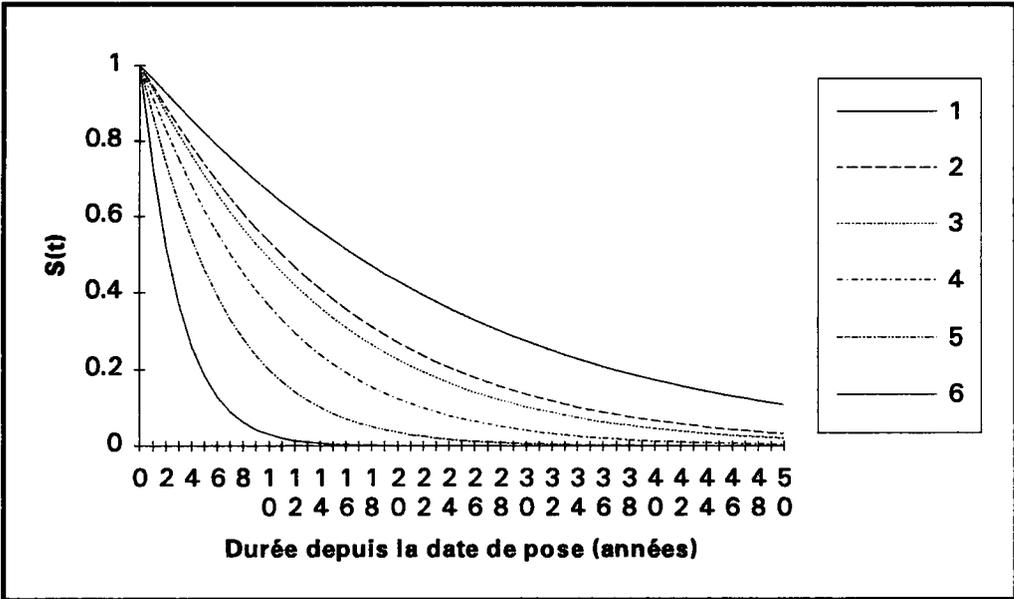


Figure A22 : Courbes de probabilité de non-défaillance (2 à 4^{ème} défaillance, LED-Bordeaux)

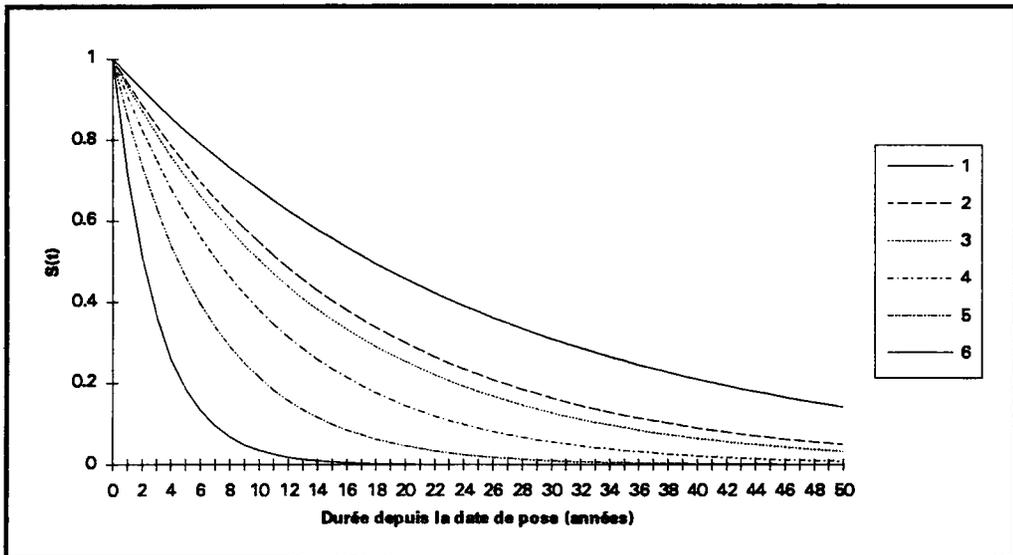


Figure A23 : Courbes de probabilité de non-défaillance (5^{ème} défaillance et +, LED-Bordeaux)

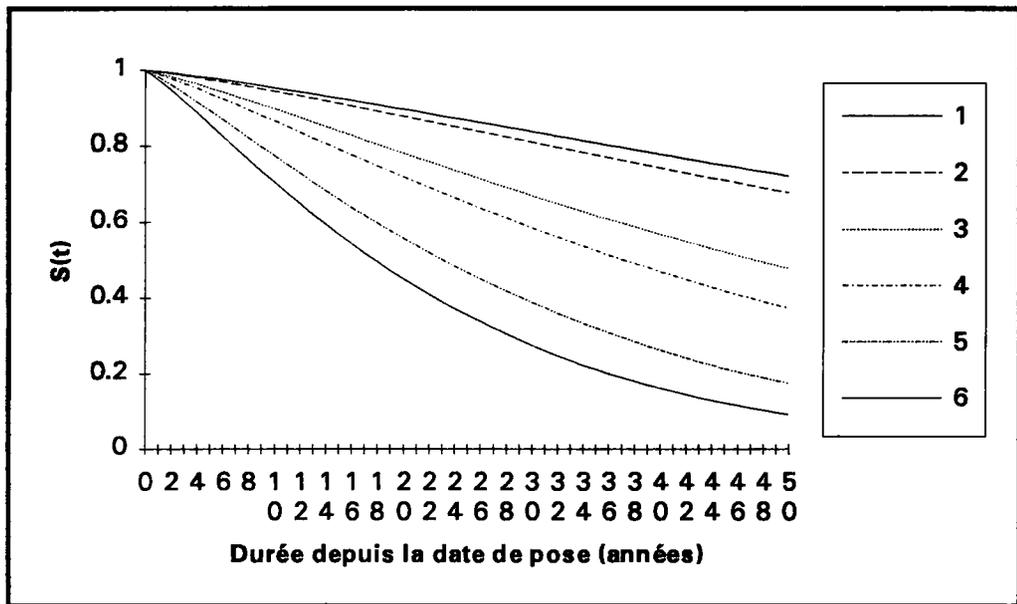


Figure A24 : Courbes de probabilité de non-défaillance (1^{ère} défaillance, CEB)

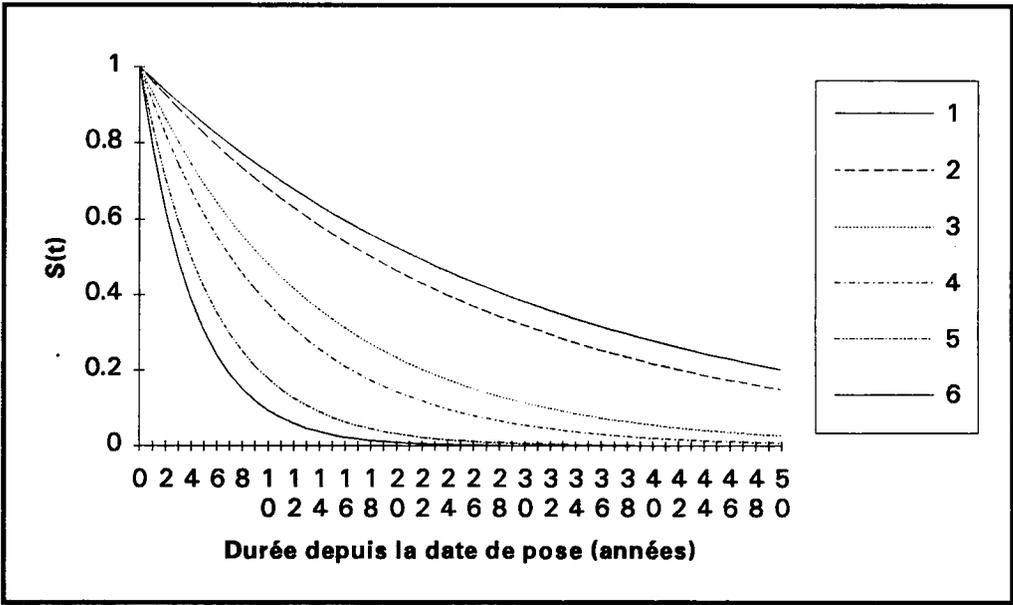


Figure A25 : Courbes de probabilité de non-défaillance (2 à 4^{ème} défaillance, CEB)

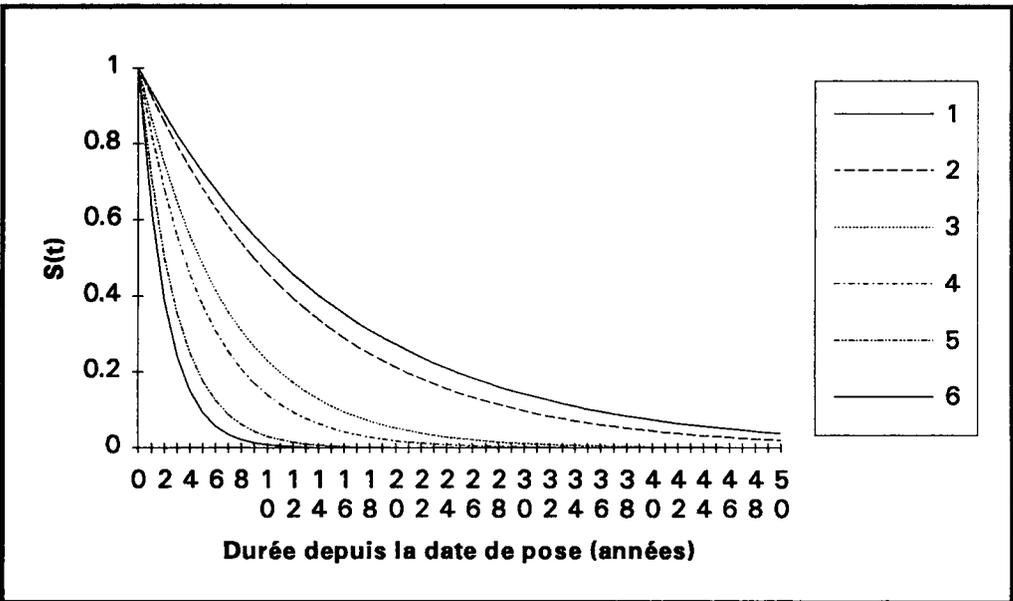


Figure A26 : Courbes de probabilité de non-défaillance (5^{ème} défaillance et +, CEB)

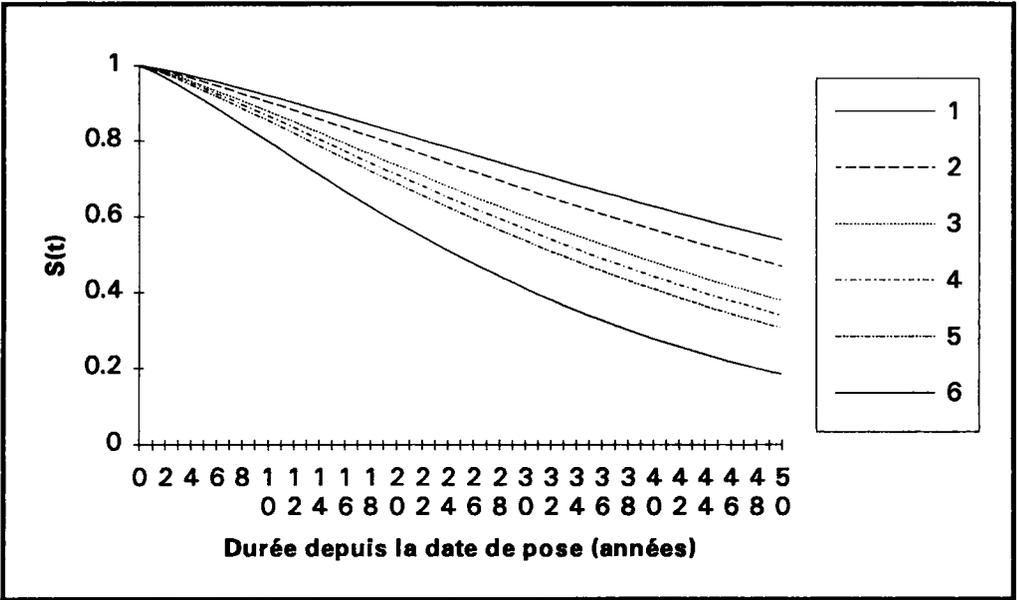


Figure A27 : Courbes de probabilité de non-défaillance (1^{ère} défaillance, Bas-Rhin)

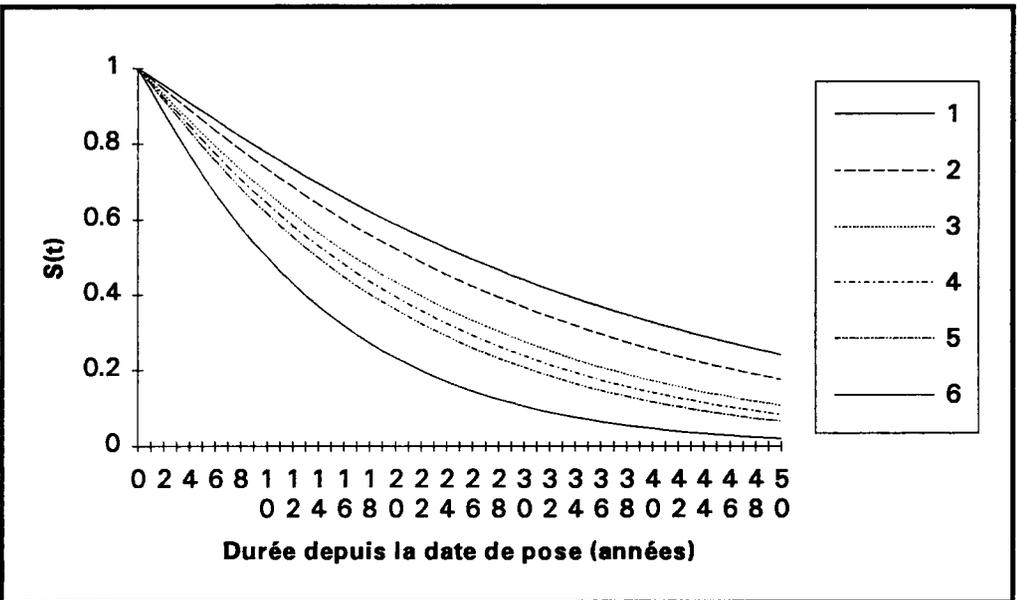


Figure A28 : Courbes de probabilité de non-défaillance (2^{ème} défaillance et +, Bas-Rhin)

Annexe 6

Calcul de l'espérance du nombre de défaillances

Le nombre de défaillances théorique est estimé à partir de l'espérance de défaillance. La formule générale de l'espérance mathématique est :

$$E(N(t)) = \sum_{k=0}^{\infty} k P(N(t) = k),$$

$P(N(t)=k)$ étant la probabilité pour que k défaillances aient eu lieu au temps t .

Calculons tout d'abord $P(N(t)=k)$. Soit A_k l'événement "avoir k défaillances entre 0 et t ", $d_i(t_j)$ l'événement "avoir une i -ième défaillance au temps t_j " et $\bar{d}_i(t_j)$ l'événement "ne pas avoir de i -ième défaillance entre t_j et t " (Cf. Figure 29). On a alors :

$$A_k \equiv (d_1(t_1) \cap d_2(t_2) \cap \dots \cap d_k(t_k) \cap \bar{d}_{k+1}(t_{k+1})),$$

avec t_1 variant de 0 à t , t_2 de t_1 à t , t_3 de t_2 à t , ..., t_k de t_{k-1} à t .

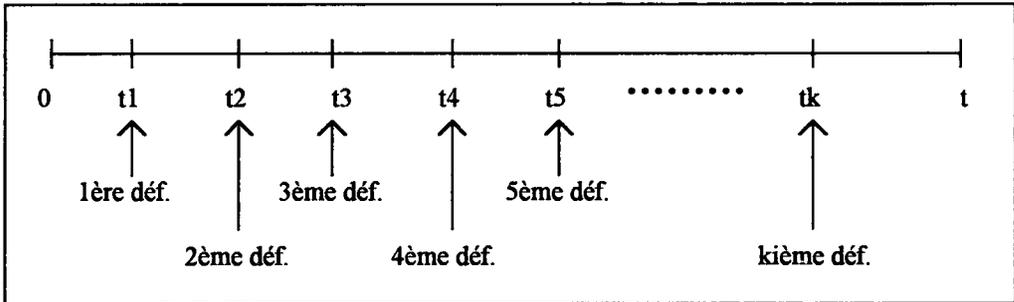


Figure 29 : Répartition de k défaillances entre 0 et t .

$$P(N(t) = k) = P(A_k) = P[d_1(t_1) \cap d_2(t_2) \cap \dots \cap d_k(t_k) \cap \bar{d}_{k+1}(t_{k+1})]_{t_1:0 \rightarrow t, t_2:t_1 \rightarrow t, t_3:t_2 \rightarrow t, \dots, t_k:t_{k-1} \rightarrow t}$$

Par la formule de Bayes, on a :

$$P(N(t) = k) = \left[\begin{array}{l} P[d_1(t_1) \cap d_2(t_2) \cap \dots \cap d_k(t_k)] \\ \times P[\bar{d}_{k+1}(t_{k+1}) / d_1(t_1) \cap d_2(t_2) \cap \dots \cap d_k(t_k)] \end{array} \right]_{t_1:0 \rightarrow t, t_2:t_1 \rightarrow t, \dots, t_k:t_{k-1} \rightarrow t}$$

d'où en considérant que $d_1(t_1) \cap d_2(t_2) \cap \dots \cap d_k(t_k) \equiv d_k(t_k)$,

$$P(N(t) = k) = \left[P[d_1(t_1) \cap d_2(t_2) \cap \dots \cap d_k(t_k)] \times P[\bar{d}_{k+1}(t_{k+1}) / d_k(t_k)] \right]_{t_1:0 \rightarrow t, t_2:t_1 \rightarrow t, \dots, t_k:t_{k-1} \rightarrow t}$$

$$\text{et } P(N(t) = k) = \left[\begin{array}{l} P[d_1(t_1) \cap d_2(t_2) \cap \dots \cap d_{k-1}(t_{k-1})] \\ \times P[d_k(t_k)/d_{k-1}(t_{k-1})] \times P[\bar{d}_{k+1}(t_k)/d_k(t_k)] \end{array} \right]_{t_1:0 \rightarrow t, t_2:t_1 \rightarrow t, \dots, t_k:t_{k-1} \rightarrow t}$$

On a donc :

$$P(N(t) = k) = \left[\begin{array}{l} P[d_1(t_1)] \times P[d_2(t_2)/d_1(t_1)] \\ \times P[d_{k-1}(t_{k-1})/d_{k-2}(t_{k-2})] \times P[d_k(t_k)/d_{k-1}(t_{k-1})] \times P[\bar{d}_{k+1}(t_k)/d_k(t_k)] \end{array} \right]_{t_1:0 \rightarrow t, t_2:t_1 \rightarrow t, \dots, t_k:t_{k-1} \rightarrow t}$$

$$\text{Or } P[d_1(t_1)] = f_1(t_1), P[d_{i+1}(t_{i+1})/d_i(t_i)] = f_{i+1}(t_{i+1} - t_i), P[\bar{d}_{k+1}(t_k)/d_k(t_k)] = S_{k+1}(t - t_{k+1})$$

où f_i est la fonction de densité de l'apparition de la i -ième défaillance et S_j la probabilité de non-défaillance concernant la i -ième défaillance.

On aura donc :

$$P(N(t) = k) = \int_0^t f_1(t_1) \int_{t_1}^t f_2(t_2 - t_1) \dots \int_{t_{k-2}}^t f_{k-1}(t_{k-1} - t_{k-2}) \int_{t_{k-1}}^t f_k(t_k - t_{k-1}) S_{k+1}(t - t_k) dt_k dt_{k-1} \dots dt_2 dt_1$$

L'espérance sera égale à :

$$E(N(t)) = \sum_{k=0}^{\infty} k \left[\int_0^t f_1(t_1) \int_{t_1}^t f_2(t_2 - t_1) \dots \int_{t_{k-2}}^t f_{k-1}(t_{k-1} - t_{k-2}) \int_{t_{k-1}}^t f_k(t_k - t_{k-1}) S_{k+1}(t - t_k) dt_k dt_{k-1} \dots dt_2 dt_1 \right]$$

Si le modèle utilisé est un modèle de Cox (pas de temps discrets), cette espérance devient :

$$E(N(t)) = \sum_{k=0}^{\infty} k \left[\sum_{t_1=0}^t f_1(t_1) \sum_{t_2=t_1}^t f_2(t_2 - t_1) \dots \sum_{t_{k-1}=t_{k-2}}^t f_{k-1}(t_{k-1} - t_{k-2}) \sum_{t_k=t_{k-1}}^t f_k(t_k - t_{k-1}) S_{k+1}(t - t_k) \right]$$

On utilise un modèle de Weibull pour la 1ère défaillance, puis pour les 2 à 4ème et ensuite un modèle exponentiel à partir de la 5ème. La partie de l'intégrale concernant le modèle exponentiel pourra être simplifiée. Elle sera égale à :

$$A_{\text{exp}} = \int_{t_4}^t \int_{t_5}^t \dots \int_{t_{k-1}}^t \lambda_3^* \exp[-\lambda_3^*(t_5 - t_4)] \lambda_3^* \exp[-\lambda_3^*(t_6 - t_5)] \dots \lambda_3^* \exp[-\lambda_3^*(t_{k-1} - t_{k-2})] \lambda_3^* \exp[-\lambda_3^*(t_k - t_{k-1})] \exp[-\lambda_3^*(t - t_k)] dt_k dt_{k-1} \dots dt_6 dt_5$$

où $\lambda_3^* = \lambda_3 \times e^{\beta z}$, λ_3 étant la fonction de risque de base du modèle exponentiel.

$$A_{\text{exp}} = \lambda_3^{*(k-4)} \int_{t_4}^t \int_{t_5}^t \dots \int_{t_{k-1}}^t \exp[-\lambda_3^*(t - t_4)] dt_k dt_{k-1} \dots dt_6 dt_5$$

d'où :

$$A_{\text{exp}} = \lambda_3^{*(k-4)} \exp[-\lambda_3^*(t-t_4)] \frac{(t-t_4)^{k-4}}{(k-4)!}.$$

Si l'on partage l'espérance de la manière suivante :

$$E(N(t)) = \sum_{k=1}^4 kP(N(t) = k) + \sum_{k=5}^{\infty} kP(N(t) = k),$$

la deuxième partie peut se simplifier. En effet on a :

$$\sum_{k=5}^{\infty} kP(N(t) = k) = \sum_{k=5}^{\infty} k \left[\int_0^t \int_{t_1}^t \dots \int_{t_3}^t f_1^*(t_1) f_2^*(t_2 - t_1) f_2^*(t_3 - t_2) f_2^*(t_4 - t_3) \left[\frac{[\lambda_3^*(t-t_4)]^{k-4}}{(k-4)!} \exp[-\lambda_3^*(t-t_4)] \right] dt_4 dt_3 dt_2 dt_1 \right]$$

f_1^* étant la densité du modèle du $i^{\text{ème}}$ groupe de défaillance.

$$\begin{aligned} \sum_{k=5}^{\infty} kP(N(t) = k) &= \int_0^t \int_{t_1}^t \dots \int_{t_3}^t f_1^*(t_1) f_2^*(t_2 - t_1) f_2^*(t_3 - t_2) f_2^*(t_4 - t_3) \sum_{k=5}^{\infty} k \left[\frac{[\lambda_3^*(t-t_4)]^{k-4}}{(k-4)!} \exp[-\lambda_3^*(t-t_4)] \right] dt_4 dt_3 dt_2 dt_1 \\ &= \sum_{k=5}^{\infty} k \left[\frac{[\lambda_3^*(t-t_4)]^{k-4}}{(k-4)!} \right] = \sum_{i=0}^{\infty} (i+5) \left[\frac{[\lambda_3^*(t-t_4)]^{i+1}}{(i+1)!} \right] \\ &= \sum_{k=5}^{\infty} k \left[\frac{[\lambda_3^*(t-t_4)]^{k-4}}{(k-4)!} \right] = \sum_{i=0}^{\infty} (i+1) \left[\frac{[\lambda_3^*(t-t_4)]^{i+1}}{(i+1)!} \right] + 4 \sum_{i=0}^{\infty} \left[\frac{[\lambda_3^*(t-t_4)]^{i+1}}{(i+1)!} \right] \\ &= \sum_{k=5}^{\infty} k \left[\frac{[\lambda_3^*(t-t_4)]^{k-4}}{(k-4)!} \right] = 4 \left[\exp(\lambda_3^*(t-t_4)) - 1 \right] + \lambda_3^*(t-t_4) \exp(\lambda_3^*(t-t_4)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=5}^{\infty} kP(N(t) = k) &= \int_0^t \int_{t_1}^t \dots \int_{t_3}^t f_1^*(t_1) f_2^*(t_2 - t_1) f_2^*(t_3 - t_2) f_2^*(t_4 - t_3) \left[4 \times (1 - \exp[-\lambda_3^*(t-t_4)]) + \lambda_3^*(t-t_4) \right] dt_4 dt_3 dt_2 dt_1 \end{aligned}$$

Si maintenant on connaît de la conduite une partie de son passé, à savoir le nombre de défaillances et leurs dates d'apparition jusqu'à un temps t_d (Cf. figure 30). L'espérance à calculer sera alors différente de la précédente, puisqu'elle tiendra compte de la date de dernière défaillance ainsi que de la durée depuis cette dernière défaillance.

On aura alors 5 espérances conditionnelles possibles selon le nombre de défaillances subies.

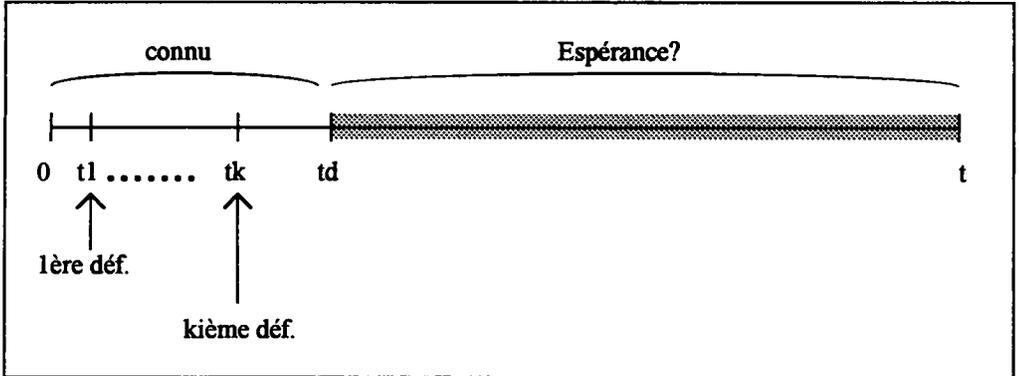


Figure 30 : Espérance conditionnelle de défaillance à partir de t_d à la suite de k défaillances.

Si aucune défaillance n'a eu lieu, l'espérance sera :

$$E(N(t)) = \sum_{k=1}^4 kP(N(t) = k) + \int_{t_d}^t \dots \int_{t_3}^t \frac{f_1^*(t_1)}{S_1^*(t_d)} f_2^*(t_2 - t_1) f_2^*(t_3 - t_2) f_2^*(t_4 - t_3) \left[4 \times \left(1 - \exp[-\lambda_3^*(t - t_4)] \right) + \lambda_3^*(t - t_4) \right] dt_4 dt_3 dt_2 dt_1$$

Si une défaillance a eu lieu en t_1 , l'espérance sera :

$$E(N(t)) = \sum_{k=1}^3 kP(N(t) = k) + \int_{t_d}^t \int_{t_2}^t \int_{t_3}^t \frac{f_2^*(t_2 - t_1)}{S_2^*(t_d - t_1)} f_2^*(t_3 - t_2) f_2^*(t_4 - t_3) \left[3 \times \left(1 - \exp[-\lambda_3^*(t - t_4)] \right) + \lambda_3^*(t - t_4) \right] dt_4 dt_3 dt_2$$

Si deux défaillances ont eu lieu en t_1 et t_2 , l'espérance sera :

$$E(N(t)) = \sum_{k=1}^2 kP(N(t) = k) + \int_{t_d}^t \int_{t_3}^t \frac{f_2^*(t_3 - t_2)}{S_2^*(t_d - t_2)} f_2^*(t_4 - t_3) \left[2 \times \left(1 - \exp[-\lambda_3^*(t - t_4)] \right) + \lambda_3^*(t - t_4) \right] dt_4 dt_3$$

Si trois défaillances ont eu lieu en t_1 , t_2 et t_3 , l'espérance sera :

$$E(N(t)) = P(N(t) = 1) + \int_{t_d}^t \frac{f_2^*(t_4 - t_3)}{S_2^*(t_d - t_3)} \left[1 - \exp[-\lambda_3^*(t - t_4)] + \lambda_3^*(t - t_4) \right] dt_4$$

Si quatre défaillances ont eu lieu en t_1 , t_2 , t_3 et t_4 l'espérance sera :

$$E(N(t)) = \lambda_3^*(t - t_d).$$

Listing du programme de calcul de l'espérance (Turbo Pascal)

Program ndeft;

```
var chaine :string;
var g,e7,som1,som2,som3,som4,sominf,a1,a2,a3,a4,ainf :real;
var tf1,tf2,tf3,tf4,z3 :real;
var code,r,tv,td,valid,nbdef,nid,an,z1,z2,z4,z5,z6,t,ndef,i,j1,j2,j3,j4 :integer;
var rep,car :char;
type texte=text;
var result,donnees :texte;
type tableau=array[1..6,0..50] of real;
var tf :tableau;
```

```
const l1=0.0301;
```

```
  p1=1.6521;
  l2=0.1497;
  p2=1.0626;
  l3=0.1345;
  p3=1;
  b1=0.58;
  b2=-0.87;
  b3=0.37;
  b4=0.49;
  b5=-0.10;
```

```
function pw(x,n :real) :real;
```

```
  begin
  if x=0
  then pw :=0
  else
  pw :=exp(n*ln(x));
  end;
```

```
function f1(x :real) :real;
```

```
  begin
  if x=0
  then f1 :=0
  else
  f1 :=l1*p1*pw(x*l1,p1-1)*g*exp(-pw(x*l1,p1)*g);
```

end;

```
function f2(x :real) :real;  
begin  
  if x=0  
    then f2 :=0  
  else  
    f2 :=l2*p2*pw(x*l2,p2-1)*g*exp(-pw(x*l2,p2)*g);  
  end;
```

```
function S1(x :real) :real;  
begin  
  if x=0  
    then S1 :=1  
  else  
    S1 :=exp(-pw((x-1)*l1,p1)*g);  
  end;
```

```
function S2(x :real) :real;  
begin  
  if x=0  
    then S2 :=1  
  else  
    S2 :=exp(-pw((x-1)*l2,p2)*g);  
  end;
```

```
function S3(x :real) :real;  
begin  
  if x=0  
    then S3 :=1  
  else  
    S3 :=exp(-pw((x-1)*l3,p3)*g);  
  end;
```

```
function finf(x :real) :real;  
begin  
  if x=0  
    then finf :=0  
  else  
    finf :=4*(1-exp(-g*l3*(x-1)))+g*l3*(x-1);  
  end;
```

```
procedure prepdon;  
begin  
  for i :=0 to 50  
  do  
    begin  
      tf[1,i] :=f1(i);  
      tf[2,i] :=f2(i);  
      tf[3,i] :=finf(i);
```



```

end;
end;
end;
end;
end;
e7 :=som1+2*som2+3*som3+(4*som4+sominf);
end;

```

```

begin
r :=0;
assign(donnees,'DATAbx90.TXT');
reset(donnees);
assign(result,'RESULbx90.TXT');
rewrite(result);
repeat
  chaine :=";
  repeat
    read(donnees,car);
    if car<>',' then chaine :=chaine+car;
  until car=',';
  val(chaine,nid,code);
  chaine :=";
  repeat
    read(donnees,car);
    if car<>',' then chaine :=chaine+car;
  until car=',';
  val(chaine,Z1,code);
  chaine :=";
  repeat
    read(donnees,car);
    if car<>',' then chaine :=chaine+car;
  until car=',';
  val(chaine,Z2,code);
  chaine :=";
  repeat
    read(donnees,car);
    if car<>',' then chaine :=chaine+car;
  until car=',';
  val(chaine,Z3,code);
  chaine :=";
  repeat
    read(donnees,car);
    if car<>',' then chaine :=chaine+car;
  until car=',';
  val(chaine,Z4,code);
  chaine :=";
  repeat
    read(donnees,car);
    if car<>',' then chaine :=chaine+car;
  until car=',';
  val(chaine,Z5,code);

```

```

chaîne :=";
repeat
  read(donnees,car);
  if (car<>',' ) and (car<>#13) then chaîne :=chaîne+car;
until (car=',') or (car=#13);
val(chaîne,valid,code);
chaîne :=";
g :=exp(ln(z1/500)*b1+ln(z2/60)*b2+z3*b3+z4*b4+z5*b5);
tv :=90-valid;
td :=0;
prepdon;
calcul1;
r :=r+1;
writeln(r);
writeln(result,nid,',',z2,',',z1,',',e7);
read(donnees,car);
until eof(donnees);
close(donnees);
close(result);
end.

```

Histogrammes de comparaison défaillances prévues-défaillances réelles (prévision sur 10 ans)

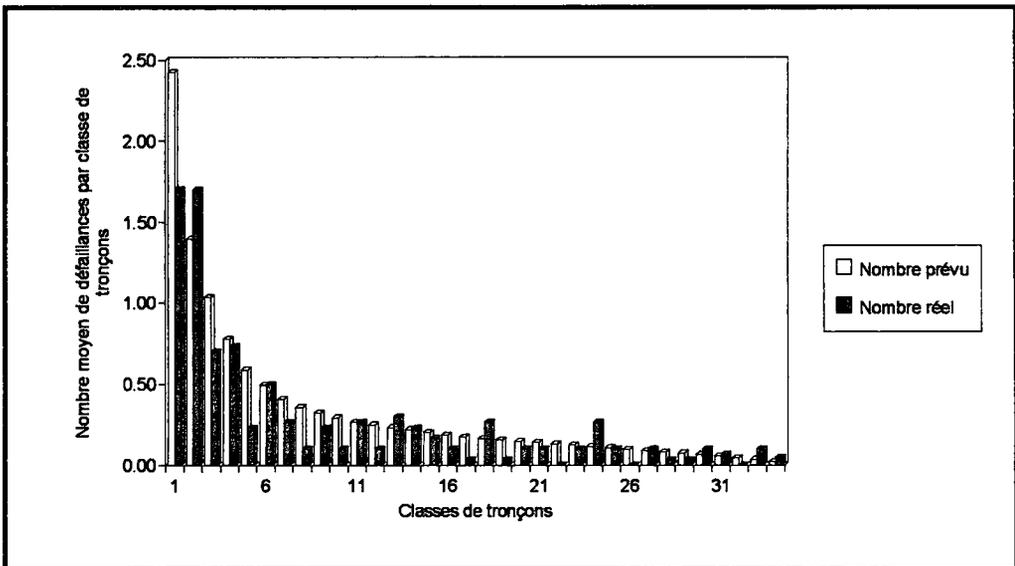


Figure 31 : Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (Prévision sur 10 ans, hypothèse de stratification, sans facteur vieillissement).

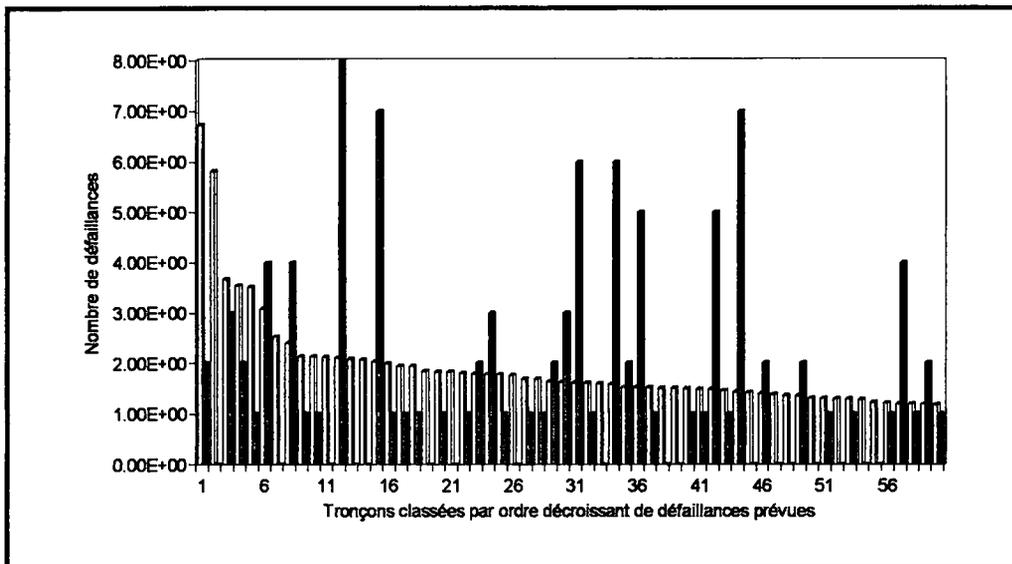


Figure 32 : Comparaison des nombres de défaillances sur les 60 premières conduites (Prévision sur dix ans, hypothèse de stratification, sans facteur "vieillesse")

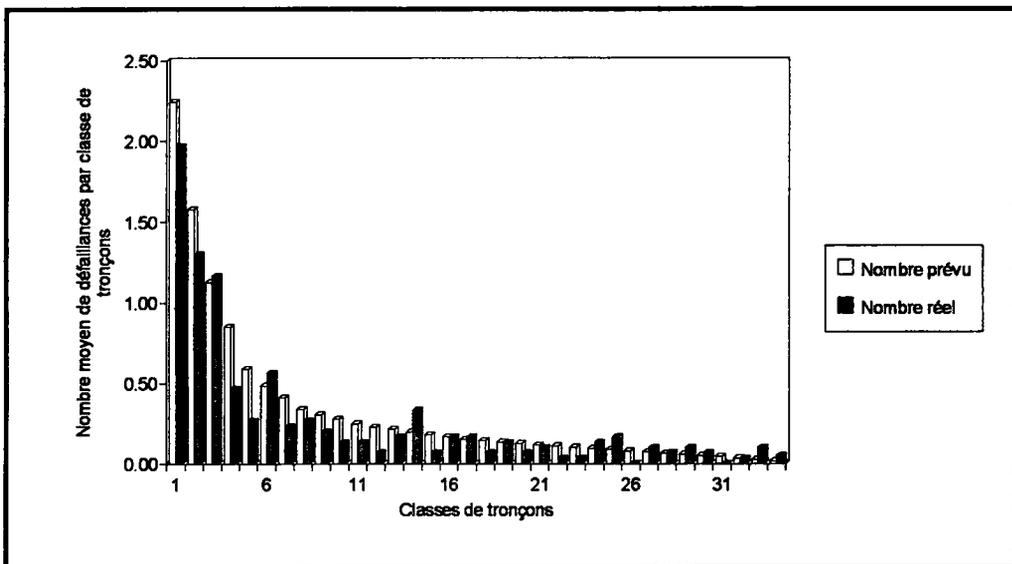


Figure 33 : Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (Prévision sur 10 ans, hypothèse de non-stratification, sans facteur vieillissement).

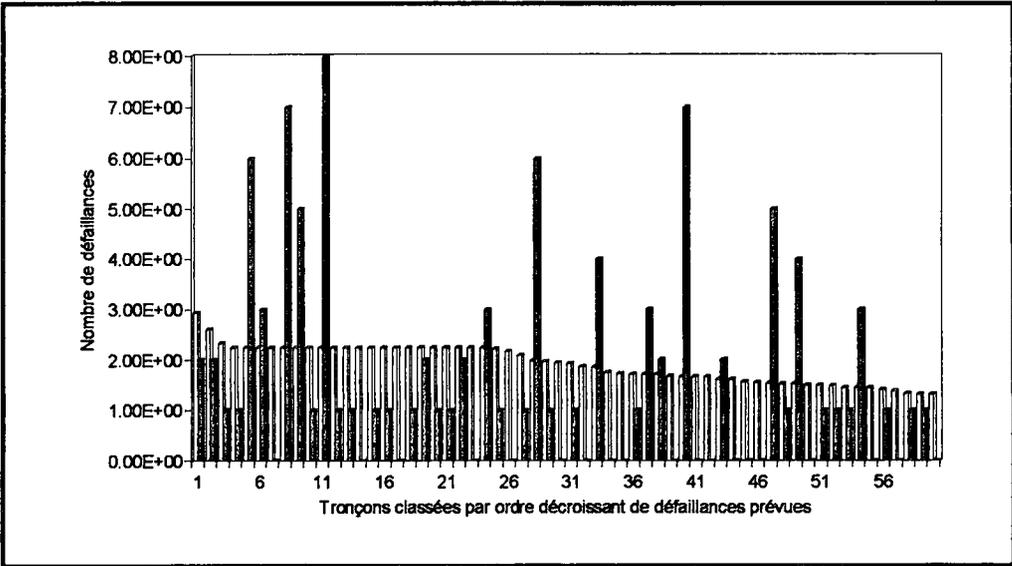


Figure 34 : Comparaison des nombres de défaillances sur les 60 premières conduites (Prévision sur dix ans, hypothèse de non-stratification, sans facteur "vieillessement")

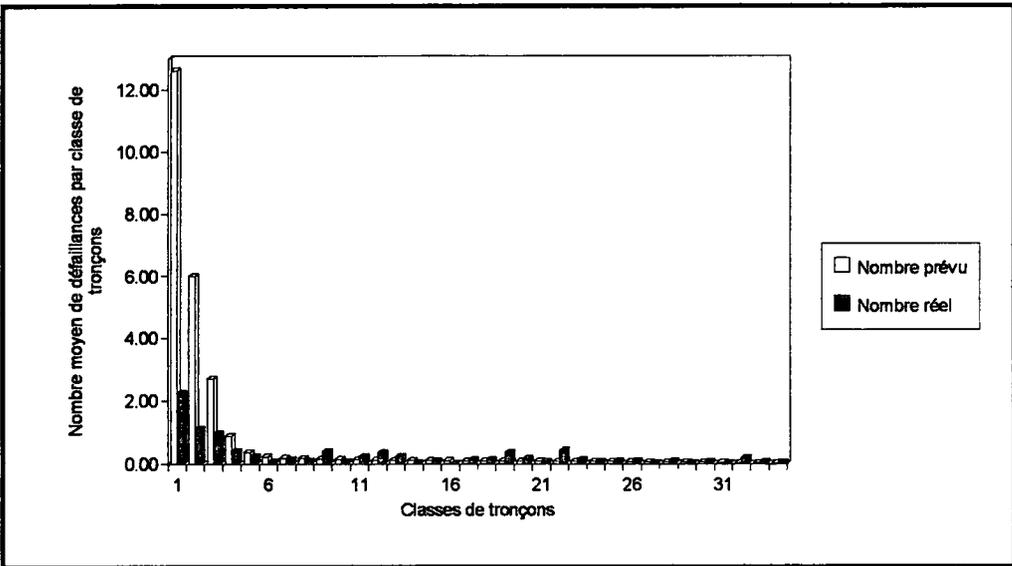


Figure 35 : Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (Prévision sur 10 ans, hypothèse de stratification, avec facteur vieillissement).

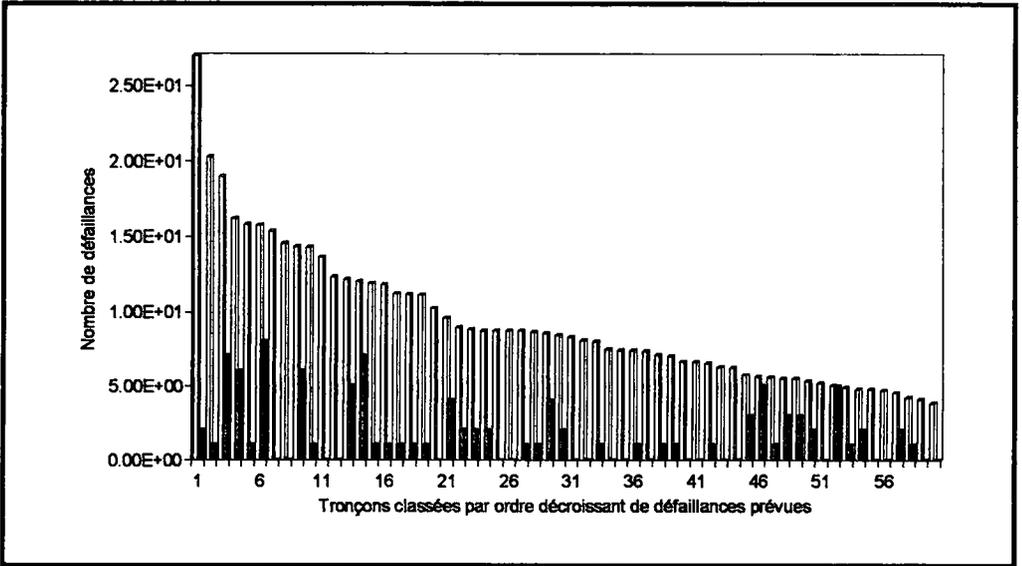


Figure 36 : Comparaison des nombres de défaillances sur les 60 premières conduites (Prévision sur dix ans, hypothèse de stratification, avec facteur "vieillesse")

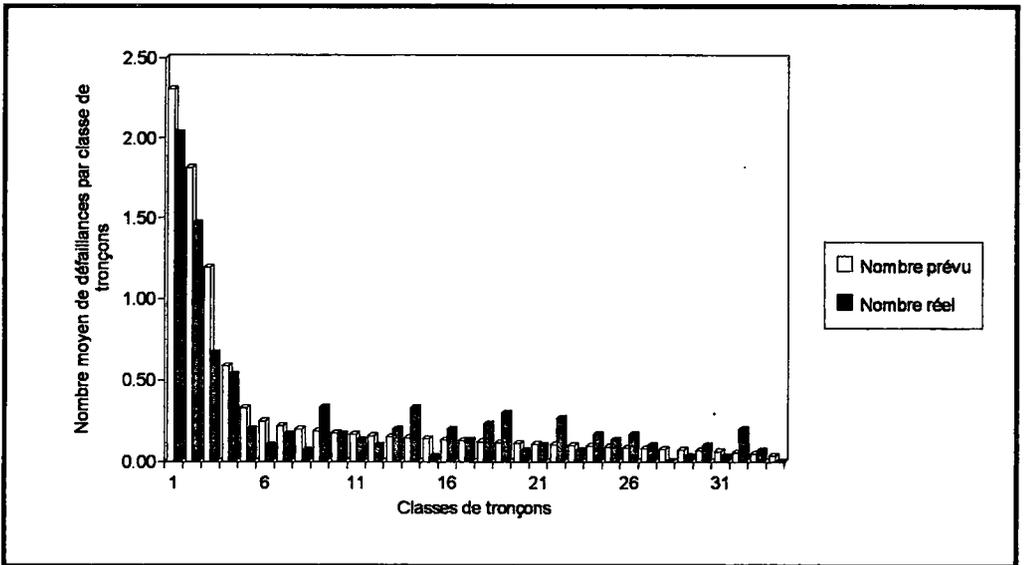


Figure 37 : Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (Prévision sur 10 ans, hypothèse de non-stratification, avec facteur vieillissement).

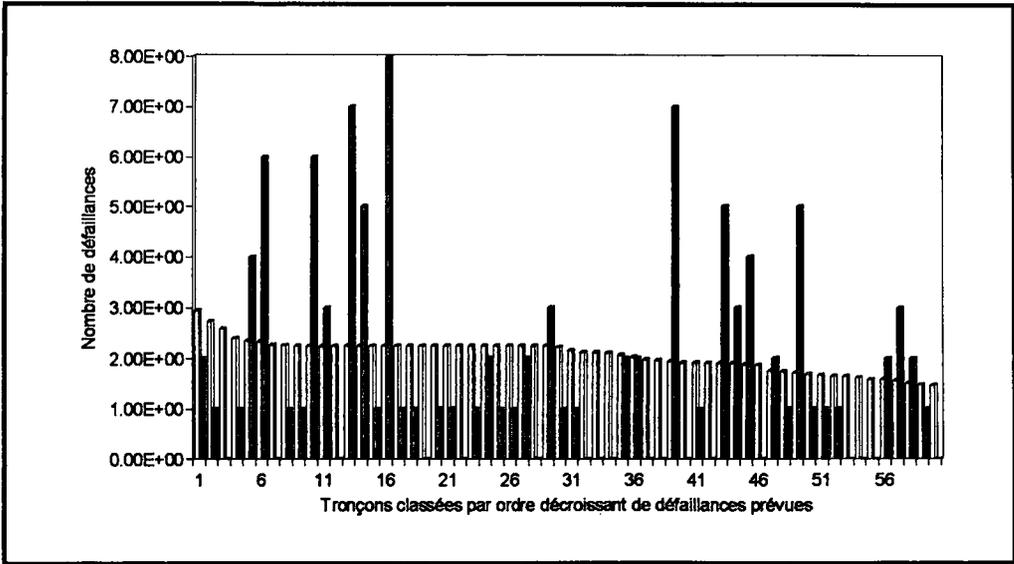


Figure 38 : Comparaison des nombres de défaillances sur les 60 premières conduites (Prévision sur dix ans, hypothèse de non-stratification, avec facteur "vieillessement")

Annexe 7

Calcul de la longueur équivalente

Supposons que l'on a une classe de k conduites de mêmes caractéristiques exceptées, chaque conduite ayant une longueur différente l_i . La longueur équivalente l_{eq} correspondra à la longueur commune de k conduites de mêmes caractéristiques que les conduites précédentes et dont la somme des risques de défaillance sera égale à la somme des risques des k conduites de longueur différente.

On aura donc :

$$\forall t, k \times h(t, l_{eq}) = \sum_{i=1}^k h(t, l_i)$$

d'où :

$$\forall t, k \times h_0(t) \times \exp\left(\sum_{j \neq \text{longueur}} \beta_j z_j\right) \times \exp(\beta_l \ln(l_{eq})) = \sum_{i=1}^k h_0(t) \times \exp\left(\sum_{j \neq \text{longueur}} \beta_j z_j\right) \times \exp(\beta_l \ln(l_i))$$

$$\forall t, \exp(\beta_l \ln(l_{eq})) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \exp(\beta_l \ln(l_i))$$

La longueur équivalente sera donc égale à :

$$l_{eq} = \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \exp(\beta_l l_i) \right]^{\frac{1}{\beta_l}}$$

Calcul du temps de défaillance rapporté à la longueur réelle

Le tirage faisant suite à la méthode d'anamorphose permet de définir les conduites défaillantes ainsi que leur date de défaillance. Les temps de défaillances t_i sont déterminés pour une conduite de longueur égale à la longueur équivalente de la classe. Il convient donc de recalculer le temps de défaillance t'_i en fonction de la longueur de la conduite concernée.

Le temps t'_i est tel que :

$$H_{CEB}(t'_i, l_i) = H_{CEB}(t_i, l_{eq})$$

soit :

$$(\lambda_i')^P \exp[\beta_i \ln(l_i)] = (\lambda_i)^P \exp[\beta_i \ln(l_{eq})].$$

On aura donc :

$$t_i' = t_i \exp\left[\beta_i \ln\left(\frac{l_{eq}}{l_i}\right)\right]$$

Liste des figures

| | Pages |
|--|-------|
| Figure 1 : Démarche employée dans le cadre de l'approche curative [O'day et al., 1989] | 22 |
| Figure 2 : Démarche employée dans le cadre de l'approche prédictive [O'day et al., 1989] | 24 |
| Figure 3 : Taux de défaillance annuel par unité de longueur (données LED-Bordeaux, 1991) [Eisenbeis, 1991] | 28 |
| Figure 4 : Différents types de ruptures des conduites d'eau potable [O'day et al., 1989] | 34 |
| Figure 5 : Fréquence des types de ruptures en fonction du diamètre [O'day et al., 1989] | 34 |
| Figure 6 : Répartition des fuites sur tuyau et sur joint en fonction du diamètre (d'après les données recueillies sur la LED-Bordeaux) [Eisenbeis, 1991] | 35 |
| Figure 7 : Contraintes subies par une conduite d'eau potable [Moruzzi, 1984] | 35 |
| Figure 8 : Causes de l'affaiblissement d'une conduite d'eau potable [O'day et al., 1989] | 37 |
| Figure 9 : Courbe présentant le modèle physique de Vancouver [O'day et al., 1989] | 40 |
| Figure 10 : Exemples de courbes de survie de conduites d'eau potable (New Haven) [Andreou et al., 1987] | 46 |
| Figure 11 : Exemple de fiches de maintenance (LED-Bordeaux) | 67 |
| Figure 12 : Répartition des conduites par année de pose par service | 71 |
| Figure 13 : Répartition des diamètres étudiés sur les trois services | 73 |
| Figure 14 : Proportion des conduites selon le nombre de défaillances subies | 73 |
| Figure 15 : Répartition des défaillances en fonction du mois | 74 |
| Figure 16 : Description de la spécificité des données | 75 |
| Figure 17 : Distinction des canalisations en individus (ndef correspond au nombre de défaillance). | 82 |
| Figure 18 : Exemple de courbe de survie. | 83 |
| Figure 19 : Fonction de risque chez l'Homme | 84 |
| Figure 20 : Fonction de risque (chômage) | 84 |
| Figure 21 : Fonction de risque, densité et fonction de survie du modèle exponentiel | 85 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figure 22 : | Fonctions de risque du modèle de Weibull. | 86 |
| Figure 23 : | Outils probabilistes en analyse de données de survie | 88 |
| Figure 24 : | Définition des "individus" vis-à-vis des tronçons de canalisations | 97 |
| Figure 25 : | Ecart moyen entre deux défaillances | 103 |
| Figure 26 : | Fonction $\ln(H(t))$ pour chacun des groupes de défaillance | 104 |
| Figure 27 : | Vérification de l'hypothèse de proportionnalité des risques pour le facteur Trafic-Chaussée. | 105 |
| Figure 28 : | Courbes de probabilité de non-défaillance (1 ^{ère} défaillance) avec intervalle de confiance à 95 % pour une conduite de 500 m de long, de diamètre 100, posée après 1975, dans un sol corrosif, dans une rue à trafic fort et sous chaussée. | 108 |
| Figure 29 : | Courbes de probabilité de non-défaillance (1 ^{ère} défaillance) avec intervalle de confiance à 95 % pour une conduite de 500 m de long, de diamètre 100, posée avant 1966 (fonte grise), dans un sol corrosif et dans une rue à trafic faible ou sous trottoir. | 109 |
| Figure 30 : | Risque de défaillance (Modèle de Cox, LED-Bordeaux) | 109 |
| Figure 31 : | Courbes des risques de défaillance selon les groupes de défaillances (LED-Bordeaux) | 110 |
| Figure 32 : | Courbe de probabilité de non-défaillance (1 ^{ère} défaillance d'une conduite de 150 mm, de 500 m de long, posée avant 1975, dans un sol corrosif, dans une rue à trafic élevé et sous chaussée) | 111 |
| Figure 33 : | Courbe de probabilité de non-défaillance (2 à 4 ^{ème} défaillance d'une conduite de 60 mm, de 500 m de long, posée avant 1966 (fonte grise), dans un sol corrosif, dans une rue à trafic fort, sous chaussée) | 111 |
| Figure 34 : | Evolution du paramètre β_1 en fonction de la longueur maximale des tronçons de l'échantillon initial. | 113 |
| Figure 35 : | Valeurs des coefficients β_1 en fonction de la longueur maximale des tronçons de l'échantillon élargi. | 115 |
| Figure 36 : | Fonctions de risque de base pour la première défaillance. | 121 |
| Figure 37 : | Fonctions de risque de base pour les 2 à 4 ^{èmes} défaillances (2 ^{ème} et + pour le Bas-Rhin). | 122 |
| Figure 38 : | Fonctions de risque de base pour les 5 ^{èmes} défaillances et +. | 122 |
| Figure 39 : | Création d'un modèle sur un service à historique faible. | 125 |
| Figure 40 : | Répartition de k défaillances entre 0 et t. | 129 |
| Figure 41 : | Espérance de défaillance à partir de t_d à la suite de k défaillances. | 131 |
| Figure 42 : | Démarche utilisée pour la comparaison des défaillances prévues et réelles | 132 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figure 43 : | Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons. | 134 |
| Figure 44 : | Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (Influence différente des facteurs selon le groupe de défaillance). | 135 |
| Figure 45 : | Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (avec facteur "Vieillessement"). | 138 |
| Figure 46 : | Comparaison des nombres de défaillances sur les 90 premières conduites (sans facteur "vieillessement") | 139 |
| Figure 47 : | Comparaison des nombres de défaillances sur les 90 premières conduites (avec facteur "vieillessement") | 140 |
| Figure 48 : | Méthode employée pour la comparaison des défaillances prévues et réelles entre 1983 et 1992 | 141 |
| Figure 49 : | Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (prévision entre 1983 et 1992). | 144 |
| Figure 50 : | Comparaison des nombres de défaillances sur les 60 premières conduites (prévision sur 10 ans) | 145 |
| Figure 51 : | Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (modèle non stratifié avec facteur "vieillessement", prévision entre 1983 et 1992). | 146 |
| Figure 52 : | Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (modèle non stratifié avec facteur "vieillessement", prévision entre 1991 et 1992). | 148 |
| Figure 53 : | Comparaison des nombres de défaillances sur les 90 premières conduites (prévision sur 2 ans) | 149 |
| Figure 54 : | Comparaison des nombres de défaillances sur les 90 premières conduites (prévision entre 1951 et 1990; oubli du facteur trafic-chaussée). | 152 |
| Figure 55 : | Comparaison des nombres de défaillances sur les 90 premières conduites (prévision entre 1951 et 1990; oubli du facteur sol). | 153 |
| Figure 56 : | Description des données du service A. | 158 |
| Figure 57 : | Création d'un modèle à partir des données du service A et du modèle général. | 159 |
| Figure 58 : | Création d'un modèle à partir des données du service A après 1988 et d'un échantillon de défaillances construit à partir du modèle général pour les conduites posées avant 1988. | 160 |
| Figure 59 : | Probabilités de non-défaillance pour une conduite n'ayant pas eu de défaillance, de diamètre 150, dans un sol non-corrosif, sous trottoir ou dans une rue à trafic faible (Apprentissage à partir de l'espérance). | 161 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figure 60 : | Probabilités de non-défaillance pour une conduite n'ayant pas eu de défaillance, de diamètre 100, dans un sol non-corrosif, sous trottoir ou dans une rue à trafic faible (Apprentissage par anamorphose). | 164 |
| Figure 61 : | Probabilités de non-défaillance pour une conduite ayant eu une à trois défaillances, de diamètre 100, dans un sol non-corrosif, sous trottoir ou dans une rue à trafic faible (Apprentissage par anamorphose). | 165 |
| Figure 62 : | Probabilités de non-défaillance pour une conduite ayant eu au moins quatre défaillances, de diamètre 100, dans un sol non-corrosif, sous trottoir ou dans une rue à trafic faible (Apprentissage par anamorphose). | 165 |
| Figure 63 : | Apprentissage année après année pour la création de modèles semi-locaux. | 166 |
| Figure 64 : | Démarche à employer lors de l'élaboration d'un modèle de prévision des défaillances. | 170 |
| Figure 65 : | Exemple de fiche de réparation. | 172 |
| Figure 66 : | Etablissement du fichier en vue du modèle. | 173 |
| Figure 67 : | Utilisation du modèle dans une politique curative de renouvellement | 175 |
| Figure 68 : | Exemple de calcul de la date optimale de renouvellement (Méthode de Shamir et Howard) [Shamir et al., 1979] | 177 |
| Figure 69 : | Recherche de la date optimale de renouvellement (Rue du Vieux Marché aux Poissons, Hypothèse non favorable, sans coût indirect) [El Naboulsi, 1993] | 178 |
| Figure 70 : | Recherche de la date optimale de renouvellement (Rue du Vieux Marché aux Poissons, Hypothèse non favorable, avec coût indirect) [El Naboulsi, 1993] | 178 |
| Figure 71 : | Utilisation du modèle dans la méthode de Shamir et Howard. | 179 |
| Figure 72 : | Fonction de densité et taux de défaillances pour les paramètres $a=120$, $b=0,12$, $c=10$. [Herz, 1992] | 181 |
| Figure 73 : | Utilisation du modèle dans la méthode de Herz | 182 |

Annexes

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figure A1 : | Article de "Sud-Ouest" du 7/10/1993 relatant une défaillance sur une canalisation et ses conséquences. | 193 |
| Figure A2 : | Article de Sud-Ouest du 23/10/1992 relatant la défaillance d'une conduite de diamètre 400 mm et ses conséquences. | 194 |
| Figure A3 : | Photographie représentant une conduite ayant subi une rupture | 195 |
| Figure A4 : | Photographie d'une conduite de diamètre 80 mm ayant subie des dépôts ferrugineux de corrosion interne. | 196 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Figure A5 : | Photographie d'une conduite de diamètre 80 mm ayant subie une corrosion externe par piqûre. | 196 |
| Figure A6 : | Même conduite que la photographie précédente. | 197 |
| Figure A7 : | Même conduite avec les deux points de corrosion. | 197 |
| Figure A8 : | Corrosion par courants vagabonds [Stalder et al., 1986] | 200 |
| Figure A9 : | Corrélation entre la température du sol et le nombre de casses [Kottmann, 1988] | 203 |
| Figure A10 : | Plan de situation de la Presqu'île de Gennevilliers (CEB) | 207 |
| Figure A11 : | Plan de situation des Syndicats du Kronthal et du Kochersberg | 208 |
| Figure A12 : | Plan de situation de la Communauté Urbaine de Bordeaux (LED) | 210 |
| Figure A13 : | Courbes de probabilité de non-défaillance (1 ^{ère} défaillance, LED-Bordeaux) | 216 |
| Figure A14 : | Courbes de probabilité de non-défaillance (2 à 4 ^{ème} défaillance, LED-Bordeaux) | 216 |
| Figure A15 : | Courbes de probabilité de non-défaillance (2 à 4 ^{ème} défaillance, LED-Bordeaux) | 217 |
| Figure A16 : | Courbes de probabilité de non-défaillance (1 ^{ère} défaillance, CEB) | 217 |
| Figure A17 : | Courbes de probabilité de non-défaillance (2 à 4 ^{ème} défaillance, CEB) | 218 |
| Figure A18 : | Courbes de probabilité de non-défaillance (5 ^{ème} défaillance et +, CEB) | 218 |
| Figure A19 : | Courbes de probabilité de non-défaillance (1 ^{ère} défaillance, Bas-Rhin) | 219 |
| Figure A20 : | Courbes de probabilité de non-défaillance (2 ^{ème} défaillance et +, Bas-Rhin) | 219 |
| Figure A21 : | Courbes de probabilité de non-défaillance (1 ^{ère} défaillance, LED-Bordeaux) | 221 |
| Figure A22 : | Courbes de probabilité de non-défaillance (2 à 4 ^{ème} défaillance, LED-Bordeaux) | 221 |
| Figure A23 : | Courbes de probabilité de non-défaillance (5 ^{ème} défaillance et +, LED-Bordeaux) | 222 |
| Figure A24 : | Courbes de probabilité de non-défaillance (1 ^{ère} défaillance, CEB) | 222 |
| Figure A25 : | Courbes de probabilité de non-défaillance (2 à 4 ^{ème} défaillance, CEB) | 223 |
| Figure A26 : | Courbes de probabilité de non-défaillance (5 ^{ème} défaillance et +, CEB) | 223 |

| | |
|---|-----|
| Figure A27 : Courbes de probabilité de non-défaillance (1 ^{ère} défaillance, Bas-Rhin) | 224 |
| Figure A28 : Courbes de probabilité de non-défaillance (2 ^{ème} défaillance et +, Bas-Rhin) | 224 |
| Figure A29 : Répartition de k défaillances entre 0 et t. | 225 |
| Figure A30 : Espérance de défaillance à partir de t_d à la suite de k défaillances. | 228 |
| Figure A31 : Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (Prévision sur 10 ans, hypothèse de stratification, sans facteur vieillissement). | 233 |
| Figure A32 : Comparaison des nombres de défaillances sur les 60 premières conduites (Prévision sur dix ans, hypothèse de stratification, sans facteur "vieillissement") | 234 |
| Figure A33 : Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (Prévision sur 10 ans, hypothèse de non stratification, sans facteur vieillissement). | 234 |
| Figure A34 : Comparaison des nombres de défaillances sur les 60 premières conduites (Prévision sur dix ans, hypothèse de non stratification, sans facteur "vieillissement") | 235 |
| Figure A35 : Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (Prévision sur 10 ans, hypothèse de stratification, avec facteur vieillissement). | 235 |
| Figure A36 : Comparaison des nombres de défaillances sur les 60 premières conduites (Prévision sur dix ans, hypothèse de stratification, avec facteur "vieillissement") | 236 |
| Figure A37 : Comparaison des nombres moyens de défaillances prévues et réelles par classe de tronçons (Prévision sur 10 ans, hypothèse de non stratification, avec facteur vieillissement). | 236 |
| Figure A38 : Comparaison des nombres de défaillances sur les 60 premières conduites (Prévision sur dix ans, hypothèse de non stratification, avec facteur "vieillissement") | 237 |

Liste des tableaux

| | Pages |
|---|-------|
| Tableau 1 : Critères de renouvellement pris en compte dans les services américains [O'day et al., 1989] | 21 |
| Tableau 2 : Manifestations et mesures de la dégradation des conduites d'eau potable | 29 |
| Tableau 3 : Répartition des canalisations par diamètre (décembre 1990) | 54 |
| Tableau 4 : Répartition des canalisations par secteur (décembre 1990) | 54 |
| Tableau 5 : Répartition par diamètre sur le réseau de la CEB | 57 |
| Tableau 6 : Répartition par matériau sur le réseau de la CEB | 57 |
| Tableau 7 : Répartition des diamètres sur les syndicats du Bas-Rhin | 58 |
| Tableau 8 : Répartition des matériaux sur les syndicats du Bas-Rhin | 58 |
| Tableau 9 : Répartition des canalisations par commune du secteur 4 (décembre 1990) | 59 |
| Tableau 10 : Répartition des conduites selon les communes étudiées sur la CEB | 60 |
| Tableau 11 : Répartition des conduites selon le diamètre sur la CEB | 60 |
| Tableau 12 : Répartition des conduites selon le matériau sur la CEB | 61 |
| Tableau 13 : Caractéristiques des conduites prises en compte sur les différents services. | 70 |
| Tableau 14 : Description des conduites recueillies par service. | 72 |
| Tableau 15 : Nombre de défaillances recueillies par service. | 73 |
| Tableau 16 : Résultats donnés par le logiciel EGRET | 95 |
| Tableau 17 : Estimation des facteurs influents (test de Wald) | 101 |
| Tableau 18 : Groupes de défaillances | 103 |
| Tableau 19 : Résultats de l'estimation des β_1 du modèle de Cox | 106 |
| Tableau 20 : Bornes des intervalles de confiance (95 %) | 107 |
| Tableau 21 : Coefficient β_1 en fonction du groupe de défaillances. | 114 |
| Tableau 22 : Valeurs du paramètre β_1 de la longueur selon l'échantillon. | 115 |
| Tableau 23 : Paramètres β_1 du modèle de Weibull avec stratification | 120 |
| Tableau 24 : Paramètres des fonctions de Weibull et exponentiel selon les services et les groupes de défaillances | 121 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Tableau 25 : | Paramètres β_j estimés dans l'hypothèse de non-stratification (** signifie que le facteur n'est pas significatif). | 133 |
| Tableau 26 : | Paramètres du modèle de Weibull stratifié avec le facteur correctif "Vieillessement". | 137 |
| Tableau 27 : | Paramètres du modèle de Weibull stratifié sans facteur vieillissement (données 1951-1982) | 141 |
| Tableau 28 : | Coefficients estimés pour les différents modèles concernant la prévision sur 10 ans. | 143 |
| Tableau 29 : | Nombre de défaillances prévues selon les modèles choisis | 142 |
| Tableau 30 : | Nombre de défaillances prévues selon les modèles choisis (prévision sur deux ans). | 147 |
| Tableau 31 : | Coefficients des modèles de Weibull selon les facteurs pris en compte dans le modèle. | 150 |
| Tableau 32 : | Espérances estimées sur la période de 1951 à 1990 selon les facteurs pris en compte dans le modèle. | 151 |
| Tableau 33 : | Coefficients du modèle semi-local en échantillonnant à partir de l'espérance | 161 |
| Tableau 34 : | Coefficients du modèle semi-local en échantillonnant à partir de la technique d'anamorphose. | 164 |

Annexes

| | | |
|--------------|---|-----|
| Tableau A1 : | Causes des défaillances selon le matériau des conduites | 198 |
| Tableau A2 : | Corrosivité du sol en fonction de sa résistivité [Boudouresque, 1985] | 201 |



9 782853 624015

Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable - Patrick Eisenbeis - © Cemagref 1995, 1^{re} édition, ISBN 2-85362-401-3. Dépôt légal 1^{er} trimestre 1995 - "Études" du Cemagref, Série *Équipements pour l'eau et l'environnement* n° 17, dirigée par Rémy Pochat, chef du département. Photo de couverture : D. Houillon, ENGEES - Impression et façonnage : Ateliers Cemagref-Dicova - Edition et diffusion : Cemagref-Dicova, BP 22, 92162 Antony Cedex, tél. (1) 40 96 61 32 et Cemagref Bordeaux, division *Ouvrages et réseaux hydrauliques*, 50 avenue de Verdun, BP 3, 33611 Gazinet Cedex, tél. 57 89 08 00. Diffusion aux libraires : TEC et DOC, 14, rue de Provigny, 94236 Cachan Cedex, tél. (1) 47 40 67 00. **Prix : 210 F TTC.**