HAL
open science

Une meilleure gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable : le modèle de prévision du renouvellement à long terme OPTIMEAU

Aurore Large

To cite this version:

Aurore Large. Une meilleure gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable : le modèle de prévision du renouvellement à long terme OPTIMEAU. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2016. Français. NNT : 2016BORD0086 . tel-01362132

HAL Id: tel-01362132

https://theses.hal.science/tel-01362132

Submitted on 8 Sep 2016

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.

THÈSE PRÉSENTÉE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE : Sciences physiques et de l'ingénieur

SPÉCIALITÉ : Mécanique

Par Aurore LARGE

Une meilleure gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable : le modèle de prévision du renouvellement à long terme OPTIMEAU

Sous la direction de : M. Sidi Mohammed ELACHACHI et M. Denys BREYSSE
Co-encadrants : M. Yves LE GAT et M. Eddy RENAUD

Soutenue le 27 Juin 2016

Membres du jury :

M. DIAB, Youssef	Professeur	Université Paris-Est	Président
M. MELINGE, Yannick	Professeur	Université de Cergy-Pontoise	Rapporteur
M. LE GAUFFRE, Pascal	Maître de conférences	INSA de Lyon	Rapporteur
Mme ALEGRE, Helena	Directrice de recherche	LNEC Portugal	Examinatrice
M. COUALLIER, Vincent	Maître de conférences	Université de Bordeaux	Examinateur
M. ELACHACHI, SM	Maître de conférences	Université de Bordeaux	Directeur
M. LE GAT, Yves	Ingénieur en chef PEF	IRSTEA	Co-encadrant
M. BREYSSE, Denis	Professeur	Université de Bordeaux	Co-directeur
M. RENAUD, Eddy	Ingénieur divisionnaire AE	IRSTEA	Invité Co-encadrant

“Celui qui ne sait pas d’où il vient ne peut savoir où il va car il ne sait pas où il est. En ce sens le passé est la rampe de lancement vers l’avenir"

Archiduc Otto de Habsbourg-Lorraine

Financement

Cette thèse a été financée par 8 structures différentes : l'IRSTEA (Institut de Recherche en Sciences et Technologie pour l'Environnement et l'Agriculture), l'Unviversité de Bordeaux, eauservice Lausanne, la métropole du Grand Lyon (Grand Lyon), le Syndicat des eaux d'Ile de France (SEDIF), le fonds de recherche pour l'eau (Forschungsfonds Wasser = FOWA) de la Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (SSIGE), l'agence de l'eau Seine-Normandie (AESN) et l'agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse (AERMC) (cf. figure 1).

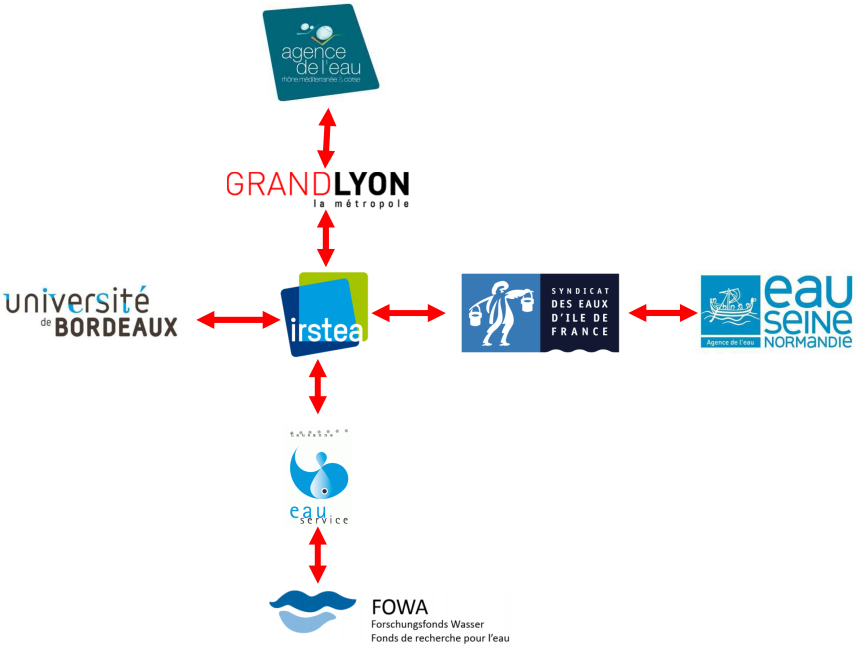


FIGURE 1: Schéma des 7 conventions bilatérales pour financer la thèse

La doctorante a été accueillie durant les 3 ans de la thèse :

- 3/5 jours par semaine dans l'équipe Gestion Patrimoniale des Infrastructures liées à l'Eau (GPIE) dirigée par M. Eddy RENAUD, au sein de l'unité de recherche (UR) Environnement Territoires et infrastructures (ETBX) de l'IRSTEA de Bordeaux.
- 2/5 jours par semaine dans le département Génie Civil et Environnemental (GCE) dirigé par M. Denis BREYSSE, au sein de l'unité mixte de recherche (UMR) Institut d'Ingénierie et de Mécanique (I2M) de l'Université de Bordeaux.

Résumé

Dans les pays développés, l'eau potable est distribuée au domicile des usagers. Ce confort requiert un long linéaire de réseau de forte valeur patrimoniale. Pour maintenir un équilibre entre ressources financières et performances, il est important d'essayer de renouveler les tronçons au meilleur moment possible. Ce manuscrit présente les modèles court (1 à 3 ans), moyen et long terme (> 30 ans) actuellement employés. Les processus court terme semblent assez efficaces, mais les méthodes moyen et long terme restent frustes. Le modèle OPTIMEAU propose une approche long terme pour obtenir une vision globale du patrimoine de canalisations et rationaliser sa gestion, tout en restant en phase avec les pratiques opérationnelles de programmation à court terme. Cette démarche, fondée sur des modèles statistiques de survie, est testée à partir des données réelles de 3 services d'eau Européens : le SEDIF (Syndicat des Eaux d'Ile de France), le Grand Lyon et eauservice Lausanne en Suisse. L'originalité de ce modèle réside dans l'estimation de la distribution des âges à la mise hors service passée, clef de voûte dans la construction de onze indicateurs liés aux finances, aux réalisations et à la performance future des services.

MOTS-CLÉS : renouvellement, optimisation, coûts-performance, risque, survie, canalisation d'eau potable

Abstract

In developed countries, drinking water is distributed to households. This comfort requires a long network with a high value. To optimize resources and performance, it is important to renew pipe sections at the best possible time. This thesis presents the short (1-3 years), medium and long term (> 30 years) models commonly employed. The short-term processes seem quite effective, but long term methods remain rough. The OPTIMEAU model proposes a long-term approach to get a prospective overview of pipes and improve its management, while remaining connected to the technical practices at short-term level. This approach, based on survival statistical models, is tested using actual data of three European water services : SEDIF (Syndicat des Eaux d'Ile de France), Grand Lyon and eauservice Lausanne in Switzerland. The originality of this model lies in the estimation of the past decommissioning age distribution, keystone in the construction of eleven indicators related to finance, achievements and future performance of water utilities.

KEYWORDS : renewal, optimization, cost-effective, risk, survival, drinking water pipe

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les 8 financeurs de ma thèse (OPTIMEAU) sans qui rien n'aurait été possible.

Je souhaite remercier les deux rapporteurs de cette thèse : M. Yannick MELINGE et M. Pascal LE GAUFFRE, qui ont, non seulement, accepté la tâche de lire ce manuscrit mais aussi de rédiger un rapport d'évaluation à son sujet.

Je désire ensuite remercier les examinateurs de ce manuscrit Mme Helena ALEGRE, M. Youssef DIAB et M. Vincent COUALLIER qui ont accepté de donner leur point de vue sur mon travail.

J'adresse des remerciements tout particuliers à mes quatre encadrants : M. Yves LE GAT, M. Sidi-Mohammed ELACHACHI, M. Eddy RENAUD et M. Denis BREYSSE. En effet, venant chacun de disciplines différentes la communication a parfois été difficile mais les complémentarités ont été d'une grande richesse.

Merci à M. Max TOMASIAN, sous ma direction pendant 1 an et demi, pour sa bonne humeur et ses compétences en statistique.

Je remercie tout particulièrement les personnes qui ont été à l'initiative de ce projet : Yves, Eddy, M. Sébastien APOTHELOZ (eauservice Lausanne), M. Didier FANGEAT (Grand Lyon) et M. Sylvain CHARRIERE (SEDIF).

Un grand merci à toutes les personnes qui m'ont accordé beaucoup de temps notamment pour la collecte des données et leur compréhension, l'analyse de mon modèle, etc. : Mme Linda VIGUET (eauservice Lausanne), Mme Christelle SANZ (eauservice Lausanne), Didier, M. David POINARD (Véolia Grand Lyon), Mme Anne LANG (SEDIF) et M. Olivier CHESNEAU (SEDIF).

Merci aux personnes qui m'ont réellement apporté une vision long terme et stratégique des enjeux de la gestion patrimoniale : Sébastien A., M. Aitor IBARROLA (eauservice Lausanne), M. Frédéric CUNIN (eauservice Lausanne), Didier, Sylvain, Olivier et M. Sébastien BUTTOUDIN (Véolia Ile de France).

Je tiens à remercier toutes les personnes suivantes pour leurs conseils techniques et leurs aides pour réaliser mes entretiens auprès des bonnes personnes : Linda, Christelle, Didier, Anne, Olivier, Mme Anne-Claire SANDRAZ (Véolia Ile de France), Mme Claire LEFORT (SEDIF) et M. Bruno CHOUX (SEDIF).

Concernant la partie **mécanique**, génie civil, la connaissance du fonctionnement d'un réseau et d'un service des eaux, mes remerciements vont d'abord à Eddy. En effet, avec sa longue expérience dans l'ingénierie technique des services de l'Etat, ses remarques étaient toujours très constructives et ont permis de ré-ancrer cette thèse dans des enjeux forts et réels de la gestion patrimoniale. Merci aussi aux agents techniques des terrains d'étude qui m'ont fait part de leur ressenti "terrain". Merci, bien-sûr, à Sidi-Mohammed, Denis et Pascal, tous trois grands spécialistes dans ce domaine. Je tiens à remercier aussi Mme Marine COLON et Sidi-Mohammed pour m'avoir demandé de donner des cours sur la gestion patrimoniale des infrastructures d'eau, aux Mastère (bac +6) gestion de l'eau de l'ENGREF (Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts) de Montpellier et à des Master I (bac +4) en génie civil de l'Université de Bordeaux. J'ai vraiment adoré enseigner.

Pour la partie **statistique** de ce manuscrit je tiens à remercier Mme Gilberte VIGNAU, enseignante en statistique à l'école d'ingénieur Montpellier Supagro qui m'a fait associer statistique et plaisir. Merci à Yves et Vincent, vous être vraiment des pros dans ce domaine. J'ai appris tellement de choses à vos côtés. Merci à Mme Karen LEFFONDRE enseignante-chercheuse à l'Institut de santé publique d'épidémiologie et de développement (ISPED) qui m'a expliqué dans le détail la complexité des analyses de survie. Merci à Sidi-Mohammed pour m'avoir incité à enseigner les statistiques à des Master I (bac+4) en génie civil. Enfin, pour leurs conseils précieux sur les résidus de schoenfelds et les analyses en composante principale je remercie Mme Charlotte SCORDIA et M. Amaury LABENNE.

Concernant le chapitre sur **le risque** dans cette thèse. Mes remerciements vont tout d'abord à Mme Aïnoha PARE-CHAMONTIN, M. SAVARY, M. COLLIN et M. MALAVOI enseignants à AgroParisTech ENGREF et à Montpellier Supagro notamment sur la gestion des risques inondations, alimentaires, sociaux, etc. Merci ensuite à Denis, aussi surnommé entre les doctorants de GCE : M. Risque. Je crois qu'avec ce surnom tout est dit. Vous allez nous manquer M. Breysse, quand vous allez quitter la direction de GCE (génie civil et environnemental). Mes remerciements vont à Sidi-Mohammed, spécialiste dans les risques sismiques. Merci à Denis pour m'avoir proposé de donner des cours sur la gestion du risque inondation à des Master II (bac + 5) de l'Université de Bordeaux.

Pour la partie **économique** de ce manuscrit, merci à Mme Sophie THOYER professeure à Montpellier Supagro qui m'a donné la passion pour cette discipline. Merci à M. Rob FRASER et M. Iain FRASER professeurs en économie de l'Imperial College London, qui m'ont appris les subtilités de cette discipline. Merci à Mme Sarah FEUILLETTE, économiste de l'agence de l'eau Seine-Normandie pour m'avoir fait confiance dans la mise en place d'analyses-coûts bénéfices (ACB) socio-environnementales. Merci à M. Guillaume HOLLARD, directeur de recherches au CNRS puis à l'école Polytechnique qui m'a incité à donner des cours sur les analyses coûts-bénéfices (ACB) aux Master II en économie de l'environnement de l'Université Panthéon Sorbonne. Merci à Mme Sylvie FERRARI maître de conférence au GREThA (Groupe de recherches en Economie Théorique et Appliquée) et Mme Caty WEREY pour avoir répondu à mes questions économiques lors de la création du modèle OPTIMEAU. Merci enfin à Mme Laetitia GUERIN-SCHNEIDER pour avoir piloté l'article que nous avons écrit sur les investissements en gestion patrimoniale.

Pour avoir répondu à mes questions sur le fonctionnement de certains modèles merci à :

- Eddy et Yves pour Casses, Criticité et les LEYP ;
- Didier, Linda, Christelle, Pascal, Yves, David, M. Patrick EISENBEIS, M. Mathew POULTON (WTSIM) pour les modèles dans le programme de recherche CARE-W ;
- Mme Morgane LE QUINIOU et Anne Claire (Véolia) pour VISION et MOSARE ;
- M. Cyril LECLERC (Suez-environnement) pour PREVOIR ;
- M. Yves COQUELET (Saint-Gobain Pont-A-Mousson) pour TCO-LCA ;
- M. Ingo KROPP (3S Consult) pour KANEW ;
- M. David MARLOW et Scott GOULD (CSIRO) pour PARMS ;
- M. Hervé HUNG, M. Denis GILBERT et M. Olivier PILLER pour PORTEAU, EPANET et les autres modèles hydrauliques.

Un grand merci aux 31 participants aux comités de suivi de ma thèse pour leurs regards critiques tant sur le point pratique que théorique. Notamment merci à M. Adrian RIEDER du service des eaux de la ville de Zurich, à M. Markus BINER de la SSIGE (Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux), M. Frédéric IMMEDIATO de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse, Mme Lisa SCHOLTEN et M. Joao LEITAO de l'EAWAG (Institut de recherche sur l'eau et les milieux aquatiques du domaine des écoles polytechniques fédérales de Zurich et de Lausanne). Merci particulièrement à Lisa pour sa relecture et ses conseils sur plusieurs de mes documents de travail.

Merci aux personnes qui ont accepté que je les interroge dans les terrains d'étude M. Marvin ANCIAN, M. DEBIEU, M. Mickael WISSA, M. Hadem BOUDRA, M. BRAUX, M. Stéphane RAVANAT, M. Gildas LEVEQUE, M. Florent ALIX, M. Charles-Henri MERLE, Mme Agathe COHEN, Mme Hassna ADMI, M. Mathieu GAUME, M. Aurélien GERVAIS et Mme Adeline HUSTACHE.

Pour leurs sourires, leurs joies de vivre et leurs soutiens indéfectible, je remercie les informaticiens d'IRSTEA : M. Jacques FOURY, M. François GUILLON, M. Philippe CAMOUIN, Mme Sandine SABATIE, M. Gilles VEYSSIERE et M. Karim HADANE. Vous m'avez tellement aidé notamment pour la mise à disposition d'ordinateurs physique, d'un ordinateur virtuel, d'une plateforme de calcul, de sites webs, de logiciels géniaux etc. bref vous êtes des supers geeks ! Merci aussi à M. Kevin PETIT pour ses astuces sur le logiciel ARC-GIS !

Pour son humanité, sa sensibilité, son sérieux et sa disponibilité, je remercie Mme Chantal GARDES du service documentaire de l'IRSTEA.

Pour ses blagues et sa qualité d'enseignement en Anglais, merci à M. James EMERY !

Je remercie tous les doctorants dans notre bureau en open space : Yassine, Hervé, Nicolas, Elodie, Amine, Cécile, etc. pour les bons moments passées ensemble.

Enfin, merci à mon entourage pour son soutien.

Avant-propos

Dans ce manuscrit tous les mots et les chiffres en **bleu** sont des liens hypertextes qui renvoient vers d'autres pages du document.

Ce symbole ☞ renvoie à trois annexes en dehors de ce manuscrit.

Traditionnellement, dans les manuscrits de thèse, les premiers chapitres sont consacrés à la bibliographie puis les autres aux modèles et aux résultats. Cependant, pour alléger la lecture, dans ce document, nous avons fait le choix de **répartir la bibliographie tout au long du manuscrit**. En effet, la gestion patrimoniale est composée de plusieurs modèles et nous pensons que cela aurait été moins compréhensible de tout regrouper au début du document.

Même si nous avons travaillé avec trois terrains d'étude (le SEDIF, le Grand Lyon et eauservice Lausanne), la plupart des exemples dans ce manuscrit correspondent aux données d'eauservice Lausanne car :

- c'est le plus petit terrain, donc les simulations fonctionnent rapidement ;
- leurs données étaient de bonne qualité, par conséquent les sorties des modèles sont entachées de peu d'erreurs liées aux données ;
- il est plus simple de suivre en fil rouge un terrain d'étude plutôt que trois.

Nous vous souhaitons une bonne lecture !

Table des matières

Financement ii

Résumé iii

Remerciements iv

Avant-propos vii

Table des matières viii

Liste des Figures xiii

Liste des Tables xx

Abréviations xxiii

Symboles xxv

Introduction 1

I La gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable : État de l'art des besoins et des outils 4

1 La gestion patrimoniale de qualité : état des connaissances actuelles 6
- 1.1 Caractérisation du patrimoine lié au service de l'eau potable et de ses enjeux 6
- 1.2 Un cadre règlementaire strict 7
- 1.3 La roue de Deming et le cylce de l'action : des méthodes éprouvées 8
- 1.4 Se fixer des objectifs 9
- 1.5 Évaluer les actions 12
- 1.6 Planifier les actions futures 14
  - 1.6.1 Trois échelles de temps de planification 14
  - 1.6.2 Focus sur la planification à long terme 14
- 1.7 Conclusion 15

2 Verrous des modèles de gestion patrimoniale 16
- 2.1 Cinq grandes familles de modèles de gestion patrimoniale 16
- 2.2 Le processus de planification à court-terme 19
  - 2.2.1 Un besoin ancien 19
  - 2.2.2 Des modèles nombreux et efficaces 20
- 2.3 Le processus de planification à long-terme 23
  - 2.3.1 Un besoin plus récent 23
  - 2.3.2 Des modèles peu nombreux avec des lacunes importantes 24
- 2.4 Conclusion 25

3 Complexité des données liées aux réseaux d'eau potable **26**
3.1 Des contextes locaux variés . . . 26
3.1.1 Des pratiques hétérogènes au sein de territoires géographiques distincts . . . 26
3.1.2 Des situations politiques et administratives différentes . . . 29
3.2 Expertise des données complexes et partielles . . . 30
3.2.1 Les données recherchées versus les données collectées . . . 30
3.2.2 Les tronçons : une notion a géométrie variable . . . 31
3.2.2.1 La répartition de la longueur des tronçons est très étalée . . . 31
3.2.2.2 Les âges à la mise hors service sont tronqués à gauche et censurés à droite 32
3.2.2.3 Des incohérences rencontrées . . . 33
3.2.2.4 Des informations manquantes . . . 34
3.2.3 La spécificité des données environnementales . . . 35
3.2.4 Les défaillances : disponibles sur une fenêtre d'observation . . . 36
3.3 La gestion des données notamment avec "R" . . . 38
3.4 Conclusion . . . 38

4 Présentation de la démarche suivie **39**
4.1 Genèse de la thèse . . . 39
4.2 Méthode de travail . . . 39
4.3 Vue d'ensemble de la démarche OPTIMEAU . . . 41

II Les avancées majeures en analyse rétrospective **44**

5 Analyse des pratiques passées via des indicateurs classiques **46**
5.1 Le budget alloué au renouvellement : un indicateur clé sur les moyens . . . 46
5.2 Le taux de renouvellement : un indicateur clé sur les réalisations . . . 47
5.3 L'indice linéaire de perte du réseau : un indicateur clé sur les résultats . . . 49
5.4 Conclusion . . . 52

6 Evaluation rétrospective des causes et des âges à la mise hors service de groupes de canalisations **53**
6.1 Justification du choix des modèles . . . 53
6.2 Description des modèles employés . . . 54
6.2.1 Méthode en effectif . . . 54
6.2.2 Méthode pondérée par la longueur des tronçons . . . 55
6.2.3 Degré de confiance des fonctions de survie rétrospectives . . . 56
6.3 Quelques résultats et discussions . . . 56
6.3.1 Intérêt de la survie en linéaire . . . 56
6.3.2 Les âges à la mise hors service passés . . . 57
6.3.3 Mises en évidence de quelques causes de mise hors service des tronçons . . . 58
6.3.3.1 Le nombre de défaillances passées . . . 58
6.3.3.2 La présence et la vulnérabilité des usagers . . . 59
6.3.3.3 La qualité des matériaux employés . . . 60
6.3.4 Pour aller plus loin . . . 62
6.4 Conclusion . . . 63

7 Analyse rétroactive par tronçon des causes et des âges à la mise hors service **64**
7.1 Un modèle de survie individualisé par tronçon : le modèle WeiCo . . . 64
7.1.1 Justification du choix du modèle . . . 64
7.1.2 Déterminer la valeur des paramètres . . . 65
7.1.3 Déterminer si les paramètres sont significatifs . . . 66

7.1.4 Estimer les risques relatifs et leurs incertitudes 66
7.1.5 Tester l'hypothèse de proportionnalité des risques au cours du temps 68
7.2 Quelques résultats et discussion 68
7.2.1 Applications à la population globale du réseau d'eauservice Lausanne 69
7.2.2 Applications aux tronçons en ville du réseau d'eauservice Lausanne 70
7.2.3 Applications à l'ensemble du réseau du SEDIF 72
7.3 Validation et évaluation critique des résultats 74
7.3.1 Vérification de l'hypothèse de proportionnalité des risques relatifs 74
7.3.2 Comparaison de WeiCo à Kaplan-Meier 76
7.4 Pour aller plus loin 78
7.5 Conclusion 79

8 Identification et formalisation des objectifs long terme 80
8.1 Ajustement des objectifs 80
8.1.1 Lausanne 80
8.1.2 Grand Lyon 81
8.1.3 SEDIF 82
8.1.4 Synthèse 82
8.2 L'utilisation des lois de survie au service de la planification à long terme : contribution et limites 83
8.2.1 La prospective : définition 83
8.2.2 Des étapes clés à respecter 83
8.2.3 Les scénarios prospectifs 84
8.2.3.1 Eauservice Lausanne 84
8.2.3.2 SEDIF 85
8.2.3.3 Grand Lyon 86
8.2.4 Transformation des scénarios en courbes de survie prospectives 87
8.2.4.1 Intégration des fonctions de survie dans le code de calcul 87
8.2.4.2 Survies des scénarios "statu quo" 88
8.2.4.3 Survies des scénarios non "statu quo" 90
8.3 Conclusion 92

III Les avancées majeures en planification à long terme 94

9 L'estimation des réalisations prévisionnelles de chaque stratégie 97
9.1 Justification du choix du modèle employé 97
9.1.1 Certains modèles : trop éloignées des pratiques réelles 97
9.1.2 Des modèles aux perspectives intéressantes 99
9.2 Prévision du linéaire à renouveler : $I1R$ 99
9.2.1 Sans changement de matériaux et une seule strate 100
9.2.2 Sans changement de matériaux et plusieurs strates 100
9.2.3 Avec changement de matériaux et plusieurs strates 101
9.3 Prévisions des taux de renouvellement futurs : $I2R$ 102
9.4 Prévision de l'évolution de l'âge moyen du réseau : $I3R$ 103
9.5 Quelques résultats et discussions 103
9.6 Validation et évaluation critique du modèle 105
9.7 Conclusion 107

10 La prédiction de la dégradation des canalisations pour chaque stratégie 109
10.1 Justification du choix du modèle 109
10.2 Présentation du modèle LEYP : Processus de Yule Linéairement Etendu 110

10.3 Le tronçon géographique : une réponse au problème posé par l'utilisation du LEYP sur du long terme . . . 112
10.4 $I1P$ sans changement de matériau . . . 113
10.5 $I1P$ avec changement de matériaux . . . 115
10.6 $I1P$ avec plusieurs strates . . . 117
10.7 Quelques résultats et discussions . . . 117
10.7.1 Lausanne scénario statu quo non stratifié . . . 117
10.7.2 Lausanne statu quo stratifié par matériau . . . 119
10.7.3 Renouvellement plus important près des éléments vulnérables . . . 121
10.8 Validation et évaluation critique du modèle . . . 123
10.8.1 Validation du pouvoir prédictif du modèle LEYP sur du court terme . . . 123
10.8.2 Comparaison d'OPTIMEAU à deux autres démarches . . . 124
10.8.3 Analyse de sensibilité d'$I1P$ à la stratification . . . 125
10.8.4 Conclusion . . . 126

11 L'estimation des risques adaptée au contexte local 128
11.1 Les composantes du risque . . . 128
11.2 Méthode de calcul du risque, théorie . . . 129
11.3 Justification du choix des méthodes de calcul . . . 130
11.4 Risque de perturbation du trafic routier : $I3P$ . . . 131
11.4.1 Cadre préliminaire . . . 131
11.4.2 Présentation de la méthode de calcul . . . 132
11.4.3 Discussion et perspectives d'amélioration . . . 133
11.5 Risque de coupure d'eau : $I2P$ . . . 134
11.5.1 Cadre préliminaire . . . 134
11.5.2 Présentation de la méthode de calcul . . . 135
11.5.3 Discussion et perspectives d'amélioration . . . 136
11.6 Risque inondation : $I4P$ . . . 137
11.6.1 Cadre préliminaire . . . 137
11.6.2 Présentation de la méthode de calcul . . . 138
11.6.3 Discussion et perspectives d'amélioration . . . 139
11.7 Risque d'effondrement du sol : $I5P$ . . . 139
11.7.1 Cadre préliminaire . . . 139
11.7.2 Présentation de la méthode de calcul . . . 140
11.7.3 Discussion et perspectives d'amélioration . . . 141
11.8 Volume de fuite : $I6P$ . . . 141
11.8.1 Cadre préliminaire . . . 141
11.8.2 Justification du choix de la méthode de calcul . . . 142
11.8.3 Présentation de la méthode de calcul . . . 142
11.8.4 Discussion et perspectives d'amélioration . . . 143
11.9 Conclusion . . . 143

12 Moyens financiers à injecter dans chaque stratégie 145
12.1 Justification du choix de la méthode de calcul . . . 145
12.1.1 Périmètre des analyses économiques . . . 145
12.1.2 Les écoles de pensée pour estimer les coûts et le bénéfices . . . 148
12.2 Coût du renouvellement : $I1F$ . . . 149
12.2.1 Sans actualisation . . . 149
12.2.2 Avec actualisation . . . 150
12.3 Analyse de sensibilité . . . 151
12.4 Coût des réparations : $I2F$ . . . 152

12.5 Quelques résultats et conclusion 153

13 Mise en œuvre pratique de la démarche OPTIMEAU : Étude de cas 155
13.1 Modèle “M survie” 155
13.2 Modèle “M linéaire” 157
13.2.1 Linéaire à renouveler $I1R$ 157
13.2.2 Taux de renouvellement $I2R$ 158
13.2.3 Age moyen $I3R$ 160
13.3 Modèle “M1 dégradation” 161
13.4 Modèle “M2 Risque” 162
13.4.1 Risque coupure d’eau $I2P$ 163
13.4.2 Risque coupure voirie $I3P$ 164
13.4.3 Risque inondation $I4P$ 164
13.4.4 Volume de fuite $I6P$ 165
13.5 Modèle “M3 économique” 166
13.5.1 Coûts du renouvellement $I1F$ 166
13.5.2 Coûts de réparation $I2F$ 167
13.6 Modèle “M4 décisionnel” 168
13.7 Conclusion 169

Conclusion et perspectives 171

Bibliographie 174

A Analogie avec la santé humaine 1

B ACP sur données mixtes (qualitatives et quantitatives) de variables au tronçon 3

C Liste des participants aux comités techniques 6

D Schémas des méthodes de planification à court terme 7

E La survie brute 10

F Analyse Coûts Bénéfices 11

G Pyramide des âges 13

H Justification du choix des 11 indicateurs d’OPTIMEAU 15

I Equivalents temps plein 17

Table des figures

1 Schéma des 7 conventions bilatérales pour financer la thèse ii
2 Localisation des 3 terrains d'étude. S : SEDIF, G : Grand Lyon, L : eauservice Lausanne 2
3 Schéma des parties du manuscrit (en rouge) sur la roue de Deming. M. = les Modèles, Eval.= Evaluer, Ajust. =Ajuster, Plan. = Planifier et Réal. = Réaliser 3

1.1 Les infrastructures liées à la fourniture d'eau potable, [CG-Marne, 2015] 6
1.2 La roue de Deming, source [Deming, 1986] 9
1.3 Le cyle de l'action, source [OCDE, 2002; Mondot, 2008] 9
1.4 Les grandes familles d'objectifs et leurs liens avec les 3 piliers du développement durable 10
1.5 Les indicateurs d'OPTIMEAU 11
1.6 L'évaluation d'une intervention publique passée, source [OCDE, 2002; Mondot, 2008] . 12
1.7 Les 3 échelles de planification employés par les services d'eau 14
1.8 Représentation schématique des conséquences à long terme de différents scénarios et stratégies prospectives. Axe de gauche : horizon temporel. Axe de droite : les indicateurs. Axe vertical : les scénarios et les stratégies. A partir de [Alegre and Coelho, 2012, p. 68]. 15

2.1 Les gammes d'échelle spatio-temporelle pour lesquelles certains logiciels de gestion patrimoniale ont été conçu 18
2.2 Schéma des 3 grandes périodes dans l'adduction d'eau potable en France 19
2.3 Fontaine de la Palud, au centre ville de Lausanne en 1800, aquarelle de Louis Ducros représentant la vie autour de cette fontaine, source [Bouffard and Creux, 1973, p. 51] 19
2.4 Evolution du taux de desserte par le réseau de distribution d'eau potable en France, source [Ajuste et al., 2004, p. 6] 20
2.5 Visualisation de l'enchainement des 4 modèles sur du court terme 21
2.6 Les quatre premières étapes de la décision de la mise hors service de tronçons à eauservice Lausanne, en 2011, visualisation de l'enchainement des 4 modèles M1, M2, M3, M4 . . 22
2.7 La cinquième étape de la décision de la mise hors service de tronçons à eauservice Lausanne, en 2011 (les pourcentages servent à donner des ordres de grandeurs) 22
2.8 Un sous-sol encombré en zone urbaine dense, source [Boesch, 2014] 24
2.9 Visualisation des 5 modèles sur du long terme 24

3.1 Les linéaires de réseaux des 3 terrains d'étude 27
3.2 Linéaire du réseau du SEDIF en service (8 296 km) fin 2012 et mis hors service (680 km) entre [1995, 2012] en fonction des dates de pose (DDP) 27
3.3 Linéaire du réseau du Grand Lyon TVD en service (2 127 km avec DDP sûres et 902 km avec DDP estimées) fin 2012 et mis hors service (123 km) entre [2002, 2012] en fonction des DDP 28
3.4 Linéaire du réseau d'eauservice Lausanne en service (874 km) fin 2012 et mis hors service (136 km) entre [2001, 2012] en fonction des DDP 28
3.5 Matériaux des réseaux en service fin 2012 en fonction de leur linéaire (%) pour chaque terrain d'étude 29
3.6 Équivalents temps plein (ETP) pour 100 kilomètres de réseau en service dédié à l'eau potable dans les terrains d'étude, situation au premier trimestre 2015 (cf. annexe I) . . 30

3.7 Citation extraite de [Bernstein, 1998] 30
3.8 Distribution de la longueur des tronçons des trois terrains d'étude. Les boîtes et les traits représentent les fractiles 5, 25, 50, 75 et 95% des tronçons 32
3.9 Les tronçons en fonction des années calendaires y, illustration de la troncature et de la censure, données disponibles (trait plein), données non disponibles ou non utilisables (en pointillé) 33
3.10 Ordres de grandeur des dates de début et de fin de pose par matériau, source [ASTEE et al., 2013b, p. 25] 34
3.11 Facteurs agissant sur l'état des conduites au cours du temps, source : à partir de [Lyonnaise des eaux, 2015] 35
3.12 Les trois types de fuite, à partir de [Fantozzi and Lambert, 2010; Claudio, 2014] 37

4.1 Vue d'ensemble de la démarche OPTIMEAU 42
4.2 Schéma des chapitres (en bleu) de la partie II du manuscrit sur la roue de Deming. Eval.= Evaluer, Ajust. =Ajuster, Plan. = Planifier, Réal. = Réaliser et M. = les Modèles 45

5.1 Taux de renouvellement annuel à Lausanne de 2004 à 2013 47
5.2 Taux de renouvellement moyen (sur 5 ans) au SEDIF de 2008 à 2013, (P107.2) 48
5.3 Taux de renouvellement moyen (sur 5 ans) au Grand Lyon TVD de 2008 à 2013, (P107.2) 48
5.4 ILP_{brut} à Lausanne 49
5.5 $ILVNC$ au SEDIF, P105.3 50
5.6 $ILVNC$ au Grand Lyon TVD, P105.3 50
5.7 Volumes annuels définis pour le calcul des indicateurs, à partir de [SMEGREG, 2009b, p. 5], di : défense incendie 50
5.8 $ILVNC$ en fonction de l'ILC en 2012 pour les trois terrains d'études 51

6.1 Représentation schématique de la densité de probabilité, de la fonction de répartition et la fonction de survie d'une variable aléatoire X suivant une loi normale 54
6.2 Fonctions de survie empirique selon trois modes de calculs 1) brute (en gris) 2) Kaplan-Meier en effectif (en vert) 3) Kaplan-Meier en linéaire (en rouge), sur la fenêtre d'observation [2001 ; 2013] concernant uniquement les tronçons en fonte ductile du réseau en ville d'eauservice Lausanne. 56
6.3 Fonctions de survie empirique, en linéaire, et leurs intervalles de confiance à 95% (IC) pour l'ensemble du réseau d'eauservice, du Grand Lyon et du SEDIF, sur leurs fenêtres d'observation passées respectives (valeur entre crochets) 57
6.4 Réseau en ville d'eauservice Lausanne partitionné en deux strates selon le nombre de défaillances. Droite : Courbes de survie passée et leurs intervalles de confiance (IC) à 95%, sur la fenêtre d'observation [2001,2013]. Gauche : Diagramme représentant la proportion de ces deux strates vis-à-vis du linéaire en service fin 2013. 59
6.5 Courbes de survie passée à Lausanne sur [2001, 2012] (méthode Kaplan Meier en linéaire), selon 4 strates : 1) conduites de distribution et de transport en ville de diamètre < 250 mm, 2) conduites de distribution et de transport en ville de diamètre ≥ 250 mm, 3) conduites d'amenés (CAM) en zone de montagne et 4) conduites d'adduction en zone de montagne 60
6.6 Diagramme du linéaire (en km) du SEDIF. Gauche : Matériaux en service fin 2012. Droite : Matériaux mis hors service entre [1995,2012] 60
6.7 Courbes de survie passées par matériaux au SEDIF. ND : non déconditionné 61
6.8 Linéaire du réseau en service fin 2012 et mis hors service entre [1995, 2012] (en rouge) en fonction des dates de pose. Le linéaire en service est stratifié en fonction des matériaux des canalisations. 62
6.9 Réseau du SEDIF stratifié selon les matériaux des canalisations. Distribution des âges des canalisations dans chaque strate au début de la fenêtre d'observation (1995). Fractiles représentés : 0%, 25%, 50%, 75% et 95%. 62

7.1 Densité de probabilité d'une loi de Weibull à deux paramètres δ et η. Ici $\eta = 50$ et δ varie entre 1, 2 et 3.5. Lorsque $\delta = 1$ on retrouve une loi exponentielle, lorsque $\delta = 2$ on retrouve la loi de Rayleigh et lorsque $\delta = 3.5$ on retrouve une forme proche de la loi normale. 69
7.2 Risques relatifs de mise hors service issus du modèle WeiCo appliqué à l'ensemble du réseau d'eauservice Lausanne. A gauche les 2 variables quantitatives, à droite les 4 variables qualitatives. 70
7.3 Risques relatifs d'être mis hors service issus du modèle WeiCo appliqué uniquement au réseau d'eauservice Lausanne situé en ville. A droite les 4 variables quantitatives, à gauche les 3 variables qualitatives 72
7.4 Risques relatifs d'être mis hors service de la variable quantitative du modèle WeiCo appliqué appliqué l'ensemble du réseau du SEDIF. 73
7.5 Risques relatifs d'être mis hors service des 3 variables quantitatives du modèle WeiCo appliqué appliqué l'ensemble du réseau du SEDIF 74
7.6 Survie de WeiCo pour 4 000 tronçons sélectionnés par tirage aléatoire sans remise (cf. équation 7.1) et survie moyenne de Weico (cf. équation 7.7), application à l'ensemble du réseau du SEDIF (cf. tableau 7.4) 76
7.7 Courbe de survie empirique, en nombre de tronçon, issue de la méthode Kaplan-Meier (en vert) et courbe de survie moyenne de WeiCo (en rouge), application à l'ensemble du réseau du SEDIF (cf. tableau 7.4 77
7.8 Courbe de survie empirique, en linéaire, issue de la méthode Kaplan-Meier (en vert) et courbe de survie moyenne de WeiCo pondérée par la longueur des tronçons (en rouge), application à l'ensemble du réseau de Lausanne (cf. tableau 7.1 78

8.1 Défaillances issues des fuites détectées et visibles sur canalisations à Lausanne en [2001, 2013], concernant le réseau en ville, simulation № 4 81
8.2 Relation entre le passé, le présent et les avenirs possibles [Griffon, 2005] 83
8.3 Organigramme du fonctionnement du code développé. M = Modèle, ES= en service, HS = Hors service, renou. = renouvellement, p. = passées et f. futur 87
8.4 SEDIF. Trait : Courbes de survie prospectives du scénario "Statu quo", obtenue en calant la loi de Weibull à 2 paramètres [Sw(t)] sur la survie passée. Point : Survie passée sur [1995 ; 2012], en linéaire, calculée par la méthode Kaplan-Meier [Skm(t)]. 89
8.5 Eauservice Lausanne. Trait : Courbe de survie prospective du scénario "Statu quo sans stratification" obtenue par une régression locale [RL]. Carrés : Survie empirique passée sur [2001 ; 2013], en effectif, calculée par la méthode Kaplan-Meier [Skm(t)]. 90
8.6 Réseau d'eauservice Lausanne en ville stratifié selon la vulnérabilité des enjeux. Points : Survies empiriques passées sur [2001 ; 2013], en effectif, calculée par la méthode Kaplan-Meier [Skm(t)]. Traits : Courbes de survie continue obtenue par une régression locale [RL] ou par la méthode des moindres carrés en calant une survie de Weibull $Swb(t)$. . 91
8.7 Eauservice Lausanne. Courbe de survie propective, en effectif, réseau stratifié selon la vulnérabilité des enjeux à Eauservice Lausanne 92
8.8 Schéma de la partie III du manuscrit sur la roue de Deming. Eval.= Evaluer, Ajust. =Ajuster, Plan. = Planifier, Réal. = Réaliser et M. = les Modèles 95
8.9 Représentation des chapitres de la partie III sur le cycle de l'action et les 11 indicateurs d'OPTIMEAU 95
8.10 Représentation des chapitres sur l'organigramme du code développé 96

9.1 Courbe de survie employée dans la méthode dans [Cador, 2002a,b] pour les canalisations en fonte grise (si l'âge à la mise hors service = 70 ans) 98
9.2 Photographie réelle fin 2013 de l'état du réseau en ville d'eauservice Lausanne. Linéaire (en km) en service (ES) (en vert) en fonction des années de pose y_0. Entrée du modèle créant l'indicateur graphique $I1R$ dans le scénario statu quo. 103

9.3 Photographie prévisionnelle fin 2014 de l'état du réseau en ville d'eauservice Lausanne. Linéaire (en km) en service (ES) (en vert) et mis hors service (HS) (en rouge) l'année 2014, ($k = 1$), en fonction des années de pose y_0. Exemple de sortie du modèle créant l'indicateur graphique $I1R$ dans le scénario statu quo. 104
9.4 Photographie prévisionnelle fin 2025 de l'état du réseau en ville d'eauservice Lausanne. Linéaire (en km) en service (ES) (en vert) et mis hors service (HS) (en rouge) entre [2014 ; 2025], ($k = 12$), en fonction des dates de pose y_0. Exemple de sortie du modèle créant l'indicateur graphique $I1R$ dans le scénario statu quo. 104
9.5 Photographie prévisionnelle fin 2050 de l'état du réseau en ville d'eauservice Lausanne. Linéaire (en km) en service (ES) (en vert) et mis hors service (HS) (en rouge) entre [2014 ; 2050], ($k = 37$), en fonction des dates de pose y_0. Exemple de sorties du modèle créant l'indicateur graphique $I1R$ dans le scénario statu quo. 104
9.6 En haut : fonctionnement normal du modèle pour calculer $I1R$. En bas : Méthode pour valider l'indicateur $I1R$. 105
9.7 Linéaire (en km) en service (ES) (en vert) en fonction des dates de pose y_0 et mis hors service (HS) (en rouge) entre [2008 ; 2013], réseau en ville d'eauservice Lausanne. En haut : entrée du modèle, photographie du réseau fin 2007 ($= y_2$). Milieu : Sortie du modèle, photographie du réseau fin 2013 ($k = 6$), scénario statu quo. En bas : Observations réelles, photographie du réseau fin 2013. 106
9.8 Comparaison de la prévision du modèle avec les observations réelles (en km). Visualisation des écarts absolus pour six cohortes différentes (années de pose y_0), sur le linéaire en service en 2013, $LE_{y_0}(2013)$ et le linéaire mis hors service entre [2008 ; 2013], $LH_{y_0}(2013)$. 107

10.1 Processus de comptage $N(t)$ du LEYP 111
10.2 Schéma d'un tronçon géographique. A chaque renouvellement seuls son âge, son matériau et son nombre de défaillances peuvent varier. 113
10.3 Schéma des éléments de la chaîne de Markov sans changement de matériau, à 150 âges de 1 à 150 ans. Les flèches indiquent les probabilités de transition d'un âge à un autre (Noir : vieillissement, Rouge : renouvellement). 114
10.4 Matrice $\boldsymbol{M}$ carrée (150 x 150) sans changement de matériaux $t_{max} = 150$ 114
10.5 Schéma des éléments de la chaîne de Markov avec changement de matériau, à 300 états. Les flèches indiquent les probabilités de transition d'un état à un autre (Gris : vieillissement en fonte grise (FG), Violet : vieillissement en fonte ductile (FD), Rouge : renouvellement). 116
10.6 Matrice $\boldsymbol{M}$ carrée (300 x 300) avec changement de matériau et $t_{max} = 150$ ans 116
10.7 Eauservice Lausanne, réseau en ville, nombre de défaillances prévisionnelles $I1P$ jusqu'en 2050. Simulation 4 : Statu quo 119
10.8 Eauservice Lausanne, réseau en ville, simulation №9, "statu quo stratifié par matériau". Point : survie empirique passée en effectif calculée par la méthode Kaplan-Meier $S\text{km}(t)$. Traits : les survies prospectives de ce scénario, tantôt en calant une fonction de Weibull $S\text{wb}(t)$, tantôt en utilisant la régression locale (RL). FG : fonte grise, FD : fonte ductile 120
10.9 Eauservice Lausanne, réseau en ville, simulation 9, statu quo stratifié par matériau . . 121
10.10 Prévision du nombre de défaillances $I1P$ à eauservice Lausanne, réseau de distribution en ville, scénario "les renouvellements sont plus fréquents autour des usagers vulnérables", simulation № 12 de l'annexe J 123
10.11 Validation du LEYP sur du court terme. Fenêtre d'apprentissage du modèle [2001 ; 2011], fenêtre de validation [2012,2013], Lausanne scenario "réseau de distribution en ville, non stratifié" 124
10.12 Comparaison des démarches "LEYP seul", OSMA et OPTIMEAU pour l'indicateur $I1P$, eauservice Lausanne, réseau en ville, simulation 4, scénario statu quo 125
10.13 Comparaison d'I1P, pour trois stratifications différentes, scénario "Statu quo" 126

11.1 Schéma des 3 éléments du risque 129

11.2 Méthode pour estimer le niveau d'un risque de dommage 129
11.3 Schéma du risque dérangement des usagers de la voirie suite à une fuite d'eau 132
11.4 Schéma de de SR_i à eauservice Lausanne. Vert : valeurs faibles, Orange : valeurs moyennes, Rouge : valeurs fortes 133
11.5 Schéma du risque de dérangement des consommateurs lié à une coupure d'eau (ou une baisse de volume) induite par une fuite sur le réseau 135
11.6 Schéma du risque de dégradation de biens par une inondation liée à une fuite 137
11.7 Schéma du risque de dommages aux biens ou aux personnes suite à un effondrement de terrain lié à une fuite 140
11.8 Schéma du risque de dégradation de nappes à cause des prélèvements pour l'eau potable 141

12.1 Les trois différents périmètres des analyses économiques 146
12.2 Avantages et inconvénients des différentes méthodes d'estimation des coûts (et des bénéfices), à partir de [Bouleau and Guérin-Schneider, 2011, p. 75] 148
12.3 Coût du renouvellement entre 2013 et 2120 avec 3 taux d'actualisation différents et deux évolutions de l'indice TP10a différents, réseaux d'exhaure (adduction), de transport et de distribution du Grand Lyon TVD, source [Large and Tomasian, 2014b] 152
12.4 Eauservice Lausanne, réseau en ville, $I1F$, Coût du renouvellement des canalisations sans actualisation. Scénario 9, Statu quo, stratifié par le matériau 153
12.5 Vue d'ensemble de la démarche OPTIMEAU 154

13.1 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Histogramme du linéaire En Service (ES) fin 2013 et mis Hors Service (HS) entre [2001 ; 2013] en fonction de leurs âges fin 2013 ou à leur mise HS. 156
13.2 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Trait : Survie prospective en linéaire pour deux scénarios. Gauche : scénario "statu quo" (RL : régression locale). Droite : scénario "on ne renouvelle plus". Carrés : Survie passée sur la fenêtre [2001 ; 2013] méthode Kaplan-Meier $Skm(t)$. 156
13.3 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Trait : Survie prospective en linéaire pour deux scénarios. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises" (RL : régression locale, Swb(t) : survie de Weibull). Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables". Points : Survie passée sur la fenêtre [2001 ; 2013] méthode Kaplan-Meier Skm(t). 157
13.4 Eauservice Lausanne, réseau en ville, entrée du modèle OPTIMEAU, linéaire en service fin 2013 (en km) en fonction des années de pose y_0 157
13.5 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I1R$ linéaire en service fin 2050 (en vert) et mis hors service entre [2014 ; 2050] (en rouge). Gauche : scénario "statu quo". Droite : scénario "on ne renouvelle plus". 158
13.6 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I1R$ linéaire en service fin 2050 (en vert) et mis hors service entre [2014 ; 2050] (en rouge). Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises". Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables". . 158
13.7 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I2R$ taux de renouvellement annuel (%) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "statu quo". Droite : scénario "on ne renouvelle plus". 159
13.8 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I2R$ taux de renouvellement annuel (%) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises". Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables". 159
13.9 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I2R$ taux de renouvellement annuel (%) global pour chaque année prospective [2014 ; 2050] dans 3 scénarios : scénario "Statu quo", scénario "Plus drastique avec les fontes grises" et scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables". 160

13.10 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I3R$ âge moyen du réseau (ans) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "statu quo". Droite : scénario "on ne renouvelle plus". 160
13.11 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I3R$ âge moyen du réseau (ans) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises". Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables". 161
13.12 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I1P$ nombre de **défaillances** pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "statu quo". Droite : scénario "on ne renouvelle plus". 161
13.13 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I1P$ nombre de **défaillances** pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises". Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables". 162
13.14 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I1P$ nombre de **défaillances** pour chaque année prospective [2014 ; 2050] dans 3 scénarios :"Statu quo", "Plus drastique avec les fontes grises", "Supérieur autour des éléments vulnérables". 162
13.15 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I2P$ risque de **coupure d'eau** (heures·clients du réseau par an pondérées) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "statu quo". Droite : scénario "on ne renouvelle plus". 163
13.16 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I2P$ risque de **coupure d'eau** (heures·clients du réseau par an pondérées) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises". Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables". 163
13.17 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I3P$ risque de **coupure de la voirie** (heures pondérées par an) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "statu quo". Droite : scénario "on ne renouvelle plus". 164
13.18 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I3P$ risque de **coupure de la voirie** (heures pondérées par an) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises". Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables". 164
13.19 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I4P$ risque **inondation** (mm^2·bar par an pondérées) chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "statu quo". Droite : scénario "on ne renouvelle plus". 165
13.20 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I4P$ risque **inondation** (mm^2·bar par an pondérées) chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises". Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables". 165
13.21 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I6P$ volume de fuite (m^3 par an) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "statu quo". Droite : scénario "on ne renouvelle plus". 166
13.22 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I6P$ volume de fuite (m^3 par an) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises". Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables". 166
13.23 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I1F$ coûts du renouvellement des canalisations chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "statu quo". Droite : scénario "on ne renouvelle plus". 167
13.24 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I1F$ coûts du renouvellement des canalisations chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises". Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables". 167
13.25 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I2F$ coûts des réparations des canalisations chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "statu quo". Droite : scénario "on ne renouvelle plus". 168
13.26 Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I2F$ coûts des réparations des défaillances chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises". Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables". 168

A.1 La survie des femmes en Europe au cours du temps, source [Vallin, 2005] 1

B.1 Carte des individus (tronçons) en fonction des deux premiers axes factoriels. Les individus sont colorisés selon leurs matériaux. 3
B.2 Carte des modalités des trois variables qualitatives selon les deux premiers axes factoriels. 4
B.3 Carte des square loading des 5 variables selon les deux premiers axes factoriels. 4
B.4 Cercle des corrélations des deux variables quantitatives selon les deux premiers axes factoriels. 5

C.1 Liste des membres ayant participé aux quatre comités techniques du projet OPTIMEAU 6

D.1 Les étapes de la décision de la mise hors service de tronçons par le SEDIF à court terme (en 2013) 7
D.2 Les étapes de la décision de la mise hors service de tronçons par le VEDIF à court terme (en 2010). TxD5 : Nombre de défaillances FR à l'hectomètre sur les 5 dernières années. OPV : Opérations sur la voirie. 8
D.3 Les 4 premières étapes de la décision de la mise hors service de tronçons par le Grand Lyon à court terme (en 2014). 8
D.4 La 5e étape de la décision de la mise hors service de tronçons par le Grand Lyon à court terme (en 2014). ILP : Indice Linéaire de Perte. 9

G.1 Age en 2013 du réseau du SEDIF service (8 296 km) fin 2012 et âge à la mise hors service des tronçons mis hors service (680 km) entre [1995, 2012] (si DDP connue) 13
G.2 Age en 2013 du réseau du Grand Lyon TVD en service (3 030 km) fin 2012 et âge à la mis hors service des tronçons mis hors service (123 km) entre [2002, 2012] en fonction des DDP (si DDP connue) 13
G.3 Age en 2013 du réseau d'Eauservice Lausanne en service (874 km) fin 2012 et âge à la mise hors service des tronçons mis hors service (136 km) entre [2001, 2012] en fonction des DDP (si DDP connue) 14

Liste des tableaux

1.1 Valeur à neuf, du patrimoine, existant en 2009 en France, lié la fourniture d'eau potable, en millions d'€ (M€), source [OIEau and E&Y, 2012, p. 30] 7
1.2 Les indicateurs de performance issus de la règlementation française concernant la gestion patrimoniale des réseaux 7
1.3 Exemple de seuils cibles et de critères évaluatifs associés 13

2.1 Modèles et logiciels de gestion des réseaux d'eau par famille principale 17

3.1 Caractéristiques territoriales des 3 terrains d'étude 26
3.2 Extrait de fichiers tronçons, IDT = Identifiant du tronçon, NA = not available 31
3.3 Extrait des fichiers environnement une fois rattaché aux tronçons grâce au SIG, IDT = Identifiant du tronçon 36
3.4 Extrait des fichiers défaillances, IDD = identifiant de la défaillance, IDT = Identifiant du tronçon 37
3.5 Ordre de grandeurs du nombre défaillances dans les trois terrains d'étude sur leur fenêtre d'observation 37

4.1 Les outils utilisés par les terrains d'étude pour leur gestion patrimoniale 40

5.1 Référentiel d'$ILVNC$ en fonction d'ILC [SMEGREG, 2009b, p. 31] 51

6.1 Ages médian et maximal à la mise hors service dans les terrains d'étude sur leurs fenêtres d'observation respectives 58
6.2 Synthèse des variables testées pour une stratification suivi de la méthode Kaplan-Meier par strate. (+++) variable fortement discriminante, (++) variable discriminante, (+) variable moyennement discriminante, (− − −) variable non discriminante, (cellule vide) variable non testée. Nb : Nombre 63

7.1 Sortie du modèle WeiCo appliqué à l'ensemble du réseau d'eauservice Lausanne 70
7.2 SI_i à Lausanne [Apotheloz, 2009, p.7] en fonction des caractéristiques des éléments vulnérables autour des conduites 71
7.3 Sortie du modèle WeiCo appliqué uniquement au réseau d'eauservice Lausanne situé en ville 72
7.4 Sortie du modèle WeiCo appliqué à l'ensemble du réseau du SEDIF. 73
7.5 P-values du test des résidus du Schoenfeld pour Weico appliqué à l'ensemble du réseau d'eauservice Lausanne 75
7.6 P-values du test des résidus du Schoenfeld pour Weico appliqué uniquement au réseau d'eauservice Lausanne situé en ville 75
7.7 P-values du test des résidus du Schoenfeld pour Weico appliqué à l'ensemble du réseau du SEDIF 75
7.8 Synthèse des variables testées dans le modèle WeiCo. (X) variable explicative, (− − −) variable non significative, (cellule vide) variable non testée. Nb : Nombre 78

8.1 Synthèse des éléments clés de 12 scénarios construits avec les données d'eauservice Lausanne . . . 85
8.2 Synthèse des éléments clés de 7 scénarios effectuées avec les données du SEDIF . . . 86
8.3 Synthèse des éléments clés de 8 scénarios effectuées avec les données du Grand Lyon . 86
8.4 Exemple de fonctions de survie de lois classiques . . . 88
8.5 Paramètres de la survie de Weibull calés sur le réseau entier du SEDIF . . . 89
8.6 Valeurs de SC_i à eauservice Lausanne, réseau en ville [Apotheloz, 2009, p. 5] . . . 91

9.1 Durée de maintien en service (en années), par famille de matériaux, selon les experts pour le SEDIF [Bruyeron and Re, 2012a,b] et dans d'autres documents [Cador, 2002a,b; Poinard, 2006; Pillot, 2011a; Poyri, 2011; Canalisateurs, 2012; Scholten, 2013] . . . 98
9.2 Comparaison de la prévision du modèle avec les observations réelles (en km). Mesure des écarts relatifs (en %) de six cohortes différentes (années de pose y_0), pour le linéaire en service en 2013, $LE_{y_0}(2013)$, le linéaire mis hors service entre [2008 ; 2013], $LH_{y_0}(2013)$ et le linéaire posé cette année là, $I1R_{y_0} = LE_{y_0}(2013) + LH_{y_0}(2013)$. . . . 107

10.1 Variables prises en compte dans quelques modèles déterministes de prévision des défaillances (X = oui, case vide = non, + = oui si stratification) . . . 109
10.2 Avantages et inconvénients de différents modèles Statistico-Probabilistes de prédiction des défaillances (tâche effectuée [+] correctement ou [−] pas correctement) . . . 110
10.3 Estimation des paramètres du modèle LEYP à Lausanne, réseau en ville, grande fenêtre d'apprentissage [2001,2013] . . . 118
10.4 Eauservice lausanne, réseau en ville stratifié selon le matériau, paramètres issus du modèle de LEYP . . . 120
10.5 Valeurs de SC à eauservice Lausanne [Apotheloz, 2009, p. 5] . . . 122
10.6 Paramètres du modèle de LEYP appliqués à eauservice Lausanne, simulation 12 . . . 122
10.7 Comparaison d'I1P à trois dates différentes, pour trois stratifications différentes, scénario Status quo . . . 126

11.1 Composantes prises en compte dans des indicateurs de risque référencés dans la littérature (X : oui ; cellule vide : non) . . . 131
11.2 Temps d'intervention sur chaque tronçon EDI_i à eauservice Lausanne [Apotheloz, 2009, p. 4] (PE = Polyéthylène, PRFV = Polyester Renforcé de Fibre de Verre) . . . 132
11.3 Temps d'intervention sur chaque tronçon EDI_i au Grand Lyon [Grand Lyon, 2013a] . 133
11.4 SR_i à Lausanne [Apotheloz, 2009] (TPL : Transports publics de la région Lausannoise) 133
11.5 SR_i au Grand Lyon [Grand Lyon, 2013a] . . . 133
11.6 SR_i dans le logiciel Australien PARMS ($/véhicule/heure) [Burn et al., 2002] . . . 134
11.7 SC_i à eauservice Lausanne [Apotheloz, 2009, p. 5] . . . 136
11.8 SC_i des éléments vulnérables au Grand Lyon autour du tronçon i . . . 136
11.9 Hiérarchisation de la vulnérabilité V_X des éléments vulnérables au Grand Lyon . . . 136
11.10 SI_i à Lausanne [Apotheloz, 2009, p.7] fonction des caractéristiques des biens vulnérables autour des conduites . . . 138
11.11 VFH_i [Grand Lyon, 2013] . . . 139
11.12 SFI_i [Grand Lyon, 2013] . . . 139
11.13 Critères pris en compte dans les indicateurs de risque d'Optimeau (X : oui ; cellule vide : non) . . . 144

12.1 Les coûts et les bénéfices estimés dans certains modèles et logiciels de gestion patrimoniale des canalisations d'eau potable. En jaune : effets directs sur la'AOEP. En rouge : effets indirects sur les Hommes. En bleu : effets induits sur l'environnement . . . 147
12.2 Périmètre des indicateurs du modèle OPTIMEAU. En jaune : effets directs sur l'AOEP. En rouge : effets indirects sociaux. En bleu : effets induits environnementaux . . . 147

12.3 Synthèse des différentes méthodes d'estimation des coûts et des bénéfices. (X) : critère pris en compte, (cellule vide) : critère non pris en compte 149
12.4 Valeurs des coûts unitaires de réparation des canalisations (en CHF par défaillance) à eauservice Lausanne, [Apotheloz, 2009, p. 3]. BATO : béton âme tôle, PE : Polyéthylène, PRFV = Polyester Renforcé de Fibre de Verre 153

A.1 Analogie entre la santé humaine et la santé des canalisations 2
A.2 Relation avec la fonction de survie 2

I.1 Les équivalents temps plein (ETP) associés au réseau d'eau potable dans chaque terrain d'étude au premier trimestre 2015. AO : Autorité organisatrice. 17

Abréviations

ACB	Analyse Coûts Bénéfices
AE	Agriculture et de l'Environnement
ARP	Annual Rehabilitation Programmes
AWARE-P	Advanced Water Asset REhabilitation - Portugal
AWWA-RF	American Water Works Association- Research Foundation (GB) - association américaine des travaux liés à l'eau – fondation pour la recherche (F)
C	Criticité hydraulique
CCI	Cost of Customer Impact
CTD	Cost of Traffic Disruption
CARE-W	Computer Aided REhabilitation of Water networks (GB) = réhabilitation des réseaux d'eau potable assistée par ordinateur (F)
CEMAGREF	CEntre du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et Forêts
CNRC	Conseil National de la Recherche du Canada
CSIRO	the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (GB) = l'organisation pour la recherche scientifique et industrielle du Commonwealth (F)
Dia	Diapositive
DFI	Damages due to Flooding in Industrial or commercial area
DSM	Damages due to Soil Movement
DT	Traffic Disruption
D-WARP	Distribution mains Water Mains Renewal Planner (GB) = Planificateur du renouvellement des canalisations d'eau potable (F)
ELECTRE	ELiminiation Et Choix Traduisant la REalité
ERSAR	Entidade Reguladora dos Serviços de Aguas e Resíduos de Portugal (P) = autorité de régulation des services d'eau et des déchets du Portugal (F)
F	France
FAIL	FAILure prédiction
FLR	Future Network Leakage Rate
FOWA	FOrschungsfonds WAsser
GB	Grande Bretagne
HCI	Hydraulic Critical Index
HDR	Habilitation à Diriger la Recherche
I-WARP	Individual distribution mains Quality Water Mains Renewal Planner
ILP	Indice Linéaire de Perte
INSA	Institut National des Sciences Appliquées
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
IRSTEA	Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
IST	Instituto Superior Técnico (P) = Institut supérieur technique (F)
IWA	International Water Association
LCC	Life Cycle Cost
LEYP	Linearly Extended Yule Process (GB) = processus de Yule linéairement étendu (F)
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil (P) =

	laboratoire national de génie civil (F)
LTP	Long Term Planning
MOSARE	MOdule Statistique d'Analyse des Réseaux d'Eau
NES	Note Etat de Santé
NETWATER	Network Water (GB) = réseau d'eau (F)
NHPP	Non Homogeneous Poisson Process
NRR	Natural Rate of Rises
P	Portugal
PARMS	Pipeline Asset and Risk Management System (GB) = système de gestion des risques et des canalisations (F)
PCWI	Predicted Critical Water Interruption
PHM	Proportionnal Hazard Model
PEF	Ponts Eaux et Forêts
PI	Performance Indicators
PiReM	Pipe Rehabilitation Management (PiReM)
PREVOIR	Plan de Renouvellement Et de Valorisation OptImisée des Réseaux
PRMS	Pipeline Risk Management System (GB) = système de gestion des risques liés aux canalisations (F)
PWI	Predicted Water Interruptions
Q-WARP	Quality Water Mains Renewal Planner
REL	RELiability Analysis
RET	Remaining Time to Failure (GB) = l'époque probable restant avant la casse (F)
RPQS	Rapport sur le Prix et la Qualité du Service
SEDIF	Syndicat des Eaux d'Ile de France
SIG	Système d'Information Géographique
SIROCO	Système Intégré d'aide au Renouvellement Optimisé des COnduites adapté aux petites et moyennes collectivités
T-WARP	Transmission mains Water Mains Renewal Planner
TCO-LCA	Total Cost of Ownership and Environmental Life Cycle Assessment of potable water pipework tool
TVD	Territoire dont Véolia était le Délégataire en 2013 et 2014
UDY	expected volume of Unmet Demand over one Year
VAN	Valeur Actuelle Nette
WARP	Water Mains Renewal Planner
WL	Water Loss
WLC	Whole Life Cost

Symboles

Thème	Signification
Le temps	
y	année calendaire quelconque
y_1	année calendaire du début de la fenêtre d'observation
y_{0i}	année calendaire de pose du tronçon i
y_{1i}	année calendaire du début de l'observation du tronçon i dans la fenêtre d'observation
y_2	année calendaire de fin de la fenêtre d'observation (ou d'apprentissage)
y_{2i}	année calendaire de fin d'observation du tronçon i dans la fenêtre d'observation
$y_{\dagger i}$	année calendaire à la mise hors service du tronçon i
T	âge à la mise hors service (variable aléatoire)
t	âge quelconque ou réalisation de la variables aléatoire T
$t-$	âge juste avant l'âge t
t_{1i}	âge du tronçon i au début de son observation dans la fenêtre d'observation
t_{2i}	âge du tronçon i à la fin de son observation dans la fenêtre d'observation
$t_{\dagger i}$	âge à la mise hors service du tronçon i
$\boldsymbol{A}$	Vecteur des probabilités des âges
c_i	censure du tronçon i
EDI	Temps de réparation (heures)
Les objets	
i	tronçon quelconque
ω	Strate quelconque
Ω	Réseau
Z	Covariable caractérisant le tronçon ou son environnement
Défaillances	
m	nombre de défaillances cumulées sur une fenêtre d'observation
$N(t)$	processus de comptage des défaillances de sa pose juqu'à son âge t
$NDOA$	Nombre moyen de défaillances observés par an sur une fenêtre d'observation
$\boldsymbol{D}_i$	Vecteur des nombres de défaillances pour un tronçon i donné de 1 an à 150 ans
$I1P_{2012+k,i}$	Nombre de défaillances pour un tronçon i donné l'année 2012+k
$I1P_{2012+k}$	Nombre de défaillances total pour tous les tronçons l'année 2012+k
Technique	
L_i	Longueur du tronçon i
$LE_{y_0}(y)$	Longueur en service l'année y des tronçons posés l'année y_0
$LH_{y_0}(y)$	Longueur mis hors service entre $[y_0; y]$ des tronçons posés l'année y_0
LI_{y_0}	Longueur initiale des tronçons posés l'année y_0
Q	Débit, demande
ϕ	Diamètre
H	Pression

TR	Taux de renouvellement
ILP	Indice linéaire de perte

Finance

r	Taux d'actualisation
C	Coûts (en € ou CHF)
C_{REN}	Coûts du renouvellement
C_{REP}	Coûts de la réparation
VAN	Valeur actuelle nette
B	Bénéfices en euros

Unité

km	kilomètres
m	mètres
mm	milimètres
mCE	mètres de colonne d'eau
€	euros
CHF	Francs Suisses (de la confédération hélvétique)
h	heures

Paramètre

$\boldsymbol{\Theta}$	Vecteur de paramètres
$\boldsymbol{\theta}$	Vecteur de paramètres

Math classique

d	différentielle
$\mathbb{E}(.)$	Espérance de .
e	exponentielle
$f(.)$	densité
$F(.)$	fonction de répartition
$S(.)$	fonction de survie
$h(.)$	fonction de risque instantané
$I\{.\}$	fonction indicatrice
$\sum$	somme
$\prod$	produit
$\mathbb{N}$	entier naturel
ln	logarithme népérien
log	Logarithme en base 10
P	Probabilité
$\boldsymbol{M}$	Matrice de transition de Markov Carrée
μ	moyenne
σ	écart-type
$'$	transposé
,	et
:	tel que
|	sachant
	Les variables sont en italiques.
	Les vecteurs sont des vecteurs colonnes, sauf si c'est précisé transposé avec un prime.
	Les vecteurs et les matrices sont en gras.
	Le contenu d'un vecteur est entre crochet.

Introduction

➢ Contexte

Dans les pays développés, l'eau potable est distribuée au domicile des usagers. Ce confort implique un long linéaire de canalisations avec une valeur patrimoniale élevée. En France, actuellement ce réseau mesure plus de 1 050 000 km [Dequesne et al., 2014] avec une valeur à neuf d'environ 138 milliards d'euros [OIEau and E&Y, 2012]. Les coûts (de pose, de renouvellement ou de réparation) pour gérer ces infrastructures sont très élevés.

Il est actuellement nécessaire de renouveler chaque année une fraction du linéaire des canalisations pour différentes causes. Certains tronçons sont en mauvais état et risquent [1] de provoquer des dommages, d'autres sont en état correct, mais obsolètes vis-à-vis de la règlementation (tels que ceux en plomb ou de diamètre trop petit pour la défense incendie). Par ailleurs les autorités organisatrices de l'eau potable (AOEP) doivent se coordonner avec des chantiers urbains (tels que voiries, tramways) qui ont prévu des interventions en sous-sol.

Comme expliqué par [Alegre and Coelho, 2012] les méthodes pour gérer les réseaux d'eau diffèrent de celles applicables à d'autres types d'infrastructures. Une des raisons est le fait que les réseaux ne sont pas remplaçables dans leur ensemble, seulement par fragment. Par conséquent, au sein d'un réseau, beaucoup d'âges différents de tronçons coexistent. De plus, les réseaux peuvent durer longtemps ($>$ 150 ans) et n'ont pas une durée de maintien en service fixe.

Les autorités organisatrices de l'eau potable sont des personnes morales publiques (communes, regroupements de communes) ayant la responsabilité de l'organisation du service public de l'eau. Les AOEP doivent décider du montant financier à dépenser (combien ?), de la méthode pour le dépenser (quels travaux ?) pour atteindre un certain niveau de performance [2] (quels résultats ?).

Les AOEP sont maîtres d'ouvrage des travaux réalisés. Généralement, des programmes des travaux sont élaborés, à court-terme, sur 1 à 4 ans et les montants financiers, affectés au renouvellement des canalisations, sont planifiés à moyen terme lors de l'élaboration des plans pluriannuels d'investissement (PPI). Ainsi, les PPI des trois terrains d'études auxquels nous ferons référence, sont élaborés entre 5 à 10 ans. Pour évaluer l'efficience et la durabilité d'une stratégie, il faut apprécier l'impact des actions sur le long terme (à des échelles plus lointaines que celles du PPI).

L'objectif des AOEP est d'avoir un rapport coûts-performance acceptable et pérenne. Le niveau de performance des services d'eau dépend directement des actions techniques réalisées sur le réseau. Les réparations relèvent du compte d'exploitation du service et le renouvellement du budget investissement. Les actions de court terme doivent être compatibles avec les objectifs de long terme. Par conséquent, pour comparer les montants financiers aux performances, il faut dépasser le moyen terme et analyser comment des stratégies techniques à long terme, c'est-à-dire au-delà des PPI, peuvent impacter les montants financiers à mettre en œuvre.

1. Ce terme a plusieurs sens, cf. encadré 7 page 67 pour lire sa définition.
2. Ce terme a plusieurs sens, cf. encadré 2 page 13 pour lire sa définition.

➢ Problématique et verrous scientifiques

Actuellement les gestionnaires ont deux problèmes métiers à résoudre à deux échelles temporelles très distinctes.

La première question opérationnelle est la suivante :
❶ "Si cette année l'AOEP a un budget de X €, quels travaux de renouvellement sont les plus bénéfiques à la performance du réseau sur du court terme ?" Des modèles de planification dits "à court-terme" (< 5 ans) permettant de répondre à cette question existent, et semblent en adéquation avec les besoins des AOEP à cette échelle temporelle.

La deuxième question opérationnelle est celle-ci :
❷ "Combien doit investir une AOEP pour le renouvellement de ses canalisations, dans les 5 à 20 ans à venir afin d'avoir un rapport coût-performance conforme à ses objectifs ?" Des modèles de planification, dits "à long terme" (> durée du PPI), existent et ils tentent de répondre à cette question. Néanmoins, ces modèles sont en général très frustes. Ils sont souvent basés sur l'âge moyen à la mise hors service des canalisations par analogie avec les pratiques comptables (cf. l'amortissement technique). Or :

- le lien entre l'âge moyen des conduites et la performance du service d'eau n'est pas direct ;
- l'âge à la mise hors service est une notion subjective car une AOEP peut réparer les défaillances pendant longtemps sans renouveler ;
- la mise hors service intègre le mauvais état des canalisations mais aussi notamment la coordination avec les chantiers urbains (voirie, gaz, etc.).

➢ Objectifs de la thèse

L'orientation générale de cette thèse s'inscrit dans le cadre de la recherche finalisée. Si la recherche fondamentale cherche à produire des connaissances, la recherche finalisée vise à améliorer une situation ou une pratique [Poinard, 2006]. L'objectif central de la thèse est de développer un modèle de planification à long-terme du renouvellement des canalisations d'eau potable. Nous appellerons ce modèle OPTIMEAU. Le modèle OPTIMEAU doit être utilisable sur le territoire du service d'eau et il doit être une aide à la décision pour les AOEP. Ensuite, les indicateurs issus du modèle long-terme OPTIMEAU doivent être connectables à ceux nécessaires dans les modèles moyen-terme et court-terme. Enfin, les stratégies prospectives simulées dans le modèle de planification à long terme OPTIMEAU doivent être réalistes par rapport aux pratiques des AOEP.

➢ Terrains d'étude

Le travail de thèse a été conduit en collaboration avec trois AOEP Européennes : le SEDIF (Syndicat des Eaux d'Ile de France), le Grand Lyon et eauservice Lausanne (cf. figure 2). Leurs données ont servi à tester et valider les modèles.

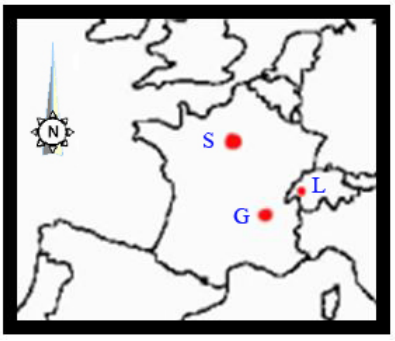


FIGURE 2: Localisation des 3 terrains d'étude. S : SEDIF, G : Grand Lyon, L : eauservice Lausanne

L'AOEP la plus importante est le SEDIF, alimentant plus de 4,3 millions d'usagers autour de Paris. Le travail a également été mené sur les territoires de la Métropole du Grand Lyon et d' eauservice

Lausanne, distribuant de l'eau potable à 1,3 million pour le premier et 360 000 personnes pour le second.

➢ Architecture du manuscrit

Afin de répondre à la question ❷ posée en introduction, à savoir :
"Combien doit investir une AOEP pour le renouvellement de ses canalisations, dans les 5 à 20 ans à venir pour avoir un rapport coût-performance acceptable et durable ?"
nous proposons de suivre les étapes de la roue de Deming[3] (cf. figure 3) à savoir : 1. Évaluation des pratiques passées, 2. Ajustement des objectifs, 3. Planification des actions futures et 4. Réalisation des actions.

- Dans la **première partie** de ce manuscrit, nous définirons ce qu'est une gestion patrimoniale de qualité. Puis après avoir présenté les données nécessaires et les modèles existants dans ce domaine nous expliquerons en quoi ils sont perfectibles.
- Au sein de la **seconde partie**, nous proposerons des méthodes pour évaluer les pratiques passées d'une AOEP, puis nous expliquerons en quoi consiste l'ajustement des objectifs d'une AOEP et comment s'appuyer sur l'évaluation du passé pour effectuer de la prospective.
- Enfin, dans la **troisième partie**, nous proposerons une démarche pour planifier à long terme les actions futures d'une AOEP en s'appuyant fortement sur l'évaluation menée dans la partie II. En permanence nous illustrerons nos propos avec des résultats issus des terrains d'études.

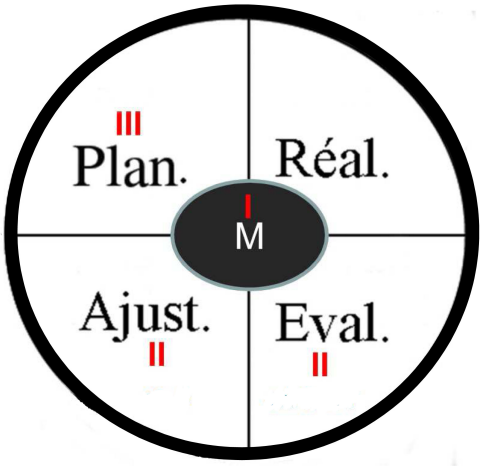


FIGURE 3: Schéma des parties du manuscrit (en rouge) sur la roue de Deming. M. = les Modèles, Eval.= Evaluer, Ajust. =Ajuster, Plan. = Planifier et Réal. = Réaliser

3. La roue de Deming sera présentée dans la section 1.3

Première partie

La gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable : État de l'art des besoins et des outils

Partie I : Introduction

Après la première desserte en eau potable jusqu'à la fin des années 1990, le problème majeur pour les AOEP réside dans la sécurisation de l'alimentation en eau potable. Cette sécurisation implique de se préoccuper de la gestion patrimoniale des réseaux, sujet qui a été mis à l'agenda des services d'eau [Goeldner-Gianella et al., 2016]. En France cette préoccupation est illustrée par le fait que l'Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement (ASTEE) a édité en 2013 deux guides sur ce sujet intitulés "gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable – politiques d'investissement et gestion des immobilisations" [ASTEE et al., 2013a] et "gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable - Élaboration du descriptif détaillé des ouvrages de transport et de distribution d'eau" [ASTEE et al., 2013b]. Dans ce contexte, la première partie du travail va s'occuper de dresser un état de l'art.

Nous allons exposer dans le chapitre 1 la méthode proposée pour aborder la question de la gestion patrimoniale. Nous présenterons, dans le chapitre 2 les outils et modèles disponibles dans ce domaine relevés à l'issu d'un travail bibliographique. Ensuite, dans le chapitre 3, nous aborderons la question de la disponibilité et de la qualité des données permettant de construire et de faire fonctionner les modèles. Enfin, dans le chapitre 4, nous détaillerons la démarche (et le modèle conjoint) que nous allons développer, effectuant principalement de la planification à long terme tout en s'appuyant sur l'évaluation du passé.

Chapitre 1

La gestion patrimoniale de qualité : état des connaissances actuelles

1.1 Caractérisation du patrimoine lié au service de l'eau potable et de ses enjeux

L'eau douce est particulièrement nécessaire pour la majorité des êtres vivants. En Europe, l'eau potable est distribuée au domicile de chaque habitant. Le patrimoine [1] est l'ensemble des équipements utilisés pour la fourniture du service [ISO-24512, 2007]. Pour le service d'eau potable, il se compose notamment du réseau (adduction, transport et distribution), des branchements, des stations de traitement et des réservoirs (cf. figure 1.1).

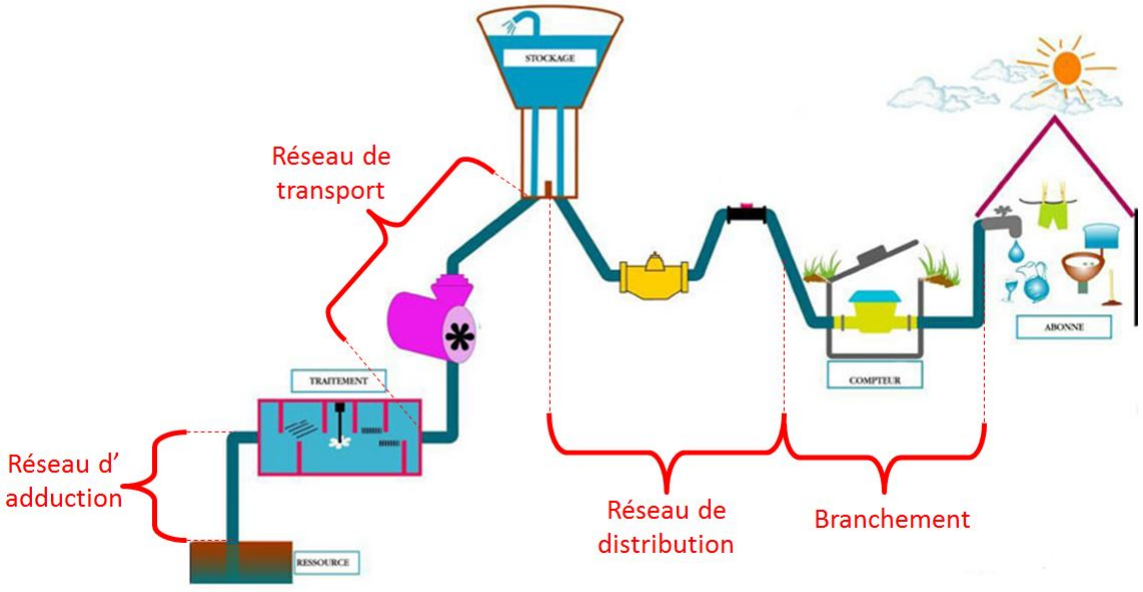


FIGURE 1.1: Les infrastructures liées à la fourniture d'eau potable, [CG-Marne, 2015]

La démarche OPTIMEAU, présentée ici, se focalise uniquement sur la gestion patrimoniale des réseaux. En effet, parmi les biens utilisés pour la fourniture des services, ce sont les plus chers et ceux dont l'état est le plus difficile à évaluer car ils sont majoritairement enterrés. L'étude [OIEau and E&Y, 2012] estime que les réseaux ont une valeur à neuf élevée. Ils représentent environ 85 % de la valeur du patrimoine eau potable (cf. tableau 1.1).

1. Ce mot est polysémique cf. encadré 1 page 7.

Patrimoine	Référence	Valeur	%
Stations traitement	16 371 000 m^3/j	9 900 M€	6 %
Réservoirs	9 142 000 m^3	2 000 M€	1 %
Réseaux	906 000 km	138 000 M€	85 %
Branchements	23 500 000	14 000 M€	8 %

Tableau 1.1: Valeur à neuf, du patrimoine, existant en 2009 en France, lié la fourniture d'eau potable, en millions d'€ (M€), source [OIEau and E&Y, 2012, p. 30]

Encadré 1 - Patrimoine : Sens et étymologie

Le mot patrimoine serait issu du latin *patrimonium* signifiant initialement tout ce qui est relatif au père (*pater*) par opposition au *matrimonium* relatif à la mère (*mater*). Ainsi au départ, ce mot était utilisé lors d'héritage pour parler des biens venant du côté du père. Puis, par extension, ce terme a évolué pour signifier tous les biens, l'argent et les titres d'héritage qui descendent, suivant les lois, des pères et mères à leurs enfants. Maintenant, ce mot est aussi employé dans un sens plus figuré il signifie aussi les choses qui sont les biens naturels d'un Homme ou d'une classe d'Hommes [Le littré, 2015].

Dans ce manuscrit, nous employons ce terme avec le sens de la dernière définition.

Les canalisations en mauvais état peuvent affecter de manière significative la qualité de l'eau et subir des fuites. En 2012, le taux de fuite des réseaux de distribution en France était en moyenne de 20% [Dequesne et al., 2015, p. 4]. Ces défaillances peuvent provoquer des coûts de réparation très élevés, la perte d'eau, des coupures d'eau et des dommages considérables aux infrastructures voisines. Par conséquent, les canalisations doivent être remplacées au meilleur moment possible [Li et al., 2015].

Les enjeux liés à la gestion des réseaux d'eau potable sont forts tant sur le volet économique (infrastructures à forte valeur), sociale (l'eau est indispensable à la survie des êtres humains) et environnementale (l'eau douce est une ressource précieuse à préserver pour la biosphère). Dans ce contexte, la règlementation française a imposé un cadre juridique strict.

1.2 Un cadre règlementaire strict

La règlementation française concernant la gestion patrimoniale des systèmes d'alimentation en eau potable repose en grande partie sur le code général des collectivités territoriales (CGCT) et le code de l'environnement. La règlementation incite les AOEP à avoir, notamment, une bonne gestion patrimoniale.

Ainsi, depuis la loi Barnier de 1995 (L2224-5 du CGCT), puis les décrets et arrêtés d'application (D2224-1 à D2224-3 du CGCT) relatifs aux rapports annuels sur le prix et la qualité des services d'eau potable et d'assainissement (RPQS), les AOEP doivent calculer chaque année une quinzaine d'indicateurs de performance dont quelques uns en liens avec la gestion patrimoniale (cf. tableau 1.2).

Code	Nom
P103.2	Indice de connaissance et de gestion patrimoniale des réseaux
P104.3	Rendement du réseau de distribution
P105.3	Indice linéaire des volumes non comptés
P106.3	Indice linéaire de perte en réseau
P107.3	Taux moyen de renouvellement des réseaux
P151.1	Taux d'occurence des interruptions de service non programmées

Tableau 1.2: Les indicateurs de performance issus de la règlementation française concernant la gestion patrimoniale des réseaux

Plus récemment, l'article 161 de la loi 2010-788 dite "Grenelle 2" complétée par un décret d'application du 27 janvier 2012, sont venus modifier ces codes. Cette nouvelle réglementation incite les collectivités compétentes en matière d'eau à développer une gestion patrimoniale de leurs réseaux, en vue notamment de limiter les pertes en eau dans les canalisations de distribution. Pour y parvenir, les collectivités doivent établir et mettre à jour annuellement un "descriptif détaillé des ouvrages de transport et de distribution d'eau potable" (L2224-7-1 du CGCT). Le descriptif devait être réalisé pour toutes les AOEP avant fin 2014, sous peine de se voir pénaliser par un doublement de la "redevance de prélèvement d'eau" [ASTEE et al., 2013a; MEDDE, 2015]. De plus, lorsque le taux de perte en eau du réseau s'avère supérieur à un taux fixé par décret selon les caractéristiques du service et de la ressource, les services publics de distribution d'eau doivent établir, avant la fin du second exercice suivant l'exercice pour lequel le dépassement a été constaté, un plan d'action pour réduire les fuites comprenant, s'il y a lieu, un projet de programme pluriannuel de travaux d'amélioration du réseau (L2224-7-1 du CGCT) [ONEMA, 2014, p.13].

Après avoir présenté le contexte de notre étude, nous allons exposer la méthode proposée pour conduire une politique de gestion patrimoniale.

1.3 La roue de Deming et le cylce de l'action : des méthodes éprouvées

Il est important qu'une AOEP gère correctement son patrimoine. La gestion patrimoniale est un processus permettant à un service public de l'eau d'orienter, de contrôler et d'optimiser la fourniture, la maintenance et la mise hors service des biens liés aux infrastructures, y compris les coûts nécessaires pour obtenir les performances spécifiées au cours de leur cycle de vie [ISO-24512, 2007].

Afin de savoir comment bien gérer un patrimoine, il est nécessaire de faire appel à des travaux en management de la qualité, notamment [2] [ISO-9001, 2005] et [ISO-55000, 2014]. En effet, selon la norme ISO 55 000, [Taillandier, 2009, p. 66] et [Alegre and Coelho, 2012, p. 53], une fois que le service d'eau a fixé ses propres **objectifs**, une gestion patrimoniale de bonne qualité doit enchaîner cycliquement les quatre grandes phases de la roue de Deming [3] (cf. figure 1.2) :

- Eval. : l'évaluation des actions passées afin de savoir si elles ont permis d'atteindre les objectifs escomptés ;
- Ajust. : le réajustement des objectifs si les actions passées n'ont pas permis d'atteindre les objectifs initiaux ou si elles les ont dépassé ;
- Plan. : la planification des actions futures ;
- Réal. : la réalisation des actions au jour le jour.

Cette démarche doit aboutir à des améliorations en continu.

La figure 1.2 schématise la roue de Deming. Le triangle jaune représente les règles et les normes au sein d'un service d'eau qui empêchent de baisser la qualité de la gestion patrimoniale.

2. ainsi que [Shewhart, 1989; Meyer, 2003; ISO-15288, 2003; ISO-9000, 2005; ISO-9001, 2005; ISO-9004, 2000; ISO-24510, 2007; ISO-24511, 2007; ISO-24512, 2007; ISO-31000, 2009; ISO-31010, 2009; ISO-51, 2014; ISO-73, 2009; Taillandier, 2009; Alegre and Coelho, 2012; ISO-55000, 2014; ISO-55001, 2014; ISO-55002, 2014]

3. La version originelle anglo-saxonne utilise l'acronyme PDCA pour Plan Do Check Act.

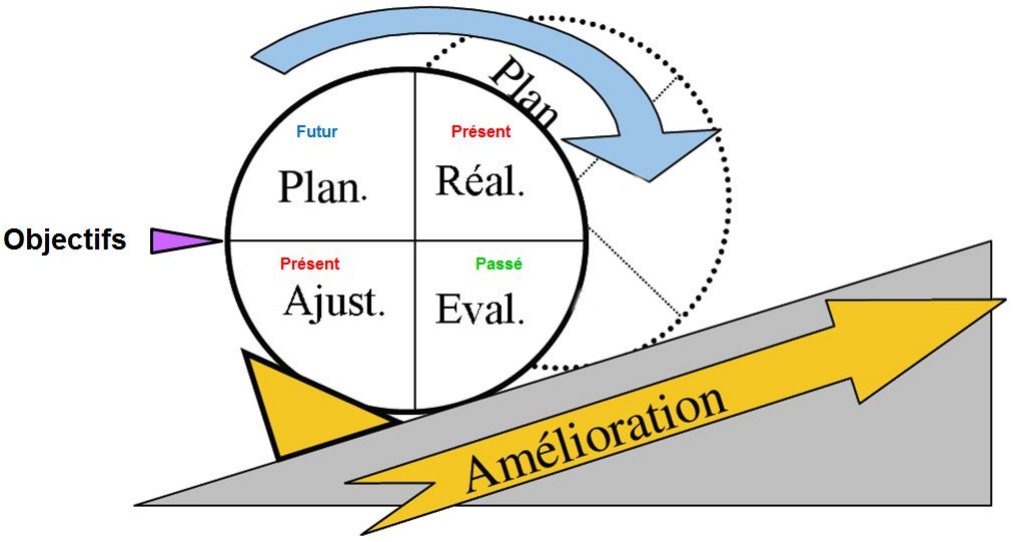


FIGURE 1.2: La roue de Deming, source [Deming, 1986]

Le cycle de l'action indique qu'une action est une activité qui a un objectif, qui doit produire des effets et qui nécessite des moyens pour sa mise en œuvre [OCDE, 2002; Mondot, 2008] (cf. figure 1.3).

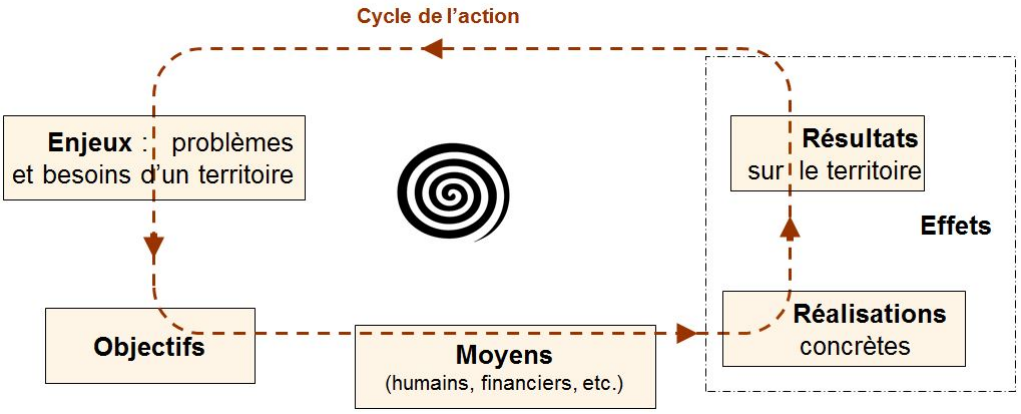


FIGURE 1.3: Le cyle de l'action, source [OCDE, 2002; Mondot, 2008]

En général, les objectifs sont fixés pour répondre aux enjeux, c'est à dire aux besoins et problèmes d'un territoire (tels qu'un nombre de coupures d'eau trop élevé, une nappe trop déficitaire). Les moyens sont les ressources humaines et financières attribuées à cet objectif (par exemple le montant investi dans le renouvellement des canalisations). Les effets sont les changements attendus ou non, directement liés ou non à une action effectuée. Au sein des effets, on distingue habituellement les réalisations et les résultats. Les **réalisations** concrètes ont fait l'objet d'une dépense et d'une mise en œuvre (comme le linéaire renouvelé) alors que les **résultats** (ou les performances) sont les effets sur le territoire (tels que le nombre de coupures d'eau, le volume de fuite).

La première étape de la démarche proposée concerne la définition des objectifs.

1.4 Se fixer des objectifs

Lors des enquêtes de terrain, quatre grandes familles d'objectifs ont été mises en évidence, pour les 3 AOEP étudiées (cf. figure 1.4). Ensuite, au sein de ces grandes familles des nuances pour chaque terrain d'étude sont apparues. Nous les développerons dans le chapitre 8. La première famille d'objectifs

est relative aux usagers : l'eau doit être de bonne qualité et en quantité suffisante. La seconde famille d'objectifs concerne la population et le cadre de vie autour des infrastructures d'eau : les AOEP doivent provoquer le moins possible de désagréments (comme les inondations, les coupures de la voirie) envers les tiers (usagers de la route, les citoyens, commerçants). La troisième famille d'objectifs est relative à l'environnement : éviter au maximum les fuites du réseaux. Enfin, la dernière famille d'objectifs concerne les aspects économiques : le prix de l'eau doit être acceptable pour les abonnés.

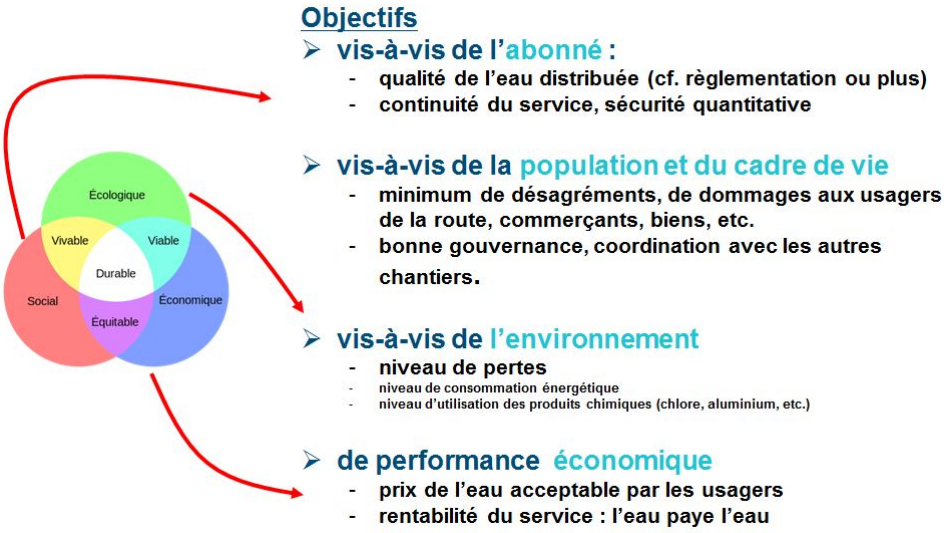


FIGURE 1.4: Les grandes familles d'objectifs et leurs liens avec les 3 piliers du développement durable

De plus, un bon objectif n'est pas que textuel, mais doit selon [Meyer, 2003] être SMART c'est à dire : Spécifique, Mesurable (par des indicateurs chiffrés), Ambitieux, Réaliste et Temporellement défini (avec une date de fin et éventuellement des points intermédiaires). Au sein du projet OPTIMEAU, il est apparu que l'aspect "mesurable" des objectifs, c'est à dire définir un seuil, était le plus difficile à expliciter avec les terrains d'étude.

Les objectifs des terrains d'étude doivent donc être traduits par un groupe d'indicateurs et des seuils cibles. Or, d'un point de vue théorique, selon [Alegre, 1997] et [Guérin-Schneider, 2001, p. 210] un groupe d'indicateurs doit avoir plusieurs qualités. Au travers d'échanges avec les terrains d'étude et de la revue bibliographique (cf. annexe H), nous avons retenu les indicateurs de la figure 1.5 ayant les caractéristiques recommandées à savoir :

1. représenter tous les aspects pertinents,
2. donner une traduction non biaisée de ces aspects,
3. être clairement définis (expressions et variables de calcul décrites),
4. être faciles à comprendre, même par un non spécialiste,
5. être relatifs à une période donnée (ici annuelle),
6. être applicables à des services ayant des caractéristiques différentes,
7. être en nombre aussi limité que possible, en évitant les aspects non essentiels.

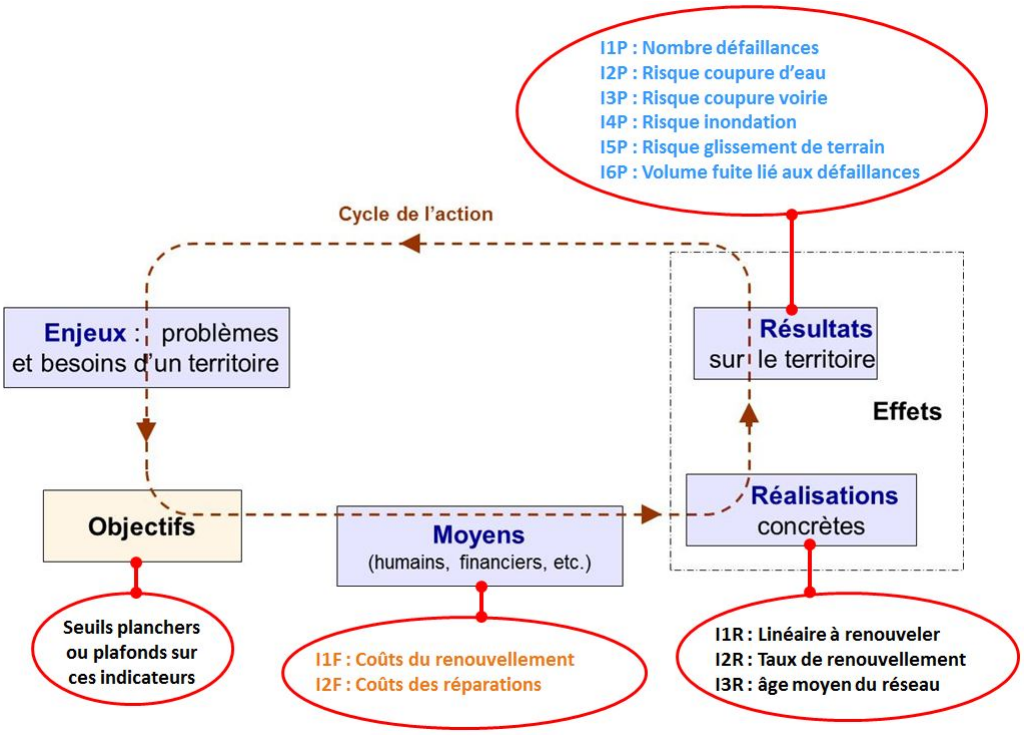


FIGURE 1.5: Les indicateurs d'OPTIMEAU

Ces indicateurs ont été choisis en collaboration avec les terrains d'étude en fonction de leurs pratiques et de leurs besoins (cf. annexe H pour le détail du choix). Ils peuvent être calculés sur du court terme, du moyen terme et du long terme. Ils sont répartis en 3 groupes : le premier concerne les moyens financiers (F), le second les réalisations (R) et le troisième relatif aux résultats ou performances (P) (cf. figure 1.5).
Tout d'abord, les 2 indicateurs de moyens financiers sont :

- $I1F$, le coût annuel du renouvellement du réseau
- $I2F$, le coût annuel de la réparation des défaillances du réseau

Ensuite, les 3 indicateurs de réalisations sont :

- $I1R$, le linéaire à renouveler chaque année
- $I2R$, le taux de renouvellement annuel
- $I3R$, l'âge moyen du réseau pour une année donnée

Enfin, les 6 indicateurs de résultats sont :

- $I1P$, le nombre annuel de défaillances du réseau
- $I2P$, le risque de coupure d'eau chez les abonnés suite à une défaillance du réseau
- $I3P$, le risque de perturbation des usagers de la voirie suite à une défaillance du réseau
- $I4P$, le risque de provoquer des dégâts sur des biens (chaussée, maisons) suite à une inondation induite par une défaillance du réseau
- $I5P$, le risque de provoquer des dégâts suite à un effondrement de terrain induit par une défaillance du réseau
- $I6P$, le volume de fuite lié aux défaillances du réseau.

En fonction des objectifs spécifiques de chaque terrain d'étude (cf. chapitre 8), la totalité des 11 indicateurs n'est pas forcément nécessaire. Par exemple, le risque d'effondrement de terrain est très faible à eauservice Lausanne, donc l'indicateur $I5P$ ne sera pas utilisé sur ce territoire. De plus, les

seuils cibles ont été fixés, principalement sur les coûts, le taux de renouvellement et le nombre de défaillances prévisionnelles. Nous détaillerons ces seuils dans le chapitre 8.

Pour mesurer l'atteinte des objectifs il est nécessaire de définir préalablement des critères d'évaluation.

1.5 Évaluer les actions

La figure 1.6 reprend les étapes classiques de l'évaluation du cycle d'une intervention publique [OCDE, 2002; Mondot, 2008]. L'évaluation des actions peut s'effectuer sur la base des 6 critères suivants :

1. La pertinence : Dans quelle mesure les objectifs répondent-ils aux enjeux (attentes des bénéficiaires, besoins, problèmes) et à leur éventuelle évolution ?
2. L'efficacité (succès, réussite) : Dans quelle mesure les objectifs ont-ils été atteints, compte tenu de leur importance relative ?
3. L'efficience (rapport efficacité/coût) : Dans quelle mesure les effets désirés sont-ils obtenus avec le moins de ressources possibles (au moindre coût) ?
4. La cohérence interne : Dans quelle mesure les ressources allouées étaient-elles adéquates pour répondre aux objectifs ?
5. La cohérence externe : Dans quelle mesure l'intervention s'inscrivait-elle en cohérence avec l'ensemble des politiques et interventions du territoire ?
6. La pérennité (viabilité, durabilité) : Dans quelle mesure les bénéfices résultant de l'intervention continuent-ils après la fin du programme d'actions ?

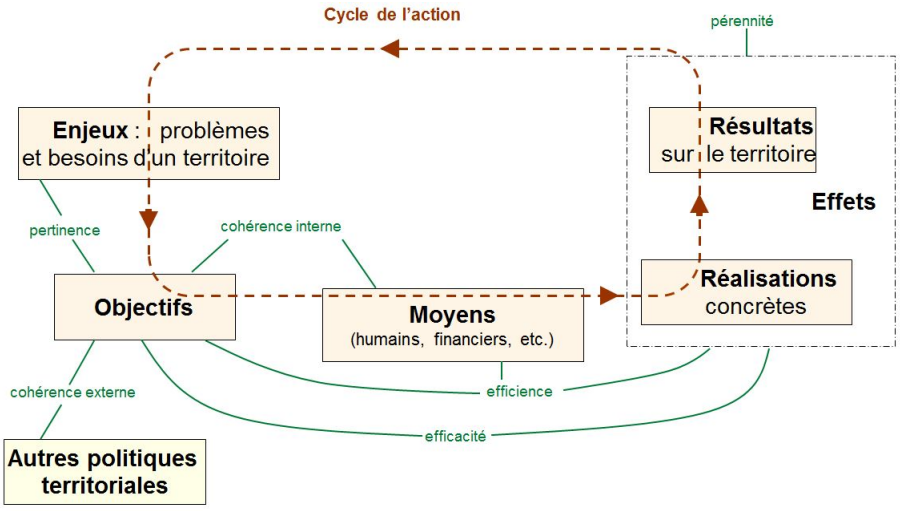


FIGURE 1.6: L'évaluation d'une intervention publique passée, source [OCDE, 2002; Mondot, 2008]

Encadré 2 - Performance : sens et étymologie

Le premier sens du mot performance est lié à la course de chevaux. Au XIXe siècle le terme est utilisé dans les haras anglais pour désigner chez un cheval sa façon de courir. Ainsi, le dictionnaire Le Robert le définit comme : la manière dont se comporte un cheval de course au cours d'une épreuve. En ce sens on parle d'une "bonne" ou d'une "mauvaise" performance. Immédiatement après, le dictionnaire montre le lien étroit qui existe entre la performance et le résultat : "Résultat chiffré obtenu au cours de cette épreuve. Tableau des épreuves subies par le même cheval". De telle façon qu'on peut lier les mots performances et résultats. On pourrait alors risquer une définition : "la performance est l'art d'obtenir les meilleurs résultats" [Elbée, 2015]. "Les meilleurs résultats", car le mot prend sa source dans la concurrence des chevaux qui courent. Ce n'est pas pour rien que le mot performance désigne –immédiatement après la course de chevaux- le résultat sportif des hommes cette fois. La performance suppose à l'origine un climat de rude concurrence, dont le sport est le modèle. L'individualisme de la performance est postérieur comme l'indique le dictionnaire. En filigrane, la performance suppose toujours la mesure d'une prestation que l'on compare aux autres. C'est vrai des champions, c'est aussi vrai des entreprises qui rivalisent d'ingéniosité pour augmenter leurs parts de marché et leurs profits, qui utilisent des indicateurs de résultats et pratiquent le benchmarking. C'est vrai du système scolaire où les meilleurs étudiants font les meilleures écoles. La culture de la performance s'exporte dans le monde de la médecine, de la politique et de l'administration [DGAFP, 2007, p. 17] [ISO-55001, 2014].
Dans cette thèse, nous utiliserons le mot performance uniquement selon deux sens.

1) Performance : Résultats mesurables d'un service d'eau [ISO-55000, 2014, p. 13].

2) Performance* : Efficience ou efficacité d'un service d'eau [Alegre and Coelho, 2012].

Pour les différencier, nous mettrons une étoile lorsque nous utiliserons le second sens.

Selon [Alegre and Coelho, 2012, p. 55], les indicateurs de performance* sont des mesures permettant de quantifier l'efficacité ou l'efficience de l'activité d'un service. Un indicateur de performance* est constitué d'une valeur exprimée en unités spécifiques, et d'une note liée à l'intervalle de confiance de l'indicateur. Les indicateurs de performance* peuvent être relatifs (par exemple en %) ou absolus (par exemple en $\$/m^3$). Les informations fournies par un indicateur de performance* sont le résultat d'une comparaison : entre la valeur observée et une valeur cible ou d'autres valeurs passées de ce même indicateur, ou avec les valeurs d'une autre AOEP pour ce même indicateur (cf. [ISO-24510, 2007], [ISO-24511, 2007], [ISO-24512, 2007], [Sjovold et al., 2008] et [Alegre et al., 2010]). Dans cette thèse, les indicateurs de performance* correspondent au premier cas. Par exemple, si eauservice Lausanne se fixe un seuil plafond (objectif) de 110 défaillances par an pour l'indicateur $I1P$, les critères évaluatifs pourraient être ceux présentés dans le tableau 1.3.

Jugement	Bon	Médiocre	Mauvais
Couleur associée	Vert	Jaune	Rouge
Valeur	$\frac{I1P}{110} \leq 1$	$1 < \frac{I1P}{110} \leq 1,2$	$1,2 < \frac{I1P}{110}$

Tableau 1.3: Exemple de seuils cibles et de critères évaluatifs associés

Une fois les actions passées évaluées, les objectifs peuvent être réajustés pour planifier de nouvelles actions. Nous allons maintenant effectuer un zoom sur cette étape.

1.6 Planifier les actions futures

1.6.1 Trois échelles de temps de planification

La planification est un processus qui permet de s'organiser à l'avance.
Actuellement, les services d'eau utilisent 3 échelles temporelles de planification : le court terme (1 à 4 ans à venir), le moyen terme (5 à 20 ans) et le long terme (20 à 170 ans à venir). Dans les prévisions à court terme, le budget est fixe et les modèles permettent d'obtenir une liste de tronçons à renouvelés hiérarchisés. Le moyen terme est l'échelle de construction des plans pluriannuels d'investissement (PPI) des services d'eau. A Lausanne le PPI est de 10 ans, au Grand Lyon le PPI est de 6 ans et au SEDIF le PPI dure 5 ans. Enfin, le long terme est l'échelle des stratégies patrimoniales. A cette échelle plusieurs stratégies peuvent être définies et simulées, puis, en comparant, les réalisations et les résultats prévus pour chaque stratégie aux objectifs du service, une stratégie peut être choisie ; sachant qu'une stratégie est une combinaison d'actions pour atteindre un ou plusieurs objectifs.

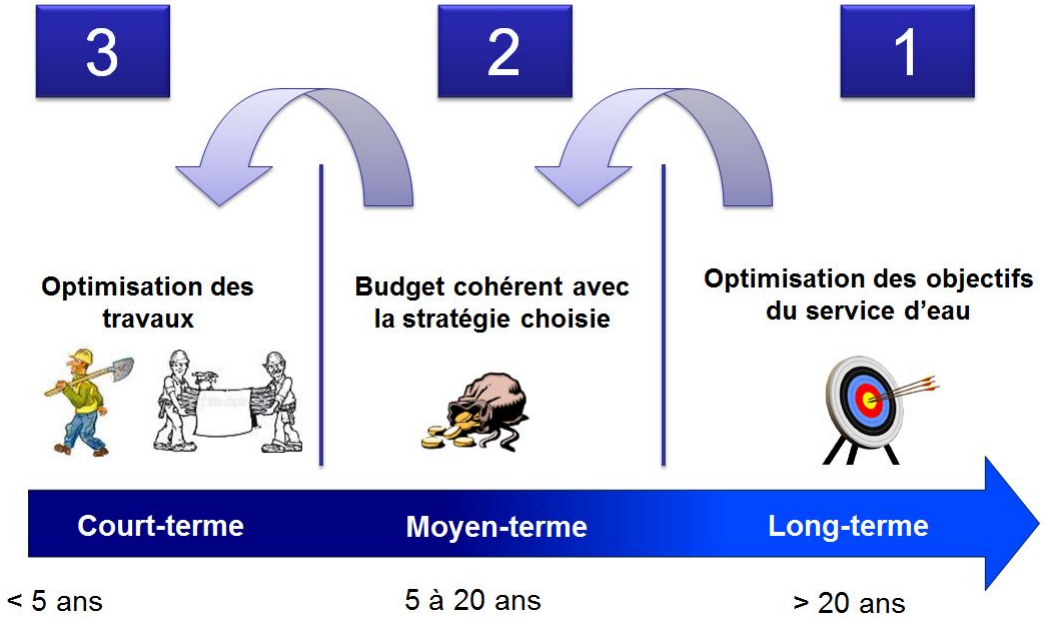


FIGURE 1.7: Les 3 échelles de planification employés par les services d'eau

Pour obtenir un rapport coûts-performances acceptable et durable, il semble logique de partir d'une vision long terme permettant de choisir une stratégie respectant les objectifs du service d'eau, puis d'en déduire le besoin en investissement à moyen terme. Il faut ensuite appliquer les méthodes de court terme permettant d'obtenir notamment pour l'année à venir une liste de tronçons hiérarchisés par niveau de besoin et opportunités en renouvellement (cf. figure 1.7).

Les indicateurs prévisionnels doivent pouvoir être calculés à toutes les échelles. Néanmoins, ce manuscrit se focalise sur la planification à long terme.

1.6.2 Focus sur la planification à long terme

Sur du long terme, les AOEP cherchent à trouver une solution optimale[4] selon un ensemble d'objectifs relatifs au service des eaux. Un processus décisionnel de planification à long terme permet de tester plusieurs scénarios prospectifs et de stratégies, puis d'évaluer pour chaque année future, en

4. Ce mot est polysémique cf. encadré 3 page 15.

fonction des seuils cibles, si les indicateurs prévisionnels sont bons, médiocres ou mauvais (cf. figure 1.8 a. b. et c.). Ensuite, en comparant les résultats de ces scénarios prospectifs et de ces stratégies (cf. figure 1.8 d.), le gestionnaire choisit un scénario et une stratégie. Puis, il décline cette stratégie long terme, d'abord en budget à moyen terme et enfin en linéaire, correspondant aux données d'entrée des modèles court terme.

Encadré 3 - Optimisation : Sens et étymologie

Optimisation serait issu de l'adjectif latin *optimus* signifiant le meilleur. Le terme optimiser fût d'abord utilisé dans le monde de l'entreprise pour signifier le fait d'atteindre un optimum de production. De nos jours, l'optimisation est une branche des mathématiques et de l'informatique en tant que disciplines, cherchant à modéliser, à analyser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à déterminer quelles sont la ou les solution(s) satisfaisant un objectif quantitatif tout en respectant d'éventuelles contraintes.
Dans ce manuscrit nous ne nous inscrivons pas dans une optique d'optimisation au sens strict (choix de la meilleure stratégie parmi l'ensemble des possibles) mais dans la comparaison de quelques stratégies.

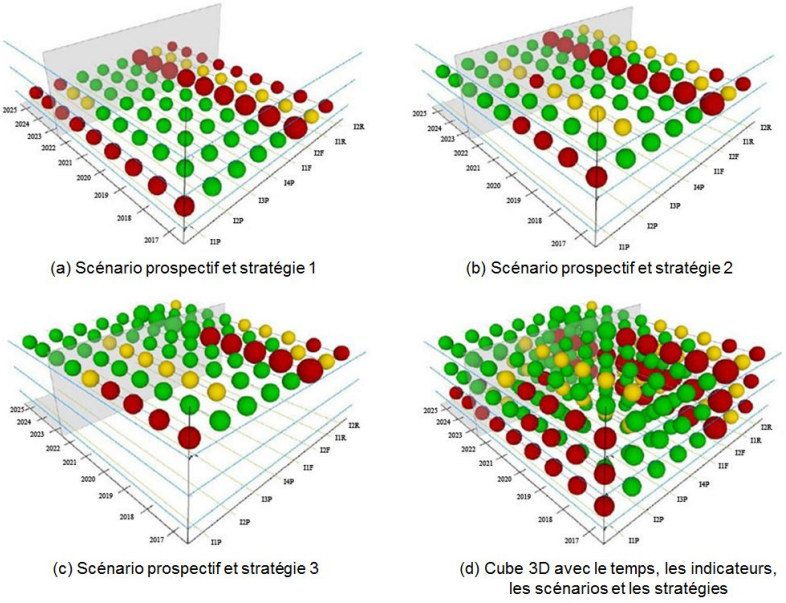


FIGURE 1.8: Représentation schématique des conséquences à long terme de différents scénarios et stratégies prospectives. Axe de gauche : horizon temporel. Axe de droite : les indicateurs. Axe vertical : les scénarios et les stratégies. A partir de [Alegre and Coelho, 2012, p. 68].

1.7 Conclusion

Après avoir présenté le contexte de notre travail, nous avons proposé une méthode pour aborder la gestion patrimoniale basée sur la roue de Deming et le cycle de l'action. Puis nous avons précisé ce que recouvre dans notre contexte l'ajustement des objectifs, l'évaluation et la planification des actions. Nous allons maintenant dresser un bilan des outils existants en indiquant leurs intérêts et leurs limitations.

Chapitre 2

Verrous des modèles de gestion patrimoniale

2.1 Cinq grandes familles de modèles de gestion patrimoniale

La démarche de gestion patrimoniale des réseaux de distribution est de plus en plus précise et de mieux en mieux maîtrisée grâce à des méthodes qui croisent informations structurelles sur le patrimoine et données d'exploitation [Gogien et al., 2014, p.89]. Les processus décisionnels de planification du renouvellement des canalisations de court-terme et de long-terme sont complexes et résultent d'un enchaînement de tâches en interaction que l'on peut regrouper en cinq grandes famille. Au sein de chaque famille, les relations entre données d'entrée et de sortie peuvent être modélisées. Nous les noterons M0, M1, M2, M3 et M4.

- M0 sont des modèles permettant d'estimer et de prévoir les linéaires à renouveler. Si l'on se réfère aux indicateurs définis à la figure 1.5, les modèles de la famille M0 permettent en sortie d'obtenir des indicateurs comme $I1R$ (linéaire à renouveler), $I2R$ (taux de renouvellement) et $I3R$ (âge moyen du réseau).
- M1 sont des modèles permettant de prévoir la dégradation des fonctions de base des canalisations. Par exemple en estimant le taux de défaillances futures, ou encore en prévoyant quelle canalisation est susceptible de générer des eaux rouges. Les modèles de la famille M1 permettent d'évaluer des indicateurs tels que $I1P$ (nombre de défaillances).
- M2 sont des modèles de risque, c'est à dire qu'ils prévoient les dommages potentiels lorsqu'un danger (défaillance, fuite, eau rouge) affecte des éléments vulnérables (consommateurs d'eau, véhicules, biens). Les modèles de la famille M2 produisent des indicateurs similaires à $I2P$ (risque coupure d'eau), $I3P$ (risque coupure route), $I4P$ (risque inondation), $I5P$ (risque effondrement de sol) et $I6P$ (volume de fuite).
- M3 sont des modèles financiers et économiques, ils peuvent monétariser les coûts des dommages, les coûts des réparations, les coûts du renouvellement, mais aussi les bénéfices (qui sont le plus souvent des dommages évités ou de la satisfaction des usagers). Ces coûts et bénéfices peuvent être calculés du point de vue du gestionnaire mais aussi du point de vue de la société dans son ensemble. Les modèles de la famille M3 s'intéressent notamment à des indicateurs tels que $I1F$ (coût renouvellement) et $I2F$ (coût réparation).
- M4 sont des modèles décisionnels. Ils décrivent l'architecture organisationnelle qui préside à la décision. Ils permettent de prendre en compte les priorités, les préférences du gestionnaire, les décisions et d'arbitrer entre tous ces indicateurs.

Nom “Logiciel” et/ou référence du modèle	M0 Linéaire	M1 dégradation	M2 risque	M3 économique	M4 décisionnel
[Kettler and Goulter, 1985]		X			
[Jacobs and Kerney, 1994]		X			
“W-PIPER” [Van Blaricum et al., 1995]		X			
[McMullen, 1982]		X			
[Rajani and Makar, 2000]		X			
[Shamir and Howard, 1979]		X			
[Walski and Pelliccia, 1982]		X			
[Clark et al., 1982]		X			
“UtilNets” [Hadzilacos et al., 2000]		X			
“CARE-W-Poisson” [Malandain, 1999]		X			
“I-WARP” [Kleiner and Rajani, 2010a,b; Kleiner et al., 2010]		X			
“D-WARP” [Kleiner and Rajani, 2004, 2007]		X			
“T-WARP” [CNRC, 2015]		X			
“Q-WARP” [Liu et al., 2012]		X			
“PRMS” [Essamin et al., 2004]		X			
“M-PRAWDS” [Kleiner et al., 1998a,b]		X			
“CARE-W-PHM” Weibull [Eisenbeis, 1994]		X			
[Mailhot et al., 2000]		X			
“CARE-W-NHPP” [Røstum, 2000]		X			
“Casses” LEYP [Le Gat, 2009; Renaud et al., 2011b, 2012]		X			
[Randall-Smith et al., 1992]		X			
“CARE-W-RelNet” [Viščor, 1997]			X		
“CARE-W-FailNetReliab” [Saegrov, 2005]			X		
“Criticité” [Brémond et al., 2005], [Renaud et al., 2011a]			X		
“Vision” [UKWIR, 2009; Veolia, 2015]			X		
“Synergi Water” Reliability Module [DNV, 2015a]			X		
“WaterCAD” darwing Design Module [Bentley, 2015]			X		
“PICCOLO” module Criticité [Safege, 2015]			X		
“VFA.Facility” [VFA, 2015]				X	
[Walski, 1987]				X	
[Park, 2000], [Loganathan et al., 2002]				X	
LCC [Delaney and Kabiling, 2008]			X	X	X
“GANetXL” [Savic et al., 2011]				X	X
“PHARE-ECO” [Humbel et al., 2014]				X	X
“FAST” [Fichtner, 2015]				X	X
“MRP” [DNV, 2015b]				X	X
“MISER” [Tynemarch, 2015a]				X	X
“APT” [APTgroup, 2015]				X	X
“SALVO” [Morris, 2014]				X	X
“RIVA” [RivaModeling, 2015]				X	X
“PIONEER” [Tynemarch, 2015b]				X	X
“Patrimoine Expert” [Naldeo, 2013]	X			X	X
“NESSIE” [Rogers and Grigg, 2006], [AWWA, 2010]	X			X	
“PARMS Risks” [Marlow et al., 2014], [Marlow and Beale, 2015]			X	X	
“CARE-W-ARP” [Le Gauffre et al., 2002a]			X	X	X
“SIROCO” [Brémond et al., 2005]			X	X	X
[Cador, 2002a,b]	X				
[Scholten, 2013]		X	X	X	X
“MOSARE” [Veolia, 2015]		X	X		X
“PREVOIR” [Suez, 2015]		X	X	X	X
“WiLCO” [Engelhardt and Skipworth, 2005]		X	X	X	X
“AWARE-P” [Vitorino et al., 2012]		X	X	X	X
“PARMS reloaded” [Marlow et al., 2014], [Marlow and Beale, 2015]	X	X	X	X	X
“Kanew” [Kropp, 2013]	X	X	X	X	X
“PiReM” [Fuchs-Hanusch et al., 2008]	X	X	X	X	X
“TCO-LCA” [Bayart and Vargas, 2015]	X	X	X	X	X

Tableau 2.1: Modèles et logiciels de gestion des réseaux d’eau par famille principale

Les outils et méthodes issus de la recherche peuvent contenir un ou plusieurs modèles de ces 5 grandes familles décrites précédemment. Suite à une longue revue bibliographique et des enquêtes auprès d'expert, nous avons pu créer le tableau 2.1 qui synthétise les outils et modèles existant actuellement et comment ils se positionnent par rapport aux 5 familles de modèles. Par exemple, "Casses" est un logiciel qui effectue des prédictions sur le nombre de défaillances à venir. C'est donc un logiciel contenant un modèle de la famille M1 (cf. tableau 2.1). En revanche, le logiciel "CARE-W-ARP"[1], si on lui fournit des probabilités de défaillances par tronçon et des caractéristiques des éléments vulnérables, est capable de calculer des indicateurs de risque, un indicateur financier puis d'intégrer ces indicateurs dans un modèle décisionnel nommé ELECTRE-TRI [Roy, 1996]. C'est donc un logiciel contenant des modèles de la famille M2, M3 et M4.

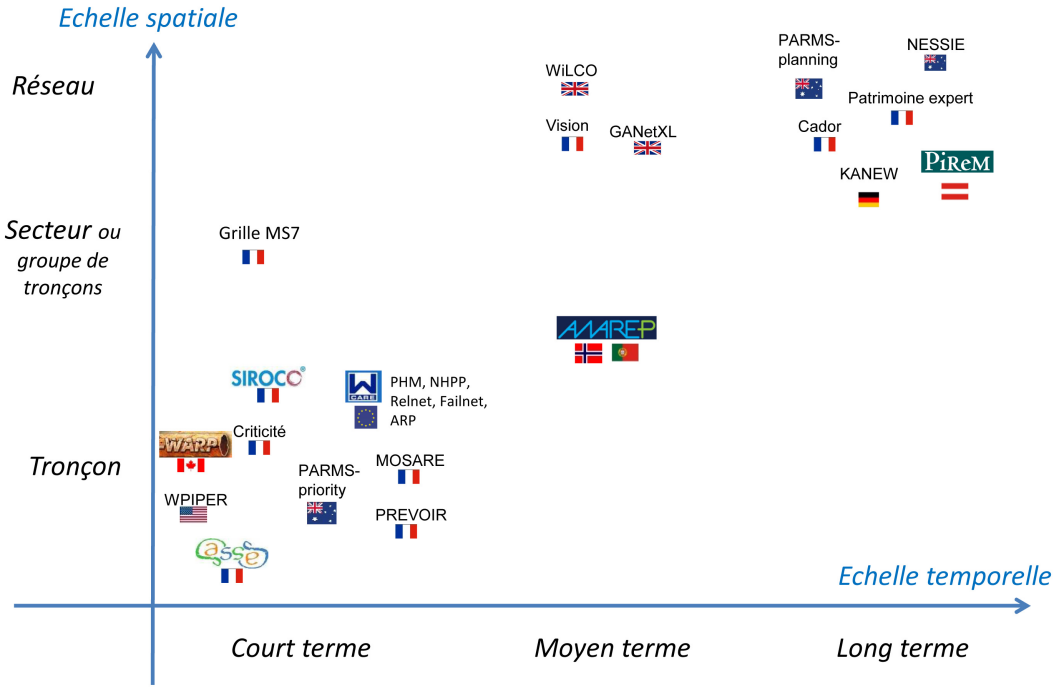


FIGURE 2.1: Les gammes d'échelle spatio-temporelle pour lesquelles certains logiciels de gestion patrimoniale ont été conçu

De plus, ces modèles peuvent être utilisés sur du long-terme, du moyen terme ou du court-terme, mais en général ils ont une échelle de temps pour laquelle ils ont été conçus et c'est sur cette dernière qu'ils fonctionnent le mieux (cf. figure 2.1). Par exemple, "Casses" a été conçu principalement pour faire des prévisions sur du court-terme (1 à 4 ans) à l'échelle du tronçon élémentaire.
La figure 2.1 qui représente le meilleur domaine de fonctionnement de certains logiciels et modèles, illustre que la majorité des modèles existants sont principalement de court-terme. Cette figure met aussi en évidence que l'échelle territoriale (spatiale) est en général corrélée à l'échelle temporelle. Les modèles court terme raisonnent le plus souvent à l'échelle du tronçon alors que les modèles long terme fonctionnent le plus souvent à l'échelle du réseau ou d'un groupe de tronçons.

Une description plus complète de ces modèles est disponible dans les revues bibliographiques suivantes : [Rajani and Kleiner, 2001], [Kleiner and Rajani, 2001], [Marlow et al., 2009], [Ugarelli and Bruaset, 2010], [Liu et al., 2012], [St. Clair and Sinha, 2012], [Large, 2013], [Nishiyama and Filion, 2013], [Marlow et al., 2014], [Large et al., 2015a] et [Scheidegger et al., 2015].

En résumé, les modèles de gestion patrimoniale appartiennent à 5 grandes familles de modèles. Certains modèles ont été conçus pour des processus de planification de court-terme et d'autres de long-terme. La majorité des modèles sont de court-terme. Ceci s'explique notamment par l'histoire de

1. CARE-W-ARP : Computer Aided REhabilitation of Water networks- Annual Rehabilitation Programmes

l'adduction d'eau en Europe que nous allons présenter en suivant. Analysons, maintenant de plus près comment fonctionnent ces processus, en commençant par celui de court-terme.

2.2 Le processus de planification à court-terme

2.2.1 Un besoin ancien

En France et en Suisse, l'histoire de l'adduction d'eau, et donc des besoins en termes de planification du renouvellement des canalisations, peut se diviser en 3 grandes phases que nous nommerons A, B et C (cf. figure 2.2).

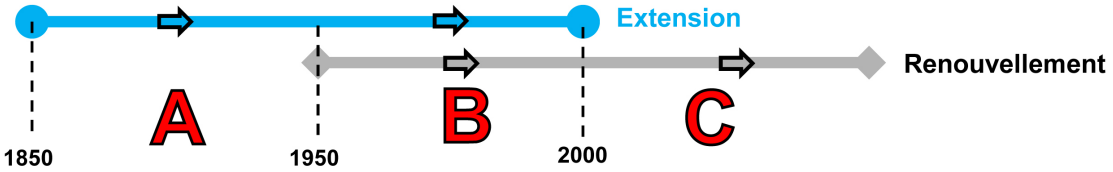


FIGURE 2.2: Schéma des 3 grandes périodes dans l'adduction d'eau potable en France

Tout d'abord, durant la première phase A, où l'extension du réseau était la préoccupation dominante, les questions majoritaires concernaient le dimensionnement, le positionnement des réseaux et la qualité d'eau. Au départ, l'eau potable fut acheminée dans les fontaines au niveau des centre-villes (cf. figure 2.3), puis, les réseaux ont été installés dans les centres-villes, ensuite en périphérie urbaine et enfin dans le monde rural. Les premiers en Europe à mettre au point des ouvrages d'adduction d'eau avec des tuyaux en terre cuite sont les Crétois vers 2500 av. JC [Poinard, 2006]. Ensuite, certaines villes du monde antique se sont dotées de réseaux importants comme Rome et *Lugdunum* (Lyon). En effet, au début du 1er millénaire, Lyon avait un réseau de 220 km d'aqueducs. Du Moyen-Age jusqu'au XIXe siècle, les porteurs d'eau sont pratiquement les seuls moyens de se procurer de l'eau à domicile. C'est dans la deuxième moitié du XIXe siècle que la distribution à domicile va véritablement voir le jour [Poinard, 2006].

FIGURE 2.3: Fontaine de la Palud, au centre ville de Lausanne en 1800, aquarelle de Louis Ducros représentant la vie autour de cette fontaine, source [Bouffard and Creux, 1973, p. 51]

Ensuite, durant la seconde phase B, le réseau d'eau potable continue de s'étendre mais les problématiques liées au renouvellement commencent à être de plus en plus prégnantes. Les premiers modèles de planification du renouvellement à court terme voient le jour. Cela correspond à peu près à la forte phase d'équipement en infrastructures pour la distribution d'eau potable, qui a eu lieu entre la fin des années 1950 et le début des années 2000.

Enfin, durant la troisème phase C, c'est à dire à partir de 2000, le réseau de distribution d'eau potable dessert la quasi-totalité de la population française, il ne s'étend presque plus [Ajuste et al., 2004, p. 6] (cf. figure 2.4). Les besoins en termes de planification du renouvellement à long, moyen, court terme et de modèles associés deviennent de plus en plus forts.

Concernant nos terrains d'étude, en règle générale leurs besoins en outils de planification à court terme ont été comblés depuis plusieurs années. Par exemple, à eauservice Lausanne, les méthodes décisionnelles court terme font partie du programme nommé MEDIREL (MEthode de Diagnostic du Réseau d'Eau de Lausanne). Ce programme a démarré dès 1996 et continue encore aujourd'hui. Son objectif est de déterminer pour une conduite donnée s'il est préférable de la changer, de la réhabiliter ou de ne rien faire. Les outils de ce programme se sont améliorés et ont évolué vers 2003, suite aux collaborations d'eauservice notamment avec le CEMAGREF-IRSTEA, l'INSA (Lyon), les participants et utilisateurs finaux du projet CARE-W [Eauservice, 2013a].

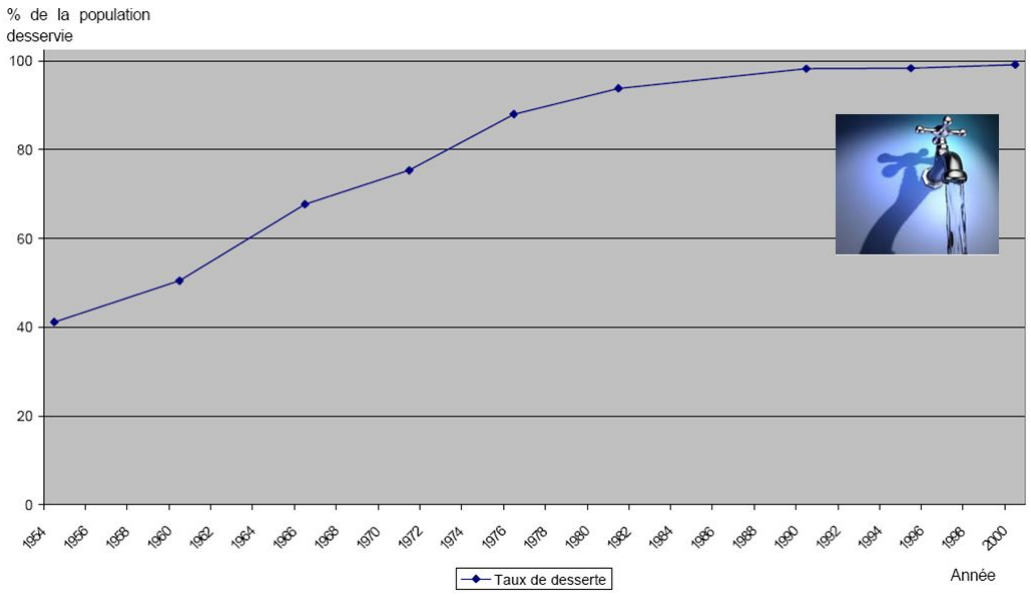


FIGURE 2.4: Evolution du taux de desserte par le réseau de distribution d'eau potable en France, source [Ajuste et al., 2004, p. 6]

En résumé, la phase de la première desserte en eau potable est actuellement dépassée. Nous sommes aujourd'hui dans la phase C de renouvellement des réseaux. Le premier besoin pour les décideurs consiste en la hiérarchisation des tronçons, d'où la naissance à partir de la fin des années 80 de modèles à court terme (cf. [McMullen, 1982]).

2.2.2 Des modèles nombreux et efficaces

Un processus court-terme permet de hiérarchiser les tronçons par besoins et opportunités en renouvellement. A cette échelle, 4 types de modèles sont enchaînés : M1, puis M2, ensuite M3 et enfin M4. Il est important de noter qu'en règle générale, sur du court terme, les sorties de M1 font partie des entrées de M2. De même, les sorties de M2 font partie des entrées de M3. Et enfin, les sorties de M3

font partie des entrées de M4 (cf. figure 2.5). Les modèles à court terme sont très nombreux et d'assez bonne qualité (cf. la revue bibliographique [Large, 2013]).

Pour illustrer comment les AOEP réalisent leurs processus décisionnels à court-terme, il semble plus pédagogique de présenter un exemple concret. Ici, notre choix s'est porté sur eauservice Lausanne. En effet, leur processus décisionnel est le plus formalisé parmi nos 3 terrains d'étude. Chaque année les critères décisionnels court terme, de chaque AOEP ou de leurs délégataires peuvent changer sensiblement. Par conséquent nous ne présenterons, ici, en détail qu'une seule année. Le processus décisionnel, en 2011, d'eauservice Lausanne peut se diviser en 5 étapes (cf. figures 2.6 et 2.7).

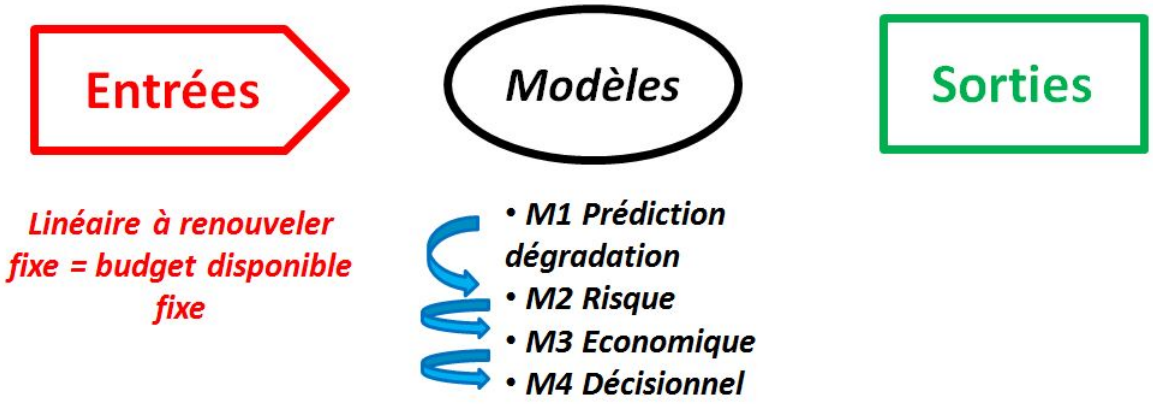


FIGURE 2.5: Visualisation de l'enchainement des 4 modèles sur du court terme

1. La probabilité de défaillances [2] (fuites) futures est estimée pour chaque tronçon. Cette évaluation est effectuée à l'aide du logiciel "Casses" via le modèle statistico-probabiliste de [Le Gat, 2009] de la famille M1. Les données d'entrée de ce modèle sont les données sur les défaillances, les caractéristiques des tronçons et de leur environnement.

2. Les niveaux de différents risques de dommages associés à la défaillance d'un tronçon sont ensuite calculés. C'est le cas par exemple des risque de coupure d'eau chez l'usager, de perturbation du trafic dans la voie concernée ou d'inondation. Ces calculs sont effectués à l'aide des logiciels "CARE-W-ARP" et "CARE-W-Relnet [3]" (contenant des modèles M2) à partir du croisement de la probabilité de défaillance obtenue à l'étape 1, du temps de réparation, et des caractéristiques des éléments vulnérables (tels que usagers, véhicules, biens) : leur quantité, leur vulnérabilité et leur valeur [Le Gauffre et al., 2002a].

3. Un indicateur de coûts est calculé. A partir de la probabilité de défaillances de l'étape 1, le coût de réparation des canalisations est estimé. Ce calcul est réalisé dans "CARE-W-ARP" [Apotheloz, 2009], contenant un modèle M3.

4. Les indicateurs de risque et/ou de coûts et/ou d'autres critères d'arbitrage (tels que la sécurité incendie : augmentation de la capacité hydraulique de conduites existantes) sont pondérés par eauservice et intégrés dans le modèle décisionnel ELECTRE TRI [Roy, 1996], modèle de la famille M4, contenu dans "CARE-W-ARP". Cette pondération permet à eauservice d'indiquer ses préférences, orientant ses futures solutions de compromis [Poinard, 2006]. Les coefficients de pondération employés en entrée d'ELECTRE TRI sont indiqués en rouge sur la figure 2.6. En sortie, eauservice obtient plusieurs groupes de tronçons classés par besoin en renouvellement croissant (cf. figure 2.6). Eauservice établit alors une carte SIG (Système d'Information Géographique) avec un code couleur (de très urgent [rouge], à moyennement [orange] et peu urgent [vert]).

2. Le mot défaillance est polysémique, pour en savoir plus cf. encadré 4 page 36.
3. Relnet : RELiability analysis of NETwork

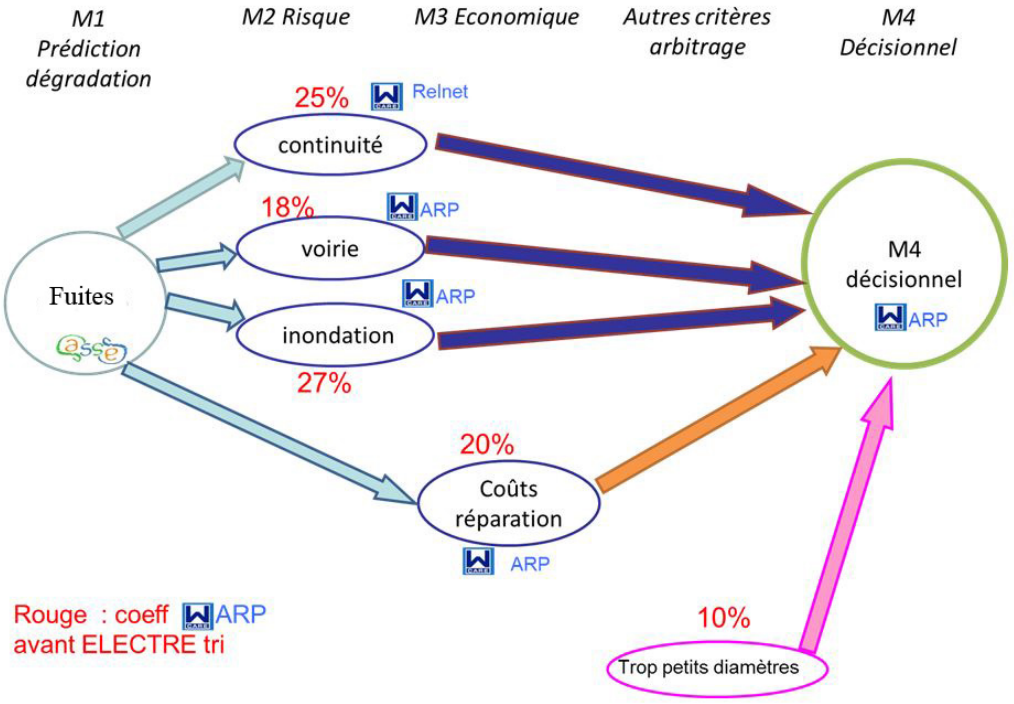


FIGURE 2.6: Les quatre premières étapes de la décision de la mise hors service de tronçons à eauservice Lausanne, en 2011, visualisation de l'enchainement des 4 modèles M1, M2, M3, M4

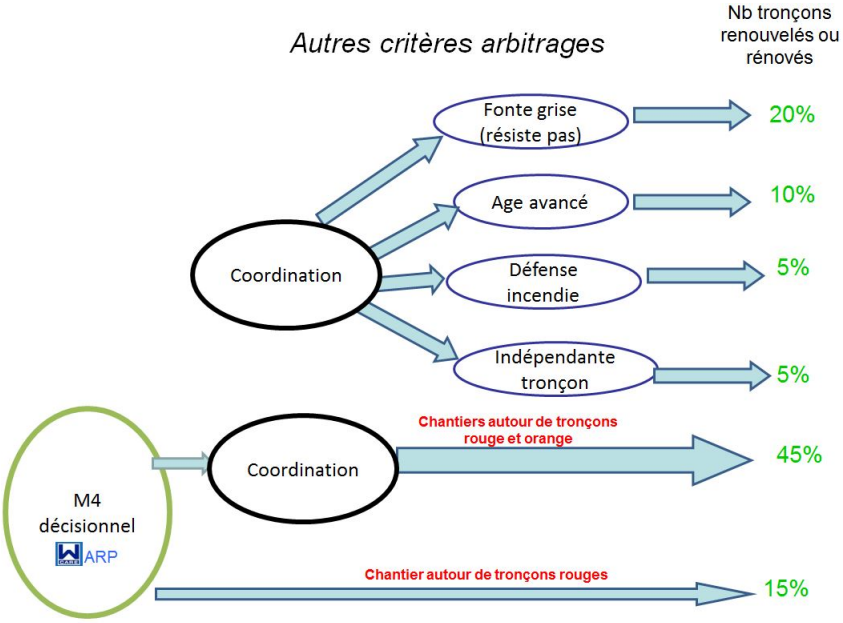


FIGURE 2.7: La cinquième étape de la décision de la mise hors service de tronçons à eauservice Lausanne, en 2011 (les pourcentages servent à donner des ordres de grandeurs)

5. Enfin, eauservice Lausanne prend en compte les opportunités et les contraintes externes à son service. Elles répondent à des besoins de coordination avec d'autres services (voirie, gaz, électricité, chauffage urbain, assainissement) ou d'autres chantiers urbains (construction d'un tramway). Ainsi, si des travaux en lien avec le gaz sont prévus dans une rue où à l'issue de l'étape 4 les tronçons d'eauservice ne sont ni rouge, ni orange, eauservice va utiliser d'autres critères d'arbitrage (est-ce que les tronçons de cette rue sont en fonte grise ? Sont-ils âgés ?) afin de décider de participer au chantier (cf. figure 2.7). En croisant toutes ces informations, eauservice établit la liste définitive des chantiers (groupes de tronçons adjacents) à mettre en œuvre dans l'année ou les 3 ans à venir. Par exemple, en 2011, environ 60% des chantiers étaient construit autour de tronçons rouge ou orange (cf. étape 4) dont 45%

de ces chantiers étaient réalisés en coordination avec d'autres services. 40% des chantiers n'étaient pas autour de tronçons rouge ou orange, mais du fait de la coordination, eauservice est intervenu (cf. les pourcentage en vert de la figure 2.7).

L'analyse de ces 5 étapes illustre la grande complexité du processus décisionnel, qui tient compte de multiples contraintes. Si les outils de départ sont effectivement des modèles statistiques de performance, ils ne pèsent au final qu'une part modérée dans le choix des canalisations renouvelées. Une conséquence, particulièrement importante pour la suite de notre travail est que les mises hors service des tronçons résultent partiellement de leur niveau de détérioration intrinsèque et largement des modalités de prise de décision dans le système organisationnel, technique et urbain.

La revue bibliographique et les enquêtes menées auprès des gestionnaires montrent, lorsqu'elles sont formalisées, que les méthodes court terme appliquées par les AOEP suivent, en général, ce même genre de démarche. Néanmoins, pour chacune de ces étapes, les critères pris en compte peuvent varier sensiblement d'un service à l'autre. Les risques et les poids associés ne sont pas forcément les mêmes d'une AOEP à l'autre. Par exemple le Grand Lyon gère un territoire avec des cavités souterraines (balmes) qui, à cause de fuites d'eau, peuvent provoquer des effondrements de terrains et de bâtiments. Par conséquent, le risque effondrement a un poids important sur le Grand Lyon [Large and Tomasian, 2014b] alors qu'il est nul pour le service des eaux de Lausanne et le SEDIF [Large and Tomasian, 2014c, p. 34-38] (cf. annexe D). Autre exemple, tous les services prennent en compte dans leur décision le budget disponible mais le service des eaux de Lausanne est le seul à introduire un indicateur de coût dans sa décision (le coût de la réparation). Enfin, le poids de la coordination avec les autres services varie d'une AOEP à l'autre : il est très fort à Lausanne (environ 85% des chantiers [4]) alors qu'elle est plus faible au SEDIF (environ 33% des chantiers menés par Veolia [5] et 5% des chantiers menés par le SEDIF [6]) et encore moindre au Grand Lyon TVD [7] (environ 25% des chantiers [8])(cf. annexe D).

Pour enchaîner ces différentes étapes, il existe une grande variété de modèles et de logiciels sensiblement différents [Large, 2013; Large et al., 2015a]. Ces modèles ne sont certes pas parfaits mais les meilleurs d'entre eux sont capables de réaliser des prédictions qui sont assez voisines de ce qui est observé sur le terrain ensuite. La marge de progression dans le domaine des modèles à court terme est limitée. Ce ne sera pas notre objectif dans cette thèse, mais nous avons formalisé ce processus de décision court terme, dans une logique d'évaluation et d'interrelation avec le processus de décision long terme.

2.3 Le processus de planification à long-terme

2.3.1 Un besoin plus récent

Actuellement, en France et en Suisse, la grande vague d'extension du réseau d'eau potable est terminée. Le linéaire continue d'augmenter mais bien plus lentement qu'avant les années 2000. Maintenant, les AOEP doivent gérer des réseaux majoritairement en place, dont une partie peut être très âgée. Or, depuis la crise financière de 2007 et la crise des dettes publiques de 2009, les budgets des AOEP sont de plus en plus contraints. Par conséquent, la question principale qui se pose aux AOEP est : quel linéaire de canalisation doivent-elles renouveler pour avoir un ratio coûts-performances acceptable et durable ? Les AOEP expriment donc un fort besoin de modèle long terme efficace. C'est dans cette optique que s'inscrit cette recherche.

4. Chiffre pour l'année 2011
5. Chiffre pour l'année 2010
6. Chiffre pour l'année 2013
7. Territoire dont Véolia était le délégataire en 2013 et 2014.
8. Chiffre pour l'année 2014

Répondre à cette question est complexe pour plusieurs raisons.
Tout d'abord, les AOEP doivent faire face à une augmentation du nombre de leurs objectifs, notamment vis-à-vis de la qualité de l'eau distribuée (tels que la faible teneur en plomb et en chlorures de vinyle monomère [CVM]). Ensuite, si le réseau d'eau est l'un des premiers a avoir conquis les sols, les réseaux se multiplient maintenant dans le sous-sol : gaz, électricité, téléphonie, chauffage urbain, fibre internet. Les sols, particulièrement en zone urbaine, sont de plus en plus encombrés (cf. figure 2.8). La gestion des réseaux d'eau potable demande donc de plus en plus de coordination avec les gestionnaires des autres réseaux, mais aussi avec les responsables de la voirie et des transports en commun.

FIGURE 2.8: Un sous-sol encombré en zone urbaine dense, source [Boesch, 2014]

Pour répondre à la question métier posée en introduction : *"Combien doit investir une AOEP pour le renouvellement de ses canalisations, dans les 5 à 20 ans à venir afin d'avoir un rapport coût-performance acceptable et durable ?"*, il est nécessaire d'employer un processus décisionnel de long-terme. A cette échelle, les 5 familles de modèles présentées dans la section 2.1 peuvent être utilisées. Tout d'abord le modèle : M0 permettant de prévoir le linéaire à renouveler puis : "M1 dégradation", "M2 risque", M3 économique" et "M4 décisionnel" (cf. figure 2.9).

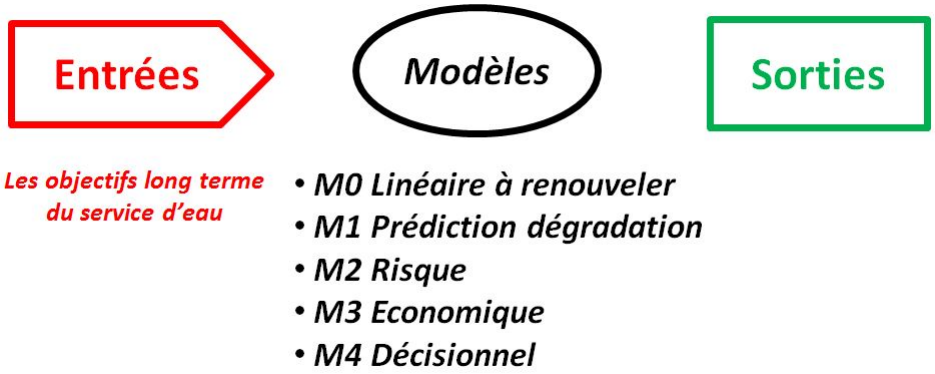


FIGURE 2.9: Visualisation des 5 modèles sur du long terme

2.3.2 Des modèles peu nombreux avec des lacunes importantes

L'analyse approfondie des modèles décisionnels existants [Large, 2013] a montré que les méthodes décisionnelles long terme sont souvent inexistantes ou déconnectées des méthodes décisionnelles de moyen terme et de court terme. La revue bibliographique et les enquêtes de terrain ont mis en évidence 3 types de modèles prévisionnels à long terme.

Le premier type de modèles (cf. [Jarrett et al., 2001], [Saegrov et al., 2003], [Engelhardt and Skipworth, 2005], PARMS [Marlow et al., 2009]) est basée sur un seuil de défaillances par tronçon que les gestionnaires ne souhaiteraient pas dépasser. Cependant, lorsqu'on a demandé aux services

d'eau quels étaient leurs propres seuils, ils n'ont pas su répondre. En effet, en général le nombre de défaillances, à l'échelle du tronçon, n'est pas le seul indicateur que les AOEP utilisent pour se fixer des objectifs. Les AOEP cherchent plutôt en général un équilibre entre les coûts et les performances à l'échelle du réseau.

Le second type de modèles (cf. [Cador, 2002a,b], Patrimoine Expert [Naldeo, 2013]) se résume simplement à additionner une durée de maintien en service hypothétique fixe à la date de pose du tronçon pour obtenir sa date de mise hors service présumée. Cette démarche ne convainc pas les praticiens. En effet, elle fait l'hypothèse que les canalisations doivent être remplacées à âge fixe, ce qui est non pertinent : en fonction des contraintes que subit une canalisation, certaines très âgées peuvent être en bon état et d'autres très jeunes en mauvais état. De plus, aucun lien n'est fait entre cette durée de maintien en service hypothétique et le processus décisionnel opérationnel passé (coordination, risques), dont résulte effectivement l'âge à la mise hors service [Renaud et al., 2012].

Le troisième type de modèles paraît le plus prometteur (cf. Kanew [Herz, 2002], [Kropp, 2013], Nessie [AWWA, 2010], PiReM [Fuchs-Hanusch et al., 2008]). Elle suppose que les canalisations ne sont pas renouvelées à âge fixe mais selon une distribution statistique (courbes en cloche) de l'âge à la mise hors service. Néanmoins ces modèles allemand, australien et autrichien ne sont utilisés par aucun service d'eau en France. La faiblesse majeure de ces modèles est que la distribution des âges à la mise hors service n'est pas issue des données des services d'eau, mais est établie a priori à partir d'hypothèses souvent grossières. La question de la représentativité et de la pertinence de ces courbes de survie par rapport aux données du service, à son processus de décision moyen et court terme passé, et à ses objectifs futurs demeure entière.

2.4 Conclusion

Les modèles court-terme sont nombreux et répondent aux besoins des AOEP alors que les modèles long-terme sont peu nombreux et présentent des lacunes importantes.
En effet, les durées de maintien en service de ces modèles sont déconnectées de la réalité du fonctionnement actuel des réseaux et des pratiques passées. Pour améliorer l'approche long terme comme on se propose de l'effectuer, il est nécessaire de s'intéresser aux données disponibles des terrains d'étude et à leur qualité. Nous allons présenter les données dont nous disposons et les traitements que nous avons dus mettre en œuvre pour pallier certaines de leurs lacunes.

Chapitre 3

Complexité des données liées aux réseaux d'eau potable

3.1 Des contextes locaux variés

3.1.1 Des pratiques hétérogènes au sein de territoires géographiques distincts

Les trois terrains d'étude ont des caractéristiques très différentes. Le modèle long terme OPTIMEAU doit être adaptable à l'ensemble des situations.

En premier lieu, le **nombre d'usagers** desservis est très variable d'un terrain d'étude à l'autre (cf. tableau 3.1 et figure 3.1). Le SEDIF est l'AOEP la plus importante d'Europe. Il distribue l'eau potable à 149 communes, autour de Paris, correspondant à 4 300 000 usagers sur un territoire de 756 km^2 via un réseau de 8 300 km. Au SEDIF, la densité de population très élevée atteint 5 690 hab/km^2 [SEDIF, 2012a,b, 2013b,c, 2014a,b, 2015b,c].
La métropole du Grand Lyon, dessert l'eau potable à 1 300 000 habitants répartis dans 58 communes, dont Lyon, s'étendant sur 515 km^2 via un réseau de 3 900 km. La densité est élevée : 2 524 hab/km^2 [Grand Lyon, 2013b,c, 2014b,c]. Notons que les résultats présentés par la suite correspondent uniquement au Grand Lyon TVD (Territoire dont Véolia était le Délégataire en 2013). Il contient 80% de la population du Grand Lyon pour environ 3 100 km de réseau.
Eauservice Lausanne alimente au détail [1] 17 communes, en gros [2] 14 communes et en appoint [3] saisonnier 56 autres communes. Cela représente un bassin de population de 360 000 personnes alimentées via un réseau de 900 km, ce qui fait d'Eauservice Lausanne le troisième distributeur d'eau en Suisse. Sur le territoire d'Eauservice Lausanne, la densité est d'environ 1 430 hab/km^2 [Eauservice, 2014, 2015b]. Cependant, cette moyenne cache de fortes disparités entre communes. Ainsi, la commune de Lausanne a une densité de 3 227 hab/km^2 alors que la commune de Rossinière a une densité de 24 hab/km^2.

	Usagers	Communes	Réseau	Superficie	Densité	Hab/km de réseau
SEDIF	4 300 000	149	8 300 km	756 km^2	5 690 hab/km^2	518 hab/km
Grand Lyon	1 300 000	58	3 900 km	515 km^2	2 524 hab/km^2	333 hab/km
ES Lausanne	360 000	87	900 km	230 km^2	1 430 hab/km^2	400 hab/km

Tableau 3.1: Caractéristiques territoriales des 3 terrains d'étude

1. 100% de leur consommation
2. > 50% de leur consommation
3. < 50% de leur consommation

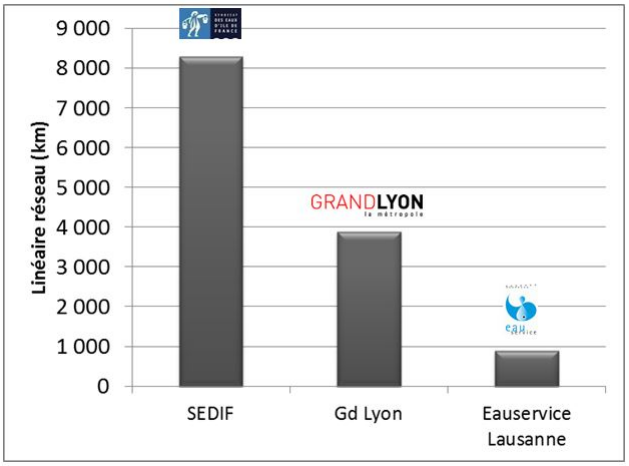


FIGURE 3.1: Les linéaires de réseaux des 3 terrains d'étude

En second lieu, l'**origine de l'eau** est soit souterraine soit superficielle. Au SEDIF, l'eau provient à 95 % de rivières (Marne, Seine et Oise). Les abonnés du Grand Lyon sont alimentés principalement (à 95%) par l'eau issue du champ captant de Crépieux Charmy, dont le prélèvement se situe au sein de la nappe alluviale d'accompagnement du Rhône. Sur le territoire d'eauservice Lausanne, l'eau produite provient environ à 50% du lac Léman, à 21% du lac de Bret et à 29% de 120 sources réparties entre le pied du Jura et les Préalpes.

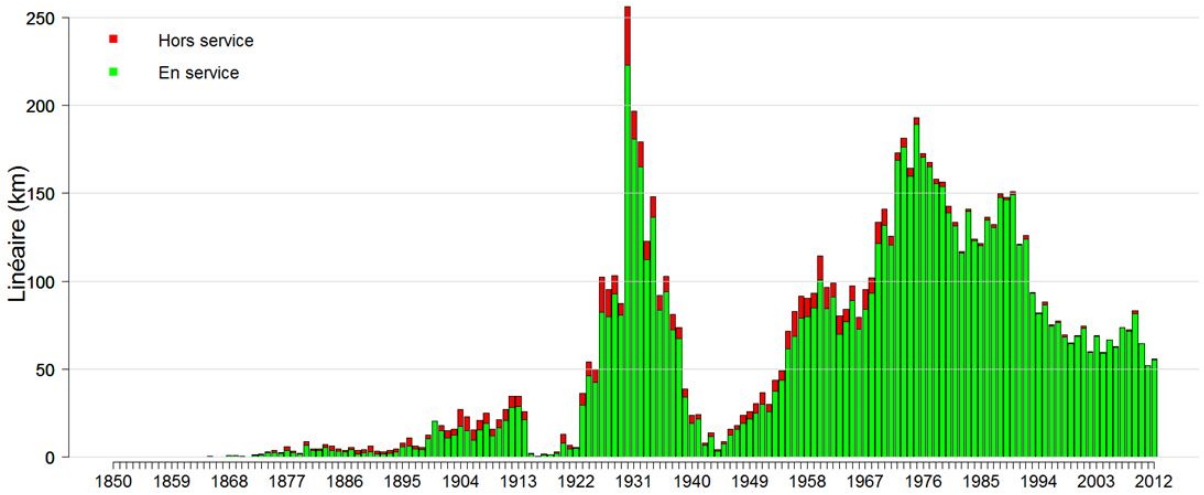


FIGURE 3.2: Linéaire du réseau du SEDIF en service (8 296 km) fin 2012 et mis hors service (680 km) entre [1995, 2012] en fonction des dates de pose (DDP)

En troisième lieu, l'**historique de pose** et les vitesses de renouvellement des réseaux passées n'ont pas été les mêmes sur chaque territoire. Les histogrammes des figures 3.2, 3.3, 3.4 et de l'annexe G illustrent la distribution des dates de pose des canalisations, qu'elles soient encore en service à ce jour (vert) ou qu'elles aient été mises hors service avant (rouge). Comme nous le verrons, leur représentativité dépend de la qualité (exhaustivité, justesse) des données. Ainsi, d'après les données que les AOEP nous ont fournies, en 2013, le plus vieux tronçon encore en service avait 161 ans au SEDIF contre 143 ans à Lausanne et 113 ans au Grand Lyon TVD. L'âge moyen de chaque réseau était de 46 ans, 39 ans et 36 ans respectivement pour le SEDIF, eauservice Lausanne et le Grand Lyon TVD [4]. Cependant, gardons en mémoire qu'un tronçon âgé n'est pas forcément en mauvais état (cf. notion de survie sélective). Le réseau du SEDIF a été nettement marqué par la première et la seconde

4. Concernant l'âge du plus vieux tronçon et l'âge moyen, les notes correspondant à l'intervalle de confiance de ces valeurs sont A pour le SEDIF et Lausanne et B pour le Grand Lyon TVD (cf. section 6.2.3 pour voir la méthode de calcul)

guerre mondiale, périodes où la longueur de canalisation posée a été très faible (cf. figure 3.2). Ensuite, à l'inverse les périodes de reconstruction d'après guerre sont clairement observables sur ce territoire. L'impact de ces périodes historiques est moins visible sur les deux autres territoires (cf. figures 3.3 et 3.4). En revanche, à Lausanne, un pic dans la pose est perceptible entre 1900 et 1902, cela correspond à une histoire locale (cf. figure 3.4). A ces dates, les Lausannois ne souhaitaient pas boire l'eau issue des lacs, par conséquent un long linéaire de réseaux a été posé rapidement pour capter l'eau de sources en altitude. Enfin, au Grand Lyon TVD le rythme de pose a été croissant jusqu'à la fin des années 80 (cf. figures 3.3).

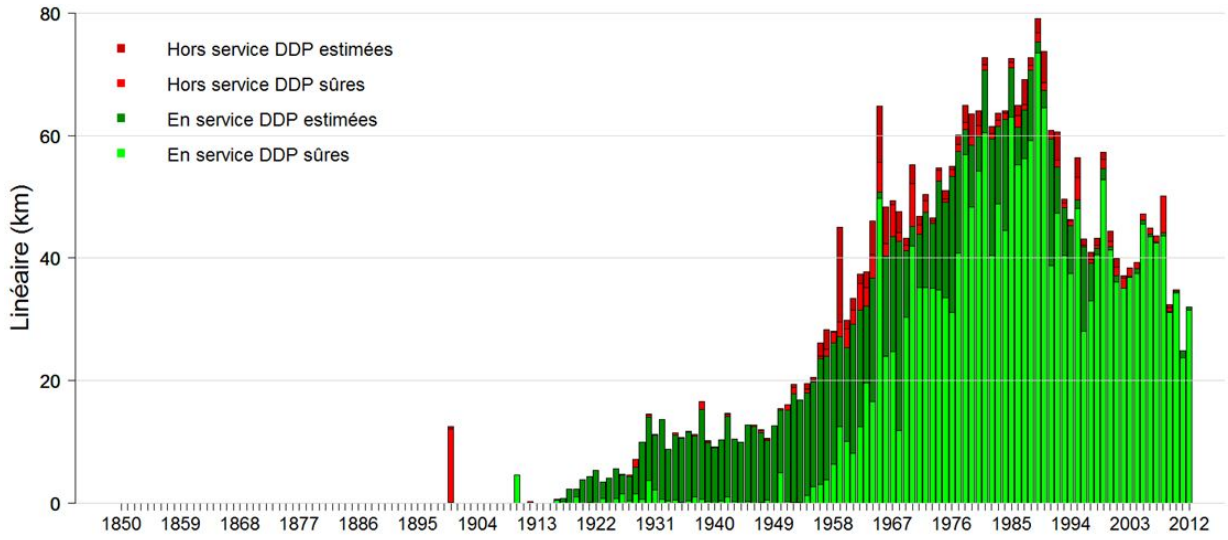


FIGURE 3.3: Linéaire du réseau du Grand Lyon TVD en service (2 127 km avec DDP sûres et 902 km avec DDP estimées) fin 2012 et mis hors service (123 km) entre [2002, 2012] en fonction des DDP

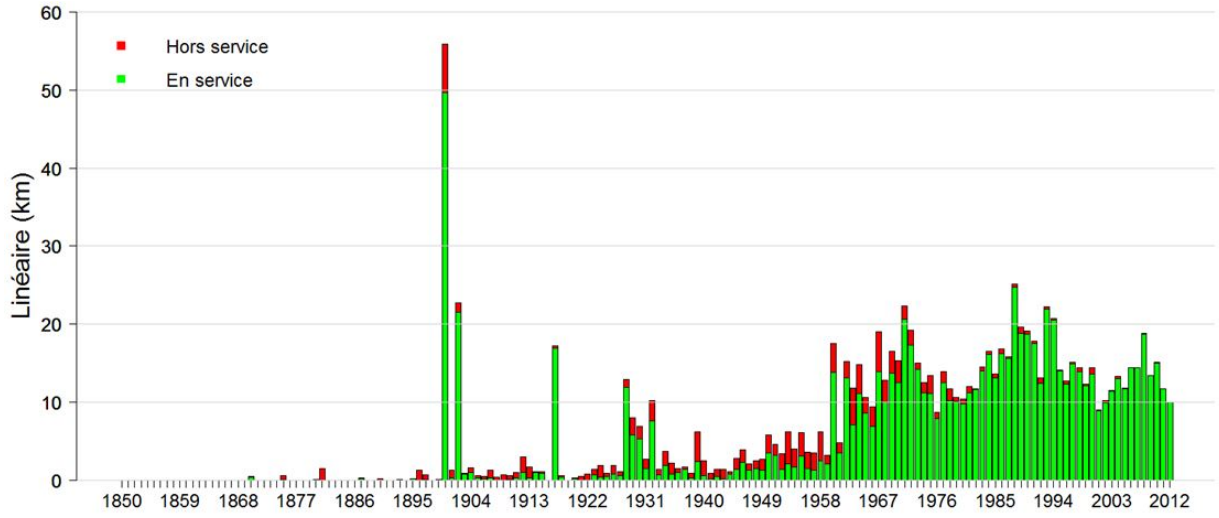


FIGURE 3.4: Linéaire du réseau d'eauservice Lausanne en service (874 km) fin 2012 et mis hors service (136 km) entre [2001, 2012] en fonction des DDP

Dans le même ordre d'idées, le linéaire actuellement en service dans chacun des terrains d'étude n'est proportionnellement pas composé des mêmes **matériaux** (cf. figure 3.5). Le SEDIF et le Grand Lyon TVD ont encore beaucoup de fontes grises (plus de 25 %) alors qu'Eauservice en a actuellement moins de 20 %. Notons que la fonte des terrains français n'a pas tout à fait les mêmes propriétés mécaniques que la fonte suisse. En effet, les français achètent principalement auprès du constructeur Pont-à-Mousson alors qu'eauservice Lausanne se fournit auprès du frabricant Von Roll. Les techniques de pose sont également bien distinctes entre la France et la Suisse.

Enfin, la **topographie** des territoires gérés par ces AOEP est très disparate. Le SEDIF se situe dans le bassin parisien qui a un dénivelé assez faible. L'altitude minimale est autour de 25 m et l'altitude maximale autour de 175 m. En revanche, le Grand Lyon se situant entre le massif central et les Alpes a des zones avec des dénivelés importants (tel que le Mont Fourvière). Sur ce territoire l'altitude varie de 220 m à 550 m. Eauservice Lausanne, situé dans les Pré-Alpes, a des dénivelés vraiment très importants. Au niveau du Lac Léman, l'altitude est d'environ 370 m, alors que certaines canalisations se situent dans le "Pays d'Enhaut" allant jusqu'à 1 600 m d'altitude, soit un différentiel considérable, d'environ 1 230 m.

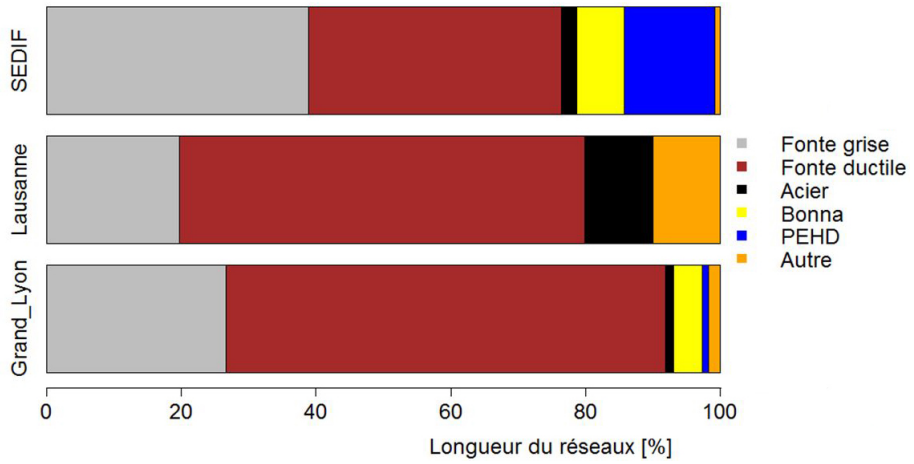


FIGURE 3.5: Matériaux des réseaux en service fin 2012 en fonction de leur linéaire (%) pour chaque terrain d'étude

3.1.2 Des situations politiques et administratives différentes

Premièrement, il est important de noter que ces 3 AOEP ont un nombre de **compétences** liées aux réseaux très variables. Le SEDIF est un syndicat à vocation unique dont la seule compétence est l'eau potable. Le Grand Lyon, était un établissement public de coopération intercommunale à fiscalité propre jusqu'au 1er Janvier 2015. A partir de cette date, il est devenu une collectivité territoriale. Ce dernier exerce plusieurs compétences concernant les réseaux. Il gère : l'eau potable, l'assainissement, la voirie et les transports publics (mobilité). La ville de Lausanne est organisée en 42 services correspondant à ses compétences. Concernant les réseaux, Lausanne gère : l'eau potable (eauservice), l'assainissement, la route, les transports publics (mobilité), le gaz, l'électricité, le chauffage à distance (eau chaude) et le multimédia (téléphone fixe, internet) [Lausanne, 2015]. Les trois terrains d'étude ont donc : 1, 4 ou 8 compétences liées aux réseaux. Ces organisations différentes n'aboutissent pas à la même gouvernance de la gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable surtout sur l'aspect "coordination" des chantiers de réseaux.

En effet, pour les deux terrains d'étude français, la **coordination** avec les autres chantiers de réseaux consiste en général à travailler les uns après les autres, de manière la plus rapprochée possible. Néanmoins, entre chaque fin de chantier réseau, la chaussée est reconstruite de manière temporaire. En revanche, à Lausanne la coordination signifie que les différents agents des réseaux vont travailler en co-activité dans la même fouille. La voirie n'est restaurée que lorsque tous les chantiers réseaux ont terminé leur travail. La coordination façon "Lausanne" permettrait d'économiser en moyenne 20 à 25% des coûts d'un chantier de renouvellement par rapport à un chantier non coordonné. La coordination selon la méthode du SEDIF et du Grand Lyon ne générerait pas d'économies [Grand Lyon, 2015; SEDIF, 2015a; Eauservice, 2015a].

Concernant les **modes de gestion** du service public de l'eau potable, Lausanne est en gestion directe, c'est à dire que la collectivité gère directement le service tandis que le Grand Lyon et le

SEDIF sont en gestion déléguée de type affermage. Ils ont confié à une[5] entreprise privée (une filiale du groupe Veolia) l'exécution d'une partie du service public tout en conservant la maîtrise de celui-ci. Veolia assure l'exécution du service avec son propre personnel. Le SEDIF et le Grand Lyon lui octroient en contrepartie l'exploitation du service [Gouv, 2015]. La figure 3.6 indique le nombre d'équivalents temps plein (ETP) pour 100 kilomètres de réseau en service dédié à l'eau potable dans les terrains d'étude, au premier trimestre 2015. Même si ces données sont assez fluctuantes d'une année à l'autre et dépendent de la maturité du contrat et du réseau, voire du type de contrat, elles donnent un ordre de grandeur du nombre d'agents affectés à l'eau potable. Ces données restent partielles, puisqu'elles ne prennent pas en compte la sous-traitance.

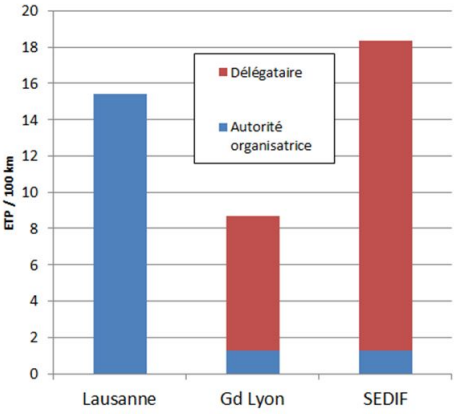


FIGURE 3.6: Équivalents temps plein (ETP) pour 100 kilomètres de réseau en service dédié à l'eau potable dans les terrains d'étude, situation au premier trimestre 2015 (cf. annexe I)

3.2 Expertise des données complexes et partielles

3.2.1 Les données recherchées versus les données collectées

Les modèles pour la gestion patrimoniale croisent des informations concernant les tronçons, leurs environnements et leurs défaillances. Néanmoins, comme le résume la citation de [Bernstein, 1998] (cf. figure 3.7), lorsqu'on travaille sur des cas réels, les données à disposition ne correspondent jamais à 100% à celles souhaitées pour les modèles. Or, acquérir de nouvelles données a un coût non négligeable. Par conséquent, il faut tirer le meilleur parti des données fournies.

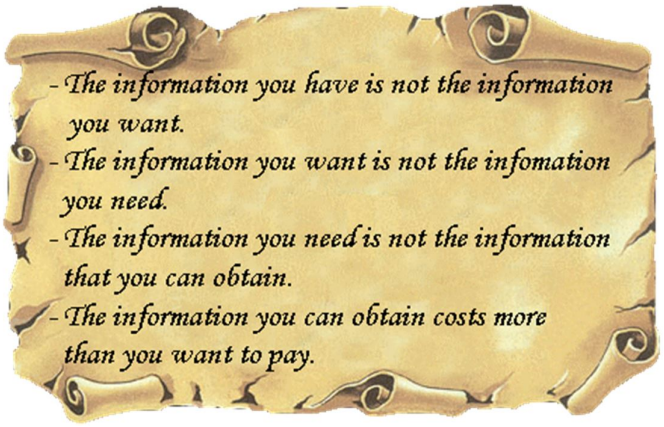


FIGURE 3.7: Citation extraite de [Bernstein, 1998]

5. Depuis février 2015, le groupe Veolia est le seul délégataire du Grand Lyon en matière d'eau potable. Néanmoins, avant cette date 3 entreprises privées assuraient ce service.

Les données nous ont été livrées en 2013, 2014 et 2015. Elles correspondent essentiellement à celles qui ont été archivées informatiquement par les AOEP et leurs délégataires au sein de leurs SIG (système d'information géographique). Elles ne sont jamais exhaustives et parfois incohérentes, ce qui peut poser des difficultés dans les évaluations a posteriori et les planifications futures. Nous allons présenter quelques exemples des difficultés rencontrées.

3.2.2 Les tronçons : une notion a géométrie variable

Un modèle de planification à long-terme nécessite notamment des données concernant les canalisations d'eau potable. Les fichiers des canalisations fournis (cf. tableau 3.2) par nos trois terrains d'étude, en 2013, concernent plus de 290 000, 59 600 et 12 300 tronçons, respectivement pour le SEDIF, le Grand Lyon et eauservice Lausanne. Un tronçon est défini comme l'ensemble des tuyaux unitaires, assemblés par des joints, homogènes en matériau, diamètre, date de pose et formant un segment de réseau généralement délimité à ses deux extrémités par des organes de sectionnement (vannes) [Le Gat, 2009]. Cependant, au SEDIF et au Grand Lyon la définition tient aussi compte des changements d'environnement : par exemple, lors d'un changement de voie ou d'un passage "sous chaussée" à "sous trottoir" d'une conduite, un nouveau tronçon est créé [Levesque, 2014].

IDT	Statu	Date pose	Date mise hors service	Diamètre (mm)	Longueur (m)	Matériau	Joint
V47	Hors service	1954	2011	250	13	fonte grise	Vissé
V63	En service	1995	NA	100	8	fonte ductile	A bride

Tableau 3.2: Extrait de fichiers tronçons, IDT = Identifiant du tronçon, NA = not available

3.2.2.1 La répartition de la longueur des tronçons est très étalée

Normalement, lors de la pose d'un tuyau, sa longueur élémentaire ne peut pas être inférieure à 6 m (au Grand Lyon et à Lausanne) ou à 3 m (au SEDIF). En effet, les fournisseurs ne vendent pas de tuyaux en dessous de ces tailles. Néanmoins, avec la deuxième définition précédente, les tronçons peuvent avoir des longueurs très inférieures à 6 m. Ainsi, au SEDIF et au Grand Lyon le plus petit tronçon mesure 1 cm et 13 cm à Lausanne. Avoir dans les bases de données trop de tout-petits tronçons peut poser de graves problèmes de représentativité lorsqu'un échantillon de tronçons est sélectionné. Malheureusement, ce phénomène est très fréquent au SEDIF : 46 % des tronçons en service mesurent moins de 6 mètres, totalisant uniquement 5 % du linéaire en service (441 km). De même, 36 % des tronçons hors service mesurent moins de 6 m. Au Grand Lyon, ce problème est moindre : 15 % des tronçons en service mesurent moins de 6 mètre, totalisant 0.8 % du linéaire en service (27 km). A eauservice Lausanne cette situation est encore moins présente : 10 % des tronçons en service mesurent moins de 6 mètres, totalisant 0.3 % du linéaire en service (2.6 km).

Ce constat implique que la médiane (cf. figure 3.8) et la moyenne de la longueur des tronçons peuvent être très éloignées l'une de l'autre. De manière logique, concernant les tronçons en service, le SEDIF détient le record des valeurs les plus faibles : 7 m de médiane contre 31 m de moyenne. Le grand Lyon est intermédiaire : 31 m pour la médiane contre 61 m pour la moyenne. Eauservice Lausanne a les valeurs les plus élevées : 50 m et 93 m respectivement pour la médiane et la moyenne.

Pour pallier cette hétérogénéité dans nos modèles nous avons envisagé 3 solutions :

1. supprimer les tronçons inférieurs à 3 mètres ;
2. ou concaténer les tronçons très petits avec un autre tronçon juxtaposé pour atteindre au moins 3 mètres ;
3. ou créer des modèles où les tronçons sont pondérés par leur longueur.

L'inconvénient de la première solution est qu'on supprime de l'information notamment du linéaire et des défaillances portées sur ces tronçons. Le problème de la seconde solution est qu'on peut regrouper des tronçons qui n'ont pas du tout le même historique de pose ce qui peut fausser les analyses statistiques. Par conséquent, nous avons choisi la troisième option.

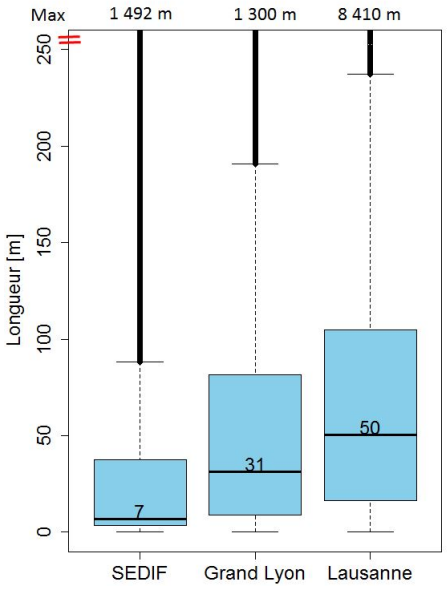


FIGURE 3.8: Distribution de la longueur des tronçons des trois terrains d'étude. Les boîtes et les traits représentent les fractiles 5, 25, 50, 75 et 95% des tronçons

3.2.2.2 Les âges à la mise hors service sont tronqués à gauche et censurés à droite

Au SEDIF, les dates de mise hors service des tronçons sont significativement archivées seulement depuis 1995. Puisque les données correspondent à la situation au 31/12/2012, nous n'avons pas de date de mise hors service après 2012. Notre fenêtre d'observation des années à la mise hors service est [1995-2012]. Les données des dates de mise hors service sur la fenêtre [1995, 2012] ne sont pas exhaustives mais elles sont néanmoins significatives. En effet, l'archivage sous format informatique des dates à la mise hors service était inexistant avant 2005. L'archivage au format informatique s'est mis en place en 2005. Les données avant 2005 ont été collectées à partir des formulaires papiers. Elles sont alors très partielles avant 1995 et représentatives mais légèrement incomplètes entre [1995, 2004]. A partir de 2005 cette donnée est exhaustive [Optimeau, 2014b]. Au total entre 1995 et 2012 environ 608 km de réseau ont été mis hors service. Au SEDIF, la période d'enregistrement informatique du linéaire hors service s'étend sur 18 ans, de 1995 à 2012.
Les données sont tronquées à gauche et censurées à droite (cf. figure 3.9).

Notons y_1 l'année de début d'observation (1995), y_2 l'année de fin d'observation (2012) et T la variable aléatoire représentant l'âge à la mise hors service. Pour chaque tronçon i, posons : y_{0i} son année du pose, $y_{\dagger i}$ son année de mise hors service, t_{1i} l'âge du tronçon au début de son observation ($t_{1i} = 0$ an si le tronçon a été posé après y_1 sinon $t_{1i} = y_1 - y_{0i}$) et t_{2i} l'âge du tronçon à la fin de son observation ($t_{2i} = y_2 - y_{0i}$ s'il est encore en service à la fin de la fenêtre d'observation sinon $t_{2i} = y_{\dagger i} - y_{0i}$).

L'âge à la mise hors service (T) est **censuré à droite** [Alioum and Leffondre, 2014, p. 10] car tous les tronçons ne sont pas encore hors service à la fin de la fenêtre d'observation (y_2). Les âges à la mise hors service ne sont pas tous observés ; pour certains d'entre eux, on a comme seule information qu'ils seront supérieurs à une certaine valeur connue t_{2i}. La fenêtre d'observation étant de taille réduite nous observons la réelle mise hors service d'une faible proportion du réseau.

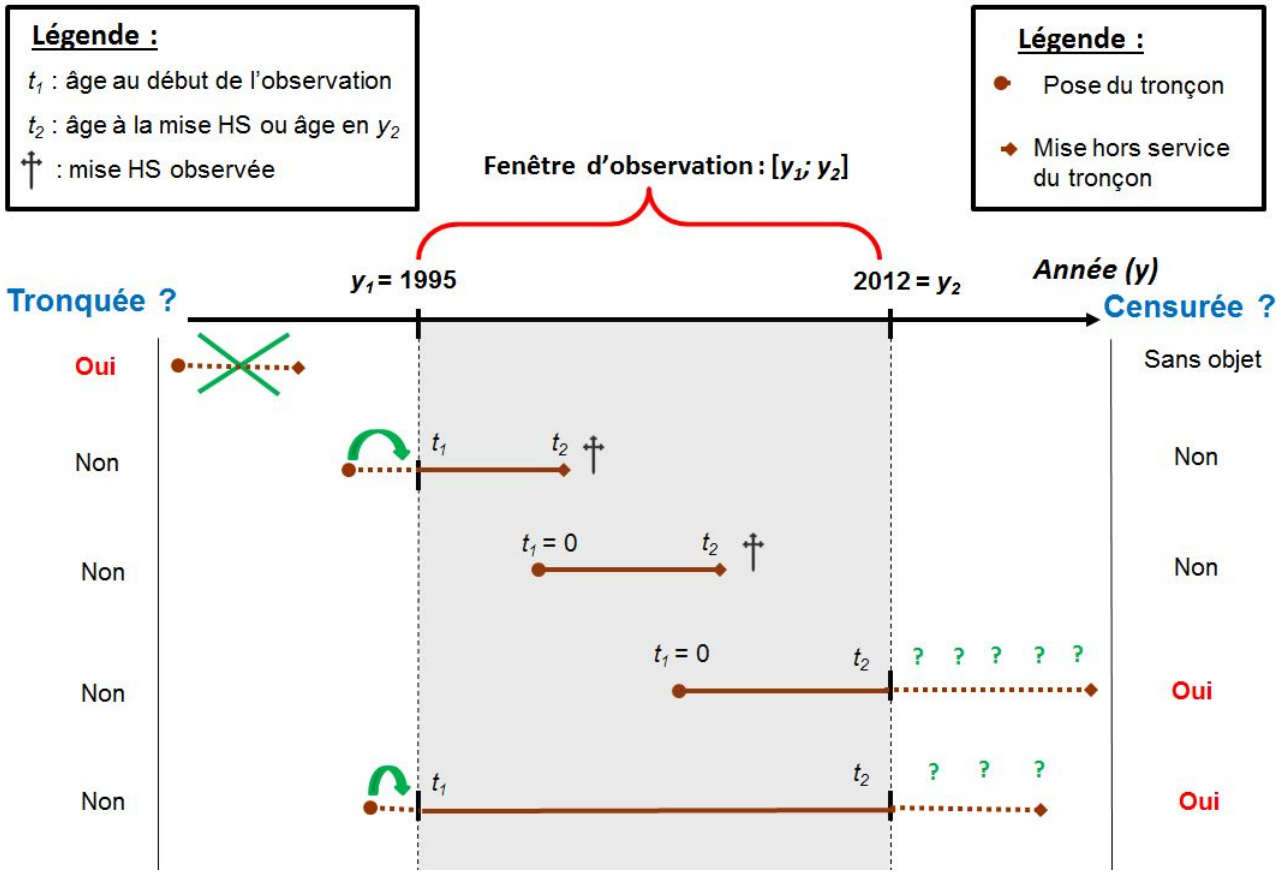


FIGURE 3.9: Les tronçons en fonction des années calendaires y, illustration de la troncature et de la censure, données disponibles (trait plein), données non disponibles ou non utilisables (en pointillé)

Les données sont **tronquées à gauche** [Alioum and Leffondre, 2014, p. 13] car les tronçons entrent dans la fenêtre d'observation à des âges différents et certains ont été mis hors service avant y_1.

La figure 3.9 illustre les concepts de troncature à gauche et de censure à droite.
- Toutes les années de mise hors service inférieures à y_1 sont inobservables.
- Les années de mise hors service entre $[y_1; y_2]$ sont exactement observées.
- Les années de mise hors service postérieures à y_2 ne sont pas observées mais on sait que pour certains tronçons i leurs âges à la mise hors service est supérieure à $y_2 - y_{0i}$.

Il est à noter qu'à Eauservice Lausanne et au Grand Lyon, nous avons rencontré ce même phénomène de censure et de troncature. En revanche, les fenêtres d'observation sont plus étroites [2001, 2012] et [2002, 2012] respectivement pour eauservice et le Grand Lyon. Par conséquent, nous allons devoir utiliser des modèles qui permettent de prendre en compte la troncature à gauche, la censure à droite et de corriger les biais qu'ils induisent sur la représentativité des données.

3.2.2.3 Des incohérences rencontrées

Grâce à des tests de cohérence, quelques contradictions dans les données ont été mises en évidence. En général, cela ne représente pas beaucoup de tronçons mais cela peut fausser les analyses statistiques. Par conséquent, un long et minutieux nettoyage des données a été nécessaire. Nous en citerons quelques exemples.

Tout d'abord, pour certains terrains d'études, dans la variable matériau nous avons trouvé l'existence de canalisations en fonte ductile (FD) posées avant 1966, matériau qui n'était pas utilisé à cette époque. Nous avons décidé de le remplacer par de la fonte grise (FG), très présente au début du 20eme siècle. Nous avons effectué d'autres modifications analogues pour d'autres matériaux (cf. [Large and

Tomasian, 2014a,b,c] pour plus de précisions). Les dates sur lesquelles nous nous sommes appuyés pour effectuer ces changements proviennent notamment de [Poinard, 2006; ASTEE et al., 2013a,b; SEDIF, 2013a] (cf. figure 3.10) et de vérifications auprès des experts locaux.

Quelques tronçons avaient un statu "En service" et une date de mise hors service. Pour corriger ce problème, selon les conseils des experts locaux [Optimeau, 2014b] toutes les dates de mise hors service de ces individus ont été remplacées par "Not Available" (NA) c'est à dire que ces tronçons ont été considérés comme "en service".

L'âge à la mise hors service a été calculé pour chacun des tronçons hors service. Ces modifications ont permis de mettre en avant l'existence de quelques tronçons dont l'âge de mise hors service était négatif. Après avoir pris conseils auprès des spécialistes locaux [Optimeau, 2014b] l'abréviation "NA" a été affectée à tous ces individus pour la variable des dates de mise hors service.

Désignation de la classe de matériau	Début de la période de pose (*)	Fin de période de pose classique (*)	Fin de période de pose extrême (*)
Acier	1930	Toujours utilisé	
Amiante ciment	1950	1996	
Béton armé		Toujours utilisé	
Béton âme tôle joint plomb	1900	1950	
Béton âme tôle joint soudé	1950	Toujours utilisé	
Cuivre		Toujours utilisé	
Grès		Toujours utilisé	
Fonte grise		1965	1970
Fonte ductile	1965	Toujours utilisé	
Polyéthylène haute densité	1990	Toujours utilisé	
Polyéthylène basse densité	1970	1990	1995
PVC posé avant 1980 à risque de monomère de chlorure de vinyle (CVM)	1960	1980	
PVC sans risque de monomère de chlorure de vinyle (CVM)	1980	Toujours utilisé	
PVC Bi-orienté	1995	Toujours utilisé	
Plomb		1970	1991

FIGURE 3.10: Ordres de grandeur des dates de début et de fin de pose par matériau, source [ASTEE et al., 2013b, p. 25]

3.2.2.4 Des informations manquantes

Date de pose des tronçons en service

1% (82 km) des canalisations en service au SEDIF n'ont pas de date de pose enregistrée dans les bases de données. 4%, c'est à dire 37 km du réseaux en service à Lausanne n'ont pas de date de pose. Cette lacune concerne principalement les conduites en montagne[6]. 30% des conduites en service au Grand Lyon TVD ont des dates de pose estimées et 1% (31 km) n'ont pas de date de pose.

Tronçons hors service

Au SEDIF, les données indiquent que 680 km ont été mis hors service sur [1995, 2012], ce qui revient à un taux de renouvellement annuel moyen d'environ 0,5% sur cette période. D'après nos entretiens et lectures [SEDIF, 2012a], ce taux de renouvellement semble bien correspondre aux pratiques du gestionnaire sur cette période.

A eauservice Lausanne, les données révèlent que 136 km ont été mis hors service entre [2001, 2012], ce qui revient à un taux de renouvellement annuel moyen d'environ 1,3% sur cette période. D'après nos entretiens et lectures [Eauservice, 2013b], ce taux de renouvellement semble également bien correspondre à leurs pratiques sur cette période.

6. Conduite d'adduction et d'amenée (transport) en altitude

Cependant au Grand Lyon TVD, les données indiquent que 123 km ont été mis hors service sur [2002, 2012], ce qui revient à un taux de renouvellement annuel moyen d'environ 0,4% sur cette période. Or, d'après nos entretiens et lectures [Grand Lyon, 2009, 2010], ce taux de renouvellement semble inférieur à leurs pratiques réelles sur cette période ($\approx$ 0,7% par an). Par conséquent, cela signifie qu'au-delà de la troncature à gauche et de la censure à droite, il manque des tronçons mis hors service entre [2002, 2012] dans les bases de données fournies. Nous avons essayé de réduire la fenêtre d'observation, sans succès.

Causes des mises hors service
Nous souhaitions ardemment obtenir à l'échelle du tronçon, les causes de mise hors service (mauvais état ou coordination ou obsolescence). Néanmoins, même si cette variable existe dans le SIG du SEDIF, la manière dont les agents l'ont renseignée la rend inutilisable.Cependant, eauservice Lausanne a fait la démarche de collecter cette information en 2013 et en 2014 ce qui a été utile mais malheureusement cela ne couvrait pas la fenêtre d'observation en entier [2001, 2012].

3.2.3 La spécificité des données environnementales

La connaissance des données environnementales, au sens de ce qui entoure le réseau, est importante pour une bonne gestion patrimoniale. D'une part, ces données peuvent permettre de mieux expliquer le nombre de défaillances [Berland et al., 2005; Babykina, 2010] (cf. figure 3.11) :

- le climat (variations de températures, nombre de jours de gel, nombre de jours très chauds) ;
- la charge liée au trafic routier ;
- la pression de l'eau dans la canalisation ;
- l'agressivité de certains sols pouvant induire des phénomènes de corrosion externe ;
- les mouvements de terrain ;
- la qualité des remblais et des travaux de compactage des sols ;
- le fait que la conduite soit immergée par période dans des nappes phréatiques (marnage) ;
- les mouvements de déstabilisation des sols causés par la pose, le remplacement ou les interventions d'entretien d'autres réseaux techniques ou des travaux de voirie ;
- la présence de courants vagabonds générés par des installations électriques.

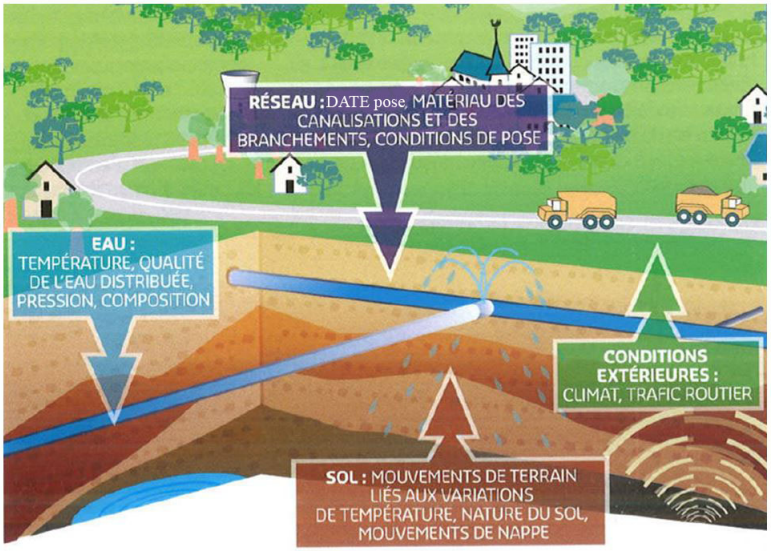


FIGURE 3.11: Facteurs agissant sur l'état des conduites au cours du temps, source : à partir de [Lyonnaise des eaux, 2015]

D'autre part, les données environnementales peuvent permettre de mieux estimer les risques de dommages liés aux défaillances :

- Nombre d'abonnés desservis par le tronçon ;
- Localisation et importance des usagers (hôpitaux, dialysés, coiffeurs [7], prisons [8], industries, etc.) ;
- Localisation des transports en commun par rapport aux canalisations ;
- Type et importance du trafic routier ;
- Pente du terrain ;
- Localisation des cavités souterraines.

Les deux listes précédentes ne sont pas exhaustives. De plus, certaines données peuvent se situer dans les deux catégories. C'est à dire être à la fois une cause et une conséquence, c'est le cas par exemple du nombre de branchements sur un réseau. Cette donnée renseigne à la fois du nombre de piquage sur un tronçon, or plus le nombre de piquages est important plus le risque de fuites à tendance à augmenter. De plus, le nombre de branchements renseigne aussi sur le nombre d'abonnés qui risquent d'être perturbés lors d'une coupure d'eau (conséquences des défaillances).

Ces informations peuvent être rattachées aux tronçons notamment grâce aux logiciels SIG (cf. tableau 3.3). Notons que les 3 terrains d'étude n'ont pas archivé la même quantité de données environnementales. Le Grand Lyon est le territoire avec le plus de données de ce type suivi de Lausanne et enfin du SEDIF.

IDT	Localisation	Pression eau (mCE)	Densité population	Type clients	Balmes	Niveau trafic routier
V47	Sous chaussée	120	Haute	Clients sensibles	Présence	Elevé
V63	Sous trottoir	130	Moyenne	Forêt	Absence	Faible

Tableau 3.3: Extrait des fichiers environnement une fois rattaché aux tronçons grâce au SIG, IDT = Identifiant du tronçon

3.2.4 Les défaillances : disponibles sur une fenêtre d'observation

Encadré 4 - Défaillance : Sens et étymologie

Historiquement le mot défaillance n'était utilisé que pour les êtres humains. En 1190, il signifiait "manque, défaut", puis en 1540 il correspondait à la "perte subite de forces physiques". Par extension ce mot a ensuite été employé pour les systèmes mécaniques. De cette histoire évolutive du terme défaillance, dans ce manuscrit, nous utiliserons le mot défaillance selon deux sens.

1) Défaillance* : Cessation de l'aptitude d'une unité fonctionnelle à accomplir une fonction requise [Breysse, 2009]. En gestion patrimoniale des canalisations d'eau potable, il existe trois types de défaillances* : les défaillances* FR (Fuites Réparées), les défaillances* QR (Qualitatives Réparées) impactant la qualité de l'eau, et les défaillances* NT (Non Trouvées). Il n'existe pas de base de données sur ces dernières car par définition, elles nous sont inconnues.

Défaillance* QR (qualitatives réparées) : Défaillances* liées au réseau impactant la qualité de l'eau (tels que eaux rouges, eaux noires, eaux riches en CVM [Chlorure de Vynil Monomère], eaux riches en plomb) et donnant lieu à une réparation. Elles sont très peu nombreuses dans les 3 terrains d'étude du projet OPTIMEAU.

2) Défaillance = défaillance* FR (fuites réparées) : Fuite intervenant sur un tronçon et donnant lieu à une réparation [ASTEE et al., 2013b].

Pour les différencier dans ce manuscrit, nous avons mis une étoile au premier sens.

7. Sans eau un coiffeur ne peut pas travailler et perd du chiffre d'affaire.
8. Le fait de couper l'eau dans une prison peut engendrer des mutineries.

Une défaillance[9] est une fuite intervenant sur un tronçon et donnant lieu à une réparation [ASTEE et al., 2013b]. Cependant, un tronçon tel que nous l'avons défini précédemment peut contenir des joints mais aussi des appareillages (tels que vannes, régulateurs de pression). Or, une fuite n'a pas forcément lieu sur la canalisation, elle peut aussi se produire sur ces équipements. Les terrains d'étude précisent dans leurs bases de données la localisation de la fuite (cf. tableau 3.4).

IDD	IDT	Date réparation fuite	Localisation	Trouvé comment ?	Type
D58	V47	15/05/2012	Sur tronçon	Fuite visible	Circulaire
D89	V47	18/01/2013	Sur tronçon	Méthodes recherche fuite	Longitudinale
D22	V63	20/09/1996	Sur appareillage	Fuite visible	Piqûre

Tableau 3.4: Extrait des fichiers défaillances, IDD = identifiant de la défaillance, IDT = Identifiant du tronçon

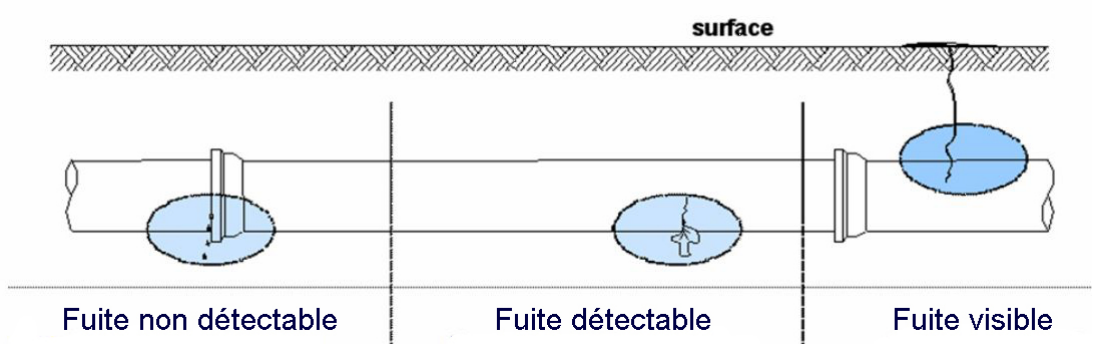


Figure 3.12: Les trois types de fuite, à partir de [Fantozzi and Lambert, 2010; Claudio, 2014]

Les fuites selon [Fantozzi and Lambert, 2010; Claudio, 2014] peuvent être classifiées en 3 groupes (cf. figure 3.12) :

- les fuites visibles ;
- les fuites invisibles à l'œil nu mais détectables par les méthodes classiques de recherche de fuite ;
- et les fuites indétectables par les méthodes de recherche de fuite classiques.

Plus une AOEP mettra en place de méthodes de recherche de fuites (telles que corrélateurs acoustiques), plus elle recensera de fuites. L'indicateur "nombre de défaillances" aura augmenté, sans que le réseau ne soit en plus mauvais état. Par conséquent, certaines AOEP comme eauservice Lausanne préfèrent suivre sur du long terme l'évolution du nombre de défaillances issu uniquement des fuites visibles sur tronçon. Il est donc important, lorsque l'on parlera de taux de défaillances de bien préciser la définition car cela à un impact significatif sur les taux de défaillances (cf. tableau 3.5).

	SEDIF	***Grand Lyon***	***Lausanne***
Défaillances détectées et visibles sur canalisations ou joints ou appareillages	1 600	450	170
Taux de défaillances associé (nb/10 km)	1,9	1,5	1,8
Défaillances détectées et visibles sur canalisations	1 200	420	150
Taux de défaillances associé (nb/10 km)	1,4	1,4	1,7
Défaillances visibles sur canalisations	1 170	?	110
Taux de défaillances associé (nb/10 km)	1,4	?	1,2

Tableau 3.5: Ordre de grandeurs du nombre défaillances dans les trois terrains d'étude sur leur fenêtre d'observation

9. Ce mot est polysémique cf. encadré 4 page 36.

Enfin, les fenêtres d'observation et d'enregistrement des défaillances passées sont [1995 ; 2012] au SEDIF, ainsi que [1998 ; 2012] pour le Grand Lyon et eauservice Lausanne.

3.3 La gestion des données notamment avec "R"

Pour manipuler ces grands jeux de données nous avons utilisé principalement : le logiciel statistique "R" [R team, 2011], le logiciel de prédiction des défaillances "Casses" [Renaud et al., 2011b] et le logiciel SIG "ArcGIS". Lorsque les calculs étaient très longs nous avons utilisé un ordinateur virtuel et une ferme [10] de calcul.

Grâce au logiciel "R" nous avons écrit nous-même la majorité des codes (tels que la mise en œuvre des algorithmes de Turnbull, Kaplan-Meier, Nelder-Mead). Cependant, afin de valider nos codes, nous avons aussi utilisé certaines fonctions du package "Survival" notamment pour le modèle de Cox ou de Kaplan-Meier.
Les atouts majeurs de ce logiciel sont multiples :

- Il est un standard international de calcul statistique ;
- Il permet une traçabilité des transformations opérées sur les données brutes, et sur les modèles ;
- Il améliore grandement la reproductibilité du travail ;
- Les codes sont réutilisables notamment entre les différents acteurs du projet ;
- Les codes pourront ensuite être intégrés dans un logiciel avec une interface homme machine conviviale.

3.4 Conclusion

Les modèles de gestion patrimoniale nécessitent des données concernant les tronçons, leur environnement et leurs défaillances. Néanmoins ces informations sont différentes selon les contextes locaux de chacun des terrains d'études. Nous avons eu la chance d'avoir accès à une très grande quantité d'informations grâce aux partenariats dans le cadre du projet OPTIMEAU. Néanmoins, certaines données sont tronquées, censurées, hétérogènes voire manquantes. L'imperfection des données doit être prise en compte dans la construction des modèles. Nous allons maintenant présenter la démarche globale du modèle long terme OPTIMEAU. La démarche proposée dans le chapitre 4 intègre les contraintes liées aux données.

10. On parle de ferme de calcul (Computer Cluster) pour désigner des techniques consistant à regrouper plusieurs ordinateurs indépendants, afin de permettre une gestion globale et de dépasser les limitations d'un ordinateur.

Chapitre 4

Présentation de la démarche suivie

4.1 Genèse de la thèse

La thèse se situe dans le prolongement du projet européen CARE-W [1] qui s'est déroulé entre 2001 et 2004. Ce projet, coordonné par l'Institut de recherche SINTEF [2] (en Norvège), financé par l'Union Européenne, a permis une collaboration fructueuse entre partenaires de recherche, dont le CEMAGREF (maintenant IRSTEA), et plusieurs AOEP, dont eauservice Lausanne et le Grand Lyon. La recherche européenne en matière d'outils d'aide à la décision en gestion du patrimoine de canalisations d'eau potable a été fortement marquée par le projet CARE-W. CARE-W a livré [3] des outils à court terme d'aide à la planification des travaux de renouvellement des canalisations, ainsi que CARE-W-LTP [4] devenu ensuite le logiciel long terme Kanew.

D'autres projets nationaux ou internationaux ont continué à améliorer ces modèles. Nous pouvons citer notamment entre 2002 et 2005 le projet AD-Ré-A [5] financé par deux ministères français [Poinard, 2006; Haidar, 2006], ou entre 2009-2013 le projet Européen AWARE-P [6] dirigé par des chercheurs du LNEC [7] (au Portugal) [Vitorino et al., 2012].

Même si ces projets ont abouti à des avancées majeures dans le domaine, ils n'ont pas réussi à répondre complètement à la question numéro ❷ posée en introduction : *"Combien doit investir une AOEP pour le renouvellement de ses canalisations, dans les 5 à 20 ans à venir afin d'avoir un rapport coût/performance acceptable et durable ?"*. En effet, la majorité des modèles long terme fonctionnent avec des durées de maintien en service hypothétiques. Or [Renaud et al., 2014] ont démontré que les hypothèses posées n'étaient pas cohérentes avec les pratiques réelles.

4.2 Méthode de travail

Afin d'essayer de répondre à la question numéro ❷, notre travail, dans le cadre de la thèse OPTIMEAU s'est déroulé selon les étapes suivantes.

Tout d'abord, le travail a été soutenu par un comité technique de suivi composé des membres du comité d'encadrement de la thèse, mais aussi de représentants des terrains d'étude, de leurs délégataires,

1. CARE-W : Computer Aided Rehabilitation of Water network
2. SINTEF : Stiftelsen for Industriell og TEknisk Forskning
3. cf. les délivrables suivant [Baptista and Alegre, 2001, 2002; Eisenbeis et al., 2002a,b, 2003, 2004; Le Gauffre et al., 2002a,b, 2003; Herz and Lipkow, 2002; Herz and Kropp, 2002; Herz et al., 2003; Kowalski et al., 2002a,b; Rostum et al., 2003; Volta et al., 2004; Saegrov, 2003, 2005; Poinard and Le Gauffre, 2005]
4. LTP : Long Term Planning
5. AD-Ré-A : Aide à la Décision pour la Réhabilitation des réseaux d'Alimentation en eau potable
6. AWARE-P : Advanced Water Asset REhabilitation - Portugal
7. LNEC : Laboratório Nacional de Engenharia Civil

des financeurs et d'experts du domaine. Ce comité s'est réuni sur une base semestrielle afin d'échanger et d'orienter les recherches (cf. les comptes rendus [Optimeau, 2013, 2014a,b, 2015]). En moyenne, nous étions 18 personnes lors de ces réunions (cf. liste en annexe C).

Puis, en plus des échanges par mails, nous avons effectué des enquêtes dans les terrains d'études correspondant à peu près à deux semaines par terrain sur la durée de la thèse (cf. les comptes rendus [Eauservice, 2013a, 2015a; Grand Lyon, 2013a, 2014a, 2015; VEDIF, 2013; SEDIF, 2013a, 2015a]).

Ensuite, nous avons demandé aux terrains d'étude de nous présenter leurs méthodes (cf. figures 2.6 et 2.7), leurs outils de travail en gestion patrimoniale et de nous préciser leurs besoins. Ainsi, après qu'ils nous aient donné, la liste des outils qu'ils utilisaient (cf. tableau 4.1) nous avons décidé de nous appuyer sur les plus partagés et performants, notamment "Casses", "CARE-W-ARP"[8] et leurs logiciels SIG (système d'information géographique).

Terrains / Famille de Logiciels	SEDIF	Gd Lyon	Eauservice Lausanne
SIG	ArcGIS	ArcGIS	Topobase ArcGIS
Hydraulique	SynerGEE	SynerGEE EPANET	EPANET
Prévision défaillances court terme	Casses MOSARE	CARE-W-Poisson	Casses
Risque court terme	MOSARE (Véolia)	CARE-W-ARP NES	CARE-W-ARP CARE-W-Relnet
Décisionnel court terme	MOSARE Grille MS7*	CARE-W-ARP Outil délégataire gros diam	CARE-W-ARP
Estimation du besoin en renouvellement long terme	Patrimoine expert	Patrimoine expert	
* Outil pas utilisé par le service programmation			

Tableau 4.1: Les outils utilisés par les terrains d'étude pour leur gestion patrimoniale

En parallèle, nous avons effectué une revue bibliographique assez complète des modèles de planification du renouvellement à court-terme, moyen-terme et long-terme proposés en gestion patrimoniale des réseaux d'eau dans le monde [Large, 2013]. Suite à cette revue bibliographique et aux enquêtes de terrain, nous nous sommes rendus compte que les verrous scientifiques se situent dans les modèles de planification à long terme.

Nous avons donc décidé de créer un nouveau modèle long terme, nommé OPTIMEAU de planification s'appuyant fortement sur l'évaluation des pratiques passées (cf. figure 4.1). Nous avons donc collecté les données disponibles pouvant nous être utiles, puis codé sous R notre nouveau modèle long terme. Régulièrement, nous faisions des allers-retours vers les terrains pour :

- choisir des indicateurs qui leurs seraient utiles ;
- vérifier que le modèle répondait à une partie de leur besoin ;
- valider les hypothèses retenues ;
- déterminer explicitement leurs objectifs long terme avec leurs seuils ;
- aider à la création de scénarios prospectifs ;
- participer à la construction des indicateurs, notamment de risque, adaptés à leurs territoires.

Ainsi, par exemple la deuxième année de la thèse, pour chaque terrain d'étude, un rapport avec l'application de l'ébauche du modèle OPTIMEAU a été écrit [Large and Tomasian, 2014a,b,c]. Après les avoir lus, les partenaires d'OPTIMEAU, nous ont fait des remarques très constructives pour amender le modèle.

8. ARP : Annual Rehabilitation Planning

Enfin, pour faire connaitre nos résultats, le modèle OPTIMEAU a été présenté lors de plusieurs conférences internationales et nationales [Large et al., 2014a,b,c, 2015c,d,e; Large, 2015a,b; Fangeat, 2015]. Pour diffuser nos résultats dans des revues d'envergure internationale et nationale, des extraits d'OPTIMEAU ont été publiés au travers d'articles scientifiques [Large et al., 2015a,b; Sanz et al., 2014; Le Gat et al., 2015]. D'autres articles sont en cours de publication [Guérin-Schneider et al., 2016].

La thèse a abouti à la création du modèle OPTIMEAU.

4.3 Vue d'ensemble de la démarche OPTIMEAU

La démarche scientifique peut se décomposer en cinq étapes (cf. figure 4.1).

La *première étape* comprend l'**analyse de la politique de gestion patrimoniale** que le service d'eau a menée par le passé, afin de répondre notamment aux questions suivantes : *"Quels ont été les âges à la mise hors service des tronçons"* et *"Quelles ont été les causes de mise hors service des tronçons ?"*. Au cours de cette étape est calculée la distribution des âges à la mise hors service sur une fenêtre d'observation passée. Ce calcul peut être effectué sur tout le réseau ou par groupe de tronçons (strate [9] en fonction de leur matériau et/ou leur diamètre) ou par tronçon. Il est à noter que tous les calculs dans ce modèle sont effectués à partir de la fonction de survie [10] des âges à la mise hors service. Cette première étape sera développée dans les chapitres 5, 6 et 7. Elle reposera sur la mise en œuvre de techniques de traitement originales, permettant de consolider les données brutes.

La *seconde étape* correspond au **réajustement des objectifs** des AOEP au vu de l'évaluation précédente. Associés à leurs objectifs, les AOEP doivent choisir des seuils plafonds (ou planchers) sur des indicateurs pertinents. Cette étape numéro deux est développée dans le chapitre 8.

La *troisième étape* consiste à élaborer différents **scénarios prospectifs**. Par exemple le scénario prospectif "statu quo" peut être : "*A l'avenir, la distribution des âges à la mise hors service des canalisations sera strictement identique à celle par le passé entre [2002, 2012]*".
Néanmoins les scénarios prospectifs peuvent être plus complexes. Un exemple de scénario possible peut-être illustré par l'ensemble de règles suivant :
Règle 1. *"Les canalisations en PVC (Polychlorure de Vinyle) posées avant 1980 et celles en amiante ciment doivent être éliminées avant 2020."*
Règle 2. *"Les canalisations ayant une forte probabilité d'induire des dommages considérables suite à leurs défaillances seront renouvelées en priorité."*
Règle 3. *"La part des canalisations renouvelées sous la contrainte (par exemple coordination avec les chantiers du tramway) sera plus faible que par le passé."*
Règle 4. *"A l'avenir toutes les canalisations seront en fonte ductile."*
Ensuite, chaque scénario prospectif est traduit par une (ou plusieurs) fonction de survie des âges à la mise hors service prospective pour chaque strate. Cela consiste en la transformation des fonctions de survie obtenues à l'étape 1.
Cette troisième étape sera développée dans le chapitre 8.

Lors de l'*étape quatre*, pour chaque scénario, **onze indicateurs** prévisionnels annuels sont déduits à partir des courbes de survie obtenues à l'étape précédente. Il s'agit de 2 indicateurs de moyens financiers, 3 indicateurs des réalisations et 6 indicateurs de résultats (ou de performance) (cf. la liste complète portée à la figure 1.5). Cette quatrième étape sera développée dans les chapitres 9, 10, 11 et 12.

Enfin, au cours de l'*étape cinq* on compare les différents scénarios par le biais des valeurs des onze indicateurs calculés à l'étape 4. En fonction de ses objectifs et contraintes (budgétaires ou autres), le

9. Ce mot est polysémique cf. définitions dans l'encadré 5 page 58.
10. Cette fonction est le complément à l'unité de l'intégrale de la distribution des âges à la mise hors service.

gestionnaire du service d'eau peut alors choisir le scénario qu'il souhaite appliquer. Le modèle OPTIMEAU fournit un tableau de bord avec ces indicateurs et la collectivité en dispose comme elle le souhaite.
Cette cinquième étape sera développée dans le chapitre 13.

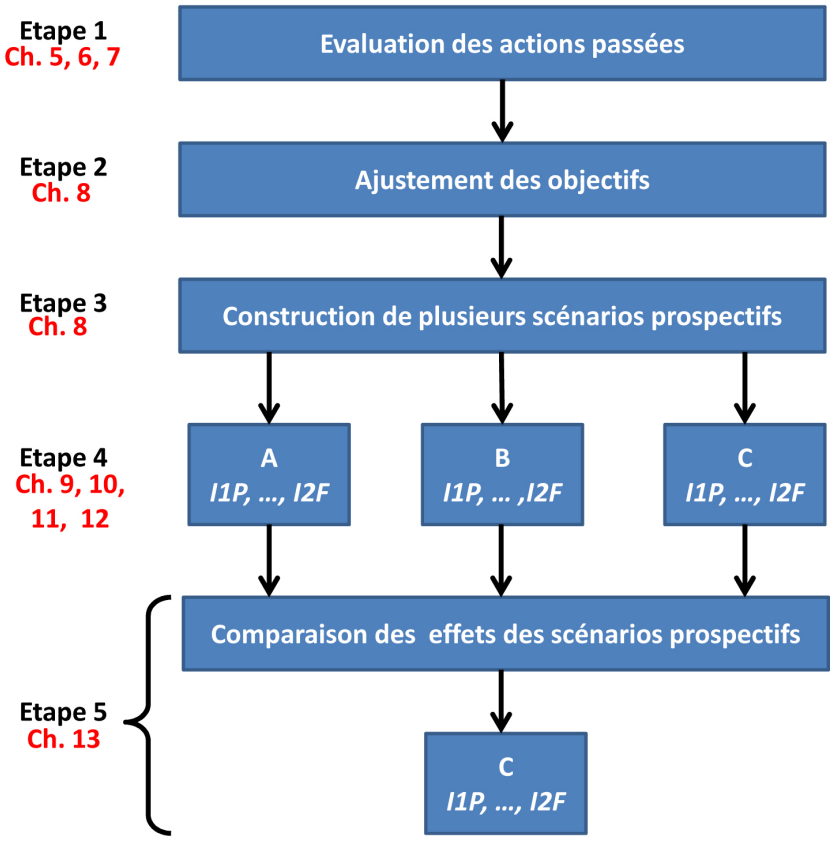


FIGURE 4.1: Vue d'ensemble de la démarche OPTIMEAU

Partie I : Conclusion

Nous venons de présenter dans le chapitre 1 le contexte de notre étude et les méthodes pour aborder la gestion patrimoniale. Nous pouvons retenir que la roue de Deming et le cycle de l'action semblent être un cadre adapté à nos travaux, ce qui a été confirmé par la revue bibliographique. Une gestion patrimoniale de qualité peut revenir à suivre cycliquement les 4 étapes de la roue de Deming : a. évaluer les actions passées, b. ajuster les objectifs, c. planifier les actions futures et d. réaliser les actions.

Au sein du chapitre 2 nous avons répertorié et classé les outils et modèles actuellement disponibles dans ce domaine. Concernant l'étape de la planification, les AOEP utilisent 3 échelles de temps : le court-terme ($<$ 4 ans), le moyen-terme ($\approx$ 6 ans) et le long terme ($>$ 10 ans ou $>$ au PPI). La majorité des modèles sont de court terme et ils paraissent répondre correctement aux besoins des AOEP à cette échelle, ce qui n'est pas le cas pour les modèles long terme. Ces derniers semblent perfectibles. A ces échelles de temps nous avons identifié 5 familles de modèles : M0 les modèles estimant les linéaires à renouveler, M1 les modèles de dégradation des conduites, M2 les modèles de risque, M3 les modèles économiques et M4 les modèles décisionnels.

Vu que nous souhaitons améliorer les modèles long terme, la question des données et de leur qualité au sein des terrains d'étude a été posée dans le chapitre 3. Nous avons pu analyser les possibilités et les contraintes que nous avions vis-à-vis de ces données. Nous avons rappelé l'importance d'apporter un grand soin dans leur collecte et leur archivage.

Enfin, dans le chapitre 4, nous avons présenté la démarche (et le modèle conjoint) que nous allons développer. Il tient compte de l'état de l'art et des contraintes liées aux données. Nous avons baptisé ce modèle OPTIMEAU.

Deuxième partie

Les avancées majeures en analyse rétrospective

Partie II : Introduction

La partie II s'intéresse à l'analyse rétrospective des pratiques dans le but d'ajuster les objectifs des terrains d'étude. Cela correspond aux trois premières étapes de notre démarche (cf. figure 4.1) et à deux étapes sur la roue de Deming (cf. figure 4.2). Après le chapitre 5 qui permet d'évaluer les pratiques avec des indicateurs clés disponibles, nous nous intéressons à la question de l'âge à la mise hors service et à sa cause, à l'échelle de groupes de tronçons dans le chapitre 6 et au tronçon dans le chapitre 7. Au sein du chapitre 8 les résultats obtenus sont ensuite utilisés pour définir les objectifs à long terme et construire les scénarios prospectifs.

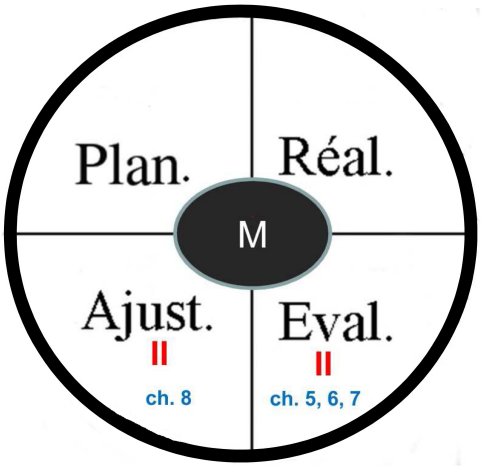


FIGURE 4.2: Schéma des chapitres (en bleu) de la partie II du manuscrit sur la roue de Deming. Eval.= Evaluer, Ajust. =Ajuster, Plan. = Planifier, Réal. = Réaliser et M. = les Modèles

Chapitre 5

Analyse des pratiques passées via des indicateurs classiques

Il existe une multitude d'indicateurs classiquement utilisés pour le suivi des réseaux d'eau (cf. notamment au niveau national [SISPEA, 2015] ou au niveau international [Alegre et al., 2010]). Cependant, par souci de concision, dans cette section, nous ne présenterons que 3 indicateurs clés : un concernant les moyens financiers alloués (budget), un autre concernant les réalisations passées (taux de renouvellement) et enfin un dernier sur les résultats (indice linéaire de perte).

5.1 Le budget alloué au renouvellement : un indicateur clé sur les moyens

A eauservice Lausanne, la gestion patrimoniale des canalisations est régie par 2 types de budgets : le budget entretien et le budget investissement (crédits d'investissement).
Le "budget entretien" est utilisé pour la réparation des fuites (ruptures, casses) sur tronçons ou appareillages mais aussi pour l'achat de matériels d'entretien.
Le "budget investissement normal" est utilisé pour le remplacement, l'amélioration des conduites et l'extension. Il est établi sur 9 à 10 ans glissants. Une enveloppe globale pour tous les services constructions de Lausanne est fixée par la ville. Cette enveloppe est fixée principalement à partir d'objectifs économiques, notamment celui de réduire la dette de la ville. Ce crédit cadre a un peu diminué ces derniers temps mais il reste assez stable. Il était de 42 millions de CHF [1] en 2008 et de 33 millions de CHF en 2013-2014. Ensuite les services constructions (tels que eau potable, gaz, électricité, voirie, eau usée, chauffage urbain) doivent se partager ce budget lors de négociations. En général, lors des négociations, les réseaux sensibles (comme le gaz) sont plus prioritaires que les autres (tel que l'eau). Par exemple en 2013-2014 eauservice a eu 6,5 millions de CHF, dont 800 000 CHF pour le remplacement des compteurs, soit 5,7 millions de CHF pour le remplacement, l'amélioration et l'extension du réseau. A ce budget se rajoute un budget investissement pour les gros chantiers. Au total, eauservice consacre annuellement environ 7 millions de CHF pour le remplacement, l'amélioration et l'extension du réseau. Il est à noter qu'eauservice n'a pas le droit d'effectuer de réserves financières. Enfin, eauservice à la possibilité de faire voter des budgets investissement urgents. Par exemple le 11/11/2012 une canalisation d'eauservice a cassé provoquant d'importants dégâts au siège du Comité International Olympique (CIO). Ainsi, eauservice a pu bénéficier d'une régularisation de 1 million de CHF entre le prévisionnel et le réel pour pouvoir réparer une partie des dégâts liés à cette défaillance [Eauservice, 2013a, 2015a].

Le SEDIF fonctionne par plans quinquennaux d'investissement. Le XIIIeme plan du SEDIF, a couvert la période 2006-2010. Son enveloppe (révisée en 2008) avait été fixée à 623,8 millions d'euros TTC. Le XIVeme plan couvre la période 2011-2015 et s'inscrit dans les orientations du Schéma Directeur

1. Le 20avril 2016 : 1 CHF valait 0,914 euros.

2011-2025. Il est prévu dans ce plan d'investir 560,7 millions d'euros TTC [SEDIF, 2011a,b,c, 2012b]. Par exemple la ligne budgétaire concernant le renouvellement des réseaux de distribution était de 16 millions d'euros en 2013 et celle concernant le réseau de transport était d'environ 9 millions d'euros. De plus, le délégataire du SEDIF, VEDIF, s'est engagé à renouveler 18 km par an de réseau dans le dernier contrat. Cela correspond à un budget d'environ 11 millions d'euros/an [SEDIF, 2013a, 2015a; VEDIF, 2013].

Le Grand Lyon a une programmation pluriannuelle des investissements de 6 ans. Le PPI se nomme dans ce territoire le "plan mandat". Actuellement le Grand Lyon est dans le PPI ou "plan mandat" de la période 2009-2014. Les autorisations de programme globales (APG) constituent les enveloppes pluriannuelles permettant le financement des projets. Leur montant doit être révisé chaque année. Le montant des APG voté annuellement, correspond à l'estimation des nouveaux besoins (pour les nouveaux projets ou des financements complémentaires), et s'ajoute au "reste à réaliser" sur les individualisations en cours [Grand Lyon, 2013a, 2014a, 2015]. En 2012, le budget renouvellement, réparation et extension du Grand Lyon était de 9 millions d'euros [Grand Lyon, 2013b, p. 55]. De plus, le délégataire Véolia a investi sur les chantiers réseau environ 11 millions d'euros cette même année dans ce domaine sur le territoire du Grand Lyon TVD [Grand Lyon, 2013b, p. 55].

En résumé, les terrains d'études ont des budgets annuels inclus dans des plan pluriannuels d'investissement de 5, 6 et 10 ans respectivement pour le SEDIF, le Grand Lyon et eauservice Lausanne. A eauservice le budget remplacement, amélioration et extension du réseau était d'environ 7 millions de CHF annuel. Au Grand Lyon et au SEDIF les ordres de grandeur sont respectivement de 20 et 40 millions d'euros.

5.2 Le taux de renouvellement : un indicateur clé sur les réalisations

Un indicateur qui permet de disposer d'informations clés à propos des réalisations passées des AOEP est le taux de renouvellement. Nous avons donc recherché dans les RPQS [2] français et dans les documents de Lausanne ces taux. Nous avons d'abord constaté qu'en France et à Lausanne, le taux de renouvellement n'est pas calculé de la même façon.

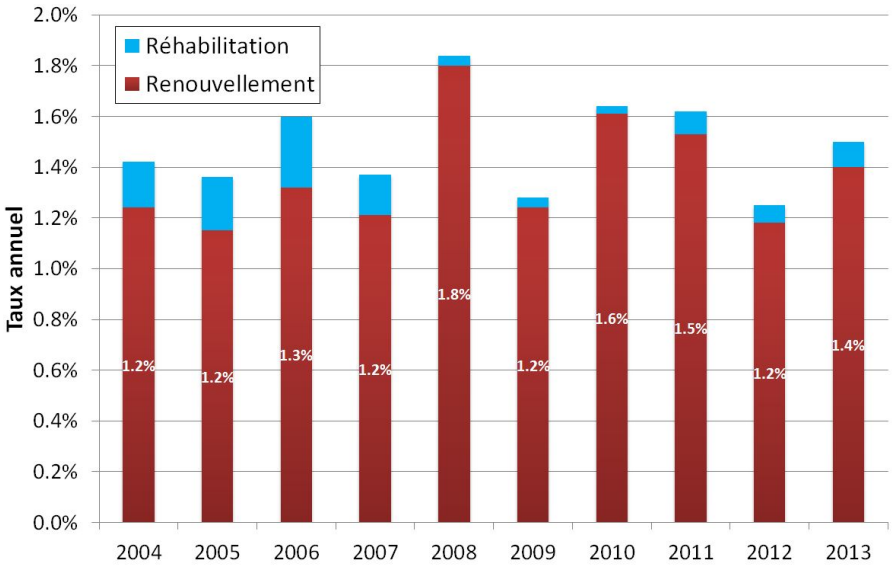


FIGURE 5.1: Taux de renouvellement annuel à Lausanne de 2004 à 2013

2. Rapport sur le Prix et la Qualité du Service d'eau

Ainsi, à Lausanne, l'indicateur suivi est le taux de renouvellement annuel (cf. rouge sur la figure 5.1). Celui-ci est bien dissocié du taux annuel de réhabilitation (chemisage, tubage des conduites) (cf. bleu sur la figure 5.1). Le taux de renouvellement moyen à Lausanne entre [2004, 2013] est égal à 1,4%. Si nous ajoutons le taux de réhabilitation, le total passe à 1,5% sur cette période.

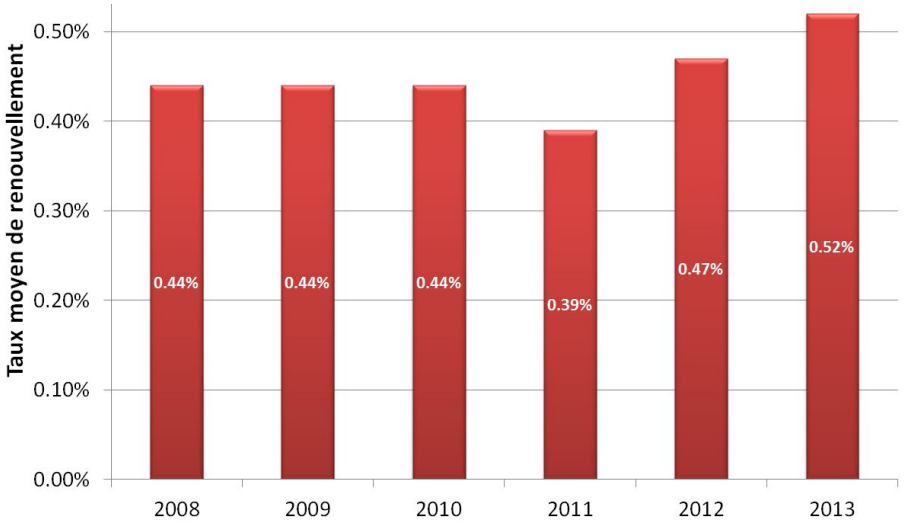


FIGURE 5.2: Taux de renouvellement moyen (sur 5 ans) au SEDIF de 2008 à 2013, ($P107.2$)

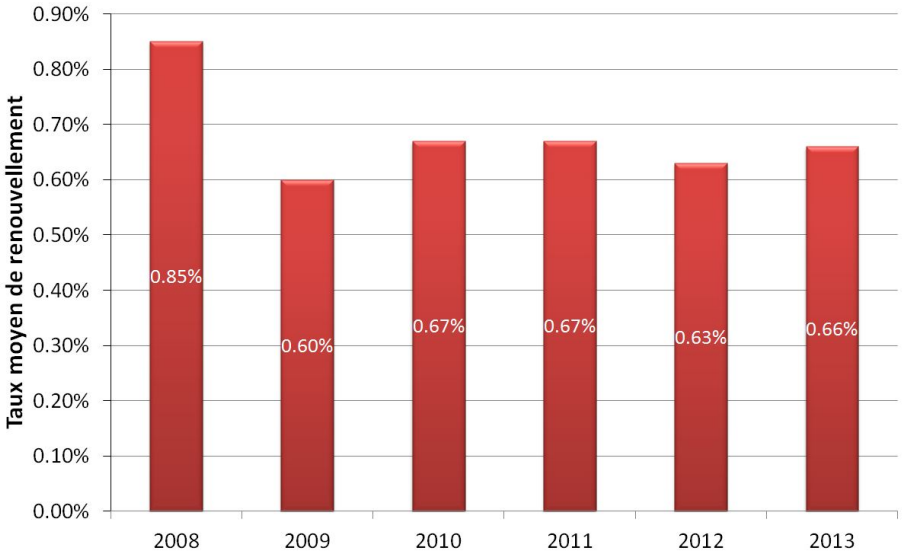


FIGURE 5.3: Taux de renouvellement moyen (sur 5 ans) au Grand Lyon TVD de 2008 à 2013, ($P107.2$)

En revanche, en France, l'indicateur suivi est celui fixé par la règlementation française [SISPEA, 2015] à savoir l'indicateur $P107.2$ qui correspond à un taux de renouvellement moyen $TR_{moy}(y_0)$ sur les 5 dernières années (cf. équation 5.1). Cet indicateur est donc plus difficile à interpréter et à appréhender que celui de Lausanne.

$$P107.2(y_0) = TR_{moy}(y_0) = \frac{\sum_{k=y_0-4}^{y_0} LR_k}{5 \times L_\Omega(y_0)} \tag{5.1}$$

Avec LR_k le linéaire de canalisations du réseau de distribution renouvelé l'année k et $L_\Omega(y_0)$ la longueur du réseau de distribution au 31 décembre de l'année y_0.

De plus, dans cette relation le linéaire considéré comme renouvelé inclut le linéaire renouvelé mais aussi le linéaire réhabilité (si ces opérations ont pour effet d'en prolonger la durée de maintien en service d'une durée équivalente à celle de la pose d'un réseau neuf) [SISPEA, 2015]. Cette définition complique la compréhension de cet indicateur car il est difficile de savoir quand la réhabilitation est incluse et quand elle ne l'est pas.

Néanmoins, nous pouvons retenir qu'en moyenne sur la fenêtre [2004, 2013] le taux de renouvellement du SEDIF est de 0,44% (cf. rouge sur la figure 5.2), et celui de Grand Lyon TVD est de 0,68% (cf. rouge sur la figure 5.3).

Pour avoir quelques références sur cet indicateur, il est à noter que le taux de renouvellement moyen en France en 2012 (moyenne de l'indicateur $P107.2$) des réseaux d'eau potable est de 0,6% [Dequesne et al., 2015]. Par conséquent, le SEDIF se situe légèrement en dessous de cette moyenne et le Grand Lyon TVD ainsi qu'eauservice Lausanne sont au-dessus. Le taux de renouvellement moyen en Suisse est de 1,5% en 2013 [SSIGE, 2014]. Seul eauservice Lausanne atteint ce seuil.

En résumé, les taux de renouvellement passés dans chaque terrain d'étude vont du simple au triple. Le plus bas est le SEDIF 0,4% ensuite le Grand Lyon TVD à 0,7% et enfin le plus haut est à Lausanne 1,5%. Nous constatons une grande disparité, qui a ce stade ne peut pas être interprété. Ces taux dépendent notamment de l'historique de pose des canalisations et des caractéristiques des services d'eau.

5.3 L'indice linéaire de perte du réseau : un indicateur clé sur les résultats

Un indicateur clé qui permet de donner des informations sur les résultats (ou performances) des réalisations [3] des AOEP est l'indice linéaire de perte. Cet indicateur n'est pas calculé de la même façon à Lausanne et en France.

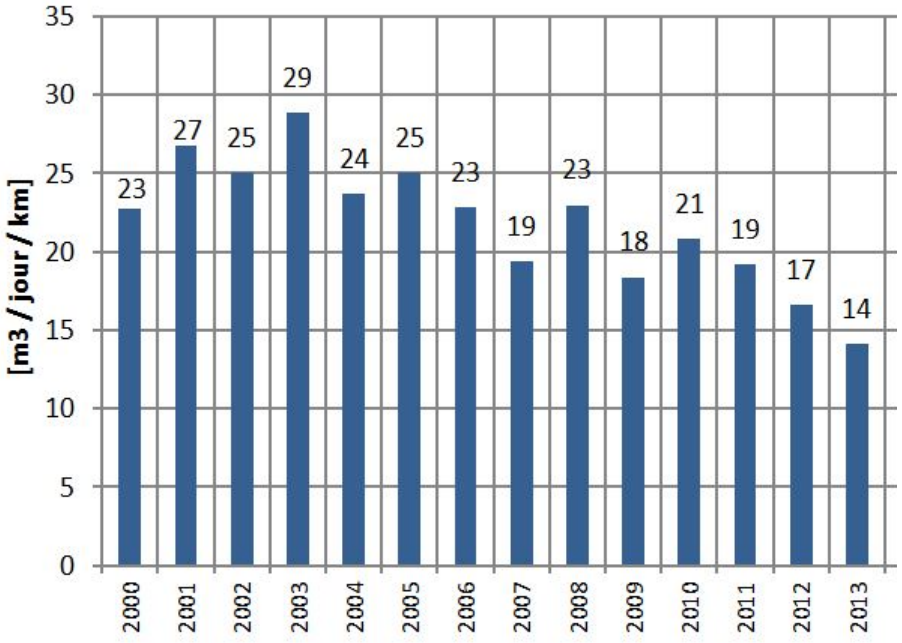


FIGURE 5.4: ILP_{brut} à Lausanne

3. cf. section 1.3 qui définit les mots réalisations et résultats.

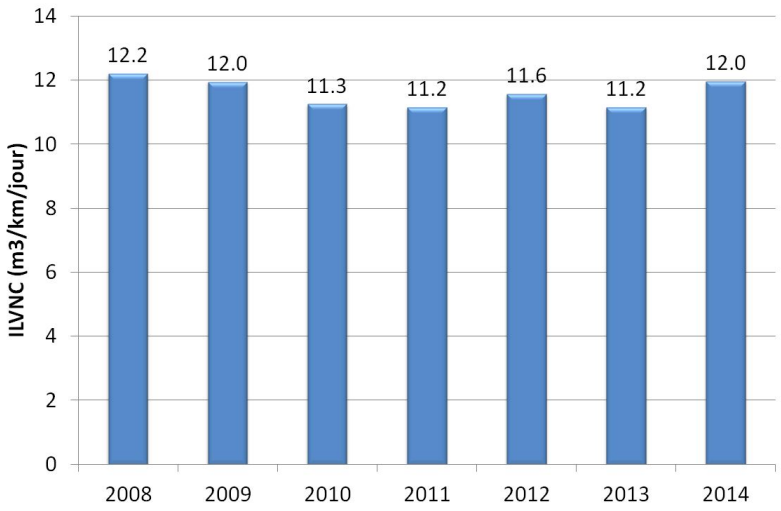


FIGURE 5.5: $ILVNC$ au SEDIF, $P105.3$

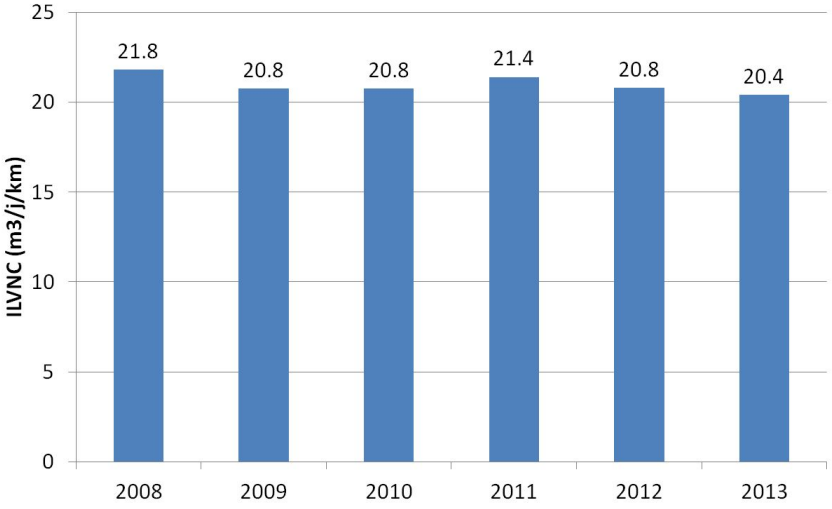


FIGURE 5.6: $ILVNC$ au Grand Lyon TVD, $P105.3$

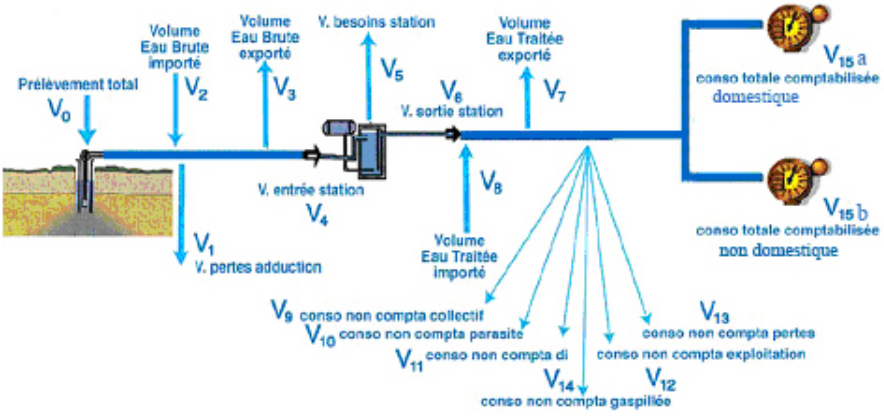


FIGURE 5.7: Volumes annuels définis pour le calcul des indicateurs, à partir de [SMEGREG, 2009b, p. 5], di : défense incendie

Eauservice Lausanne suit l'ILP_{brut} qui correspond tout simplement aux volumes entrants dans le réseau après station de traitement dont on déduit les volumes consommés comptabilisés au cours d'une année (cf. équation 5.2) rapportés au kilomètre de réseau et à la journée.

$$ILP_{\text{brut}} = \frac{V_6 + V_8 - V_7 - V_{15a} - V_{15b}}{L_\Omega \times 365} \tag{5.2}$$

Où les définitions des volumes V_k sont indiquées sur la figure 5.7.

En France, le calcul de l'indicateur nommé ILP est plus complexe. L'ILP défini par le RPQS, nommé $P106.3$, ressemble à l'ILP_{brut}, néanmoins sont aussi soustraits les volumes consommés des usagers sans compteurs (tels que le lavage de la voirie ou la défense incendie) et les volumes utilisés par le service des eaux sans compteurs (comme les purges et les eaux de lavage des réservoirs) (cf. équation 5.3). Ces deux derniers volumes doivent donc être estimés ce qui est une source d'incertitudes.

$$P106.3 = ILP = \frac{V_6 + V_8 - V_7 - V_9 - V_{11} - V_{12} - V_{15a} - V_{15a}}{L_\Omega \times 365} \tag{5.3}$$

Un indicateur équivalent à l'ILP_{brut} de Lausanne est également prévu par la règlementation française : c'est l'indice linéaire des volumes non comptés ($ILVNC$), $P105.3$. Par conséquent c'est celui-ci que nous utiliserons. Il correspond aux volumes introduits après la station de traitement dont on déduit les volumes comptabilisés rapportés au km et à la journée (cf. équation 5.4).

$$P105.3 = ILVNC = \frac{V_6 + V_8 - V_7 - V_{15a} - V_{15b}}{L_\Omega \times 365} \tag{5.4}$$

Niveau de pertes faible	$ILVNC \leq 0.24 \times ILC$
Niveau de pertes modéré	$0.24 \times ILC < ILVNC \leq 0.4 \times ILC$
Niveau de pertes élevé	$0.4 \times ILC < ILVNC \leq 0.68 \times ILC$
Niveau de pertes très élevé	$0.68 \times ILC < ILVNC$

Tableau 5.1: Référentiel d'$ILVNC$ en fonction d'ILC [SMEGREG, 2009b, p. 31]

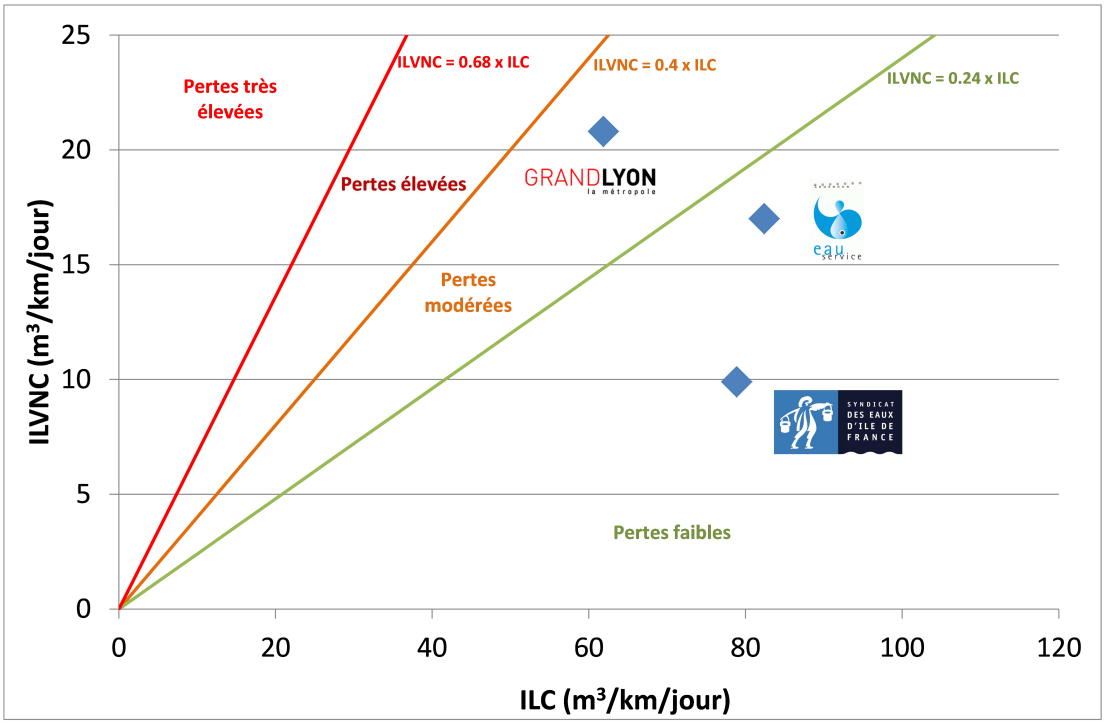


Figure 5.8: $ILVNC$ en fonction de l'ILC en 2012 pour les trois terrains d'études

L'ILP_{brut} moyen à eauservice Lausanne entre [2000, 2013] est de 22 m^3/jour/km. Il présente une tendance marquée à la baisse au fil des ans. Ainsi, en 2013 l'ILP_{brut} était de 14 m^3/jour/km (cf. figure 5.4).
L'$ILVNC$ moyen au Grand Lyon TVD entre [2008, 2013] est de 21 m^3/jour/km. La tendance est légèrement à la baisse, ainsi en 2013, l'$ILVNC$ était de 20,4 m^3/jour/km (cf. figure 5.6).
L'$ILVNC$ moyen au SEDIF entre [2008, 2014] est de 12 m^3/jour/km. La tendance est plutôt stable, ainsi en 2014 l'$ILVNC$ était de 12 m^3/jour/km (cf. figure 5.5).
L'ILP_{brut} ou l'$ILVNC$ sont corrélés à la densité urbaine. Pour les évaluer il faut trouver un moyen pour la prendre en compte. Le rapport [SMEGREG, 2009b, p. 31] donne des références sur comment interpréter cet indicateur (cf. tableau 5.1). Une méthode consiste à représenter l'$ILVNC$ en fonction de l'indice linéaire de consommation ILC (cf. équation 5.5). Le niveau des pertes d'eau du réseau est faible lorsqu'il se situe en-dessous de la courbe verte : $ILVNC = 0.24 \times ILC$ (cf. figure 5.8), c'est le cas du SEDIF et de Lausanne en 2012. Le niveau des pertes d'eau est modéré pour le Grand Lyon en 2012.

$$ILC = \frac{V_7 + V_{15a} + V_{15b}}{L_\Omega \times 365} \tag{5.5}$$

Pour résumer, le niveau de perte, mesuré par l'ILP_{brut}, au SEDIF et à Lausanne est faible et modéré au Grand Lyon.

5.4 Conclusion

Les trois indicateurs que nous venons de présenter montrent des situations tranchées. Ils mettent en évidence que les taux de renouvellement et la performance (ici les pertes) ne peuvent pas être reliés directement. Le rythme de renouvellement doit prendre en compte des facteurs propres à chaque service notamment la pyramide des âges résultant de l'historique du service. C'est pourquoi nous allons maintenant nous intéresser à l'étude des âges et des causes à la mise hors service.

Chapitre 6

Evaluation rétrospective des causes et des âges à la mise hors service de groupes de canalisations

Dans la littérature scientifique [Malm et al., 2012; Scholten, 2013; Nedey, 2014] et la littérature grise [1] [Cador, 2002a,b; Mattersdorf, 2010; OIEau and E&Y, 2012; Bruyeron and Re, 2012b; Canalisateurs, 2012; Pillot, 2011b] nous rencontrons de nombreux chiffres concernant les durées de maintien en service des canalisations. Cependant, les méthodes ayant servi à estimer ces durées sont rarement explicitées et on ne sait pas souvent si les valeurs données correspondent à la médiane, la moyenne ou l'âge maximal possible de maintien en service.
Dans ce chapitre pour déterminer les âges et les causes à la mise hors service nous proposons de recourir à l'analyse de survie qui permet de construire la distribution des âges à la mise hors service sur une fenêtre d'observation passée de groupes de tronçons.

6.1 Justification du choix des modèles

Dans ce chapitre, à partir des données, nous nous efforçons de répondre aux deux questions suivantes :

- *A quels âges les tronçons ont-ils été mis hors service ?*
- *Quelles ont été les causes de mises hors service des tronçons ?*

Des questions de même nature, sont posées dans le domaine de la santé humaine depuis de très longues années (cf. annexe A). De même que pour les âges à la mise hors service des tronçons, les données concernant les âges des décès des êtres humains souffrent de deux faiblesses structurelles : elles sont souvent **tronquées à gauche** et **censurées à droite** (cf. définitions dans la section 3.2.2.2). Ces faiblesses résultent du caractère limité dans le temps de la fenêtre d'observation, c'est à dire de la longueur d'enregistrement des phénomènes. Ces deux biais ont des effets non négligeables sur les modèles et doivent être corrigés dans la mesure du possible [Kaplan and Meier, 1958]. Par conséquent, de nombreux statisticiens épidémiologistes comme [Greenwood, 1926; Kaplan and Meier, 1958; Nelson, 1969; Cox, 1972; Aalen, 1976; Turnbull, 1976] se sont attelés à trouver des méthodes mathématiques permettant de corriger les biais liés à la censure à droite et à la troncature à gauche.

1. La littérature grise est, selon l'AFNOR, tout document dactylographié ou imprimé, souvent à caractère provisoire, reproduit et diffusé à un nombre d'exemplaires inférieur au millier, en dehors des circuits commerciaux de l'édition et de la diffusion.

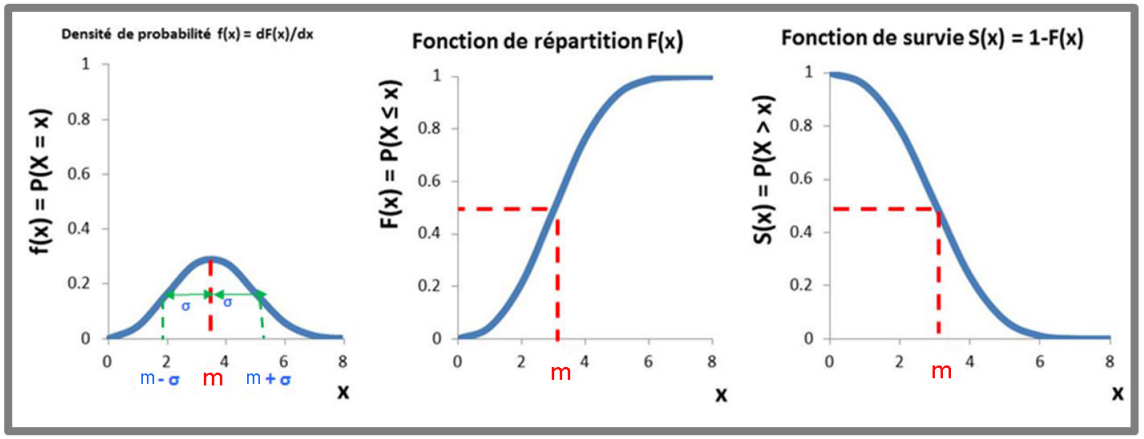


FIGURE 6.1: Représentation schématique de la densité de probabilité, de la fonction de répartition et la fonction de survie d'une variable aléatoire X suivant une loi normale

La variable aléatoire continue que nous étudions est **l'âge T à la mise hors service des tronçons** ($\in \mathbb{R}^+$). Nous désirions étudier la densité de probabilité [2] passée de cette variable $f(t) \approx \mathrm{P}(T = t)$ car elle est plus facilement intelligible que la fonction de répartition $F(t) = \mathrm{P}(T \leq t)$ ou de survie $S(t) = \mathrm{P}(T > t)$ (cf. figure 6.1). Néanmoins, après analyse de la revue bibliographique, nous nous sommes rendu compte, du fait du caractère continu de T, que la fonction de survie empirique est plus facile à estimer que la densité de probabilité empirique. Par conséquent, nous travaillerons essentiellement avec la loi de survie.

Pour estimer la fonction de survie de T passée d'un groupe de tronçons, nous avons utilisé les méthodes de Turnbull [Turnbull, 1976; Le Gat et al., 2013] et de Kaplan-Meier [Kaplan and Meier, 1958; Claude and Lyon, 1997] prenant en compte la censure à droite et la troncature à gauche. Les méthodes de Turnbull et de Kaplan-Meier nous ont donné strictement les mêmes résultats. Vu que la méthode itérative de Turnbull est bien plus longue en temps de calcul ($\approx$ 25 minutes) nous avons privilégié la méthode de Kaplan-Meier (instantanée). Nous présenterons donc ici uniquement les résultats de cette méthode.

Nous cherchons à estimer la survie T (âge à la mise hors service) par groupes de tronçons.

6.2 Description des modèles employés

6.2.1 Méthode en effectif

Pour rappel nous avons noté y_1 l'année de début de la fenêtre d'observation, y_2 l'année de fin d'observation et T la variable aléatoire représentant l'âge à la mise hors service. Pour chaque tronçon i, nous avons posé : y_{0i} son année de pose, y_{2i} la dernière année où on l'observe, $y_{\dagger i}$ son année de mise hors service, t_{1i} l'âge du tronçon au début de son observation ($t_{1i} = 0$ an si le tronçon a été posé après y_1 sinon $t_{1i} = y_1 - y_{0i}$), t_{2i} l'âge du tronçon à la fin de son observation ($t_{2i} = y_2 - y_{0i}$ s'il est encore en service à la fin de la fenêtre d'observation sinon $t_{2i} = y_{\dagger i} - y_{0i}$) et c_i sa variable censure ($c_i = 0$ si $y_{2i} = y_{\dagger i}$ et $c_i = 1$ si $y_{2i} = y_2$).

L'estimateur de Kaplan-Meier [Kaplan and Meier, 1958; Claude and Lyon, 1997; Saint Pierre, 2013] permet d'estimer une fonction de survie empirique d'après des durées de maintien en service observées. Il repose sur l'idée qu'être en service après un âge t, c'est être en service juste avant t (ici : t moins une année) et ne pas passer hors service à l'âge t. L'évènement d'intérêt ici est la mise hors service d'un tronçon.

2. La densité de probabilité d'une loi normale n'est pas strictement égale à $f(t) = \mathrm{P}(T = t)$ mais à $f(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\mathrm{P}(T \epsilon [t,\ t+\Delta t])}{\Delta t}$ car c'est une loi de probabilité continue.

L'estimateur de Kaplan-Meier de la survie, $\widehat{S}_{\mathrm{K}}(t)$, est alors un produit de la forme suivante :

$$\widehat{S}_{\mathrm{K}}(t) = \prod_{a \,\leq\, t} \left(1 - \frac{\mathrm{Card}\,\{i \;:\; t_{2i} = a,\; c_i = 0\}}{\mathrm{Card}\,\{i \;:\; t_{1i} \leq a,\; t_{2i} \geq a\}}\right) \tag{6.1}$$

En posant $g(a) = \mathrm{Card}\,\{i \;:\; t_{2i} = a,\; c_i = 0\}$ et $G(a) = \mathrm{Card}\,\{i \;:\; t_{1i} \leq a,\; t_{2i} \geq a\}$, alors, un estimateur de sa variance $\widehat{\sigma}^2_{\mathrm{K}}(t)$ est donné par la formule de Greenwood [Greenwood, 1926; Aalen et al., 2008] (cf. équation 6.2) :

$$\widehat{\sigma}^2_{\mathrm{K}}(t) = \widehat{S}^2_{\mathrm{K}}(t) \times \sum_{a \leq t} \frac{g(a)}{G(a) \times [G(a) - g(a)]} \tag{6.2}$$

Nous avons testé plusieurs méthodes pour estimer l'intervalle de confiance à 95% de la fonction de survie : la méthode classique, la formule de Rothman, la méthode beta. Il se trouve que c'est l'équation suivante [Andersen et al., 1997, p. 265] qui s'ajuste le mieux à nos données.

$$IC_{95\%}(t) = \widehat{S}_{\mathrm{K}}(t)^{\exp\left[\pm 1,96 \times \dfrac{\widehat{\sigma}_{\mathrm{K}}(t)}{\widehat{S}_{\mathrm{K}}(t) \times \ln[\widehat{S}_{\mathrm{K}}(t)]}\right]} \tag{6.3}$$

6.2.2 Méthode pondérée par la longueur des tronçons

L'estimateur $\widehat{S}_{\mathrm{K}}(t)$ précédent de la fonction de survie de l'âge à la mise hors service des tronçons, considère chaque tronçon comme un individu. Ils ont tous le même poids quelle que soit leur longueur. Or, nous avons présenté dans le paragraphe 3.2.2.1 que beaucoup de tronçons sont de très petites tailles, pouvant descendre jusqu'à 1 cm. Par conséquent, $\widehat{S}_{\mathrm{K}}(t)$ n'est pas une fonction facilement compréhensible par les AOEP. Nos interlocuteurs de terrain, lors des réunions du comité de suivi de la thèse, nous ont demandé une fonction de survie sur laquelle ils ont plus de références. La nécessite de prendre en compte la longueur vient du fait que compte tenu de la disparité des longueurs (de 1 cm jusqu'à 8 km), la survie en effectif ne peut pas être facilement reliée à un volume de travaux.
Nous avons donc établi, par analogie, l'estimateur suivant $\widehat{S}_{\mathrm{L}}(t)$ de la fonction de survie de T qui pondère l'importance de chaque tronçon i selon leurs longueurs L_i. Cela revient à considérer que le réseau est constitué de tronçons de longueurs homogènes.

$$\widehat{S}_{\mathrm{L}}(t) = \prod_{a \,\leq\, t} \left[1 - \left(\sum_{i \,:\, t_{2i}=a,\; c_i=0} L_i\right) \Big/ \left(\sum_{i \,:\, t_{1i}\leq a,\; t_{2i}\geq a} L_i\right)\right] \tag{6.4}$$

Puis, nous avons créé, par analogie encore, l'estimateur suivant de sa variance : $\widehat{\sigma}^2_{\mathrm{L}}(t)$ et son intervalle de confiance à 95% :

$$\widehat{\sigma}^2_{\mathrm{L}}(t) = \widehat{S}^2_{\mathrm{L}}(t) \times \sum_{a \leq t} \frac{g(a)}{G(a) \times [G(a) - g(a)]} \tag{6.5}$$

$$IC_{95\%}(t) = \widehat{S}_{\mathrm{L}}(t)^{\exp\left[\pm 1,96 \times \dfrac{\widehat{\sigma}_{\mathrm{L}}(t)}{\widehat{S}_{\mathrm{L}}(t) \times \ln[\widehat{S}_{\mathrm{L}}(t)]}\right]} \tag{6.6}$$

6.2.3 Degré de confiance des fonctions de survie rétrospectives

Nous avons montré dans la section 3.2.2.2 qu'au-delà de la troncature à gauche et de la censure à droite une partie des données est soit estimée soit manquante. L'intervalle de confiance à 95% ne traduit pas totalement le degré de confiance que l'on peut avoir dans les fonctions de survie. Par conséquent, en nous inspirant de la méthode employée dans les rapports sur le prix et la qualité du service (RPQS) en France, nous avons attribué aux courbes de survie une lettre en fonction du niveau estimé de la qualité des données et/ou des manques :
- A : La collecte des données suit les meilleures pratiques et les données ne font pas l'objet d'estimation et/ou de manque significatif (moins de 5 % du total).
- B : La collecte des données suit les meilleures pratiques. Les estimations et/ou les manques sont supérieurs à 5% mais restent inférieurs à un tiers du total.
- C : Absence de suivi des meilleures pratiques ou estimations ou manques très significatifs (supérieurs à un tiers du total).

D'une manière générale les courbes de survies rétrospectives du SEDIF et de Lausanne appartiennent au groupe A, celles du Grand Lyon au groupe B.

6.3 Quelques résultats et discussions

6.3.1 Intérêt de la survie en linéaire

Le graphique de la figure 6.2 représente la survie passée, entre [2001 ; 2013], des tronçons en fonte ductile à Lausanne selon 3 modes de calcul :

1. corrigé de la censure et de la troncature, en effectif (nombre de tronçons), selon l'équation 6.1 (cf. survie en vert) ;
2. corrigé de la censure et de la troncature, en linéaire du réseau, selon l'équation 6.4 (cf. survie en rouge) ;
3. et non corrigé de la censure et de la troncature, en linéaire du réseau, selon l'équation E.3 (cf. survie brute en gris).

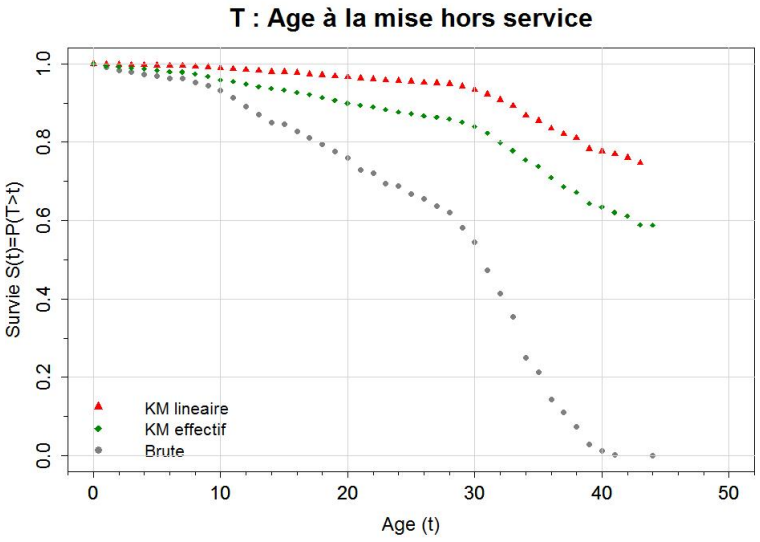


FIGURE 6.2: Fonctions de survie empirique selon trois modes de calculs 1) brute (en gris) 2) Kaplan-Meier en effectif (en vert) 3) Kaplan-Meier en linéaire (en rouge), sur la fenêtre d'observation [2001 ; 2013] concernant uniquement les tronçons en fonte ductile du réseau en ville d'eauservice Lausanne.

La fonte ductile est un matériau assez récent, posé à Lausanne à partir des années 1970. Au 31/12/2013, le linéaire en service en fonte ductile était de 512 km et uniquement 32 km ont été mis hors service entre [2001; 2013]. La majorité des tronçons en fonte ductile est encore en service, le phénomène de censure à droite est donc très important. Le plus vieil âge à la mise hors service observé est seulement de 44 ans. Il est évident que certains tronçons en fonte ductile seront mis hors service à un âge plus élevé que 44 ans mais l'on ne dispose pas aujourd'hui de ces données. La survie brute est donc fortement biaisée et nous ne l'utiliserons pas dans cette étude. Les deux autres survies corrigent le biais induit par la censure à droite. Cependant, la survie en linéaire permet de comparer des réseaux qui n'ont pas la même définition du mot tronçon et elle est plus facilement intelligible. Par conséquent, nous essayerons au maximum d'utiliser celle-ci.
Nous constatons que la survie en linéaire est au-dessus de celle en effectif ce qui traduit que les tronçons courts sont en moyenne davantage remplacés que les tronçons longs.

6.3.2 Les âges à la mise hors service passés

La figure 6.3 représente la survie passée de l'ensemble du réseau (en linéaire) d'eauservice Lausanne, du Grand Lyon TVD et du SEDIF sur leurs fenêtres d'observation respectives ainsi que leurs intervalles de confiance à 95 %. Le degré de confiance de ces survies est élevé pour le SEDIF et Lausanne (groupe A) alors qu'il est moyen pour le Grand Lyon (groupe B). La figure 6.3 donne la réponse, à l'échelle du réseau de chaque AOEP, à la première question de la section 6.1 : *"A quels âges les tronçons ont-ils été mis hors service ?"*. Par exemple, sur la figure 6.3 on peut lire que, sur leurs fenêtres d'observation respectives, l'âge médian à la mise hors service des tronçons du réseau d'eauservice Lausanne est de 55 ans alors qu'il est le double au SEDIF (110 ans) (cf. tableau 6.1). Ce résultat est cohérent avec les taux de renouvellement passés appliqués dans ces territoires de 1,5% à Lausanne contre 0,44% au SEDIF.

Les âges à la mise hors service au Grand Lyon semblent se situer entre les deux. Les intervalles de confiance statistique dépendent naturellement de la taille de l'échantillon. Leur largeur est certainement sous-estimée dans la mesure où elle n'intègre pas les effets de l'incertitude et de l'incomplétude des données (qui peuvent être importants si les données sont fortement incertaines). Le degré de confiance étant moyen (groupe B) pour le Grand Lyon TVD il convient de prendre avec prudence les résultats sur les âges à la mise hors service passé sur ce terrain d'étude.

Les pentes des courbes de survie autour de la médiane sont très à moyennement abrupte pour Lausanne et le Grand Lyon et plus douce pour le SEDIF. Ce constat indique qu'à Lausanne proportionnellement parlant les mises hors services sont très importantes autour de 55 ans et faible avant 30 ans et après 80 ans.

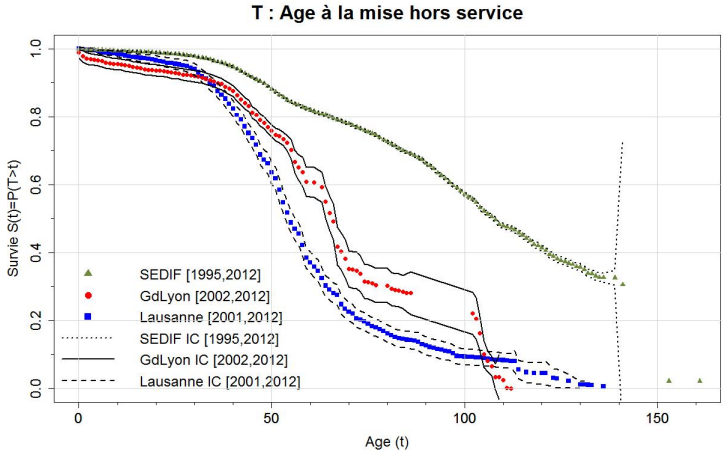


FIGURE 6.3: Fonctions de survie empirique, en linéaire, et leurs intervalles de confiance à 95% (IC) pour l'ensemble du réseau d'eauservice, du Grand Lyon et du SEDIF, sur leurs fenêtres d'observation passées respectives (valeur entre crochets)

AOEP	Age à la mise hors service médian : $S(t) = 0,5$	Age à la mise hors service max : $S(t) \approx 0$	Degré de confiance	Fenêtre d'observation passée
Lausanne	55 ans	143 ans	A	[2001, 2012]
Grand Lyon	68 ans	113 ans	B	[2002, 2012]
SEDIF	110 ans	161 ans	A	[1995, 2012]

TABLEAU 6.1: Ages médian et maximal à la mise hors service dans les terrains d'étude sur leurs fenêtres d'observation respectives

Nous venons de répondre à la première question posée à savoir :

- *"A quels âges les tronçons ont-ils été mis hors service ?"*

Pour répondre partiellement à la seconde, à savoir :

- *"Quelles ont été les causes de mises hors service des tronçons ?"*,

une première méthode consiste à déterminer les survies passées en stratifiant le réseau de chaque AOEP à partir d'une variable explicative de la mise hors service.
Notre logique repose sur l'identification des variables discriminantes majeures pouvant expliquer des changements dans la loi de survie. Dans un premier temps, nous avons identifié l'ensemble des variables à tester sur la base de l'étude bibliographique et des pratiques de terrain. Dans un second temps nous avons partitionné les données relativement à ces variables, et vérifié si elles s'avéraient ou non discriminantes.
Nous allons présenter quelques résultats clés dans la section suivante.

6.3.3 Mises en évidence de quelques causes de mise hors service des tronçons

Dans cette section le réseau est divisé en plusieurs strates [3].

Encadré 5 - Strate : Sens et étymologie

Le mot strate viendrait du latin *stratum* qui signifiait couverture de lit. Actuellement, en géologie une strate est une couche homogène d'une roche sédimentaire. En sciences sociales, ce terme est utilisé pour catégoriser les communes françaises. Par exemple, la strate de 500 à 2 000 habitants regroupe toutes les communes ayant ce nombre d'habitants. Cette dernière définition se rapproche du concept de partition en mathématique.
Dans ce manuscrit, nous employons le mot stratification avec le même sens que le mot partitionnement. Donc nous nommons chaque partition : strate. Sachant qu'une partition mathématique (ou une strate) a la définition suivante :

Soit Ω l'ensemble des tronçons du réseau d'une AOEP. Un sous-ensemble des tronçons de Ω est une strate de Ω si et seulement si :

- aucune de ses strates n'est vide ;
- l'union de toutes ses strates est égale à Ω ;
- les strates sont deux à deux disjointes.

6.3.3.1 Le nombre de défaillances passées

D'après l'analyse des pratiques passées des terrains d'étude (cf. figure 2.6), une variable qui devrait expliquer une partie des mises hors service passées est le nombre de défaillances qu'a subi chaque tronçon, puisque les gestionnaires ont tendance à privilégier le renouvellement des tronçons ayant

3. Ce mot est polysémique cf. définitions dans l'encadré 5 page 58.

montré des défaillances. Partant de cette idée, nous avons créé pour chaque tronçon i une variable $NDOA_i$ qui correspond au nombre de défaillances moyen annuel sur la période d'observation du tronçon $(t_{2i} - t_{1i})$. Ensuite, nous avons séparé le réseau en deux strates :

1. ceux avec $NDOA_i > 0$;
2. ceux avec $NDOA_i$ égal à 0.

La figure 6.4 présente les survies estimées sur ces deux strates. La survie de la strate $NDOA_i > 0$ (cf. courbe noire) est plus proche de l'axe des ordonnées que celle de $NDOA_i = 0$ (cf. courbe orange). Ce résultat met en évidence que les tronçons ayant subi au moins une défaillance sur la fenêtre d'observation sont mis hors service plus tôt que ceux n'ayant subi aucune défaillance sur cette même fenêtre. Cette conclusion était intuitive : l'analyse des données conforte les pré-supposés.

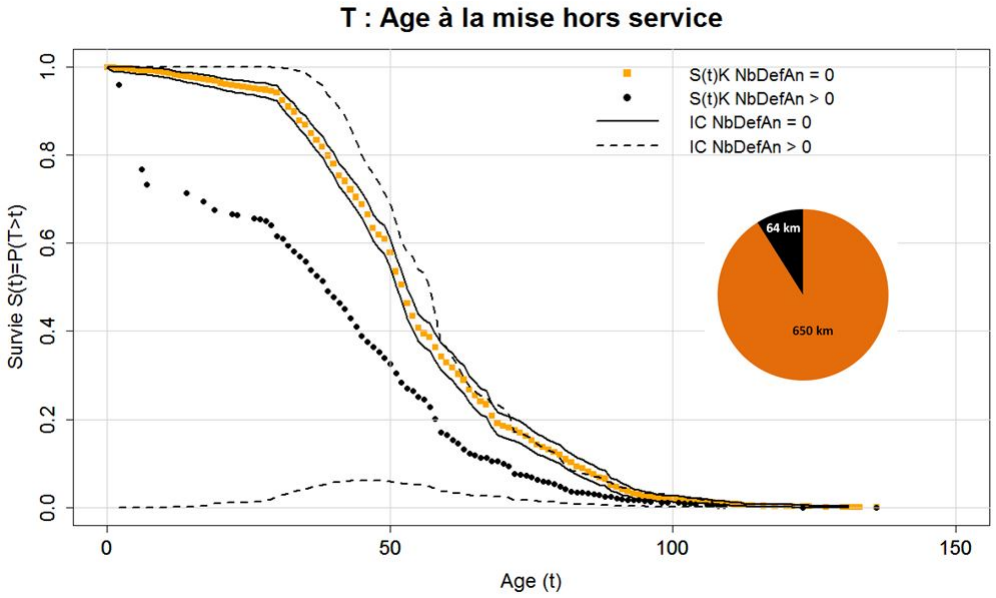


FIGURE 6.4: Réseau en ville d'eauservice Lausanne partitionné en deux strates selon le nombre de défaillances. Droite : Courbes de survie passée et leurs intervalles de confiance (IC) à 95%, sur la fenêtre d'observation [2001,2013]. Gauche : Diagramme représentant la proportion de ces deux strates vis-à-vis du linéaire en service fin 2013.

☞ Pour en savoir plus : consulter la simulation "Lausanne № 8" dans l'annexe J.

6.3.3.2 La présence et la vulnérabilité des usagers

La figure 6.5 présente la stratification du réseau de Lausanne en 4 strates : 1) Les conduites d'adduction d'eau situées en zone de montagne, 2) les conduites d'amenées, qui sont des conduites de transport situées en zone de montagne, 3) les conduites de distribution et de transport en ville dont le diamètre est < 250 mm, 4) les conduites de distribution et de transport en ville dont le diamètre est ≥ 250 mm. Nous constatons que les deux courbes de survie en ville sont bien plus proches de l'axe des ordonnées que les deux survies en zone de montagne. Donc, eauservice Lausanne met hors service plus tôt (en âge) les conduites en ville que les conduites en montagne. Ce résultat s'explique car eauservice Lausanne ne traite pas les conduites en zones de montagne de la même manière que les conduites en ville. En effet, une défaillance en zone de montagne ne provoquera quasiment pas de dommages sur des biens ou les personnes, et ce d'autant plus que les conduites d'adduction sont gravitaires (faible pression). Donc à nombre de défaillances passées et à âges égaux, eauservice a tendance à moins renouveler les conduites en montagne. De plus les conduites en montagne sont en général plus robuste et de première génération (jamais remplacés) et les canalisations de diamètre important sont mieux surveillées.

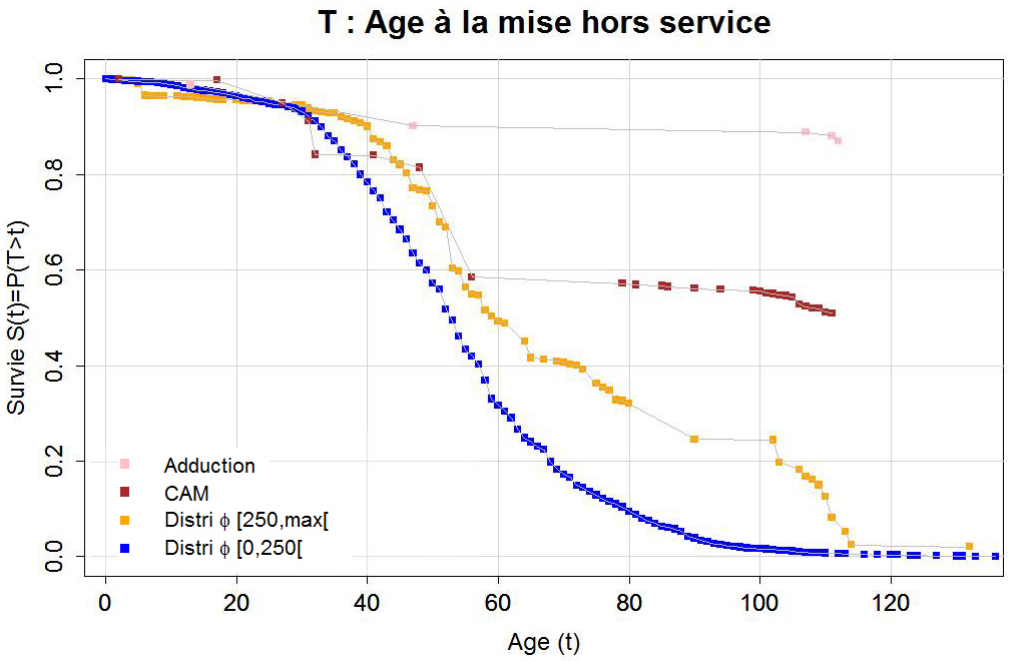


FIGURE 6.5: Courbes de survie passée à Lausanne sur [2001, 2012] (méthode Kaplan Meier en linéaire), selon 4 strates : 1) conduites de distribution et de transport en ville de diamètre < 250 mm, 2) conduites de distribution et de transport en ville de diamètre ≥ 250 mm, 3) conduites d'amenés (CAM) en zone de montagne et 4) conduites d'adduction en zone de montagne

☞ Pour en savoir plus : consulter la simulation "Lausanne № 2" dans l'annexe J.

6.3.3.3 La qualité des matériaux employés

Dans ce paragraphe nous avons partitionné l'ensemble des tronçons du SEDIF en 6 sous-ensembles selon leurs matériaux : 1) Fonte grise (FG), 2) Fonte ductile (FD) 3) Béton âme tôle de Bonna Sabla 4) PEHD (Polyéthylène Haute Densité) 5) Acier 6) autres matériaux [4]. La figure 6.6 représente le linéaire en service fin 2012 et mis hors service entre [1995, 2012] selon cette stratification.

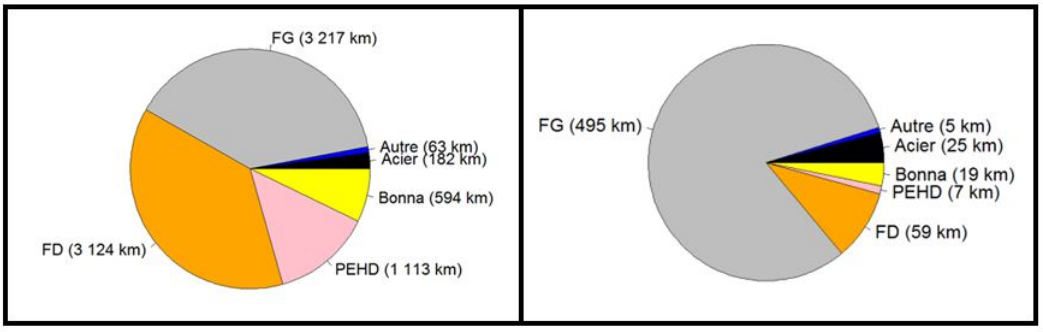


FIGURE 6.6: Diagramme du linéaire (en km) du SEDIF. Gauche : Matériaux en service fin 2012. Droite : Matériaux mis hors service entre [1995,2012]

Sur la figure 6.7 sont représentées les courbes de survie passée entre [1995, 2012] selon les différents matériaux. Notons qu'elles sont très différentes d'un matériau à l'autre.

4. Les autres matériaux sont notamment l'amiante-ciment, le PVC (polyvinyl chloride), le PEBD (polyéthylène basse densité), et des matériaux composites.

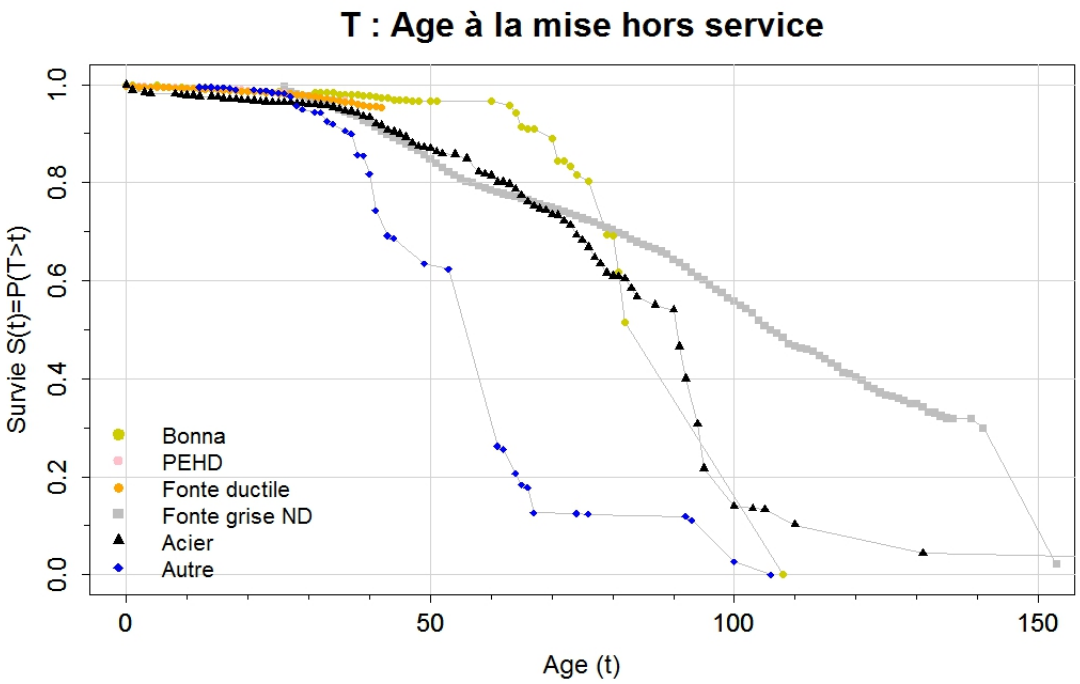


FIGURE 6.7: Courbes de survie passées par matériaux au SEDIF. ND : non déconditionné

☞ Pour en savoir plus : consulter la simulation "SEDIF № 6"dans l'annexe K.

Contrairement aux stratifications selon le nombre de défaillances ou selon la localisation des usagers, le partitionnement selon le matériau est extrêmement corrélé à l'âge des canalisations. En effet, au cours du temps, selon les avancées technologiques, certains matériaux ont été plus employés que d'autres (cf. figure 6.8).

Il est impossible d'estimer la survie après 40 ans des tronçons en fonte ductile et après 30 ans pour le PEHD. Effectivement, ce sont tous deux des matériaux d'emploi récent (cf. figure 6.8) et nous n'avons pas suffisamment d'information dans le temps pour calculer leur survie après ces âges.

Concernant les tronçons en fonte grise, nous ne connaissons pas le début de la courbe de survie entre 0 et 26 ans. Ceci s'explique par le fait que dans notre fenêtre d'observation, le plus jeune tronçon de fonte grise observé en 1995 a 27 ans (cf. figure 6.9). En effet, les derniers tronçons en fonte grise ont été posés aux alentours de 1970 (cf. figure 6.8) tandis que la fenêtre d'observation des âges à la mise hors service commence en 1995. La fonction de survie de la fonte grise est conditionnelle : $S_{cond}(t) = P(T > t \mid T \geq 27)$. Il est possible de déconditionner cette survie. Les méthodes pour réaliser cette étape sont détaillées dans [Large and Tomasian, 2014c].

Les tronçons en "autres matériaux" ont en moyenne été renouvelés plus tôt que les tronçons en acier, en fonte grise ou en béton âme tôle. D'après les experts locaux la survie des "autres matériaux" au SEDIF est très faible car le SEDIF a testé des matériaux composites, qui malheureusement en pratique se sont révélés de très mauvaise qualité. Donc le SEDIF les a renouvelés assez rapidement.

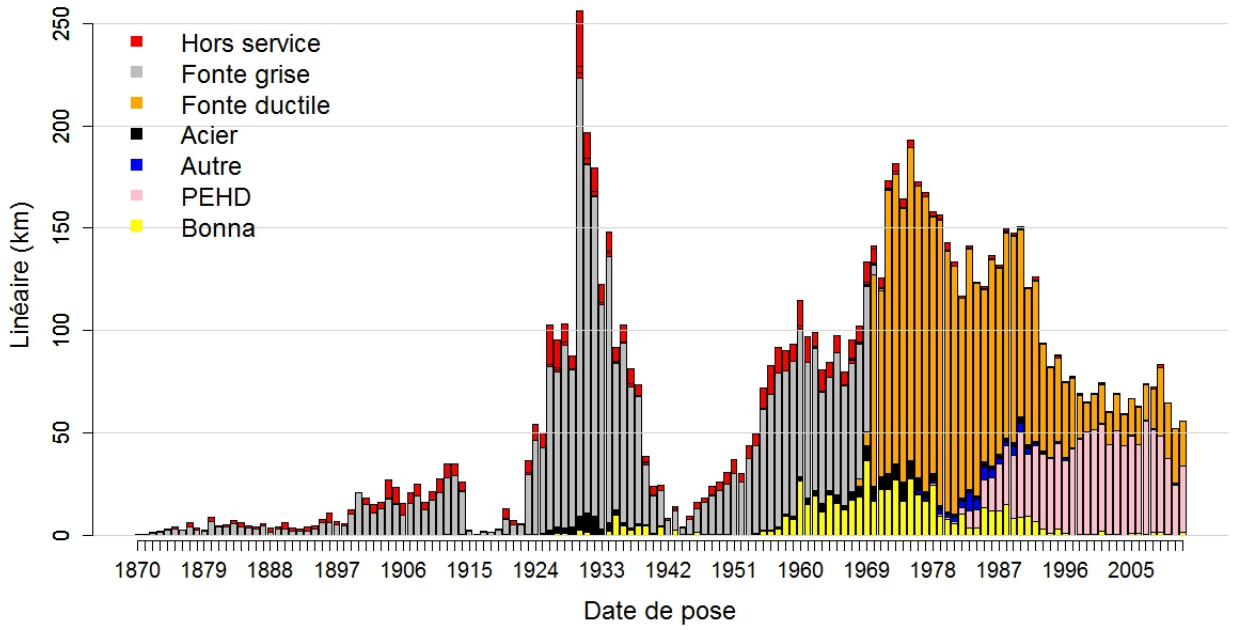


FIGURE 6.8: Linéaire du réseau en service fin 2012 et mis hors service entre [1995, 2012] (en rouge) en fonction des dates de pose. Le linéaire en service est stratifié en fonction des matériaux des canalisations.

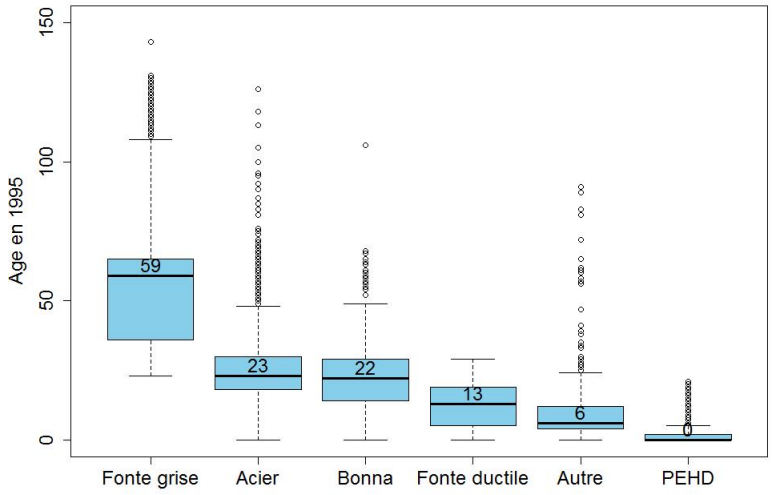


FIGURE 6.9: Réseau du SEDIF stratifié selon les matériaux des canalisations. Distribution des âges des canalisations dans chaque strate au début de la fenêtre d'observation (1995). Fractiles représentés : 0%, 25%, 50%, 75% et 95%.

6.3.4 Pour aller plus loin

Pour créer des survies corrigeant la troncature et la censure, nous avons utilisé le modèle de Kaplan-Meier. Ce dernier, appliqué à l'ensemble des tronçons, a permis de mettre en évidence que les survies sont bien distinctes d'un territoire à l'autre. Les survies dépendent de la qualité des données et des pratiques des terrains d'étude.

Dans ce manuscrit et dans les rapports [Large and Tomasian, 2014a,b,c] nous avons testé 12 (cf. tableau 6.2) variables pour stratifier les réseaux. Par exemple, nous avons testé si les survies variaient

selon la vulnérabilité des usagers, l'intensité du trafic routier, la hauteur du réservoir [5], le niveau d'enfouissement [6], la technique de pose (traditionnelle ou autres [7]), le type d'appui (sol compact ou béton ou autres), présence ou non de balmes [8], etc.

Certaines variables se sont avérées, selon les terrains, plus ou moins explicatives (cf. tableau 6.2). Le nombre de défaillances passées, le matériau et la longueur des tronçons ont été discriminantes pour les 3 terrains d'étude. Les exemples que nous avons choisis de présenter dans ce manuscrit expose des survies éloignées d'une strate à l'autre.

	SEDIF	Grand Lyon	Lausanne
Age / DDP		Abscisse	
Chaussée/ trottoir	----	+	
Diamètre des tronçons	+ +	----	+ + +
Hauteur du réservoir	+ +		
Longueur des tronçons	+ +	+ +	+ + +
Matériau des tronçons	+ + +	+ +	+ +
Nb défaillances	+ +	+ +	+ + +
Profondeur d'enfouissement	----		
Technique de pose	+		
Type d'apui	+		
Type de Joints	+ +		
Vulnérabilité des usagers			+ + +
Zone de Balmes (oui/non)		----	

TABLEAU 6.2: Synthèse des variables testées pour une stratification suivi de la méthode Kaplan-Meier par strate. (+++) variable fortement discriminante, (++) variable discriminante, (+) variable moyennement discriminante, (− − −) variable non discriminante, (cellule vide) variable non testée. Nb : Nombre

6.4 Conclusion

A partir des données disponibles, nous avons montré que la méthode Kaplan-Meier est adaptée pour construire la courbe empirique de survie passée d'une population de tronçons.
Par la stratification, nous avons mis en évidence des différences dans les strates qui donnent des indications sur les causes de mise hors service. Ces dernières résultent pour partie de **phénomènes physiques** (défaillances) et pour partie d'**autres facteurs** (réglementation, coordination, etc.).
Les causes sont multiples et corrélées (cf. les aspects technologiques confirmés par l'ACP (Analyse en Composante Principale) de l'annexe B). L'approche par strate trouve ses limites, donc nous proposons dans le chapitre suivant une approche au tronçon permettant de prendre en compte plusieurs facteurs simultanément.

5. Niveau du trop-plein du réservoir auquel est relié le tronçon selon le NGF (nivellement général de la France en mètre).
6. Différence entre l'altitude du sol et l'altitude du tronçon (en mètre).
7. Par exemple technique de pose sans tranchée.
8. Cavités souterraines.

Chapitre 7

Analyse rétroactive par tronçon des causes et des âges à la mise hors service

7.1 Un modèle de survie individualisé par tronçon : le modèle WeiCo

7.1.1 Justification du choix du modèle

Nous souhaitons pouvoir utiliser les lois de survie dans une démarche prospective, c'est à dire les employer pour simuler les effets de différents scénarios de gestion sur le devenir des réseaux. Il nous faut disposer pour ce faire de modèles explicatifs, décrivant comment la distribution des âges à la mise hors service dépend de variables identifiées, maîtrisables, et dont les paramètres pourront être modifiées à l'avenir selon les scénarios de gestion retenus.

Nous venons de voir, dans ce qui précède, que les lois de survie à la mise hors service établies à partir de l'analyse des données existantes (sur le passé) dépendaient à la fois des paramètres intrinsèques des tronçons et de paramètres relatifs aux décisions prises dans la gestion du patrimoine. De plus, la complexité des corrélations entre les variables (qui peuvent en outre différer selon les terrains d'étude) rendent difficile l'emploi immédiat des lois précédemment identifiées.

Pour l'ensemble de ces raisons, nous allons tâcher d'identifier comment, à l'échelle d'un tronçon, une loi de survie statistique peut être établie, sur la connaissance de l'ensemble de ses variables descriptives.

Nous avons choisi d'écrire les fonctions de survie passées individuelles selon plusieurs formes analytiques dépendantes de différentes covariables[1] du tronçon i. Cependant, il s'est avéré que le modèle que nous avons nommé WeiCo[2], qui combine la loi de Weibull et le modèle de Cox, a donné les résultats les plus intéressants. Nous allons donc présenter le modèle WeiCo.

Notons $\boldsymbol{Z}_i$ le vecteur avec les covariables[3] du tronçon i. Par exemple, les covariables quantitatives peuvent être $NDOA_i$ le nombre moyen de défaillances observé par an, ϕ_i le diamètre du tronçon et L_i la longueur du tronçon. Concernant les variables qualitatives on utilise des covariables indicatrices qui sont des variables binaires associées aux différentes modalités de la covariable qualitative. La fonction de survie du modèle WeiCo s'écrit alors comme suit :

$$S_{\boldsymbol{\theta}}(t,i) = \exp(-t_i^{\delta} \times \mathrm{e}^{\boldsymbol{Z}_i'\boldsymbol{\beta}}) \tag{7.1}$$

1. Ce mot est polysémique cf. sa définition dans l'encadré 6 page 65.
2. Wei pour Weibull et Co pour Cox.
3. La première valeur de ce vecteur est 1 pour obtenir l'intercept les autres sont des covariables stricto sensus.

Avec $\boldsymbol{\beta}$ et $\boldsymbol{\theta}$ les vecteurs des paramètres du modèle à estimer.

Encadré 6 - Covariable : Sens et étymologie

Le préfixe *co* est d'origine latine, il signifie : avec. Ce préfixe exprime donc en général la réunion et la simultanéité. Le mot covariable provient ensuite de l'anglais covariate. En statistique une covariable peut avoir deux sens.

Soit la covariable est une variable prédictive du résultat à l'étude. Elle peut-être d'un intérêt direct ou être un facteur de confusion ou un facteur interagissant avec les autres variables. Avec cette définition, dans notre cas, l'âge du tronçon et les variables dans le vecteur $\boldsymbol{Z}$ (diamètre, longueur, matériaux, réhabilitation, ville/montagne, etc.) sont toutes des covariables.

Soit, dans une utilisation plus spécifique, plus restreinte, une covariable est une variable secondaire qui peut affecter la relation entre la variable dépendante de l'intérêt primaire et d'autres variables indépendantes de l'intérêt primaire. Avec cette deuxième définition, dans notre cas, l'âge du tronçon est la variable dépendante de l'intérêt primaire et les autres variables telles que celles dans le vecteur $\boldsymbol{Z}$ (diamètre, longueur, matériaux, réhabilitation, ville/montagne, etc.) sont les covariables.

Dans ce manuscrit, nous utiliserons le mot covariable selon le premier sens.

La survie de Weibull à deux paramètres (η et δ) s'écrit classiquement ainsi $S(t) = \mathrm{e}^{-(t/\eta)^{\delta}}$. Le modèle WeiCo a les propriété d'une loi Weibull car dans WeiCo, δ est le paramètre de forme et $\eta = \left[\frac{1}{\mathrm{e}^{\boldsymbol{Z}'\boldsymbol{\beta}}}\right]^{\frac{1}{\delta}}$ est le paramètre d'échelle d'une loi de Weibull.

Notons $h(t)$ la fonction de risque* [4] instantané de mise hors service d'un tronçon à l'âge t qui vaut $\frac{f(t)}{S(t)}$, avec $f(t)$ la densité de probabilité d'une loi et $S(t)$ la fonction de survie de cette même loi. Le risque* instantané d'un modèle de Cox s'écrit classiquement $h(t) = h_0(t)\exp\left(\beta_1 Z_1 + \cdots + \beta_n Z_n\right)$. Le modèle WeiCo a les propriétés d'un modèle de Cox avec $h_0(t) = \delta t^{\delta-1} \times \mathrm{e}^{\beta_0}$ (cf. démonstration dans [Large and Tomasian, 2014c]).

Tous les paramètres du modèle WeiCo sont facilement intelligibles : δ est le paramètre de forme, et les β peuvent [5] être utilisés pour calculer des risques relatifs (cf. paragraphe 7.1.4 pour plus d'explication sur cette notion).

7.1.2 Déterminer la valeur des paramètres

Notons $\widehat{\boldsymbol{\theta}}$ l'estimateur de $\boldsymbol{\theta}$, il se calcule en maximisant la vraisemblance.

Pour la construction d'une fonction de vraisemblance il est important de prendre en compte la censure à gauche et la troncature à droite de l'échantillon observé. Si la date de mise hors service est observée ($c_i = 0$) alors la probabilité que l'événement se produise dans un intervalle arbitrairement petit contenant cet âge est connue. Cette probabilité est approximativement égale à la fonction de densité de l'individu pour ce moment $f_{\boldsymbol{\theta}}(t_{2i}|t_{1i})$.

Si la date de mise hors service n'est pas observée, l'individu est censuré ($c_i = 1$). Alors, la seule information dont nous disposons est la probabilité que l'âge à la mise hors service soit supérieur à l'âge t_{2i} qui se lit donc par sa fonction de survie : $S_{\boldsymbol{\theta}}(t_{2i}|t_{1i})$.

Enfin comme l'échantillon est tronqué à gauche il est nécessaire de prendre en compte sa probabilité conditionnelle : [Klein and Moeschberger, 2003] $\frac{f_{\boldsymbol{\theta}}(t_{2i}|t_{1i})}{S_{\boldsymbol{\theta}}(t_{1i})}$.

4. Le mot risque est polysémique cf. encadré 7 page 67.
5. sauf β_0 qui est l'intercept

La fonction de vraisemblance s'écrit alors en composant ces trois éléments :

$$\mathcal{L}(\boldsymbol{\theta}) = \prod_{i=1}^{n} \frac{f_{\boldsymbol{\theta}}(t_{2i}|t_{1i})^{1-c_i} \times S_{\boldsymbol{\theta}}(t_{2i}|t_{1i})^{c_i}}{S_{\boldsymbol{\theta}}(t_{1i})} \tag{7.2}$$

Par la méthode de Nelder-Mead [Nelder and Mead, 1965] (pour plus de détails cf. [Large and Tomasian, 2014a,b,c]) nous minimisons la fonction objectif correspondant à $-\ln[\mathcal{L}(\boldsymbol{\theta})]$, ce qui revient finalement à maximiser la vraisemblance. Grâce à cette méthode nous obtenons un vecteur $\widehat{\boldsymbol{\theta}}$ estimant les paramètres du modèle.

7.1.3 Déterminer si les paramètres sont significatifs

Nous effectuons plusieurs tests de rapport de vraisemblance pour valider chacun des paramètres du modèle. Nous faisons autant de tests de rapport de vraisemblance qu'il y a de paramètres dans le modèle.

Par exemple le test associé au paramètre δ est le suivant.
Posons l'hypothèse nulle H_0 : $\boldsymbol{\theta} = \hat{\boldsymbol{\theta}}_0$ avec $\hat{\boldsymbol{\theta}}_0 = [\delta = 1\ \beta_0 = \widehat{\beta}_0\ \beta_1 = \widehat{\beta}_1\ ...\ \beta_n = \widehat{\beta}_n]$.
δ est le paramètre associé à t, si $\delta = 1$ alors l'âge n'a pas d'impact sur la mise hors service du tronçon. Les $\widehat{\beta}$ sont les autres (que δ) paramètres du modèle issus de l'optimisation par la méthode de Nelder-Mead.

Contre l'hypothèse alternative H_1 : $\boldsymbol{\theta} = \widehat{\boldsymbol{\theta}} \neq \widehat{\boldsymbol{\theta}}_0$.
Nous rappelons que $\widehat{\boldsymbol{\theta}}$ est le vecteur des paramètres estimés par la méthode de Nelder-Mead.

La statistique du test du rapport de vraisemblance est défini par :

$$\chi^2_{obs} = 2\log\left(\frac{\mathcal{L}(\widehat{\boldsymbol{\theta}}_0)}{\mathcal{L}(\widehat{\boldsymbol{\theta}})}\right) \tag{7.3}$$

On sait que sous l'hypothèse nulle, la statistique du test du rapport de vraisemblance suit une loi du χ^2 avec un nombre de degrés de liberté égal au nombre de contraintes imposées par l'hypothèse nulle. Donc sous H_0, χ^2_{obs} suit une loi du χ^2 à 1 degré de liberté ($\chi^2_{obs} \sim \chi^2(1)$). Nous choisissons un seuil de 5% (noté α) d'acceptation de l'erreur. C'est la probabilité que l'on a de se tromper d'hypothèse. Par conséquent, on rejette H_0 (à α près) lorsque la statistique du test du rapport de vraisemblance est supérieure au quantile d'ordre $1-\alpha$ de la loi du χ^2 à 1 degré de liberté. Autrement dit si le χ^2 observé est supérieur au χ^2 théorique : i.e $\chi^2_{obs} > \chi^2_{the} = 7,9$ alors nous acceptons H_1. De même, si la P-value est $< 5\%$ alors nous rejetons H_0 et acceptons H_1 et si la P-value $\geq 5\%$ nous acceptons H_0.

Nous devons réaliser ensuite autant de tests qu'il y a de paramètres β dans notre modèle. Dans ces cas l'hypothèse nulle teste $\beta_k = 0$. En effet, si $\beta_k = 0$ cela signifie que ce paramètre ne doit pas être présent dans l'équation.

7.1.4 Estimer les risques relatifs et leurs incertitudes

Le modèle de WeiCo a une propriété essentielle du modèle de Cox : celle des **risques proportionnels**. Pour illustrer cette propriété, prenons deux individus i_1 et i_2 qui ne diffèrent que par une seule covariable, disons la k^{ieme}. On peut imaginer que cette covariable vaut 0 chez i_1 et 1 chez i_2. Notons $h(t)$ la fonction de risque* instantané de mise hors service d'un tronçon à l'âge t qui vaut $h(t) = \frac{f(t)}{S(t)}$, avec $f(t)$ la densité de probabilité d'une loi et $S(t)$ la fonction de survie de cette même loi. En utilisant le modèle WeiCo, on obtient alors, quel que soit t :

$$\frac{h\left(t,i_2\right)}{h\left(t,i_1\right)}=\frac{h_0\left(t\right)\exp\left(\beta_1 Z_1+\cdots+\beta_{k-1}Z_{k-1}+\beta_k\times 1+\beta_{k+1}Z_{k+1}+\cdots+\beta_n Z_n\right)}{h_0\left(t\right)\exp\left(\beta_1 Z_1+\cdots+\beta_{k-1}Z_{k-1}+\beta_k\times 0+\beta_{k+1}Z_{k+1}+\cdots+\beta_n Z_n\right)}=\exp\left(\beta_k\right) \quad (7.4)$$

Le rapport est donc indépendant de l'âge. Autrement dit, quel que soit l'âge t, l'individu i_2 a un risque* instantané d'être mis hors service $\exp(\beta_k)$ fois :
- plus élevé (si $\beta_k > 0$)
- ou moins élevé (si $\beta_k < 0$)
que celui de l'individu i_1.

Encadré 7 - Risque : Sens et étymologie

Selon [Picoche, 1992], les sens du mot risque sont multiples et évolutifs, son étymologie est hautement incertaine et c'est bien d'ailleurs le seul point sur lequel les experts sont d'accord ! cf. [Dauphiné, 2001], [Leplat, 2003], [Pradier, 2006], [ChevassusAuLouis, 2007], [Breysse, 2009], [Taillandier, 2009], [ISO-73, 2009], [Paré-Chamontin, 2010], [UVED, 2012] et [Perret et al., 2012].
Certains affirment que le risque serait issu d'un mot latin *resecum*, utilisé au Moyen-Age vers 1156 dans le commerce maritime pour signifier les rochers escarpés que pouvaient rencontrer les bateaux. Ainsi, si les navires évitaient le *resecum*, ils pouvaient vendre leurs marchandises et accéder à la *fortuna* (fortune), ou alors s'ils le percutaient, ils allaient le payer au *periculum* (péril) de leur vie. Ce sens perdure de nos jours lorsque le risque est le fait de s'engager dans une action qui pourrait apporter un avantage mais qui comporte l'éventualité d'un péril. Par exemple : "Courir un risque en jouant au poker."
Ensuite, très récemment le développement technologique, la production de masse et les effets néfastes qui sont apparus ont induit notre société à faire émerger des études du risque focalisées uniquement sur les aspects négatifs (*periculum*) des choses [Magne, 2009].
Dans cette thèse, nous utilisons le mot risque selon deux sens.

1) Risque : Éventualité d'un évènement ne dépendant pas exclusivement de la volonté des parties et pouvant causer la perte d'un objet ou tout autre dommage [Le Robert, 2015]. C'est à dire, la rencontre éventuelle d'un danger et d'éléments vulnérables aboutissant à un dommage [MEDD, 2005]. Exemple : "Le risque de blesser des personnes suite à une casse d'une conduite corrodée."

2) Risque* relatif : Mesure statistique souvent utilisée en épidémiologie, mesurant la probabilité de survenue d'un événement dans un groupe par rapport à l'autre. Exemple : "Le risque* d'avoir un cancer du poumon est deux fois plus élevé chez les fumeurs que chez les non fumeurs."

Pour les différencier, nous avons mis une étoile au second sens. Précisons que ces définitions ne sont pas strictement conformes à celles de la norme [ISO-73, 2009] : "Le risque est l'effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs." Nous nous efforcerons dans le document d'éviter toute ambiguïté.

Pour une variable qualitative transformée en indicatrice (0 ou 1) le risque* relatif vaut $RR_k = \exp(\beta_k)$ comme dans l'exemple précédent.
En revanche, pour calculer le risque* relatif d'une variable quantitative, nous avons choisi d'utiliser son écart-type σ : $RR_k = \exp(\beta_k)^{\pm\sigma}$, ce qui permet d'être cohérent avec ses variations indépendamment de son unité.

Le risque* relatif étant une estimation, il est nécessaire de déterminer son intervalle de confiance. Nous avons employé la méthode de Miettinen [Miettinen and Nurminen, 1985]. En effet, cette méthode peut être appliquée dans notre cas. Les limites inférieure (RR_1) et supérieure (RR_2) de l'intervalle de confiance à 95% sont déterminées au moyen de la relation suivante.

$$[RR_1;\ RR_2] = RR^{1\pm\left(\frac{1.96}{\sqrt{\chi^2_{obs}}}\right)} \quad (7.5)$$

7.1.5 Tester l'hypothèse de proportionnalité des risques au cours du temps

L'hypothèse de proportionnalité du modèle de Cox est importante, il faut donc vérifier que celle-ci est satisfaite. Pour chaque covariable, on teste si son effet est indépendant de l'âge des tronçons. Cet effet doit être constant, ce qui signifie qu'il peut être positif (mise hors service plus précoce), négatif (mise hors service plus tardive) ou simplement nul.

Il existe différentes méthodes pour vérifier si l'hypothèse des risques proportionnels est satisfaite. On peut s'appuyer sur des méthodes graphiques, par exemple, si l'on veut vérifier l'hypothèse des risques proportionnels sur une covariable Z_k - qui prend les valeurs 0 ou 1 - ; alors on peut regarder si les courbes $\log\left[-\log\left[S\left(t\right)\right]\right]$ des deux strates (i.e. : les individus pour qui $Z_k = 0$ et ceux pour qui $Z_k = 1$) paraissent translatées. Si c'est le cas, l'hypothèse est vérifiée.

Il existe également des tests statistiques, comme le test des résidus de Schoenfeld [Schoenfeld, 1982] que nous avons utilisé. Les résidus de Schoenfeld s'estime de la manière suivante : pour chaque âge à la mise hors service t_k, on calcule la différence entre les caractéristiques de l'individu mis hors service (en cas d'ex-aequo, on calcule un résidu pour chaque individu et chaque âge à la mise hors service et on somme les résidus) et une moyenne pondérée des caractéristiques des individus à risque d'être mis hors service à l'âge t_k. Ceci donne :

$$R_{kj} = Z_{kj} - \bar{Z}_{kj}\left(t_i\right) \tag{7.6}$$

Avec :
R_{kj} : résidu à l'âge t_k
Z_{kj} : valeur de la covariable j pour l'individu mis hors service à l'âge t_k
$\bar{Z}_{kj}\left(t_k\right)$: moyenne pondérée de la covariable j chez les individus à risque au temps t_k.

Pour chaque variable on peut tracer et tester ces résidus. Si l'hypothèse des risques proportionnels est vérifiée, ces résidus ont en théorie un aspect totalement aléatoire et l'évolution moyenne en fonction de l'âge des tronçons est une droite horizontale.
Si l'hypothèse des risques proportionnels n'est pas vérifiée, par exemple si la covariable a un impact important sur les jeunes tronçons mais pas sur les tronçons âgés, alors les résidus seront, sur le schéma, négatifs puis positifs, et l'évolution moyenne en fonction de l'âge des tronçons sera une courbe croissante (ou le contraire selon le codage de la covariable).
Pour chaque variable on teste : $\mathrm{H}_0 = Z_j(t) = Z_j$ contre $\mathrm{H}_1 = Z_j(t) \neq Z_j$.

7.2 Quelques résultats et discussion

Nous allons présenter trois exemples différents d'application. Pour chacun, nous avons testé de nombreuses covariables sous différentes formes (population complète ou stratifiée). Nous avons arrêté nos simulations lorsque nous avons identifié le maximum possible de covariables significatives. Les résultats de ces modèles ne sont valables que sur une fenêtre d'observation passée donnée. Les tableaux 7.1, 7.3 et 7.4 indiquent notamment les covariables significatives dans le modèle WeiCo, les paramètres estimés par la méthode de Nelder-Mead et des informations pour calculer les risques relatifs de chaque covariable.
Les figures 7.2, 7.3, 7.4 et 7.5 représentent graphiquement les risques relatifs d'être mis hors service (barre horizontale) et leurs intervalles de confiance (barre verticale). Nous avons construit ces graphiques de sorte à ce que les risques relatifs des variables soient toujours ≥ 1, ce qui les rend plus facilement intelligibles.

7.2.1 Applications à la population globale du réseau d'eauservice Lausanne

Le tableau 7.1 et la figure 7.2 représentent les résultats de l'application du modèle WeiCo à l'ensemble du réseau de Lausanne, correspondant à un linéaire en service d'environ 900 km, sur la fenêtre [2001, 2012]. Sur ce territoire, 3 variables quantitatives des tronçons se sont révélées être significatives pour expliquer les mises hors service : l' âge, le nombre de défaillances moyen observées sur la fenêtre d'observation ($NDOA$) et la longueur. De plus, 4 variables qualitatives transformées en indicatrices (0 ou 1) sont apparues significatives : 1) Les réseaux ont-ils été réhabilités avant la fin de la fenêtre d'observation ? 2) Les tronçons sont-ils situés en ville ou en montagne ? 3) Les tronçons ont-ils des diamètres importants ? 4) Les tronçons sont-ils en fonte grise ?

Nous pouvons déduire du tableau 7.1 et de la figure 7.2 que les variables qui pèsent le plus dans le modèle WeiCo sont par ordre décroissant :

- l'âge du tronçon. Le paramètre de forme δ de la survie vaut 2. Par conséquent la distribution des âges à la mise hors service a une forme proche de la courbe rouge de la figure 7.1.
- la réhabilitation des canalisations. Le risque* qu'une canalisation non réhabilitée soit renouvelée est 4,6 (=1/0,22) fois plus élevé qu'une canalisation qui a déjà été réhabilitée (tubage/chemisage).
- la localisation (ville/montagne). Le risque* qu'une canalisation soit renouvelée en ville est 3,5 fois plus élevé qu'en montagne.
- la longueur des tronçons. Une canalisation qui mesurait 148 mètres de moins qu'une autre a un risque* d'être renouvelé 2,5 ($= 1/0,994^{148}$) fois plus élevé.
- le matériau des canalisations. Le risque* qu'une canalisation en fonte grise soit renouvelé sur la fenêtre d'observation est 1,6 (=1/0,63) fois plus élevé que pour d'autres matériaux.
- le nombre de défaillances passées des canalisations. Une canalisation qui a eu 0,06 défaillances de plus en moyenne sur la fenêtre d'observation qu'une autre a un risque* d'être renouvelée 1,2 ($= 14,6^{0,06}$) fois plus élevé.
- le diamètre des canalisations. Le risque* qu'une canalisation de petit diamètre ($<$ 250 mm) soit renouvelée est 1,001 (=1/0,999) fois plus élevé qu'une canalisation de diamètre important ($\geq$ 250 mm).

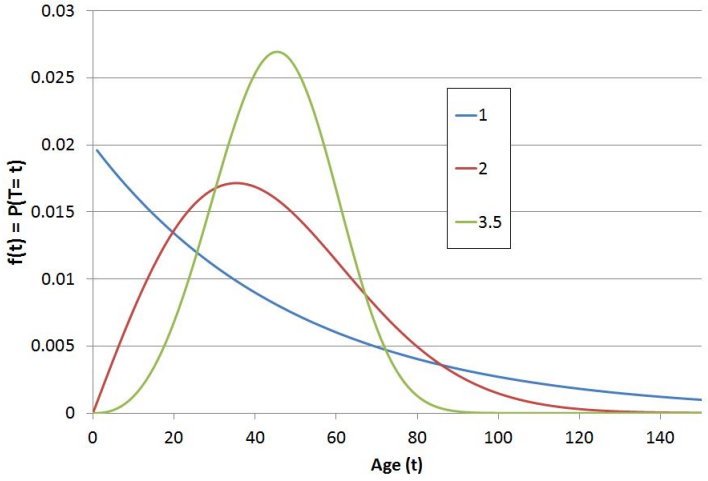


FIGURE 7.1: Densité de probabilité d'une loi de Weibull à deux paramètres δ et η. Ici $\eta = 50$ et δ varie entre 1, 2 et 3.5. Lorsque $\delta = 1$ on retrouve une loi exponentielle, lorsque $\delta = 2$ on retrouve la loi de Rayleigh et lorsque $\delta = 3.5$ on retrouve une forme proche de la loi normale.

Certaines variables du modèle précédent sont extrêmement corrélées entre elles. C'est le cas par exemple de la localisation (ville/montagne) et du diamètre des conduites. Beaucoup de conduites situées en montagne sont de diamètre important car ce sont souvent des conduites de transport. Autre exemple, l'âge des tronçons est très corrélé au matériau des conduites. En effet, les vieux tronçons sont

plutôt en fonte grise, les plus jeunes en fonte ductile. Par conséquent, si on supprime du modèle une variable corrélée à une autre, c'est l'autre qui "prendra" le poids.
Les résultats indiqués au travers des risques relatifs ne doivent donc pas être considérés comme une vérité absolue, mais doivent être appréciés à la lumière de ces corrélations, en fonction des variables qu'on peut rajouter ou supprimer dans le modèle.

Covariables	θ	$\widehat{\theta}$	$e^{\widehat{\beta}}$	p-value	Ecart-type	χ^2_{obs}
Age	δ	2.05	Sans objet	< 0.05	Sans objet	17 610
Intercept	β_0	-8.59	Sans objet	< 0.05	Sans objet	455 638
NDOA	β_1	2.21	14.6	< 0.05	0.06	208
Longueur (m)	β_2	-0.0061	0.994	< 0.05	148	930
Fonte grise	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Autres matériaux	β_3	0.47	0.63	< 0.05	Sans objet	296
Non réhabilité	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Réhabilité	β_4	-1.52	0.22	< 0.05	Sans objet	50
Montagne	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Ville	β_5	1.24	3.5	< 0.05	Sans objet	2 506
Diamètre < 250 mm	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Diamètre ≥ 250 mm	β_6	-0.001	0.999	< 0.05	Sans objet	457

TABLEAU 7.1: Sortie du modèle WeiCo appliqué à l'ensemble du réseau d'eauservice Lausanne

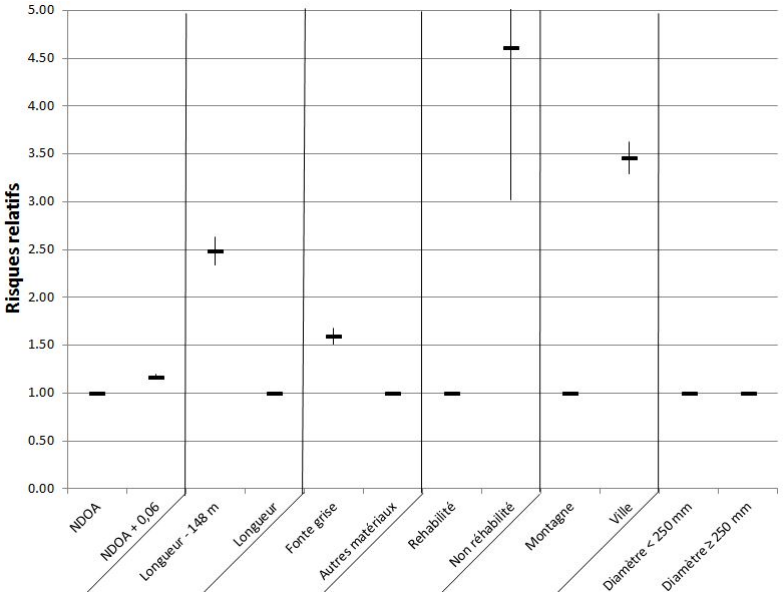


FIGURE 7.2: Risques relatifs de mise hors service issus du modèle WeiCo appliqué à l'ensemble du réseau d'eauservice Lausanne. A gauche les 2 variables quantitatives, à droite les 4 variables qualitatives.

☞ Pour en savoir plus : consulter la simulation "Lausanne № 2" dans l'annexe J.

7.2.2 Applications aux tronçons en ville du réseau d'eauservice Lausanne

Dans cette section, nous avons appliqué le modèle WeiCo uniquement aux conduites en ville du réseau d'eauservice Lausanne sur la fenêtre [2001, 2013]. Sur ce territoire, le linéaire en service fin 2013 est d'environ 715 km. Nous avons appliqué le modèle WeiCo à ce territoire car nous avons accès à beaucoup de données environnementales sur cette zone. Par exemple, nous avons toutes les variables utilisées pour faire fonctionner les modèles de planification à court-terme (cf. figures 2.6 et

2.7) d'eauservice Lausanne, comme le nombre moyen d'habitants par branchement autour des conduites ou encore les caractéristiques des éléments vulnérables autour des tronçons (SI_i [6]) (cf. tableau 7.2).

SI_i	Description
1	Vieille ville
0.8	Zone industrielle sensible
0.6	Haute densité
0.5	Centre village
0.4	Moyenne densité
0.4	Zone industrielle normale
0.2	Faible densité
0	Conduite de transport et bouclage
0	Zone verte (arborée ou engazonnée)

TABLEAU 7.2: SI_i à Lausanne [Apotheloz, 2009, p.7] en fonction des caractéristiques des éléments vulnérables autour des conduites

Au final, les variables qui pèsent le plus dans le modèle WeiCo, sur ce territoire, sont par ordre décroissant :

- l'âge du tronçon. Le paramètre de forme δ de la survie vaut 1,98.
- la réhabilitation des canalisations. Le risque* qu'une canalisation non réhabilitée soit renouvelée est 3,7 fois plus élevé qu'une canalisation qui a été réhabilitée (tubage/chemisage).
- la longueur des tronçons. Une canalisation qui mesuraient 100 mètres de moins qu'une autre a un risque* d'être renouvelé 1,7 fois plus élevé.
- le matériau des canalisations. Le risque* qu'une canalisation en fonte grise soit renouvelée sur la fenêtre d'observation est 1,6 fois plus élevé que des canalisations en d'autres matériaux.
- le diamètre des canalisations. Le risque* qu'une canalisation de petit diamètre (< 250 mm) soit renouvelée est 1,4 fois plus élevé qu'une canalisation de diamètre important (≥ 250 mm).
- le nombre de défaillances passées des canalisations. Une canalisation qui a eu 0,06 défaillances de plus en moyenne sur la fenêtre d'observation qu'une autre a un risque* d'être renouvelé 1,2 fois plus élevé.
- le nombre d'habitants moyen par branchement par conduite. Une canalisation qui a 15 habitants en moyenne par branchement de plus qu'une autre a un risque* d'être renouvelé 1,2 fois plus élevé.
- les caractéristiques des éléments vulnérables autour des conduites. Une canalisation qui a 0,2 points en plus au critère SI_i (cf. tableau 7.2) qu'une autre a un risque* d'être renouvelé 1,1 fois plus élevé.

Nous retrouvons en ville, pour les covariables âge, réhabilitation, longueur et matériau les ordres de grandeur que nous avions sur le territoire VM (ville + montagne). Ce résultat est cohérent car le territoire VM contient la ville.
La covariable diamètre a un poids plus important en ville que sur le territoire VM. Ce résultat est logique, car le diamètre est en partie corrélé avec la covariable ville/montagne. Précédemment la covariable ville/montagne avait "absorbé" la covariable diamètre. Enfin, deux nouvelles covariables relatives aux éléments vulnérables (clients et infrastructures) sont apparues significatives.

6. SI_i pour Sensitivity of Infrastructures

Covariables	θ	$\widehat{\theta}$	e^{β}	p-value	Ecart-type	χ^2_{obs}
Age	δ	1.98	Sans objet	< 0.05	Sans objet	206
Sans objet	β_0	-7.37	Sans objet	< 0.05	Sans objet	8 638 498
NDOA	β_1	2.59	13.3	< 0.05	0.06	185
Longueur (m)	β_2	-0.0055	0.99	< 0.05	100	767
SI	β_3	0.5	1.64	< 0.05	0.2	154
Habitants par brt	β_4	0.009	1.01	< 0.05	15	139
Fonte grise	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Autres matériaux	β_5	-0.46	0.63	< 0.05	Sans objet	230
Non réhabilité	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Réhabilité	β_6	-1.28	0.27	< 0.05	Sans objet	54
Diamètre < 250 mm	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Diamètre ≥ 250 mm	β_7	-0.34	0.71	< 0.05	Sans objet	60

TABLEAU 7.3: Sortie du modèle WeiCo appliqué uniquement au réseau d'eauservice Lausanne situé en ville

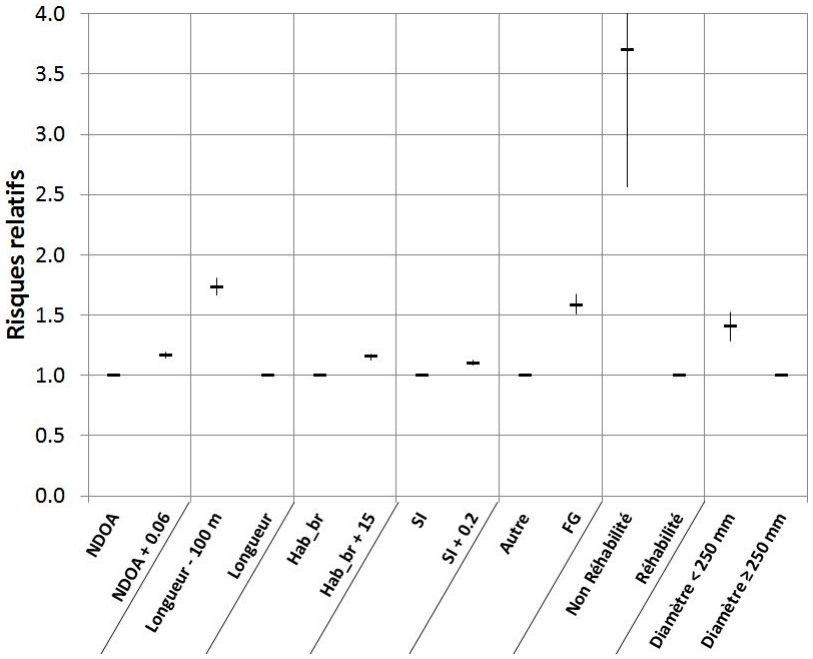


FIGURE 7.3: Risques relatifs d'être mis hors service issus du modèle WeiCo appliqué uniquement au réseau d'eauservice Lausanne situé en ville. A droite les 4 variables quantitatives, à gauche les 3 variables qualitatives

☞ Pour en savoir plus : consulter la simulation "Lausanne № 4" dans l'annexe J.

7.2.3 Applications à l'ensemble du réseau du SEDIF

Dans cette section, nous avons appliqué le modèle WeiCo, à l'ensemble du réseau du SEDIF sur la fenêtre [1995, 2012]. Trois variables quantitatives et une variable qualitative se sont avérées être significatives.

Au final, les variables qui pèsent le plus dans le modèle WeiCo, sur ce territoire, sont par ordre décroissant :

- l'âge du tronçon. Le paramètre de forme δ de la survie vaut 1,98. Il est voisin de celui identifié pour Lausanne.
- le matériau des tronçons. Par exemple, le béton âme tôle de Bonna Sabla est le matériau qui a le risque* relatif d'être renouvelé le plus faible. La fonte ductile a un risque* d'être renouvelé 3,3

fois plus élevé que le Bonna. L'acier a un *RR* d'être renouvelé 3,4 fois plus élevé que le Bonna. La fonte grise a un *RR* d'être renouvelé, sur la fenêtre d'observation [1995, 2012], 4,4 fois plus élevé que le Bonna. Les autres matériaux (que le Bonna, la fonte ductile, l'acier et la fonte grise) ont eu un risque* d'être renouvelé 23,3 fois plus élevé que le Bonna. Ce résultat semble cohérent avec les survies obtenues par la méthode de Kaplan-Meier où le réseau est partitionné par matériaux (cf. figure 6.7).

- le nombre de défaillances passées des canalisations. Une canalisation qui a 0,03 défaillances de plus en moyenne sur la fenêtre d'observation qu'une autre a un risque* d'être renouvelé 1,08 fois plus élevé.
- le diamètre des canalisations. Une canalisation qui mesurait 180 mm de plus qu'une autre a un risque* d'être renouvelé 1,04 fois plus élevé.
- la longueur des tronçons. Une canalisation qui mesuraient 53 mètres de plus qu'une autre a un risque* d'être renouvelé 1,03 fois plus élevé.

Covariables	θ	$\widehat{\theta}$	e^{β}	p-value	Ecart-type	χ^2_{obs}
Age	δ	2.05	Sans objet	< 0.05	Sans objet	1×10^5
Intercept	β_0	-10.43	Sans objet	< 0.05	Sans objet	1.9×10^7
NDOA	β_1	2.53	12.55	< 0.05	0.03	5.2×10^2
Diamètre (mm)	β_2	0.0002	1.0002	< 0.05	180	4×10^5
Longueur (m)	β_3	0.0005	1.0005	< 0.05	53	1×10^{63}
Acier	Référence	0	1	Référence	Sans objet	Sans objet
PEHD	β_4	0.95	2.59	< 0.05	Sans objet	26
Fonte grise	β_5	0.25	1.28	< 0.05	Sans objet	1.1×10^4
Fonte ductile	β_6	-0.05	0.95	< 0.05	Sans objet	2.2×10^3
Bonna	β_7	-1.23	0.29	< 0.05	Sans objet	61
Autres matériaux	β_8	1.91	6.75	< 0.05	Sans objet	4×10^2

TABLEAU 7.4: Sortie du modèle WeiCo appliqué à l'ensemble du réseau du SEDIF.

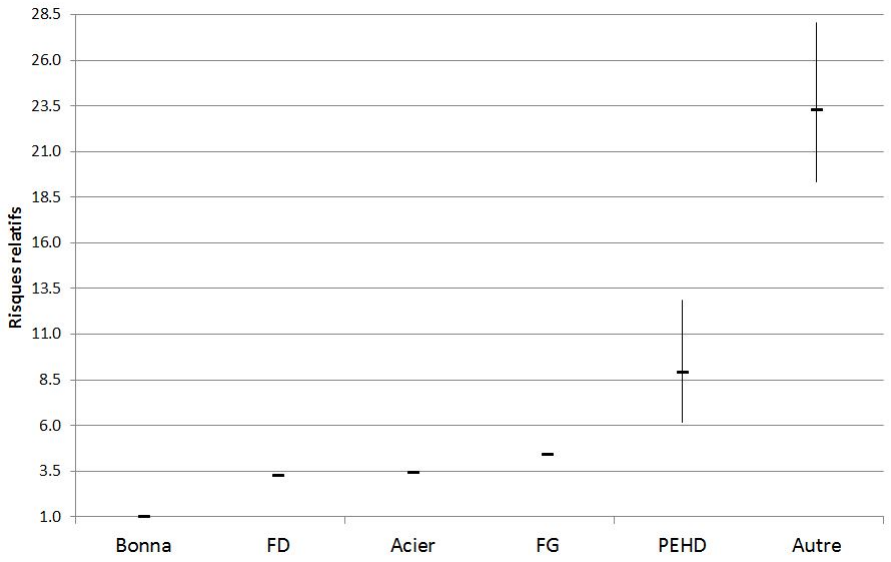


FIGURE 7.4: Risques relatifs d'être mis hors service de la variable quantitative du modèle WeiCo appliqué appliqué l'ensemble du réseau du SEDIF.

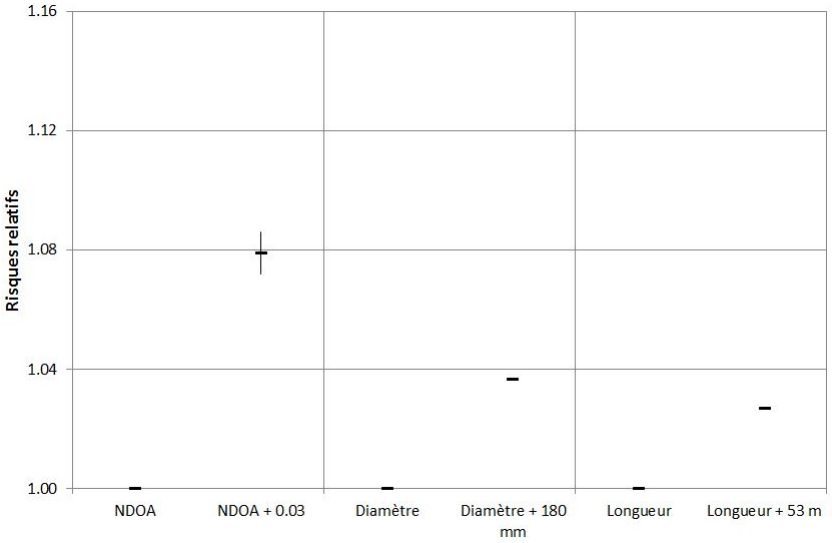


FIGURE 7.5: Risques relatifs d'être mis hors service des 3 variables quantitatives du modèle WeiCo appliqué appliqué l'ensemble du réseau du SEDIF

☞ Pour en savoir plus : consulter la simulation "SEDIF № 6" dans l'annexe K.

Dans cette application, nous avons fait l'hypothèse que le paramètre de forme δ est le même pour chaque matériau, néanmoins à en juger par les fonctions de survie empiriques tel n'est pas le cas. Par conséquent, il est intéressant d'ajuster le modèle Weibull sur le réseau du SEDIF stratifié par matériau. C'est ce que nous avons effectué dans la simulation numéro 6.

7.3 Validation et évaluation critique des résultats

7.3.1 Vérification de l'hypothèse de proportionnalité des risques relatifs

Dans cette section nous analysons si l'hypothèse de proportionnalité des risques du modèle WeiCo est vérifiée, tout au long de la vie du tronçon (âge), dans les 3 applications précédentes (Lausanne global, Lausanne ville et SEDIF).
Les résultats obtenus par la méthode des résidus de Schoenfeld sont résumés dans les tableaux 7.5, 7.6 et 7.7. Pour que l'hypothèse de proportionnalité des risques soit acceptée, il faut que les P-values du test présenté dans la section 7.1.5 soient supérieures à 5%. Or ce n'est pas en général le cas, sauf pour quelques covariables. Par conséquent l'hypothèse de proportionalité des risques ne semble pas globalement respectée. Ce résultat signifie au cours de la "vie" d'un tronçon les covariables (dont la proportionnalité des risques n'est pas respecté) tantôt accélèreront sa mise hors service, tantôt la retarderont.

Covariables	P-value	Proportionalité des risques
NDOA	0.006	Non
Longueur	0	Non
Fonte grise	Référence	Référence
Autres matériaux	0.007	Non
Non réhabilité	Référence	Référence
Réhabilité	0.37	Oui
Montagne	Référence	Référence
Ville	0.004	Non
Diamètre < 250 mm	Référence	Référence
Diamètre ≥ 250 mm	0.63	Oui
Global	0	Non

Tableau 7.5: P-values du test des résidus du Schoenfeld pour Weico appliqué à l'ensemble du réseau d'eauservice Lausanne

Covarariables	P-value	Proportionalité des risques
NDOA	0.0008	Non
Longueur	0	Non
SI	0.52	Oui
Habitants par brt	0.02	Non
Fonte grise	Référence	Référence
Autres matériaux	0.054	Oui
Non réhabilité	Référence	Référence
Réhabilité	0.4	Oui
Diamètre < 250 mm	Référence	Référence
Diamètre ≥ 250 mm	0.09	Oui
Global	0	Non

Tableau 7.6: P-values du test des résidus du Schoenfeld pour Weico appliqué uniquement au réseau d'eauservice Lausanne situé en ville

Covariables	P-value	Proportionalité des risques
Diamètre	0.29	Oui
Longueur	0	Non
NDOA	3×10^{-3}	Non
Acier	Référence	Référence
Fonte grise	0	Non
Fonte ductile	1.8×10^{-4}	Non
PEHD	0.15	Oui
Bonna	0.43	Oui
Autres matériaux	5.8×10^{-4}	Non
Global	0	Non

Tableau 7.7: P-values du test des résidus du Schoenfeld pour Weico appliqué à l'ensemble du réseau du SEDIF

Dans le cas de risques non proportionnels, comme c'est le cas ici, il serait judicieux d'utiliser une des méthodes suivantes :

1. Transformer certaines variables quantitatives en variables qualitatives ;
2. Pour les variables qualitatives, essayer de modifier la taille des classes en regroupant certaines ;

3. Si l'hypothèse de proportionnalité est vérifiée sur des intervalles d'âges moins étendus, effectuer une modélisation par partie (faire différents modèles sur ces intervalles) ;
4. Stratifier le réseau ;
5. Réaliser des modèles testant les modifications d'effet de variables entre elles. Concrètement cela revient à rajouter des covariables qui sont issues de la multiplication de deux covariables.

Faute de temps, nous n'avons pu utiliser toutes ces méthodes. Néanmoins, nous avons testé la première et les deux dernières options proposées. La dernière méthode a en effet grandement amélioré l'hypothèse de proportionnalité des risques [Large and Tomasian, 2014a], mais elle complique cependant l'analyse des résultats.

7.3.2 Comparaison de WeiCo à Kaplan-Meier

Afin de comparer les résultats de WeiCo développée à l'échelle du tronçon, à la courbe de survie empirique de tous les tronçons calculée avec la méthode de Kaplan-Meier, **en effectif**, nous calculons la survie de chaque tronçon i à chaque âge t issue de WeiCo : $S_{\boldsymbol{\theta}}(t,i)$ (cf. équation 7.1). Puis, nous effectuons la moyenne à chaque âge (cf. équation 7.7 et figure 7.6) de cette survie pour tous les tronçons. Cette survie moyenne de WeiCo nous permet d'analyser la mise hors service des tronçons en fonction de covariables, ici l'âge, le diamètre, la longueur, les différents matériaux et le nombre de défaillances observé. La survie moyenne de WeiCo du réseau complet du SEDIF correspond à la courbe rouge sur les figures 7.6 et 7.7.

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} S_{\boldsymbol{\theta}}(t,i)}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \exp(-t_i^{\delta} \times \mathrm{e}^{\boldsymbol{Z}_i'\boldsymbol{\beta}})}{n} \tag{7.7}$$

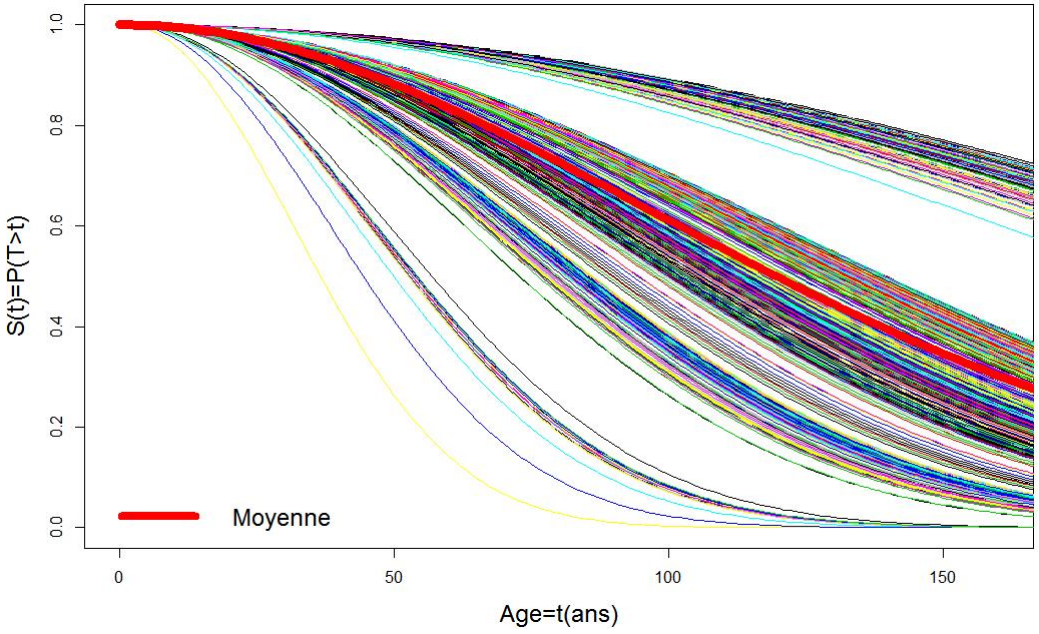


FIGURE 7.6: Survie de WeiCo pour 4 000 tronçons sélectionnés par tirage aléatoire sans remise (cf. équation 7.1) et survie moyenne de Weico (cf. équation 7.7), application à l'ensemble du réseau du SEDIF (cf. tableau 7.4)

La survie moyenne de WeiCo s'ajuste convenablement sur la courbe de Kaplan-Meier en nombre de tronçons (cf. figure 7.7), nous obtenons donc un premier résultat satisfaisant qui explique les mises hors service en fonction de covariables. Il illustre la capacité, sur la base des survies individuelles, à reconstituer la loi de survie globale.

Par conséquent, la forme analytique WeiCo de la survie que nous avons choisie initialement paraît être dans ce cas un choix judicieux. Cependant, une fonction de survie WeiCo à 4 paramètres [Large and Tomasian, 2014c] ou une Weibull à deux paramètres s'ajustent aussi très bien, l'intérêt ici c'est d'avoir plusieurs covariables et que les paramètres aient du sens (cf. les risques relatifs dans le paragraphe 7.1.4).

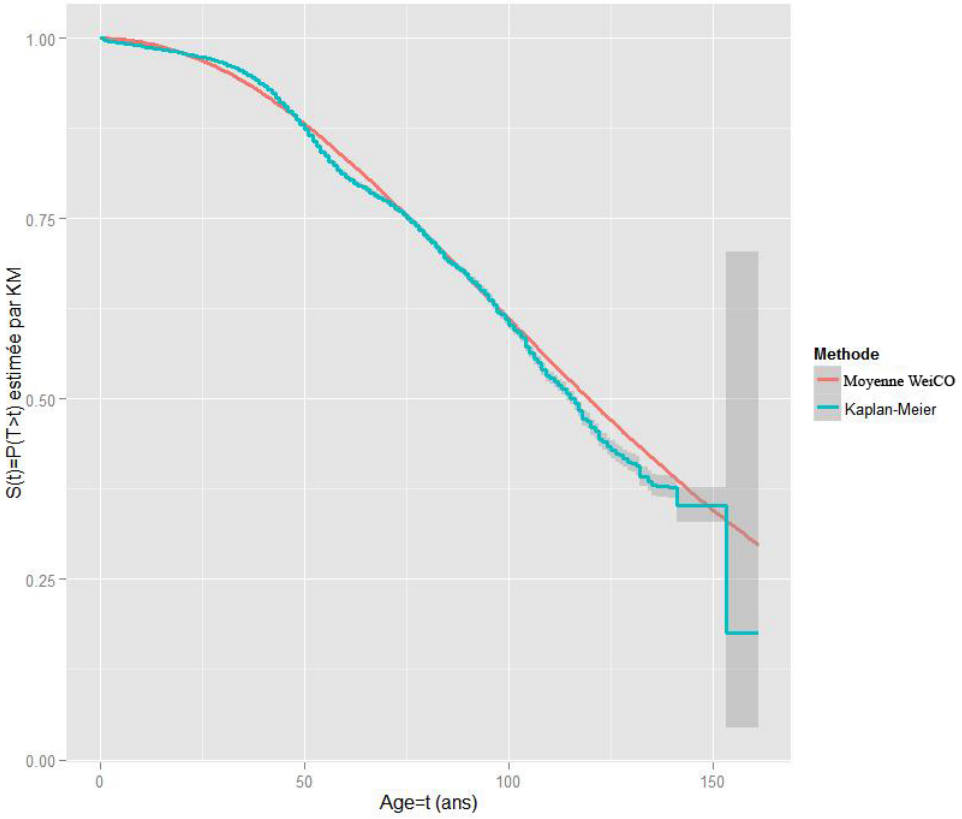


FIGURE 7.7: Courbe de survie empirique, en nombre de tronçon, issue de la méthode Kaplan-Meier (en vert) et courbe de survie moyenne de WeiCo (en rouge), application à l'ensemble du réseau du SEDIF (cf. tableau 7.4

Afin de comparer nos résultats issus de WeiCo à la courbe de survie empirique de tous les tronçons calculée avec la méthode de Kaplan-Meier, **en linéaire**, nous calculons la survie de chaque tronçon i à chaque âge t issue de WeiCo : $S_{\boldsymbol{\theta}}(t,i)$ (cf. équation 7.1). Puis, nous effectuons la moyenne à chaque âge (cf. équation 7.8) de cette survie pour tous les tronçons pondérés par leur longueur L_i.

$$\frac{\sum_{i=1}^{n}[S_{\boldsymbol{\theta}}(t,i)\times L_i]}{\sum_{i=1}^{n}L_i}=\frac{\sum_{i=1}^{n}[\exp(-t_i^{\delta}\times \mathrm{e}^{\boldsymbol{Z}_i'\boldsymbol{\beta}})\times L_i]}{\sum_{i=1}^{n}L_i} \tag{7.8}$$

La survie de WeiCo pondérée par la longueur des tronçons et la survie empirique Kaplan-Meier en linéaire sont très proches pour l'application du SEDIF. En revanche, pour l'application à l'ensemble du réseau de Lausanne, la moyenne pondérée des survies de WeiCo ne s'ajuste pas parfaitement (cf. figure 7.8). Par conséquent, cela signifie que la forme analytique WeiCo n'est pas adaptée pour Lausanne. Notons que nous obtenons des résultats similaires en effectif.

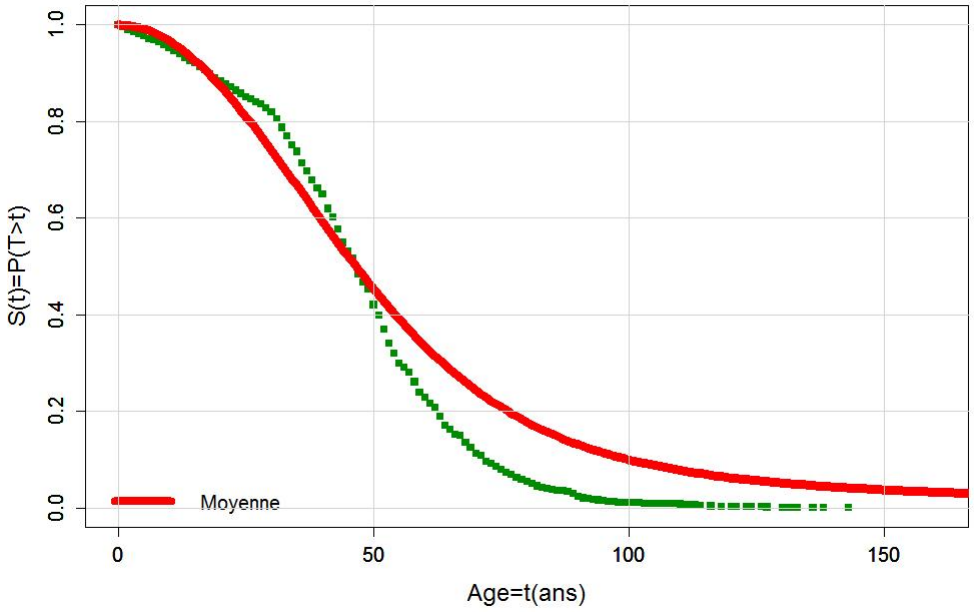


FIGURE 7.8: Courbe de survie empirique, en linéaire, issue de la méthode Kaplan-Meier (en vert) et courbe de survie moyenne de WeiCo pondérée par la longueur des tronçons (en rouge), application à l'ensemble du réseau de Lausanne (cf. tableau 7.1

7.4 Pour aller plus loin

Le modèle WeiCo permet de mettre en évidence des variables expliquant la mise hors service des tronçons tout en prenant en compte le fait que les covariables peuvent être corrélées entres elles. Le tableau 7.8 synthétise, pour chacun des terrains d'étude, les variables qui ont été significatives dans au moins une simulation avec le modèle WeiCo. Les résultats complets sont disponibles dans les rapports [Large and Tomasian, 2014a,b,c]. Par exemple à Lausanne, la vulnérabilité des bâtiments est très corrélée à la vulnérabilité des usagers donc dans le modèle WeiCo, la première variable absorbe la seconde ou vice-versa. Elles ne sont pas significative dans le même modèle WeiCo.
Il aurait été intéressant de tester d'autres variables, mais dans le temps imparti nous nous sommes arrêtés aux variables du tableau 7.8.

	SEDIF	Grand Lyon	Lausanne
Age	Relié au paramètre de forme		
Chaussée/trottoir	---	X	
Diamètre	X	X	X
Longueur	X	X	X
Matériaux	X	X	X
Nb défaillances	X	X	X
Nb hab par branchement			X
Profondeur d'enfouissement	---		
Réhabilitation (tubage, etc.)			X
Ville/ Montagne			X
Vulnérabilité des bâtiments			X
Vulnérabilité des usagers			X

TABLEAU 7.8: Synthèse des variables testées dans le modèle WeiCo. (X) variable explicative, (– – –) variable non significative, (cellule vide) variable non testée. Nb : Nombre

Certains risques relatifs ont un caractère transversal et d'autres au contraire sont spécifiques au terrain d'étude. Par exemple, à Lausanne le risque relatif le plus élevé (4,6) est celui de la variable réhabilitation (tubage/chemisage). Cette variable n'était pas disponible dans les deux autres terrains d'étude. Néanmoins, ce résultat nous parait transversal à tous les terrains d'étude. Normalement, réhabiliter un tronçon doit lui permettre d'être mis hors service plus tardivement.
Dans tous les terrains d'étude, le nombre de défaillances passées sur la fenêtre d'observation est une variable significative avec des risques relatifs assez élevés. Ce constat doit pouvoir se généraliser à n'importe quel terrain d'étude qui tient compte des défaillances dans le choix de ces chantiers de renouvellement.
Au contraire, à Lausanne, le risque relatif lié à la variable "ville-montagne" (1,4) est spécifique à ce site. La topographie de ce site (captages en altitude) est très différente de celle du SEDIF et du Grand Lyon.

7.5 Conclusion

Après traitement des données, grâce au modèle WeiCo nous avons pu identifier des fonctions de survie de l'âge à la mise hors service à l'échelle du tronçon. Tout comme ce qui avait été mis en évidence lors de la création de survie par strates à l'aide de Kaplan-Meier, ces dernières résultent pour partie de **phénomènes physiques** (défaillances) et pour partie des **pratiques** (captage d'eau en altitude, réhabilitation, etc.). Actuellement il existe de nombreux modèles sur les phénomènes physiques (corrosion, dégradation, défaillances) mais peu sur les pratiques (choix vis à vis de la coordination, des éléments vulnérables, etc.) ce qui constitue une limite pour la suite.
Après avoir ainsi caractérisé les phénomènes et les pratiques passés nous allons à partir de ces résultats envisager dans le chapitre 8 l'ajustement des objectifs à long terme

Chapitre 8

Identification et formalisation des objectifs long terme

Sur la base des fonctions de survie établies à l'échelle de la population entière, de la strate ou des individus, nous allons maintenant simuler des stratégies de gestion future de long terme. Pour cela, dans un premier temps nous allons identifier dans le détail les objectifs de long terme de chaque terrain d'étude. Ensuite, nous allons définir des scénarios permettant de viser ces objectifs. Puis nous allons traduire ces scénarios d'une part en fonction de survie prospective (de l'âge à la mise hors service des tronçons) d'autres part en faisant évoluer des indicateurs de réalisation, de résultat (ou performance) et de moyens financiers.
Le verrou principal consiste à créer des courbes de survie prospective correspondant bien au scénario défini par les AOEP.

Nous ne nous inscrivons pas dans une optique d'optimisation au sens strict (choix de la meilleure stratégie parmi l'ensemble des possibles) mais dans la comparaison de quelques stratégies.

8.1 Ajustement des objectifs

Après avoir évalué les actions passées, l'étape suivante de la roue de Deming consiste à réajuster les objectifs long terme à atteindre. Nous avons présenté dans la section 1.4 les quatre grandes familles d'objectifs des AOEP : 1) vis-à-vis des abonnés, 2) vis-à-vis de la population et du cadre de vie, 3) vis-à-vis de l'environnement, et 4) économiques. Maintenant, nous allons exposer dans le détail, pour nos trois terrains d'étude, les nuances dans ces objectifs et leurs seuils. Ces seuils ont plusieurs origines : soient ils sont présents depuis plusieurs années, au sein des services techniques de l'AOEP, soient ce sont des objectifs politiques fixés par les élus locaux, soient ce sont des objectifs contractuels entre le délégataire et l'autorité organisatrice, et enfin certains seuils ont été fixés ou explicités suite à notre demande dans le cadre du projet OPTIMEAU.

8.1.1 Lausanne

A eauservice Lausanne, les échanges avec les services techniques ont permis d'identifier les objectifs suivants, ordonnés par priorité décroissante :

- Eviter les défaillances pour minimiser les coûts de réparation ;
- Eviter les interruptions de service surtout chez les clients sensibles ;
- Ne pas donner une mauvaise image de l'AOEP suite à des interventions trop fréquentes dans la même zone ;
- Eviter les dégâts aux tiers (inondation de biens) ;

- Eviter les dégâts aux routes ;
- Eviter les perturbations du trafic routier ;
- Se coordonner avec les autres services ;
- Améliorer la qualité de l'eau ;
- Eviter les pertes d'eau ;
- Augmenter les diamètres des tronçons sous-dimensionnés (défense incendie notamment) ;
- Avoir un prix de l'eau acceptable par les usagers.

Afin de savoir s'il atteint ses objectifs, eauservice Lausanne s'est fixé les seuils suivants sur les indicateurs ci-dessous :

- Moins de 100 défaillances (sur tronçons) (visibles et détectées) par an sur le réseau en ville, i.e $I1P(y) \leq 100$. La figure 8.1 présente les défaillances passées sur ce réseau et l'objectif (trait rouge) ;
- Taux de renouvellement inférieur à 1,5%, c'est-à-dire moins de 13,5 km par an renouvelé (hypothèse 900 km de réseau) c'est-à-dire le budget renouvellement doit être inférieur à 7 millions de CHF/an (hypothèse coût renouvellement 512 CHF/m), i.e $I2R(y) \leq 1,5\% \Leftrightarrow I1R \leq 13,5$ km/an $\Leftrightarrow I1F(y) \leq 7$ millions de CHF ;
- Moins de 4,7 interruptions non programmées pour 1 000 abonnés par an ;
- Moins de 3 000 CHF de dégâts au tiers par an ;
- $ILP_{brut} \leq 8$ m^3/jour/km.

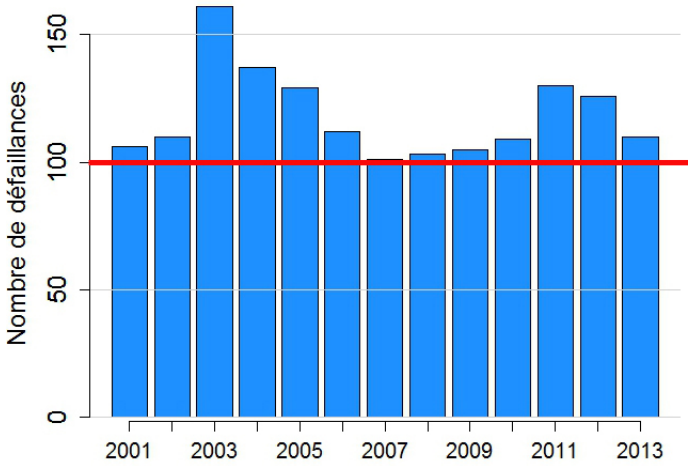


FIGURE 8.1: Défaillances issues des fuites détectées et visibles sur canalisations à Lausanne en [2001, 2013], concernant le réseau en ville, simulation № 4

☞ Pour en savoir plus : consulter la simulation "Lausanne № 4" dans l'annexe J.

8.1.2 Grand Lyon

Au Grand Lyon, les objectifs sont les suivants, ordonnés par priorité décroissante :

- Eviter les effondrements de terrain liés aux fuites. Ces effondrements ont principalement lieu en zones de balmes ;
- Eviter les dégâts aux tiers (inondations) ;
- Eviter les coupures d'eau surtout chez les clients sensibles ;
- Eviter de perturber les usagers de la route ;
- Eviter les pertes d'eau ;
- Améliorer la qualité de l'eau ;

- Avoir un prix de l'eau acceptable par les usagers.

Afin de savoir s'il atteint ses objectifs, le Grand Lyon s'est fixé les seuils suivants sur les indicateurs ci-dessous :

- Moins de 30 défaillances par an en zone de balme, i.e $I1P_\omega(y) \leq 30$;
- Moins de 300 défaillances par an sur tout le réseau, i.e $I1P_\Omega(y) \leq 300$;
- Moins de 5 interruptions non programmées pour 1 000 abonnés par an ;
- $ILP < 12$ m^3/jour/km ;
- $ILVNC < 12{,}5$ m^3/jour/km ;
- Le rendement doit être ≥ 85 % ;
- Dans un avenir proche, le taux de renouvellement à l'échelle du réseau doit au moins atteindre 0,75 % puis dans un avenir plus lointain l'effort doit être maintenu voire renforcé à 1%, i.e $I2R \geq 0,75\%$.

8.1.3 SEDIF

Au SEDIF, les objectifs sont les suivants, ordonnés par priorité décroissante :

- Maintenir ou diminuer le nombre de défaillances ;
- Eviter les dégâts importants liés aux défaillances (rares) des diamètres importants (feeders) ;
- Essayer de lisser les impacts du pic de pose d'après guerre. Le SEDIF craint que les tronçons de ce pic défaillent tous en même temps et qu'ils n'aient pas les moyens financiers et humains pour les réparations et/ou renouvellement ;
- Eviter les pertes d'eau. Maintenir de bons rendements, ILP et $ILVNC$ à l'échelle du réseau ;
- Essayer de ne pas réaliser trop de chantiers dans la même commune la même année. En effet les usagers n'acceptent pas quand il y a trop de travaux ;
- Maintenir une bonne qualité d'eau ;
- Avoir un prix de l'eau acceptable par les usagers.

Afin de savoir s'il atteint ses objectifs, le SEDIF s'est fixé les seuils suivants sur les indicateurs ci-dessous :

- Moins de 1 000 défaillances par an sur le réseau, i.e $I1P(y) \leq 1000$;
- Le rendement doit être supérieur à 88,4% ;
- $ILP \leq 13{,}72$ m^3/km/jour ;
- $ILVNC \leq 16{,}89$ m^3/km/jour.
- Ne pas renouveler plus de 3% du linéaire par an dans la même commune, i.e $I2R_\omega \leq 3\%$;
- Le taux de renouvellement à l'échelle du réseau doit être de 1% entre 2015 et 2022, i.e $I2R_\Omega = 1\%$.

8.1.4 Synthèse

Les objectifs de nos terrains d'étude répondent globalement à la même logique. Les AOEP cherchent notamment à diminuer les défaillances, les dégâts et les pertes d'eau tout en maîtrisant les coûts.
En revanche, l'indicateur taux de renouvellement $I2R$ n'est pas utilisé de la même façon dans chaque territoire. D'un côté, eauservice Lausanne cherche à être inférieur à un seuil pour maîtriser ses coûts alors que le SEDIF et le Grand Lyon cherchent à atteindre voire dépasser un seuil afin de respecter des objectifs plus politiques.

De plus, nous pouvons constater que seul eauservice Lausanne a fixé des seuils sur des indicateurs de "coûts". Au Grand Lyon et au SEDIF l'aspect financier est géré à une échelle plus large. En général, ces deux territoires ont des objectifs vis-à-vis d'un prix de l'eau à ne pas dépasser. Or, le prix de l'eau est un indicateur qui contient beaucoup plus d'information que le renouvellement des canalisations. Enfin, eauservice Lausanne est le seul à citer la "coordination" dans ses objectifs. En pratique, la coordination est aussi présente au Grand Lyon et au SEDIF mais elle est plus envisagée comme une contrainte que comme un objectif.

Les objectifs ayant été formalisés, il convient d'identifier les stratégies permettant de les atteindre. Dans la suite, une approche par scénarios associés à des courbes de survie est proposée.

8.2 L'utilisation des lois de survie au service de la planification à long terme : contribution et limites

8.2.1 La prospective : définition

D'après [Bouleau, 2009] on parle de prospective lorsqu'on se projette dans un avenir plus lointain et plus controversé que le court-terme. Il n'est pas possible de prévoir avec certitude l'évolution d'un système impliquant l'humain. Chacun construit sa propre représentation du futur et elle peut même changer au fil du temps. Toutefois, il est possible de faire discuter les acteurs sur ces représentations pour les **aider à prendre une décision qui aura un impact sur le futur**.

La prospective vise à une exploration de différents avenirs possibles sous l'hypothèse que toute évolution peut se faire soit en suivant les tendances soit avec des ruptures du système que l'on veut représenter. Elle est donc appropriée aux situations caractérisées par le fait que différentes variables-clés sont susceptibles de fluctuer, voire de connaître des ruptures d'évolution : ce qui amène à construire des conjectures dans le cadre d'avenirs par définition incertains, voire hostiles à ceux les définissant [Griffon, 2005].

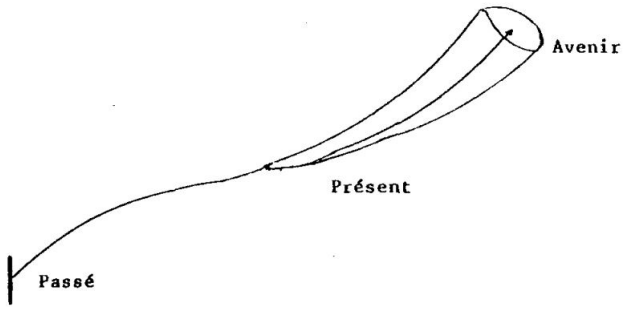


FIGURE 8.2: Relation entre le passé, le présent et les avenirs possibles [Griffon, 2005]

La démarche prospective admet qu'à tout instant l'avenir peut suivre plusieurs chemins, et que c'est principalement de la relation entre les différents acteurs du territoire que naîtra tel ou tel futur. La construction de l'avenir s'expliquerait par l'action humaine et par les déterminismes environnementaux (climat, catastrophe naturelle majeure, etc.) [Ancelin and Godet, 1983].

8.2.2 Des étapes clés à respecter

La prospective est un art qui peut être très complexe. Pour notre étude, nous avons réalisé de la prospective de base, en respectant uniquement quelques étapes clés décrites par [Bouleau, 2009].

Avant toute chose une étude prospective est réalisée à la demande d'un commanditaire (ou maître d'ouvrage). L'origine de la commande définit la limite entre les éléments du contexte qui sont considérés comme internes (de la responsabilité du maître d'ouvrage) et ceux qui sont externes (sur lesquels le maître d'ouvrage n'a qu'un effet limité).

Dans notre cas, **notre commanditaire est l'AOEP** sur les trois territoires étudiés.

Il est ensuite très important de définir une question précise, un cadrage spatial et politique du système considéré et un horizon temporel.

Le système étudié est le **réseau d'eau potable** (hors branchement) ; le cadrage politique et spatial est **l'impact de chacune de nos AOEP** dans la prise de décision de renouveler ou non les canalisations sur leur territoire.
Les horizons temporels choisis sont les suivants :

- Le SEDIF a opté pour 2050, ce qui correspond à peu près à 7 plans quinquennaux (PPI) ;
- Le Grand Lyon s'est fixé 2040. En effet, cela correspond à 24 années de prévision c'est à dire 4 plans mandats (PPI) et 3 contrats avec le délégataire ;
- Eauservice Lausanne a choisi 2050 correspondant à peu près à 35 années de prévision.

De plus, [Bouleau, 2009] conseille de rechercher des informations utiles. Il est important de se renseigner sur les tendances du moment mais il est aussi crucial de trouver des informations inhabituelles pour enrichir la réflexion. Une prospective est plus intéressante et ses résultats mieux exploitables si des signaux faibles, des germes de changement, des variabilités et des ruptures ont été mis en évidence.

Nous pouvons citer les exemples suivants d'information recueillies :
Tout d'abord, il semble que les usagers et les citoyens ont une inquiétude grandissante vis-à-vis de l'impact de certains matériaux (des canalisation, des joints, des appareillages, etc.) et des produits de réhabilitation sur la **santé humaine et l'environnement**. Les inquiétudes portent notamment sur le plomb, l'amiante ciment, les plastiques (comme ceux émettant des Chloro Vynil Monomère [CVM]) et certaines résines époxy.
De plus, la volonté de réduire les gaz à effet de serre et la mode du sans voiture semblent aboutir dans nos collectivités au développement croissant de **transports en commun** en réseau (trolleybus, tramway).
Ensuite, il est prévu que la **population** sur l'arc lémanique augmente entre 2005 et 2030 de plus 100 000 personnes. Plus précisément, sur le territoire de Lausanne, le PALM (plan d'agglomération Lausanne Morges) a prévu une augmentation de plus de 60 000 personnes entre 2005 et 2030. Néanmoins, il est prévu en majorité de densifier l'habitat, c'est à dire d'augmenter le nombre de branchements, mais l'extension du réseau devrait être faible.

Nous avons ensuite, sur ces bases, élaboré plusieurs scénarios prospectifs (soit dans la continuité des tendances soit en rupture) afin de pouvoir mener une analyse stratégique permettant de conclure sur les actions les plus pertinentes à réaliser à l'avenir. Notons que nous entendons par scénario : des prévisions réalisées selon certaines hypothèses, et tenant compte des contraintes d'une situation économique, démographique, etc. [Jeuge-Maynart et al., 2011].

8.2.3 Les scénarios prospectifs

8.2.3.1 Eauservice Lausanne

A Lausanne, nous avons construit plusieurs scénarios prospectifs dont les 12 présentées sur le tableau 8.1. Certains scénarios ont été explicitement demandées par eauservice Lausanne (cf. annexe J). D'autres ont été réalisées pour disposer de bases de comparaison.

Le premier point qui nous a été demandé par eauservice Lausanne a été de séparer les conduites en ville (715 km), des conduites en altitude (en montage) (185 km). En effet, les conduites en altitude, c'est à dire tout le réseau d'adduction et une partie du transport [1] ne sont pas gérés de la même façon par eauservice que les canalisations en ville. Les conduites en montagne sont en général gravitaires, de diamètres importants et avec très peu d'habitants autour alors que les conduites en ville sont sous pression, de diamètre en général plus faible et cernées d'usagers vulnérables. Pour les conduites de diamètres importants eauservice a une meilleure connaissance de l'état car elles sont plus surveillées (suivi de la consommation électrique notamment) que les conduites en ville.

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Périmètre	Tout le réseau		Réseau en ville									
Stratifié ?	Non	Ville/ Montagne	Non				Diamètre	NDOA	Matériaux		Vulnérabilité	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2001; 2012]		[2001; 2007]	[2001; 2013]								
Statu quo ?	Oui		Oui		On arrête de renouveler	On vise un TR de 1%	Oui			Plus drastique avec les fontes grises	Oui	> autour des éléments vulnérables

Tableau 8.1: Synthèse des éléments clés de 12 scénarios construits avec les données d'eauservice Lausanne

Les résultats des scénarios 2, 6, 10 et 12 (cf. tableau 8.1) nous ont été explicitement demandés par eauservice :

- 2- On effectue une stratification ville/montagne du réseau total et on garde les mêmes âges à la mise hors service que ceux (du passé) de la fenêtre [2001 ; 2012] ("Statu quo"). Si cette information n'est pas complètement disponible [2] on prolonge les tendances selon un calendrier fourni par eauservice. ☞ Pour en savoir plus : consulter le scénario "Lausanne № 2 de l'annexe J".
- 6- On travaille uniquement sur le réseau en ville et on essaye de viser un taux de renouvellement autour de 1% (c'est à dire plus faible que par le passé). ☞ Pour en savoir plus : consulter le scénario "Lausanne № 6 de l'annexe J".
- 10- On travaille uniquement sur le réseau en ville, on stratifie selon les matériaux des tuyaux et à l'avenir on essaye de renouveler les canalisations en fonte grise plus précocement que ce qui a été fait sur la fenêtre [2001 ; 2013]. Les autres matériaux sont renouvelés à l'avenir à des âges identiques à ceux de la fenêtre [2001 ; 2013]. Les tronçons en fonte grise seront systématiquement renouvelés par de la fonte ductile. ☞ Pour en savoir plus : consulter le scénario "Lausanne № 10 de l'annexe J".
- 12- On travaille uniquement sur le réseau en ville et on stratifie selon les caractéristiques des éléments vulnérables (usagers, biens) autour des conduites. A l'avenir les âges à la mise hors service des conduites en-dessous des éléments très vulnérables seront plus faibles que sur (le passé) la fenêtre [2001 ; 2013]. A l'avenir, les âges à la mise hors service des conduites entourées d'éléments peu vulnérables seront les mêmes que sur la fenêtre [2001 ; 2013]. ☞ Pour en savoir plus : consulter le scénario "Lausanne № 12 de l'annexe J".

8.2.3.2 SEDIF

Avec les données du SEDIF, nous avons réalisé plusieurs scénarios prospectifs dont les 7 présentées dans le tableau 8.2. Une partie des scénarios nous a été explicitement demandée par le SEDIF.

1. C'est à dire les conduites de Pont de Pierre, Pays d'Enhaut, Prévondavaux et Thierrens
2. C'est le cas pour le réseau en montagne

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7
Stratifié ?	Non			Diamètres	NDOA	Matériaux	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[1995; 2004]	[1995; 2012]					
Statu quo ?	Oui		On arrête de renouveler	Oui			On arrête de renouveler

TABLEAU 8.2: Synthèse des éléments clés de 7 scénarios effectuées avec les données du SEDIF

Il en est ainsi des scénarios 4 et 6 (cf. tableau 8.2) :

- 4- On stratifie selon le diamètre des tuyaux et à l'avenir on essaye de renouveler les canalisations à des âges identiques que (par le passé) sur la fenêtre [1995 ; 2012] ("statu quo"). ☞ Pour en savoir plus : consulter le scénario "SEDIF № 4"de l'annexe K.
- 6- On stratifie selon les matériaux des tuyaux et à l'avenir on essaye de renouveler les canalisations à des âges identiques que (par le passé) sur la fenêtre [1995 ; 2012] ("statu quo"). Les tronçons en fonte grise seront renouvelés par de la fonte ductile. ☞ Pour en savoir plus : consulter le scénario "SEDIF № 6" de l'annexe K.

8.2.3.3 Grand Lyon

Avec les données du Grand Lyon, nous avons réalisé plusieurs scénarios prospectifs dont les 8 présentées dans le tableau 8.3. Certains scénarios nous été explicitement demandées par le Grand Lyon (cf. annexe L). Les autres ont été réalisées pour avoir des bases de comparaison.

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8
Stratifié ?	Non						Diamètre	Matériaux
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2002; 2005]	[2002; 2012]	On n'utilise pas la survie du Grand Lyon				[2002; 2012]	
Statu quo ?	Oui		Survie SEDIF	Survie Lausanne	Survie entre SEDIF et Lausanne	On arrête de renouveler	Oui	

TABLEAU 8.3: Synthèse des éléments clés de 8 scénarios effectuées avec les données du Grand Lyon

Les résultats des scénarios 3, 4 et 5 (cf. tableau 8.3) nous ont été demandés par le Grand Lyon. En effet, vu que leurs courbes de survie passée a un niveau d'incertitude de rang B, ils ont préféré tester des scénarios avec des lois de survies identifiées sur les deux autres terrains d'étude.

- 3- A l'avenir on essaye de renouveler les canalisations à des âges identiques à ceux du SEDIF (par le passé) sur la fenêtre [1995 ; 2012] . ☞ Pour en savoir plus : consulter la scénario "Grand Lyon № 3" de l'annexe L.
- 4- A l'avenir on essaye de renouveler les canalisations à des âges identiques à ceux d'eauservice Lausanne que (par le passé) sur la fenêtre [2001 ; 2012]. ☞ Pour en savoir plus : consulter le scénario "Grand Lyon № 4" de l'annexe L.
- 5- A l'avenir on essaye de renouveler les canalisations à des âges à la mise hors service intermédiaires entre ceux du SEDIF et ceux de Lausanne par le passé. ☞ Pour en savoir plus : consulter le scénario "Grand Lyon № 5" de l'annexe L.

Après avoir construit les scénarios prospectifs, il faut ensuite traduire ces mots en fonctions de survie prospective qui permettront de calculer les 11 indicateurs prévisionnels.

8.2.4 Transformation des scénarios en courbes de survie prospectives

Il est important de rappeler que la distribution des âges à la mise hors service des tronçons et donc la fonction de survie contient toutes les causes de mises hors service. La fonction de survie agrège toutes les causes : coordination, mauvais état, aversion au risque, respect de telle ou telle règlementation, etc. Par conséquent, une étape clé réside dans le choix de cette fonction de survie.

Dans un premier temps nous présenterons comment dans nos simulations numériques nous intégrons les fonctions de survie, puis nous distinguerons dans les sections suivantes les deux cas décrits ci-dessous :

- d'une part les survies dans les scénarios "statu quo" ;
- d'autre part les survies dans les autres scénarios.

8.2.4.1 Intégration des fonctions de survie dans le code de calcul

Dans le code développé nous enchaînons à la suite 4 modèles (cf. figure 8.3). Le premier modèle "M0 Linéaire" peut se décomposer en deux sous-modèles : "M survie" et "M linéaire". "M survie" permet de créer des survies prospectives essayant de prendre en compte toutes les causes de mise hors service à venir. Le second sous-modèle "M linéaire" stricto sensus permet en sortie d'obtenir trois indicateurs $I1R$ (le linéaire à renouveler), $I2R$ (le taux de renouvellement) et $I3R$ (l'âge moyen du réseau). Ensuite "M1 dégradation" permet en sortie d'obtenir $I1P$ (le nombre de défaillances futures). On notera que la fonction de survie est une sortie de "M survie" et une entrée de "M linéaire" et "M1 dégradation". Ensuite, "M2 risque" produit les cinq indicateurs suivants : $I2P$ (le risque coupure d'eau), $I3P$ (le risque coupure route), $I4P$ (le risque inondation), $I5P$ (le risque effondrement de sol) et $I6P$ (le volume de fuite). Enfin, "M3 économique" engendrent deux indicateurs : $I1F$ (coût renouvellement) et $I2F$ (coût réparation).

Le modèle "M survie" est développé dans les sections suivantes de ce chapitre. Les autres modèles seront développés dans les chapitres suivants.

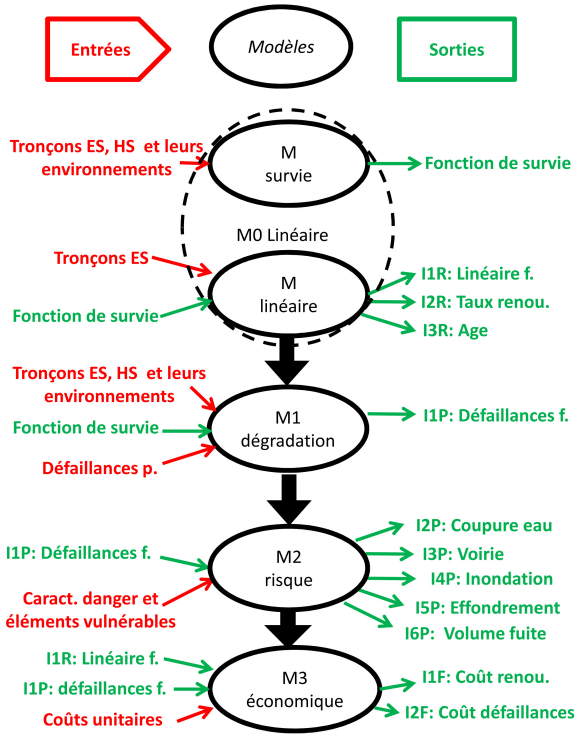


FIGURE 8.3: Organigramme du fonctionnement du code développé. M = Modèle, ES= en service, HS = Hors service, renou. = renouvellement, p. = passées et f. futur

8.2.4.2 Survies des scénarios “statu quo”

Dans les scénarios “statu quo”, nous utilisons la fonction de survie passée comme base. Néanmoins cette dernière peut ne pas avoir de valeur à tous les âges (présence de “trous”). Or, pour tous les calculs des indicateurs, nous avons besoin d’une survie avec une valeur à chaque âge.
Pour résoudre ce problème nous avons opté pour plusieurs modèles, ayant chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Le **premier groupe** de méthodes, consiste à caler sur la fonction empirique, par la méthode des moindres carrés, une loi mathématique. Le **second groupe** de modèles consiste à compléter les “trous” par différentes méthodes de régression ou d’interpolation.

➢ **Calage d’une loi classique sur la courbe empirique**

Présentation de la démarche

Le **premier groupe** consiste à estimer, par la méthode des moindres carrés, les paramètres optimaux $\widehat{\boldsymbol{\theta}}$ estimateur de $\boldsymbol{\theta}$ correspondant aux paramètres d’une loi mathématique classique (tels que Weibull, Normale) ou non (comme WeiCo, Herz) (cf. figure 8.4). Ces paramètres sont ceux qui minimisent la quantité de l’équation 8.1 :

$$\sum_{t=t_{min}}^{t_{max}} \left(\widehat{S}_{\mathrm{K}}(t) - \frac{S_{\boldsymbol{\theta}}(t)}{S_{\boldsymbol{\theta}}(t_{min})} \right)^2 \tag{8.1}$$

Où $\widehat{S}_{\mathrm{K}}(t)$ est la survie empirique calculée par la méthode Kaplan-Meier et $S_{\boldsymbol{\theta}}(t)$ est la fonction de survie d’une loi classique. t_{min} est égal au minimum observé des t_{2i} dans la strate concernée. Par exemple $t_{min} = 27$ ans pour la strate fonte grise au SEDIF (cf. section 6.3.3.3). t_{max} est égal au maximum des t_{2i} dans la strate concernée. Par exemple, pour l’ensemble du réseau du SEDIF, $t_{max} =$ 161 ans (cf. section 3.1.1).

Nom Source	Survie $S_{\boldsymbol{\theta}}(t)$	$\boldsymbol{\theta}$
Loi de Weibull [Weibull, 1951]	$= \mathrm{e}^{-(t/\eta)^{\delta}}$	$[\eta\ \delta]$
Loi de Herz [Herz, 1996]	$= \begin{cases} 1 & \text{si } t \leq \zeta \\ \dfrac{\chi+1}{\chi+\mathrm{e}^{\varsigma(t-\zeta)}} & \text{si } t > \zeta \end{cases}$	$[\chi\ \zeta\ \varsigma]$
Loi normale Laplace et Gauss $\approx$ 1800	$= \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\mathrm{erf}\left[\frac{t-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right]$	$[\mu\ \sigma]$
Loi Log normale Galton $\approx$ 1900	$= \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\mathrm{erf}\left[\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right]$	$[\mu\ \sigma]$

Tableau 8.4: Exemple de fonctions de survie de lois classiques

Pour déterminer les paramètres de l’équation 8.1 comme dans la section 7.1.2 nous utilisons la méthode de Nelder-Mead puis nous effectuons plusieurs tests de rapport de vraisemblance.

Exemple de résultat et discussions

Nous avons suivi cette démarche, puis lorsque les p-values étaient significatives (< 0.05) et que visuellement l’écart entre la survie empirique et la survie de la loi classique était faible, nous avons

conservé les résultats. En général, c'est la loi de Weibull à deux paramètres qui s'est ajustée le mieux à nos données.

Par exemple, le tableau 8.5 et la figure 8.4 présentent les résultats de cette démarche pour l'ensemble du réseau du SEDIF. Nous constatons que les p-values sont significatives, en revanche les derniers points de la survie de Kaplan-Meier (à partir de 140) sont assez éloignés de la survie de Weibull.

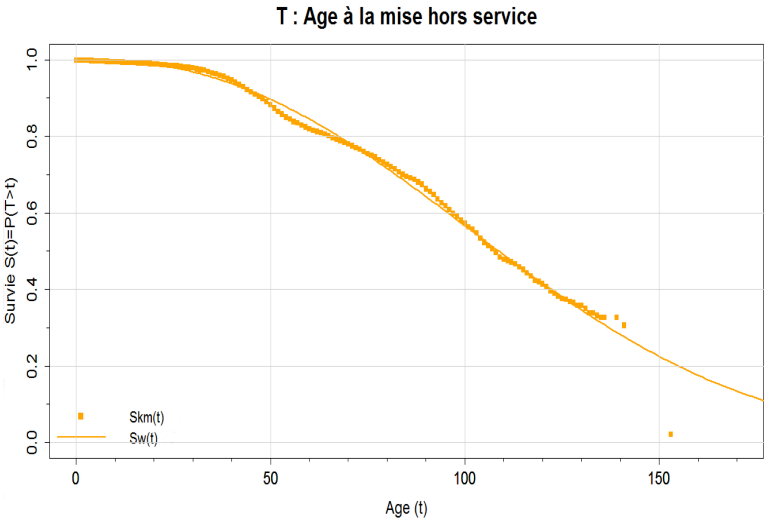


FIGURE 8.4: SEDIF. Trait : Courbes de survie prospectives du scénario "Statu quo", obtenue en calant la loi de Weibull à 2 paramètres [Sw(t)] sur la survie passée. Point : Survie passée sur [1995 ; 2012], en linéaire, calculée par la méthode Kaplan-Meier [Skm(t)].

☞ Pour en savoir plus : consulter le scénario "SEDIF № 2"de l'annexe K.

θ	Paramètres	$\widehat{\theta}$	p-values
δ	de forme	2.3	< 0.05
η	d'échelle	122	< 0.05

TABLEAU 8.5: Paramètres de la survie de Weibull calés sur le réseau entier du SEDIF

Grâce à cette démarche, la survie prospective est facile à manipuler car elle tient en une seule équation. En revanche, la forme peut ne pas être parfaitement adaptée comme cela a été le cas pour certaines survies empiriques d'eauservice Lausanne.

➢ Effectuer des régressions ou des interpolations

A eauservice Lausanne, certaines courbes empiriques comme celle de la figure 8.5 (cf. les carrés oranges), semblent pouvoir être scindées en deux. De 0 à 30 ans, la survie empirique de la figure 8.5 ressemble à celle d'une équation linéaire, puis à partir de 30 ans la forme est celle d'une fonction de survie classique. Par conséquent, à eauservice pour mieux capter cette forme originale nous avons effectué soit une interpolation linéaire soit une régression locale.

Présentation des méthodes

1. Interpolation linéaire

Elle permet d'obtenir une fonction continue à partir de notre fonction de survie discontinue empirique en estimant uniquement la valeur des points inexistants de proche en proche. Cette méthode est bien plus simple que la précédente. Elle consiste à tracer une droite entre deux points existants ce qui permet d'estimer les points inexistants au milieu.

2. Régression locale

La régression locale [Cleveland, 1979; Cleveland and Loader, 1996] combine la simplicité d'une régression linéaire avec la flexibilité de la régression non linéaire (méthode des moindres carrées), en effectuant

une régression simple sur des sous-ensembles locaux de données. L'un des principaux avantages de cette méthode est qu'elle rend inutile la définition d'une unique fonction globale qui décrirait le modèle de régression, puisque la méthode consiste à calculer autant de fonctions locales qu'il y a de segments de données. Pour plus d'information cf. l'annexe 17 dans [Large and Tomasian, 2014a].

Exemple de résultat et discussions

Le trait orange de la figure 8.5 représente les résultats d'une régression locale à partir de la survie empirique d'eauservice Lausanne sur le réseau en ville. Nous constatons que même si cette survie est en deux morceaux elle s'ajuste très bien à la survie empirique.

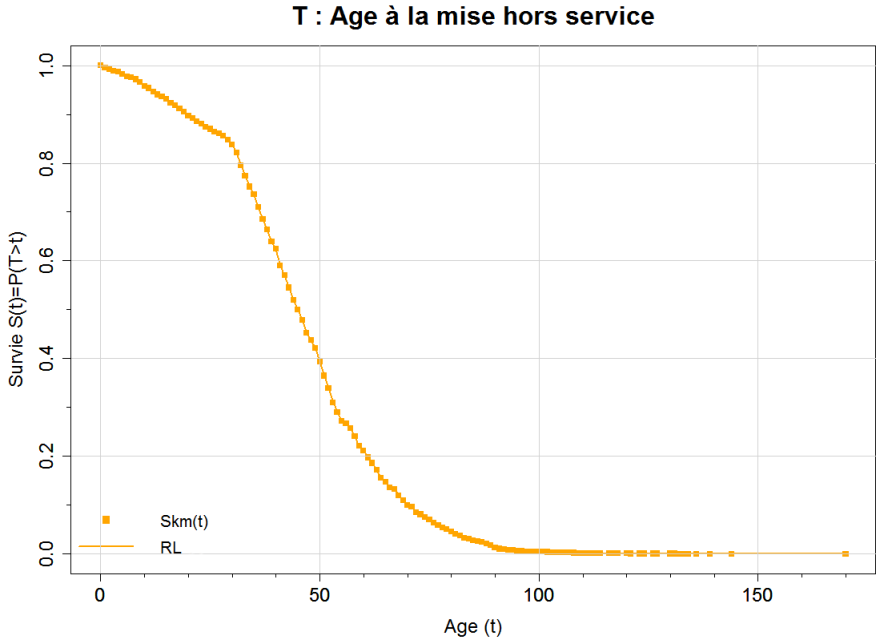


FIGURE 8.5: Eauservice Lausanne. Trait : Courbe de survie prospective du scénario "Statu quo sans stratification" obtenue par une régression locale [RL]. Carrés : Survie empirique passée sur [2001 ; 2013], en effectif, calculée par la méthode Kaplan-Meier [Skm(t)].

☞ Pour en savoir plus : consulter le scénario "Lausanne № 4" de l'annexe J.

En résumé, pour créer les survies des scénarios "statu quo" :
1. soit nous avons calé une loi classique paramétrique par la méthode des moindres carrés ;
2. soit nous avons mené une régression locale ou une interpolation linéaire.

Les survies paramétriques ont été préférées pour les scénarios "statu quo" lorsqu'elles avaient une bonne qualité d'ajustement. De plus, pour s'écarter du "statu quo" elles sont plus facile à manipuler.

8.2.4.3 Survies des scénarios non "statu quo"

Le construction de survies non "statu quo" est plus complexe. Nous nous sommes appuyés sur les survies passées pour mieux nous en détacher ensuite.

Dans l'exemple suivant le réseau d'eauservice Lausanne est partitionné en trois en fonction des caractéristiques des éléments vulnérables autour des tronçons fin 2013 : très vulnérable (et/ou forte valeur), moyennement vulnérable (et/ou valeur moyenne) et peu vulnérable (et/ou faible valeur). Pour cela nous avons utilisé le paramètre SC_i [3] que nous avons subdivisé en trois selon le tableau 8.6.

3. SC_i (Sensibility of Customer) est un critère utilisé par eauservice pour la planification à court terme

SC_i	Description	Vulnérabilité
1	Clients sensibles	Très vulnérable
0.6	Zone industrielle sensible	et/ou forte valeur
0.5	Zone industrielle normale	
0.3	Haute densité	
0.2	Vieille ville	Moyennement vulnérable
0.2	Centre village	et/ou valeur moyenne
0.2	Moyenne densité	
0.1	Faible densité	Peu vulnérable
0	Conduites de transport et bouclage	et/ou valeur faible
0	Zone verte (arborée, engazonnée)	

TABLEAU 8.6: Valeurs de SC_i à eauservice Lausanne, réseau en ville [Apotheloz, 2009, p. 5]

Dans un premier temps, nous avons estimé les survies empiriques, puis nous avons calé le plus souvent une équation de Weibull à deux paramètres sur ces dernières (cf. figure 8.6).

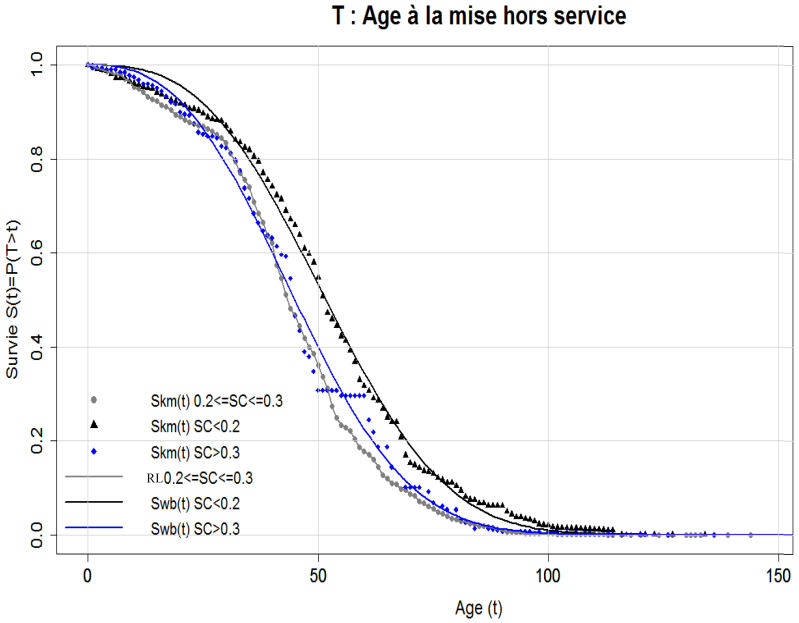


FIGURE 8.6: Réseau d'eauservice Lausanne en ville stratifié selon la vulnérabilité des enjeux. Points : Survies empiriques passées sur [2001 ; 2013], en effectif, calculée par la méthode Kaplan-Meier [Skm(t)]. Traits : Courbes de survie continue obtenue par une régression locale [RL] ou par la méthode des moindres carrés en calant une survie de Weibull $Swb(t)$.

☞ Pour en savoir plus : consulter le scénario "Lausanne № 11" de l'annexe J.

Ensuite, pour obtenir le scénario prospectif "Lausanne № 12" à savoir : "à l'avenir eauservice renouvelera plus autour des éléments vulnérables que par le passé", en échangeant avec les terrains et en respectant leurs commandes nous avons fait varier le paramètre d'échelle de la loi de Weibull des deux courbes où la vulnérabilité était la plus élevée, ce qui revient à décaler uniformément les âges à la mise hors service.

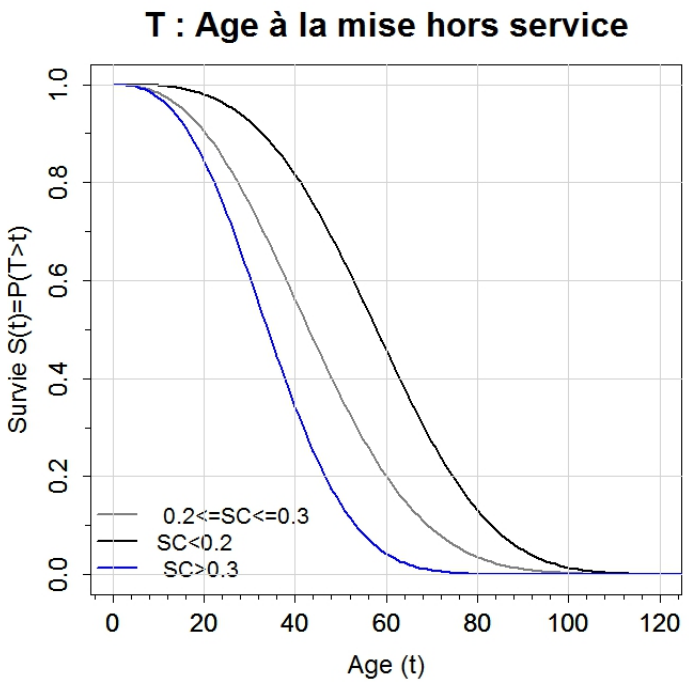


FIGURE 8.7: Eauservice Lausanne. Courbe de survie propective, en effectif, réseau stratifié selon la vulnérabilité des enjeux à Eauservice Lausanne

☞ Pour en savoir plus : consulter le scénario “Lausanne № 12” de l’annexe J.

Notons que cette démarche est applicable avec n’importe quelle survie ayant une forme analytique. Ainsi, cette démarche fonctionne aussi avec WeiCo.

8.3 Conclusion

Nous venons de présenter dans le détail les objectifs des terrains d’étude. En s’appuyant sur ces objectifs, des scénarios contrastés ont été construits. Les scénarios ont ensuite été traduit en courbe de survie prospective ce qui est loin d’être trivial sauf pour le scénario “Statu quo”. S’éloigner de ce scénario est difficile car nous n’avons pas pu séparer les renouvellements pour cause de mauvais état, des renouvellements pour coordination avec d’autres chantiers. En effet nous n’avions pas dans les bases de données fournies, des informations suffisantes sur la coordination pour utiliser Kaplan-Meier ou WeiCo.

Partie II : Conclusion

Au sein de la partie II nous venons de suivre deux étapes de la roue de Deming : l'**évaluation des pratiques passées** et l'**ajustement des objectifs** (cf. figure 8.8). Dans le chapitre 5 cette analyse a été réalisée grâce à trois indicateurs classiques : le budget attribué au renouvellement chaque année, le taux de renouvellement et l'indice linéaire de perte. Dans les trois terrains d'étude ces indicateurs présentent de grandes disparités et ils mettent en évidence qu'il n'y a pas de lien direct entre le taux de renouvellement et la performance (ici les pertes d'eau).

Nous avons adapté la méthode de Kaplan-Meier pour reconstruire la survie par groupe de tronçons (chapitre 6) et développé un modèle pour construire la survie par tronçon (WeiCo) qui permet de prendre en compte plusieurs variables explicatives simultanément (chapitre 7). Cependant cela nécessite beaucoup de données, pas forcément disponibles dans les trois terrains d'étude.

Dans le chapitre 8 nous avons réajusté les objectifs des terrains et construit des scénarios contrastés qui ont été traduits en survies prospectives. Un verrou existe lorsque nous souhaitons nous écarter des scénarios "Statu quo". Nous n'avons pas pu séparer les renouvellements pour cause de mauvais état, des renouvellements pour coordination avec d'autres chantiers. En effet, ce sont deux catégories intrinsèquement liées et nous avons manqué de données sur les causes de mise hors service. La démarche pour créer les survies prospectives est rigoureuse dans le cas des scénarios "statu quo", en revanche elle est empirique dans les autres scénarios.

Troisième partie

Les avancées majeures en planification à long terme

Partie III : Introduction

Après avoir réajusté les objectifs, l'étape suivante de la roue de Deming consiste à **planifier les actions futures** (cf. figure 8.8). C'est ce que nous allons effectuer dans la partie III. La planification s'appuiera sur l'évolution prévue des indicateurs dans chaque scénario qui sera comparée aux seuils cibles. Nous nous intéresserons aux méthodes de calcul de ces indicateurs à partir des fonctions de survie prospectives et à l'application de la démarche dans les terrains d'étude.

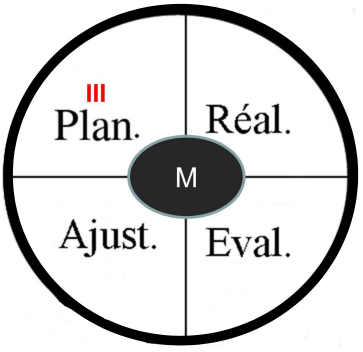


FIGURE 8.8: Schéma de la partie III du manuscrit sur la roue de Deming. Eval.= Evaluer, Ajust. =Ajuster, Plan. = Planifier, Réal. = Réaliser et M. = les Modèles

Pour chaque scénario prospectif, 11 indicateurs prévisionnels peuvent être calculés. Dans les chapitres suivants, nous allons détailler la méthode de calcul de ces 11 indicateurs (cf. figure 8.9 et 8.10). Ils peuvent être rassemblés en trois groupes :

1. les indicateurs de réalisation. Le linéaire à renouveler $I1R$, le taux de renouvellement $I2R$ et l'âge moyen du réseau $I3R$ seront détaillés dans le chapitre 9.
2. les indicateurs de performance. Le nombre de défaillances $I1P$ sera présenté dans le chapitre 10 et les autres tels que le risque de coupure d'eau $I2P$, le risque de perturbation de la voirie $I3P$, le risque inondation $I4P$, le risque de glissement de terrain $I5P$ et le volume de fuite $I6P$ seront exposés dans le chapitre 11.
3. les indicateurs financiers. le coût du renouvellement $I1F$ et le coût des réparations $I2F$ seront décortiqués dans le chapitre 12.

Enfin, au sein du chapitre 13 nous présenterons un cas d'étude où la démarche complète sera exposée via la comparaison de quatre scénarios prospectifs.

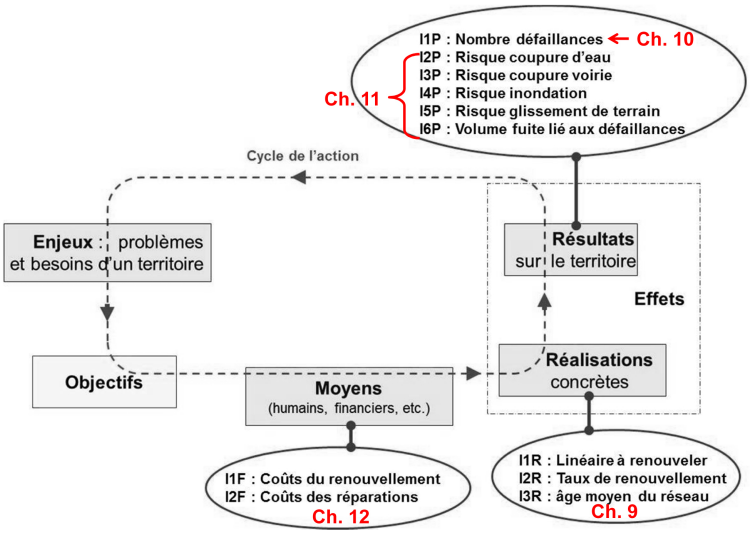


FIGURE 8.9: Représentation des chapitres de la partie III sur le cycle de l'action et les 11 indicateurs d'OPTIMEAU

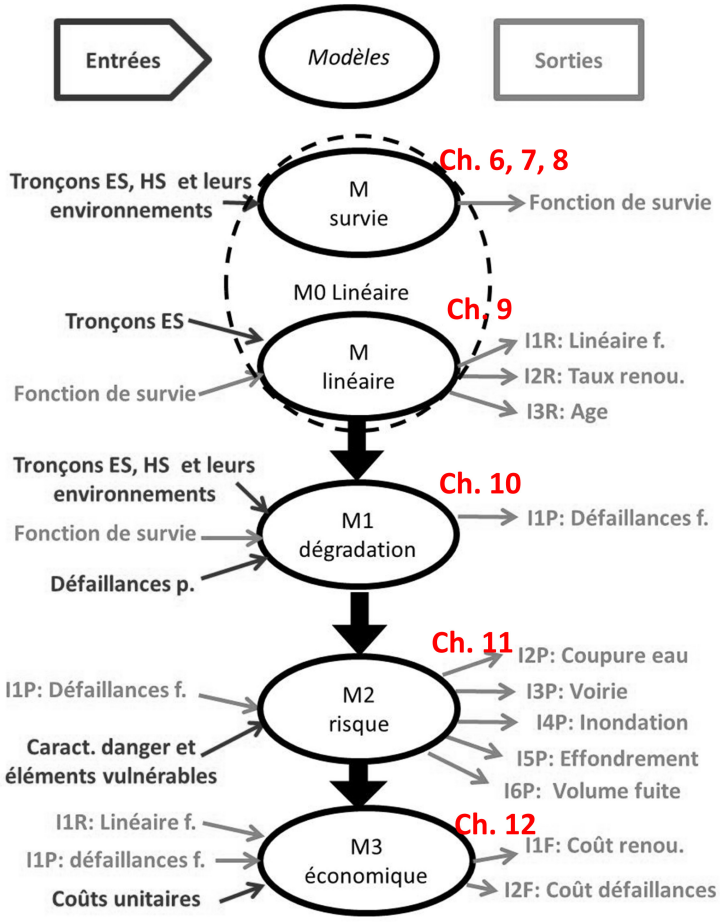


FIGURE 8.10: Représentation des chapitres sur l'organigramme du code développé

Chapitre 9

L'estimation des réalisations prévisionnelles de chaque stratégie

Sur du long terme deux indicateurs sont très difficiles à estimer. Le **premier verrou** consiste à évaluer le besoin en renouvellement (linéaire à renouveler) sur du long terme. Le second verrou réside dans l'estimation du nombre de défaillances futures. Les autres indicateurs (cf. figure 8.10) sont bien plus triviaux à calculer. Dans ce chapitre nous nous attaquons au premier verrou : l'**estimation du besoin en renouvellement**.

9.1 Justification du choix du modèle employé

Le taux de renouvellement $I2R$, l'âge moyen du réseau $I3R$ sont deux indicateurs qui se déduisent à partir du linéaire à renouveler $I1R$. Le plus difficile est d'estimer $I1R$, les autres sont ensuite calculés très aisément. Nous avons donc effectué notre revue bibliographique principalement sur $I1R$. Comme nous l'avons résumé dans le chapitre 2, les modèles pour prédire le linéaire à renouveler peuvent être classés en trois grandes familles.

9.1.1 Certains modèles : trop éloignées des pratiques réelles

Le premier groupe est composé des modèles déterministes qui n'utilisent que la moyenne ou la médiane de la variable étudiée (tel que l'âge à la mise hors service).
Au sein de ce groupe, la méthode la plus simple est celle du taux de renouvellement (TR) fixe. Le gestionnaire se fixe un TR annuel puis en multipliant ce taux par le linéaire total de son réseau, il obtient $I1R$. Dans la même veine, la méthode où le budget renouvellement est fixe est très proche. En effet, si on considère que le coût unitaire du renouvellement des canalisations est constant (par exemple 530 euros/m) alors $I1P$ est encore obtenu directement. Ces deux méthodes ne sont pas satisfaisantes, en effet, il n'y a aucune estimation du réel besoin en renouvellement, ce qui n'empêche pas qu'elles soient utilisées par certains bureaux d'étude. De plus, il n'y a pas de lien avec les indicateurs de performance (résultats) et ce taux est fixé sans justification objective.

Une méthode largement utilisée aujourd'hui est la méthode rencontrée pour la première fois dans les rapports [Cador, 2002a,b]. Elle consiste à ajouter, aux dates de pose de chaque tronçon, selon leur matériau, un âge à la mise hors service imposé (cf. tableau 9.1). Cette démarche ne convainc pas les praticiens. En effet, elle fait l'hypothèse que les canalisations doivent être remplacées à âge fixe, ce qui est non pertinent (cf. survie avec une marche d'escalier sur la figure 9.1) : en fonction des contraintes que subit une canalisation, certaines très âgées peuvent être en bon état et d'autres très jeunes en mauvais état. De plus, aucun lien n'est fait entre cette durée de maintien en service hypothétique et le processus

décisionnel opérationnel passé (coordination, risques) sur le territoire, dont résulte effectivement l'âge à la mise hors service. Par conséquent, chaque bureau d'études ou expert donne subjectivement sa propre valeur qui peut être 6 fois plus élevée d'une personne à une autre (cf. tableau 9.1 pour la fonte grise de 25 à 160 ans soit 135 ans d'écart !) .

	Age à la mise hors service		
Matériaux \ Sources	SEDIF	Autres documents	
		Le plus petit	Le plus grand
Fonte grise	70	25	160
Fonte ductile	120	30	140
Acier	60	37	100
Béton Ame Tôle	120	50	120
PEHD	100	37	100

TABLEAU 9.1: Durée de maintien en service (en années), par famille de matériaux, selon les experts pour le SEDIF [Bruyeron and Re, 2012a,b] et dans d'autres documents [Cador, 2002a,b; Poinard, 2006; Pillot, 2011a; Poyri, 2011; Canalisateurs, 2012; Scholten, 2013]

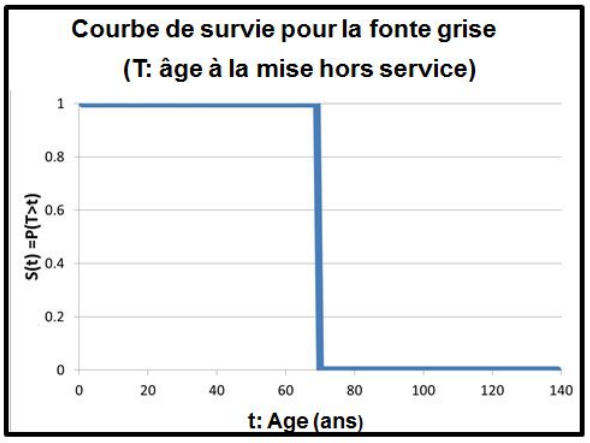


FIGURE 9.1: Courbe de survie employée dans la méthode dans [Cador, 2002a,b] pour les canalisations en fonte grise (si l'âge à la mise hors service = 70 ans)

Une autre méthode largement rencontrée est celle présente dans le logiciel Patrimoine Expert [Naldeo, 2013]. Cette démarche est une amélioration de la méthode présente dans [Cador, 2002a,b]. Un indice de vieillesse (IV) est calculé pour chaque tronçon en divisant son âge par un âge à la mise hors service fixe (cf. tableau 9.1). Ce sont les tronçons qui ont l'indice de vieillesse le plus élevé qui sont renouvelés en priorité. Cela revient donc quasiment à renouveler les plus vieux en premier. De plus, ce modèle nécessite en entrée : un budget (pour limiter le nombre de tronçons à renouveler).
Dans la même veine, une méthode exploratoire rencontrée au SEDIF (cf. détails dans [Large and Tomasian, 2014c]) consiste à renouveler en priorité les tronçons les plus vieux. Puis cette démarche nécessite un taux de renouvellement fixe pour limiter le nombre de tronçons à renouveler.
Ces deux méthodes ne sont pas satisfaisantes car sur du long terme, justement, c'est le volume budgétaire ou le taux de renouvellement que les autorités organisatrices recherchent en sortie des modèles. Or, dans ces cas, ce sont des entrées du modèle.

Le second groupe de modèles est celui présent dans des logiciels comme PARMS [Burn et al., 2002, 2003] [Rahilly et al., 2013, p. 48]. Ces modèles ne permettent de prendre en compte que des objectifs de performance directement liés aux défaillances et n'intègre pas l'évolution du réseau à long terme. En effet, le renouvellement des tronçons n'est pas pris en compte.

En résumé, nous nous écarterons de ces modèles pour permettre la prise en compte de la distribution des âges à la mise hors service et à l'évolution du réseau qui en résulte.

9.1.2 Des modèles aux perspectives intéressantes

La troisième famille de modèles dite probabiliste utilise la distribution complète de l'âge à la mise hors service et non pas une seule valeur. Elle nous parait la plus intéressante. Cette démarche est présente dans les logiciels Nessie [Rogers and Grigg, 2006; Kuhr et al., 2007; AWWA, 2010], Kanew [Herz, 1996, 2002; Baur and Kropp, 2002; Herz and Kropp, 2002; Herz et al., 2003; Kropp, 2003, 2013] et PiReM [Fuchs, 2001; Fuchs-Hanusch et al., 2008]. Elle suppose que les canalisations ne sont pas renouvelées à âge fixe mais selon une distribution statistique (courbes en cloche) de l'âge à la mise hors service. La faiblesse majeure de ces modèles est que la distribution des âges à la mise hors service n'est pas issue des données des services d'eau, mais est, elle aussi, établie a priori à partir d'hypothèses souvent très grossières. La question de la représentativité et de la pertinence de ces courbes de survie par rapport aux données du service, à ses processus de décision à moyen et court terme passés, et à ses objectifs futurs demeure entière.

Les modèles de calcul de la survie développés dans la partie II sont donc mieux adaptés à nos objectifs.

9.2 Prévision du linéaire à renouveler : $I1R$

Au niveau des méthodes pour calculer le linéaire à renouveler $I1R$ nous avons envisagé les trois possibilités suivantes.

1. Le linéaire à renouveler peut être estimé sur le réseau entier (i.e une seule strate) avec une seule survie prospective (cf. section 9.2.1).
2. Cette estimation peut aussi s'effectuer sur un réseau stratifié, chaque strate ayant sa propre survie prospective (cf. section 9.2.2).
3. Le linéaire à renouveler peut aussi être calculé sur le réseau stratifié selon les matériaux, et au cours du temps les matériaux peuvent changer (i.e de la fonte ductile est posée pour remplacer les tronçons en fonte grise renouvelés). Chaque matériau a une survie prospective. Par conséquent, chaque strate peut nécessiter l'utilisation de deux lois de survie au cours du temps (une pour l'ancien matériau et une pour le nouveau) (cf. section 9.2.3).

Pour effectuer ces calculs nous utilisons la notion de cohorte (cf. encadré 8 page 99 pour voir sa définition).

Encadré 8 - Cohorte : Sens et étymologie

Le mot cohorte viendrait du latin *cohors* qui signifiait dans le monde antique une "unité de l'armée romaine". Actuellement, en épidémiologie, une cohorte de malades est un ensemble de personnes suivies porteuses d'une même maladie alors qu'une cohorte de population générale regroupe un ensemble de personnes suivies au cours du temps choisies indépendamment de leur état de santé.
Dans ce manuscrit nous utiliserons la définition suivante :

Sans stratification :
La "cohorte y_0" regroupe l'ensemble des tronçons posés l'année y_0.
L'union de toutes les cohortes est égale à l'ensemble des tronçons en service et hors service d'un réseau. Notons que chaque année le linéaire total (en service et hors service) augmente naturellement.

Avec stratification :
La "cohorte $y_0\omega$" regroupe l'ensemble des tronçons d'une strate ω posés l'année y_0.

9.2.1 Sans changement de matériaux et une seule strate

Pour calculer $I1R$, le linéaire à poser pour plusieurs années prospectives y selon la première possibilité, nous avons besoin en entrée du modèle :

1. d'une photographie au 31 décembre de l'année de fin de la fenêtre d'observation y_2, du linéaire d'un réseau en service en fonction des dates de pose ;
2. et de la fonction de survie prospective $S(t)$ (en linéaire) du réseau.

Une cohorte est composée de tous les tronçons posés l'année y_0. Chaque cohorte est caractérisée par son linéaire encore en service l'année y, notée $LE_{y_0}(y)$, son linéaire ayant été mis hors service entre l'année y_0 et l'année y, notée $LH_{y_0}(y)$ et sa survie à l'âge $t = y - y_0$, notée $S(y - y_0)$. La première année de simulation prospective est notée $y_2 + 1$ (ex : 2013 au SEDIF). $I1R_{y_0}$ est le linéaire initial à poser l'année y_0 donc $I1R_{y_0} = LE_{y_0}(y_0) = LE_{y_0}(y) + LH_{y_0}(y)$. Pour plus de pédagogie, nous avons décidé de représenter graphiquement le linéaire en service en vert $LE_{y_0}(y)$ et le linéaire mis hors service entre y_0 et y en rouge $LH_{y_0}(y)$ plutôt que directement leur somme.

Dans un premier temps, pour chaque cohorte, nous calculons le linéaire encore en service une année après la fin de la fenêtre d'observation $y_2 + 1$ (c'est à dire 2013 pour le SEDIF). Par exemple, au SEDIF, ce calcul s'effectue sur 162 cohortes différentes (y_0 allant de $1851 = \min(y_0)$ à $2012 = y_2$) selon l'équation 9.1.

$$LE_{y_0}(y_2 + 1) = LE_{y_0}(y_2) \times \frac{S(y_2 + 1 - y_0)}{S(y_2 - y_0)} \tag{9.1}$$

Dans un second temps, en faisant l'hypothèse que le linéaire total du réseau est constant (pas d'extension), nous calculons le linéaire de la nouvelle cohorte posé l'année $y_2 + 1$ selon l'équation 9.2.

$$I1R_{y_2+1} = LE_{y_2+1}(y_2 + 1) = \sum_{y_0=\min(y_0)}^{y_2} [LE_{y_0}(y_2) - LE_{y_0}(y_2 + 1)] \tag{9.2}$$

Pour rappel l'obtention, du linéaire hors service de la cohorte y_0 l'année y s'obtient alors selon l'équation 9.3.

$$LH_{y_0}(y) = LE_{y_0}(y_0) - LE_{y_0}(y) \tag{9.3}$$

Pour obtenir $I1R$ sur plusieurs années, il faut enchaîner les équations 9.1, 9.2 et 9.3, puis itérer année par année jusqu'à obtenir l'année prospective désirée (par exemple 2050 au SEDIF).

9.2.2 Sans changement de matériaux et plusieurs strates

Pour calculer $I1R_y$ le linéaire à poser l'année prospective y selon la seconde possibilité, nous avons besoin en entrée du modèle :

1. d'une photographie au 31 décembre de l'année de fin de la fenêtre d'observation y_2 du linéaire d'un réseau en service en fonction des dates de pose, stratifié selon la variable désirée ;
2. et des fonctions de survie prospective $S_\omega(t)$ (en linéaire) pour chaque strate de tronçon $\omega \in [1, n]$ du réseau Ω.

Dans ce cas le raisonnement pour chaque strate est le même que précédemment. En revanche pour avoir le résultat sur l'ensemble du réseau il faut pour chaque année prospective (y) sommer les résultats obtenus pour chaque strate ω (cf. équation 9.4).

$$LE_{y_0\Omega}(y) = \sum_{\omega=1}^{n} [LE_{y_0\omega}(y)] \tag{9.4}$$

9.2.3 Avec changement de matériaux et plusieurs strates

Pour calculer $I1R_y$ le linéaire à poser l'année y selon la troisième possibilité, nous avons besoin en entrée du modèle :

1. d'une photographie au 31 décembre de l'année de fin de la fenêtre d'observation y_2, du linéaire d'un réseau en service en fonction des dates de pose, stratifié selon le matériau des tronçons.
2. et des fonctions de survie prospective $S_{mat}(t)$ (en linéaire) pour chaque matériau.

Si dans une strate le matériau reste le même tout au long de la simulation prospective (par exemple les tronçons en fonte ductile sont renouvelés par d'autres tronçons en fonte ductile) la démarche est la même que celle présentée dans la section 9.2.1.

En revanche, si dans une strate ω les tronçons renouvelés changent de matériau, par exemple les tronçons en fonte grise FG sont renouvelés par de la fonte ductile FD, il faut respecter les étapes suivantes. Nous avons choisi cet exemple car c'est la situation la plus courante dans notre domaine.

Nous faisons l'hypothèse que la strate ω contient les tronçons géographiques[1] où les tronçons physiques sont tous en fonte grise au $31/12/y_2$ (i.e 31/12/2012 au SEDIF). Au niveau des tronçons géographiques de cette strate, dès qu'un tronçon physique en fonte grise FG est renouvelé, il sera remplacé par un tronçon en fonte ductile FD.

Nous reconstituons dans cette strate le linéaire initial noté LI posé en fonte grise (étape calculatoire transitoire qui sera ensuite supprimée) (cf. équation 9.5).

$$LI_{y_0} = \frac{LE_{y_0}(y_2)}{S_{FG}(y_2 - y_0)} \tag{9.5}$$

La première année prospective $y_2 + 1$, dans cette strate, toutes les cohortes sont en fonte grise FG. Dans chaque cohorte, nous prévoyons alors le linéaire en service (cf. équation 9.6) et hors service (cf. équation 9.3) pour cette année là (i.e 2013 au SEDIF). Par exemple au SEDIF, ce calcul s'effectue pour les 162 cohortes différentes (y_0 allant de $1851 = \min(y_0)$ à $2012 = y_2$). Notons que la fonte grise n'est plus posée depuis le début des années 1970 au SEDIF. Donc les cohortes de cette strate entre le début des années 1970 et 2012 sont des ensembles vides.

$$LE_{y_0}(y_2 + 1) = LI_{y_0} \times S_{FG}(y_2 + 1 - y_0) \tag{9.6}$$

Puis en utilisant l'équation 9.2 nous obtenons le linéaire à poser l'année 2013. Ce linéaire sera en fonte ductile. Puis l'équation 9.3 nous donne $LH_{y_0}(y)$.

L'année prospective suivante $y_2 + k$ (avec $k = 2$), toutes les cohortes de la strate ω sont en fonte grise FG sauf celle de $y_2 + 1$ (i.e 2013 au SEDIF) qui est en fonte ductile FD, la prévision du linéaire ES et HS pour l'année prospective $y_2 + k$ (i.e 2014 au SEDIF) dans cette strate devient alors plus complexe.

1. Un tronçon géographique est un tronçon qui garde les même coordonnées (x,y,z) au cours du temps. Cette notion est expliqué en détail dans la section 10.3

1) Pour les cohortes en fonte grise dont les dates de pose sont les suivantes $y_0 \epsilon [y_{min}, y_2]$ alors on utilise les équations 9.7 puis 9.3.

$$LE_{y_0}(y_2 + k) = LI_{y_0} \times S_{FG}(y_2 + k - y_0) \tag{9.7}$$

2) Dans la strate ω, pour les cohortes en fonte ductile dont les dates de pose sont entre $[y_2 + 1; y_2 + k - 1]$ alors on utilise les équations 9.8 puis 9.3. NB : La seconde année prospective $k = 2$ donc il n'y a qu'une seule cohorte celle de $y_2 + 1$ (i.e 2013 au SEDIF).

$$LE_{y_0}(y_2 + k) = LI_{y_0} \times S_{FD}(y_2 + k - y_0) \tag{9.8}$$

Puis en utilisant l'équation 9.9 on obtient le linéaire à poser l'année $y_2 + k$ (i.e 2014 au SEDIF).

$$I1R_{\omega\ y_2+k} = LE_{y_2+k}(y_2 + k) = \sum_{y_0=\min(y_0)}^{y_2+k-1} [LE_{y_0}(y_2 + k - 1) - LE_{y_0}(y_2 + k)] \tag{9.9}$$

Ensuite les années prospectives suivantes ($k \geq 2$) nous réalisons la même démarche que précédemment de manière itérative.

La dernière étape consiste à supprimer le linéaire mis hors service depuis la première pose d'une canalisation jusqu'à 2012 (cf. étape transitoire calculatoire au début de cette section). Pour chaque cohorte dont les DDP sont les suivantes $y_0 \epsilon [y_{min}, 2012]$ il faut enlever LS (cf. équation 9.10) à LH . En effet, nous effectuons de la prospective, pas de la rétrospective.

$$LS_{y_0} = LI_{y_0} \times [1 - S_{FG}(2012 - y_0)] \tag{9.10}$$

Nous venons de présenter, comment obtenir le linéaire à renouveler $I1R$ sur un réseau stratifié ou non, avec ou sans changement de matériaux. Maintenant nous allons l'illustrer par des exemples d'applications.

9.3 Prévisions des taux de renouvellement futurs : $I2R$

L'indicateur $I2R(y_0)$ à savoir le taux de renouvellement prévisionnel l'année de pose y_0 se déduit sans peine à partir d'$I1R$ soit à l'échelle du réseau Ω (cf. équation 9.11) soit à l'échelle de la strate ω (cf. équation 9.12).

$$I2R_{\Omega}(y_0) = \frac{I1R_{y_0\Omega}}{L_{\Omega}(y_0)} \tag{9.11}$$

$$I2R_{\omega}(y_0) = \frac{I1R_{\omega y_0}}{L_{\omega}(y_0)} \tag{9.12}$$

Où $L_{\Omega}(y_0)$ et $L_{\omega}(y_0)$ sont respectivement les linéaires en service l'année y_0 soit à l'échelle du réseau Ω soit à l'échelle de la strate ω.

9.4 Prévision de l'évolution de l'âge moyen du réseau : $I3R$

L'indicateur $I3R$ est l'âge moyen du réseau l'année y. Il se déduit naturellement à partir des linéaires en service obtenus :

- dans la section 9.2.1 si on raisonne à l'échelle du réseau (cf. équation 9.13) ;
- ou dans les sections 9.2.2 et 9.2.3 si on se situe à l'échelle de la strate (cf. équation 9.14).

$$I3R_{\Omega}(y) = \frac{\sum_{y_0=min(y_0)}^{y} [LE_{y_0}(y) \times (y - y_0)]}{L_{\Omega}(y)} \tag{9.13}$$

$$I3R_{\omega}(y) = \frac{\sum_{y_0=min(y_0)}^{y} [LE_{\omega y_0}(y) \times (y - y_0)]}{L_{\omega}(y)} \tag{9.14}$$

9.5 Quelques résultats et discussions

Les graphiques des figures 9.3, 9.4 et 9.5 illustrent les résultats du calcul d'$I1R$ sur le réseau en ville d'eauservice Lausanne. Le linéaire en service fin 2013 de ce réseau était de 715 km. Le graphique 9.2 correspond aux données d'entrée du modèle, ceux numéro 9.3, 9.4 et numéro 9.5 correspondent aux sorties pour des simulations respectivement pour les années 2014, 2025 puis 2050. Ce scénario correspond au Statu quo. Nous pouvons constater que contrairement à la méthode dans [Cador, 2002a,b], les résultats ne sont pas une simple translation de l'histogramme initial. ☞ Pour en savoir plus : consulter la simulation "Lausanne № 4" de l'annexe J.

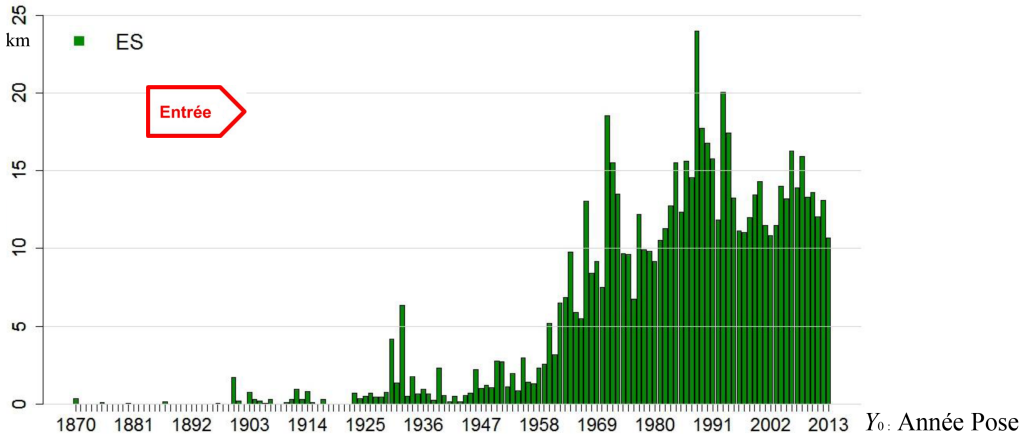


FIGURE 9.2: Photographie réelle fin 2013 de l'état du réseau en ville d'eauservice Lausanne. Linéaire (en km) en service (ES) (en vert) en fonction des années de pose y_0. Entrée du modèle créant l'indicateur graphique $I1R$ dans le scénario statu quo.

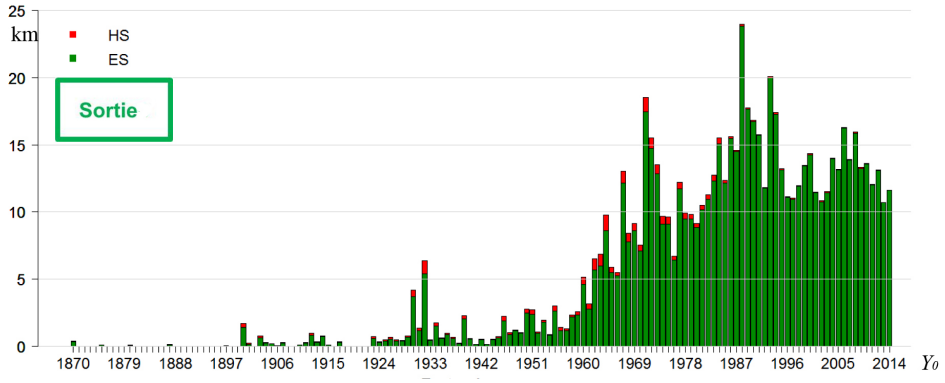


FIGURE 9.3: Photographie prévisionnelle fin 2014 de l'état du réseau en ville d'eauservice Lausanne. Linéaire (en km) en service (ES) (en vert) et mis hors service (HS) (en rouge) l'année 2014, ($k = 1$), en fonction des années de pose y_0. Exemple de sortie du modèle créant l'indicateur graphique $I1R$ dans le scénario statu quo.

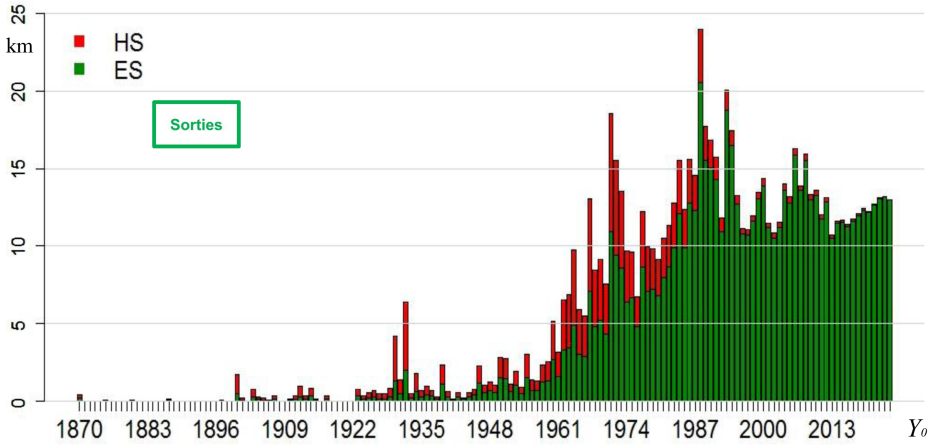


FIGURE 9.4: Photographie prévisionnelle fin 2025 de l'état du réseau en ville d'eauservice Lausanne. Linéaire (en km) en service (ES) (en vert) et mis hors service (HS) (en rouge) entre [2014 ; 2025], ($k = 12$), en fonction des dates de pose y_0. Exemple de sortie du modèle créant l'indicateur graphique $I1R$ dans le scénario statu quo.

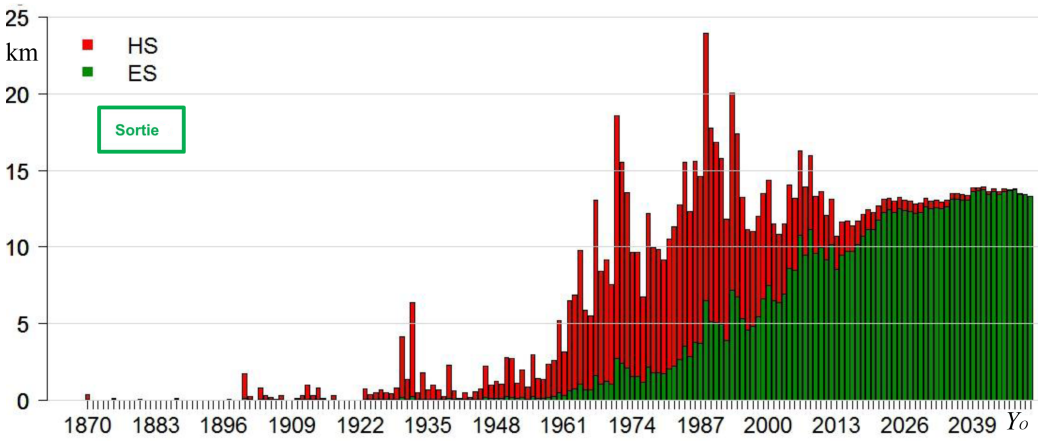


FIGURE 9.5: Photographie prévisionnelle fin 2050 de l'état du réseau en ville d'eauservice Lausanne. Linéaire (en km) en service (ES) (en vert) et mis hors service (HS) (en rouge) entre [2014 ; 2050], ($k = 37$), en fonction des dates de pose y_0. Exemple de sorties du modèle créant l'indicateur graphique $I1R$ dans le scénario statu quo.

9.6 Validation et évaluation critique du modèle

Pour calculer $I1R$, en fonctionnement normal, nous essayons que la fenêtre d'apprentissage du modèle soit la plus grande possible c'est à dire égale à la fenêtre d'observation réelle des données (cf. figure 9.6 en haut). C'est ce schéma que nous avons suivi dans la section précédente. En revanche, dans cette section, pour valider notre indicateur, nous avons raccourci la fenêtre d'apprentissage du modèle (cf. figure 9.6 en bas). Au lieu d'être de [2001 ; 2013], nous l'avons réduite de 6 ans : elle est ici de [2001 ; 2007] (cf. graphique du haut de la figure 9.7). En considérant l'état initial en 2007, nous avons ensuite effectué des prévisions avec le modèle jusqu'en 2013 (cf. graphique du milieu de la figure 9.7). Or, vu que nous savons ce qui s'est réellement passé entre [2008 ; 2013] (cf. graphique du bas de la figure 9.7), cela nous permet de comparer voire de valider partiellement nos résultats avec la réalité. La comparaison de la prévisions vis-à-vis des observations réelles s'effectue donc sur du moyen terme (6 ans). Avec les données fournies, il n'a pas été possible d'effectuer une validation sur du long terme.

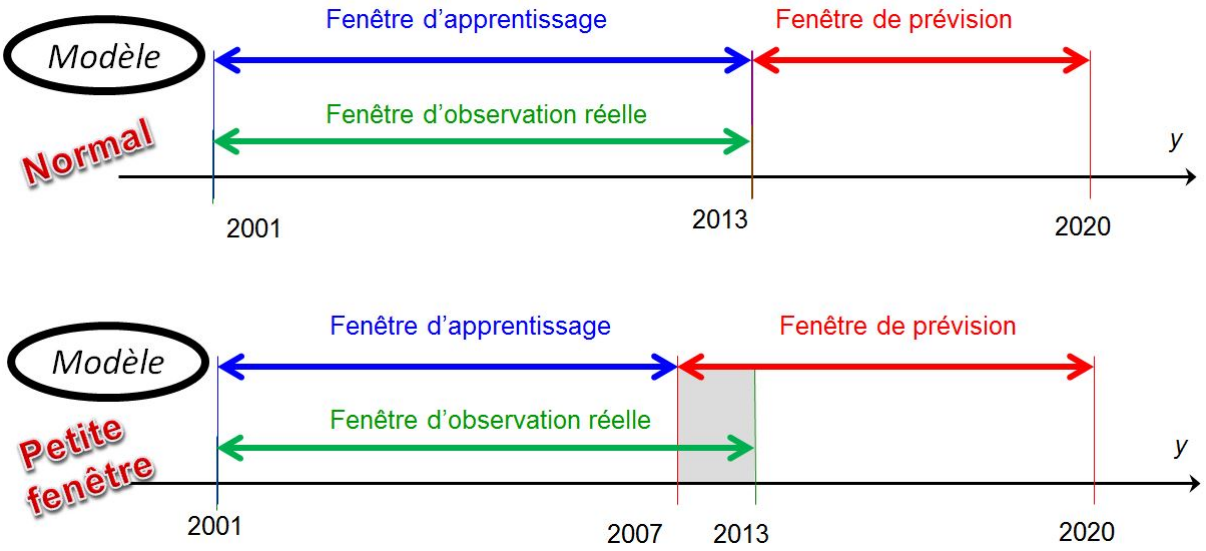


FIGURE 9.6: En haut : fonctionnement normal du modèle pour calculer $I1R$. En bas : Méthode pour valider l'indicateur $I1R$.

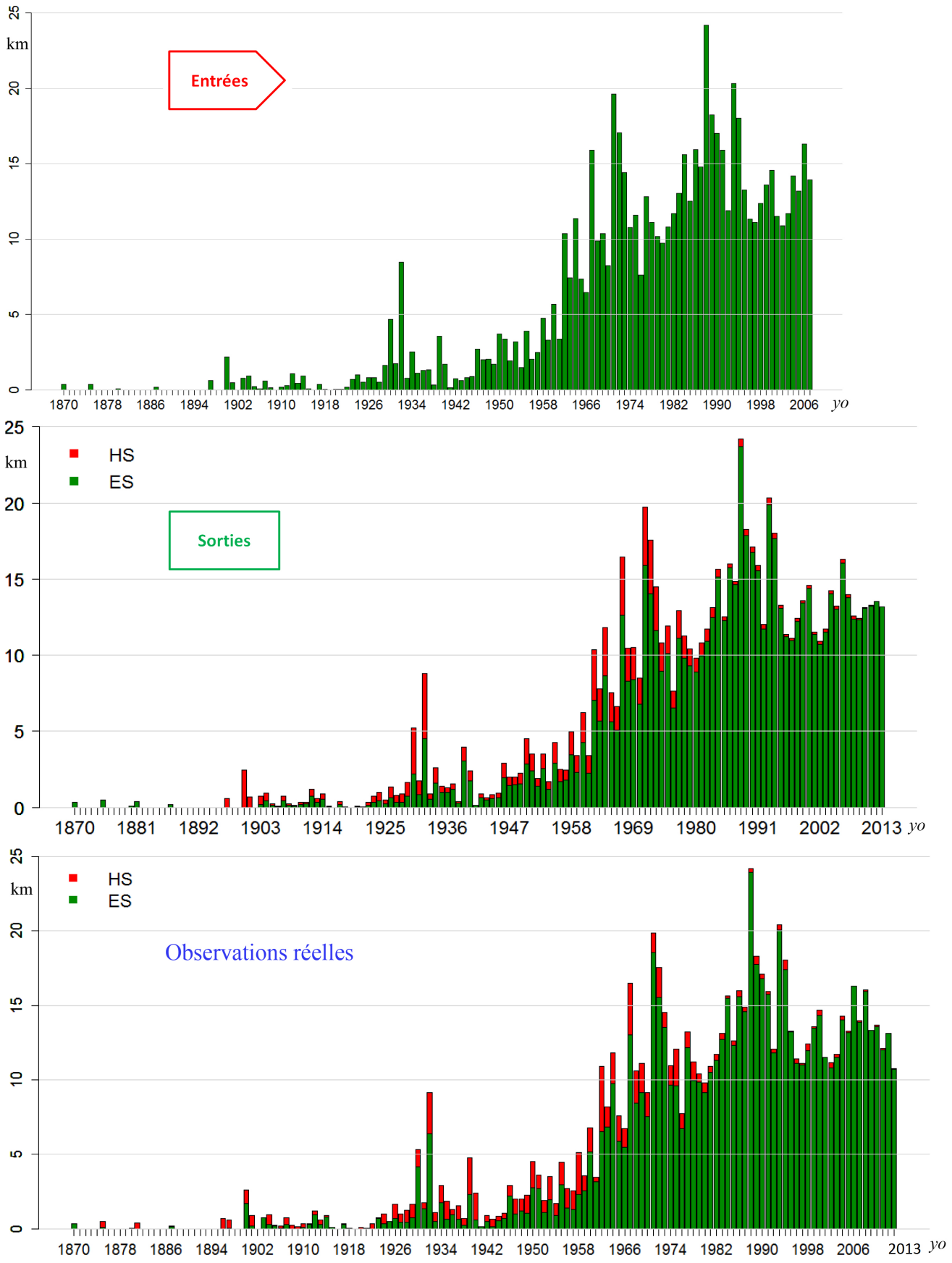


FIGURE 9.7: Linéaire (en km) en service (ES) (en vert) en fonction des dates de pose y_0 et mis hors service (HS) (en rouge) entre [2008 ; 2013], réseau en ville d'eauservice Lausanne. En haut : entrée du modèle, photographie du réseau fin 2007 ($= y_2$). Milieu : Sortie du modèle, photographie du réseau fin 2013 ($k = 6$), scénario statu quo. En bas : Observations réelles, photographie du réseau fin 2013.

	Prévision du modèle			Observation réelle			Ecart (%) = (L_{prev}-L_{obs})/L_{obs}		
y_0	*LE*	*LH*	*I1R*	*LE*	*LH*	*I1R*	*LE*	*LH*	*I1R*
2008	12.4	0.17	12.6	15.9	0.11	16.0	-22%	58%	-22%
2009	12.3	0.09	12.4	13.3	0.01	13.3	-7%	1094%	-7%
2010	13.1	0.05	13.1	13.6	0.07	13.7	-4%	-26%	-4%
2011	13.2	0.04	13.3	12.0	0.07	12.1	10%	-51%	9%
2012	13.5	0.02	13.5	13.1	0.01	13.1	3%	94%	3%
2013	13.2	0.00	13.2	10.7	0.05	10.7	23%	-93%	23%
total	77.7	0.37	78.1	78.7	0.32	79.0	-1%	15%	-1%

TABLEAU 9.2: Comparaison de la prévision du modèle avec les observations réelles (en km). Mesure des écarts relatifs (en %) de six cohortes différentes (années de pose y_0), pour le linéaire en service en 2013, $LE_{y_0}(2013)$, le linéaire mis hors service entre [2008 ; 2013], $LH_{y_0}(2013)$ et le linéaire posé cette année là, $I1R_{y_0} = LE_{y_0}(2013) + LH_{y_0}(2013)$.

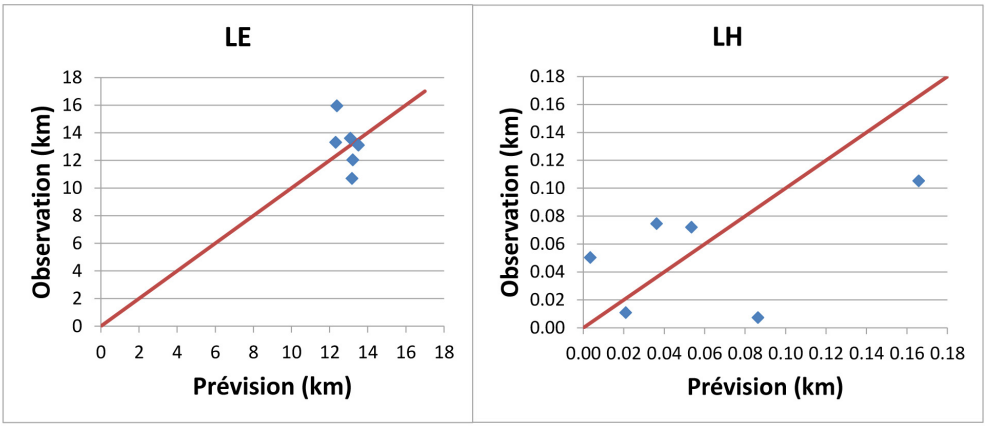


FIGURE 9.8: Comparaison de la prévision du modèle avec les observations réelles (en km). Visualisation des écarts absolus pour six cohortes différentes (années de pose y_0), sur le linéaire en service en 2013, $LE_{y_0}(2013)$ et le linéaire mis hors service entre [2008 ; 2013], $LH_{y_0}(2013)$.

Le tableau 9.2 et la figure 9.8 présentent les écarts entre la prévision du modèle et l'observation réelle pour 6 cohortes [2008 ; 2013]. Les écarts relatifs sont importants pour $LH_{y_0}(2013)$ les deux premières années de la prospective (ex : 1094 % en 2009). Ce résultat est cohérent dans la mesure où la survie les premières années dépend essentiellement de facteurs subits imprévisibles.
Nous constatons que le linéaire posé $I1R_{y_0}$ estimé est tantôt en dessous (-22%) tantôt au-dessus ($+23\%$) de ce qui s'est réellement passé. Les écarts relatifs années par années sont assez importants mais le résultat sur l'ensemble de la période est bon -1%. Les écarts en valeur absolue de $LE_{y_0}(2013)$ entre la prévision et les observations (cf. figure 9.8) paraissent raisonnables. En effet, les résultats sont proches de la bissectrice.

☞ Pour en savoir plus : consulter la simulation "Lausanne № 3" de l'annexe J.

9.7 Conclusion

Le modèle pour calculer le linéaire à renouveler $I1R$ nous paraît effectuer des prévisions assez réalistes avec les données d'eauservice Lausanne. Nous avons aussi réalisé cette validation avec les données du SEDIF et du Grand Lyon et nous avons rencontré des écarts supérieurs entre prévision et observation.
Une fois obtenu $I1R$, il est très rapide et quasiment direct d'obtenir le taux de renouvellement annuel $I2R$ et l'évolution de l'âge moyen du réseau $I3R$. Ces trois indicateurs ont été calculés systématiquement dans chaque scénario. Calculer $I1R$, $I2R$ et $I3R$ à partir d'une survie n'est pas innovant. Cette

fonctionnalité existe déjà dans les modèles NESSIE, Kanew et PiReM. En revanche, une innovation de ce chapitre réside dans le fait que nous arrivons à calculer ces indicateurs avec des survies qui sont basées sur leurs pratiques passées. Une autre innovation réside dans la présentation d'$I1R$, nous avons fait le choix de représenter graphiquement le linéaire en service et le linéaire hors service, afin d'essayer d'améliorer sa compréhension.
Enfin, une hypothèse de calcul de cet indicateur est que le linéaire du réseau en service est constant (aire verte). Néanmoins, en pratique, certains réseaux au cours du temps peuvent s'étendre. Par conséquent, une perspective d'amélioration de cet indicateur serait d'arriver à prendre en compte mathématiquement les extensions du réseau.

Après avoir expliqué comment nous estimons dans le modèle long terme OPTIMEAU les 3 indicateurs de réalisation $I1R$, $I2R$ et $I3R$, nous allons présenter comment est calculé l'indicateur de résultat (ou de performance) correspondant à la prévision de la dégradation des canalisations $I1P$ (nombre de défaillances).

Chapitre 10

La prédiction de la dégradation des canalisations pour chaque stratégie

Dans le chapitre précédent, nous nous sommes attaqués au premier verrou c'est à dire comment estimer le besoin en renouvellement d'une AOEP sur du long terme. Maintenant dans ce chapitre nous allons aborder le **deuxième verrou** c'est à dire l'estimation du **nombre potentiel de défaillances futures sur du long terme**.

10.1 Justification du choix du modèle

Un indicateur essentiel est le nombre de défaillances. Les modèles de la famille M1 (cf. chapitre 2) pour prédire le nombre de défaillances à venir sur les réseaux d'eau potable sont très nombreux mais ils peuvent être scindés en deux groupes : modèles déterministes et modèles probabilistes.

Le **premier groupe**, des modèles déterministes, donne en sortie, uniquement, la moyenne de la variable étudiée (le nombre de défaillances en général). Les modèles suivants appartiennent à cette catégorie : [Shamir and Howard, 1979; McMullen, 1982; Clark et al., 1982; Walski and Pelliccia, 1982; Kettler and Goulter, 1985; Jacobs and Kerney, 1994; Agbenowosi, 2000]. Le modèle déterministe le plus simple semble être celui de [Kettler and Goulter, 1985], c'est une fonction linéaire de l'âge des tronçons. Le modèle déterministe le plus complexe semble être celui de [Clark et al., 1982] utilisant une fonction exponentielle dépendant de plusieurs paramètres dont le matériau, la corrosivité du sol et la pression de l'eau (cf. tableau 10.1).

	Age	Matériau	Diamètre	Longueur	Défaillances passées	Type de sol	Pression eau
[Kettler and Goulter, 1985]	X	+					
[Jacobs and Kerney, 1994]	X			X			
[McMullen, 1982]	X					X	
[Shamir and Howard, 1979]	X				X		
[Walski and Pelliccia, 1982]	X	X			X		
[Clark et al., 1982]	X	X	X	X		X	X

Tableau 10.1: Variables prises en compte dans quelques modèles déterministes de prévision des défaillances (X = oui, case vide = non, + = oui si stratification)

Cependant, pour modéliser les défaillances dans les réseaux d'eau, les modèles stochastiques ou statistico-probabilistes semblent être plus appropriés, car ils tiennent compte de l'aspect aléatoire des défaillances. Par conséquent, nous avons décidé d'utiliser un modèle probabiliste plutôt qu'un modèle déterministe pour le calcul d'$I1P$.
Le **second groupe**, concernant les modèles statistico-probabilistes, donne en sortie, en général, la densité de probabilité de la variable étudiée (nombre de défaillances ou intervalle de temps entre les défaillances) donc notamment sa moyenne, mais aussi son écart-type, son intervalle de confiance. Les modèles suivant appartiennent à cette famille : [Jeffrey, 1985; Eisenbeis, 1994; Lei, 1997; Malandain, 1999; Gustafson and Clancy, 1999; Røstum, 2000; Pelletier, 2000; Mailhot et al., 2000; Dridi, 2005; Asnaashari, 2007; Le Gat, 2009; Babykina, 2010; Scholten, 2013; Claudio, 2014; Kabir et al., 2015; Drouillard et al., 2015]. Les données d'entrée de ces modèles sont : les caractéristiques des tronçons (telles que : en service ou non, date de pose, diamètre), les données sur les défaillances passées (comme les dates de défaillances) et les données environnementales (trafic routier, climat, corrosivité du sol, pression de l'eau, etc.). Ces modèles testent ensuite quelles sont les variables statistiquement significatives expliquant les défaillances passées et ils en déduisent une équation pour l'avenir.

D'après les analyses comparatives de ces différents modèles réalisées par [Eisenbeis et al., 2002a,b] ; [Horaud, 2002, p. 48] ; [Eisenbeis et al., 2003, p. 30-38] ; [Eisenbeis et al., 2004, p. 33] ; [Le Gat, 2009, p. 90-94] et [Martins, 2011, p. 53], le modèle WALM (Weibull Accelerated Lifetime Model) [Eisenbeis, 1994; Le Gat and Eisenbeis, 2000] produit une bonne hiérarchisation des tronçons par taux probable de défaillances par rapport à la réalité. Les modèles de Poisson [Malandain, 1999] et NHPP (Non Homogeneous Poisson Process) [Røstum, 2000] ont une bonne prévision des taux de défaillances par rapport à la réalité. Le modèle de LEYP (Linear Extented Yule Process) [Le Gat, 2009] est un modèle faisant la synthèse des ces deux avantages (cf. table 10.2). Par conséquent, nous avons décidé d'utiliser principalement le modèle de LEYP pour le calcul d'$I1P$. Cependant, le modèle de LEYP a été conçu pour réaliser des prédictions à court-terme ou moyen terme à l'échelle du tronçon.

En effet, le modèle originel du LEYP n'est pas capable de prendre en compte le renouvellement des tronçons. Les prévisions du LEYP originel s'effectuent uniquement sur les tronçons en service à la fin de la fenêtre d'observation (y_2). Par conséquent, nous avons choisi de le coupler à un autre modèle (chaîne de Markov) pour effectuer des prévisions à long terme.

Modèles	Prévision du taux de casses	Hiérarchisation des tronçons par taux probable de défaillances
WALM [Eisenbeis, 1994]	-	+
Poisson [Malandain, 1999]	+	-
NHPP [Røstum, 2000]	+	-
LEYP [Le Gat, 2009]	+	+

Tableau 10.2: Avantages et inconvénients de différents modèles Statistico-Probabilistes de prédiction des défaillances (tâche effectuée [+] correctement ou [−] pas correctement)

10.2 Présentation du modèle LEYP : Processus de Yule Linéairement Etendu

Le modèle LEYP a été développé par le CEMAGREF-IRSTEA de Bordeaux à partir de [Le Gat, 2009, 2014]. Ce modèle tire ses origines des modèles de comptage des évènements récurrents (voir [Babykina, 2010], chapitre 2). Le modèle LEYP est actuellement utilisé par de nombreux logiciels (tels que "Casses", "PREVOIR", "AWARE-P") pour la prédiction des défaillances sur les canalisations des réseaux d'eau potable.

Dans le cadre du LEYP, pour chaque tronçon i, $N_i(t)$ est défini comme le processus de comptage du nombre d'occurrences de défaillances, c'est à dire du nombre de défaillances cumulées du tronçon observées à l'âge t et $\mathrm{d}N_i(t)$ est la différentielle de $N_i(t)$ qui prend la valeur 0 (si pas de défaillance) ou 1 (si une défaillance) à l'âge t (cf. figure 10.1). Le LEYP prend en compte le fait que la dégradation

de l'ouvrage s'intensifie avec le nombre de défaillances passées. $N_i(t)$ suit une loi binomiale négative. Dans ce contexte, l'espérance conditionnelle du nombre de défaillances par unité de temps à l'âge t pour le tronçon i, c'est à dire l'intensité du processus, est donné par :

$$\lambda_{i,\boldsymbol{\theta}}(t) = (1+\alpha j)\delta t^{\delta-1}\mathrm{e}^{\boldsymbol{Z}_i'\boldsymbol{\beta}} = \frac{\mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}}[\mathrm{d}N_i(t) \mid N_i(t-) = j]}{\mathrm{d}t} \tag{10.1}$$

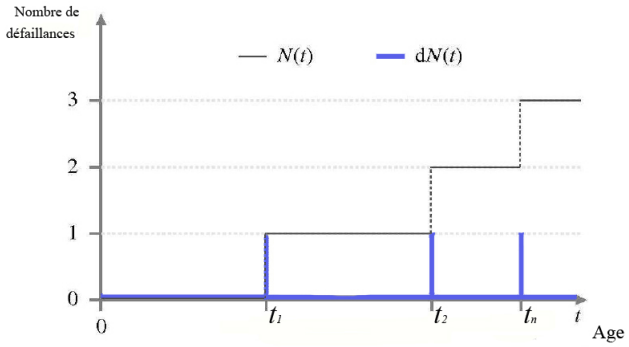


FIGURE 10.1: Processus de comptage $N(t)$ du LEYP

où $N_i(t-) = j$ est le nombre de défaillances cumulées survenues juste avant t, $\boldsymbol{Z_i}$ est le vecteur de covariables [1] du tronçon i et $\boldsymbol{\theta} = [\alpha\ \delta\ \boldsymbol{\beta}']'$ est le vecteur des paramètres associés au modèle.

Cette intensité se décompose en trois facteurs :
– un facteur de Yule $(1+\alpha j)$ [Yule, 1922] qui permet de prendre en compte l'effet des défaillances passées,
– un facteur de Weibull $(\delta t^{\delta-1})$ [Weibull, 1951] qui permet de prendre en compte l'effet de l'âge des canalisations (si $\delta = 1$ pas de vieillissement),
– un facteur de Cox $(e^{\boldsymbol{Z}'\boldsymbol{\beta}})$ [Cox, 1972] qui permet de prendre en compte l'effet des variables explicatives autres que l'âge (t) et le nombre de défaillances passées (j).

Encadré 9 - Exemple d'équation LEYP utilisée au SEDIF

Lorsque le modèle LEYP est utilisé par [Poulton and Saignol, 2013] sur la fenêtre d'apprentissage [1996-2012] pour les tronçons en acier du réseau de distribution du SEDIF, l'intensité du processus de comptage des défaillances du tronçon i pour l'année 2013 a été écrite de la manière suivante :

$$\lambda_{i,\theta}(t) = (1+2,9\ j) \times 1,36\ t^{0,36} \times \exp(-2,32\ \ +1,1\ \log(L) - 0,004\ \phi + 0,004\ Pz - 0,32\ E)$$

Les vecteurs des paramètres du modèles $\boldsymbol{\theta}$ et des covariables $\boldsymbol{Z}$ sont alors les suivants $\boldsymbol{\theta} = [2,9\ \ 1,36\ \ -2,32\ \ 1,1\ \ -0,004\ \ 0,004\ \ -0,32]$ et $\boldsymbol{Z} = [1\ \log(L)\ \phi\ Pz\ E]$.

Les covariables du tronçon i sont :

- t son âge en 2013 (en siècle)
- j son nombre de défaillances cumulées entre 0 et t moins 1 an
- $\log(L)$ le logarithme en base 10 de sa longueur (en mètres)
- ϕ son diamètre (en millimètres)
- Pz son niveau piézométrique (en mètres), *i.e* le niveau du trop-plein du réservoir auquel est relié le tronçon i selon le NGF (nivellement général de la France)
- E son niveau d'enfouissement (en mètres), *i.e* la différence entre l'altitude du sol et l'altitude du tronçon

1. Attention la première valeur de ce vecteur est 1, les autres sont des covariables

De plus, l'espérance marginale du nombre de défaillances par unité de temps à l'âge t pour le tronçon i est donné par :

$$\frac{\mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}}[\mathrm{d}N_i(t)]}{\mathrm{d}t} = \delta t^{\delta-1}\exp(\boldsymbol{Z'\beta} + \alpha t^{\delta}\mathrm{e}^{\boldsymbol{Z'\beta}}) \tag{10.2}$$

L'espérance conditionnelle non instantanée du nombre de défaillances au cours d'une année civile complète noté $\mathbb{EC}_{\boldsymbol{\theta},i}(t)$ correspond à :

$$\mathbb{EC}_{\boldsymbol{\theta},i}(t) = \mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}}[N_i(t+0.01) - N_i(t) \mid (N_i(t_2) - N_i(t_1)) = m] = \left(\frac{1}{\alpha} + m\right)\frac{\mu(t+0.01) - \mu(t)}{\mu(t_2) - \mu(t_1) + 1} \tag{10.3}$$

Où m est le nombre de défaillances entre t_1 et t_2, t est l'âge du tronçon l'année $y_2 + k$ (en siècle) et $\mu(t) = \exp\left(\alpha t^{\delta}\mathrm{e}^{\boldsymbol{Z'\beta}}\right)$.

Et enfin l'espérance marginale non instantanée est donnée par :

$$\mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}}[N_i(t+0.01) - N_i(t)] = \frac{1}{\alpha} \times \frac{\mu(t+0.01) - \mu(t)}{\mu(t+0.01) - \mu(t) + 1} \tag{10.4}$$

Tout comme pour la méthode WeiCo présentée dans le chapitre 7, les paramètres du modèle LEYP sont déterminés en maximisant la vraisemblance avec la méthode de Nelder-Mead. Des tests du rapport de vraisemblance sont effectués afin de vérifier si les paramètres sont significatifs. Enfin, les risques* relatifs peuvent être calculés. L'ensemble de la démarche est bien détaillé dans [Le Gat, 2009]. La différence majeure entre les modèles WeiCo et LEYP est la variable d'intérêt : âge à la mise hors service dans WeiCo, nombre de défaillances dans le LEYP. Donc le risque* relatif (RR) du LEYP sera celui d'avoir plus de défaillances qu'un autre tronçon (et non le RR d'être mis hors service plus tôt comme dans WeiCo).

10.3 Le tronçon géographique : une réponse au problème posé par l'utilisation du LEYP sur du long terme

Le modèle de LEYP est un modèle de régression statistique qui permet d'estimer, de manière empirique, les défaillances futures en fonction de plusieurs covariables du tronçon physique, notamment : son âge t, le nombre de défaillances passées m, le matériau, le diamètre, la pression de l'eau, le niveau du trafic routier, etc. Le modèle de LEYP s'applique sur les tronçons physiques réels, c'est à dire des tronçons dont toutes les covariables sont connues : t, m et $\boldsymbol{Z'} = [1\ Z_1\ Z_2\ ...\ Z_k]$ à la fin de la fenêtre d'observation. Cependant, dans les scénarios de long terme certains tronçons sont renouvelés et de nouveaux tronçons physiques vont apparaître ayant leurs propres covariables. Par conséquent, il est nécessaire d'effectuer des hypothèses sur les covariables de ces nouveaux tronçons.

Pour cela, nous avons introduit la notion de "tronçon géographique", en faisant l'hypothèse que le tronçon renouvelé garde les mêmes covariables (tels que coordonnées géographiques, longueur, diamètre[2], sol corrosif, etc.) que le tronçon précédent au même endroit sauf pour trois variables : l'âge t, le nombre de défaillances passées m (le nouveau tronçon n'hérite pas de la mémoire des événements passés), et le matériau (le nouveau tronçon peut être constitué ou non du même matériau que le tronçon remplacé) (cf. figure 10.2).

2. Notons, que dans ce manuscrit nous avons considéré le diamètre comme fixe au cours du temps. Cependant, en pratique, il peut y avoir des variations de diamètre à la marge.

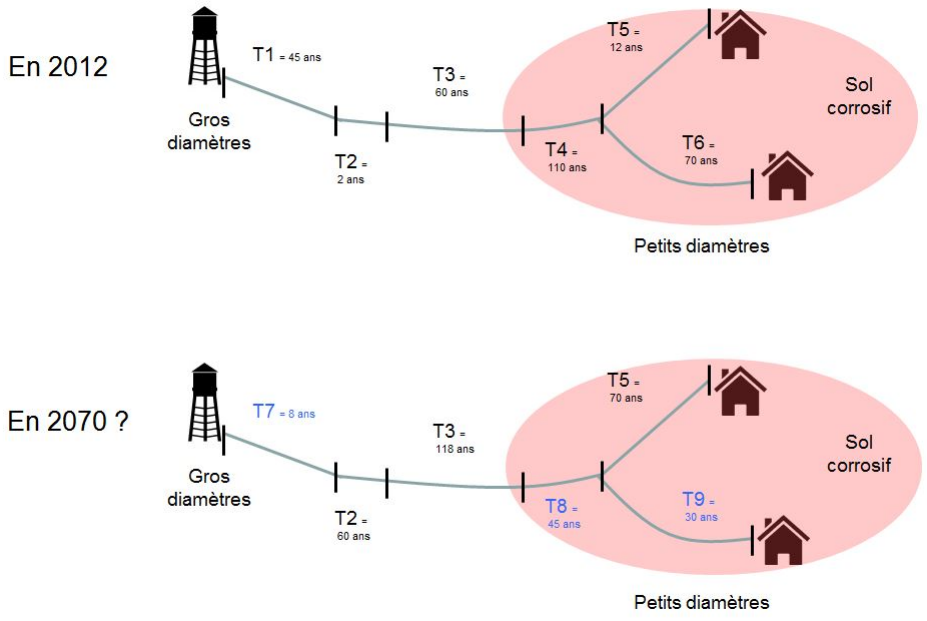


FIGURE 10.2: Schéma d'un tronçon géographique. A chaque renouvellement seuls son âge, son matériau et son nombre de défaillances peuvent varier.

Dans un premier temps, nous présenterons la méthode employée pour estimer le nombre de défaillances sur du long terme, lorsque seuls l'âge et le nombre de défaillances du tronçon géographique varient. Puis nous présenterons la démarche plus complexe lorsque le matériau du tronçon géographique varie aussi.

10.4 $I1P$ sans changement de matériau

Le but de la démarche suivante est de prendre en compte à la fois le vieillissement des canalisations et leurs renouvellements dans l'estimation du nombre de défaillances. Nous cherchons notamment à exprimer, pour chaque tronçon, les probabilités d'être en service ou d'être remplacé.

Vue d'ensemble

L'estimation du nombre futur de défaillances sur du long terme $I1P$ à l'échelle du territoire du service d'eau s'effectue en trois étapes. **Première étape**, à l'échelle du tronçon géographique, la distribution des probabilités des "âges à venir" est estimée. **Deuxième étape**, des équations du processus de détérioration des tronçons physiques en fonction de leur âge et d'autres variables explicatives sont calées. **Troisième étape**, les âges probables des tronçons géographiques sont couplés aux équations physiques du processus de détérioration. Notons que le pas de temps des calculs est l'année.

❶ Estimation des "âges à venir" des tronçons géographiques

La première étape est composée de deux phases. La première phase consiste en la transformation de la fonction de survie prospective en matrice de transition de Markov [Markov, 1910] notée $\boldsymbol{M}$ (cf. figure 10.4). Elle contient dans chaque cellule la probabilité de passer d'un âge t (ligne) entre $[1; t_{max}]$ à un autre âge (colonne) entre $[1; t_{max}]$, avec t_{max} l'âge maximal que peut avoir un tronçon. Par exemple dans les équations 10.5 et 10.7, $t_{max} = 150$ ans comme à Lausanne. La matrice $\boldsymbol{M}$ concerne l'évolution de l'âge des conduites (cf. figures 10.3 et 10.4) et non pas l'état physique, comme on le voit plus traditionnellement. L'année est un pas classiquement utilisé par les autorités organisatrices pour calculer leurs indicateurs dans les rapports annuels. Nous avons donc choisi dans la matrice $\boldsymbol{M}$ de discrétiser l'âge de chaque tronçon i par pas de temps annuel. Lorsqu'un tronçon a un âge t (en

année) sa probabilité de transition de vieillir d'une année vaut $\frac{S(t)}{S(t-1)}$ et sa probabilité d'être renouvelé l'année suivante vaut $1 - \frac{S(t)}{S(t-1)}$.

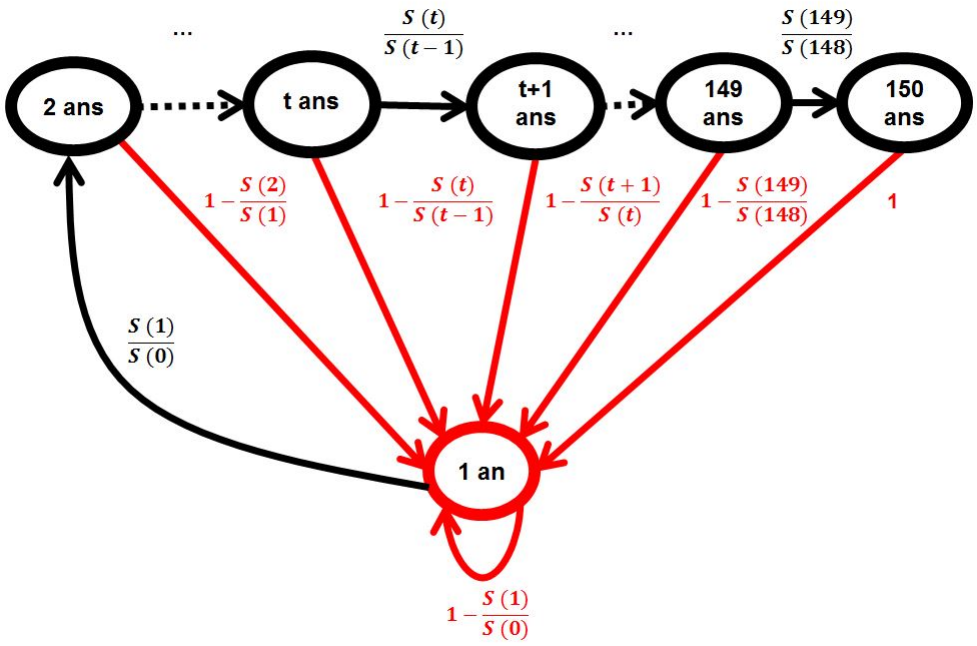


FIGURE 10.3: Schéma des éléments de la chaîne de Markov sans changement de matériau, à 150 âges de 1 à 150 ans. Les flèches indiquent les probabilités de transition d'un âge à un autre (Noir : vieillissement, Rouge : renouvellement).

$$
\begin{array}{c}
\\ 1 \\ 2 \\ \dots \\ t \\ \dots \\ 148 \\ 149 \\ 150
\end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccccc} 1 & 2 & 3 & \dots & t+1 & \dots & 149 & 150 \end{array} \\
\begin{bmatrix}
1 - \frac{S(1)}{S(0)} & \frac{S(1)}{S(0)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
1 - \frac{S(2)}{S(1)} & 0 & \frac{S(2)}{S(1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
1 - \frac{S(t)}{S(t-1)} & 0 & 0 & 0 & \frac{S(t)}{S(t-1)} & 0 & 0 & 0 \\
\dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\
1 - \frac{S(148)}{S(147)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{S(148)}{S(147)} & 0 \\
1 - \frac{S(149)}{S(148)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{S(149)}{S(148)} \\
1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}
\end{array}
$$

FIGURE 10.4: Matrice $\boldsymbol{M}$ carrée (150 x 150) sans changement de matériaux $t_{max} = 150$

La seconde phase consiste à prendre en compte les renouvellements successifs. Pour cela nous cherchons à obtenir pour chaque tronçon géographique i un vecteur contenant les probabilités d'avoir un âge (entre 1 et t_{max}) l'année y noté $\boldsymbol{A'}_i(y)$. y varie de y_2 (année de fin de la fenêtre d'observation) jusqu'à l'année de fin de la simulation prospective notée y_2+k ($k \in \mathbb{N}$). $\boldsymbol{A'}_i(y_2)$ est définie selon l'équation 10.5, puis en utilisant la théorie de la chaîne de Markov [Markov, 1910] $\boldsymbol{A'}_i(y_2+k)$ est obtenue grâce à l'équation 10.6.

$$
\boldsymbol{A'}_i(y_2) = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} 1 & 2 & \dots & y_2 - y_0 & \dots & 149 & 150 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \tag{10.5}
$$

$$\boldsymbol{A}'_i(y_2 + k) = \boldsymbol{A}'_i(y_2) \times \boldsymbol{M}^k \tag{10.6}$$

❷ Calage d'équations du processus de détérioration des tronçons physiques

La deuxième étape consiste à déterminer une équation de prédiction de la détérioration des tronçons physiques au cours du temps. Lors de cette phase il a été décidé d'utiliser le modèle statistico-probabiliste l'équation 10.3 du modèle de LEYP (cf. section 10.2). Issues du modèle de LEYP, les prévisions pour chaque tronçon physique i de l'espérance du nombre de défaillances annuel à l'âge t sont stockées dans le vecteur $\boldsymbol{D}_i$ (cf. équation 10.7).

$$\boldsymbol{D}_i = [\mathbb{E}\mathbb{C}_{\boldsymbol{\theta},i}(t)]_{1 \leq t \leq 150} \tag{10.7}$$

❸ Croisement des âges probables et du processus de dégradation

La troisième étape consiste à croiser les âges probables des tronçons avec les résultats de la prévision du processus de détérioration afin d'obtenir l'espérance du nombre de défaillances pour chaque tronçon géographique i l'année y noté $I1P_i(y)$ (cf. équation 10.8). Enfin, pour obtenir le nombre de défaillances sur le réseau, noté $I1P(y)$ il suffit de sommer les $I1P_i(y)$ des tronçons (cf. équation 10.8).

$$I1P(y_2 + k) = \sum_i I1P_i(y_2 + k) = \sum_i [\boldsymbol{A}'_i(y_2 + k) \times \boldsymbol{D}_i] \tag{10.8}$$

10.5 $I1P$ avec changement de matériaux

Le modèle suivant prend en compte le fait qu'un tronçon physique constitué d'un matériau donné, au niveau d'un tronçon géographique, puisse être renouvelé par un autre tronçon physique d'un autre matériau. En pratique, cette situation est très fréquente. Par exemple, la fonte grise n'est actuellement plus posée, elle est souvent renouvelée par de la fonte ductile ou du PEHD. Prenons le cas où un tronçon en fonte grise (FG) est systématiquement renouvelé par un tronçon en fonte ductile (FD) et où $t_{max} = 150$ ans, alors nous obtenons la chaîne de Markov de la figure 10.5. Les probabilités pour passer d'un état à l'autre sont calculées avec la fonction de survie de la fonte grise (S_{FG}) et celle de la fonte ductile (S_{FD}).

La démarche est alors sensiblement la même que celle présentée dans la section 10.4, seuls $\boldsymbol{M}$, $\boldsymbol{A}'_i(y)$ et $\boldsymbol{D}_i$ s'écrivent différemment. Par exemple, à Lausanne lorsque nous fixons un âge maximal de 150 ans, $\boldsymbol{M}$ est une matrice carrée 300 (2×150) par 300 (cf. figure 10.6). $\boldsymbol{A}'_i(y)$ (cf. équation 10.9) et $\boldsymbol{D}_i$ (cf. équation 10.10) sont des vecteurs à 300 éléments.

$$\begin{array}{lcccccccccc} & & \text{Fonte grise} & & & & & \text{Fonte ductile} & & & \\ t & 1 & \dots & y_2 - y_0 & \dots & 150 & 1 & \dots & 149 & 150 \\ \mathbf{A}'_i(y_2) = & [\,0 & \dots & 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0\,] \end{array}$$

10.9: Vecteur $\boldsymbol{A}'_i(y_2)$ avec changement de matériau

$$D_i = [\overbrace{\mathbb{E}\mathbb{C}_{\boldsymbol{\theta},i}(t)}^{\text{Fonte grise}}, \overbrace{\mathbb{E}\mathbb{C}_{\boldsymbol{\theta},i}(t)}^{\text{Fonte ductile}}]_{1 \leq t \leq 150}$$

10.10: Vecteur $\boldsymbol{D}_i$ avec changement de matériau

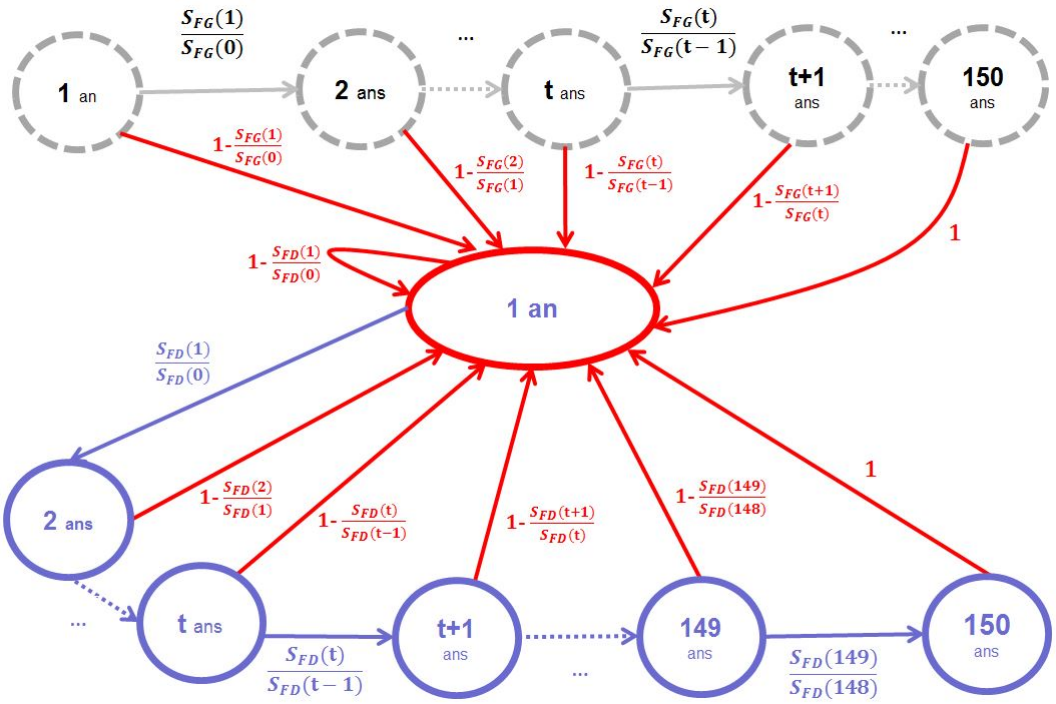


FIGURE 10.5: Schéma des éléments de la chaîne de Markov avec changement de matériau, à 300 états. Les flèches indiquent les probabilités de transition d'un état à un autre (Gris : vieillissement en fonte grise (FG), Violet : vieillissement en fonte ductile (FD), Rouge : renouvellement).

$$
\begin{array}{c}
 \\ \text{Fonte grise} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \text{Fonte ductile} \\ \\ \\ \\ \\ \\
\end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccc|cccccc}
\multicolumn{6}{c|}{\text{Fonte grise}} & \multicolumn{6}{c}{\text{Fonte ductile}} \\
1 & 2 & \dots & t+1 & \dots & 150 & 1 & 2 & \dots & t+1 & \dots & 150
\end{array} \\
\begin{array}{c|cccccc|cccccc}
1 & 0 & \frac{S_{FG}(1)}{S_{FG}(0)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\frac{S_{FG}(1)}{S_{FG}(0)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
t & 0 & 0 & 0 & \frac{S_{FG}(t)}{S_{FG}(t-1)} & 0 & 0 & 1-\frac{S_{FG}(t)}{S_{FG}(t-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
150 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\hline
1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\frac{S_{FD}(1)}{S_{FD}(0)} & \frac{S_{FD}(1)}{S_{FD}(0)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\frac{S_{FD}(t)}{S_{FD}(t-1)} & 0 & 0 & \frac{S_{FD}(t)}{S_{FD}(t-1)} & 0 & 0 \\
\dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
149 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\frac{S_{FD}(149)}{S_{FD}(148)} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{S_{FD}(149)}{S_{FD}(148)} \\
150 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{array}
\end{array}
$$

FIGURE 10.6: Matrice $\boldsymbol{M}$ carrée (300 x 300) avec changement de matériau et $t_{max} = 150$ ans

Cette démarche est transposable pour n'importe quel changement de matériau. Une matrice doit être construite pour chaque paire de matériaux.

10.6 $I1P$ avec plusieurs strates

Le calcul précédent s'effectue à l'échelle d'un groupe de tronçons correspondant soit à tout le réseau soit à une strate. Si le calcul précédent a été effectué pour chaque strate ω, alors le nombre total de défaillances est celui décrit dans l'équation 10.11.

$$I1P(y_2 + k) = \sum_{\omega} I1P_{\omega}(y_2 + k) \tag{10.11}$$

10.7 Quelques résultats et discussions

Nous allons présenter les résultats de calcul d'$I1P$ issus de trois scénarios appliqués sur le réseau en ville d'eauservice Lausanne (715 km de canalisations en service) :

1. le scénario statu quo sur l'ensemble de ce réseau non stratifié ;
2. le scénario statu quo où ce réseau est stratifié selon le type de matériau et où les tronçons en fonte grise sont renouvelés par des tronçons en fonte ductile ;
3. et le scénario où Lausanne renouvelle plus fréquemment les conduites autour des usagers et des biens vulnérables que par le passé.

10.7.1 Lausanne scénario statu quo non stratifié

❶ Estimation des "âges à venir" des tronçons géographiques

Pour la première étape nous avons besoin en entrée du modèle d'une courbe de survie prospective pour chaque matériau. Ici, nous avons choisi le scénario statu quo, donc la courbe de survie prospective est égale à la courbe de survie passée sur [2001 ; 2013] calculée par la méthode Kaplan-Meier (corrigée des points manquants par une régression locale). La figure 8.5 présente la courbe prospective employée.

Cette fonction de survie est ensuite transformée en matrice de transition de Markov avec $t_{max} =$ 150 ans. Il est ainsi possible d'obtenir les "âges à venir" probables des tronçons géographiques.

❷ Calage d'une équation du processus de détérioration des tronçons physiques

Pour la seconde étape nous avons besoin d'une équation prévoyant le nombre de défaillances à venir en fonction de l'âge de chaque tronçon.
Pour obtenir cette équation de prédiction de la dégradation, nous avons besoin en entrée du modèle LEYP de deux types de données. D'une part il faut les défaillances passées survenues entre [2001 ; 2013] sur les tronçons et d'autre part toutes les variables pouvant expliquer l'apparition des défaillances ou interagir avec. Nous avons utilisé le logiciel "Casses" pour trouver l'équation qui nous semblait la plus pertinente possible. Le tableau 10.4 résume les résultats obtenus avec le modèle de LEYP. Toutes les p-values de ces paramètres sont inférieures à 5% donc ils sont significatifs.

Covariables	$\boldsymbol{\theta}$	$\widehat{\boldsymbol{\theta}}$	$\exp(\widehat{\beta})$	Ecart-type	p-value
Défaillances passées	α	2,9	sans objet	0,42	$< 1 \times 10^{-5}$
Age (en siècle)	δ	1,57	sans objet	sans objet	$< 1 \times 10^{-5}$
Intercept	β_0	-1,55	sans objet	sans objet	$< 1 \times 10^{-5}$
ln(Longueur) (m)	β_1	0,39	1,47	80 m	$< 1 \times 10^{-5}$
Diamètre (mm)	β_2	-0,0028	0,97	125 mm	$< 1 \times 10^{-5}$
Rénové et rajeuni non	Réf.	0	1	sans objet	Réf.
Rénové et rajeuni oui	β_3	0,93	2,53	sans objet	$< 1 \times 10^{-5}$
Pression eau (en bar)	β_4	0,04	1,04	2,8 bar	$< 1 \times 10^{-5}$
Fonte ductile et acier	Réf.	0	1	sans objet	Réf.
Fonte grise	β_5	-0,25	0,78	sans objet	$< 1 \times 10^{-5}$
Autres matériaux	β_6	-0,75	0,47	sans objet	$< 1 \times 10^{-5}$

Tableau 10.3: Estimation des paramètres du modèle LEYP à Lausanne, réseau en ville, grande fenêtre d'apprentissage [2001,2013]

☞ Pour en savoir plus : consulter la simulation "Lausanne № 4" de l'annexe J.

Sur la fenêtre d'observation passée [2001, 2013], à âge égaux, les paramètres du modèle de LEYP peuvent être analysés de la façon suivante.

Le nombre de défaillances m entre t_1 et t_2 pour chaque tronçon en service fin 2013 varie entre 0 et 7 défaillances. En moyenne, ils ont eu 0,09 défaillance entre $[t_1; t_2]$ avec un écart-type de 0,42. Plus α est grand plus l'impact du nombre de défaillances passées est élevé sur le nombre de défaillances à venir. Ici $\alpha = 2,9$ donc l'impact est important.

Le paramètre de forme δ de la distribution du nombre de défaillances cumulées en fonction de l'âge des canalisations est modéré (< 2) ce qui correspond à une courbe asymétrique à droite (cf. figure 7.1).

La longueur des tronçons étudiés varie de 5 m à 500 m, la moyenne est de 83 m et l'écart-type est de 80 m. Une canalisation qui serait deux fois plus longue qu'une autre a 1,3 ($= \mathrm{e}^{0.39\times\ln(2)} = 2^{0.39}$) fois plus de risque* de subir des défaillances. Ce résultat est tout à fait normal, plus un tronçon est grand, plus le nombre de défaillances par tronçon à tendance à augmenter. C'est pour cela que les gestionnaires utilisent très souvent le taux de défaillances comme indicateur [Large and Tomasian, 2014c]. En effet, cet indicateur divise le nombre de défaillances par la longueur du tronçon, ce qui permet de mieux comparer les tronçons entre eux.

Pour les tronçons étudiés la pression interne exercée par l'eau varie de 0,02 bar à 20 bars. La moyenne est de 8,8 bars et l'écart-type de 2,8. En général les services d'eau essayent de fixer une pression de l'eau avant compteur des usagers de 3 bars. Il est à noter qu'en-dessous de 0,3 bar on conseille aux usagers de s'équiper d'un surpresseur. Au-dessus de 3,5 bars on conseille aux usagers de s'équiper de réducteur de pression. Une canalisation qui aurait une pression de 2,8 bars de plus qu'une autre a un risque* d'avoir plus de défaillances 1,1 ($= 1,04^{2,8}$) fois plus élevé. Ce résultat est cohérent, en effet plus la pression est élevée, plus les contraintes exercées par l'eau sont fortes et plus les canalisations se dégradent rapidement.

Le diamètre des tronçons étudiés varie de 32 à 1 000 mm, la médiane est de 150 mm et l'écart-type est de 125 mm. Une canalisation qui mesure 125 mm de moins qu'une autre a 33 ($= 1/0,97^{125}$) fois plus de risque* d'avoir des défaillances. Les canalisations de petit diamètre ont donc une propension plus élevée à subir des défaillances que celles de diamètre important.

La variable "rénové et rajeuni", est une variable créant un nouveau tronçon et remettant son âge à zéro lorsque ce tronçon a été rénové (tubage, chemisage, etc.). Par conséquent, vu que ce sont des tronçons qui ont été artificiellement rajeunis, il est normal que le risque* de ces tronçons d'avoir des défaillances soit 2,5 fois plus élevé que pour les tronçons sans cette variable. En effet, ils paraissent jeunes pour le logiciel alors qu'en fait ils sont en réalité plutôt âgés.

Le risque* que les tronçons en “fonte ductile et en acier” aient des défaillances est 1,28 fois (= 1/0.78) plus élevé que pour les tronçons en fonte grise. Ce résultat est cohérent, en effet, eauservice Lausanne redoute les défaillances des fontes grises qui sont rares mais provoquent beaucoup de dégâts. Par conséquent, ils ont tendance à les renouveler plus tôt (en âge) les fontes grises que les autres matériaux afin d’éviter au maximum les défaillances. Ce résultat prouve qu’ils arrivent à atteindre leurs objectifs, mais illustre aussi la complexité des analyses statistiques, dont les résultats proviennent, encore une fois, d’un couplage des phénomènes physiques et des pratiques de gestion.

Ensuite, en faisant l’hypothèse que cette équation, descriptive du passé, sera la même dans le futur et en utilisant l’équation 10.3 du modèle LEYP, puis l’équation 10.7, nous pouvons stocker dans le vecteur 10.7 le nombre de défaillances probables qu’aura chaque tronçon à chaque âge (pour 150 âge différents).

❸ Croisement des âges probables et du processus de dégradation

Enfin en croisant les résultats des deux étapes précédentes (cf. équation 10.8 nous obtenons $I1P$ représenté graphiquement sur la figure 10.7. Cette figure indique les résultats (sorties) du modèle OPTIMEAU c’est à dire l’estimation d’$I1P$ sur du long terme. Nous constatons qu’avec ce scénario le nombre de défaillances a tendance à augmenter régulièrement et modérément au fil du temps. Ici, le nombre de défaillances est systématiquement au-dessus de 100, c’est à dire au-dessus du seuil qu’eauservice se fixe comme objectif. Le taux de renouvellement moyen de ce scénario est de 1,7%.

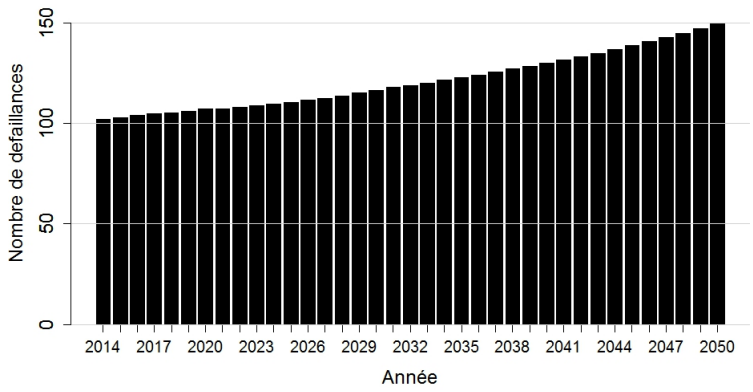


FIGURE 10.7: Eauservice Lausanne, réseau en ville, nombre de défaillances prévisionnelles $I1P$ jusqu’en 2050. Simulation 4 : Statu quo

☞ Pour en savoir plus : consulter la simulation “Lausanne № 4” de l’annexe J.

10.7.2 Lausanne statu quo stratifié par matériau

Dans ce scénario le réseau d’eauservice Lausanne est partitionné en quatre strates en fonction des matériaux des tronçons fin 2013 : fonte grise, fonte ductile, acier et autres matériaux.

❶ Estimation des “âges à venir” probables des tronçons géographiques

Pour la première étape nous avons besoin, en entrée du modèle, d’une courbe de survie prospective pour chaque matériau. Ici, nous avons choisi le scénario statu quo, donc la courbe de survie prospective est égale à la courbe de survie passée sur [2001, 2013] calculée par la méthode Kaplan-Meier (corrigée des points manquants). La figure 10.8 présente les courbes prospectives employés.

Cette fonction de survie est ensuite transformée en matrice de transition de Markov avec t_{max} = 150 ans. Il est ainsi possible d’obtenir les “âges à venir” des tronçons géographiques.

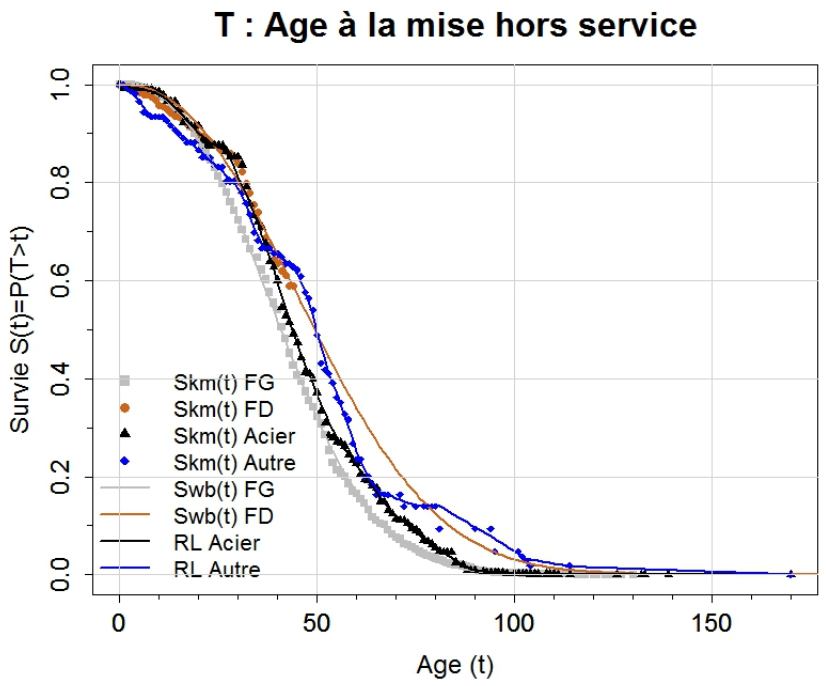


FIGURE 10.8: Eauservice Lausanne, réseau en ville, simulation №9, "statu quo stratifié par matériau". Point : survie empirique passée en effectif calculée par la méthode Kaplan-Meier $S\text{km}(t)$. Traits : les survies prospectives de ce scénario, tantôt en calant une fonction de Weibull $S\text{wb}(t)$, tantôt en utilisant la régression locale (RL). FG : fonte grise, FD : fonte ductile

☞ Pour en savoir plus : consulter la simulation "Lausanne № 9" de l'annexe J.

❷ Calage d'équations du processus de détérioration des tronçons physiques

Pour obtenir une équation de la prédiction de la dégradation en fonction de l'âge du tronçon pour chaque strate de matériau, nous avons suivi la même démarche que celle présentée dans la section 10.7.1. Le tableau 10.4 résume les résultats obtenus avec le modèle de LEYP. Toutes les p-values sont inférieures à 5% donc les paramètres sont significatifs.

Les résultats peuvent être analysés selon la même démarche que celle présentée dans la section 10.7.1. La nuance réside dans le fait que chaque strate à sa propre équation explicative des défaillances passées. Nous pouvons noter que le paramètre de forme δ de chaque strate est différent. De plus, celui de la fonte grise est égal à 1, ce qui signifie que l'âge des tronçons en fonte grise n'a pas eu d'impact sur le nombre de défaillances apparues entre [2001, 2013].

Covariables	θ	Fonte ductile $\widehat{\theta}$	Fonte Grise $\widehat{\theta}$	Acier $\widehat{\theta}$	Autres matériaux $\widehat{\theta}$
Défaillances passées	α	2.93	1.38	3.17	3.68
Age (siècle)	δ	2.36	1	1.31	1.35
Intercept	β_0	-0.45	-1.26	-1.53	-0.82
ln(Longueur) (m)	β_1	0.39	0.31	0.44	-
Diamètre (mm)	β_2	-0.0044	-0.0022	-0.0027	-
Rénové et rajeuni non	Référence	0	0	0	-
Rénové et rajeuni oui	β_3	1.01	0.51	0.7	-
Pression (bar)	β_4	0.03	0.05	-	-

TABLEAU 10.4: Eauservice lausanne, réseau en ville stratifié selon le matériau, paramètres issus du modèle de LEYP

☞ Pour en savoir plus : consulter la simulation "Lausanne № 9" de l'annexe J.

Ensuite, en utilisant l'équation 10.3 du modèle de LEYP, puis l'équation 10.7 (strate sans changement de matériau) et l'équation sur la figure 10.10 (strate avec changement FG en FD), nous pouvons

stocker pour chaque strate le nombre de défaillances probables qu'aura chaque tronçon à chaque âge (150 âges différents).

❸ Croisement des âges probables et du processus de dégradation

Enfin, en croisant les résultats de deux étapes précédentes (cf. équation 10.8 pour une strate sans changement de matériau et équation 10.11 pour la strate où la fonte grise devient de la fonte ductile) nous obtenons $I1P$ représenté graphiquement sur la figure 10.9. Cette figure indique d'une part les défaillances entre [2001, 2013], données d'entrée du modèle de LEYP et d'autre part les résultats (sorties) du modèle OPTIMEAU c'est à dire l'estimation d'$I1P$ sur du long terme. Attention, la strate de couleur grise est constituée uniquement de fonte grise entre [2001 ; 2012], puis à partir de 2013 les tronçons renouvelés sont progressivement remplacés par de la fonte ductile.

Dans ce scénario $I1P$ augmente progressivement année par année comme dans le scénario "statu quo non stratifié". $I1P$ est un peu en dessous de 100 entre 2014 et 2024, donc conforme aux objectifs d'eauservice sur cette période. En revanche, à partir de 2025, $I1P$ est au-dessus de 100 donc non conforme aux objectifs. On peut aussi noter que l'augmentation progressive provient d'une augmentation des défaillances des canalisation en fonte, les plus fréquentes. Notons que le taux de renouvellement associé à ce scénario est en moyenne de 1,7%

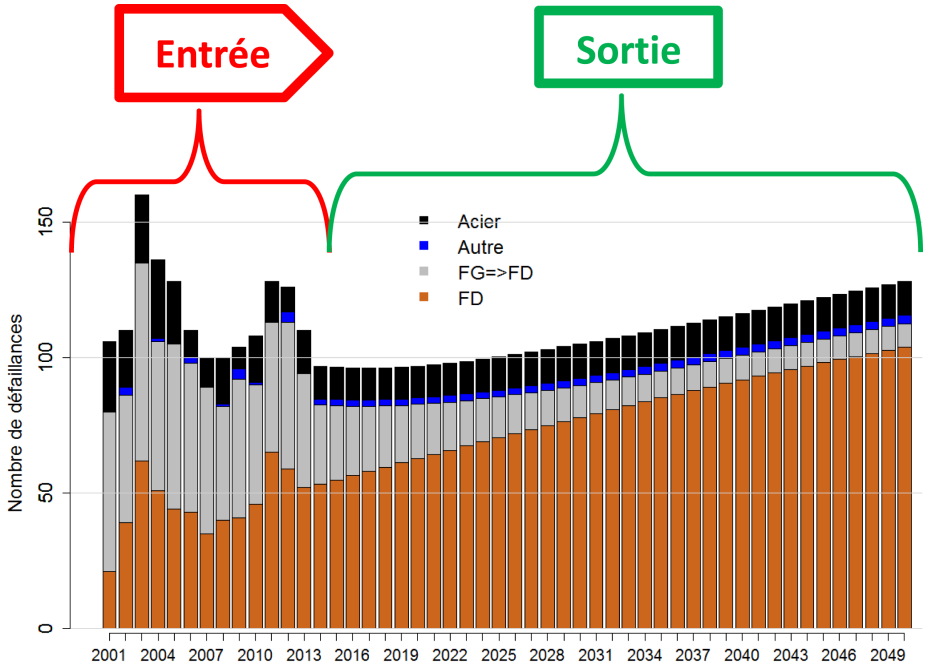


FIGURE 10.9: Eauservice Lausanne, réseau en ville, simulation 9, statu quo stratifié par matériau

☞ Pour en savoir plus : consulter la simulation "Lausanne № 9" de l'annexe J.

10.7.3 Renouvellement plus important près des éléments vulnérables

Dans ce scénario le réseau d'eauservice Lausanne est partitionné en trois en fonction des caractéristiques des éléments vulnérables autour des tronçons fin 2013 : très vulnérable (et/ou forte valeur), moyennement vulnérable (et/ou valeur moyenne) et peu vulnérable (et/ou faible valeur). Pour cela nous avons utilisé le paramètre SC que nous avons subdivisé en trois selon les tableaux 8.6 et 10.5. Nous avons fait en sorte que le linéaire en service de chaque strate soit de taille équivalente. Dans ce scénario, on chercher à renouveler les canalisation de manière plus importante près des éléments très vulnérables que dans le scénario Statu Quo.

SC	Vulnérabilité
[1 ; 0.3[	Très vulnérable et/ou forte valeur
[0.3 ; 0.2]	Moyennement vulnérable et/ou valeur moyenne
]0.2 ; 0]	Peu vulnérable et/ou valeur faible

TABLEAU 10.5: Valeurs de SC à eauservice Lausanne [Apotheloz, 2009, p. 5]

❶ Estimation des "âges à venir" probable des tronçons géographiques

Dans ce contexte pour calculer $I1P$ nous avons besoin en entrée du modèle d'une courbe de survie prospective pour chaque strate. Ici, nous avons choisi le scénario où Lausanne renouvelle plus les conduites autour des usagers et des biens vulnérables (et/ou de forte valeur) que par le passé. Donc les courbes de survie prospective pour les deux premières strates sont plus proches de l'axe des ordonnées que la courbe de survie passée sur [2001 ; 2013] calculé par la méthode Kaplan-Meier. La figure 8.7 présente les courbes prospectives employées.

❷ Calage d'équations du processus de détérioration des tronçons physiques

Ensuite nous avons besoin d'une équation de prédiction de la dégradation en fonction de l'âge du tronçon, pour chaque strate. Le tableau 10.6 résume les résultats obtenus avec le modèle de LEYP sur la fenêtre d'observation [2001 ; 2013]. Toutes les p-values de ces paramètres sont inférieures à 5%, donc les paramètres sont significatifs. Ces résultats peuvent être analysés selon la même démarche que celle présentée dans la section 10.7.1. Ensuite, en faisant l'hypothèse que cette équation expliquant les défaillances passées sera la même à l'avenir, nous avons stocké ces résultats pour chaque tronçon pour 150 âges différents de [1 à 150 ans].

Covariables	θ	SC [1 ; 0.3[$\widehat{\theta}$	SC [0.3 ; 0.2] $\widehat{\theta}$	SC]0.2 ; 0] $\widehat{\theta}$
Défaillances passées	α	4	2.63	3.79
Age (siècle)	δ	1.47	1.48	1.32
Intercept	β_0	-2.2	-1.71	-1.93
ln(Longueur) (m)	β_1	0.41	0.37	0.37
Diamètre (mm)	β_2	-0.0025	-0.0021	-0.0028
Pression (bar)	β_3	0.061	0.041	0.042

TABLEAU 10.6: Paramètres du modèle de LEYP appliqués à eauservice Lausanne, simulation 12

❸ Croisement des âges probables et du processus de dégradation

Enfin, en croisant les résultats de deux étapes précédentes (cf. équation 10.8) nous obtenons $I1P$ représenté graphiquement sur la figure 10.10. Nous constatons que dans ce scénario, Lausanne reste toujours en dessous de son seuil objectif de 100 défaillances par an. Notons que le taux de renouvellement de ce scénario est en moyenne de 2,4 %.

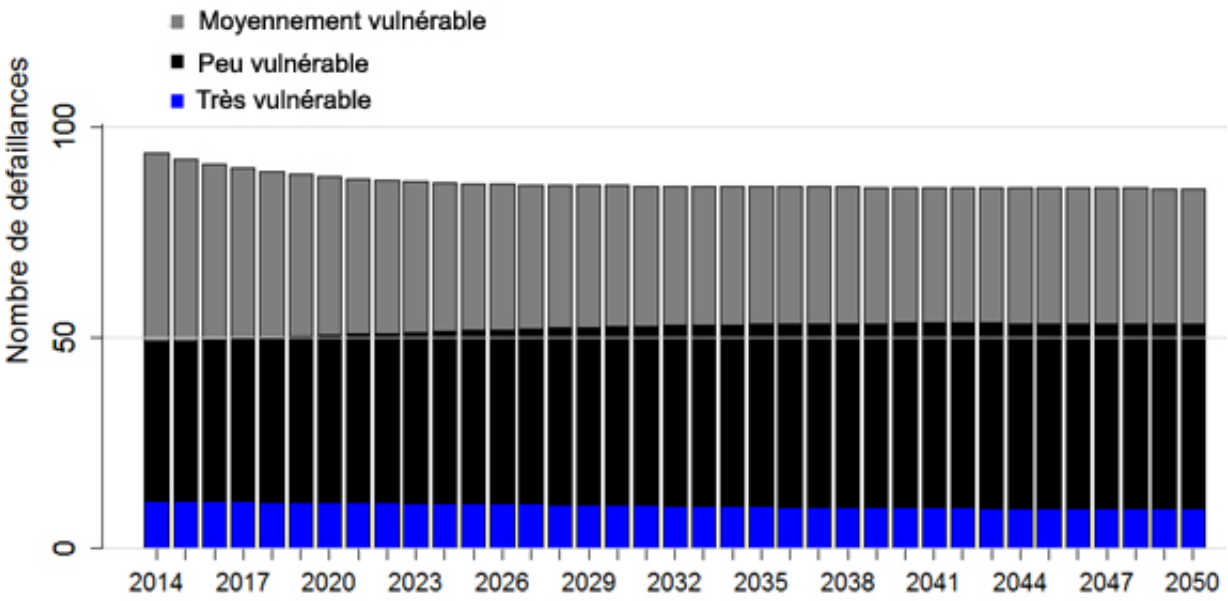


FIGURE 10.10: Prévision du nombre de défaillances $I1P$ à eauservice Lausanne, réseau de distribution en ville, scénario "les renouvellements sont plus fréquents autour des usagers vulnérables", simulation № 12 de l'annexe J

☞ Pour en savoir plus : consulter la simulation "Lausanne № 12" de l'annexe J.

10.8 Validation et évaluation critique du modèle

La validation de notre modèle pour calculer $I1P$ va s'effectuer en trois phases.

1. Tout d'abord, nous allons vérifier si le modèle de LEYP effectue de bonnes prévisions du nombre de défaillances $I1P$ sur du court terme (2 ans).
2. Puis, nous allons confronter l'estimation d'$I1P$ selon la démarche OPTIMEAU à deux autres démarches sur du moyen terme (10 ans).
3. Enfin, nous allons analyser la sensibilité d'$I1P$ (démarche OPTIMEAU) vis-à-vis de la stratification du réseau.

Dans cette section, nous travaillons en permanence avec les données du réseau de distribution en ville d'eauservice Lausanne.

10.8.1 Validation du pouvoir prédictif du modèle LEYP sur du court terme

Afin de valider le pouvoir prédictif du LEYP, la prévision des défaillances des canalisations $I1P$ entre [2012 ; 2013], calculées uniquement à partir du modèle LEYP calé sur la fenêtre d'apprentissage [2001 ; 2011], sont comparées aux défaillances réellement observées entre [2012 ; 2013]. Nous utilisons la méthode détaillée dans [Lorenz, 1905]. Les résultats sont portés sur la figure 10.11. Ce graphique permet à la fois de vérifier si la hiérarchisation des tronçons (d'après leurs nombres de défaillances) est correcte et si l'ordre de grandeur du nombre de défaillances est proche de la réalité. Nous constatons que l'aire sous la courbe rouge est de 0,843 ($>> 0,5$), ce qui signifie que la hiérarchisation des tronçons selon le nombre prévu de défaillances grâce au LEYP est très fiable.

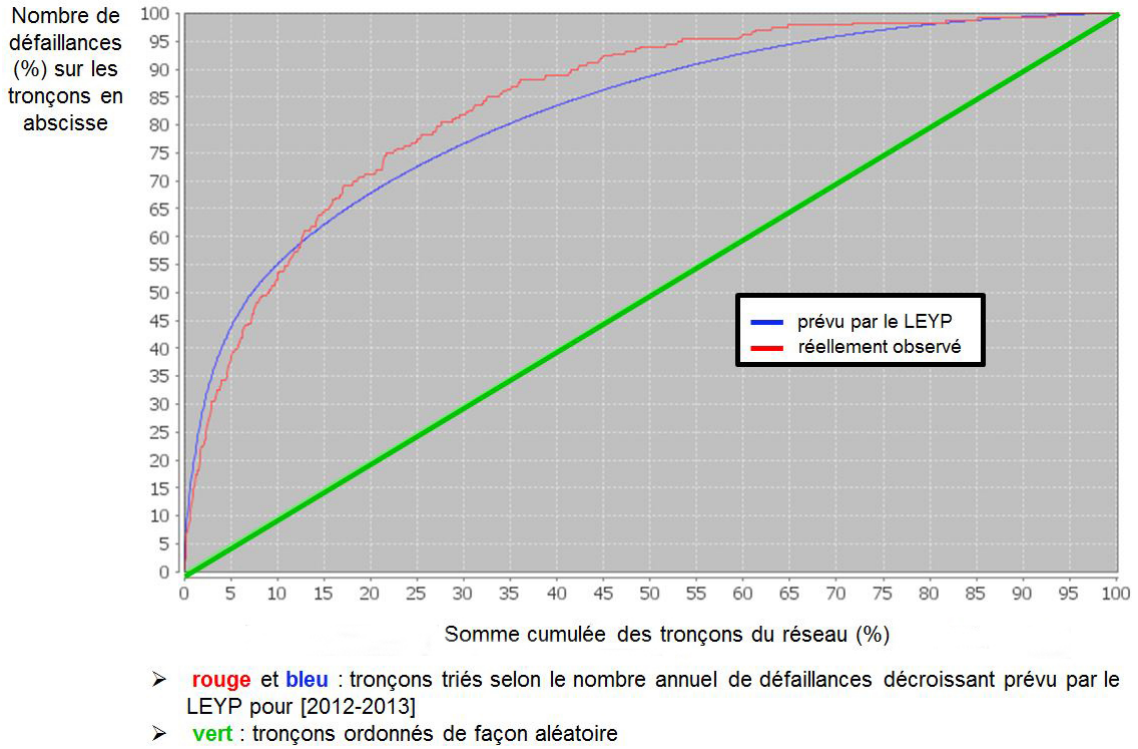


FIGURE 10.11: Validation du LEYP sur du court terme. Fenêtre d'apprentissage du modèle [2001 ; 2011], fenêtre de validation [2012,2013], Lausanne scenario "réseau de distribution en ville, non stratifié"

10.8.2 Comparaison d'OPTIMEAU à deux autres démarches

Dans ce paragraphe nous comparons le résultat d'$I1P$ calculé selon OPTIMEAU à 2 autres démarches (cf. figure 10.12). Pour ces trois démarches, la prédiction des défaillances des tronçons physiques a été effectué par le LEYP (cf. tableau 10.3) sur la fenêtre d'apprentissage [2001, 2013].

La première méthode, dite "LEYP seul", fait l'hypothèse que les tronçons à partir de 2014 ne sont plus renouvelés. Par conséquent, au fil du temps, l'âge des tronçons ne fait qu'augmenter. Dans cette démarche on utilise uniquement le modèle de LEYP.

La seconde méthode, dite "OSMA"[3], consiste à renouveler chaque année le linéaire donné par l'indicateur $I1R$ d'OPTIMEAU mais ce sont les tronçons qui ont le taux probable de défaillances le plus élevé qui sont renouvelés en priorité. De plus, OSMA fait l'hypothèse que les tronçons posés à partir de 2014 n'auront jamais de défaillances.

Pour rappel, dans la démarche OPTIMEAU le renouvellement des tronçons s'effectue en fonction de la courbe de survie prospective (dépendant des âges à la mise hors service). Or les âges à la mise hors service dépendent du mauvais état (taux probables de défaillances) mais aussi de l'aversion des gestionnaires plus au moins grande au risque et du niveau de coordination avec les autres chantiers urbains (tel que voiries, tramway, gaz). De plus, dans ce processus les nouveaux tronçons posés peuvent subir des défaillances.

3. OSMA : OS pour Oslo et MA pour Mathew, car cette démarche est inspirée d'un rapport de Mathew Poulton appliquée au territoire d'Oslo

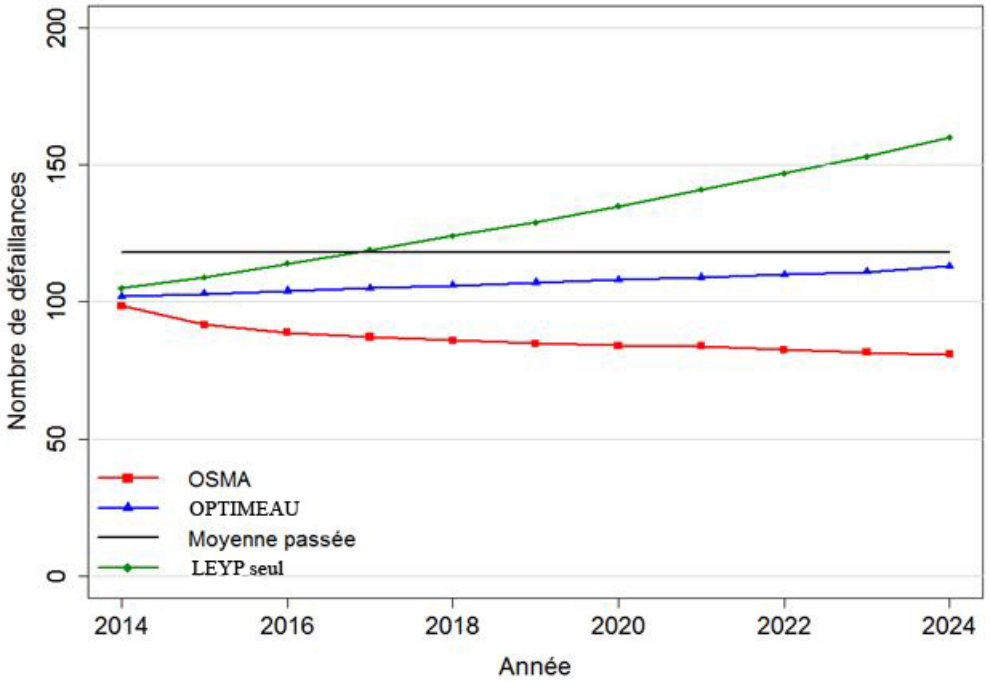


FIGURE 10.12: Comparaison des démarches "LEYP seul", OSMA et OPTIMEAU pour l'indicateur $I1P$, eauservice Lausanne, réseau en ville, simulation 4, scénario statu quo

La figure 10.12 expose les résultats de cette comparaison. Avec la démarche "LEYP seul" le nombre de défaillances augmente chaque année assez rapidement. Ce résultat est cohérent : en effet, sans renouvellement, l'âge des tronçons physiques augmente et donc le nombre de défaillances augmente. Avec le processus OSMA, le nombre de défaillances diminue progressivement. Ce résultat est logique car d'une part les tronçons renouvelés sont les tronçons les plus en mauvais état (taux de défaillances le plus élevé) et d'autre part les nouveaux tronçons posés ne subissent aucune défaillance. Par conséquent, OSMA tend à réaliser une asymptote vers 0. La méthode OPTIMEAU est intermédiaire à ces deux démarches. Cette situation est cohérente, en effet ici les tronçons renouvelés ne sont pas forcément ceux dont l'état est le pire (coordination prise en compte) et les nouveaux tronçons installés peuvent subir des défaillances.

10.8.3 Analyse de sensibilité d'$I1P$ à la stratification

Nous avons aussi analysé la sensibilité d'$I1P$ à la stratification. A cet effet, nous avons utilisé les données d'eauservice Lausanne en ville avec une fenêtre d'apprentissage pour le modèle entre [2001 ; 2013]. Nous avons testé en entrée du LEYP systématiquement les mêmes covariables néanmoins pour chaque strate les sorties varient. Nous sommes restés dans les scénarios statu quo, nous avons comparé les résultats du scénario "statu quo sans stratification" aux scénarios "statu quo strates matériaux" et "statu quo strates vulnérabilité".

La figure 10.13 présente $I1P$ pour ces trois scénarios entre [2014 ; 2050] et le tableau 10.7 présente $I1P$ à trois dates assez espacées les unes des autres. Nous observons que le fait de stratifier diminue le nombre de défaillances. Ainsi, comme le montre le tableau 10.7 les deux scénarios avec stratification ont entre 2 à 5 % d'écart alors que le scénario non stratifié peut avoir jusqu'à 20% d'écart avec les deux autres. Cette différence doit être liée aux paramètres de sortie du LEYP variant à chaque fois. Notons, tout de même que ces trois courbes ont toutes la même tendance à savoir une croissance régulière. Ce résultat montre la sensibilité des résultats au modèle de LEYP. Avant d'estimer $I1P$ il faut choisir la stratification qui permet d'obtenir le meilleur modèle de LEYP.

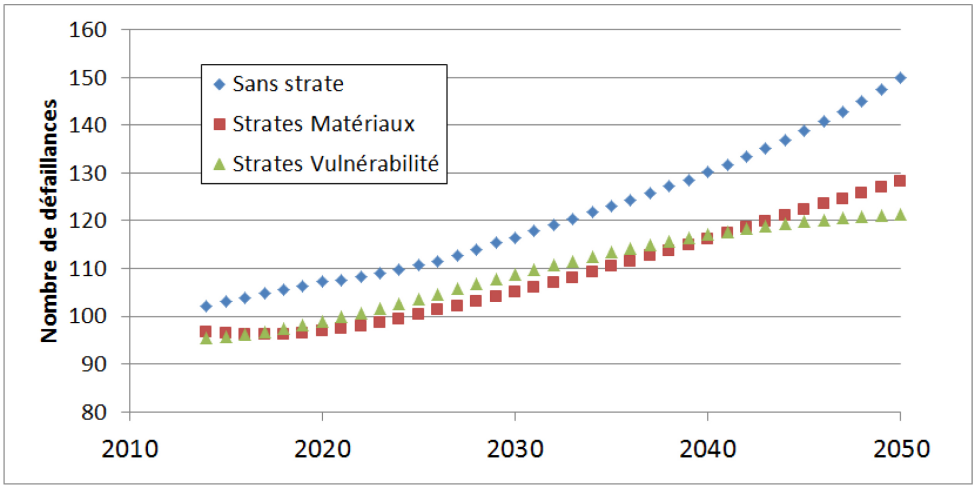


FIGURE 10.13: Comparaison d'I1P, pour trois stratifications différentes, scénario "Statu quo"

Scénarios	2014	2030	2050
Sans strate	102	116	150
Strates matériaux	97	105	128
Strates vulnérabilité	95	109	121

TABLEAU 10.7: Comparaison d'I1P à trois dates différentes, pour trois stratifications différentes, scénario Status quo

10.8.4 Conclusion

Dans ce chapitre, à l'étape 2, nous avons choisi le LEYP comme modèle de prévision de la dégradation. Notons que le raisonnement suivi est valable avec n'importe quel autre modèle de prédiction de la dégradation. Nous avons, notamment testé avec le NHPP, cependant les résultats étaient moins en accord avec les pratiques passées. A l'avenir, il serait intéressant de tester en utilisant le modèle ζ-LEYP ou le LEYP2s qui d'après [Le Gat, 2016] donne de meilleures prévisions que le LEYP.

Le calcul de tous les indicateurs du modèle Optimeau est quasiment instantané sauf celui d'$I1P$. En effet, sur un ordinateur portable core I7 d'indice [4] de performance 6.5, pour une quarantaine d'années prospectives, ce dernier s'exécute en 15 minutes pour le réseau de Lausanne composé d'environ 12 300 tronçons différents alors qu'il peut durer deux jours sur le réseau du SEDIF (environ 290 000 tronçons). Lorsque nous parallélisons de manière basique les calculs, ce temps au SEDIF peut passer à 12h. Une programmation réellement optimisée par des informaticiens permettrait certainement de réduire significativement les temps de calculs.

Les tentatives que nous avons effectuées pour évaluer le modèle créant $I1P$ ne sont pas probantes. En effet, faute de recul, nous avons essayé de valider $I1P$ sur du court terme. Or, sur du court terme c'est le modèle de LEYP qui prédomine par rapport au renouvellement des canalisations (survies transformées en matrice de transition de Markov). Compte tenu du poids du LEYP dans cet indicateur, il est crucial de choisir la stratification qui donne les meilleurs LEYP (cf. la validation dans la section 10.8.1).
Le modèle pour calculer $I1P$ ne prend pas en compte, au sein d'une cohorte, le fait que les tronçons à problèmes seront renouvelés avant ceux qui n'en pose pas. Par conséquent ce modèle à tendance à surestimer le nombre de défaillances à long terme.

4. L'indice de performance windows évalue les composants système clés (processeur, mémoire vive, etc.) sur une échelle allant de 1 à 7.9

Une amélioration de ce modèle serait de ne pas renouveler les tronçons au hasard dans la cohorte mais en fonction par exemple de leurs défaillances ou des risques prévues.

Chapitre 11

L'estimation des risques adaptée au contexte local

Dans ce chapitre nous allons travailler sur les modèles de risque nommé M2 dans le chapitre 2. Après avoir détaillé les différentes composantes du risque, nous présenterons les modèles de risque que nous avons créés et pourquoi nous les avons construits ainsi. Nous avons choisi (cf. annexe H) de créer 5 indicateurs de risque :

- $I2P$, le risque de coupure d'eau chez les abonnés suite à une défaillance du réseau. Il sera décrit dans la section 11.5.
- $I3P$, le risque de perturbation des usagers de la voirie suite à une défaillance du réseau. Il sera développé dans la section 11.4.
- $I4P$, le risque de provoquer des dégâts sur des biens (chaussées, maisons) suite à une inondation induite par une défaillance du réseau. Il sera décrit dans la section 11.6.
- $I5P$, le risque de provoquer des dégâts suite à un effondrement de terrain induite par une défaillance du réseau. Il sera décrit dans la section 11.7.
- $I6P$, le volume de fuite lié aux défaillances du réseau. Il sera développé dans la section 11.8.

Il faut garder en mémoire que selon le cycle de l'action présenté sur la figure 1.5, les indicateurs de risque sont des indicateurs de **résultats** (ou performance) (cf. définition dans la section 1.3).

Notons qu'un risque périodiquement médiatisé, à savoir le risque que l'eau potable puisse rendre malade des personnes [Leclerc, 2014; Senet, 2015] n'est pas présent dans les indicateurs d'Optimeau. En effet, nos partenaires nous ont informé qu'en général les problèmes de dégradation de la qualité d'eau lié au réseau sont peu prégnants. Donc, il n'y a pas de base de données associée à ces problèmes. De plus, dès que ce genre de problème est détecté, leur réaction est quasi immédiate. En effet, résoudre ce type de problème devient alors d'une extrême priorité. Par conséquent, il n'a pas été prévu d'indicateur prévisionnel de risque à ce sujet.
Cependant, les AOEP suivent de près les informations règlementaires et scientifiques sur l'impact des matériaux des réseaux sur la qualité de l'eau distribuée. Par exemple, certaines canalisations en PVC (Polyvinyl Chloride) relarguent dans l'eau des molécules toxiques pour l'être humain (les CVM : Chlorure de Vinyle Monomère) [MASS, 2012; Lafforgue, 2014].

11.1 Les composantes du risque

Comme indiqué dans l'encadré 7 page 67 la définition du risque que nous utilisons dans ce manuscrit est la suivante : "le risque est l'éventualité d'un évènement ne dépendant pas exclusivement de la volonté des parties et pouvant causer la perte d'un objet ou tout autre dommage" [Le Robert, 2015].

Dans ce cas, le risque est issu du croisement possible d'un danger et d'éléments vulnérables aboutissant à des dommages (cf. figure 11.1).

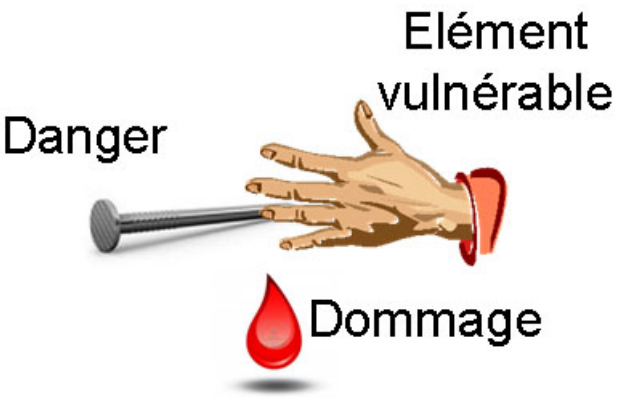


FIGURE 11.1: Schéma des 3 éléments du risque

Il est important de définir précisément les 3 éléments du risque. Tout d'abord, le **danger** est la propriété intrinsèque, à une substance ou à un système technique (*i.e* mise sous pression de l'eau dans une canalisation) ou à une disposition (tel qu'un trou dans le sol) ou à un organisme, de nature à provoquer un dommage sur un élément vulnérable [MEDD, 2005]. Ensuite, les **éléments vulnérables** sont des éléments tels que les personnes, les biens ou les différentes composantes de l'environnement susceptibles, du fait de l'exposition au danger, de subir, en certaines circonstances, des dommages [MEDD, 2005]. Enfin, **le dommage** est un dégât matériel, physique ou psychologique à un bien ou une personne.

Après avoir défini le concept de risque, nous allons maintenant présenter comment il s'estime.

11.2 Méthode de calcul du risque, théorie

Les indicateurs utilisés pour calculer le niveau des risques de dommage afférents aux réseaux d'eau potable sont, en général, toujours construits de la même façon. D'un côté, soit le calcul consiste en la multiplication de la probabilité d'occurrence de défaillances par l'intensité de la défaillance par au moins une caractéristique des éléments vulnérables : leur quantité, leur vulnérabilité ou leur valeur. D'un autre côté, soit l'estimation résulte de la multiplication de la probabilité d'occurrence du dommage par la gravité de ce dernier. Ces deux manières d'écrire les équations sont strictement équivalentes. La figure 11.2 présente ces deux méthodes pour calculer le risque.

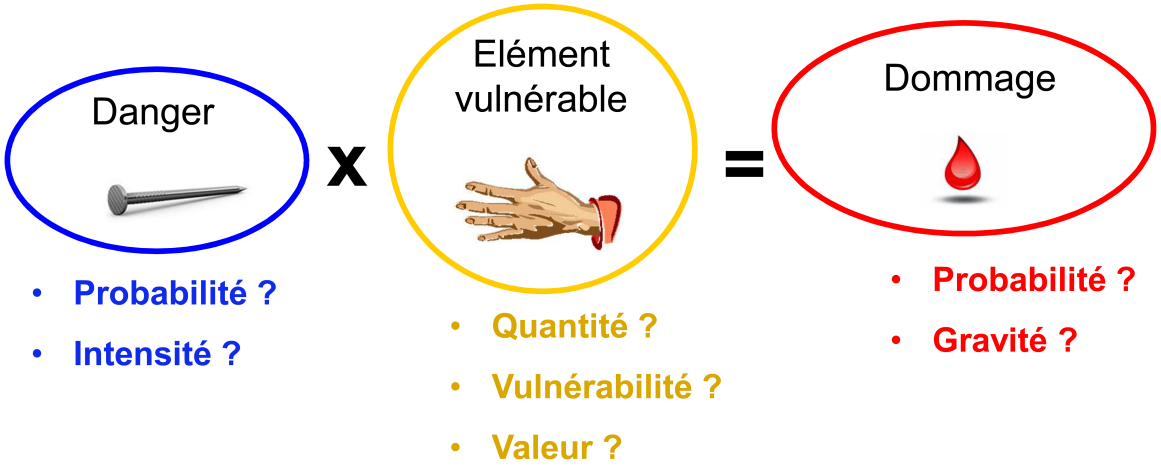


FIGURE 11.2: Méthode pour estimer le niveau d'un risque de dommage

Les concepts de probabilité, intensité, quantité et gravité sont assez stables dans la bibliographie [1] et le langage courant. En revanche, les définitions concernant les notions de vulnérabilité et de valeur sont très mouvantes.

Par conséquent, dans ce manuscrit nous entendons par **vulnérabilité** le facteur de proportionnalité entre les effets auxquels est exposé un élément vulnérable et les dommages qu'il subit [MEDD, 2005]. Par exemple, la célèbre histoire des trois petits cochons illustre très bien ce concept. Dans cette fable, face au même souffle du loup, la maison en paille est bien plus vulnérable que la maison en brique [2].

De plus, la **valeur** correspond à l'importance, au prix attaché subjectivement à quelque chose [Jeuge-Maynart et al., 2011]. Par exemple, le crash de l'avion de la Germanwings avec 150 personnes à bord dans les Alpes de Haute-Provence, le 24 mars 2015, illustre parfaitement le fait que la valeur est une notion subjective. A la radio, nous avons entendu des mères dire que leurs jeunes enfants disparus avaient plus de valeur que leur mari car ces enfants avaient encore toute la vie devant eux. Pourtant, nous avons pu lire dans les médias que du point de vue des assurances, les proches ayant perdu un père, cadre polytechnicien qui subvenait aux besoins de la famille, ont subi une perte en valeur plus grande que ceux qui ont perdu un enfant et donc allaient recevoir plus d'argent (de plusieurs milliers à 1 million d'euros) [BFM, 2015].

Pour ne pas rajouter de nouvelles notations aux terrains d'étude, nous avons fait le choix de garder au maximum celles utilisées dans le logiciel CARE-W-ARP [Le Gauffre et al., 2003; Haidar, 2006]. En effet, ce logiciel est utilisé à la fois à Lausanne et au Grand Lyon pour calculer des indicateurs de risque sur du court terme. Le logiciel CARE-W-ARP est issu du programme de recherche Européen CARE-W, par conséquent ses notations sont anglophones.

Au vu des objectifs présentés dans la section 8.1, nous avons fait le choix d'estimer uniquement cinq risques.

11.3 Justification du choix des méthodes de calcul

Comme cela est réalisé dans le domaine des risques naturels (séisme, inondation), l'idéal pour calculer un indicateur de risque est de disposer de plusieurs bases de données **géoréférencées** : une pour chaque danger (*i.e* défaillances) et une pour chaque famille d'éléments vulnérables (tels que les consommateurs d'eau, les usagers de la voirie et les infrastructures). Néanmoins, au sein des services d'eau ces données ne sont pas toujours existantes et exhaustives, par conséquent nous avons essayé de faire au mieux avec les données disponibles dans le temps imparti. Nous nous sommes inspirés des formulations dans CARE-W-ARP en nous attachant à dissocier clairement les concepts de quantité, de vulnérabilité et de valeur au sein des équations.

Le tableau 11.1 synthétise les composantes prises en compte dans certains indicateurs de risque rencontrés lors de la revue bibliographique [Large, 2013] des modèles de gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable. Les noms complets des indicateurs sont disponibles dans la liste des abréviations page xxiii.

1. cf. [Dauphiné, 2001], [Leplat, 2003], [MEDD, 2005],[Pradier, 2006], [ChevassusAuLouis, 2007], [Breysse, 2009], [Taillandier, 2009], [ISO-73, 2009], [Magne, 2009], [Paré-Chamontin, 2010], [UVED, 2012], [Picoche, 1992] et [Perret et al., 2012]

2. Cette fable n'est plus d'actualité, on construit maintenant des maisons en paille et en bois très résistantes face au vent.

Risque	Modèle\logiciel	Indicateur	Danger		Éléments vulnérables		
			Probabilité	Intensité	Quantité	Vulnérabilité	Valeur
Coupure d'eau	CARE-W-ARP	$PCWI$	X	X		X	X
	CARE-W-ARP	PWI	X	X	X		
	CARE-W-RelNet	HCI		X	X		
	Criticité	C	X	X	X	X	X
	AWARE-P	UDY	X	X	X		
	PARMS	CCI	X	X	X		X
Coupure voirie	CARE-W-ARP	DT	X		X	X	X
	PARMS	CTD	X	X	X	X	X
Inondation	CARE-W-ARP	DFI	X	X	X	X	X
Effondrement de sol	CARE-W-ARP	DSM	X	X			
Volume fuite	TCO-LCA	WL		X			
	Vision	NRR		X			
	Kanew	FLR		X			

Tableau 11.1: Composantes prises en compte dans des indicateurs de risque référencés dans la littérature (X : oui ; cellule vide : non)

Pour en savoir plus sur ces modèles et ces indicateurs consultez la synthèse dans [Large, 2013] ou bien les références complètes ici [3].

Nous pouvons constater que tous les critères des éléments du risque sont pris en compte dans seulement 3 indicateurs de risque : C, CTD et DFI. Les autres indicateurs sous-entendent soit que la probabilité d'occurrence du danger vaut 1 (cas d'HCI, de WL, de NRR et de FLR) soit (qu'une) ou plusieurs caractéristiques des éléments vulnérables sont les mêmes pour tous les tronçons.

Nous avons essayé de construire nos indicateurs de telle sorte que toutes les composantes soient prises en compte. Ces indicateurs ont été créés uniquement au Grand Lyon et à eauservice Lausanne. En effet, même si le SEDIF nous a transmis toutes les données nécessaires à leur création, nous n'avons pas eu le temps d'aller au bout de la démarche sur ce territoire.

Après avoir présenté la manière dont sont estimés les risques dans les outils de gestion patrimoniale, nous allons présenter les indicateurs de risque dans le modèle OPTIMEAU. L'indicateur qui décompose le plus clairement ces 5 composantes est le risque qu'une défaillance entraîne une coupure de la voirie $I3P$. Nous allons donc commencer par celui-ci.

11.4 Risque de perturbation du trafic routier : $I3P$

11.4.1 Cadre préliminaire

L'indicateur $I3P$ quantifie le risque de dérangement des usagers de la voirie suite à une défaillance du réseau et aux travaux qu'elle engendre.

3. CARE-W-ARP [Le Gauffre et al., 2002a,b, 2003], CARE-W-Relnet [Eisenbeis et al., 2002a; Le Gauffre et al., 2002a], Criticité [Renaud et al., 2011a], Aware-P [Vitorino et al., 2012], PARMS [Burn et al., 2002, 2003; Rahilly et al., 2013], TCO-LCA [Bayart and Vargas, 2015], Vision [UKWIR, 2005, 2009; Le Quiniou and Sandraz, 2012a,b], Kanew [Herz and Lipkow, 2002; Herz and Kropp, 2002; Herz et al., 2003; Kropp, 2003, 2013].

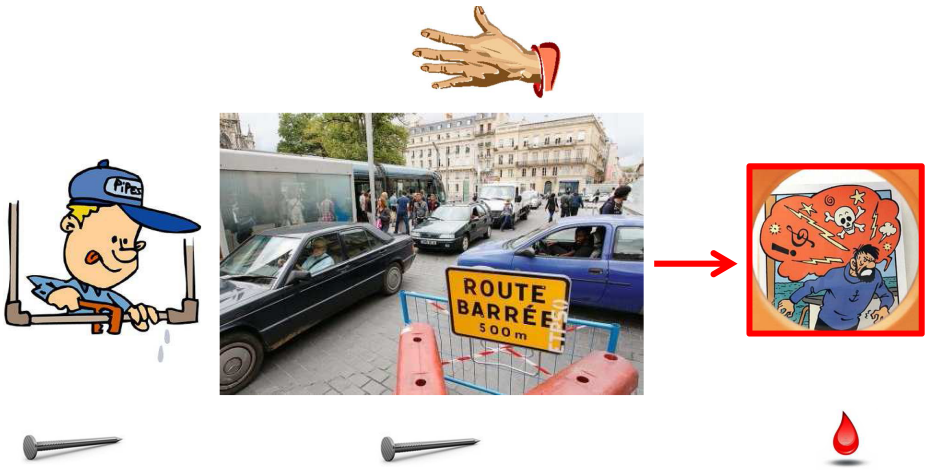


FIGURE 11.3: Schéma du risque dérangement des usagers de la voirie suite à une fuite d'eau

Dans ce cas, le **danger primaire** est la défaillance d'une canalisation puis sa réparation ou son renouvellement. Le **danger secondaire** est la coupure de la route (en totalité ou partiellement). Les **éléments vulnérables** sont les usagers de la route et de la rue (tramway, trolleybus, bus, camions, voitures, vélos, rollerman, piétons, etc.). Les **dommages** potentiels vont de l'accroissement des temps de déplacement et leurs conséquences, c'est à dire de l'énervement des usagers jusqu'à la perte de chiffre d'affaires de certaines commerces ou entreprises (cf. figure 11.3).

11.4.2 Présentation de la méthode de calcul

Le risque de coupure de la voirie $I3P$ l'année y future s'écrit selon l'équation 11.1.

$$I3P(y) = \sum_i I3P_i(y) = \sum_i [I1P_i(y) \times EDI_i \times SR_i] \tag{11.1}$$

Avec pour chaque tronçon i, $I1P_i$ est l'espérance du nombre de défaillances à venir probable de ce tronçon calculé dans le chapitre 10, EDI_i [4] est le temps d'intervention sur ce tronçon (en heures) et SR_i [5] est un critère intégrant la quantité, la vulnérabilité et la valeur des usagers de la voie au-dessus de ce tronçon.

La **probabilité** d'occurrence du danger est captée dans $I1P_i$. Ensuite, l'**intensité** du danger c'est à dire le temps d'intervention à Lausanne (cf. tableau 11.2) dépend du matériau et du diamètre de chaque tronçon alors qu'au Grand Lyon (cf. tableau 11.3) il ne dépend que de son diamètre.

EDI_i (Heures)	Matériaux	Diamètre (mm)
3	Acier, fonte ductile, PE	$\phi < 250$
4	Acier, fonte ductile, PE	$\phi \geq 250$
6	Fonte grise, Eternit, PRFV	$\phi < 250$
8	Fonte grise, Eternit, PRFV	$\phi \geq 250$

TABLEAU 11.2: Temps d'intervention sur chaque tronçon EDI_i à eauservice Lausanne [Apotheloz, 2009, p. 4] (PE = Polyéthylène, PRFV = Polyester Renforcé de Fibre de Verre)

4. EDI : Expected Duration of Interruption
5. SR : Sensitivity of the Road

EDI_i (Heures)	Diamètre (mm)
2	$\phi < 200$
3	$200 \leq \phi \leq 400$
4	$\phi > 400$

TABLEAU 11.3: Temps d'intervention sur chaque tronçon EDI_i au Grand Lyon [Grand Lyon, 2013a]

Ensuite, le critère SR_i intègre à Lausanne les 3 dimensions des **éléments vulnérables**, à savoir (cf. tableau 11.4 et figure 11.4) :
- leur **quantité**. Le comptage du nombre de véhicules par jour passant au-dessus du tronçon i est intégré (cf. ordonné de la figure 11.4) .
- leur **vulnérabilité**. Les trolleybus connectés en permanence à des câbles électriques aériens sont classés plus vulnérables que les bus et les voitures (cf. abscisse de la figure 11.4).
- leur **valeur**. Eauservice a indiqué l'importance (la valeur) qu'il attribue à chaque situation dépendant du type d'usagers (vulnérabilité) et de leur nombre (cf. valeurs centrales sur la figure 11.4). Nous constatons de manière logique qu'eauservice a inscrit des poids très élevés lorsque les éléments vulnérables étaient très nombreux et très vulnérables (cf. case rouge de la figure 11.4).

Valeur de SR_i	TPL ?	Niveau du trafic (véhicules/jour)
1	Trolleybus	trafic $\geq$ 15 000
0.9	Trolleybus	trafic $<$ 15 000
0.8	Bus	trafic $\geq$ 15 000
0.7	Bus	trafic $<$ 15 000
0.7	Pas de TPL	trafic $\geq$ 20 000
0.5	Pas de TPL	20 000 $>$ trafic $\geq$ 10 000
0.4	Pas de TPL	10 000 $>$ trafic $\geq$ 5 000
0.2	Pas de TPL	5 000 $>$ trafic $\geq$ 500
0.0	Pas de TPL	trafic $<$ 500

TABLEAU 11.4: SR_i à Lausanne [Apotheloz, 2009] (TPL : Transports publics de la région Lausannoise)

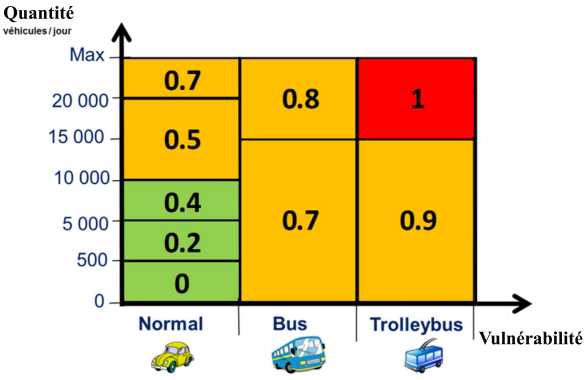


FIGURE 11.4: Schéma de de SR_i à eauservice Lausanne. Vert : valeurs faibles, Orange : valeurs moyennes, Rouge : valeurs fortes

Le critère SR_i au Grand Lyon est plus simple qu'à eauservice Lausanne. Cependant, les trois caractéristiques des éléments vulnérables sont incluses (cf. tableau 11.5). En effet, le Grand Lyon considère que lorsqu'une chaussée est coupée, cela risque de perturber beaucoup de voitures donc ils ont mis un poids (une valeur) importante. En revanche, lorsqu'un trottoir est coupé en raison de travaux cela va perturber uniquement quelques piétons moins vulnérables (qu'une voiture) car ils pourront circuler sur la chaussée.

Valeur de SR_i	Description
1	Sous chaussée
0,7	Indéterminée
0.4	Sous trottoirs et autres

TABLEAU 11.5: SR_i au Grand Lyon [Grand Lyon, 2013a]

Deux exemples d'application de l'équation 11.1 sur le territoire d'eauservice Lausanne sont portés sur la figure 13.17 du chapitre 13.

11.4.3 Discussion et perspectives d'amélioration

Nous voyons deux perspectives pour améliorer l'indicateur $I3P$.

❶ Tout d'abord, nous avons vu que la notion de **valeur** dans SR_i au Grand Lyon et à eauservice Lausanne consiste à attribuer un coefficient (une importance) dans [0 ; 1] aux éléments vulnérables situés au-dessus des tronçons en fonction de leur quantité et de leur vulnérabilité. Cette **valeur** aurait pu être monétarisée plutôt que d'être transformée en un coefficient sans unité. Par exemple, dans le logiciel Australien PARMS, il existe un indicateur de risque, construit quasiment comme $I3P$ mais avec un SR_i monétarisé (cf. tableau 11.6). L'unité de SR_i est alors basée sur le dollar australien. La base de connaissance de cet indicateur est obtenue grâce à des méthodes issues de l'économie de l'environnement (comme l'évaluation contingente, la méthode des coûts de transport ou la méthode des prix hédoniques[6]) [Davis et al., 2008; Large, 2008]. La monétarisation de la valeur a l'avantage de mettre tous les indicateurs de risque dans la même unité (euros ou dollars ou francs suisses) puis de minimiser ou maximiser une fonction objectif tel que la VAN (valeur actuelle nette) dans une ACB (analyse coûts bénéfices). Cette méthode est détaillé dans l'annexe F.

Le tableau 11.6 indique par exemple que couper une rue commerçante en Australie à cause de la réhabilitation d'un tronçon entre 18 et 19 heures coûte 3,46 dollars australiens par véhicule bloqué. SR_i est ensuite multiplié par le nombre de véhicules bloqués. $I3P$ dans ce cas, a donc à la fin une unité monétaire, qui est plus compréhensible que les unités que nous obtenons dans la section 11.4.2. En effet, les unités de $I3P$ dans Optimeau sont "des heures pondérées par an concernant les véhicules roulant au dessus du réseau ". Une perspective d'amélioration de notre indicateur $I3P$ serait donc de nous inspirer de cette vision anglo-saxonne pour estimer la valeur de nos éléments vulnérables.

Localisation / horaire	6h00-9h00	9h00-16h00	16h00-19h00	19h00-6h00
Quartier central des affaires	0,57	0,63	0,87	0,06
Artère principale	1,23	0,52	1,75	0,02
Rue commerçante	1,98	2,52	3,46	0,03
Rue de banlieue	0	0	0	0

Tableau 11.6: SR_i dans le logiciel Australien PARMS ($/véhicule/heure) [Burn et al., 2002]

❷ Enfin, il est à noter que nous avons fait l'hypothèse que SR_i et EDI_i sont stables dans le temps c'est à dire qu'ils ne dépendent pas de l'année prospective y. Cependant, il est clair que cette hypothèse est dans la réalité erronée. SR_i dépend de l'urbanisation. Or, l'urbanisation est un phénomène qui évolue sur le long terme. Par conséquent, il serait intéressant pour améliorer notre indicateur de créer des SR_i dépendant du temps au sein des scénarios prospectifs (forte/ faible urbanisation, etc.).

Nous venons de présenter le risque de coupure de la voirie $I3P$. Or, le risque que les AOEP cherchent le plus à éviter sont les coupures d'eau $I2P$. Nous allons présenter comment il est estimé dans Optimeau.

11.5 Risque de coupure d'eau : $I2P$

11.5.1 Cadre préliminaire

Nous allons aborder maintenant le risque de dérangement des consommateurs liés à une baisse de volume d'eau ou à une coupure d'eau suite à une fuite ou à des travaux sur le réseau d'eau potable.

6. En anglais : *contingent valuation, travel cost method et hedonic pricing method*

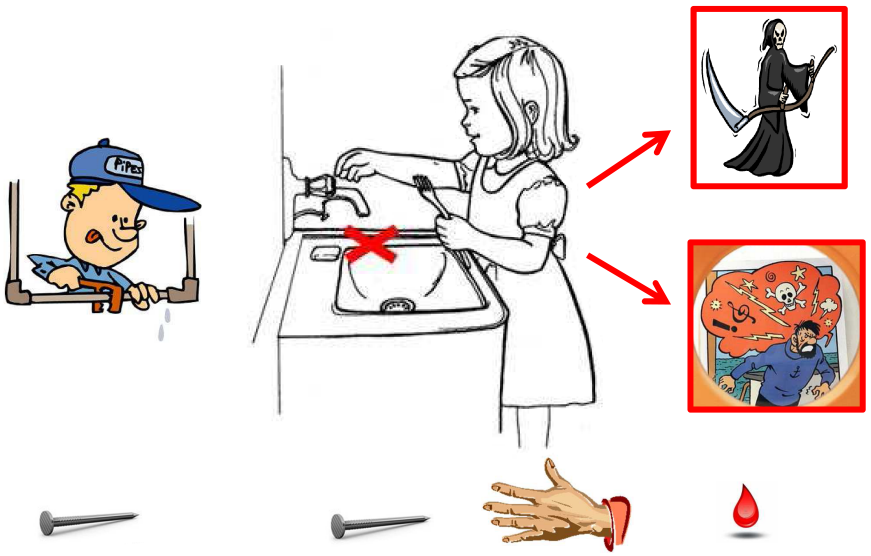


FIGURE 11.5: Schéma du risque de dérangement des consommateurs lié à une coupure d'eau (ou une baisse de volume) induite par une fuite sur le réseau

Dans ce cas, le **danger primaire** est la défaillance d'une canalisation et sa réhabilitation. Le **danger secondaire** est une baisse de volume d'eau au robinet ou une coupure d'eau. Les **éléments vulnérables** sont les consommateurs d'eau (hôpitaux, dialysés, dentiste, usine de bière, coiffeur, crèche, maison, etc.). Les **dommages** peuvent aller du simple dérangement, énervement des consommateurs, en passant par la baisse du chiffre d'affaire de certaines entreprises, jusqu'à la déshydratation de personnes fragiles (cf. figure 11.5).

11.5.2 Présentation de la méthode de calcul

Le risque de rupture de la continuité du service $I2P$ pour une année y future s'écrit selon l'équation 11.2.

$$I2P(y) = \sum_i I2P_i(y) = \sum_i [I1P_i(y) \times EDI_i \times NPS_i \times SC_i] \tag{11.2}$$

Avec pour chaque tronçon i, $I1P_i$ est l'espérance du nombre de défaillances à venir sur ce tronçon (cf. chapitre 10), EDI_i est le temps d'intervention sur ce tronçon (durée de la coupure d'eau) en heures (cf. tableaux 11.2 et 11.3), NPS_i [7] est le nombre de personnes raccordées à ce tronçon pour leur alimentation en eau et SC_i [8] est un critère qui prend en compte la vulnérabilité et la valeur des clients alimentés par ce tronçon.

Concernant le danger, $I1P_i$ est donc le paramètre prenant en compte sa probabilité d'occurrence et EDI_i son intensité. Concernant les éléments vulnérables, NPS_i prend en compte la quantité d'éléments vulnérables et SC_i est censé ne prendre en compte que leur vulnérabilité et leur valeur. Néanmoins, dans les faits, nous constatons que les critères SC_i des terrains d'étude font tous appel à une notion de quantité. Ceci peut donc être redondant avec NPS_i.

Nous allons détailler NPS_i et SC_i.

Tout d'abord, NPS_i est estimé en multipliant le nombre de branchements sur le tronçon i par le nombre moyen d'habitants par branchement sur ce tronçon.

7. NPS : Number of People Supplied
8. *SC* : Sensitivity of customer

Ensuite, le tableau 11.7 présente SC_i à eauservice Lausanne. Nous pouvons nous rendre compte que SC_i contient le critère de vulnérabilité (clients sensibles), celui de la valeur (des poids sont attribués) mais aussi un peu du critère de quantité (densité de population).

SC_i	Description
1	Clients sensibles
0.6	Zone industrielle sensible
0.5	Zone industrielle normale
0.3	Haute densité
0.2	Vieille ville
0.2	Centre village
0.2	Moyenne densité
0.1	Faible densité
0	Conduites de transport et bouclage
0	Zone verte (arborée, engazonnée)

Tableau 11.7: SC_i à eauservice Lausanne [Apotheloz, 2009, p. 5]

Dans le même ordre d'idées, SC_i au Grand Lyon (cf. tableau 11.8) contient de la vulnérabilité (cf. les V_X dans le tableau 11.9), de la valeur (son coefficient attribué) et aussi de la quantité ("plusieurs" $\neq$ "au moins un)".

SC_i	Description
1	Au moins un client $\in V_1$
0.7	Au moins un client $\in V_2$ ou plusieurs $\in V_3$
0.3	1 client $\in V_3$
0	Que des clients non vulnérables

Tableau 11.8: SC_i des éléments vulnérables au Grand Lyon autour du tronçon i

V_X	Type d'éléments vulnérables	Vulnérabilité
V_1	Hôpitaux, maisons de retraite, dialysés, prisons	Forte
V_2	Restaurants, hôtels, écoles, crèches	Moyenne
V_3	Notables du Grand Lyon, activité industrielle, coiffeurs	Faible

Tableau 11.9: Hiérarchisation de la vulnérabilité V_X des éléments vulnérables au Grand Lyon

Deux exemples d'application de l'équation 11.2 sur le territoire d'eauservice Lausanne sont disponibles sur la figure 13.15 du chapitre 13.

11.5.3 Discussion et perspectives d'amélioration

Nous voyons trois perspectives pour améliorer l'indicateur $I2P$.

❶ Tout d'abord il serait intéressant que le critère de **quantité** ne soit pas présent à la fois dans SC_i et dans NPS_i. Y arriver demanderait de créer une base de données exhaustive sur tous les clients, afin de connaître leur vulnérabilité individuelle, et leur valeur propre. Ensuite, il faudrait connaitre lorsqu'un tronçon casse, quels sont les usagers impactés précisément et effectuer la somme pour tous les usagers impactés du produit de leur vulnérabilité individuelle par leur valeur propre. Le SIG est alors un outil indispensable pour réaliser ce croisement. Cette pratique est très courante dans le domaine du risque d'inondation fluviale.

❷ Ensuite, l'indicateur de l'équation 11.2 prend en compte l'impact de défaillances sur un tronçon vis-à-vis d'usagers du voisinage. Néanmoins, un tronçon n'alimente pas forcément que les personnes au-dessus de lui. De plus, cet indicateur ne précise pas si l'usager concerné est impacté par une légère baisse de pression ou une coupure d'eau totale. Or, pour l'usager ces deux situations ne sont en rien

similaires. Par conséquent, il semble pertinent d'introduire dans $I2P$ le résultat d'un calcul de criticité hydraulique comme ce qui est fait dans UDY [9] d'AWARE-P ou HCI [10] de CARE-W-RelNet. En effet, HCI est un indicateur qui estime le volume d'eau qui ne sera pas délivré suite à la défaillance d'un tronçon. La difficulté ensuite consiste à attribuer ce volume non distribué aux clients concernés. De plus, lorsque les réseaux sont très maillés (cas du SEDIF, du Grand Lyon et d'eauservice Lausanne) même si un tronçon casse le tronçon voisin prendra surement le relais, ce qui complique fortement les calculs hydrauliques.

❸ Enfin, tout comme pour SR_i, il semble judicieux pour SC_i de monétariser la valeur plutôt que de fixer des coefficients entre 0 et 1. Cela permettrait que l'unité finale de notre indicateur soit en euro. Le résultat serait alors, à notre avis, plus intelligible. Actuellement, dans Optimeau, les unités d'$I2P$ sont des heures pondérées pour toutes les personnes alimentées par le réseau par an.

Nous venons de présenter le risque de coupure d'eau $I2P$, le risque de coupure de la voirie $I3P$, nous allons maintenant présenter un autre risque important pris en compte dans Optimeau : le risque inondation $I4P$.

11.6 Risque inondation : $I4P$

11.6.1 Cadre préliminaire

Nous allons présenter $I4P$ essayant d'estimer le risque de provoquer des dommages suite à une inondation induite par une défaillance du réseau d'eau potable.

FIGURE 11.6: Schéma du risque de dégradation de biens par une inondation liée à une fuite

Dans ce cas, le **danger** est la fuite d'une canalisation d'eau potable. Les **éléments vulnérables** sont les biens (voitures, bitume de la chaussée, maisons, etc.) ou les personnes à proximité. Les **dommages** potentiels vont de l'énervement des résidents, en passant par la destruction de biens, l'inondation de caves, la perte de chiffres d'affaires de certaines entreprises, et dans le pire des cas, jusqu'à blesser voire tuer des êtres vivants (cf. figure 11.6).

La dégradation de biens à cause de fuites arrive régulièrement dans chacun de nos terrains d'étude. Le plus fréquemment rencontré est la détérioration de la chaussée. Par exemple eauservice Lausanne a comptabilisé entre [2011, 2013] 154 dommages sur la chaussée. La médiane des coûts de ces dégâts se situe à 11 000 CHF par dégradation de chaussée [Eauservice, 2013a, 2015a].

9. UDY : expected volume of Unmet Demand over one Year
10. HCI : Hydraulic Critical Index

La détérioration d'autres biens est beaucoup plus rare mais peut être plus coûteuse. Par exemple eauservice a comptabilisé 18 dégâts aux tiers entre [2001, 2013] dont la médiane est à 5 000 CHF. Il est à noter qu'eauservice a connu le 11 novembre 2012 une inondation rare mais très grave. En effet, une fuite d'eau potable s'est infiltrée dans les locaux du Comité International Olympique et a dévasté notamment tous ses serveurs informatiques. La sinistre à causé environ 14 millions de CHF de dégâts soit deux fois le budget annuel d'eauservice [Eauservice, 2013a, 2015a].

11.6.2 Présentation de la méthode de calcul

Le risque inondation $I4P$ pour l'année y future s'écrit selon l'équation 11.3.

$$I4P(y) = \sum_i I4P_i(y) = \sum_i [I1P_i(y) \times {\phi_i}^2 \times H_i \times SI_i] \tag{11.3}$$

Avec pour chaque tronçon i, $I1P_i$ est le nombre de défaillances à venir sur ce tronçon (cf. chapitre 10), ϕ_i est son diamètre (en mm), H_i est la pression de l'eau dans le tronçon (en bar [11]) et SI_i [12] est un critère qui prend en compte la vulnérabilité, la quantité et la valeur des biens environnant ce tronçon.

Concernant le **danger**, $I1P_i$ est donc le paramètre prenant en compte son **occurrence** alors que ${\phi_i}^2$ et H_i son **intensité**. L'intensité d'une inondation est classiquement caractérisé par 4 éléments : la vitesse du courant [13], la hauteur d'eau [14], l'étendue de la submersion [15] et la durée de la submersion [Jha et al., 2012]. Or, le débit de fuite potentiel est lié au débit transitant dans la canalisation. Ce dernier dépend du diamètre ϕ_i et de la pression.

Concernant les éléments vulnérables, SI_i prend en compte la quantité, la vulnérabilité et la valeur des infrastructures.
Ainsi, à eauservice SI_i prend bien en compte la vulnérabilité ("sensible"), leur quantité (on suppose que quand il y a beaucoup d'habitants, il y a beaucoup d'infrastructures) et leur valeur (poids) (cf. tableau 11.10).

SI_i	Description
1	Vieille ville
0.8	Zone industrielle sensible
0.6	Haute densité
0.5	Centre village
0.4	Moyenne densité
0.4	Zone industrielle normale
0.2	Faible densité
0	Conduite de transport et bouclage
0	Zone verte (arborée ou engazonnée)

Tableau 11.10: SI_i à Lausanne [Apotheloz, 2009, p.7] fonction des caractéristiques des biens vulnérables autour des conduites

Notons qu'au Grand Lyon SI_i est issue de la multiplication de VFH_i [16] par SFI_i [17]. Nous retrouvons aussi les trois critères : la **vulnérabilité** (les voies ferrées et les parking sont plus vulnérables que les autres infrastructures), la **quantité** (à Lyon et Villeurbanne les constructions sont très nombreuses)

11. 1 bar vaut 10^{-5} kg.m^{-1}.s^{-2} dans les unités du système international
12. SI : Sensitivity of Infrastructure
13. plus la vitesse est grande plus les dommages peuvent être importants
14. plus la hauteur d'eau est grande plus les dommages peuvent être importants
15. plus l'étendue est importante et plus les dommages peuvent être importants
16. VFH : Vulnerable Values in Housing area
17. SFI : Sensitivity to Flooding of Industrial or commercial areas

et la **valeur** (poids). Il est intéressant de noter que le Grand Lyon considère aussi la présence ou non de Balmes[18] dans cet indicateur.

VFH_i	Description
0.8	Lyon-Villeurbanne et zones de balmes
0.4	Lyon-Villeurbanne sans balmes
0.3	Périphérie et zones de balmes
0.1	Périphérie sans balmes

Tableau 11.11: VFH_i [Grand Lyon, 2013]

SFI_i	Description
1	Voies ferrées et parking et zones balmes
0.9	Voies ferrés et zones de zones balmes
0.9	Parking et zones de balmes
0.8	Parking et voies ferrées sans balmes
0.5	Voies ferrées sans balmes
0.3	Parking sans balmes

Tableau 11.12: SFI_i [Grand Lyon, 2013]

Deux exemples d'application de l'équation 11.3 sur le territoire d'eauservice sont disponibles sur la figure 13.19.

11.6.3 Discussion et perspectives d'amélioration

Nous voyons trois perspectives pour améliorer l'indicateur $I4P$.

❶ Tout d'abord, $I4P$ prend en compte l'impact d'une fuite d'un tronçon vis-à-vis des infrastructures proches de lui. Cependant, l'écoulement de l'eau en surface suit les lignes de plus grandes pentes. Or, à Lausanne et au Grand Lyon les dénivelés sont très importants donc les dommages induits par une inondation peuvent être très éloignés de l'origine de la fuite. Par conséquent, il serait intéressant de simuler des fuites dans un modèle hydraulique à surface libre dépendant de la topographie du territoire puis de visualiser où la fuite s'engouffrerait. Ces types de simulations sont très classiques dans le domaine des inondations fluviales et maritimes.

❷ Ensuite, il semblerait intéressant que pour chaque infrastructure, les services d'eau différencient plus nettement leur valeur de leur vulnérabilité. Parvenir à faire cela demanderait de créer une base de données exhaustive sur toutes les infrastructures, afin de connaître leur vulnérabilité individuelle, et leur valeur propre. Ensuite, il faudrait connaitre précisément les infrastructures impactées par la fuite d'un tronçon et effectuer la somme pour toutes ces infrastructures impactés du produit de leur vulnérabilité individuelle par leur valeur propre. Le SIG est alors un outils indispensable pour réaliser ce croisement. Cette pratique est très courante dans le domaine des risques naturels (séisme, inondation, etc.).

❸ Enfin, tout comme pour SR_i et SC_i, il semble judicieux pour SI_i de monétariser la valeur plutôt que de fixer des coefficients entre 0 et 1. En effet, cela permettrait que l'unité de l'indicateur $I3P$ soit plus intelligible. Actuellement, les unités d'$I4P$ sont des $mm^2 \cdot bar$ par an pondérés.

Nous venons de présenter le risque de coupure d'eau $I2P$, le risque de coupure de la voirie $I3P$ et le risque inondation $I4P$ nous allons maintenant présenter un autre risque pris en compte dans Optimeau : le risque d'effondrement du sol $I5P$.

11.7 Risque d'effondrement du sol : $I5P$

11.7.1 Cadre préliminaire

Nous allons présenter l'indicateur $I5P$ du risque de défaillances induisant un glissement de terrain ou de tout autre mouvement de sol pouvant provoquer des dommages sur des biens et/ou des personnes.

18. Dans la région lyonnaise, les balmes désignent de manière globale tous coteaux escarpés, pentes ou talus. Sur ces territoires les fuites d'eau peuvent facilement provoquer des glissements de terrains [Mongereau and Vinet, 2004]

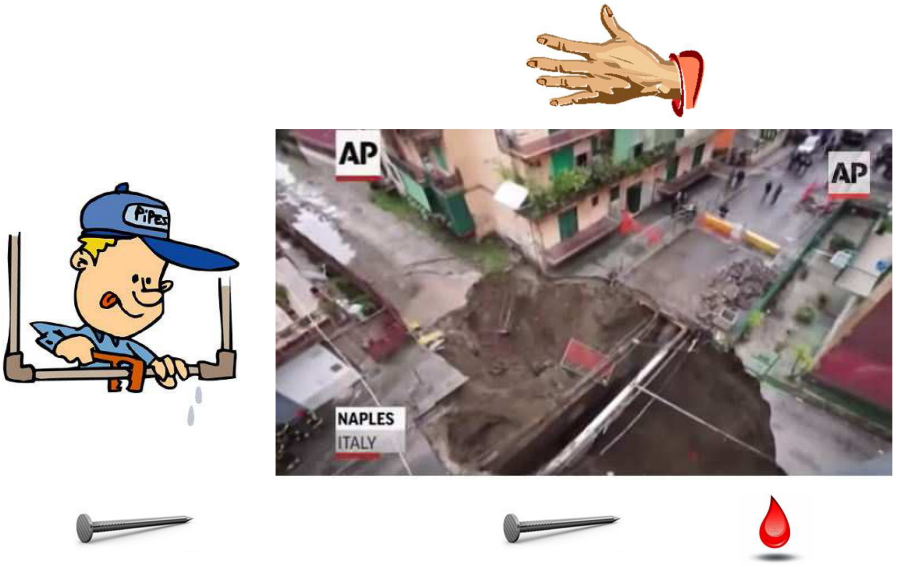


FIGURE 11.7: Schéma du risque de dommages aux biens ou aux personnes suite à un effondrement de terrain lié à une fuite

Dans ce cas, le **danger primaire** est la fuite d'une canalisation d'eau potable. Le **danger secondaire** est l'effondrement du terrain à cause de cette fuite. Les **éléments vulnérables** sont les biens (voitures, bitume de la chaussée, maison, ...) ou les personnes à proximité. Les **dommages** potentiels vont de l'énervement des résidents, en passant par la destruction de biens, la perte de chiffre d'affaire de certaines entreprises, et dans le pire des cas, jusqu'à blesser voire tuer des êtres vivants (cf. figure 11.7).

Ce risque est très présent sur le territoire du Grand Lyon et quasiment inexistant dans les deux autres terrains d'étude. Par conséquent, cet indicateur n'a été créé et calculé que pour le Grand Lyon. Les zones de balmes sont très importantes dans la gestion patrimoniale du réseau du Grand Lyon. Dans ces zones de balmes (Mont Fourvière, Croix-Rousse, etc.) l'équilibre initial des terrains a été compromis par l'urbanisation. Dernier exemple en date, le 5 décembre 2013, une fuite d'eau issue d'une rupture de canalisations dans une zone de balmes (la Montée de l'observance à Lyon) pourrait avoir provoqué un glissement de terrain et un éboulement partiel de la colline qui surplombe le conservatoire du Grand Lyon [Tribot Laspière, 2013]. Heureusement il n'y a eu aucun blessé.

11.7.2 Présentation de la méthode de calcul

Le risque de glissement de terrain $I5P$ pour l'année y future s'écrit selon l'équation 11.4.

$$I5P(y) = \sum_i I5P_i(y) = \sum_i [I1P_i(y) \times {\phi_i}^2 \times H_i \times LS_i] \tag{11.4}$$

Avec pour chaque tronçon i, $I1P_i$ est le nombre de défaillances à venir sur ce tronçon (cf. le chapitre 10), ϕ_i est le diamètre (en mm), H_i est la pression de l'eau dans le tronçon (en bar) et LS [19] est un critère qui indique la présence ($LS = 1$) ou l'absence de balmes ($LS = 0$).

Tout comme pour l'indicateur du risque inondation, ici $I1P_i$ est le paramètre prenant en compte la **probabilité d'occurrence** alors que ${\phi_i}^2$ et H_i l' **intensité** du **danger primaire**. LS est un critère caractérisant la **probabilité d'occurrence** du **danger secondaire**. En revanche, il n'y a aucun paramètre concernant les éléments vulnérables ce qui signifie que l'hypothèse sous-jacente à $I5P$ est

19. LS : LandSlide

que les caractéristiques des éléments vulnérables (infrastructures, habitants) sont homogènes (même densité de population, même valeurs, etc.) dans toutes les zones de balmes.

11.7.3 Discussion et perspectives d'amélioration

Nous voyons deux perspectives pour améliorer l'indicateur $I5P$

❶ Tout d'abord, il semble intéressant de rajouter dans cet indicateur un paramètre qui prenne en compte les caractéristiques des résidents et des biens en zones de balmes. A priori, vu que les balmes couvrent un large territoire, l'hypothèse d'homogéneité ne doit pas être toujours valide.

❷ Enfin, tout comme pour SR_i, SC_i et SI_i, une fois que les biens et les résidents auront été caractérisés, il semble judicieux de monétariser leur valeur pour obtenir une unité plus claire. Actuellement, les unités d'$I5P$ sont des mm^2·bar par an.

Nous venons de présenter le risque de coupure d'eau $I2P$, le risque de coupure de la voirie $I3P$, le risque inondation $I4P$ et le risque d'effondrement du sol $I5P$, nous allons maintenant présenter le volume de fuite $I6P$.

11.8 Volume de fuite : $I6P$

11.8.1 Cadre préliminaire

Nous allons maintenant présenter l'indicateur $I6P$ essayant d'estimer le volume des fuites survenues sur le réseau d'eau potable. Si nous considérons que toutes les ressources en eau dans les territoires étudiés sont vulnérables aux prélèvements par l'AOEP, alors cet indicateur peut être aussi nommé le risque de gaspillage des ressources en eau à cause des fuites.

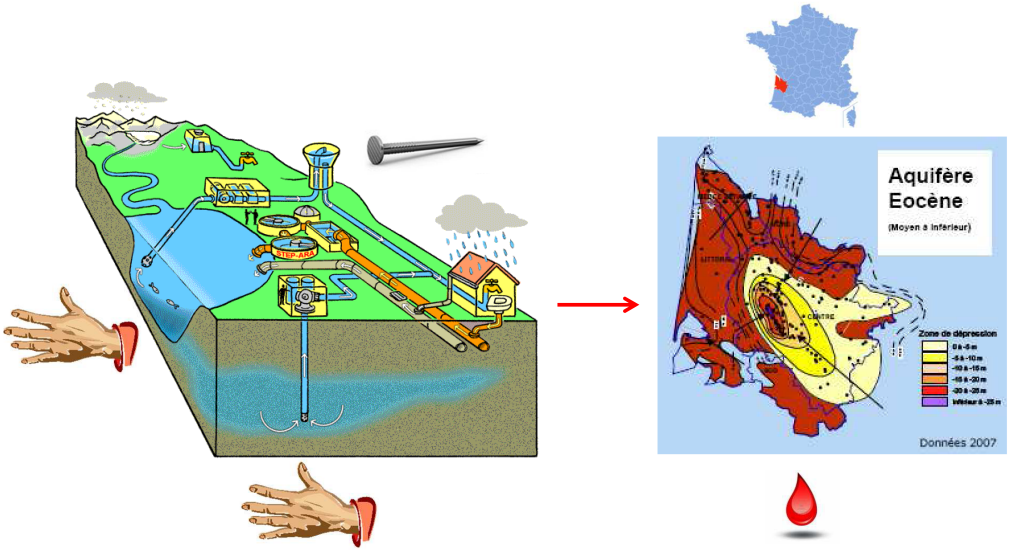


FIGURE 11.8: Schéma du risque de dégradation de nappes à cause des prélèvements pour l'eau potable

Dans ce cas, le **danger** est le prélèvement en eau excessif par l'AOEP. Les **éléments vulnérables** sont les ressources en eau (nappes, rivières ou sources). Les **dommages** potentiels peuvent aller de la baisse significative de la ressource jusqu'à son épuisement. La figure 11.8 illustre cette situation avec la nappe de l'éocène située dans le département français de la Gironde [SMEGREG, 2009a]. En effet, vu que les prélèvements d'eau (dont ceux pour la distribution de l'eau potable) sont localement trop

importants, son régime d'exploitation n'est pas durable. Ainsi, la carte sur la figure 11.8 indique des zones de dépression (en rouge). A terme de l'eau salée de l'océan atlantique risque de rentrer dans cette nappe et ainsi la polluer pour très longtemps.

Vu qu'aucun de nos terrains d'étude nous a indiqué qu'ils prélèvent l'eau dans une nappe déficitaire, nous avons décidé de nous focaliser uniquement sur le volume de perte sans prendre en compte les caractéristiques des ressources. Le volume de perte de leur réseau est un indicateur essentiel dans le suivi de leur performance (cf. les objectifs présentés dans la section 8.1).

11.8.2 Justification du choix de la méthode de calcul

Les modèles pour estimer les volumes de fuites à venir sont très nombreux [20]. Ces modèles peuvent être regroupés en 3 grands groupes.

Le premier groupe, comme ceux dans [Kanakoudis and Tolikas, 2001; Cousin and Taugourdeau, 2015] utilisent une durée de maintien en service des canalisations fixe et/ou réalise une croissance du volume de fuite en fonction de l'âge du tronçon ou du réseau. Or un vieux tronçon n'est pas forcément en mauvais état et un jeune pas forcément en bon état. Nous avons donc décidé de ne pas utiliser ce type de modèles.

Ensuite, le second groupe rencontré pour estimer le volume de fuite à venir, comme celle des modèles TCO-LCA [Bayart and Vargas, 2015] et Kanew [Kropp, 2013], se basent sur l'indice linéaire de perte (ILP). L'ILP concerne les fuites sur le réseau et sur les branchements. Cependant, dans ce manuscrit nous nous focalisons uniquement sur les fuites sur le réseau sans les branchements. Or, la grande majorité du volume de fuites provient des branchements, depuis le dispositif de prise en charge jusqu'au compteur de l'usager [Lambert et al., 2000; MEDDE, 2013]. L'ILP serait donc en majorité lié aux fuites sur les branchements. Par conséquent, il serait très difficile dans notre cas de travailler avec l'ILP et donc ce style de modèles. De plus, l'échelle la plus petite pour estimer l'ILP est le secteur c'est à dire l'ILP concerne toujours un groupe de tronçon et non un seul tronçon.

Nous avons donc choisi d'opter pour le troisième groupe de modèles comme celle dans [Lambert et al., 2000; Pillot et al., 2015] qui consiste à utiliser le nombre de défaillances et un volume unitaire par défaillance. Ainsi, sur un réseau rural en France [Pillot et al., 2015] a estimé ce volume à 980 m^3 par fuite. [Lambert et al., 2000] sur 27 réseaux dans 20 pays différents a estimé ce volume a 864 m^3.

Eauservice Lausanne nous a fourni une base de données avec une centaine de fuites survenues entre 2001 et 2013, pour lesquelles les agents de terrain ont estimé les volumes de fuite. Le minimum est de 2 m^3/ fuite, le maximum de 30 000 m^3/fuite, la médiane de 290 m^3/fuite et la moyenne a 1 109 m^3/fuite. Vu qu'il y a peu d'évènements extrêmes et qu'ils perturbent la moyenne, nous avons choisi, pour l'indicateur $I6P$ sur le territoire d'eauservice d'utiliser la médiane. Ce choix reste cependant subjectif.

11.8.3 Présentation de la méthode de calcul

Le volume de fuite $I6P$ à eauservice Lausanne pour l'année y future s'écrit selon l'équation 11.5.

$$I6P(y) = \sum_i I6P_i(y) = \sum_i [I1P_i(y) \times 290 \times \phi_i/\phi_{moy}] \tag{11.5}$$

20. cf. notamment [Arreguín-Cortes and Ochoa-Alejo, 1997; Lambert et al., 2000; Kanakoudis and Tolikas, 2001; Le Quiniou and Sandraz, 2012b; Kropp, 2013; Bayart and Vargas, 2015; Cousin and Taugourdeau, 2015; Pillot et al., 2015].

Avec pour chaque tronçon i, $I1P_i$ est le nombre de défaillances à venir sur ce tronçon (cf. chapitre 10), 290 m^3/fuite est le volume médian d'une fuite à eauservice Lausanne, ϕ_i est le diamètre du tronçon i et ϕ_{moy} est le diamètre moyen du réseau.

$I1P_i$ est le paramètre prenant en compte la **probabilité d'occurrence** et $290 \times \phi_i / \phi_{moy}$ l'**intensité** du **danger**. Nous avons pris en compte le diamètre du tronçon pour prendre en compte le fait que plus un tronçon est de diamètre important plus l'intensité de sa fuite peut-être grande par rapport à un tronçon de petit diamètre.

11.8.4 Discussion et perspectives d'amélioration

Nous voyons quatre perspectives pour améliorer l'indicateur $I6P$.

❶ Tout d'abord, le volume de fuite dépend de la vitesse d'écoulement et donc de la pression de l'eau (cf. expression de Torricelli). Il serait donc intéressant de la prendre en compte dans cette équation tout comme ce qui a été réalisé dans Vision [UKWIR, 2005, 2009; Le Quiniou and Sandraz, 2012a,b]. Des études sont actuellement menées à l'IRSTEA pour travailler dans cet axe.

❷ Ensuite, si c'est vraiment du point de vue des ressources en eau que l'on se place, il serait intéressant de rajouter dans cet indicateur un paramètre qui prenne en compte les caractéristiques des éléments vulnérables : les ressources (déficitaires, excédentaires, etc.).

❸ L'indicateur, que les gestionnaire ont l'habitude d'utiliser est l'ILP qui s'établit à l'échelle du réseau de transport et de distribution (sans l'adduction) et des branchements. Il serait intéressant de trouver une méthode qui connecte $I6P$ le volume de fuite sur le réseau d'adduction, de transport et de distribution avec l'ILP. Ce ne sera pas une chose aisée car pour l'instant les périmètres de ces deux indicateurs ne sont pas du tout les mêmes.

❹ Si l'on se place du point de vue de l'environnement, tout comme pour SR_i, SC_i et SI_i, une fois que les ressources en eau auront été caractérisées, il semble judicieux de monétariser leur valeur. Ou, si l'on se place du point de vue des coûts directs du gestionnaire, il semble intéressant d'estimer les coûts énergétiques, de traitement de l'eau (chlore, etc.) liés à ces pertes en eau.

❹ Enfin, le lien entre le nombre de défaillances et un volume de fuite n'est pas clairement établi. En effet, certaines fuites n'ont pas été détectées (cf. figure 3.12), donc il existe des tronçons sans défaillance qui peuvent générer des volumes de fuite importants.

Quatre exemples d'application de l'équation 11.5 sur le territoire d'eauservice sont disponibles sur les figures 13.21 et 13.22.

11.9 Conclusion

Nous avons présenté comment nous estimons dans le modèle OPTIMEAU les 5 indicateurs de performance suivants : le risque de coupure d'eau $I2P$, le risque de coupure de la voirie $I3P$, le risque d'inondation $I4P$, le risque d'effondrement du sol $I5P$ et le volume de fuite $I6P$. Pour trois d'entre eux nous prenons en compte les caractéristiques du danger et des éléments vulnérables (cf. tableau 11.13) alors que pour les deux derniers nous émettons l'hypothèse que tous les éléments vulnérables ont les mêmes caractéristiques (cf. cases vide dans le tableau 11.13).

Risque	Indicateur	Danger		Éléments vulnérables		
		Probabilité	Intensité	Quantité	Vulnérabilité	Valeur
Coupure d'eau	$I2P$	X	X	X	X	X
Coupure voirie	$I3P$	X	X	X	X	X
Inondation	$I4P$	X	X	X	X	X
Effondrement de sol	$I5P$	X	X			
Volume fuite	$I6P$	X	X			

Tableau 11.13: Critères pris en compte dans les indicateurs de risque d'Optimeau (X : oui ; cellule vide : non)

Grâce au calcul de ces indicateurs, les scénarios pourront être comparés entre eux en matière de risque. En effet, vu que les unités d'$I2P$, d'$I3P$, d'$I4P$ et d'$I5P$ sont difficiles à comprendre, nous n'avons pas d'ordres de grandeur en mémoire pour évaluer ces indicateurs (bon ? médiocre ? mauvais ?). Par conséquent, l'évaluation de ces indicateurs doit toujours s'effectuer en relatif d'un scénario prospectif par rapport à un autre. C'est ce que nous ferons dans le chapitre 13.

Nous avons présenté dans ce chapitre comment estimer 5 risques différents, nous allons maintenant présenter dans le chapitre suivant les modèles économiques et les méthodes de calcul des indicateurs qui ont été choisis dans le modèle OPTIMEAU.

Chapitre 12

Moyens financiers à injecter dans chaque stratégie

Tous les terrains d'étude cherchent à maîtriser leurs coûts. Dans ce chapitre nous allons dans un premier temps présenter une synthèse sur les différents modèles économiques nommés M3 dans le chapitre 2 puis nous allons exposer les deux indicateurs économiques présents dans la démarche OPTIMEAU.

12.1 Justification du choix de la méthode de calcul

12.1.1 Périmètre des analyses économiques

Les modèles pour estimer les coûts et les bénéfices à venir de la gestion patrimoniale des canalisations d'eau potable sont très nombreux [1]. Cependant, en fonction du périmètre choisi par le créateur du modèle, chaque outil n'estimera pas les mêmes coûts et les mêmes bénéfices (cf. figure 12.1).

Se pose donc la question des périmètres pertinents.
En général, en économie, il existe trois périmètres anthropocentrés [2] différents pour estimer les coûts et les bénéfices (cf. figure 12.1) :

- le premier est le périmètre du commanditaire du projet, ici, ce sont **les AOEP**. Sur ce périmètre les coûts et les bénéfices sont "marchands" c'est à dire qu'ils correspondent aux flux ***directs*** dans leur trésorerie. Les coûts directs sont dans ce cas : le coût de renouvellement des canalisations, de leur remplacement, de leur réhabilitation, le coût de l'électricité pour faire fonctionner les pompes, etc. Les bénéfices directs marchands sont en terme comptable et financier les recettes concrètes que vont rapporter les actions, par exemple les recettes liées à la facture d'eau. De plus, lorsqu'on compare deux scénarios, les bénéfices peuvent être des coûts évités (cf. cercle jaune sur la figure 12.1).
- le second périmètre est celui dans lequel les AOEP vont induire des externalités (des effets) ***indirectes*** sur les **êtres humains** dans un **laps de temps assez court**. Contrairement, au premier périmètre ces externalités sont "**non-marchandes**" [3]. A cette échelle nous pouvons citer

1. Par exemple [Shamir and Howard, 1979; Clark et al., 1982; Walski and Pelliccia, 1982; Walski, 1987; Kim and Mays, 1994; Savic and Walters, 1997; Arreguín-Cortes and Ochoa-Alejo, 1997; Werey, 2000a,b; Park, 2000; Kanakoudis and Tolikas, 2001; Le Gauffre et al., 2002b; Montori, 2002; Loganathan et al., 2002; Skipworth et al., 2002; Werey et al., 2003; Essamin et al., 2004; Brémond et al., 2005; Engelhardt and Skipworth, 2005; Geem, 2006; Dandy and Engelhardt, 2006; Kuhr et al., 2007; Werey et al., 2007; Nafi et al., 2008; Davis et al., 2008; Kleiner et al., 2010; Le Quiniou and Sandraz, 2012b; Vitorino et al., 2012; Kropp, 2013; Rahilly et al., 2013; Naldeo, 2013; Shahata and Zayed, 2013; Bayart and Vargas, 2015; Cousin and Taugourdeau, 2015]
2. centrés sur les êtres humains
3. cf. définition dans la section 12.1.2

les bénéfices liés à la satisfaction des usagers, des citoyens et des résidents (pas d'interruption du service, peu de routes coupées, peu d'inondation, peu de glissement de terrain, etc.) ou au contraire les coûts des dommages sur ces mêmes personnes (rupture de la continuité régulièrement, routes trop souvent coupés, inondations fréquentes, etc.) (cf. cercle rouge sur figure 12.1). Si nous avions monétarisé les indicateurs précédents $I2P$ (coupure eau), $I3P$ (coupure voirie), $I4P$ (inondation) et $I5P$ (glissement de terrain) nous serions dans ce périmètre (cf. tableau 12.2)

- le dernier périmètre est celui où les AOEP vont provoquer des externalités ***induites*** sur **l'environnement** en général dans un laps de **temps plus long**. Comme le périmètre précédent ces externalités sont "**non-marchandes**". Nous pouvons citer, ici, par exemple le fait d'utiliser :
  - des techniques très émettrices de gaz à effets de serre pour la fabrication des tuyaux posés ;
  - ou des matériaux se dégradant mieux ou polluant moins en fin de vie que d'autres (acier versus plomb et polymères) ;
  - ou d'utiliser de l'électricité d'origine nucléaire, laissant des déchets radioactifs dans les sols, etc (cf. cercle bleu sur figure 12.1).
  Si nous avions monétarisé l'indicateur précédent $I6P$ (volume fuite) nous serions au moins dans ce périmètre (cf. tableau 12.2).

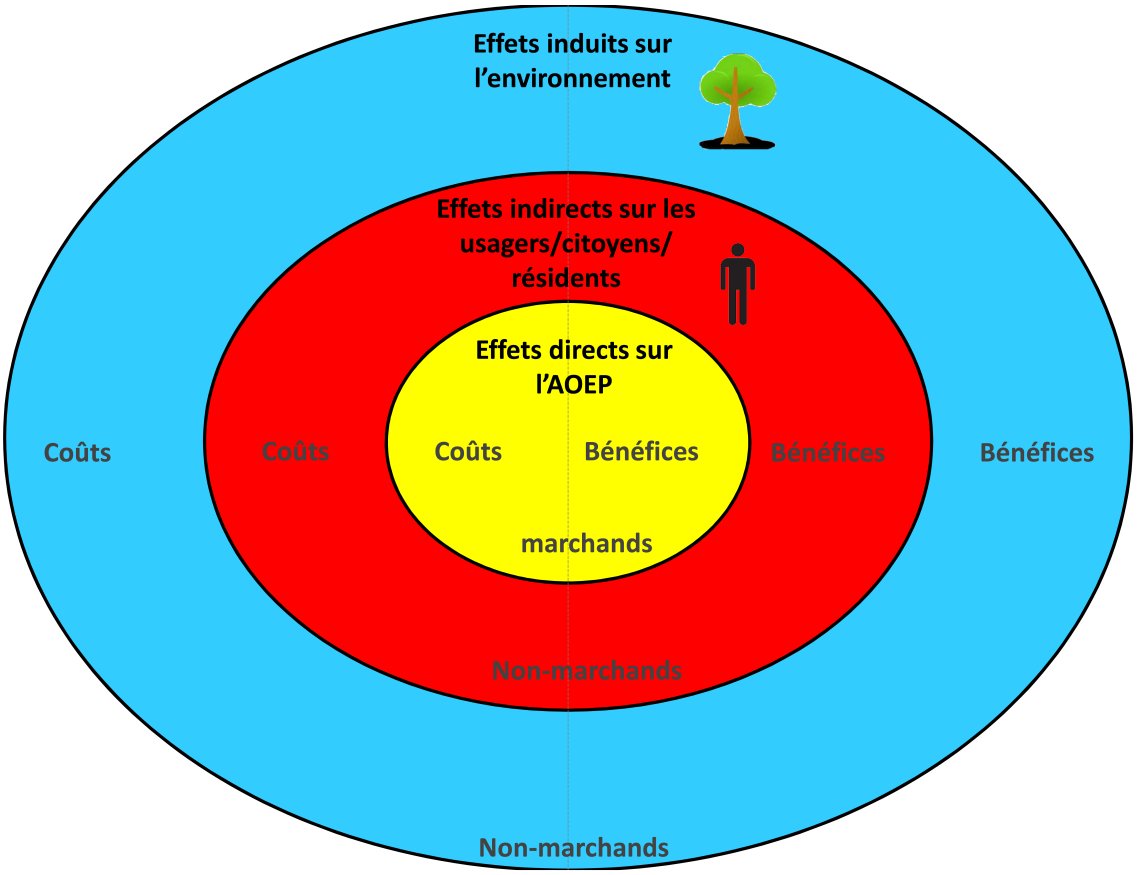


FIGURE 12.1: Les trois différents périmètres des analyses économiques

Lors de la revue bibliographique, nous nous sommes effectivement rendu compte que les modèles couvrent la totalité ou une partie de ces périmètres. Le tableau 12.1 synthétise pour certains modèles de gestion patrimoniale des canalisations, quels sont les coûts et les bénéfices pris en compte et à quel périmètre ils appartiennent.

Par exemple, le modèle NESSIE prend en compte seulement le coût du renouvellement des canalisations correspondant donc à une partie du périmètre jaune sur la figure 12.1. Dans le logiciel PARMS de nombreux coûts et bénéfices sont pris en compte (cf. tableau 12.1) dont la majorité appartiennent aux cercles jaune et rouge de la figure 12.1 et un seul (le volume de fuite) appartient au cercle bleu. Enfin, l'outil TCO-LCA est focalisé sur les coûts appartenant au cercle jaune et bleu de la figure 12.1 ; ce logiciel s'intéresse donc aux impacts directs et induits.

	Aspects pris en compte \ Noms des modèles / logiciels	Nessie	Patrimoine expert	Aware-P	SIROCO	Shamir et al. 1979	Park 2000	CARE-W-ARP	Walski 1987	WilCO	TCO-LCA	Cousin & Taugourd.	Vision	Kanew	Davis et al. 2008	PARMS
Coûts	Réparation des défaillances				X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
	Remplacement canalisations	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
	Réhabilitation canalisations										X					
	Fonctionnement (énergie, etc.)										X					
	Inspection, détection défaillance								X				X		X	X
	Pénalité, amende														X	X
	Dommages liés coupure d'eau									X					X	X
	Dommages liés coupure voirie									X					X	X
	Autres dommages (inondation, etc.)									X			X			X
	Perte d'eau							X	X		X	X	X			
	Autres Impacts environnementaux										X					
Bénéfices	Coûts évités réparations d'urgence													X	X	X
	Coûts évités mauvias remplacement														X	X
	Dommages évités (satisfaction usagers)															X
	Coûts évités fuites (eau non perdu)											X	X	X		X

TABLEAU 12.1: Les coûts et les bénéfices estimés dans certains modèles et logiciels de gestion patrimoniale des canalisations d'eau potable. En jaune : effets directs sur la'AOEP. En rouge : effets indirects sur les Hommes. En bleu : effets induits sur l'environnement

Pour en savoir plus sur ces modèles consultez la synthèse dans [Large, 2013] ou bien les références complètes ici [4]

Dans le modèle OPTIMEAU, nous avons fait le choix, de ne monétariser que deux coûts directs : $I1F$ le coût de renouvellement des canalisations et $I2F$ le coût des réparations des défaillances (cf. tableau 12.2) En effet, ce sont les deux indicateurs financiers qui nous ont été le plus demandés par les terrains d'étude. Les deux autres périmètres sont partiellement pris en compte au travers d'indicateurs de risque non monétarisés (cf. tableau 12.2).

Position	Nom court	N°	Direct	Indirect	Induit
Finance	Coûts renouvellements	I1F	X		
Finance	Coûts réparations	I2F	X		
Réalisation	Linéaire	I1R	X		
Réalisation	Taux renouvellement	I2R	X		
Réalisation	Age moyen	I3R	X		
Performance	Nb Défaillances	I1P	X	X	X
Performance	Risque coupure eau	I2P		X	
Performance	Risque coupure voirie	I3P		X	
Performance	Risque inondation	I4P		X	
Performance	Risque effondrement	I5P		X	
Performance	Volume fuite	I6P			X

TABLEAU 12.2: Périmètre des indicateurs du modèle OPTIMEAU. En jaune : effets directs sur l'AOEP. En rouge : effets indirects sociaux. En bleu : effets induits environnementaux

4. NESSIE [Rogers and Grigg, 2006; Kuhr et al., 2007; AWWA, 2010], Patrimoine expert [Naldeo, 2013], Aware-P [Vitorino et al., 2012], SIROCO [Brémond et al., 2005], Shamir et al 1979 [Shamir and Howard, 1979], Park 2000 [Park, 2000], CARE-W-ARP [Le Gauffre et al., 2002a,b, 2003], Walski 1987 [Walski, 1987], WilCO [Engelhardt and Skipworth, 2005], TCO-LCA [Bayart and Vargas, 2015], Cousin et Taugourd. [Cousin and Taugourdeau, 2015], Vision [UKWIR, 2005, 2009; Le Quiniou and Sandraz, 2012a,b], Kanew [Herz and Lipkow, 2002; Herz and Kropp, 2002; Herz et al., 2003; Kropp, 2003, 2013], Davis et al. 2008 [Davis et al., 2008] et PARMS [Burn et al., 2002, 2003; Rahilly et al., 2013]

12.1.2 Les écoles de pensée pour estimer les coûts et le bénéfices

Il existe différentes méthodes et "écoles" de pensée pour estimer les coûts et les bénéfices des actions (cf. figure 12.2) [Bouleau and Guérin-Schneider, 2011], [Nicholson, 1998]. Ces différentes méthodes ont chacune leur lot d'avantages et d'inconvénients. Par exemple les méthodes dite "gestionnaires" sont plus fiables car très précises mais moins transposables d'un service à l'autre que les autres méthodes (cf. figure 12.2). En revanche, les méthodes dites "économiste de l'environnement" sont moins fiables car moins précises [5] mais elles sont plus transposables d'un terrain d'étude à l'autre (cf. figure 12.2).

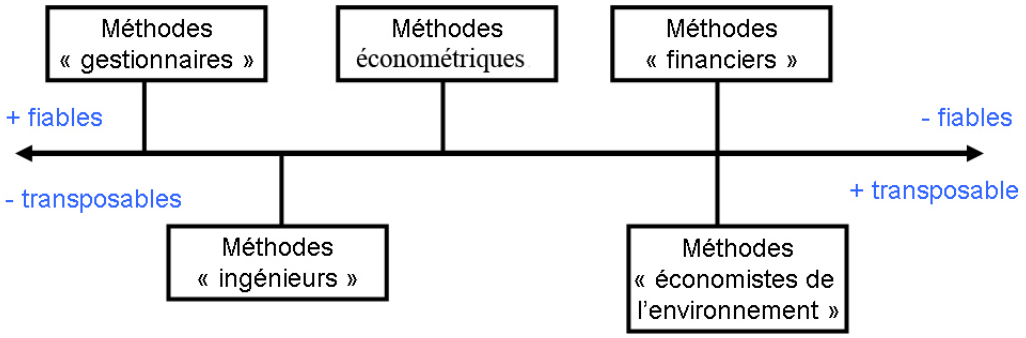


FIGURE 12.2: Avantages et inconvénients des différentes méthodes d'estimation des coûts (et des bénéfices), à partir de [Bouleau and Guérin-Schneider, 2011, p. 75]

Ces méthodes sont souvent nommées dans les articles scientifiques sous des vocables différents : "coûts complets", "coûts directs", "LCC" (life cycle cost), "WLC" (whole life cost) et "ACB" analyse coûts bénéfices. En général, nous pouvons les différencier selon :

- qu'elles utilisent des **taux d'actualisation** ou non ;
- qu'elles comptabilisent uniquement les coûts ou aussi les **bénéfices** ;
- qu'elles mesurent uniquement les effets marchands, ou aussi les externalités **non marchandes** (cf. tableau 12.3).

Le tableau 12.3 récapitule ces grandes différences selon les méthodes. Par exemple, la "life cycle cost" (LCC), en général ne mesure que les coûts marchands et introduit sur le long terme un **taux d'actualisation** c'est à dire "un taux de conversion permettant de rendre commensurable les sommes perçues et dépensées à des époques différentes, tout en essayant d'intégrer une estimation quantifiée des risques de toutes natures (économiques, financiers, industriels, technologiques, sociaux...) susceptibles de peser sur la rentabilité des investissements publics." [AERMC, 2007].

Autre exemple, l' "analyse coûts-bénéfices (ACB) socio-environnementale", mesure en général les coûts et les bénéfices marchands et non-marchands en utilisant un taux d'actualisation. Les coûts et les bénéfices **non-marchands** sont liés aux valeurs que les personnes attribuent à leur bien propre ou à un bien de l'environnement. Il est possible d'estimer ces valeurs (d'usage, de legs, etc.) qu'attribuent des individus à ces biens :
- à travers ce qu'ils ont exprimé durant un processus d'enquête
- ou à partir de leurs comportements sur le marché (Ex : déplacements, achats, valeurs immobiliers) [Bright et al., 2002; Large, 2008].

5. Les hypothèses sont plus générales que celles des autres.

		Utilisation du taux d'actualisation	Avec bénéfices	Avec coûts non-marchand	Avec bénéfices non marchand
Méthodes "gestionnaires"	Coût complet (direct et indirect) du bien				
	Coût direct du bien				
	Coût par activité				
Méthodes "ingénieurs"	Coût d'investissement	X			
	Coût d'exploitation				
Méthodes "économétriques"	Coût statistique				
Méthodes "financiers"	Life cycle cost (LCC)	X			
	Analyse coûts bénéfices (ACB) simple	X	X		
Méthodes "économistes de l'environnement"	WLC (Whole Life Cost) socio-env.	X		X	
	ACB socio-environnementale	X	X	X	X

TABLEAU 12.3: Synthèse des différentes méthodes d'estimation des coûts et des bénéfices. (X) : critère pris en compte, (cellule vide) : critère non pris en compte

Il est intéressant de noter que certaines méthodes présentées dans le tableau 12.3 sont des méthodes économiques donc appartenant à la famille de modèles nommés M3 dans le chapitre 2, mais elles sont aussi des méthodes décisionnelles nommées M4 dans le chapitre 2. C'est le cas par exemple de l'ACB (analyse coûts bénéfices). Cette famille de modèles décisionnels qui permettent l'agrégation de tous les indicateurs et de prendre des décisions est bien plus large que ceux présentés dans le tableau 12.3. Nous pouvons citer notamment les méthodes d'agrégation complètes comme la MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) [Scholten, 2013], ou la méthode d'agrégation partielle ELECTRE (Elimination et Choix Traduisant la Réalité) [Roy, 1996].

Nous avons choisi de créer uniquement deux indicateurs de coûts directs (le coût annuel du renouvellement des canalisations et le coût annuel de réparation des défaillances) que nous allons détailler dans les sections suivantes.

12.2 Coût du renouvellement : $I1F$

12.2.1 Sans actualisation

$I1F$ est le coût annuel de renouvellement des canalisations pour l'année prospective y. Si nous ne prenons en compte ni le taux d'actualisation ni l'indice d'évolution des prix, le coût du renouvellement peut s'écrire selon l'équation 12.1.

$$I1F(y_2 + k) = I1R_{y_2+k} \times C_{UREN} \tag{12.1}$$

Où $I1R_{y_2+k}$ est le linéaire (en mètre) posé l'année $y_2 + k$ obtenu lors du calcul du linéaire à renouveler (cf. chapitre 9), C_{UREN} est le coût unitaire (en mètre) de renouvellement des canalisations, y_2 est l'année de fin de la fenêtre d'apprentissage du modèle et k sont les années supplémentaires pour lesquelles nous exploitons le modèle en simulation prédictive. Ce calcul peut s'effectuer à l'échelle d'une strate ou du réseau complet.

Par exemple, à l'échelle du réseau, dans les trois terrains d'étude, nous pouvons retenir les ordres de grandeur suivants du coût unitaire de renouvellement des canalisations C_{UREN} :

- A eauservice Lausanne le coût unitaire de renouvellement des canalisations C_{UREN} dépend notamment du diamètre, des conditions de pose (facile/ difficile), de la technique employée, des appareillages posés et de la main d'œuvre. La liste des coûts selon ces critères est disponible dans l'annexe 16 de [Large and Tomasian, 2014a].
  Par exemple, si les calculs se font à l'échelle du réseau, en considérant que la médiane des diamètres des tronçons est à 150 mm et que le matériau dominant est la fonte ductile, afin de calculer des coûts d'investissement futurs, à l'échelle du réseau, nous avons considéré comme hypothèses simplificatrices que le coût de renouvellement d'un mètre de tronçon quel que soit son diamètre, son matériau et ses conditions de pose est de 765 CHF (Francs de la Confédération Helvétique). Des exemples de résultats d'$I1F$ utilisant ces hypothèses sont disponibles sur la figure 13.23 et dans le rapport [Large and Tomasian, 2014a].
- Au Grand Lyon, le coût unitaire de renouvellement des canalisations C_{UREN} dépend notamment de la technique de pose (avec ou sans tranchée), du diamètre, du nombre de branchements, du nombre de raccordements et de la réfection de la voirie. Par exemple, à l'échelle du réseau, en moyenne, le chiffre de 530 € par mètre peut être retenu [Grand Lyon, 2015]. Des exemple d'$I1F$ avec cette hypothèse sont disponibles dans le rapport [Large and Tomasian, 2014b].
- Si le SEDIF n'a pas la fouille à effectuer, ni la réfection de la voirie alors le renouvellement des canalisations C_{UREN} lui coûte en moyenne 530 € par mètre. En revanche, s'il doit effectuer ces deux tâches alors le tarif moyen se situe entre 620 et 720 euros [SEDIF, 2015a]. Le SEDIF a insisté sur le fait que les coûts dépendent de plus en plus des aléas tels que la présence d'amiante ciment ou d'HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) dans les enrobés routiers et du respect de la règlementation DT-DICT [6]. Des exemples d'$I1F$ appliqués au SEDIF sont disponibles dans le rapport [Large and Tomasian, 2014c].

12.2.2 Avec actualisation

Dans cette section nous proposons trois expression pour actualiser le coût du renouvellement des canalisations, de la plus simple à la plus complexe.

Suite à l'analyse de [Hardelin and Marical, 2011; Quinet, 2013] sur les valeurs du taux d'actualisation r, nous avons choisi de créer **une première relation :**
- avec un taux d'actualisation indépendant du temps. Par exemple il pourrait être de 3% par an c'est à dire très proche du taux fixé par le « commissariat général au Plan » [Lebègue, 2005]
- et avec une évolution annuelle de l'indice des prix fixe au cours du temps. Par exemple nous pouvons utiliser l'indice TP10a représentant, dans les travaux publics, l'indice canalisations, égouts, assainissement et adduction d'eau avec fournitures de tuyaux. Sa valeur moyenne [7] ces dernières années entre [2004, 2013] était de 3.7% par an (Cf. Annexe 21 du rapport [Large and Tomasian, 2014b]). Cet indice est utilisé au Grand Lyon et au SEDIF.

La relation la plus simple d'actualisation des coûts est alors donnée par :

$$C_{REN}(y_2 + k) = LI_{y_2+k} \times C_{UREN}(y_2) \times \frac{(1+e)^k}{(1+r)^k} \tag{12.2}$$

Avec :
- k : nombre d'années de projection au delà de y_2
- r : le taux d'actualisation
- e : évolution annuelle de l'indice des prix

6. Déclaration de projet de Travaux- Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux
7. Un indice est présenté en base 100. Ici nous l'avons ramené en pourcentage

Des exemples de résultats d'$I1F$ avec cette expression sont disponibles dans [Large and Tomasian, 2014b].
Notons qu'un taux d'actualisation positif dégrade au cours du temps la valeur du coût alors qu'au contraire un indice des prix positifs augmente la valeur du coût.

La seconde formule plus complexe que précédemment consiste à utiliser le taux d'actualisation évoluant au cours du temps recommandé par le « commissariat général au Plan » [Lebègue, 2005] soit 4% pendant les 30 premières années puis décroissant ensuite (asymptote à 2%).

La relation d'actualisation des coûts est alors donnée par :

$$C_{REN}(y_2 + k) = LI_{y_2+k} \times C_{UREN}(y_2) \times \frac{(1+e)^k}{(1+r_k)^k} \tag{12.3}$$

Avec :
- r_k le taux d'actualisation du « commissariat général au Plan » [Lebègue, 2005] pour l'année supplémentaire k où :

- pour $k \leq 30$: $r_k = 0.04$
- et pour $k > 30$: $r_k = \sqrt[k]{1.04^{30} \times 1.02^{k-30}} - 1$

Des exemples de résultats d'$I1F$ avec cette équation sont disponibles dans [Large and Tomasian, 2014c].

Enfin, **la troisième formulation** peut s'appliquer à Lausanne où trois indices de prix différents sont utilisés. Par exemple à eauservice Lausanne, pour ces simulations budgétaires, nous faisons l'hypothèse que le renouvellement d'un mètre de canalisation coûte 765 CHF (en 2012) dont 487 CHF en génie civil, 164 CHF en appareillages et 114 CHF en main d'œuvre [Eauservice, 2013a, 2015a].

Dans ce cas l'expression d'actualisation des coûts est la suivante :

$$C_{REN}(y_2 + k) = \frac{LI_{y_2+k} \times [487(1+eIPGC)^k + 164(1+eIPAPP)^k + 114(1+eIPMO)^k]}{(1+r)^k} \tag{12.4}$$

Où $eIPGC$ est l'évolution moyenne annuelle de l'indice des prix en génie civil (par exemple il était de -0.6% sur [2008 ; 2012] à Lausanne), $eIPAPP$: évolution moyenne annuelle de l'indice des prix de l'appareillage et $eIPMO$: évolution moyenne annuelle de l'indice des prix de la main d'œuvre.

Des exemples de résultats d'$I1F$ utilisant ces hypothèses sont disponibles dans le rapport [Large and Tomasian, 2014a].

Dans Optimeau, ces calculs peuvent s'effectuer à l'échelle d'une strate ou du réseau complet.

12.3 Analyse de sensibilité

Nous avons testé la sensibilité du coût de renouvellement C_{REN} dans trois situations en faisant varier dans l'équation 12.2 le taux d'actualisation et l'indice des prix :
- une avec un taux d'actualisation nul, et une évolution annuelle de l'indice TP10a nulle ;
- une autre avec un taux d'actualisation à 3% (très proche du taux fixé par le « commissariat général au Plan » [Lebègue, 2005]), et avec une évolution annuelle de l'indice TP10a de 3.7% (valeurs de ces dernières années cf. annexe 21 du rapport [Large and Tomasian, 2014b])
- une dernière avec un taux d'actualisation à 4% et une évolution annuelle de l'indice TP10a de 3.7%.

Les résultats sont portés sur la figure 12.3.

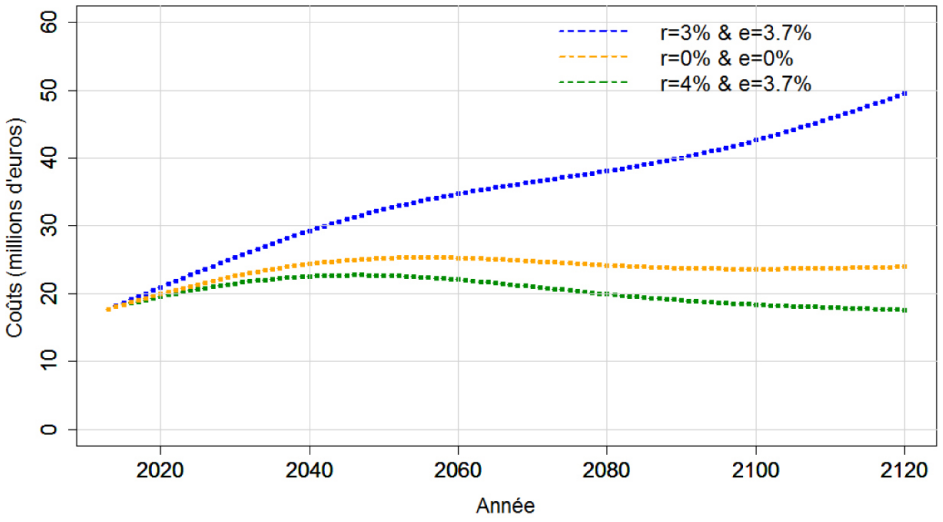


FIGURE 12.3: Coût du renouvellement entre 2013 et 2120 avec 3 taux d'actualisation différents et deux évolutions de l'indice TP10a différents, réseaux d'exhaure (adduction), de transport et de distribution du Grand Lyon TVD, source [Large and Tomasian, 2014b]

Nous constatons que le résultat C_{REN} est extrêmement sensible aux taux choisis qui sont hautement incertain. De plus, dans la mesure où nous comparons des scénarios entre eux, l'actualisation ne va pas impacter la hiérarchie des scénarios. Par conséquent, les AOEP ont décidé de n'utiliser que la relation 12.1 sans actualisation.

Deux exemples du coût de renouvellement des canalisations $I1F$ utilisant l'équation 12.1 sur le territoire d'eauservice Lausanne sont disponibles sur la figure 13.23.

12.4 Coût des réparations : $I2F$

$I2F$ est le coût annuel de réparation des canalisations pour l'année prospective y (cf. figure 12.5).

$$I2F(y_2 + k) = I1P(y_2 + k) \times C_{UREP}(y_2) \tag{12.5}$$

Où $I1P(y_2 + k)$ est le nombre de défaillances l'année $y_2 + k$ calculé pour $I1P$ (cf. chapitre 10) et C_{UREP} est le coût unitaire de réparation d'une défaillance. Dans Optimeau, ce calcul peut s'effectuer à l'échelle d'un tronçon, d'une strate ou du réseau complet.

Vu que les terrains d'étude n'ont pas souhaité utiliser, pour $I1F$, les formules actualisées, nous avons fait de même pour $I2F$.

Dans les trois terrains d'étude, nous pouvons retenir les ordres de grandeur suivants concernant les coûts moyen de réparation d'une défaillance C_{UREP}. A eauservice Lausanne les coûts de réparation [8] des défaillances dépendent du matériau et du diamètre (cf. figure 12.4).

8. Notons que les coûts fournis par eauservice Lausanne sont majorés pour la Fonte grise, le Polyester (PRFV), l'éternit et le Béton âme tôle pour les faire ressortir dans leur processus de court-terme.

C_{UREP} (CHF)	Matériau	Diamètre (mm)
4 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi < 250$
6 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi \geq 250$
20 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BATO	$\phi < 250$
40 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BATO	$\phi \geq 250$

TABLEAU 12.4: Valeurs des coûts unitaires de réparation des canalisations (en CHF par défaillance) à eauservice Lausanne, [Apotheloz, 2009, p. 3]. BATO : béton âme tôle, PE : Polyéthylène, PRFV = Polyester Renforcé de Fibre de Verre

Le Grand Lyon et le SEDIF sous-traitent toutes les réparations des défaillances à une entreprise privée. L'entreprise a un seuil minimum et un seuil maximum de défaillances entre lesquels le tarif reste toujours le même (forfait). Une réparation de fuite coûte environ 2 000 euros. A ce chiffre il faut rajouter les frais de réfection de la voirie [Grand Lyon, 2015].

12.5 Quelques résultats et conclusion

Nous avons proposé deux indicateurs de coûts directs : $I1F$ et $I2F$ respectivement pour le renouvellement des canalisations et la réparation des défaillances. Par exemple, nous obtenons pour un scénario donné, des graphiques au pas de temps annuel comme celui de la figure 12.4. La stratification du réseau peut-être prise en compte comme dans l'exemple de la figure 12.4.

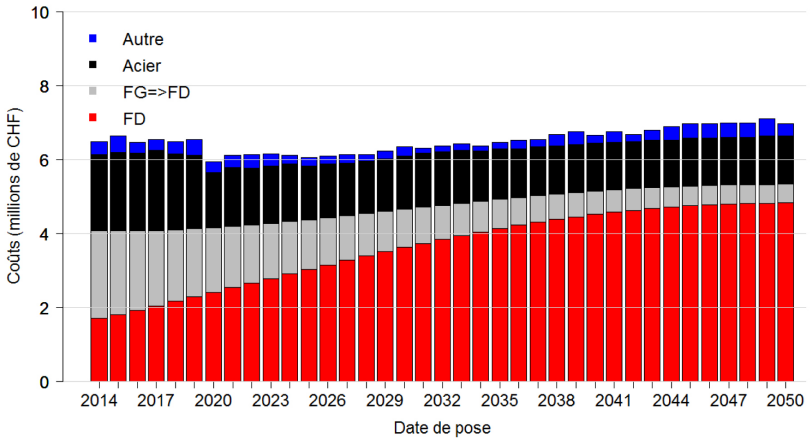


FIGURE 12.4: Eauservice Lausanne, réseau en ville, $I1F$, Coût du renouvellement des canalisations sans actualisation. Scénario 9, Statu quo, stratifié par le matériau

☞ Pour en savoir plus : consulter la simulation "Lausanne № 9" de l'annexe J.

Un indicateur de coûts qui ne soit pas accompagné des indicateurs de performance ou de réalisation a peu d'intérêt. En effet, notre objectif est de pouvoir comparer les coûts, la performance (résultats) et les réalisations prévisionnelles de différents scénarios. Nous allons présenter dans ce qui suit un cas d'étude où quatre scénarios seront comparés au travers de tous les indicateurs que nous avons présentés dans les chapitres précédents. Pour mémoire c'est **la courbe de survie qui permet de connecter tous ces indicateurs entre eux** puisqu'elle fournit l' information de base (âge à la mise hors service).

Au niveau de la démarche complète OPTIMEAU présentée dans le chapitre 4, nous savons maintenant comment réaliser les 4 premières étapes (cf. figure 12.5). En effet, ont été présentées :

- l'étape 1 expliquant comment évaluer les actions passées des AOEP, dans les chapitres 5, 6, 7 ;
- l'étape 2 pour réajuster les objectifs, dans le chapitre 8 ;
- l'étape 3 pour construire des scénarios prospectifs, dans le chapitre 8 ;
- et l'étape 4 pour calculer les 11 indicateurs, dans les chapitres 9, 10, 11 et 12.

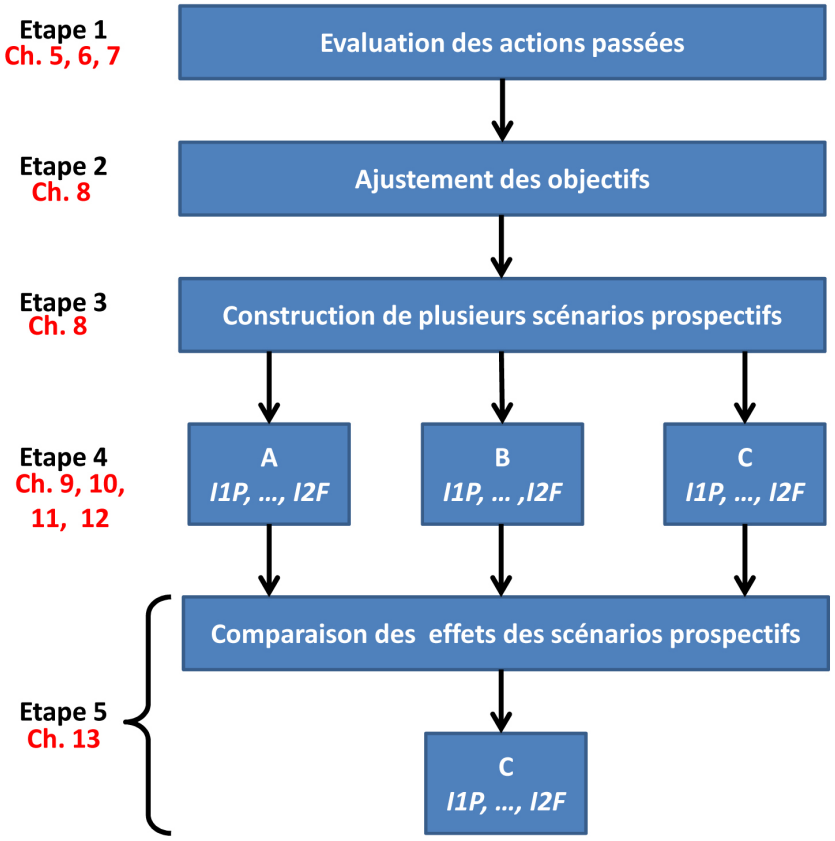


FIGURE 12.5: Vue d'ensemble de la démarche OPTIMEAU

Il nous reste donc à présenter l'étape 5 permettant de comparer plusieurs scénarios selon leurs ratios coûts-performance à long terme.

Chapitre 13

Mise en œuvre pratique de la démarche OPTIMEAU : Étude de cas

Nous rappelons que la démarche suivie ne s'inscrit pas dans une optique d'optimisation au sens strict (choix de la meilleure stratégie parmi l'ensemble des possibles) mais dans la comparaison de quelques stratégies. Pour chaque stratégie nous pouvons calculer 11 indicateurs.

Nous allons exposer un exemple où nous comparons les indicateurs pour quatre scénarios sur le territoire d'eauservice Lausanne en ville (715 km). Ce sont les scénarios que nous avons numérotés 4, 5, 10 et 12 dans la section 8.2.3.1.

Dans les deux premiers scénarios le réseau n'est pas stratifié et la fenêtre d'apprentissage du modèle est égale à la fenêtre d'observation des données. Le scénario 4 est le scénario **"Statu quo"** c'est à dire qu'on utilise à l'avenir les mêmes âges à la mise hors service que ceux (du passé) sur la fenêtre [2001 ; 2013]. Le scénario 5 est le scénario **"On arrête de renouveler"** les canalisations.

Au sein des deux autres scénarios le réseau est stratifié, dans le scénario 10 selon le matériau des canalisations et dans le scénario 12 selon le niveau de vulnérabilité des citoyens autour des conduites (cf. le critères SC_i dans le tableau 11.7). Ces deux scénarios s'éloignent du statu quo. Dans le scénario 10 nommé **"Plus drastique avec les fontes grises"** pour les 3 strates : fonte ductile, acier et autres matériaux, on utilise à l'avenir les mêmes âges à la mise hors service que ceux (du passé) sur la fenêtre [2001 ; 2013] alors que pour la quatrième strate fonte grise on utilise des âges à la mise hors service plus jeunes que par le passé.
Le scénario numéro 12 nommé **"Supérieur autour des éléments vulnérables"** est composé de 3 strates : faiblement vulnérable ($SC_i < 0.2$), moyennement vulnérable ($0.2 \leq SC_i \leq 0.3$) et très vulnérable ($SC_i > 0.3$). Pour la première strate $SC_i < 0.2$ la survie est la même que par le passé alors que pour les deux autres strates on utilise des âges à la mise hors service plus jeunes que par le passé.

Nous allons présenter les indicateurs prévisionnels en suivant les modèles développés dans notre code informatique (cf. organigramme de fonctionnement du code développé porté sur la figure 8.3) et illustrer la démarche complète OPTIMEAU : tout d'abord avec le modèle "M Survie", puis "M Linéaire", ensuite "M1 Dégradation", puis "M2 Risque" et enfin "M3 Économique". Nous aborderons succinctement à la fin de ce chapitre les modèles "M4 décisionnels".

13.1 Modèle "M survie"

Les données d'entrée de "M survie" sont les informations sur les tronçons en service et hors service (cf. figure 13.1). Le modèle employé est celui de l'équation 6.4. En sortie de "M survie", nous obtenons premièrement la survie passée sur [2001 ; 2013] représentée avec les petits carrés de la figure 13.2 (à

droite et à gauche). Ensuite, pour le scénario prospectif “Statu quo” nous avons effectué une régression locale (RL) sur cette courbe (cf. trait sur la figure 13.2 à gauche). Pour le scénario prospectif “on ne renouvelle plus” la fonction de survie reste constante et égale à un quel que soit l’âge des tronçons (cf. trait sur la figure 13.2 à droite).

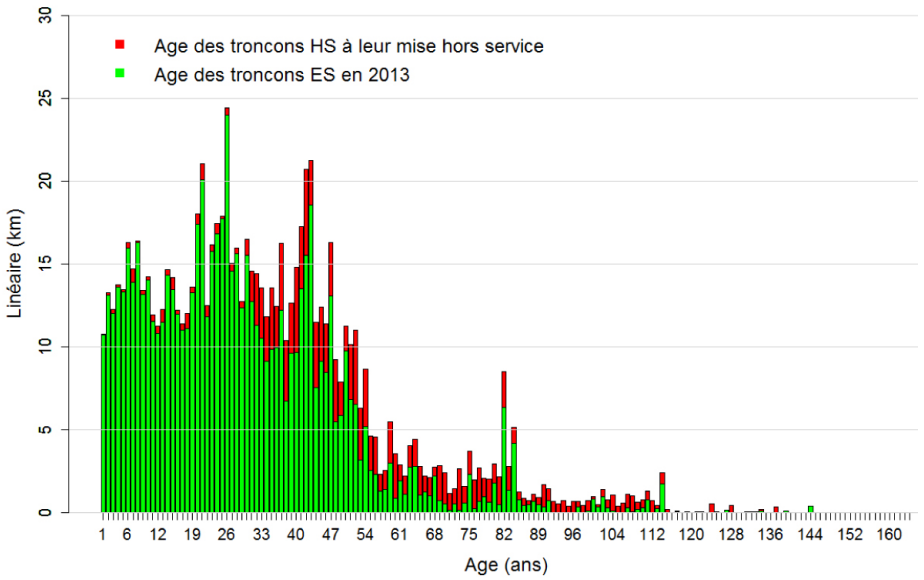


FIGURE 13.1: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Histogramme du linéaire En Service (ES) fin 2013 et mis Hors Service (HS) entre [2001 ; 2013] en fonction de leurs âges fin 2013 ou à leur mise HS.

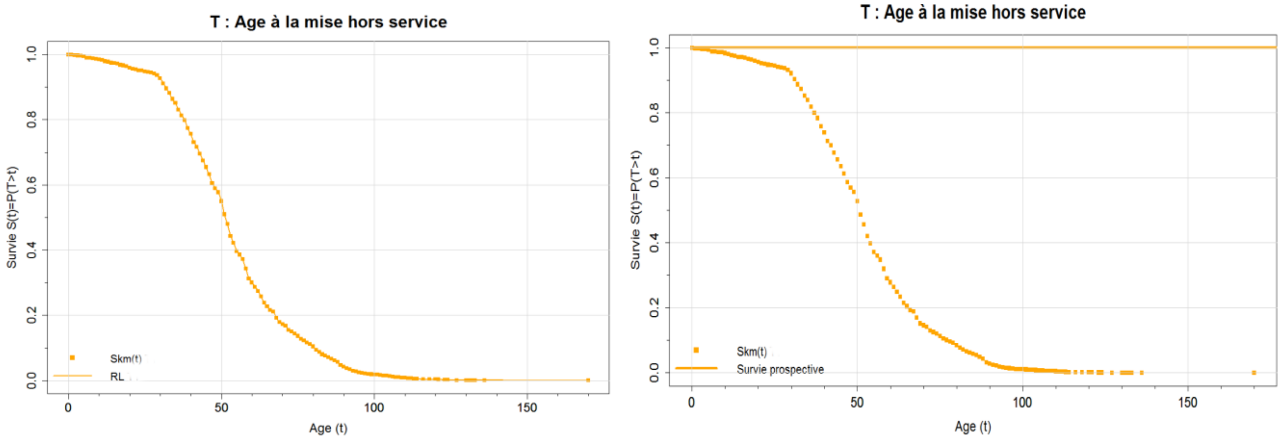


FIGURE 13.2: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Trait : Survie prospective en linéaire pour deux scénarios. Gauche : scénario “statu quo” (RL : régression locale). Droite : scénario “on ne renouvelle plus”. Carrés : Survie passée sur la fenêtre [2001 ; 2013] méthode Kaplan-Meier $Skm(t)$.

La figure 13.3 à gauche expose les survies passées (points) et prospectives (traits) du scénario “Plus drastique avec les fontes grises”. Notons que la survie prospective de la strate fonte grise (FG) est décalée vers l’axe des ordonnées par rapport à sa survie passée. La figure 13.3 à droite présente les survies passées (points) et prospectives (traits) du scénario “Supérieur autour des éléments vulnérables”. Nous constatons que les survies prospectives des strates “très vulnérable ($SC_i > 0.3$)” et “moyennement vulnérable ($0.2 \leq SC_i \leq 0.3$)” sont décalées vers l’axe des ordonnées par rapport à leurs survies passées.

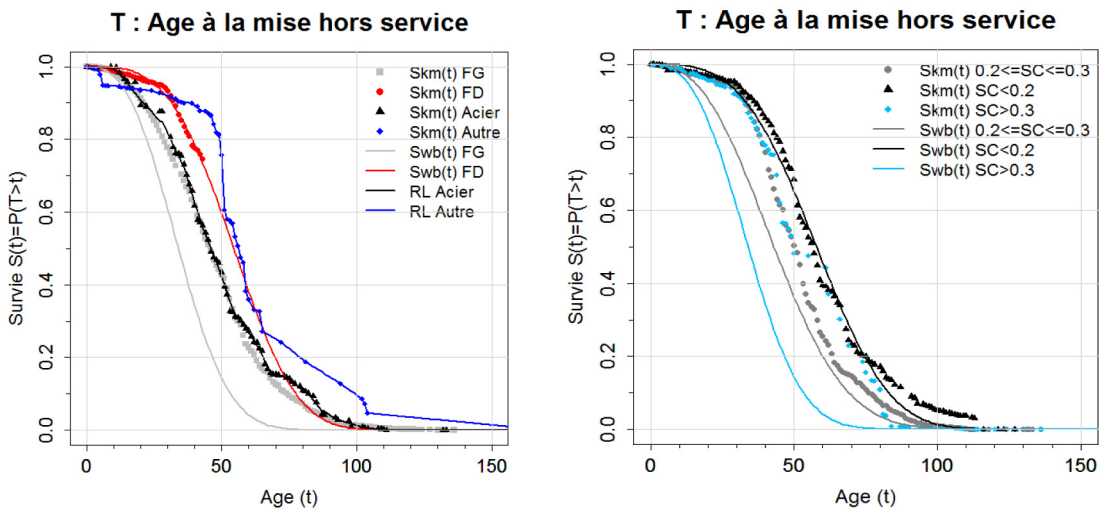


FIGURE 13.3: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Trait : Survie prospective en linéaire pour deux scénarios. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises" (RL : régression locale, Swb(t) : survie de Weibull). Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables". Points : Survie passée sur la fenêtre [2001 ; 2013] méthode Kaplan-Meier Skm(t).

13.2 Modèle "M linéaire"

13.2.1 Linéaire à renouveler $I1R$

En entrée du modèle "M linéaire", nous utilisons les survies prospectives définies précédemment (cf. figures 13.2 et 13.3) et le linéaire en service (ES) en fonction de leurs dates de pose (cf. figure 13.4).

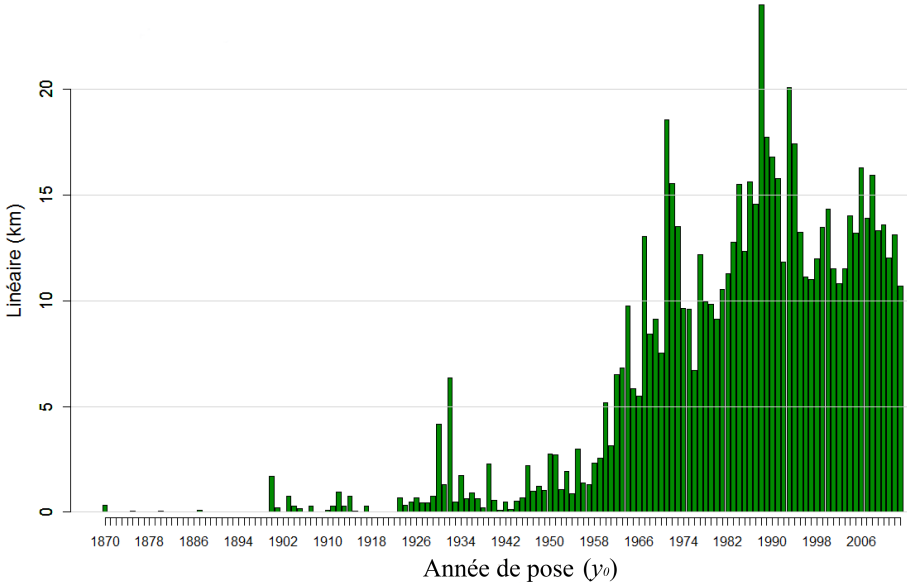


FIGURE 13.4: Eauservice Lausanne, réseau en ville, entrée du modèle OPTIMEAU, linéaire en service fin 2013 (en km) en fonction des années de pose y_0

Les sorties de "M0 linéaire" sont les trois indicateurs de réalisation.

Dans ce cas d'étude notre modèle "M0 linéaire" utilise les équations de la section 9.2. Nous obtenons en sortie $I1R$ le linéaire à renouveler (cf. figures 13.5 et 13.6). Pour le scénario 5, $I1R$ (cf. figure 13.5 à droite) est strictement égal à l'entrée (cf. la figure 13.4) car "on ne renouvelle plus" les tronçons. Ils ne font que vieillir, c'est à dire qu'ils vont rester "en service" même s'ils sont défaillants, et ils vont

impacter fortement les indicateurs de performance.
Notons que dans le scénario “Plus drastique avec les fontes grises” les tronçons en fonte grise (FG) sont systématiquement renouvelés par de la fonte ductile (FD) donc nous avons nommé cette strate “FG=>FD” (cf. figure 13.6).

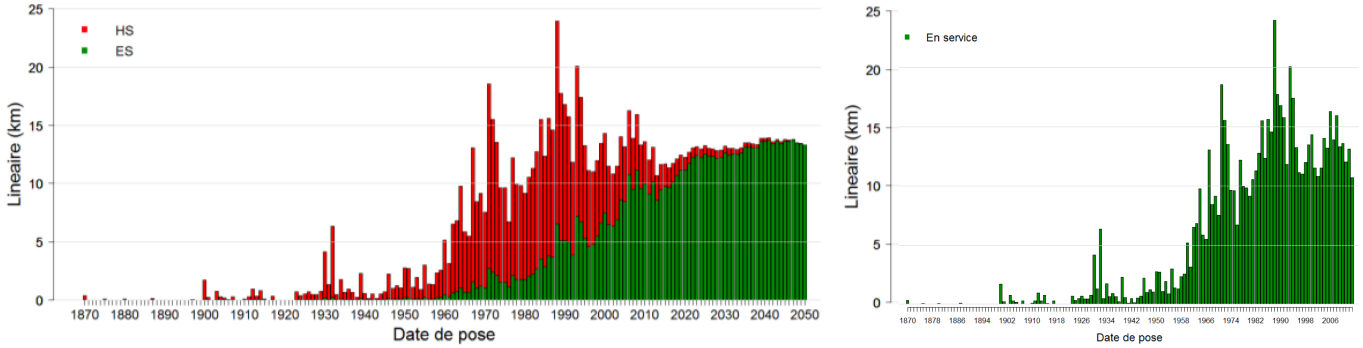


FIGURE 13.5: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I1R$ linéaire en service fin 2050 (en vert) et mis hors service entre [2014 ; 2050] (en rouge). Gauche : scénario “statu quo”. Droite : scénario “on ne renouvelle plus”.

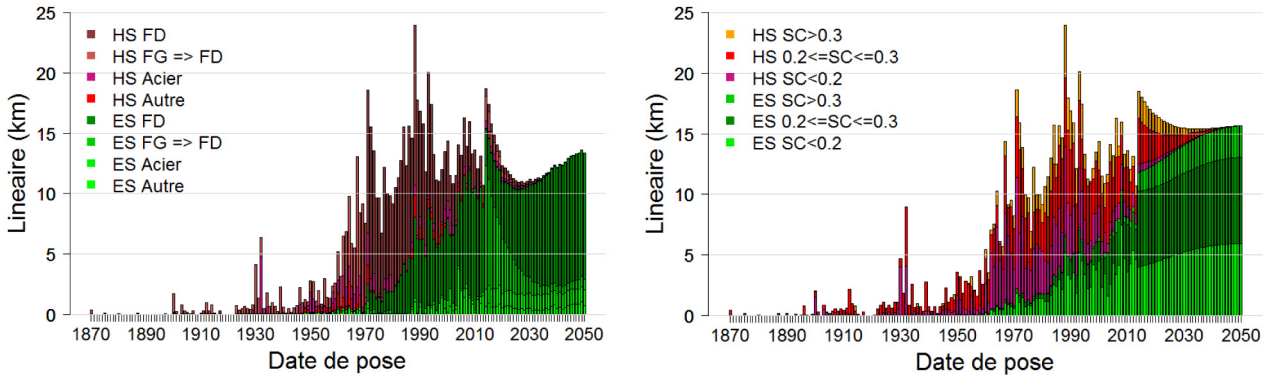
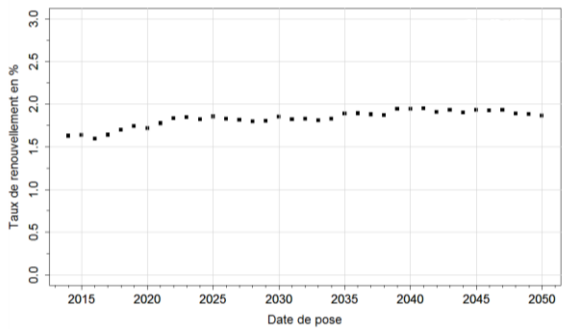


FIGURE 13.6: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I1R$ linéaire en service fin 2050 (en vert) et mis hors service entre [2014 ; 2050] (en rouge). Gauche : scénario “Plus drastique avec les fontes grises”. Droite : scénario “Supérieur autour des éléments vulnérables”.

13.2.2 Taux de renouvellement $I2R$

Puis en utilisant les équations de la section 9.3 nous obtenons $I2R$ le taux de renouvellement annuel. Nous constatons qu’il est nul pour le scénario “on ne renouvelle plus” et qu’il oscille entre 1,5% et 2% pour le scénario “Statu quo”. Nous pouvons noter que ce taux est supérieur au 1,5% qu’eauservice s’était fixé comme objectif. Cependant ce taux ne concerne que le réseau en ville (715 km) ; il faudrait ajouter le réseau en montagne pour avoir un taux complet pour eauservice. En effet, en général eauservice renouvelle moins le réseau en montagne que le réseau en ville. Rajouter le réseau en montagne devrait donc diminuer ce taux.



O%

FIGURE 13.7: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I2R$ taux de renouvellement annuel (%) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario “statu quo”. Droite : scénario “on ne renouvelle plus”.

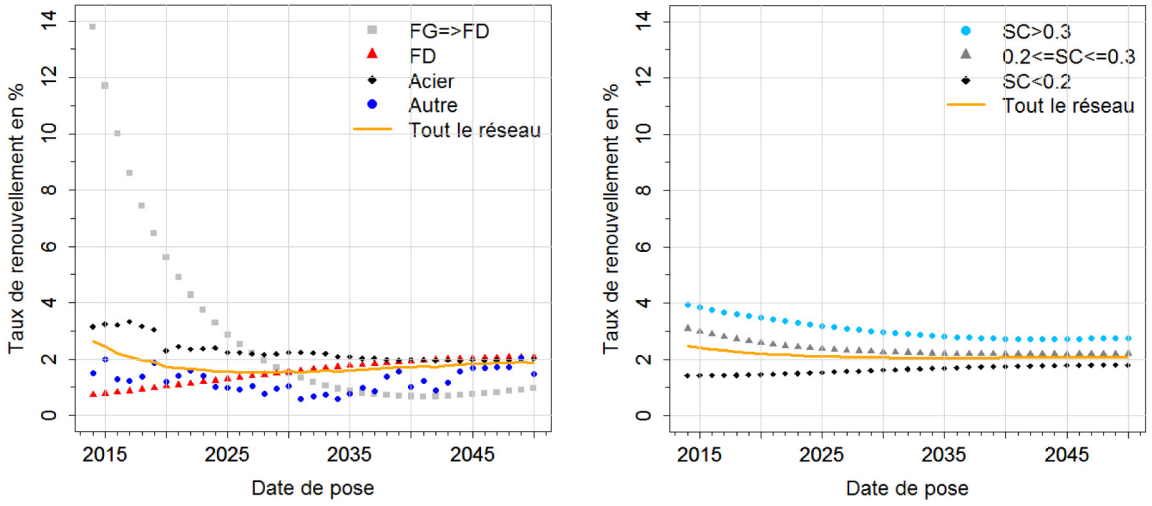


FIGURE 13.8: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I2R$ taux de renouvellement annuel (%) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario “Plus drastique avec les fontes grises”. Droite : scénario “Supérieur autour des éléments vulnérables”.

La figure 13.9 expose les taux de renouvellement sur le territoire de Lausanne en ville pour chaque scénario sur le même graphique sauf le scénario “on ne renouvelle plus”. Nous pouvons constater que la première année prospective 2014, l’effort en renouvellement le plus important est dans le scénario “Plus drastique avec les fontes grises” alors que les années suivantes c’est le scénario “Supérieur autour des éléments vulnérables” qui a le taux de renouvellement le plus élevé. De plus, autour des années 2025 le scénario “Plus drastique avec les fontes grises” a le taux de renouvellement le plus faible, derrière le scénario “Statu quo” et “Supérieur autour des éléments vulnérables”.

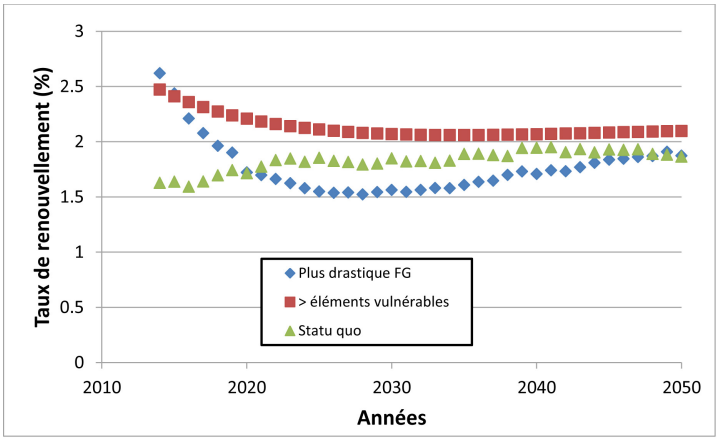


FIGURE 13.9: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I2R$ taux de renouvellement annuel (%) global pour chaque année prospective [2014 ; 2050] dans 3 scénarios : scénario "Statu quo", scénario "Plus drastique avec les fontes grises" et scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables".

13.2.3 Age moyen $I3R$

Ensuite en utilisant les équations de la section 9.4 nous pouvons prévoir l'évolution de l'âge moyen du réseau. Pour les scénarios "Statu quo" et "Plus drastique avec les fontes grises" l'âge moyen $I3R$ se stabilise vers 29 ans alors qu'il ne fait qu'augmenter dans le scénario "on ne renouvelle plus" (cf. figures 13.10 et 13.11). Notons que 29 ans peut paraître jeune, cependant nous ne travaillons que sur le réseau en ville qui est bien plus jeune que celui en montagne. Dans le scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables" l'âge moyen à tendance à diminuer jusqu'à atteindre 24 ans.

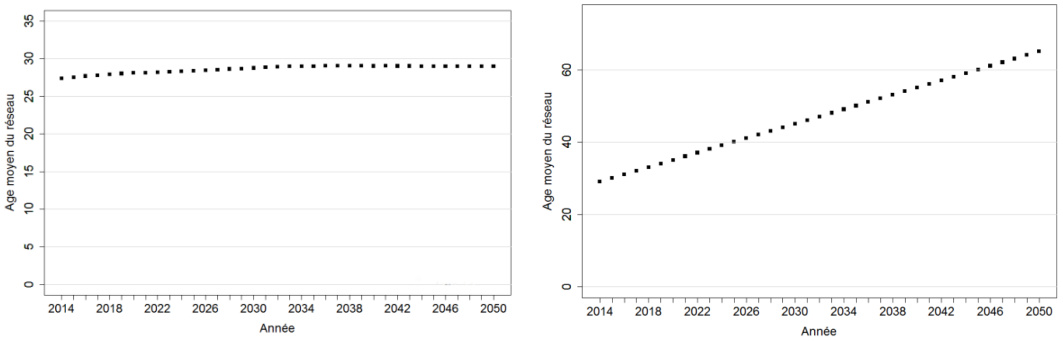


FIGURE 13.10: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I3R$ âge moyen du réseau (ans) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "statu quo". Droite : scénario "on ne renouvelle plus".

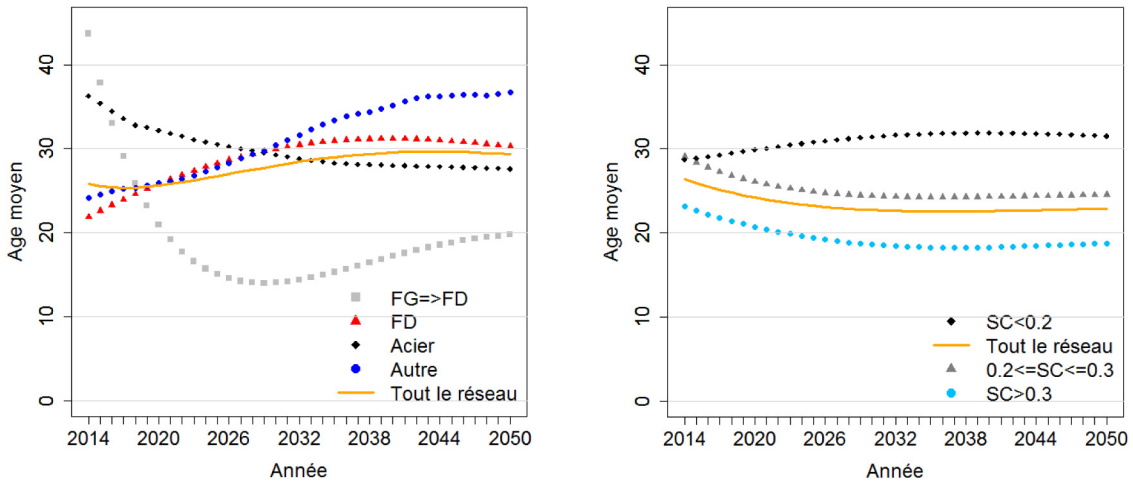


FIGURE 13.11: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I3R$ âge moyen du réseau (ans) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises". Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables".

13.3 Modèle "M1 dégradation"

Pour estimer $I1P$ le nombre de défaillances à venir il est nécessaire de suivre les étapes suivantes. En entrée du modèle M1 dégradation, nous avons besoin des survies prospectives représentées sur les figures 13.2 et 13.3, des données sur les défaillances passées (cf. figure 8.1), des informations sur les caractéristiques des tronçons et de leur environnement.

Pour estimer les "âges à venir" des tronçons géographiques, les survies prospectives sont ensuite transformées en matrice de transition de Markov. Puis nous avons calé une équation du processus de détérioration des tronçons physiques. Enfin le croisement des âges probables et du processus de dégradation donne les résultats portés sur les figures 13.12 et 13.13.

Nous constatons qu'avec le scénario "statu quo" le nombre de défaillances augmente lentement partant de 100 défaillances en 2014 pour atteindre 150 en 2050. Pour le scénario "on ne renouvelle plus", le nombre annuel de défaillances augmente beaucoup plus vite pour atteindre 750 défaillances en 2050. Dans ces deux scénarios, eauservice est au-dessus de son seuil objectif de 100 défaillances par an.

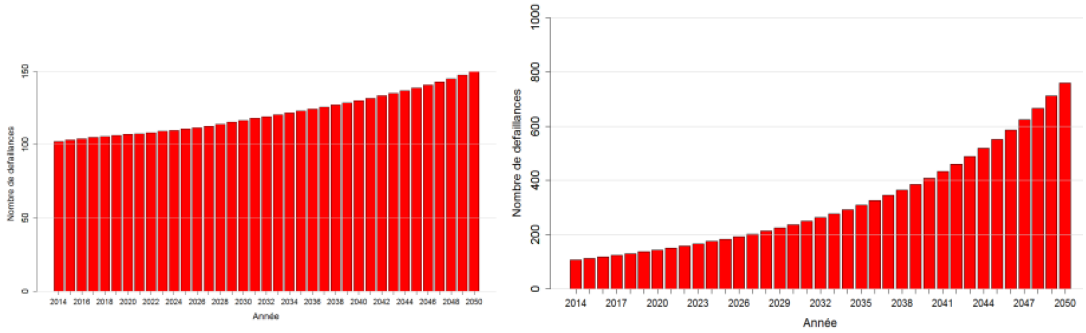


FIGURE 13.12: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I1P$ nombre de **défaillances** pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "statu quo". Droite : scénario "on ne renouvelle plus".

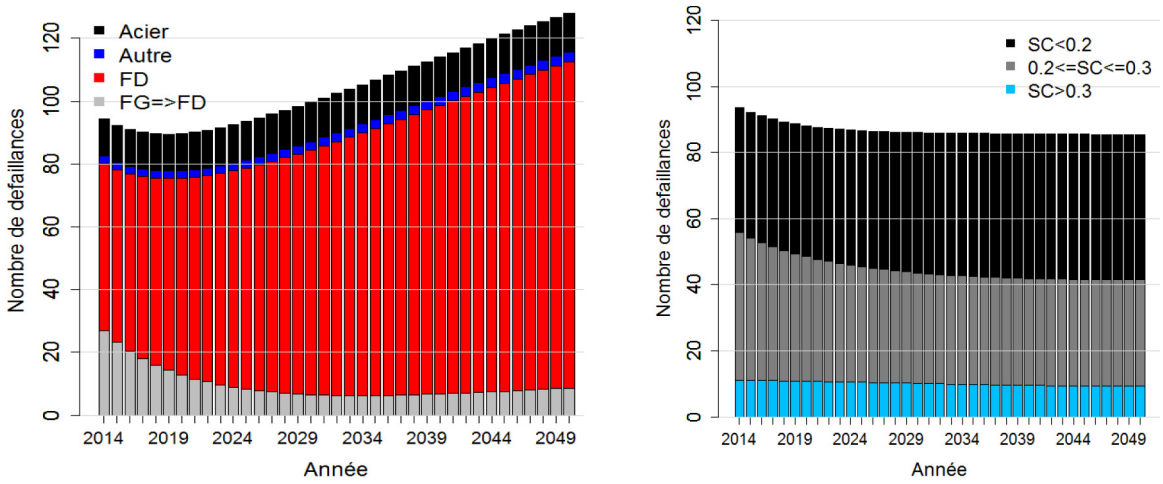


FIGURE 13.13: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I1P$ nombre de **défaillances** pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises". Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables".

A moyen terme, la stratégie de remplacer plus tôt les tronçons en fonte grise a le même effet que de renouveler plus les tronçons autour des citoyens les plus vulnérables. Néanmoins, sur du long terme si eauservice Lausanne souhaite rester en dessous de 100 défaillances par an, remplacer les canalisations autour des usagers les plus vulnérables devient la stratégie la plus intéressante (cf. figures 13.12, 13.13 et 13.14).

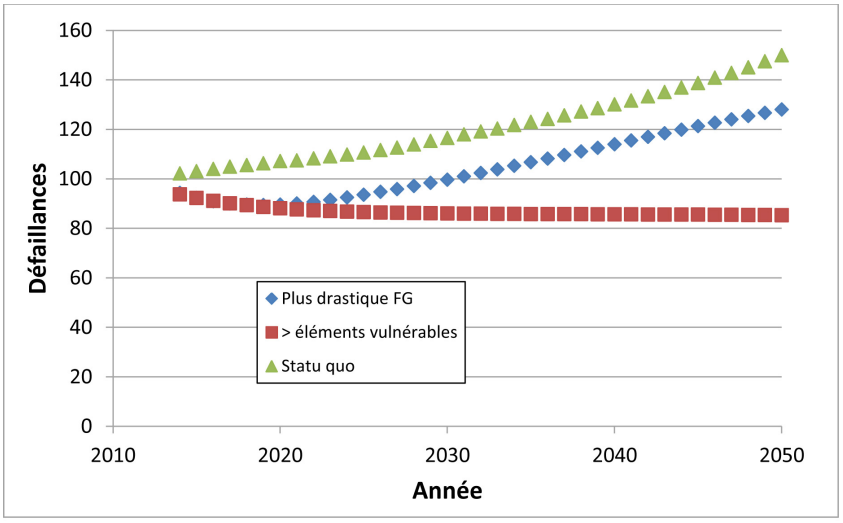


FIGURE 13.14: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I1P$ nombre de **défaillances** pour chaque année prospective [2014 ; 2050] dans 3 scénarios :"Statu quo", "Plus drastique avec les fontes grises", "Supérieur autour des éléments vulnérables".

13.4 Modèle "M2 Risque"

En utilisant le nombre de défaillances des figures 13.12 et 13.13, les caractéristiques du danger et des éléments vulnérables à eauservice présentés dans le chapitre 11, nous pouvons estimer 5 indicateurs de risque.

13.4.1 Risque coupure d'eau $I2P$

Pour estimer le premier indicateur $I2P$ c'est à dire le risque de coupure d'eau chez les abonnés suite à une défaillance du réseau nous avons utilisé l'équation 11.2 ainsi que NPS_i de la section 11.5.2 et SC_i du tableau 11.7.

Cet indicateur est entre 5 000 et 6 000 pour le scénario "statu quo" alors qu'il ne fait qu'augmenter dans le scénario "on ne renouvelle plus" pour atteindre 42 000 en 2050 (cf. figure 13.15). En 2050 le risque de coupure d'eau est donc 7,5 fois plus élevé si eauservice Lausanne ne renouvelle plus le réseau, par rapport au scénario "statu quo".

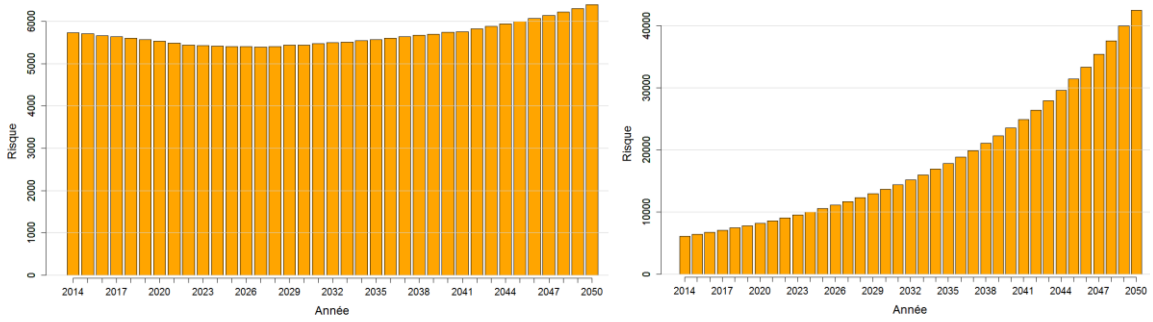


FIGURE 13.15: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I2P$ risque de **coupure d'eau** (heures·clients du réseau par an pondérées) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "statu quo". Droite : scénario "on ne renouvelle plus".

Sur du court terme, la stratégie de remplacer plus tôt les tronçons en fonte grise est moins risqué vis à vis des usagers que de renouveler plus les tronçons autour des citoyens les plus vulnérables. Néanmoins, sur du long terme remplacer les canalisations autour des usagers les plus vulnérables devient nettement plus intéressant (cf. figure 13.16).

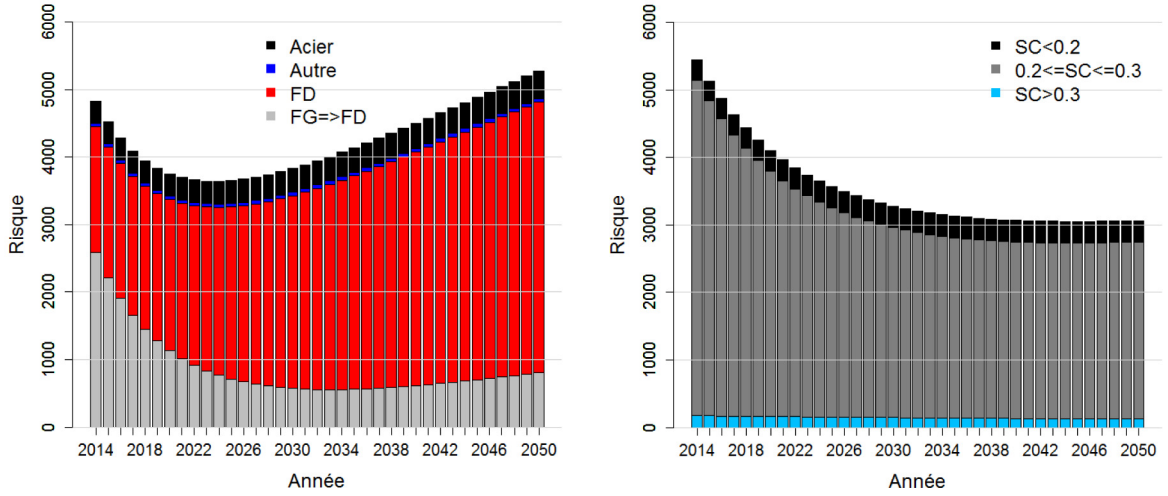


FIGURE 13.16: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I2P$ risque de **coupure d'eau** (heures·clients du réseau par an pondérées) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises". Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables".

13.4.2 Risque coupure voirie $I3P$

Pour estimer $I3P$ c'est à dire le risque de dérangement des usagers de la voirie suite à une défaillance puis des travaux sur le réseau d'eau potable, nous avons utilisé l'équation 11.1 ainsi que EDI du tableau 11.2 et SR_i du tableau 11.4.

Cet indicateur augmente légèrement sur la durée de la prévision pour atteindre 85 dans le scénario "statu quo"(cf. figure 13.17). Dans le scénario "on ne renouvelle plus" il atteint 450 c'est à dire qu'il est 5 fois plus élevé que dans le scénario "statu quo".

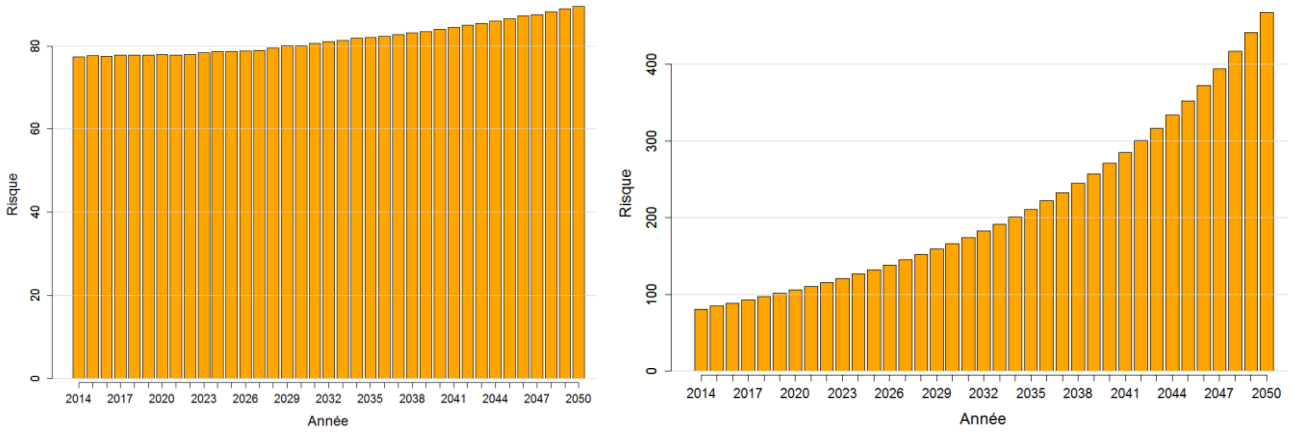


FIGURE 13.17: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I3P$ risque de **coupure de la voirie** (heures pondérées par an) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "statu quo". Droite : scénario "on ne renouvelle plus".

Concernant les scénarios 10 et 12 (cf. figure 13.18), les remarques que nous avons notées dans la section précédente sont toujours valables : sur du long terme, le scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables" est le plus intéressant des quatre scénarios présentés.

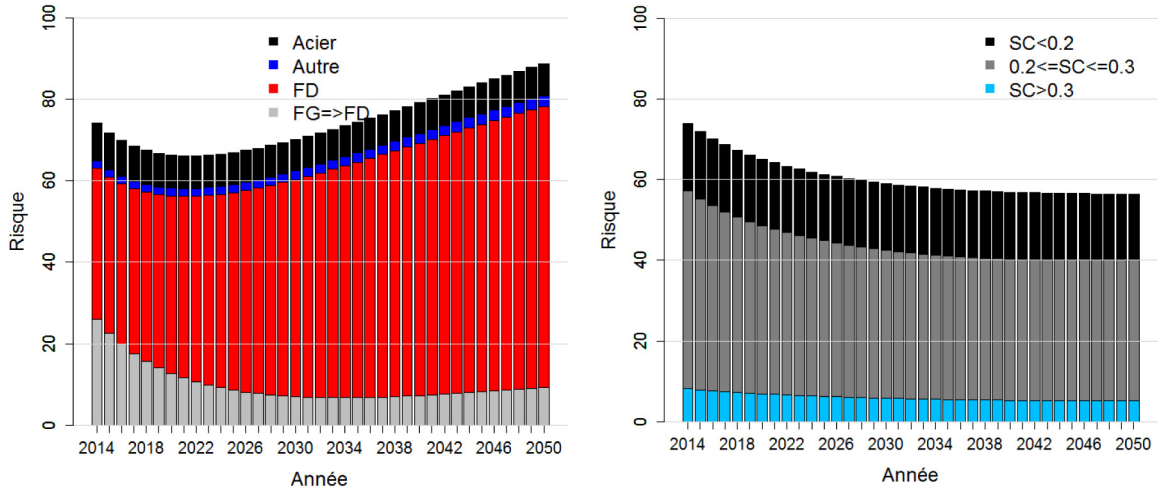


FIGURE 13.18: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I3P$ risque de **coupure de la voirie** (heures pondérées par an) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises". Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables".

13.4.3 Risque inondation $I4P$

Pour estimer $I4P$ c'est à dire le risque de provoquer des dommages suite à une inondation induite par une défaillance du réseau d'eau potable, nous avons utilisé l'équation 11.3 ainsi que SI_i du tableau 11.10.

Cet indicateur augmente légèrement sur la durée de la prévision pour atteindre $1,55 \times 10^7$ dans le scénario “statu quo”(cf. figure 13.17). Dans le scénario “on ne renouvelle plus” il atteint $6,5 \times 10^7$ en 2050 c’est à dire qu’il est 4 fois plus élevé que dans le scénario “statu quo”.

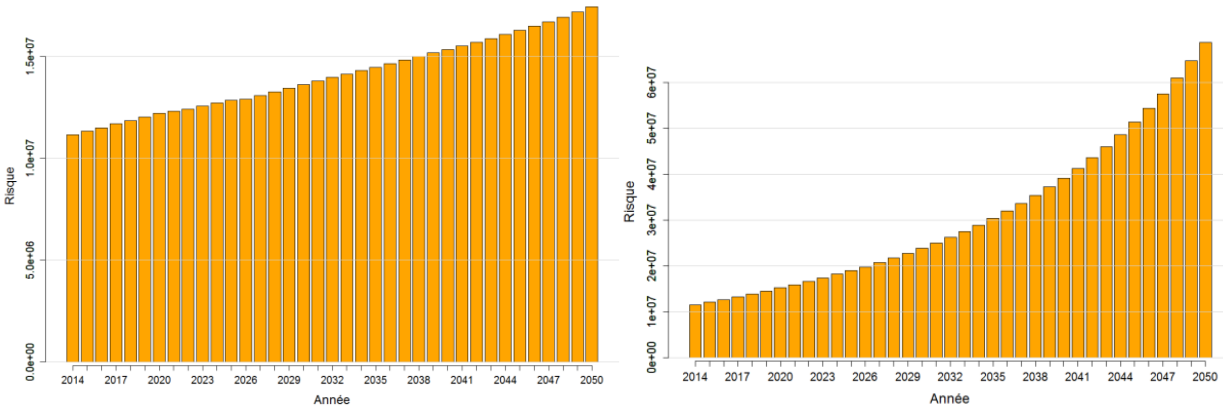


FIGURE 13.19: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur *I4P* risque **inondation** (mm^2·bar par an pondérées) chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario “statu quo”. Droite : scénario “on ne renouvelle plus”.

Le risque inondation est toujours le plus faible dans la stratégie “Supérieur autour des éléments vulnérables” par rapport aux trois autres scénarios (cf. figures 13.19 et 13.20).

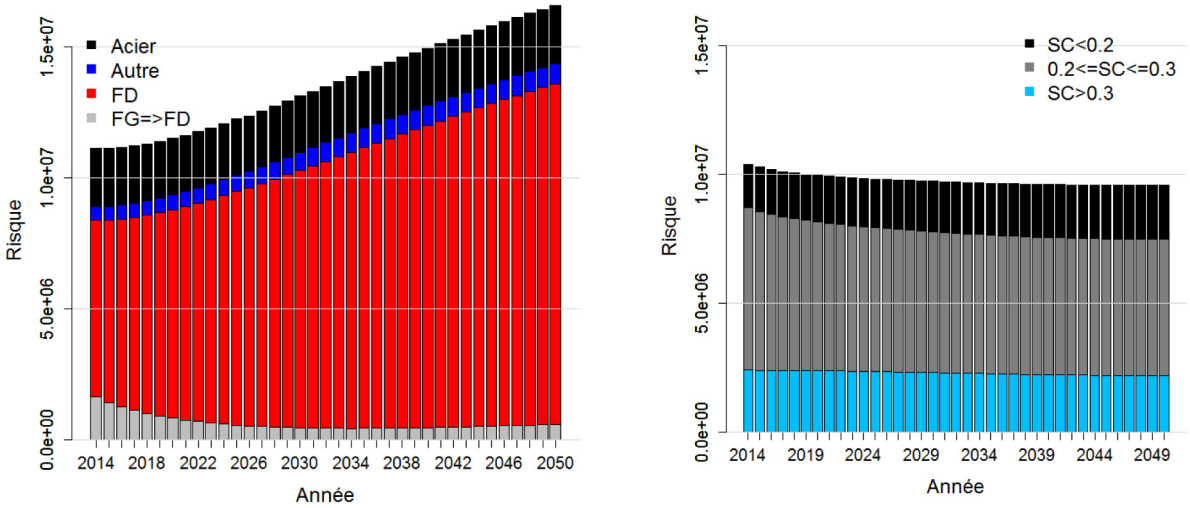


FIGURE 13.20: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur *I4P* risque **inondation** (mm^2·bar par an pondérées) chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario “Plus drastique avec les fontes grises”. Droite : scénario “Supérieur autour des éléments vulnérables”.

13.4.4 Volume de fuite *I6P*

Pour estimer *I6P* c’est à dire le volume de fuite induit par les défaillances sur le réseau, nous avons utilisé l’équation 11.5.

Cet indicateur augmente légèrement sur la durée de la prévision pour atteindre 3 510 m^3 dans le scénario “statu quo”(cf. figure 13.21). Dans le scénario “on ne renouvelle plus” il atteint 16 000 m^3 en 2050 c’est à dire qu’il est 4,5 fois plus élevé que dans le scénario “statu quo”.

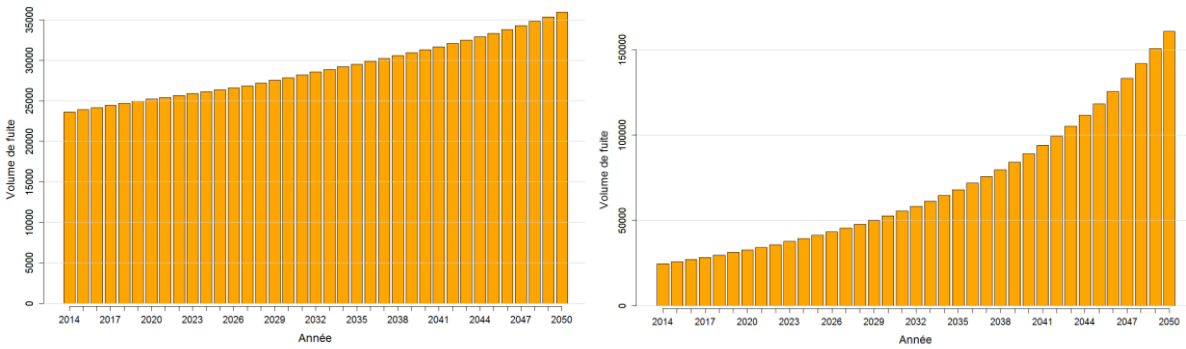


FIGURE 13.21: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I6P$ volume de fuite (m^3 par an) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "statu quo". Droite : scénario "on ne renouvelle plus".

De même que dans la section précédente sur du court, du moyen et du long terme le volume de fuite le plus faible est lié à la stratégie "Supérieur autour des éléments vulnérables"(cf. figures 13.21 et 13.22).

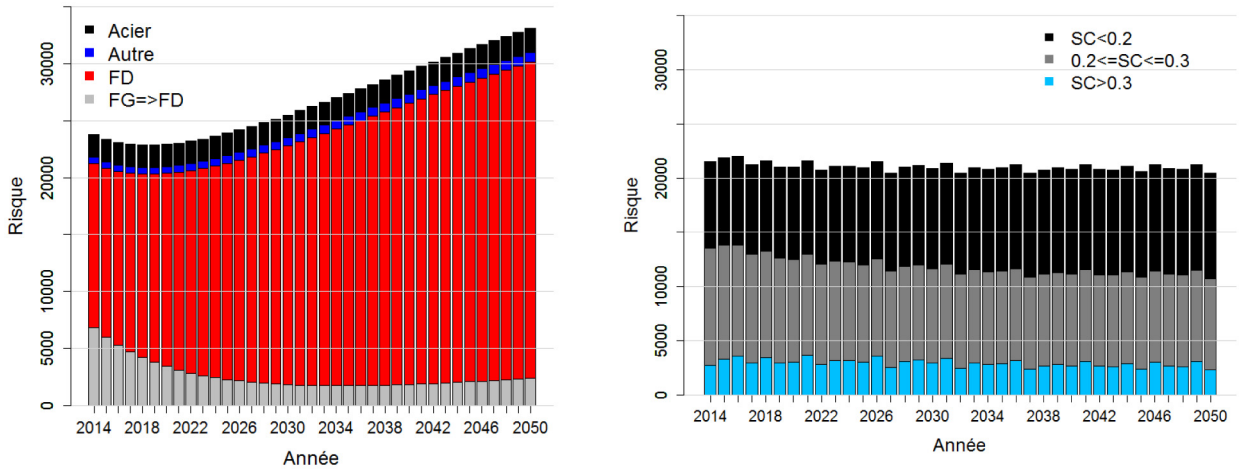


FIGURE 13.22: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I6P$ volume de fuite (m^3 par an) pour chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises". Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables".

13.5 Modèle "M3 économique"

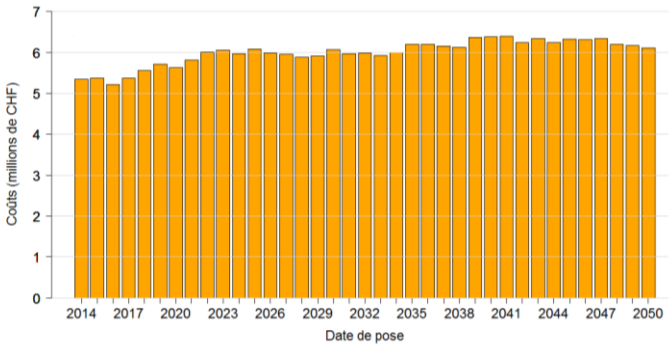
Les sorties de M3 économique sont les 2 indicateurs financiers $I1F$ (coûts du renouvellement) et $I2F$ (coûts des réparations).

13.5.1 Coûts du renouvellement $I1F$

Pour estimer $I1F$ le coût annuel de renouvellement des canalisations, nous avons utilisé l'équation 12.1 et en général un coût unitaire de renouvellement de 459 CHF par mètre [1], sauf pour la strate acier pour laquelle nous avons utilisé 1 032 CHF par mètre [2].

1. 459 correspond à 80% de travaux coordonnées, de diamètre moyen 200 mm. Sachant que les travaux coordonnés coûtent en moyenne 25% de moins que les travaux sans coordination.
2. 1 032 correspond à 80% de travaux coordonnées, de diamètre moyen 300 mm.

Cet indicateur oscille entre 5,2 et 6,3 millions de CHF dans le scénario “statu quo”(cf. figure 13.23) alors qu’il est nul (0 CHF) dans le scénario “on ne renouvelle plus”. $I1F$ dans le scénario “statu quo” est donc inférieur au seuil objectif de 7 millions de CHF par an que s’était fixé eauservice Lausanne.



0 CHF

FIGURE 13.23: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I1F$ coûts du renouvellement des canalisations chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario “statu quo”. Droite : scénario “on ne renouvelle plus”.

Parmi les 4 stratégies présentées, les coûts du renouvellement des canalisations sont les plus élevés sur du court terme dans la stratégie où eauservice renouvelle plus que par le passé les canalisations en fonte grise (cf. figures 13.23 et 13.24). Cependant à long terme, c’est la stratégie où eauservice renouvelle plus autour des usagers vulnérables qui devient la plus coûteuse.

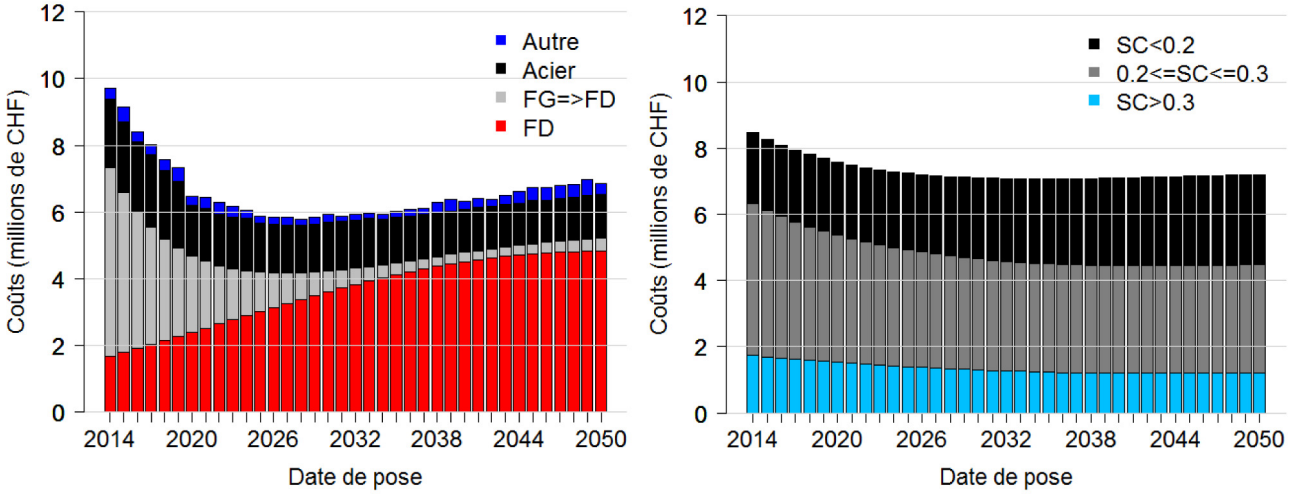


FIGURE 13.24: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur $I1F$ coûts du renouvellement des canalisations chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario “Plus drastique avec les fontes grises”. Droite : scénario “Supérieur autour des éléments vulnérables”.

13.5.2 Coûts de réparation $I2F$

Pour estimer $I2F$ le coût de la réparation des défaillances, nous avons utilisé $I1P$ le nombre de défaillances calculé précédemment et l’équation 12.5. Cet indicateur est estimé à l’échelle du tronçon, par conséquent nous avons pu utiliser le tableau 12.4 où les coûts unitaires dépendent du matériau et du diamètre des tronçons.

L’estimation d’$I2F$ est portée sur les figures 13.25 et 13.26. Pour le scénario “statu quo” $I2F$ varie entre 0,8 et 1 million de CHF par an, alors qu’il est croissant dans le scénario “on ne renouvelle plus” jusqu’à atteindre 6 millions de CHF en 2050.

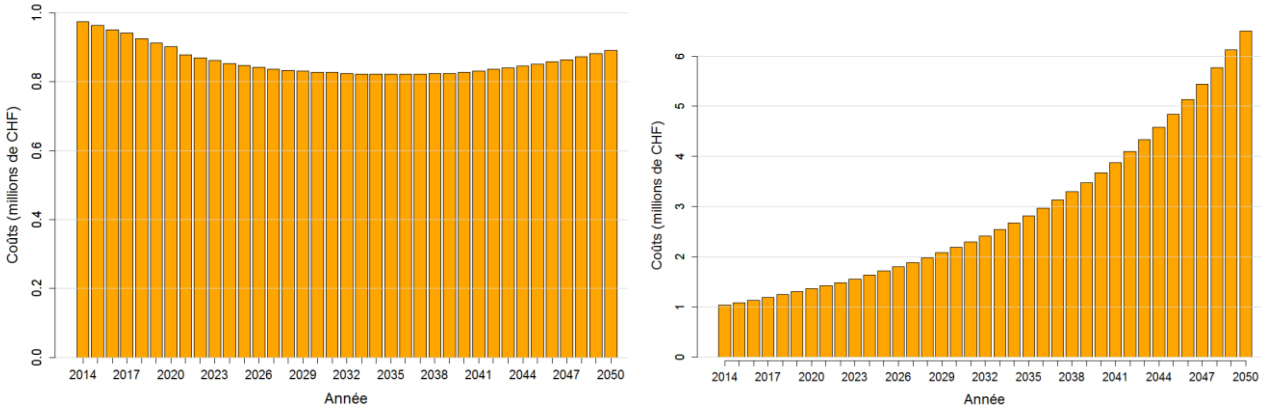


FIGURE 13.25: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur *I2F* coûts des réparations des canalisations chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "statu quo". Droite : scénario "on ne renouvelle plus".

Le coûts de réparation des défaillances sont les plus élevés dans la stratégie où eauservice ne renouvelle plus. Ensuite, la moins chère sur du court terme est "Plus drastique avec les fontes grises". Cependant sur du long terme la stratégie "Supérieur autour des éléments vulnérables" devient la moins chère.

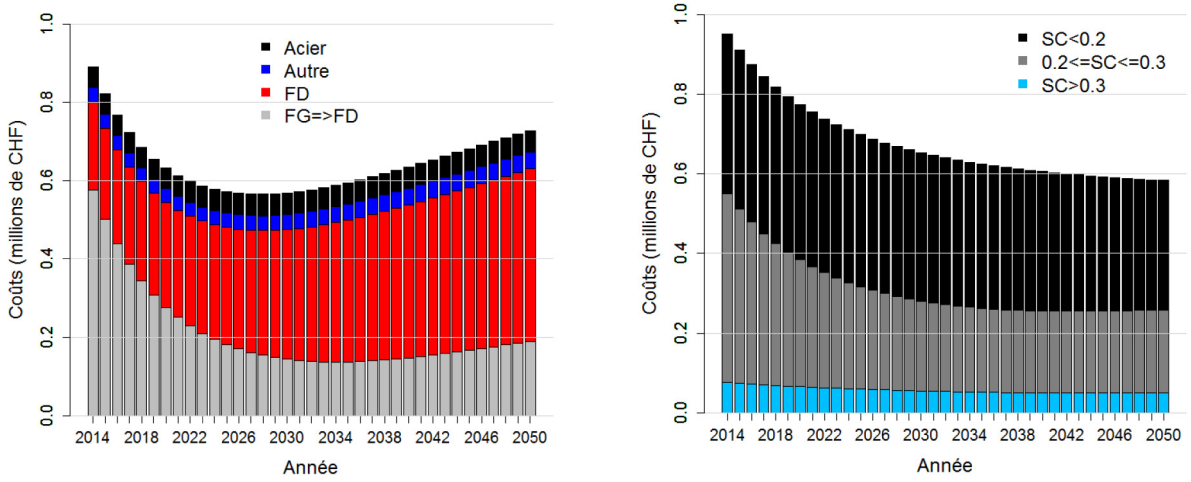


FIGURE 13.26: Eauservice Lausanne, réseau en ville. Indicateur *I2F* coûts des réparations des défaillances chaque année prospective [2014 ; 2050]. Gauche : scénario "Plus drastique avec les fontes grises". Droite : scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables".

13.6 Modèle "M4 décisionnel"

Actuellement le modèle OPTIMEAU que nous avons développé s'arrête à la comparaison des indicateurs précédents. Nous n'avons pas de modèle mathématique décisionnel M4.
Cependant, la comparaison des indicateurs pour les deux scénarios précédents apporte beaucoup d'information et peut permettre de tirer quelques enseignements.
Moyennant des efforts en renouvellement les premières années sur la fonte grise supérieurs à ceux du scénario "statu quo" mais compensés les années suivantes, nous aboutissons à un nombre de défaillances moindre et à un niveau de performance supérieur que dans le scénario "statu quo". Au sein du scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables" l'effort est plus élevé qu'aujourd'hui mais il a une tendance à se rapprocher du scénario "statu quo" à long terme ce qui permet de réduire significativement le nombre de défaillances et les risques associés puis de les stabiliser. En terme de coûts, le niveau supérieur du coût de renouvellement du scénario "Supérieur autour des éléments vulnérables" n'est

que partiellement compensé par les coûts de réparation lorsqu'on le compare au scénario "statu quo". Ces résultats montrent qu'il serait possible pour les AOEP, en affinant les scénarios, de construire une stratégie adaptée constituant un compromis entre leurs différents objectifs.

Le renouvellement des canalisations d'eau potable comporte plusieurs objectifs, souvent contradictoires. Plus les risques sont minimisés, plus les coûts ont tendance à augmenter. La prise de décision est donc multi-critères et nécessite des choix ou jugements. Pour aller plus loin, il est important de noter qu'il existe tout un pan disciplinaire qui travaille sur ces méthodes (matrice de jugement, l'optimum de Pareto etc.).

Ainsi, plusieurs chercheurs ont travaillé à classifier ces méthodes notamment [Hajkowicz and Collins, 2007; Ananda and Herath, 2009]. [Scharling, 1985] cité par [Lehoux and Vallée, 2004] explique que ces méthodes peuvent être divisées en 3 catégories selon la façon dont les jugements sont agrégés :

- agrégation complète : on cherche à agréger n critères afin de les réduire en un critère unique [cf. Somme des notes (WSM [3]), Multiplication des ratios (WPM [4]), Analytic Hierarchy Process (AHP) [Saaty and Peniwati, 2008], Multi Attribute Utility Theory (MAUT), Analyse Coûts Bénéfices (ACB) (cf. annexe F), etc.]
- agrégation partielle : on cherche à comparer des actions potentielles ou des classements les uns aux autres et à établir entre ces éléments des relations de surclassement [cf. ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE) [Roy, 1996], Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations Melchior (PROMETHEE), Qualifex, Orestre, Regim, Naïade, etc.].
- agrégation locale et itérative : on cherche en premier lieu une solution de départ. Par la suite on procède à une recherche itérative pour trouver une meilleure solution (cf. Cônes d'amélioration, goal programming, STEM, Ziont-Wallenius, etc.).

Actuellement notre démarche est unidirectionnelle, nous partons de la survie puis nous estimons 11 indicateurs. Il aurait été intéressant d'utiliser des modèles dynamiques inverses telles que l'Open-Loop Feedback Control (OLFC) [Madanat et al., 2006] qui permettent de partir des indicateurs puis de remonter.

13.7 Conclusion

Pour chaque scénario prospectif nous sommes capables de calculer 11 indicateurs prévisionnels. La fonction de survie permet de connecter tous ces indicateurs entre eux. Nous venons de comparer quatre scénarios sur le territoire d'eauservice Lausanne au travers de 10 indicateurs. Nous n'avons pas utilisé l'indicateur correspondant au risque d'effondrement de terrain $I5P$ car il est mineur à Lausanne. Dans notre démarche Optimeau, il n'y a pas de modèle décisionnel M4. Néanmoins, l'analyse des résultats permet une comparaison qualitative des scénarios et ouvre des perspectives pour les affiner.

3. WSM : Weight Sum Method
4. WPM : Weighted Product Model

Partie III : Conclusion

Nous avons développé une méthode pour évaluer les besoins en renouvellement en associant pour chaque scénario une survie prospective globale ou par strate. Par un couplage au modèle de LEYP des survies (chaîne de Markov) nous avons créé un modèle permettant d'estimer les défaillances à long terme. La survie permet de prendre en compte le renouvellement des réseaux dans l'évaluation des défaillances. Toujours à partir de la survie, 10 autres indicateurs (de moyen financier, de réalisation et de résultat) sont estimés. Nous avons ensuite appliqué cette démarche aux terrains d'étude. Quatre scénarios d'eauservice Lausanne ont été présentés. Ils montrent les potentialités et l'intérêt de cette démarche. La comparaison des scénarios entre eux permet d'éclairer les décideurs. Cette approche pourra être améliorée par la conception d'un modèle décisionnel.

Conclusion et perspectives

Le renouvellement des réseaux d'eau potable est une thématique à forts enjeux tant sur les volets économiques (infrastructures à forte valeur nécessaires à de nombreuses activités) que social (l'eau au robinet fait partie de notre confort quotidien) et environnemental (l'eau est précieuse pour la biosphère). Cependant la gestion de ces infrastructures est complexe. En effet, elles sont souterraines et renouvelables par fragments. De plus, leur renouvellement dépend de leur niveau de dégradation mais aussi notamment de la coordination avec d'autres services (gaz, transport urbain, chaussée, etc.).

Sur le court terme, la question principale est la suivante : *"Si cette année l'AOEP a un budget de X euros, quels travaux de renouvellement doit-elle réaliser pour maximiser sa performance sur du court terme ?"* Des modèles de planification dits "à court-terme" (< 5 ans) permettant de répondre à cette question existent, et semblent en adéquation aux besoins exprimés par les AOEP à cette échelle temporelle.

Sur le long terme la question principale est la suivante : *"Combien doit investir une AOEP pour le renouvellement de ses canalisations, dans les 5 à 20 ans à venir afin d'avoir un rapport coût performance acceptable et pérenne ?"* Des modèles de planification, dits "à long terme" ($>$ durée du PPI), existent et tentent de répondre à cette question. Néanmoins, ces modèles sont très peu nombreux et en général très frustes. Ils reposent par exemple sur des courbes de survie postulées a priori, peu justifiées et pouvant être éloignées de la réalité.

Par conséquent, nous avons décidé de créer un nouveau modèle long terme nommé OPTIMEAU. La démarche proposée suit les 4 grandes étapes de la roue de Deming : 1. Évaluation des pratiques passées, 2. Ajustement des objectifs, 3. Planification des actions futures et 4. Réalisation des actions planifiées. Nous avons développé uniquement les trois premières étapes.

Le modèle long terme OPTIMEAU repose sur l'exploitation de courbes de survie rétrospectives établies à partir des données historiques sur les trois terrains d'étude. Pour cela nous avons effectué une analyse rétroactive et reconstruit les distributions statistiques des durées de maintien en service passées dont résulte la performance actuelle. Ces durées de "vie" ont été calées sur des données historiques.

Une première étape clé a consisté en une importante **consolidation des données** pour combler les lacunes et rectifier les incohérences. D'une part, nous avions les âges à la mise hors service uniquement sur une fenêtre d'observation (cf. troncature et censure) donc nous avons dû prendre en compte ces biais par la méthode Kaplan-Meier. Ensuite, nous avons détecté que la longueur des tronçons est très disparate par conséquent nous avons créé une survie en linéaire. Enfin, les courbes de survie empirique sont apparues lacunaires (plage d'âges manquants) par conséquent nous avons dû utiliser des méthodes de complètement (régression locale, Weibull).

Une seconde étape clé a été la reconstitution des **courbes de survie passée**. Elles peuvent être construites à l'échelle du réseau, de strates ou par individu (cf. le modèle WeiCo). Ainsi, l'ensemble des tronçons peuvent être stratifiés selon des variables pertinentes regroupées en classes comme le type de matériau, le diamètre, la vulnérabilité ou la localisation. L'intérêt de la stratification réside dans la modulation des résultats en fonction d'une variable pertinente. La survie au tronçon permet de prendre en compte un grand nombre de variables explicatives (dont le nombre de défaillances) qui peuvent être corrélées entre elles. Faute de données, nous n'avons pas pu utiliser comme variable de stratification

ou distinguer dans les modèles au tronçon, les mises hors service pour cause de mauvais état de celles liées à la coordination avec les autres chantiers. Cela induit des limites dans l'approche, sur lesquelles nous reviendrons.

Une troisième étape clé a été la traduction des stratégies en **courbes de survie prospective**. Nous avons commencé par expliciter les objectifs des terrains d'étude puis nous avons transformé leurs stratégies en courbes de survie prospective. A partir des courbes de survie onze indicateurs prévisionnels (de moyens financiers, de réalisation et de performance) peuvent être calculés. Nous avons donc une loi connectant les moyens financiers, les réalisations et les résultats. Cependant, nous n'avons pas réussi à créer un modèle inverse, c'est-à-dire de partir des réalisations afin de remonter à la loi de survie.

Le modèle OPTIMEAU sert à simuler plusieurs stratégies et à les comparer via l'évolution future de onze indicateurs, permettant au gestionnaire de juger si une **stratégie** est cohérente avec ses objectifs. Nous avons pu simuler l'évolution future d'une batterie d'indicateurs de performances, pour plusieurs stratégies simples et en comparer les effets.

L'indicateur le plus complexe à calculer sur du long terme est l**e nombre de défaillances** $I1P$. Cet indicateur est basé sur un modèle de prédiction des défaillances (le LEYP) et sur une chaîne de Markov permettant de prendre en compte la survie donc le niveau de renouvellement des tronçons. Pour estimer cet indicateur nous n'avons pas utilisé les survies au tronçon car nous avons buté sur un verrou numérique. En effet, par exemple au SEDIF, il y a 290 000 tronçons cela reviendrait à travailler avec 290 000 survies différentes. Le volume de calcul étant trop important à cette échelle, nous avons opté pour des estimations à l'échelle des strates. La stratification détermine les sous-groupes élémentaires porteurs d'une survie et d'un modèle LEYP. La variable de stratification vise deux objectifs qui peuvent être contradictoires :

- obtenir les meilleurs modèles de prévision des défaillances (LEYP) ;
- identifier la survie de groupes pouvant faire l'objet de stratégies de renouvellement différentes.

Au sein d'un sous-groupe élémentaire, tous les tronçons sont régis par la même loi de survie ainsi, la propension à renouveler préférentiellement ceux qui présentent un risque élevé (de casser ou de provoquer des dommages) n'est pas prise en compte, ce qui conduit certainement à surestimer le nombre de défaillances futures à long terme.

Le modèle OPTIMEAU a permis d'obtenir des premiers résultats prometteurs. Le modèle OPTIMEAU est **original** :

- l'utilisation des courbes de survie passées propres à chacun des services d'eau permet de tenir compte dans le modèle de données objectives, résultant des pratiques réalistes et non de données arbitraires ;
- la construction innovante de l'indicateur prévisionnel du nombre de défaillances futures repose sur la modélisation des défaillances observées et intègre les effets du renouvellement à venir ;
- la représentation graphique du linéaire à renouveler permet de visualiser le vieillissement du réseau année par année.

L'ensemble de la démarche est très **reproductible** et est applicable sans problème sur des réseaux de différentes tailles. Elle a été appliquée avec succès sur le réseau d'eau de la ville de Lausanne en Suisse (900 km), du Grand Lyon (3 900 km) ou sur celui du SEDIF 9 fois plus étendu.

A la suite de cette étude, plusieurs perspectives peuvent être envisagées.

Une première amélioration vise à mieux s'écarter de la stratégie statu quo en recherchant des stratégies **optimales** visant à mieux intégrer les objectifs et les contraintes des AOEP. Les verrous à lever restent complexes, dans la mesure où les courbes de survies observées dépendent à la fois de la nature, de l'histoire du patrimoine, de la combinaison entre les processus physiques de défaillances et des pratiques organisationnelles de la collectivité. Découpler les contributions de chaque facteur est un passage nécessaire pour construire des survies prospectives pertinentes.

Ce travail devra se faire en deux étapes. Dans un premier temps, à partir d'une analyse fine des processus opérationnels de décision passés, il pourra être étudié comment les causes clés (coordination vs mauvais état) de mise hors service des tronçons contribuent à la survie passée.

Dans un second temps, il devrait être possible de reconstruire de nouvelles courbes de survie opérationnelles prospectives, qui intégreront de manière explicite les éléments essentiels qui président au processus de décision (coordination vs mauvais état). On pourra ainsi comparer des stratégies plus complexes et en meilleure adéquation avec les pratiques (par exemple profiter plus efficacement des opportunités de travaux).

Une seconde perspective serait d'améliorer l'estimation du **nombre de défaillances futures** $I1P$. Pour cela il faudrait travailler avec des survies au tronçon plutôt qu'à la strate ce qui revient à intégrer dans les calculs les variables qui permettent d'améliorer le modèle de prévision des défaillances et celles qui sont pertinentes pour traduire les stratégies en courbes de survie. Cependant cette proposition induit actuellement un verrou : des temps de calcul très importants par la multiplication notamment des matrices de transition. La solution passe probablement par des reformulations mathématiques et de l'optimisation des codes informatiques.

Actuellement le modèle OPTIMEAU fonctionne par essai-erreur, divers scénarios sont testés jusqu'à ce qu'un scénario atteigne les objectifs fixés par l'AOEP. Une amélioration serait d'introduire une méthode d'**optimisation mathématique**, c'est-à-dire un "modèle décisionnel M4" qui fasse ressortir la (ou les) stratégie(s) permettant d'atteindre, dans un champ de contraintes, des objectifs fixés sur le long terme. Cela suppose d'être en mesure de formaliser le lien entre les paramètres de la fonction de survie prospective et les règles de renouvellement. Actuellement ce chaînon est manquant dans le modèle OPTIMEAU. D'une manière plus large le pilotage à long terme des performances (et le choix d'une stratégie optimale) passe par l'établissement de modèles d'aide à la décision multicritères, dans la mesure où chaque composante de la performance ne contribue que partiellement à l'image globale de la performance et que le choix passe par une recherche de compromis.

Enfin, l'ajout de ce chaînon manquant entrainera sûrement une **ré-évaluation des méthodes de hiérarchisation de court-terme**, selon leur capacité à assurer la cohérence avec la stratégie de long terme choisie. En effet, on peut s'interroger sur la capacité des processus décisionnels de court terme à atteindre les objectifs de performance à long-terme.

Bibliographie

Aalen, O.
1976. Nonparametric inference in connection with multiple decrement models. *Scandinavian Journal of Statistics*, 3 :15–27.

Aalen, O., O. Borgan, and H. Gjessing
2008. *Survival and Event History Analysis : A Process Point of View.* Springer.

AERMC
2007. *Outils socio-économiques pour une nouvelle culture de l'eau, glossaire, guide technique.* AERMC.

Agbenowosi, N. K.
2000. *A mechanistic analysis based decision support system for scheduling optimal pipeline replacement.* PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute, USA.

Ajuste, C., J.-M. Berland, and J.-L. Celerier
2004. *Réhabilitation/remplacement des réseaux d'eau potable en zone rurale, FNDAE, OIEAU.*

Alegre, H.
1997. A general framework of performance indicators in the scope of water supply. In *IWSA, Workshop on Performance Indicators for Transmission and Distribution Systems, 5-6 mai 1997, Lisbonne, Portugal.*

Alegre, H., J. M. Baptista, E. Cabrera, F. Cubillo, P. Duarte, W. Hirner, and R. Parena
2010. *Performance Indicators for water supply services, second edition.* IWA publishing (First published 2006, reprinted 2010).

Alegre, H. and S. Coelho
2012. *Water Supply System Analysis*, chapter Infrastructure Asset Management of Urban Water Systems, chapter 3, Pp. 49–73. InTech.

Alioum, A. and K. Leffondre
2014. *Analyse des données de survie.* ISPED.

Ananda, J. and G. Herath
2009. A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning. *Ecological Economics*, 68(10) :2535–2548.

Ancelin, C. and M. Godet
1983. *Prospective et prévision technologique.* Centre d'étude des systèmes et des technologies avancées.

Andersen, P., O. Borgan, R. Gill, and N. Keiding
1997. *Statistical models based on counting processes.* Springer series in statistics.

Apotheloz, S.
2009. *Utilisation du module ARP de Care-W, mode d'emploi dans le cadre de MEDIREL. (MEthode de Diagnostic du Réseau d'Eau de Lausanne).* Eauservice Lausanne.

APTgroup
2015. *The Asset Performance Toolkit http ://aptgroup.com.au/aptools.html.*

Arreguín-Cortes, F. I. and L. H. Ochoa-Alejo
1997. Evaluation of water losses in distribution networks. *Journal of water resources planning and management*, 123(5) :284–291.

Asnaashari, A.
2007. *Water pipelines failure modeling : Statistical artificial neural networks and survival modelling.* PhD thesis, Unviersité des Sciences et Technologies de Lille.

ASTEE, AITF, and ONEMA
2013a. *Gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable - Politiques d'investissement et gestion des immobilisations : cadre et bonnes pratiques - Une vision à la croisée des approches techniques, comptables et financières. Coordination M. Sylvain Charrière et Mme Caty Werey.*

ASTEE, ONEMA, AITF, and MEDDE
2013b. *Gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable. Elaboration du descriptif détaillé des ouvrages de transport et de distribution d'eau , coordonné par Charrière, S.*

AWWA
2010. *Buried no longer : confronting america's water infrastructure challenge.*

Babykina, E.
2010. *Modélisation statistique d'évènements récurrents. Exploration empirique des estimateurs, prise en compte d'une covariable temporelle et application aux défaillances des réseaux d'eau.* PhD thesis, Ecole doctorale de Mathématiques et Informatique, Université de Bordeaux II, France.

Baptista, J. M. and H. Alegre
2001. *D1, CARE-W : WP1 Construction of a control panel of performance Indicators for réhabilitation. - Report 1.1 preliminary rehab PI system.* LNEC.

Baptista, J. M. and H. Alegre
2002. *D2, CARE-W : WP1 Construction of a control panel of performance Indicators for réhabilitation- Report 1.2- Validation of the rehabilitation performance indicators system.* LNEC.

Baur, R. and I. Kropp
2002. Selecting and scheduling infrastructure rehabilitation projects. *Water Science and Technology : Water Supply*, 2(4) :43–50.

Bayart, J. and M. Vargas
2015. *Total Cost of Ownership and Environmental Life Cycle Assessment of potable water pipework tool development. Methodological report prepared for : SAINT-GOBAIN PAM.* Quantis.

Bentley
2015. *http ://www.bentley.com/fr-FR/Products/WaterCAD/Product-Overview.htm.*

Berland, J.-M., J.-A. Faby, and C. Juery
2005. *La gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable : enjeux et recommandations.*

Bernstein, P. L.
1998. *Against the Gods : The Remarkable Story of Risk.* Broché.

BFM
2015. *Le 24 mars 2015, un Airbus A320 de la compagnie allemande Germanwings s'écrase dans les Alpes de Haute-Provence, avec 150 personnes à son bord.* BFM news.

Boesch, J.
2014. *Avancement de la mise en oeuvre de la Réforme DT-DICT, présentation journée Technique de l'ASTEE, gestion patrimoniale des réseaux. MEDDE.*

Bouffard, P. and R. Creux
1973. *Fontaines miroirs de la Suisse.* Bonvent et Fontainemore.

Bouleau, G.
2009. *Bilan des outils et évaluation des besoins en prospective de l'ONEMA.* CEMAGREF.

Bouleau, G. and L. Guérin-Schneider
2011. *Des tuyaux et des hommes. Les réseaux d'eau en France.* Quae éditions.

Breysse, D.
2009. *Maîtrise des risques en génie civil 1, multiples dimensions des risques en génie civil.*, volume 1. Lavoisier.

Bright, H., U. Lohmann, and J. Morrison
2002. *Study Guide d' Environmental Valuation at Wye Campus. 220 p.* Imperial College London.

Brémond, B., C. Laplaud, B. Huchin, J. C. De Massiac, and E. Renaud
2005. *Système intégré d'aide au renouvellement optimisé des conduites adapté aux petites et moyennes collectivités : SIROCO.*

Bruyeron, N. and C. Re
2012a. *Gestion patrimoniale du reseau d'eau potable du SEDIF, phase 1 - Etude bibliographique.*

Bruyeron, N. and C. Re
2012b. *Prestations techniques de conseil, de suivi et d'expertise liées aux critères de choix des conduites à renouveler dans le cadre de la gestion patrimoniale du réseau d'eau potable du SEDIF, Marche subsequent 7, phase 2 - Réalisé par le bureau d'étude Naldeo*, number 111.

Burn, S., S. Tucker, M. Rahilly, P. Davis, R. Jarrett, and M. Po
2002. *[CD] Pipeline Asset and Risk Management System (PARMS), demonstration CD.*

Burn, S., S. Tucker, M. Rahilly, P. Davis, R. Jarrett, and M. Po
2003. Asset planning for water reticulation systems – the parms model. *Water Science and Technology : Water Supply*, 3(1-2) :55–62.

Cador, J.
2002a. *Le patrimoine en canalisations d'AEP en France, Bilan des huit enquêtes départementales et estimation nationale.*

Cador, J.
2002b. *Le renouvellement du patrimoine en canalisations d'eau potable en France.*

Canalisateurs
2012. *Inventaire des réseaux d'eau et d'assainissement, guide pratique réalisé par les canalisteurs de France, l'AMF, la FP2E, CINOV, Fédérations des distributeurs d'eau indépendants (FDEI), SYNTEC ingénierie.* Canalisateurs de France.

CG-Marne
2015. *http ://www.ccepc.fr/ccepc.asp ?idpage=5543&id=63170.*

Chavent, M., V. Kuentz, A. Labenne, B. Liquet, and J. Saracco
2015. *Package 'PCAmixdata'.* Université de Bordeaux, IRSTEA, CRAN.

ChevassusAuLouis, B.
2007. *L'analyse des risques – L'expert, le décideur et le citoyen.* Versailles : QUAE.

Clark, R. M., C. L. Stafford, and J. A. Goodrich
1982. Water distribution systems : A spatial and cost evaluation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 108(3) :243–256.

Claude, U. and B. Lyon
1997. Generalisation de l'estimateur Kaplan-Meier d'une loi de durée de maintien en presence d'observations tronquées à gauche. *Bulletin Français d'actuariat*, 1(2) :97–114.

Claudio, K.
2014. *Maitrise des pertes sur les réseaux d'eau potable. Mise en place d'un modèle de fuites multi-états en secteur hydraulique instrumenté.* PhD thesis, Université de Bordeaux.

Cleveland, W.
1979. Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74(368) :829–836.

Cleveland, W. S. and C. Loader
1996. *Statistical Theory and Computational Aspects of Smoothing*, chapter Smoothing by Local Regression : Principles and Methods, P. 49. Physica-Verlag Heidelberg.

CNRC
2015. Systèmes d'aqueducs vieilissants.

Cousin, E. and E. Taugourdeau
2015. *Trade-off between water loss and water infrastructure quality : A cost minimization approach.*

Cox, D. R.
1972. Regression models and life-tables. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological),*, 34(2) :187–220.

Dandy, G. C. and M. O. Engelhardt
2006. Multi-objective trade-offs between cost and reliability in the replacement of water mains. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(2) :79–88.

Dauphiné, A.
2001. *Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer.* Armand Colin.

Davis, P., D. De Silva, D. Marlow, M. Moglia, S. Gould, and S. Burn
2008. Failure prediction and optimal scheduling of replacements in asbestos cement water pipes. *Journal of Water Supply : Research and Technology*, 57.4 :239–252.

Delaney, P. and W. Kabiling
2008. Effectively managing aging assets : using a simulation model to improve o&m and capital planning processes. *Management Quarterly*, 49(4) :1–10.

Deming, W. E.
1986. *Out of the Crisis.*, number ISBN 0-911379-01-0. MIT Center for Advanced Engineering Study.

Dequesne, J., E. Brejoux, A. Claverolas-Renard, and T. Peyrin
2015. *Observatoire des services publics d'eau et d'assainissement SISPEA. Panorama des services et de leur performance en 2012.* ONEMA.

Dequesne, J., E. Brejoux, A. Liccardi, and A. Claverolas-Renard
2014. *Observatoire des services publics d'eau et d'assainissement SISPEA. Panorama des services et de leur performance en 2010.*

DGAFP
2007. *LOLF et GRH : les nouvelles règles de gestion des ressources humaines dans la fonction publique. DGAFP : Direction Générale de l'Administration et de la Fonction Publique.* La documentation française.

DNV
2015a. *https ://www.dnvgl.com/services/advanced-water-distribution-analysis-software-synergi-water-2792.*

DNV
2015b. *http ://www.gl-group.com/en/water/Software.php.*

Dridi, L.
2005. *Développement et validation d'une approche de remplacement des conduites pour les réseaux d'eau potable.* PhD thesis, Université du Québec, Institut National Canadien de la Recherche Scientifique (INRS), Canada.

Drouillard, M., Y. Le Gat, C. Leclerc, and E. Sigoillot
2015. Assessing the dégradation of water service cconnection with varying levels of asset knowledge. *Water Asset Management International*, 11.2 :8–11.

Eauservice
2013a. *Compte-rendu des entretiens menés à Eauservice Lausanne, le 8 et 9 Juillet 2013 avec Mme Linda Viguet, M. Marvin Ancian, M. Débieu, M. Mickael Wissa, M. Hadem Boudra, M. Frédéric Cunin, M. Aitor Ibarrola et M. Sébastien Apotheloz.*

Eauservice
2013b. *Indicateurs de la division distribution d'eauservice Lausanne, fichier Excel.*

Eauservice
2014. *Rapport annuel 2013 eauservice Lausanne.*

Eauservice
2015a. *Compte-rendu des entretiens menés à Eauservice Lausanne en janvier 2015 auprès de Christelle Sanz, Linda Viguet, Sébastien Apotheloz, Aitor Ibarrola et Frédéric Cunin.*

Eauservice
2015b. *Rapport annuel 2014 d'eauservice Lausanne.*

Eisenbeis, P.
1994. *Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable.* PhD thesis, Université Louis Pasteur Strasbourg, France.

Eisenbeis, P., K. Laffréchine, P. Le Gauffre, Y. Le Gat, J. Røstum, L. Tuhovčák, and P. Valkovič
2003. *D4, CARE-W : WP2 Description and validation of technical tools. - Report 2.2 Tests and validation of technical tools.*, number 2.2. CEMAGREF, INSA Lyon, SINTEF-NTNU et Brno University.

Eisenbeis, P., Y. Le Gat, K. Laffréchine, P. Le Gauffre, A. König, J. Røstum, L. Tuhovčák, and P. Valkovič
2002a. *D3, CARE-W : WP2 Description and validation of technical tools. - Report 2.1 models description*, number 2.1. CEMAGREF, INSA Lyon, SINTEF-NTNU et Brno University.

Eisenbeis, P., Y. Le Gat, and M. Poulton
2002b. Failure forecast and hydraulic reliability models for rehabilitation decision aid. In *International Conference for Computer aided rehabilitation of water networks (CARE-W), in Dresden Germany, November 1st.*, Pp. 97–106.

Eisenbeis, P., M. Poulton, K. Laffréchine, and P. Le Gauffre
2004. *D5, CARE-W : WP2 Description and validation tools. - Report 2.3 Guidelines for the use of technical tools.* CEMAGREF et INSA Lyon.

Elbée, P.
2015. *http ://www.performance-et-vie.fr/articleall.php ?id=15.*

Engelhardt, M. O. and P. J. Skipworth
2005. Wilco, state of the art decision support. In *Proceedings of the 8th International Conference on Computing and Control for the water Industry, Exeter, United Kingdom*, Pp. 27–32.

Essamin, O., K. El-Sahli, and G. Hovhanessian
2004. The great man made river management system : A pipe risk management system (prms) for prestressed concrete cylinder pipe : How an expert model and monitoring extend a pipeline lifespan at lower cost. *Pipeline Engineering and Construction*, 146(9) :1–11.

Fangeat, D.
2015. Drinking water infrastructure of « métropole de lyon » : strategic asset management and technical heritage. In *First international conference dedicated to water in megacities.Water- Megacities and Global change. UNESCO. 1-4 december 2015, Paris, France.*

Fantozzi, M. and A. Lambert
2010. Legitimate night use component of minimum night flows initiative. In *Water Loss 2010 - Sao Paulo.*

Fichtner
2015. *http ://www.optnet.de/index.php ?id=135.* Fichtner Asset Services & Technologies (FAST).

Fuchs, D.
2001. *Decision Support Systeme für die Rehabilitationsplanung von Wasserrohrnetzen.* PhD thesis, Graz University of Technology, Austria.

Fuchs-Hanusch, D., G. Gangl, B. Kornberger, J. Kölbl, J. Hofrichter, and H. Kainz
2008. Pirem, pipe rehabilitation management developing a decision support system for rehabilitation planning of water mains. *Water Practice and Technology*, 3(1)(1) :9.

Geem, Z. W.
2006. Optimal cost design of water distribution networks using harmony search. *Engineering Optimization*, 38(03) :259–277.

Goeldner-Gianella, L., O. Barreteau, A. Euzen, M. Pinon-Leconte, Q. Gautier, and P. Arnould
2016. *Concilier la gestion de l'eau et des territoires.* Edition Johanet.

Gogien, F., T. Fix, A et Kirkhus, and F. Joly
2014. Gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable : diagnostic de l'état de dégradation des conduites d'adduction et de transport. *L'eau, l'industrie, les nuisances*, 372 :88–93.

Gouv
2015. *http ://www.collectivites-locales.gouv.fr/mode-gestion-des-services-publics-locaux.*

Grand Lyon
2009. *Rapport annuel 2008 sur le prix et la qualité des services publics de l'eau potable et de l'assainissement du Grand Lyon.*

Grand Lyon
2010. *Rapport annuel 2009 sur le prix et la qualité des services publics de l'eau potable et de l'assainissement du Grand Lyon.*

Grand Lyon
2013a. *Compte-rendu des entretiens menés au Grand Lyon, à Véolia Lyon et à l'INSA de Lyon auprès de M. Didier Fangeat, M. Franck Braux, M. David Poinard, M. Stéphane Ravanat et M. Pascal Le Gauffre, du 22 au 24 Juillet 2013 à Lyon.*

Grand Lyon
2013b. *Rapport annuel 2012 sur le prix et la qualité des services publics de l'eau potable et de l'assainissement du Grand Lyon.*

Grand Lyon
2013c. *Rapport d'activité 2012 du Grand Lyon.*

Grand Lyon
2014a. *Compte rendu des entretiens menés au Grand Lyon avec M. Fangeat et M. Poinard le 14 juillet 2014.*

Grand Lyon
2014b. *Rapport annuel 2013 sur le prix et la qualité des services publics de l'eau potable et de l'assainissement.*

Grand Lyon
2014c. *Rapport d'activité 2013 du Grand Lyon.*

Grand Lyon
2015. *Compte rendu des entretiens menés au Grand Lyon en février 2015 auprès de Didier Fangeat et M. David Poinard.*

Greenwood, M.
1926. *The natural duration of cancer. Reports on Public Health and Medical Subjects 33, 1–26.* Her Majesty's Stationery Office, London.

Griffon, M.
2005. *Modèles et prospectives : pourquoi tant de divergences entre les prévisions des années 1990 et la réalité des années 2000 ? Par M. Griffon, Conseiller pour le développement durable auprès du Directeur général du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD).* Demeter.

Guérin-Schneider, L.
2001. *Introduire la mesure de performance dans la régulation des services d'eau et d'assainissement en France. Intrumentation et organisation.* PhD thesis, ENGREF.

Guérin-Schneider, L., A. Large, C. Wittner, and C. Werey
2016. Stratégie patrimoniale : intégrer de nouvelles dimensions dans les choix d'investissement et de financement. *Sciences Eaux et Territoires*, P. en cours.

Gustafson, J. and D. Clancy
1999. Modelling the occurrence of breaks in cast iron water mains using methods of survival analysis. In *Proceedings of the AWWA Annual Conference.*

Hadzilacos, T., D. Kalles, N. Preston, P. Melbourne, L. Camarinopoulos, M. Eimermacher, V. Kallidromitis, S. Frondistou-Yannas, and S. Saegrov
2000. Utilnets : a water mains rehabilitation decision-support system. *Computers, environment and urban systems*, 24 :215– 232.

Haidar, H.
2006. *Réhabilitation des réseaux d'eau potable : méthodologie d'analyse multicritère des patrimoines et des programmes de réhabilitation.* PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

Hajkowicz, S. and K. Collins
2007. A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Resources Management*, 21(9) :1553–1566.

Hardelin, J. and F. Marical
2011. *Taux d'actualisation et politiques environnementales : un point sur le débat.*

Herz, R.
1996. Ageing processes and rehabilitation needs of drinking water distribution networks. *Journal of Water Supply : Research and Technology*, 45(5) :221–231.

Herz, R.
2002. Developing rehab strategies for drinking water networks, dresden university of technology, germany. In *Proceedings of the 9 DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components*, P. 11.

Herz, R. and I. Kropp
2002. *D10, CARE-W : WP4 Strategic Planning and Investment.- Report 4.2 Development of the Rehab Strategy Manager software.*, number 4.2. Université technique de Dresde.

Herz, R., I. Kropp, R. Baur, and A. Lipkow
2003. *D11, CARE-W : WP4 Strategic Planning and Investment. - Report 4.3 Development of the Rehab Strategy Evaluator software.* Université technique de Dresde.

Herz, R. and A. Lipkow
2002. *D9, CARE-W : WP4 Strategic Planning and Investment - Report 4.1 Development of the scenario writer software for the exploration of future utility backgroundst.* Université technique de Dresde.

Horaud, C.
2002. Prévision des défaillances des conduites d'eau potable. Master's thesis, Université Bordeaux I, DESS Modélisation Stochastique et Recherche Opérationnelle.

Humbel, X., C. Werey, M. Tsanga-Tabi, and A. Marlangeon
2014. Phare-eco : outil de gestion patrimoniale intégré pour l'analyse de stratégies techniques et financières de maitrise de l'évolution du prix de l'eau. In *93eme congrès de l'ASTEE, Orléan, 3-6 Juin 2014.*

ISO-15288
2003. *Ingénierie systèmes – Processus de cycle de vie des systèmes.– Systems Engineering – System Life-Cycle Processes.* International Organization for Standardization. AFNOR.

ISO-24510
2007. *Activités relatives aux services de l'eau potable et de l'assainissemen– Lignes directrices pour l'évaluation et l'amélioration du service aux usagers.– Activities relating to drinking water and wastewater services– Guidelines for the assessment and for the improvement of the service to users.* International Organization for Standardization. AFNOR.

ISO-24511
2007. *Activités relatives aux services de l'eau potable et de l'assainissement– Lignes directrices pour le management des services publics de l'assainissement et pour l'évaluation des services fournis. – Activities relating to drinking water and wastewater services– Guidelines for the management of wastewater utilities and for the assessment of of wastewater services.* International Organization for Standardization. AFNOR.

ISO-24512
2007. *Activités relatives aux services de l'eau potable et de l'assainissement – Lignes directrices pour le management des services publics de l'eau potable et pour l'évaluation des services fournis. – Activities relating to drinking water and wastewater services – Guidelines for the management of drinking water utilities and for the assessment of drinking water services.* International Organization for Standardization. AFNOR.

ISO-31000
2009. *Management du risque — Principes et lignes directrices. – Risk Management– Principles and Guidelines on Implementation.* International Organization for Standardization. AFNOR.

ISO-31010
2009. *Gestion des risques — Techniques d'évaluation des risques.– Risk Management– Risk Assessment Techniques.* International Organization for Standardization. AFNOR.

ISO-51
2014. *Aspects liés à la sécurité.– Principes directeurs pour les inclure dans les normes.– Safety aspects – Guidelines for their inclusion in standards.* International Organization for Standardization. AFNOR.

ISO-55000
2014. *Gestion d'actifs — Aperçu général, principes et terminologie. – Asset management– Overview, principles and terminology.* International Organization for Standardization. AFNOR.

ISO-55001
2014. *Gestion d'actifs — Systèmes de management — Exigences. – Asset management — Management systems— Requirements.* International Organization for Standardization. AFNOR.

ISO-55002
2014. *Gestion d'actifs – Systèmes de management – Lignes directrices relatives à l'application de l'ISO 55001.– Asset management — Management systems — Guidelines for the application of ISO 55001.* International Organization for Standardization. AFNOR.

ISO-73
2009. *ISO guide. Management du risque – Vocabulaire. – Risk management – Vocabulary.* International Organization for Standardization. AFNOR.

ISO-9000
2005. *Systèmes de management de la qualité.– Principes essentiels et vocabulaire. – Quality management systems – Fundamentals and vocabulary.* International Organization for Standardization. AFNOR.

ISO-9001
2005. *Systèmes de management de la qualité — Exigences. – Quality management systems – Requirements.* International Organization for Standardization. AFNOR.

ISO-9004
2000. *Systèmes de management de la qualité – Lignes directrices pour l'amélioration des performances.– Quality management systems– Guidelines for performance improvements.* International Organization for Standardization. AFNOR.

Jacobs, P. and B. Kerney
1994. Gis development with application to cast iron water main break rate. In *2nd International conference of water pipeline systems, Edinburgh, Scotland.*

Jarrett, R., O. Hussain, A. Veevers, and J. Van der Touw
2001. A review of asset management models available for water pipeline networks. In *Proceedings of International Conference of Maintenance Societies ICOMS, Melbourne.*

Jeffrey, L. A.
1985. *Predicting urban water distribution maintenance strategies : a case study of New Haven, Connecticut.* Massachusetts Institute of Technology.

Jeuge-Maynart, I., C. Girarc-Marinier, and J. Florent
2011. *Le petit larousse illustré 2011.* Larousse.

Jha, A., R. Bloch, and J. Lamond
2012. *Guide de gestion intégrée du risque dinondation en zone urbaine pour le XXIe siècle. Résumé à l'attention des décideur.* Banque mondiale.

Kabir, G., S. Tesfamariam, and R. Sadiq
2015. Prediction of water mains failure - a bayesian approach. In *12th Internationa Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP 12, Vancouver, Canada, July 12-15, 2015.*

Kanakoudis, V. K. and D. K. Tolikas
2001. The role of leaks and breaks in water networks, technical and economical methodic solutions. *Water Supply : Research and Technology-AQUA*, 50 (5) :301–311.

Kaplan, E. L. and P. Meier
1958. Non parametric estimation from incomplete observations. *Journal of the American Statistical Association*, 53(282) :457–481.

Kettler, A. J. and I. C. Goulter
1985. An analysis of pipe break in urban water distribution networks. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 12 :286–293.

Kim, J. H. and L. W. Mays
1994. Optimal rehabilitation model for water-distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(5) :674–692.

Klein, J. and M. Moeschberger
2003. *Survival Analysis, Techniques for Censored and Truncated Data, Second Edition.* Spinger.

Kleiner, Y., B. Adams, and J. Rogers
1998a. Long-term planning methodology for water distribution system rehabilitation. *Water Resources Research*, 34 :2039–2051.

Kleiner, Y., B. Adams, and J. Rogers
1998b. Selection and scheduling of rehabilitation alternatives for water distribution systems. *Water Resources Research*, 34 :2053–2061.

Kleiner, Y., A. Nafi, and B. Rajani
2010. Planning renewal of water mains while considering deterioration, economies of scale and adjacent infrastructure. *Water Science and Technology : Water Supply*, 10.6 :897–906.

Kleiner, Y. and B. Rajani
2001. Comprehensive review of structural deterioration of water mains : statistical models. *Urban Water Journal*, 3 :131–150.

Kleiner, Y. and B. Rajani
2004. Quantifying effectiveness of cathodic protection in water mains : theory. 10 (2), 43–51. *Journal of Infrastructures Systems ASCE*, 10(2) :43–51.

Kleiner, Y. and B. Rajani
2007. *Static and dynamic effects in prioritizing individual water mains for renewal D-WARP.* CNRC-NRC -Institute for Research in Construction, National Research Council.

Kleiner, Y. and B. Rajani
2010a. *Dynamic Influences on the Deterioration Rates of Individual Water Mains (I-WARP) [Project 3052].* Water Research Foundation-National Research Council Canada.

Kleiner, Y. and B. Rajani
2010b. I-warp : Individual water main renewal planner. *Drinking Water, Engineering and Science*, 3 :71–77.

Kowalski, M., J. Hulance, and P. Conroy
2002a. *D12, CARE-W : WP5 Elaboration and Validation of the Care-W Prototype.- Report 5.1 The CARE-W procedure.* WRc.

Kowalski, M., K. Taylor, J. Hulance, D. Nascetti, and P. Conroy
2002b. *D13, CARE-W : WP5 Elaboration and Validation of the Care-W Prototype.- Report 5.2 The architecture of CARE-W prototype softaware.* WRc and Université de Bologne.

Kropp, I.
2003. *KANEW 3.0, user guide.* Dresden, Germany.

Kropp, I.
2013. *Kanew software, version 4, manual.* 3S Consult GmbH.

Kuhr, S., D. Lanning, G. Nestel, and H. Reynolds
2007. *Challenges in the water industry : meeting demand while facing Dwinling Supplies. Planning and Financing Water and Wastewater Utility Infrastructure Replacement. Step 3 : Create Long-term Cash Flow Forecasts.*

Lafforgue, M.
2014. La gestion du risque cvm dans les conduites des réseaux de distribution d'eau potable. avril 2014. *L'eau, l'industrie, les nuisances*, 371 :95–97.

Lambert, A., T. Brown, and D. Takizawa, M.and Weimer
2000. *A review of performance indicators for real losses from water supply systems.* IWA.

Large, A.
2008. *Justification des dérogations économiques à l'atteinte du bon état des eaux en Seine-Normandie. Approches à différentes échelles.* Agence de l'eau Seine-Normandie. SupAgro Montpellier.

Large, A.
2013. *Optimisation du renouvellement des canalisations d'eau potable , Rapport de première année de thèse : revue bibliographique et cadre méthodologique.*

Large, A.
2015a. Improved management of drinking water networks : the long-term optimeau model for forecasting renewal, application on the water services of paris area (sedif) and on lausanne. In *UIC (Union Internationale des Chemins de fer) Asset Management Global Conference 2015. 12-13 October 2015, Paris, France.*

Large, A.
2015b. Une meilleure gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable : le modèle de prévision du renouvellement à long terme optimeau. In *Actes des 33e rencontres universitaires de Génie Civil avec l'AUGC (Association Universitaire de Génie Civil) dans le cadre du Concours Jeune Chercheur, 27 au 29 mai 2015, Bayonne, 10 p.*

Large, A., Y. Le Gat, S. M. Elachachi, E. Renaud, and D. Breysse
2014a. Decision support tools : Review of risk models in drinking water network asset management. In *ICVRAM International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management, ISUMA International Symposium on Uncertainty Modelling and Analysis.* University of Liverpool.

Large, A., Y. Le Gat, S. M. Elachachi, E. Renaud, and D. Breysse
2014b. Optimisation du renouvellement des canalisations d'eau potable : méthodes à « long terme » et à « court terme », application aux données de lausanne en suisse. In *Actes des 32èmes rencontres universitaires de Génie Civil avec l'AUGC (Association Universitaire de Génie Civil), 4-6 Juin 2014 à Orléans, France, 11 p.*

Large, A., Y. Le Gat, S. M. Elachachi, E. Renaud, D. Breysse, and M. Tomasian
2014c. Modélisation de la survie à long terme des canalisations d'eau potable pour optimiser leur renouvellement, application aux données du syndicat des eaux d'ile de france. In *Actes des 6èmes Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine (JDHU), 1-3 Juillet 2014 à Villeurbanne, France, 11 p.*

Large, A., Y. Le Gat, S.-M. Elachachi, E. Renaud, D. Breysse, and M. Tomasian
2015a. Decision support tools : Review of risk models in drinking water network asset management. *Water Utility Journal*, 10 :45–53.

Large, A., Y. Le Gat, S.-M. Elachachi, E. Renaud, D. Breysse, and M. Tomasian
2015b. Improved modelling of "long term" future performance of drinking water pipes. *Journal of Water Supply : Research and Technology - AQUA*, 64.4 :404–414.

Large, A. and M. Tomasian
2014a. *Elaboration d'un modèle long terme pour optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable. Application à Lausanne. Rapport de deuxième année de thèse (3/3).* OPTIMEAU.

Large, A. and M. Tomasian
2014b. *Elaboration d'un modèle long terme pour optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable. Application au Grand Lyon. Rapport de deuxième année de thèse (2/3).* OPTIMEAU.

Large, A. and M. Tomasian
2014c. *Elaboration d'un modèle long terme pour optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable. Application au SEDIF. Rapport de deuxième année de thèse (1/3).* OPTIMEAU.

Large, A., M. Tomasian, S. M. Elachachi, Y. Le Gat, E. Renaud, and D. Breysse
2015c. Une vision à long terme en réponse aux enjeux économiques du renouvellement des canalisations d'eau potable. In *92e congrès de l'ASTEE (Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement) : Des villes et des territoires sobres et sûrs , du 2 au 5 Juin 2015, Montauban.*

Large, A., M. Tomasian, Y. Le Gat, S. M. Elachachi, E. Renaud, and D. Breysse
2015d. Optimisation du renouvellement des canalisations d'eau potable : un nouvel indicateur long terme de prédiction des défaillances. In *Actes des 33e rencontres universitaires de Génie Civil avec l'AUGC (Association Universitaire de Génie Civil), 27 au 29 mai 2015, Bayonne, 10 p.*

Large, A., M. Tomasian, Y. Le Gat, S. M. Elachachi, E. Renaud, and D. Breysse
2015e. Optimization of future drinking water pipe renewal under uncertainty. In *12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP), 12-15 July 2015 at Vancouver, Canada, 10 p.*

Lausanne
2015. *http ://www.lausanne.ch/lausanne-officielle/administration/organigramme.html.*

Le Gat, Y.
2009. *Une extension du processus de Yule pour la modélisation stochastique des événements récurrents. Application aux défaillances de canalisations d'eau sous pression.* PhD thesis, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), France.

Le Gat, Y.
2014. Extending the yule process to model recurrent pipe failures in water supply networks. *Urban Water Journal*, 11(8) :617–630.

Le Gat, Y.
2016. *Recurrent event modeling based on the Yule Process. Volume 2. Application to water network asset management.* Edition ISTE Wiley.

Le Gat, Y. and P. Eisenbeis
2000. Using maintenance records to forecast failures in water network. *Urban Water Journal*, 2(3) :173–181.

Le Gat, Y., I. Kropp, and M. Poulton
2013. Is the service life of water distribution pipelines linked to their failure rate ? *Water Science and Technology : Water Supply*, 13.2 :386–393.

Le Gat, Y., A. Large, E. Renaud, M. Tomasian, C. Sanz, S. M. Elachachi, and D. Breysse
2015. Le projet franco-suisse optimeau, vers une vision à long terme en gestion patrimoniale des réseau d'eau potable. *Aqua and Gas*, 11 :2–6.

Le Gauffre, P., K. Laffréchine, R. Baur, V. Di Federico, P. Eisenbeis, A. Koning, M. Kowalski, S. Saegrov, J. P. Torterotot, L. Tuhovcak, and C. Werey
2002a. *D6, CARE-W : WP3 Decision Support for Annual Rehabilitation Programmes. - Report 3.1 Criteria for the prioritisation of rehabilitation projects. EU project under the 5th Framework Program, c.* CEMAGREF, INSA Lyon, SINTEF-NTNU et Brno University.

Le Gauffre, P., K. Laffréchine, and M. Miramond
2002b. *D7, CARE-W : WP3 Decision Support for annaul rehabilitation Programmes. - Report 3.2 Survey of multi-criteria techniques and selection of relevant procedures.* INSA Lyon.

Le Gauffre, P., K. Laffréchine, and M. Miramond
2003. *D8, CARE-W : WP3 Decision Support for annual Rehabilitation pprogram. - Report on ARP Help.* INSA Lyon.

Le littré
2015. *Dictionnaire.*

Le Quiniou, M. and A. Sandraz
2012a. *Integration of water losses in Veolia Water's drinking asset management strategy and tools for water network.*

Le Quiniou, M. and A. Sandraz
2012b. Integration of water losses in veolia water's drinking water networks asset management strategy and tools. In *Water Losses, 26-29 février, Manilla, Philippines*, P. 9.

Le Robert
2015. *Dictionnaire.*

Lebègue, D.
2005. *Révision du taux d'actualisation des investissements publics, rapport du groupe d'experts présidé par Daniel Lebègue.*

Leclerc, J.
2014. Dramede l'ariège : plusieurs plaintes et deux enquêtes en cours. lepère du garçon décédé s'est dit déterminé à aller«jusqu'au bout»pour éclaircir lescirconstances de la mort de son fils unique. l'eau du robinet mise en accusation. juillet 2014. *Le figaro*, Pp. 1–9.

Lehoux, N. and P. Vallée
2004. *Analyse multicritères.*

Lei, J.
1997. *Statistical approach for describing lifetimes of water mains : case Trondheim municipality.* Trondheim, Norway : SINTEF, Civil and Environmental Engineering, Water and Waste Water.

Leplat, J.
2003. *Les risques professionnels : évolutions des approches, nouvelles.*, chapter Questions autour de la notion de risque. Toulouse : Octarès.

Levesque, G.
2014. *Interview avec monsieur LEVESQUE, Chef de projet SIG au SEDIF.*

Li, F., L. Ma, Y. Sun, and J. Mathew
2015. Optimized group replacement scheduling for water pipeline network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 04015035 :1–10.

Liu, Z., Y. Kleiner, B. Rajani, L. Wang, and W. Condit
2012. *Condition assessment technologies for water transmission and distribution systems.* United States Environmental Protection Agency (EPA).

Loganathan, G. V., S. Park, and H. D. Sherali
2002. Threshold break rate for pipeline replacement in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128 :271–279.

Lorenz, M.
1905. Methods of measuring the concentration of wealth. *American Statistical Association*, 9 (70) :209–219.

Madanat, S., S. Park, and K. Kuhn
2006. Adaptive optimization and systematic probing of infrastructure system maintenance policies under model uncertainty. *Journal of infrastructure systems*, 12(3) :192–198.

Magne, L.
2009. *Histoire sémantique du risque et de ses corrélats.*

Mailhot, A., G. Pelletier, J. F. Noël, and J. P. Villeneuve
2000. Modeling the evolution of the structural state of water pipe networks with brief recorded pipe break histories : Methodology and application. *Water Resources Research*, 36(10) :3053–3062. doi :10.1029/2000WR900185.

Malandain, J.
1999. *Modélisation de l'état de santé des réseaux de distribution d'eau pour l'organisation de la maintenance : étude du patrimoine de l'agglomération de Lyon.* PhD thesis, Institut National des Sciences Apliquées (INSA) de Lyon, France.

Malm, A., O. Ljunggren, O. Bergstedt, T. J. R. Pettersson, and G. M. Morrison
2012. Replacement predictions for drinking water networks through historical data. *Water Research*, 46 :2149–2158.

Markov, A. A.
1910. Investigation of the general case of trials associated into a chain (in russian). In *Actes de la Société physico-mathématique, Université de St Pétersbourg, 8e série.*, volume 25, P. 33.

Marlow, D. and D. Beale
2015. *Selecting methods for projecting life cycle asset management investment needs.* Water Research Foundation.

Marlow, D., S. Gould, P. Davis, N. Goodman, and G. Tjandraatmadja
2014. *Asset Renewal Decision Making.* Water Corporation Western Australia.

Marlow, D., A. Urquharta, P. Davis, D. Trans, D. Beale, and S. Burn
2009. *Remaining Asset Life : A State of the Art Review.* IWA publishing.

Martins, A.
2011. *Stochastic models for prediction of pipe failures in water supply systems.* PhD thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade técnica de Lisboa, Portugal.

MASS
2012. *INSTRUCTION N°DGS/EA4/2012/366 du 18 octobre 2012 relative au repérage des canalisations en polychlorure de vinyle susceptibles de contenir du chlorure de vinyle monomère résiduel risquant de migrer vers l'eau destinée à la consommation humaine et à la gestion des risques sanitaires en cas de dépassement de la limite de qualité des eaux destinées à la consommation humaine pour le chlorure de vinyle monomère en application des articles R.1321-26 à R.1321-36 du code de la santé publique. Date d'application : immédiate.* Ministre des Affaires Sociales et de la Santé (MASS).

Mattersdorf, G.
2010. *Gestion patrimoniale et durabilité des services publics d'eau potable et d'assainissement.* ENGREF, SP2000, Master EDDE.

McMullen, L. D.
1982. Advanced concepts in soil evaluation for exterior pipeline corrosion. In *AWWA Annual Conference, Miami, USA.*

MEDD
2005. *Circulaire DPPR/SEI2/MM-05-0316 du 07/10/2005 relative aux Installations classées - Diffusion de l'arrêté ministériel relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.* Mnistère de l'Ecologie du Développement Durable (MEDD).

MEDDE
2013. *La diminution des fuites dans les réseaux. Les orientations du Grenelle.* Gouvernement Français.

MEDDE
2015. *Instruction du 16 juin 2015 Relative au doublement du taux de la redevance pour prélèvement sur la ressource en eau pour l'usage « alimentation en eau potable ».* République Française.

Meyer, P.
2003. *What would you do if you knew you couldn't fail ? Creating S.M.A.R.T. Goals. Attitude Is Everything : If You Want to Succeed Above and Beyond.* Meyer Ressource Group.

Miettinen and Nurminen
1985. Comparative analysis of two rates. *Statistics in Medicine*, 4 :213–226.

Mondot, M.
2008. *L'évaluation des contrats globaux du 9ème programme de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie : méthode et perspectives.* Paris : AgroParisTech.

Mongereau, N. and L. Vinet
2004. *Balmes, note géotechnique.*

Montori, J.
2002. *Evaluation des coûts sociaux liés à une défaillance ou à des travaux sur le réseau d'adduction en eau potable.* CEMAGREF-ENGEES de Strasbourg.

Morris, S.
2014. *Strategic Assets : Lifecycle Value Optimization (SALVO) http ://www.salvoproject.org/.*

Nafi, A., C. Werey, and P. Llerena
2008. A multi-objective optimization approach for water pipes renewal planning. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35 :87–97.

Naldeo
2013. *Patrimoine expert, Outil de simulation du vieillissement du patrimoine canalisations AEP, Manuel de l'utilisateur, Version 3.4.* Naldeo ingénierie et conseil.

Nedey, F.
2014. Services d'eau et d'assainissement : un équilibre financier fragilisé. *Techni.Cités*, 273 :31–36. version papier.

Nelder, J. A. and R. Mead
1965. The downhill simplex method. *Computer Journal*, 7 :308–3013. je ne l'ai pas c'est tiré du livre numerical recipes in C : the art of scientific computing, p 408.

Nelson, W. B.
1969. Hazard plotting for incomplete failure data. *Journal Quality Technology*, 1 :27–52.

Nicholson, W.
1998. *Microeconomic theory, basic principles and extensions, seventh edition.* The dryden press, Harcourt Brace College Publishers.

Nishiyama, M. and Y. Filion
2013. Review of statistical water main break prediction models. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40 :972–979.

OCDE
2002. *Glossaire des principaux termes relatifs à l'évaluation et la gestion axée sur les résultats.*

OIEau and E&Y
2012. *Etude de la récupération des coûts des services liés à l'utilisation de l'eau pour les bassins hydrographiques français en application de la directive cadre sur l'eau.*

ONEMA
2014. *Réduction des pertes d'eau des réseaux de distribution d'eau potable Guide pour l'élaboration du plan d'actions (décret 2012-97 du 27 janvier 2012).Sous la direction d'Eddy Renaud.* ONEMA.

Optimeau
2013. *Compte rendu du comité technique de suivi 1 du projet optimeau le 14/06/2013 à IRSTEA, Bordeaux.*

Optimeau
2014a. *Compte rendu du comité technique de suivi 2 du projet optimeau le 25/03/2014 au Grand Lyon, Lyon.*

Optimeau
2014b. *Compte rendu du comité technique de suivi 3 du projet optimeau le 15/10/2014 au SEDIF, Paris.*

Optimeau
2015. *Compte rendu du comité technique de suivi 4 du projet optimeau le 19/05/2015 à eauservice Lausanne.*

Paré-Chamontin, A.
2010. *Contribution au développement d'une organisation vigilante, cas de la détection d'organismes nuisibles aux végétaux agricoles en France métropolitaine.* PhD thesis, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), France.

Park, S.
2000. *An optimal pipe replacement scheduling model for water distribution systems.* PhD thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.

Pearce, D., G. Atkison, and S. Mourato
2006. *Analyse coûts bénéfices et environnement, développements récents.* Edition OCDE, 355 p.

Pelletier, G.
2000. *Impact du remplacement des conduites d'aqueduc sur le nombre annuel de bris.* PhD thesis, Institut National de la Recherche Scientifique du Canada.

Perret, P., R. Russier, P. G. Delaporte, J. J. Fadeuilhe, R. Ouachani, P. Bisch, S. Rigot, L. Dehouck, B. Munier, P. Buisson, C. Espivent, J. L. Pigeon, D. Morand, D. Breysse, H. Niandou, and L. Demilecamps
2012. Management des risques des projets complexes de génie civil et urbain. *Cahier pratique Le Moniteur*, 3 :35.

Picoche, J.
1992. *Etymologie du français.* Le Robert coll. Les Usuels.

Pillot, J.
2011a. *Élaboration d ' une stratégie de gestion du patrimoine de l 'Eau Potable du Grand Lyon.* INSA Lyon et Toulouse.

Pillot, J.
2011b. Élaboration d'une stratégie de gestion du patrimoine de l'eau potable du grand lyon. rapport de stage. Master's thesis, INSA Lyon.

Pillot, J., L. Catel, E. Renaud, B. Augeard, and P. Roux
2015. Evaluating the environmental impact of loss reduction in drinking water networks. In *First international conference dedicated to water in megacities.Water- Megacities and Global change. UNESCO. 1-4 december 2015, Paris, France.*

Poinard, D.
2006. *Modèles pour la conception de stratégies et de programmes de réhabilitation des réseaux urbains d'eau potable.* PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, France.

Poinard, D. and P. Le Gauffre
2005. *CARE-W-Poisson, presentation and application.*

Poulton, M. and P. Saignol
2013. *Etablissement d'un programme de travaux de remplacement des conduites de distribution - Etude réalisé par le cabinet Merlin et le bureau d'étude WTSim.*

Poyri
2011. *Rapport sur le renouvellement des canalisations et des équipements du Grand Lyon par les bureaux d'étude PÖYRY + FINANCE CONSULT + Cabinet CABANES + Borromeo, version 1.1.*

Pradier, P. C.
2006. *La notion de risque en économie.* La découverte.

Quinet, E.
2013. *Evaluation socioéconomique des investissements publics.* Commissariat général à la stratégie et à la prospective.

R team
2011. *R Development Core Team, R : A Language and Environment for Statistical Computing.* the R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Rahilly, M., B. Lane, and E. Coultas
2013. *PARMS Reloaded user guide, PARMS Planning and PARMS Priority Combined.* CSIRO.

Rajani, B. and Y. Kleiner
2001. Comprehensive review of structural deterioration of water mains : physically based models. *Urban Water Journal*, 3 :151–164.

Rajani, B. and J. Makar
2000. A methodology to estimate remaining service life of grey cast iron water mains. *Revue canadienne de génie civil*, 27(6) :1259–1272.

Randall-Smith, M., A. Russel, and R. Oliphan
1992. *Guidance manual for the structural condition assessment of trunk mains.*

Renaud, E., B. Bremond, and Y. Le Gat
2014. Water pipes : why lifetime is not an adequate concept on which to base pipe renewal strategies. *Water Practice and Technology*, 9 (3) :307–315.

Renaud, E., Y. Le Gat, and M. Poulton
2012. Using a break prediction model for drinking water networks asset management : From research to practice. *Water Science and Technology : Water Supply*, 12.5 :674–682.

Renaud, E., Y. Le Gat, and S. Sabatie
2011a. *Manuel d'utilisation du logiciel Criticité, Free, Version 1.1.0.* CEMAGREF-IRSTEA, Cestas, France.

Renaud, E., Y. Le Gat, S. Sabatie, K. Haddane, T. Cluchat, and F. Guillon
2011b. *Manuel d'utilisation du logiciel Casses, free, version 2.0.0.* CEMAGREF-IRSTEA, Cestas, France.

RivaModeling
2015. *RIVA Real-time Infrastructure Valuation Analysis http ://www.rivamodeling.com/About.aspx.*

Rogers, P. and N. Grigg
2006. Failure assessment model to prioritize pipe replacement in water utility asset management. In *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA, August 27-30.*

Røstum, J.
2000. *Statistical Modelling of Pipe Failures in Water Networks.* Doctor engineer dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Trondheim, Norway.

Rostum, J., M. Kowalski, and J. Hulance
2003. *D14, CARE-W : User manual, CARE-W Rehab Manager.* NTNU-SINTEF, WRc.

Roy, B.
1996. *Multicriteria Methodology for decision Making.* Dordrecht, The Netherlands : Kluwer Academic Publishing.

Saaty, T. L. and K. Peniwati
2008. *Group Decision Making : Drawing out and Reconciling Differences.* RWS Publications.

Saegrov, S.
2003. *D15, CARE-W : system of testing CARE-W prototype.* SINTEF.

Saegrov, S.
2005. *CARE-W : Computer Aided Rehabilitation for Water Networks.* IWA Publishing, London.

Saegrov, S., A. König, A. Mattick, J. Milina, J. Röstum, and I. Selseth
2003. Methods for estimating water network rehabilitation needs. *Water Supply*, 3 :63–69.

Safege
2015. *http ://www.gfi.fr/utilities/PICCOLO.php.*

Saint Pierre, P.
2013. *Introduction à l'analyse des durées de survie.*

Sanz, C., S. Apothéloz, A. Ibarrola, L. Viguet, and F. Cunin
2014. Gestion patrimoniale des réseaux. une approche multi-services. *Aqua and Gas*, 6 :32–36.

Savic, D. A., J. Bicik, and M. S. Morley
2011. A dss generator for multiobjective optimisation of spreadsheet-based models. *Environmental Modelling and Software*, 26 :551–561.

Savic, D. A. and G. A. Walters
1997. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Journal of water resources planning and management*, 123(2) :67–77.

Scharling, A.
1985. *Décider sur plusieurs critères.* Presses Polytechniques Romandes.

Scheidegger, A., J. Leitao, and L. Scholten
2015. Statistical failure models for water distribution pipes : a review from a unified perspective. *Water Research*, 83 :237–247.

Schoenfeld, D.
1982. Partial Residuals for The Proportionnal Hazards Regression Model. *Biometrika*, 69(1) :239–241.

Scholten, L.
2013. *Multi-criteria decision analysis for water supply infrastructure planning under uncertainty.* PhD thesis, ETH Zurich, Switzerland.

SEDIF
2011a. *Inf'eau numéro 75 (Janvier), le magazine du syndicat des eaux d'île de France.*

SEDIF
2011b. *Inf'eau numéro 77 (Décembre), le magazine du syndicat des eaux d'île de France.*

SEDIF
2011c. *Séance du comité du SEDIF du jeudi 23 juin 2011, compte-rendu sommaire.*

SEDIF
2012a. *Rapport annuel 2011.*

SEDIF
2012b. *Rapport d'activité 2011.*

SEDIF
2013a. *Compte rendu des entretiens avec le SEDIF (puis VEDIF), mené le 18 et 19 juillet 2013 à Paris et Nanterre avec Mme Claire Lefort, M. Gildas Lévèque, M. Florent Alix, M. Sylvain Charrière et M. Bruno Choux.*

SEDIF
2013b. *Rapport annuel 2012.*

SEDIF
2013c. *Rapport d'activité 2012.*

SEDIF
2014a. *Rapport annuel 2013.*

SEDIF
2014b. *Rapport d'activité 2013.*

SEDIF
2015a. *Compte-rendu des entretiens menés au SEDIF en mars 2015 auprès d'Olivier Chesneau, Anne LANG, Gildas Lévêque, Agathe COHEN, Charles-Henri MERLE, Hassna ADMI, Mathieu GAUME, Aurélien GERVAIS, Adeline HUSTACHE et Sylvain CHARRIERE.*

SEDIF
2015b. *Rapport annuel 2014.*

SEDIF
2015c. *Rapport d'activité 2014.*

Senet, S.
2015. Véolia condamné pour la mauvaise qualité de l'eau au robinet. l'eau était viciée par des caractéristiques organoleptiques anormale, à savoir une odeur ferrugineuse et une coloration liée à la présence de particules en suspension. le 21 octobre 2015. *Le journal de l'environnement*, 10 :11.

Shahata, K. and T. Zayed
2013. Simulation-based life cycle cost modeling and maintenance plan for water mains. *Structure and Infrastructure Engineering : Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 9 :5 :403–415.

Shamir, U. and C. Howard
1979. An analytic approach to scheduling pipe replacement. *Journal of American Water Works Association*, 71 :248–258.

Shewhart, W.
1989. *Les fondements de la maîtrise de la qualité.* Economica.

SISPEA
2015. *Les indicateurs des services d'eau potable et les fiches pour les calculer. http ://www.services.eaufrance.fr/observatoire/indicateurs/eau-potable.* Etat Français.

Sjovold, F., P. Conroy, and E. Algaard
2008. *Performance assessment of urban infrastructure services : the case of water supply, wastewater and solid waste.*

Skipworth, P., M. Engelhardt, A. Cashman, D. Savic, A. Saul, and G. Walters
2002. *Whole life costing for water distribution network management.* Thomas Telford.

SMEGREG
2009a. *Tableau du bord du SAGE nappes profondes de la Gironde (données jusqu'à fin 2007).* SAGE nappes profondes de la Gironde.

SMEGREG
2009b. *Valeurs de références de l'indice linéaire de pertes des réseaux d'alimentation en eau potable. Application dans le contexte du SAGE Nappes Profondes de Gironde.* SMEGREG, CEMAGREF, AEAG.

SSIGE
2014. *La consommation d'eau continue à baisser.*

St. Clair, A. M. and S. Sinha
2012. State-of-the-technology review on water pipe condition, deterioration and failure rate prediction models ! *Urban Water Journal*, 9(2) :85–112.

Suez
2015. *PREVOIR : Gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable - Suez, Lyonnaise des Eaux.*

Taillandier, F.
2009. *La notion de risque comme clef du pilotage d'un parc patrimonial immobilier.* PhD thesis, Université de Savoie, spécialité : génie civil, France.

Tribot Laspière, V.
2013. *Glissement de terrain à Lyon, 80 personnes évacuées du conservatoire.*

Turnbull, B. W.
1976. The empirical distribution function with arbitrarily grouped, censored and truncated data. *Journal of the Royal Statistical Society*, 3 :290–295.

Tynemarch
2015a. *http ://www.tynemarch.co.uk/products/miser/miser.shtml.*

Tynemarch
2015b. *PIONEER http ://www.tynemarch.co.uk/products/pioneer/index.shtml.*

Ugarelli, R. and S. Bruaset
2010. *Review of deterioration modelling apapproach for ageing infrastructure.*

UKWIR
2005. *Natural Rate of Rise in Leakage, report 05/WM/08/33.* UKWIR (United Kingdom Water Industry Research).

UKWIR
2009. *Factors Affecting the Natural Rate of Rise of Leakage, 09/WM/08/40.* UKWIR (United Kingdom Water Industry Research).

UVED
2012. *Université Virtuelle Environnement & Développement durable de l'Ecole de Mines ParisTech. Cours sur l'analyse et la gestion du risque.*

Vallin, J.
2005. L'espérance de vie des êtres humains. In *Conférence aux Rentes Genévoises.*

Van Blaricum, V., R. Gugiomo, and V. Hock
1995. *WPIPER 1.0 with flow reduction module. Implementation guide and user manual. US Army Corps of Engineers.*

VEDIF
2013. *Compte-rendu des entretiens menés au VEDIF et à Véolia direction technique, Nanterre le 18 Juillet 2013 avec Le Quiniou, Morgane and Buttoudin, Sébastien and Sandraz, Anne-Claire.*

Veolia
2015. *MOSARE et VISION http ://www.veolia.fr/activites/gestion-de-l-eau/nos-expertises/production-et-distribution-d-eau.*

VFA
2015. *http ://www.vfa.com/products-services/software-solutions/vfa-facility/.*

Viščor, P.
1997. *Spolehlivost vodovoních sítí.* PhD thesis, University of Technology, Brno, Czech Republic.

Vitorino, D., S. T. Coelho, H. Alegre, A. Martins, J. P. Leitão, and M. S. Silva
2012. *Aware-P software documentation.* LNEC.

Volta, M., M. Poulton, J. Rostum, S. Saegrov, and M. Herrero
2004. *D16, CARE-W : WP6 Testing and validation of CARE-W rehab manager.* SINTEF.

Walski, T. M.
1987. Replacement rules for water mains. *Journal of American Water Works Association*, 79 :33–37.

Walski, T. M. and A. Pelliccia
1982. Economic analysis of water main breaks. *Journal of American Water Works Association*, 74(3) :140–147.

Weibull, W.
1951. A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics ASME*, 18 :293–297.

Werey, C.
2000a. *Politiques de renouvellement des réseaux d'eau potable.* PhD thesis, Université Louis Pasteur de Strasbourg, France.

Werey, C.
2000b. Rencana -maintenance des conduites d'eau potable : réparation ou renouvellement. - numéro spécial assainissement, traitement des eaux. *Ingénieries-EAT*, Pp. 67–75.

Werey, C., J. Janel, and E. Weber
2003. Renouvellement des réseaux d'eau potable : Analyse des coûts. *La Houille Blanche*, 3 :73–76.

Werey, C., J. Torterotot, D. Sousa e Silva, A. König, A. Peirera, and M. Montginoul
2007. Rehabilitation of sewer networks : addressing socio-economic impacts in the care-s project. In *Proceedings of the IWA Conference on "Leading-Edge Asset management", Lisbon, 17-19 October. IWA.*

Yule, G. U.
1922. *An Introduction to the Theory of Statistics.* 6th Edition. London, C. Griffin.

Annexe A

Analogie avec la santé humaine

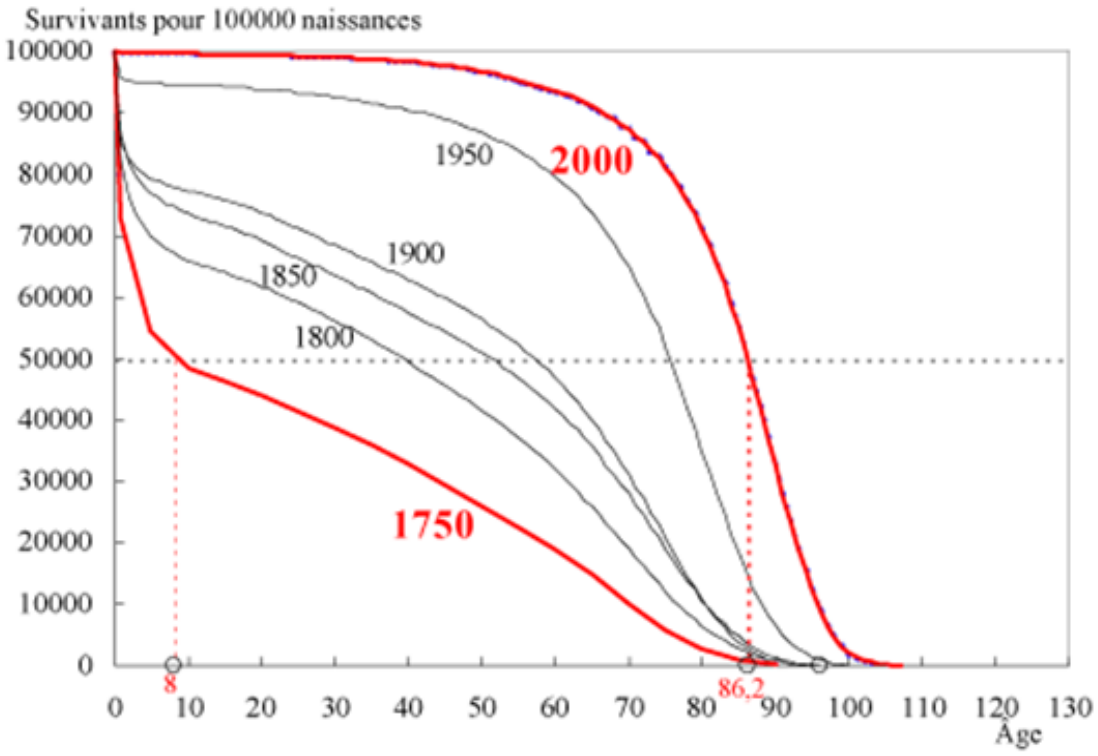


FIGURE A.1: La survie des femmes en Europe au cours du temps, source [Vallin, 2005]

La figure A.1 représente les fonctions de survie des femmes en Europe pour 6 années différentes. Dans les années 1750, la mortalité infantile était très élevée et 50 % des femmes mourraient avant l'âge de 8 ans. Petit à petit, d'une part les guerres, les épidémies vont diminuer, d'autre part les progrès de la médecine et du niveau de vie (alimentation, hygiène, ...) tendent à allonger l'espérance de vie. Ainsi, de nos jours dans les années 2000, 50 % des femmes meurent avant l'âge de 86,2 ans. De plus, la majorité des femmes meurent autour de cet âge là. En effet, nous constatons que la pente de la courbe est très forte vers cet âge.

Les tableaux A.1 et A.2 synthétisent les analogies que nous pouvons effectuer entre la santé humaine et la santé des canalisations. Attention, l'espérance (moyenne) de vie et la médiane de nos courbes de survie sont d'un point du vue mathématique très distinctes. En effet, l'espérance de vie à la naissance est égale à la durée de vie moyenne d'une population fictive qui vivrait toute son existence dans les conditions de mortalité de l'année considérée. Or, sur une fonction de survie la moyenne (espérance) n'est pas toujours égale à la médiane.

Pour une loi de Weibull, le paramètre de forme δ décrit la façon dont nos données sont distribuées. Une forme égale à 3 se rapproche d'une courbe de la loi normale. Une forme comprise entre 2 et 4 peut encore être considérée comme presque normale. Une forme avec une valeur faible, par exemple 1.25, donne une courbe asymétrique à droite. Une forme avec une valeur élevée, par exemple 10, donne une courbe asymétrique à gauche.

Donc, si nos fonctions de survie peuvent être décrites par une loi de Weibull où le paramètre de forme δ est compris entre 2 et 4 (ce qui est notre cas cf. chapitre 7) alors la moyenne est très proche de la médiane et les analogies ci-dessous sont mathématiquement correctes.

Num	Santé humaine	Santé des canalisations
A	Age d'un décès par euthanasie	Age à la mise hors service
B	Nombre de fois qu'un être humain a été malade au cours de sa vie	Nombre de défaillances cumulées depuis la pose
C	Espérance de vie depuis la naissance Ex : en France en 2003, ♀ 85 ans, ♂ 79 ans	Médiane de l'âge à la mise hors service Ex : à Lausanne [2001, 2012], tt réseau 55 ans Ex : au SEDIF [1995, 2012], tt réseau 110 ans
D	Espérance de vie à 65 ans Ex : en France en 2011 : ♀ 89 ans, ♂ 84 ans	Médiane de l'âge à la mise hors service de la fonte grise Ex : SEDIF [1995, 2012] min(âge HS FG obs) = 27 ans, médiane 112 ans
E	Espérance de vie en bonne santé à 65 ans Ex : France en 2011, ♀ 73 ans, ♂ 72 ans	Médiane de l'âge en bon état sachant que les canalisations ont déjà vécu 65 ans.

Tableau A.1: Analogie entre la santé humaine et la santé des canalisations

Num	Notations
A	$\mathrm{P}(T = t)$
B	$N(t)$
C	$S(t) = \mathrm{P}(T > t) = 0.5$
D	$S(t \mid t \geq 65) = \mathrm{P}(T > t \mid t \geq 65) = 0.5$ ou $S(t \mid t \geq 27) = \mathrm{P}(T > t \mid t \geq 27) = 0.5$
E	Sans objet

Tableau A.2: Relation avec la fonction de survie

Annexe B

ACP sur données mixtes (qualitatives et quantitatives) de variables au tronçon

Cette analyse en composante principale (ACP) a été réalisé sur tous les 290 000 tronçons du SEDIF à partir de 3 variables qualitatives : le type de matériau, le type de joint, l'emplacement (sous chaussée ou sous trottoir) et de deux variables quantitatives la longueur des tronçons et leurs diamètres. Nous avons utilisé la méthode PCAmix présentée dans [Chavent et al., 2015].

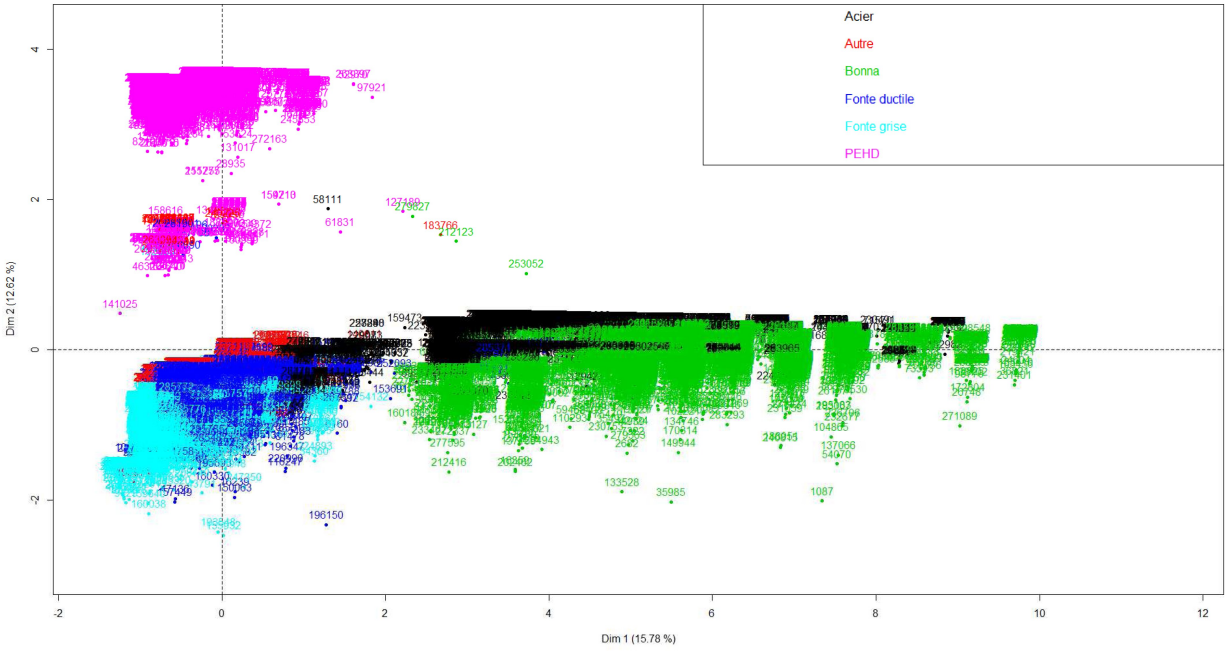


FIGURE B.1: Carte des individus (tronçons) en fonction des deux premiers axes factoriels. Les individus sont colorisés selon leurs matériaux.

Les deux premiers axes factoriels expliquent 28,4 % de la variance. La figure B.1, réalisée sur ces axes, indique trois groupes de tronçons. Le premier semble être dominé par les tronçons en PEHD, le second par les tronçons en fonte et le troisième par les tronçons en béton âme tôle (Bonna) et acier.

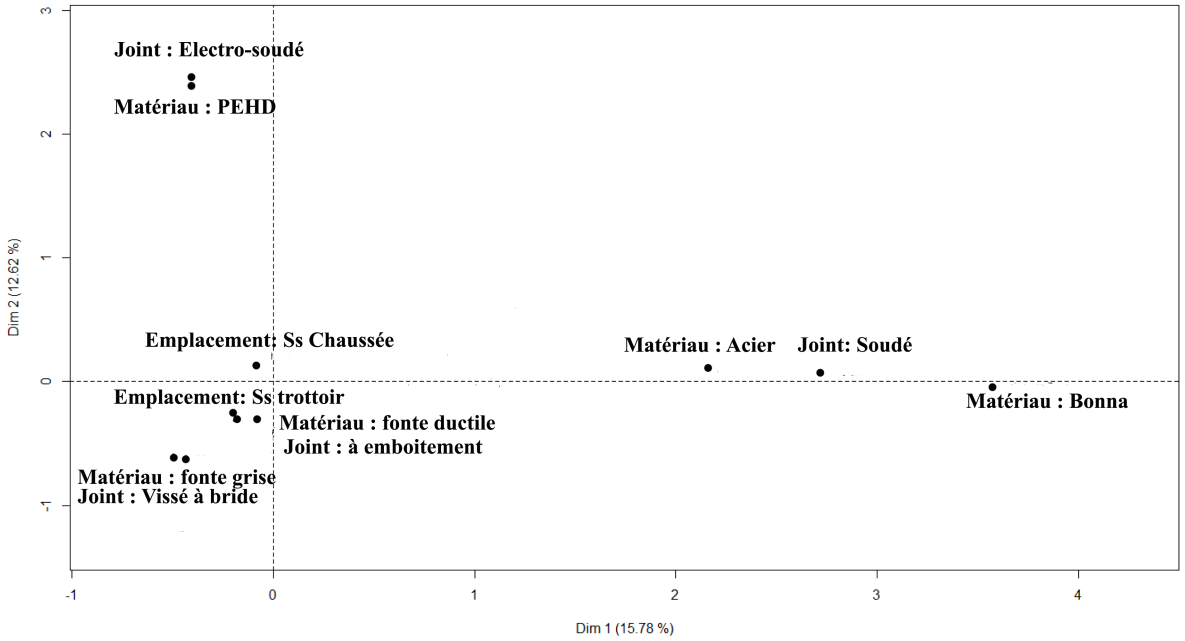


FIGURE B.2: Carte des modalités des trois variables qualitatives selon les deux premiers axes factoriels.

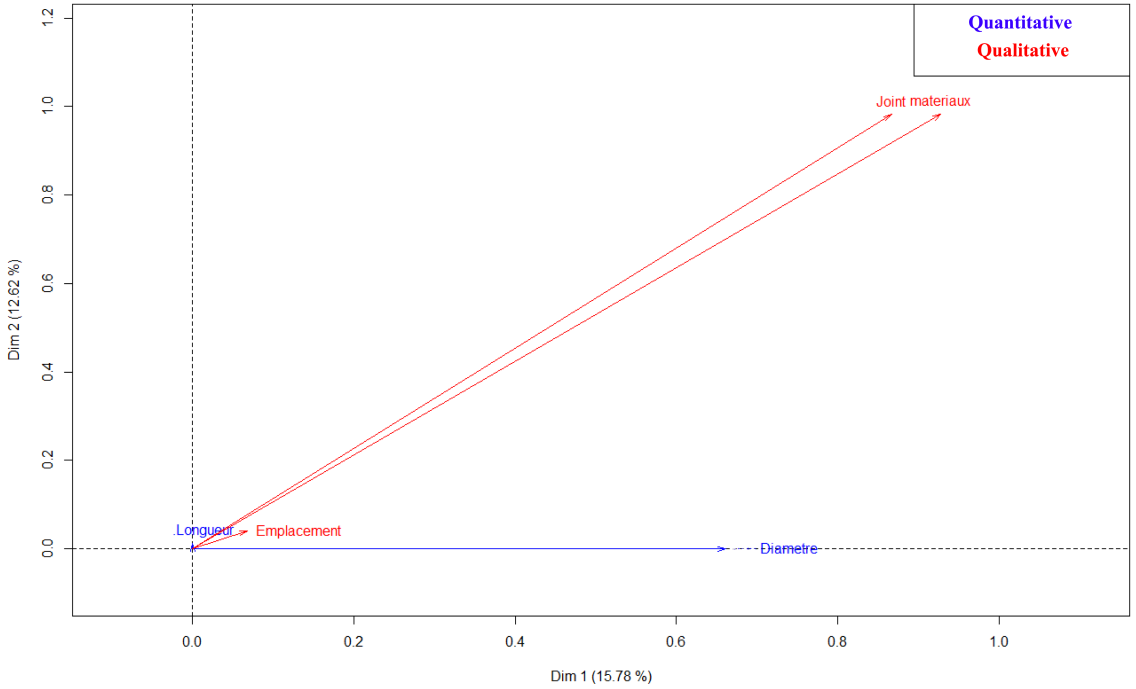


FIGURE B.3: Carte des square loading des 5 variables selon les deux premiers axes factoriels.

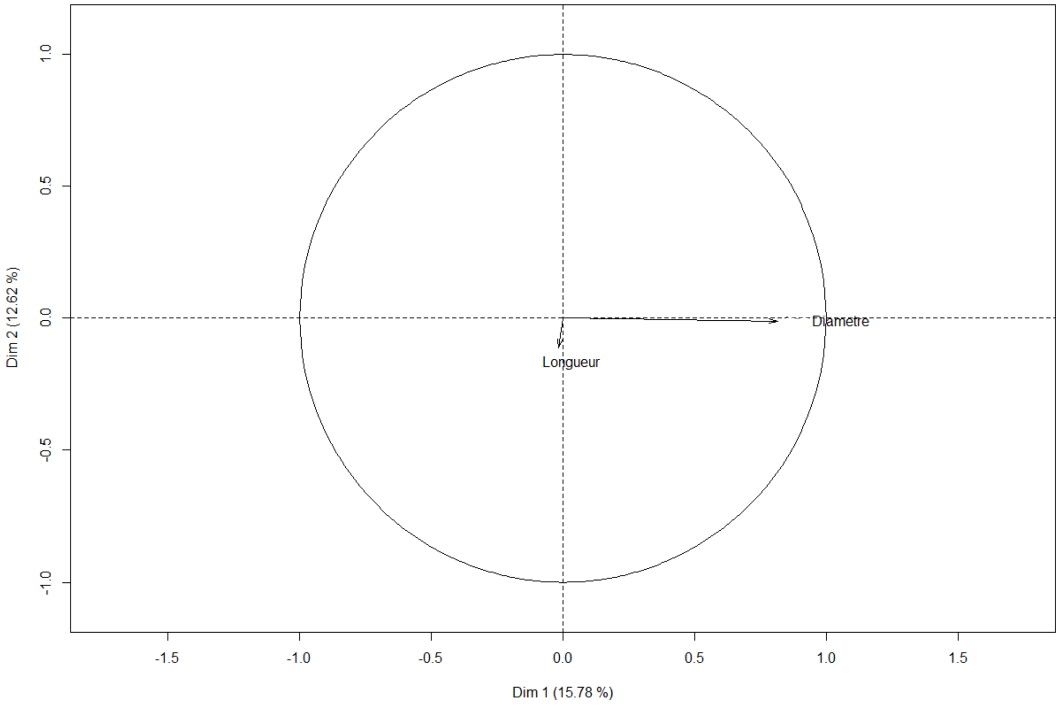


FIGURE B.4: Cercle des corrélations des deux variables quantitatives selon les deux premiers axes factoriels.

Les figurent B.2, B.3 et B.4 indiquent que la variable **Joint** est extrêmement corrélée à la variable **matériau**. En général, les canalisation en PEHD ont un joint électro-soudé, les fontes ductiles ont plutôt des joints à emboîtement et les fontes grises des joints vissés à bride. Les individus à droite de la figure B.1 ont des **diamètres** importants et ceux à gauche des diamètres plus petits (cf. figure B.3). Les tronçons en béton âme tôle (Bonna) sont donc les tronçons en général ayant les diamètres les plus importants, suivi de ceux en acier. Ensuite ceux en PEHD, en fonte ductile et en fonte grise semblent avoir des diamètres plus petits.

La longueur et l'emplacement des tronçons ne semblent pas être des variables très corrélées aux trois autres.

Annexe C

Liste des participants aux comités techniques

				A Bordeaux le 14/06/2013	A Lyon le 25/03/2014	A Paris le 13/10/2014	A Lausanne le 19/05/2015
Prénom NOM	**Structure**	**Pays**	**Statut**	**Présent**	**Présent**	**Présent**	**Présent**
M. Yves LE GAT	IRSTEA	France	Encadrement	Oui	Oui	Oui	Oui
M. S-M.ELACHACHI	Univ. Bordeaux (Génie Civil)	France	Encadrement	Oui	Oui	Oui	Oui
M. Eddy RENAUD	IRSTEA	France	Encadrement	Oui	Oui	Oui	Oui
M. Denys BREYSSE	Univ. Bordeaux (Génie Civil)	France	Encadrement	Oui	Oui	Non	Non
M. Sébastien APOTHELOZ	Eauservice Lausanne	Suisse	Terrain	Oui	Non	Non	Oui
Mme Linda VIGUET	Eauservice Lausanne	Suisse	Terrain	Oui	Oui	Non	Oui
Mme Christelle SANZ	Eauservice Lausanne	Suisse	Terrain	Non	Oui	Oui	Oui
M. Aitor IBARROLA	Eauservice Lausanne	Suisse	Terrain	Non	Non	Non	Oui
M. Frederic CUNIN	Eauservice Lausanne	Suisse	Terrain	Non	Non	Non	Oui
Mme Lisa SCHOLTEN	EAWAG	Suisse	Experte	Non	Oui	Non	Non
M. Joao LEITAO	EAWAG	Suisse	Expert	Non	Oui	Non	Non
M. Markus BINER	SSIGE -FOWA	Suisse	Expert	Non	Non	Non	Oui
M. Adrian Rieder	ville Zurich	Suisse	Expert	Non	Non	Non	Oui
Mme Anne LANG	SED Ile de France	France	Terrain	Oui	Non	Oui	Non
M. Bruno CHOUX	SED Ile de France (Hydratech)	France	Terrain	Oui	Non	Non	Non
M. Olivier CHESNEAU	SED Ile de France	France	Terrain	Oui	Non	Oui	Oui
Mme Claire LEFORT	SED Ile de France	France	Terrain	Non	Oui	Non	Non
M. Sylvain CHARRIERE	SED Ile de France	France	Terrain	Non	Non	Oui	Non
M. Christophe PERROD	SED Ile de France	France	Terrain	Non	Non	Oui	Non
M. Sébastien BUTTOUDIN	Véolia Ile de France	France	Expert	Non	Non	Oui	Oui
Mme A-C SANDRAZ	Véolia Ile de France	France	Experte	Oui	Oui	Oui	Oui
M. Didier FANGEAT	Grand Lyon	France	Terrain	Oui	Oui	Oui	Oui
Mme Elisabeth SIBEUD	Grand Lyon	France	Terrain	Non	Oui	Non	Non
M. Pascal LE GAUFFRE	INSA Lyon	France	Expert	Non	Oui	Oui	Oui
M. David POINARD	Véolia Gd Lyon	France	Expert	Non	Oui	Oui	Oui
M. Frédéric IMMEDIATO	AERMC	France	Expert	Non	Oui	Non	Non
Mme Caty WEREY	IRSTEA-ENGEES	France	Experte	Oui	Oui	Non	Oui
Mme Sylvie FERRARI	Univ. Bordeaux (Economie)	France	Experte	Oui	Non	Non	Non
M. Vincent COUALLIER	Univ. (Statistiques)	France	Expert	Oui	Oui	Oui	Oui
M. Max TOMASIAN	IRSTEA	France	Ing. Étude	Non	Oui	Oui	Oui
Mme Aurore LARGE	IRSTEA	France	Doctorante	Oui	Oui	Oui	Oui

FIGURE C.1: Liste des membres ayant participé aux quatre comités techniques du projet OPTIMEAU

Annexe D

Schémas des méthodes de planification à court terme

D.1 SEDIF

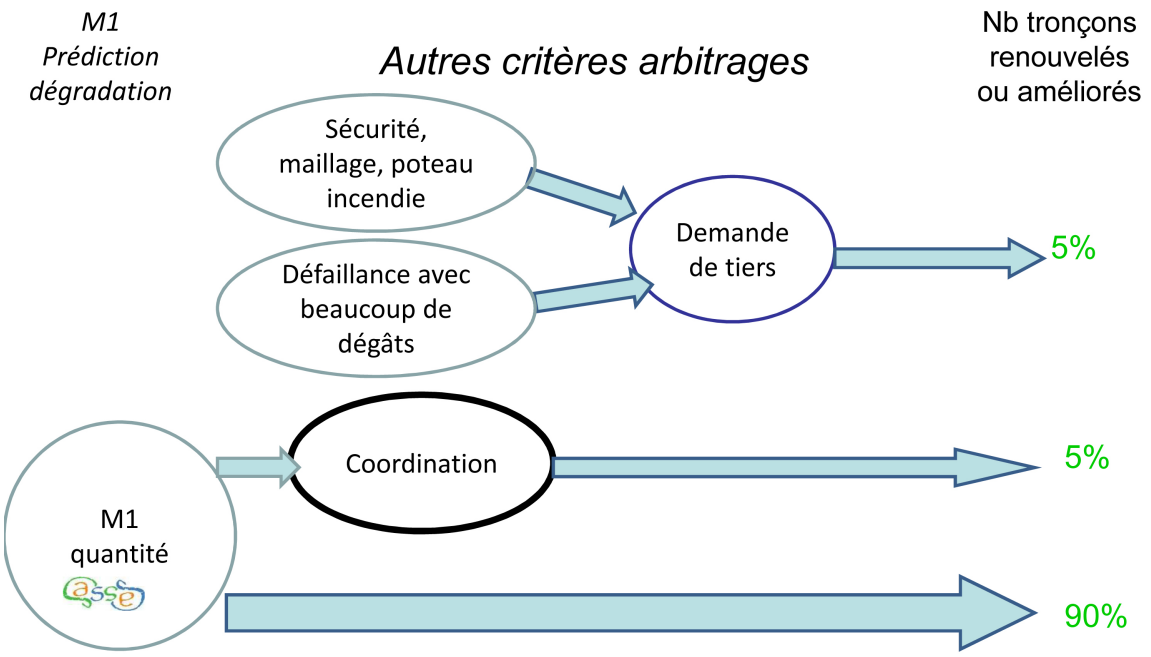


FIGURE D.1: Les étapes de la décision de la mise hors service de tronçons par le SEDIF à court terme (en 2013)

D.2 VEDIF

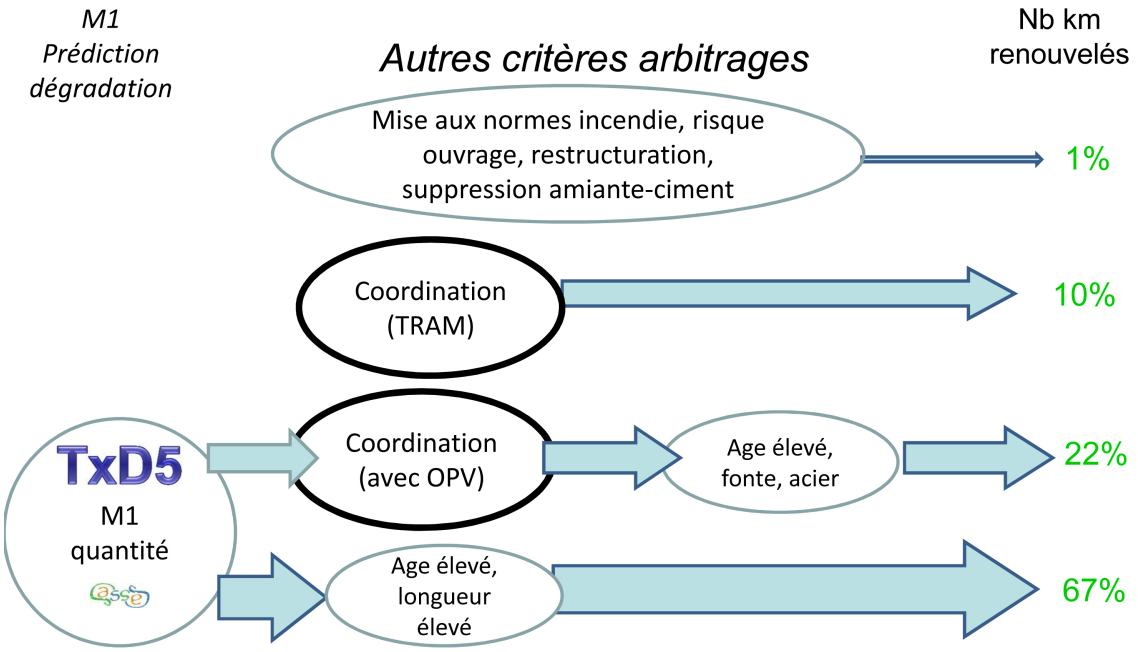


FIGURE D.2: Les étapes de la décision de la mise hors service de tronçons par le VEDIF à court terme (en 2010). TxD5 : Nombre de défaillances FR à l'hectomètre sur les 5 dernières années. OPV : Opérations sur la voirie.

D.3 Grand Lyon TVD

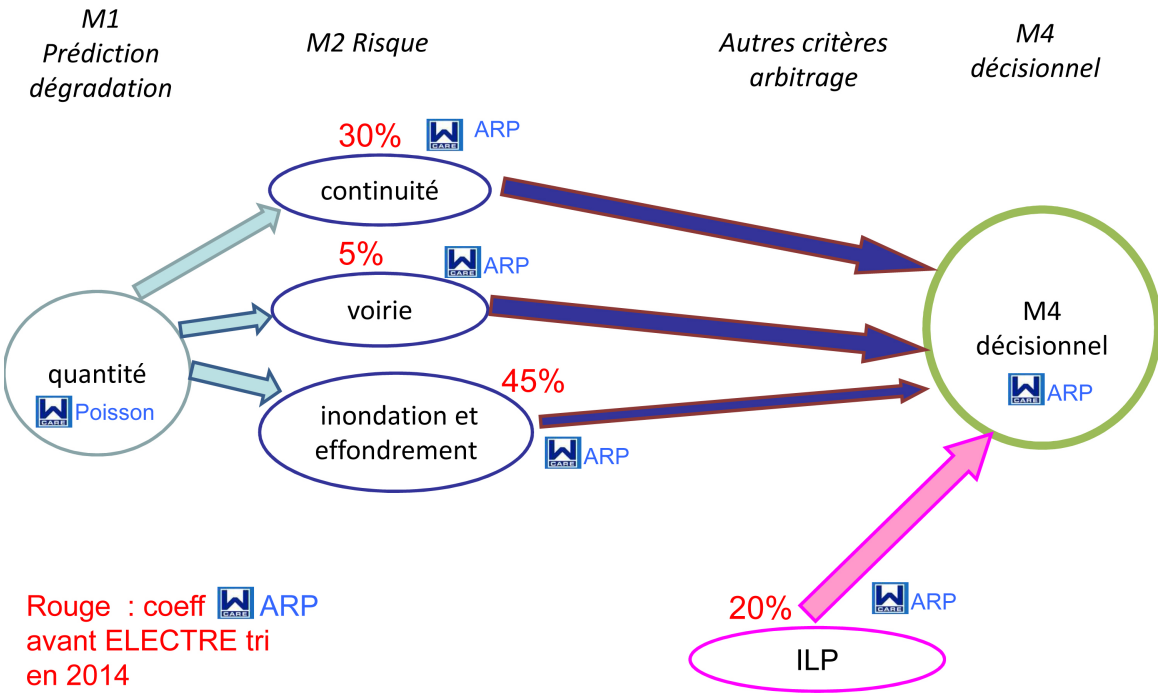


FIGURE D.3: Les 4 premières étapes de la décision de la mise hors service de tronçons par le Grand Lyon à court terme (en 2014).

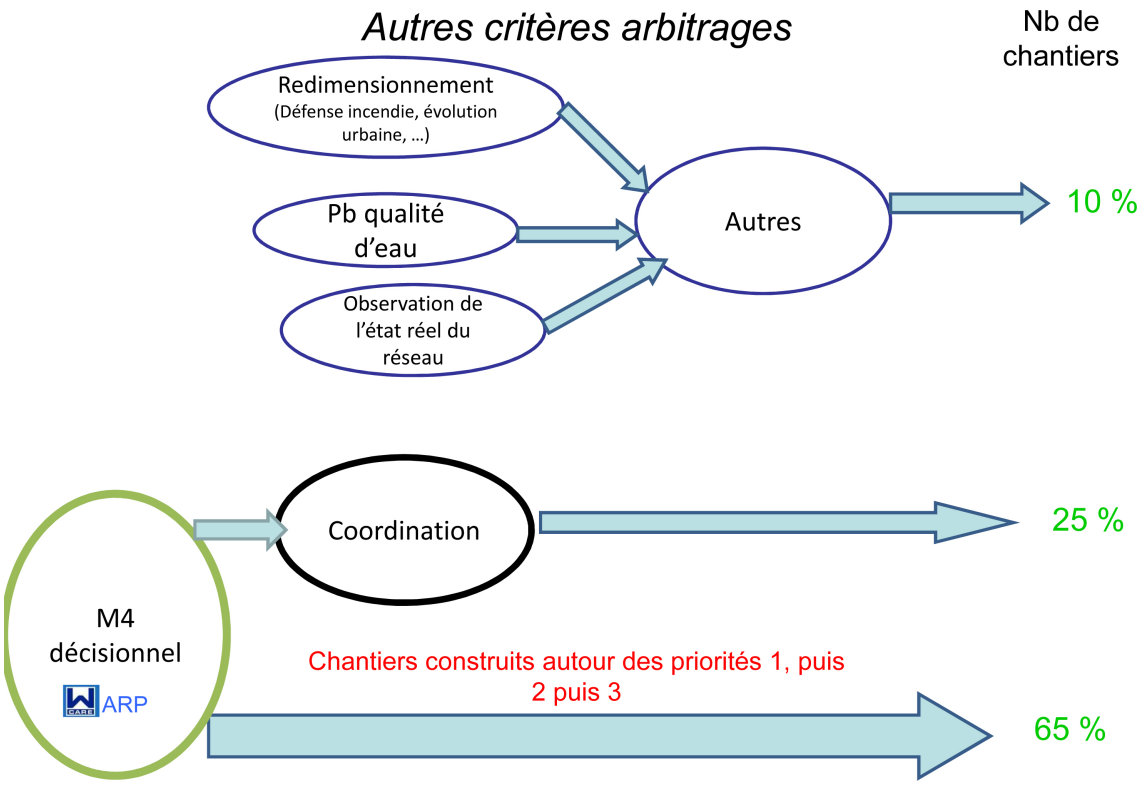


FIGURE D.4: La 5e étape de la décision de la mise hors service de tronçons par le Grand Lyon à court terme (en 2014). ILP : Indice Linéaire de Perte.

Annexe E

La survie brute

Notons y_1 l'année de début de la fenêtre d'observation, y_2 l'année de fin d'observation et T la variable aléatoire représentant l'âge à la mise hors service. Pour chaque tronçon i, posons : y_{0i} son année de pose, $y_{\dagger i}$ son année de mise hors service, t_{1i} l'âge du tronçon au début de son observation ($t_{1i} = 0$ an si le tronçon a été posé après y_1 sinon $t_{1i} = y_1 - y_{0i}$), t_{2i} l'âge du tronçon à la fin de son observation ($t_{2i} = y_2 - y_{0i}$ s'il est encore en service à la fin de la fenêtre d'observation sinon $t_{2i} = y_{\dagger i} - y_{0i}$) et c_i sa variable censure ($c_i = 0$ si $y_{2i} = y_{\dagger i}$ et $c_i = 1$ si $y_{2i} = y_2$).

Survie brute en linéaire

$$f_{\mathrm{B}}(t) = \left(\sum_{i\ :\ t_{2i}=t,\ c_i=0} L_i \right) \Big/ \left(\sum_{i\ :\ c_i=0} L_i \right) \tag{E.1}$$

$$F_{\mathrm{B}}(t) = \sum_{a \leq t} f_{\mathrm{B}}(a) \tag{E.2}$$

$$S_{\mathrm{B}}(t) = 1 - F_{\mathrm{B}}(t) \tag{E.3}$$

Annexe F

Analyse Coûts Bénéfices

Si on avait voulu agréger les indicateurs d'Optimeau, il nous semble qu'une méthode adaptée dans notre cas soit l'ACB (analyse coûts-bénéfices) socio-environnementale. Elle a les avantages suivants :

- elle peut couvrir le plus grand périmètre possible sur la figure 12.1 ;
- elle est générique cf. figure 12.2 ;
- elle s'adapte parfaitement à des horizons temporels prospectifs longs ;
- elle est simple à comprendre ;
- et elle permet d'identifier les impacts d'un scénario par rapport à un autre scénario.

L'analyse coûts bénéfices consiste en l'évaluation d'un projet dans une perspective de long terme et du point de vue de l'économie dans son ensemble, en comparant les effets du projet avec ceux d'un scénario sans projet [Pearce et al., 2006; Large, 2008]. Un projet satisfait au critère coûts bénéfices si ses bénéfices sociaux sont supérieurs à ses coûts sociaux. Les bénéfices sont alors définis comme des augmentations du bien-être humain (ou de l'utilité) alors que les coûts sont définis comme des réductions du bien-être humain.

L'ACB se déroule en cinq grandes étapes :

- Etape 1. Définir le projet ;
- Etape 2. Identifier les impacts du projet par rapport à un scénario sans projet ;
- Etape 3. Évaluer monétairement ces impacts ;
- Etape 4. Calculer des indicateurs clés tel que la VAN (valeur actuelle nette) ;
- Etape 5. Effectuer une analyse de sensibilité sur ces indicateurs et conclure.

Par exemple, si nous comparions le scénario "On ne renouvelle pas" noté $sc0$ au scénario "Statu quo" noté $sc1$, la VAN aurait pu être la suivante :

$$VAN(y_2 + k) = \sum_{j=1}^{k} \frac{B(y_2 + j) - C(y_2 + j)}{(1 + r)^j} \tag{F.1}$$

Où y_2 est l'année de fin de la fenêtre d'apprentissage du modèle, k est l'horizon temporel vers lequel nous faisons tendre la simulation (ici $k = 37$ pour aller à 2050), r est le taux d'actualisation et B sont les bénéfices c'est à dire les dommages évités entre ces deux scénarios. Si les indicateurs de risque du chapitre 11 avaient été monétarisés nous aurions pu utiliser l'équation F.2 pour estimer les bénéfices. C est la différence des coûts (non actualisés) entre ces deux scénarios (cf. équation F.3).

$$B(y_2+j) = I2P_{sc0}(y_2+j) + I3P_{sc0}(y_2+j) + I4P_{sc0}(y_2+j) + I5P_{sc0}(y_2+j) + I6P_{sc0}(y_2+j) \\ -[I2P_{sc1}(y_2+j) + I3P_{sc1}(y_2+j) + I4P_{sc1}(y_2+j) + I5P_{sc1}(y_2+j) + I6P_{sc1}(y_2+j)] \tag{F.2}$$

Avec :

- $I2P$, le risque de coupure d'eau chez les usagers suite à une défaillance du réseau
- $I3P$, le risque de perturbation des usagers de la voirie suite à une défaillance du réseau
- $I4P$, le risque de dégâts sur des biens (chaussée, maisons) suite à une inondation induite par une défaillance du réseau
- $I5P$, le risque de dégâts suite à un glissement de terrain induit par une défaillance du réseau
- $I6P$, le volume de fuite lié aux défaillances du réseau.

$$C(y_2+j) = I1F_{sc1}(y_2+j) + I2F_{sc1}(y_2+j) - [I1F_{sc0}(y_2+j) + I2F_{sc0}(y_2+j)] \tag{F.3}$$

Avec :

- $I1F$, le coût annuel du renouvellement du réseau
- $I2F$, le coût annuel de la réparation des défaillances du réseau

Annexe G

Pyramide des âges

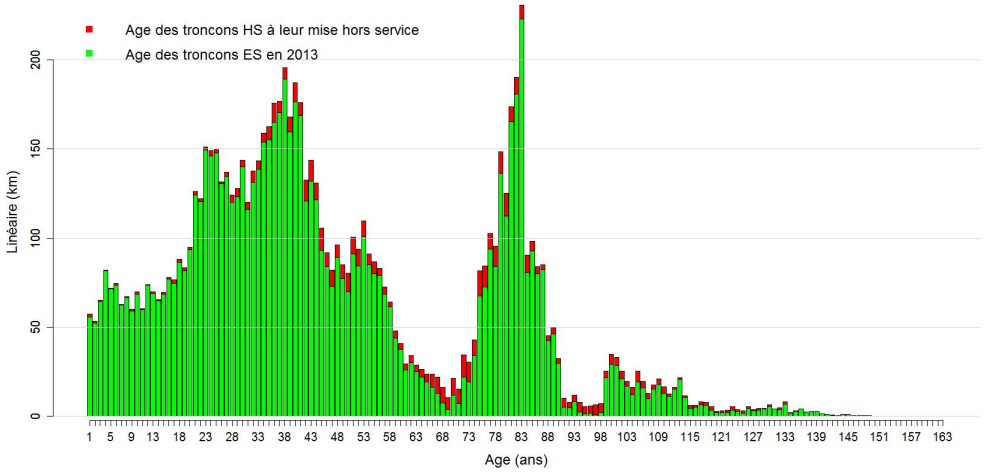


FIGURE G.1: Age en 2013 du réseau du SEDIF service (8 296 km) fin 2012 et âge à la mise hors service des tronçons mis hors service (680 km) entre [1995, 2012] (si DDP connue)

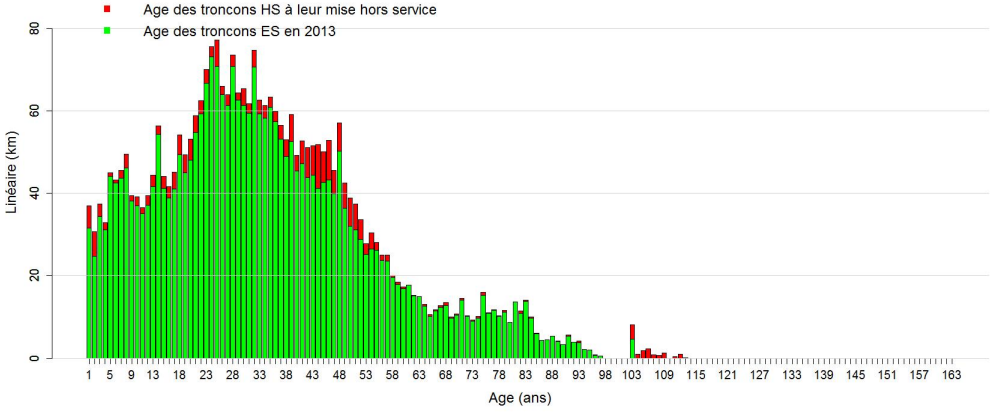


FIGURE G.2: Age en 2013 du réseau du Grand Lyon TVD en service (3 030 km) fin 2012 et âge à la mis hors service des tronçons mis hors service (123 km) entre [2002, 2012] en fonction des DDP (si DDP connue)

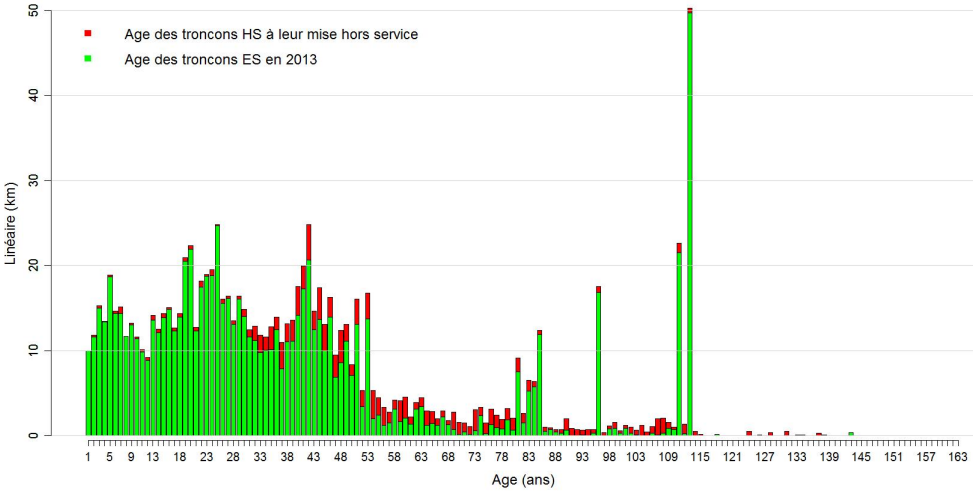


FIGURE G.3: Age en 2013 du réseau d'Eauservice Lausanne en service (874 km) fin 2012 et âge à la mise hors service des tronçons mis hors service (136 km) entre [2001, 2012] en fonction des DDP (si DDP connue)

Annexe H

Justification du choix des 11 indicateurs d'OPTIMEAU

Les 11 indicateurs d'OPTIMEAU ont été choisis en fonction des objectifs (cf. chapitre 8) des terrains d'étude, de leurs pratiques et de la revue bibliographique. Nous avons effectué un compromis entre ce dont les terrains avaient besoin et ce dont nous étions capables de calculer.

H.1 Indicateurs de résultat (ou performance)

Concernant les **résultats** (ou performance), les 3 AOEP suivent "le nombre annuel de défaillances du réseau", nous l'avons nommé $I1P$.

Le Grand Lyon et eauservice Lausanne utilisent dans leurs modèles décisionnels de court terme :

- $I2P$, le risque de coupure d'eau chez les abonnés suite à une défaillance du réseau ;
- $I3P$, le risque de perturbation des usagers de la voirie suite à une défaillance du réseau ;
- $I4P$, le risque de provoquer des dégâts sur des biens (chaussée, maisons) suite à une inondation induite par une défaillance du réseau.

Compte tenu des pratiques il n'a pas été choisi d'avoir une approche où les indicateurs de risque seraient monétarisés.

Le Grand Lyon utilise dans son modèle décisionnel de court terme : $I5P$, le risque de provoquer des dégâts suite à un effondrement de terrain induit par une défaillance du réseau.

Enfin, les 3 AOEP suivent l'indice linéaire de perte (cf. chapitre 8 et section 5.3) mais comme nous l'expliquons dans la section 11.8.3 cet indicateur couvre un territoire plus vaste que celui des réseaux. Il comporte les branchements. Par conséquent nous avons créé : $I6P$, le volume de fuite lié aux défaillances à l'échelle du réseau.

H.2 Indicateurs de réalisation

Concernant les réalisations les 3 AOEP suivent $I2R$ le taux de renouvellement. Pour faciliter sa compréhension nous l'avons calculé annuellement (comme à eauservice) plutôt que pluri-annuellement (comme au Grand Lyon et au SEDIF).

Ensuite pour estimer $I2R$ nous avons besoin du linéaire à renouveler chaque année $I1R$ nous avons donc décidé de le représenter graphiquement aussi.

Enfin, l'âge moyen du réseau pour une année donnée $I3R$ est un indicateur suivi par les 3 terrains d'étude, nous avons décidé de le conserver.

H.3 Indicateurs économiques

A eauservice Lausanne, $I2F$ "le coût annuel de la réparation des défaillances du réseau" est utilisé dans leur modèle décisionnel court-terme, nous avons décidé de le garder.

Ensuite travaillant sur le renouvellement des réseau, il semblait évident de présenter $I1F$ "le coût annuel du renouvellement du réseau".

H.4 Conclusion

Nous aurions pu calculer d'autres indicateurs cependant il nous a semblé que ces 11 indicateurs permettent d'éclairer les décideurs publics à propos de la gestion patrimoniale des réseaux.

Annexe I

Equivalents temps plein

	Lausanne	Gd Lyon	SEDIF
Autorité organisatrice (ETP)	139	50	105
Délégataire (ETP)		290	1 417
Total	139	340	1 522
km de réseau	900	3 900	8 300
ETP AO pr 100 km	15	1	1
ETP délégataire pr 100 km		7	17
ETP total pour 100 km	15.4	8.7	18.3

	Lausanne	Gd Lyon	SEDIF
Usagers	360 000	1 300 000	4 300 000
ETP AO pr 100 000 usagers	39	4	2
ETP délég. pr 100 000 usagers		22	33
ETP total pour 100 000 usagers	38.6	26.2	35.4

Tableau I.1: Les équivalents temps plein (ETP) associés au réseau d'eau potable dans chaque terrain d'étude au premier trimestre 2015. AO : Autorité organisatrice.

Annexe J : Scénarios à partir des données d'eauservice Lausanne

	Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Périmètre	Tout le réseau		Réseau en ville									
	Stratifié ?	Non	Ville/ Montagne	Non				Diamètre	NDOA	Matériaux		Vulnérabilité	
	Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2001; 2012]		[2001; 2007]	[2001; 2013]								
	Statu quo ?	Oui		Oui		On arrête de renouveler	On vise un TR de 1%	Oui			Plus drastique avec les fontes grises	Oui	> autour des éléments vulnérables
	Numéro scénario / Indicateurs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Survie passée	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
I1R	Linéaire	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
I2R	Tx renouvellement	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X
I3R	Âge moyen	X			X	X	X	X		X	X	X	X
I1F	Coût renouvellement	X			X	X	X	X		X	X	X	X
I1P	Nb Def Eq3				X	X	X	X		X	X	X	X
I2F	Coût réparation				X	X	X			X	X	X	X
I2P	Continuité				X	X	X			X	X	X	X
I3P	Voirie				X	X	X			X	X	X	X
I4P	Inondation				X	X	X			X	X	X	X
I5P	Glissement												
I6P	Volume fuite				X	X	X				X		X

Scénario 1 (code E)

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Périmètre	Tout le réseau		Réseau en ville									
Stratifié ?	Non	Ville/ Montagne	Non				Diamètre	NDOA	Matériaux		Vulnérabilité	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2001; 2012]		[2001; 2007]	[2001; 2013]								
Statu quo ?	Oui		Oui		On arrête de renouveler	On vise un TR de 1%	Oui			Plus drastique avec les fontes grises	Oui	> autour des éléments vulnérables

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

⇨ Donnée Linda 2013

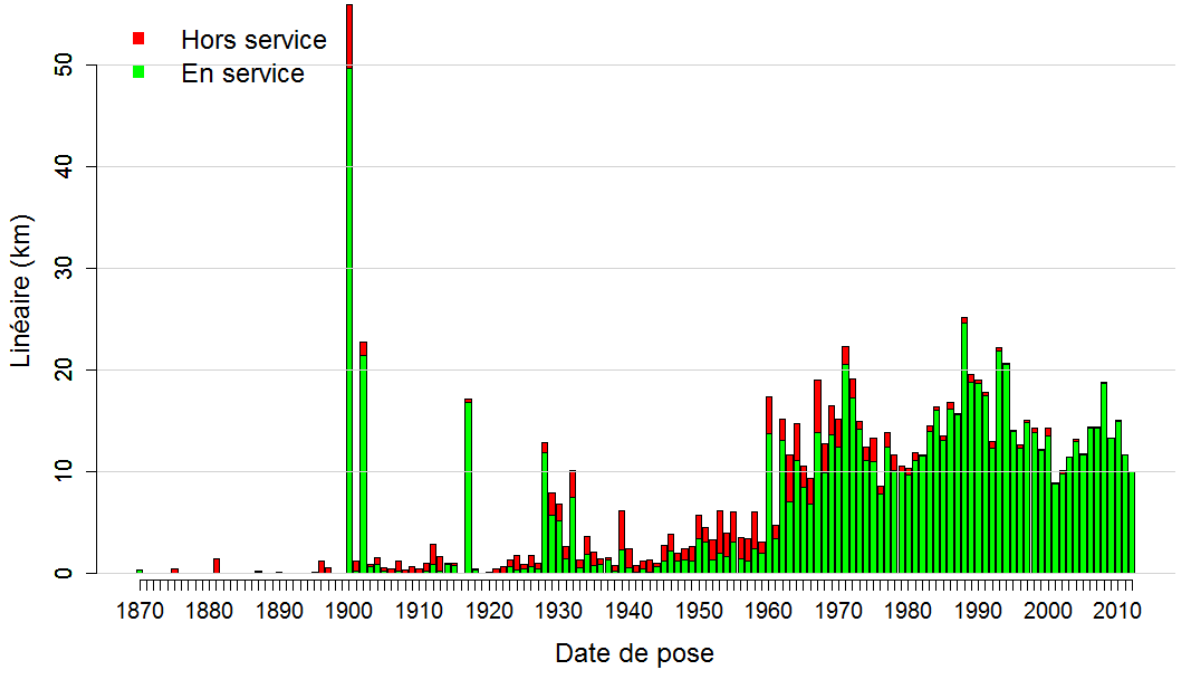


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2001 ; 2012])

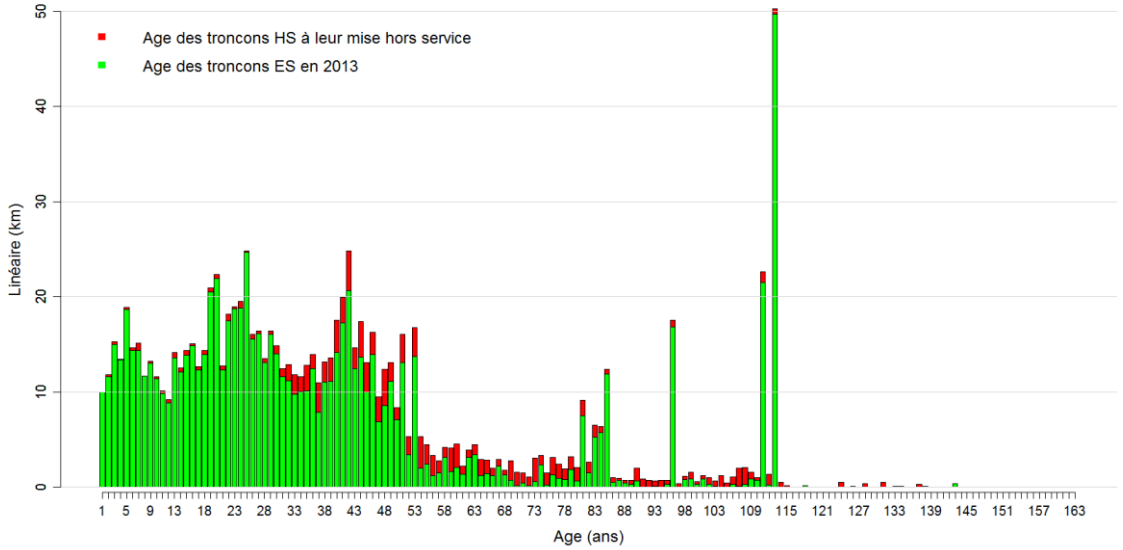


Figure 2 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2012 en fonction de leur âges (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2001 ; 2012])

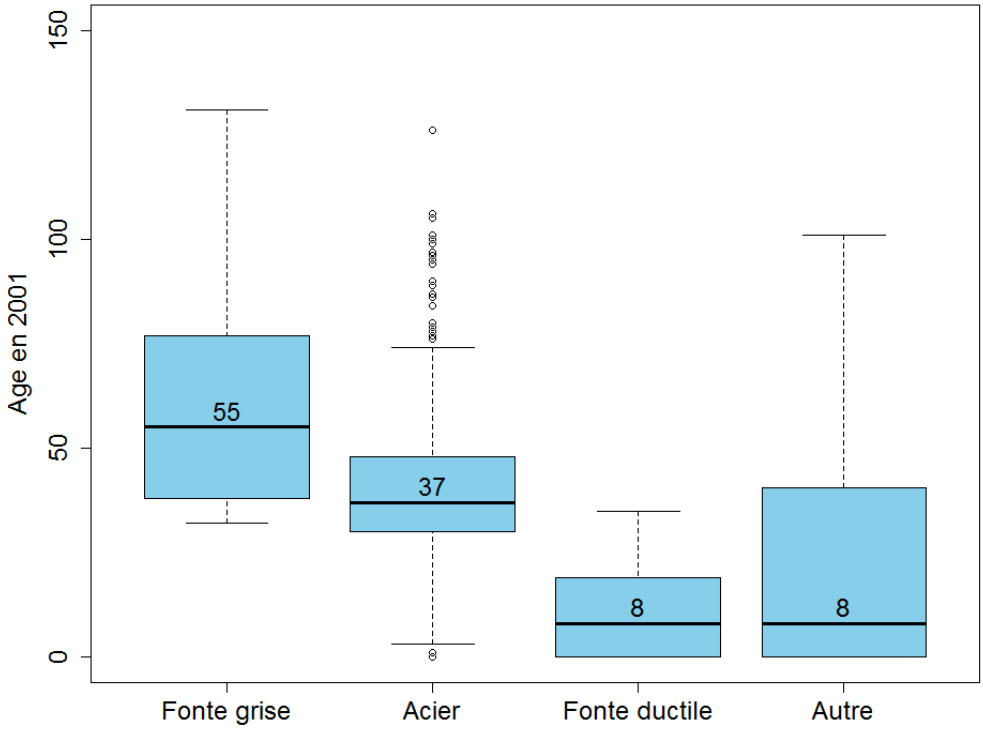


Figure 3 : Boite à moustache de l'âge par matériaux

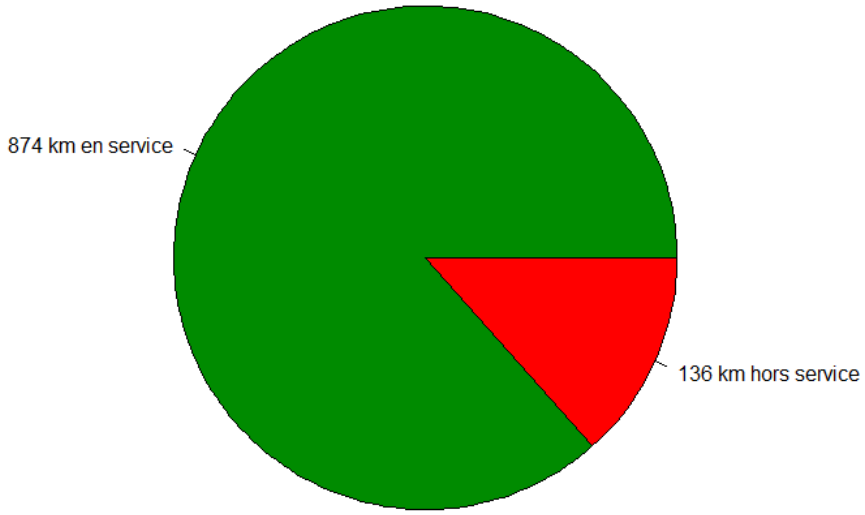


Figure 4 : Proportion du linéaire ES au 31/12/2012 et mis HS entre [2001,2012] avec DDP

I.2 Sortie en linéaire

I.2.1 Sortie en linéaire sans IC

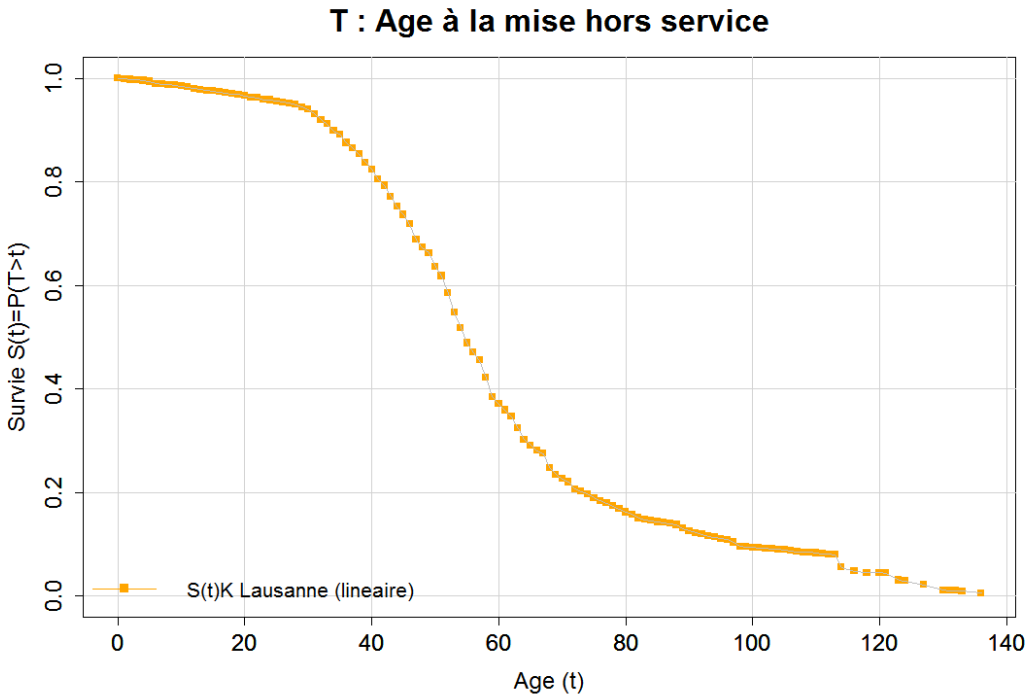


Figure 5 : Courbes de survie passée, sur la fenêtre [2001, 2012], de Kaplan Meier en linéaire de tronçons

I.2.2 Qualité des données d'entrée (en linéaire)

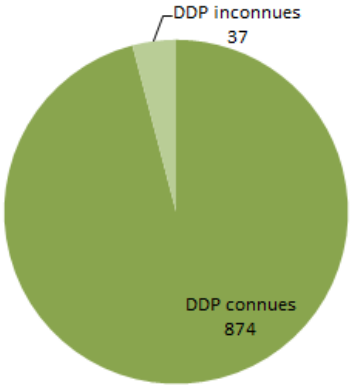


Figure 6 : Diagramme du linéaire en service (911 km) au 31/12/2012 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose (4% d'inconnues)

DDP inconnues des tronçons ES au 31/12/2012 : 4%

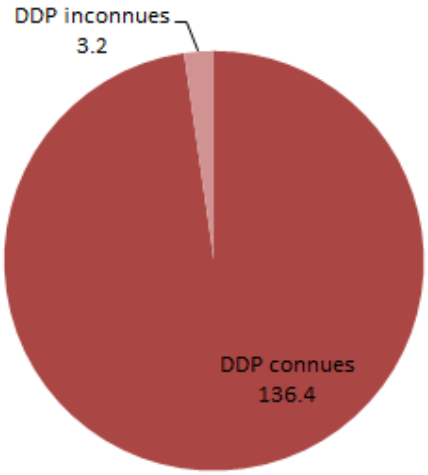


Figure 7 : Diagramme du linéaire mis hors service entre [2001 ; 2012] (140 km) à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose (2% d'inconnues)

DDP inconnues des tronçons mis HS entre [2001,2012] : 2%

Donc peu de DDP inconnues, les intervalles de confiances suivants caractérisent bien l'incertitude.

I.2.3 Sortie en linéaire avec IC du modèle

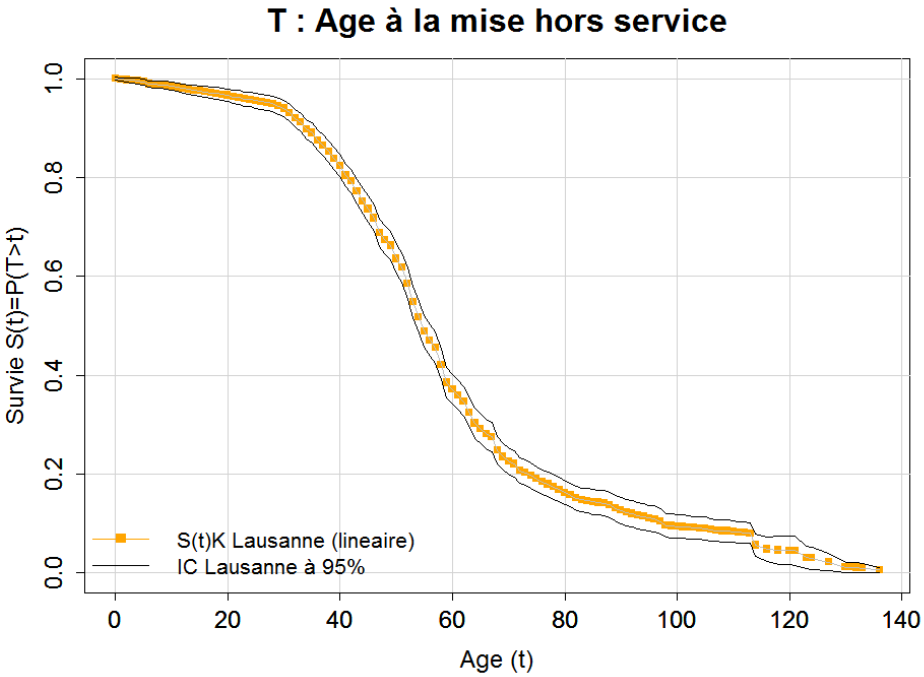


Figure 8 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en linéaire tronçons. IC méthode 1.96+-sig (G=effectif).

I.1 Entrée en effectif

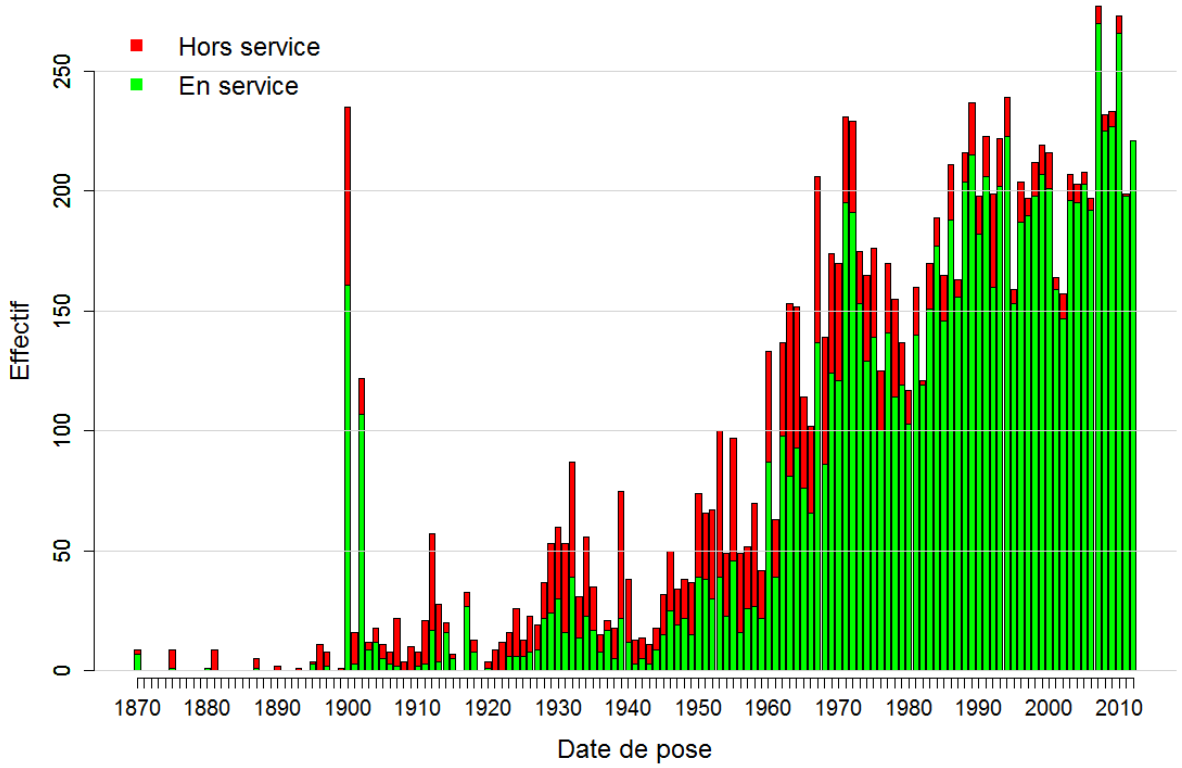


Figure 9 : Histogramme du nombre de tronçons En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2001 ; 2012])

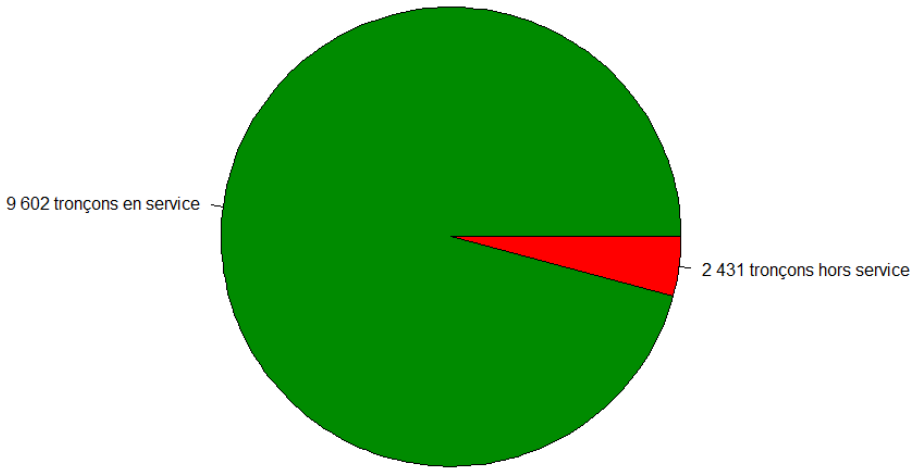


Figure 10 : Proportion du nombre de tronçon ES au 31/12/2012 et mis HS entre [2001,2012] avec DDP

I.2 Sortie en effectif

I.2.1 Sortie en effectif sans IC

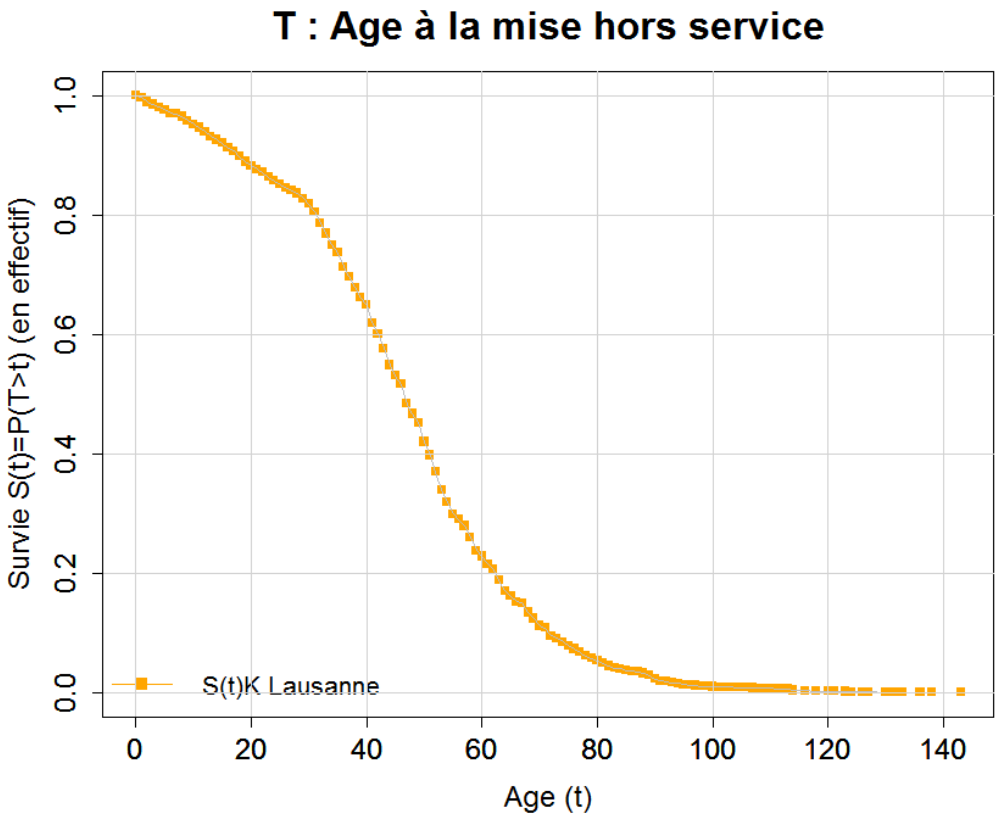


Figure 11 : Courbes de survie passée, sur la fenêtre [2001, 2012], de Kaplan Meier en nombre de tronçon

I.2.1 Qualité des données d'entrée (en effectif)

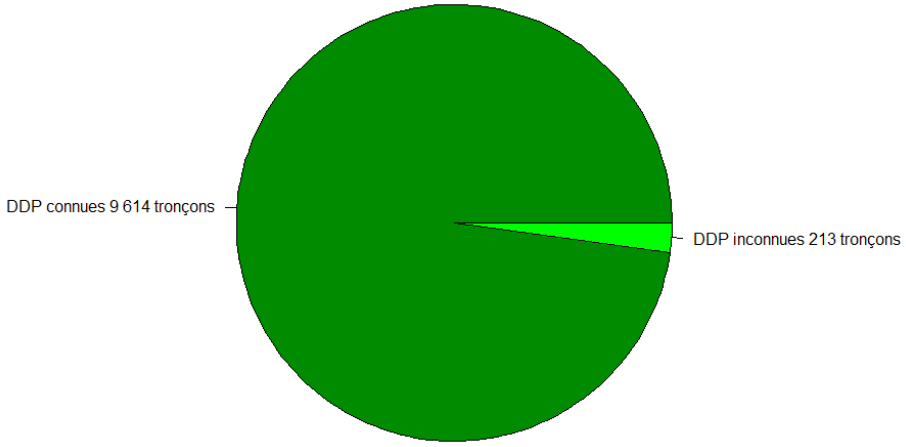


Figure 12 : Diagramme du nombre de tronçons en service (9827 tronçons) au 31/12/2012 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose (2.2% d'inconnues)

DDP inconnues des tronçons ES au 31/12/2012 : 2.2%

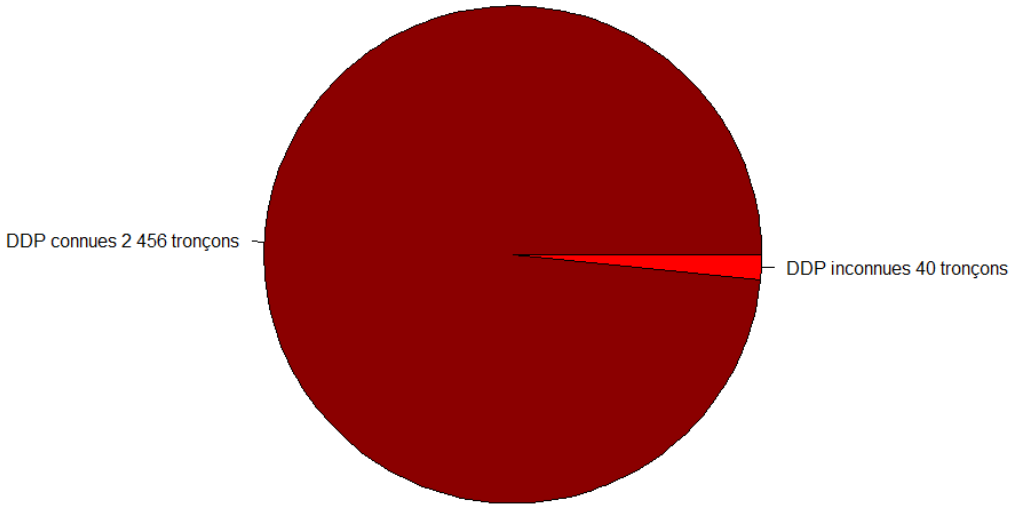


Figure 13 : Diagramme du linéaire mis hors service entre [2001 ; 2012] (2 496 tronçons) à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose (1.6% d'inconnues)

I.2.2 Sortie en effectif avec IC du modèle

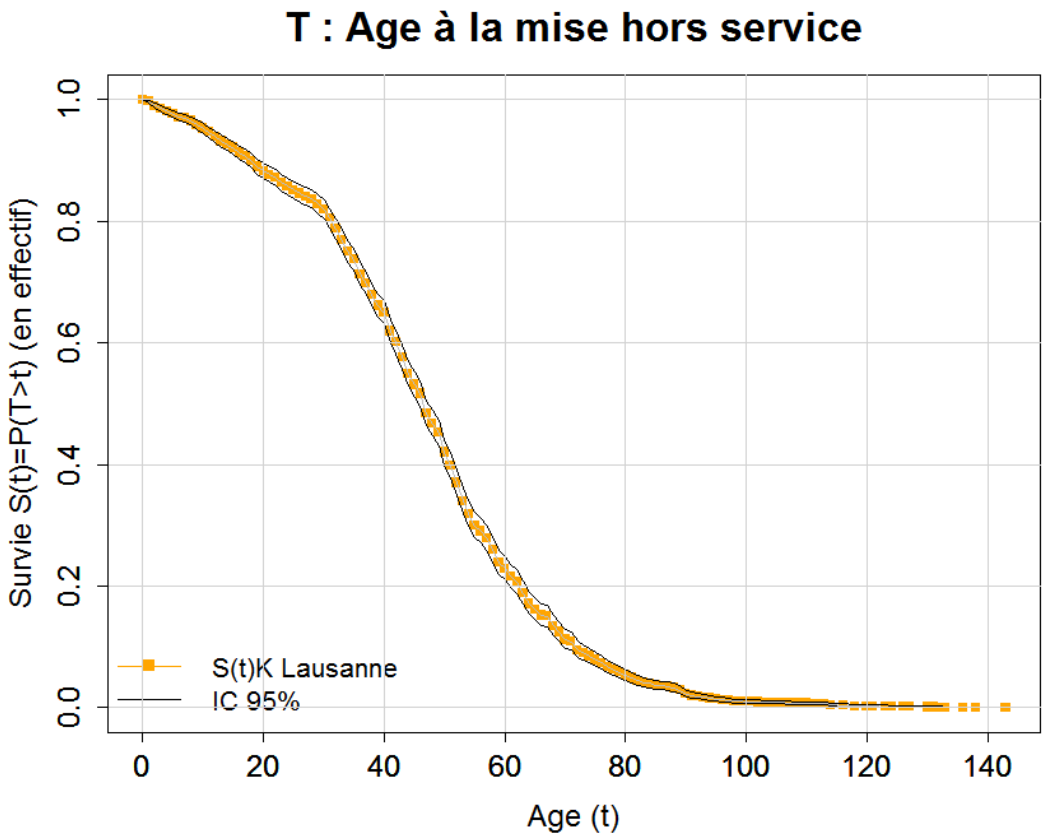


Figure 14 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en nombre de tronçons (avec son intervalle de confiance)

II Scénario 1

- scénario prospectif « Statu quo » : « A l' avenir la distribution des âges à la mise hors service des canalisations sera strictement identique à celle de Lausanne par le passé ».

- Groupe de tronçons : tout le réseau !
- Date export donné : 2013 par Linda
- Photographie des données au 31/12/2012

III Construction scénario prospectif

III.1 Entrée en linéaire

Cf. :Figure 1

III.2 Sortie en linéaire

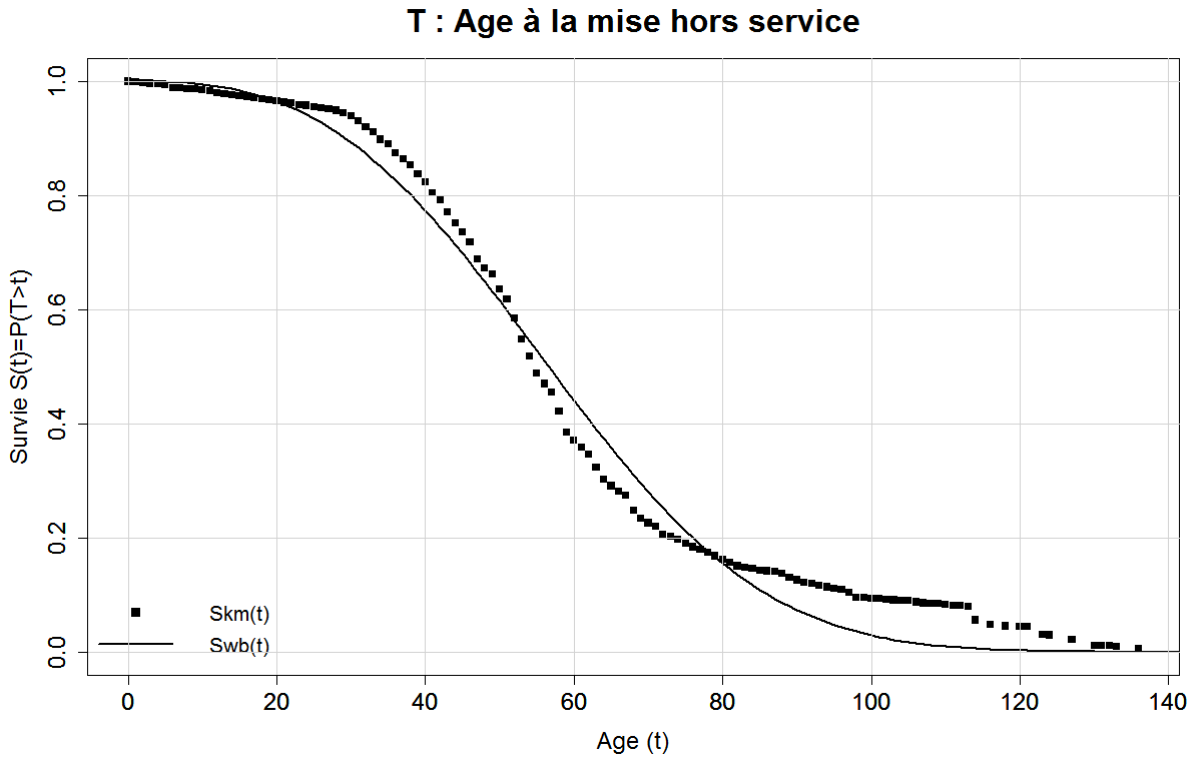


Figure 15 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait) par classe de diamètres

Paramètres de la loi de Weibull

Label	Estimate	Ref	Chi2	df	Pval
delta	2.8589188e+00	1	1.0697148e+02	1	0.0000000
lambda	1.1904783e+01	10	2.4825076e+01	1	0.0000006

IV Calcul des indicateurs I1R, I2R et I3R

IV.1 Entrée

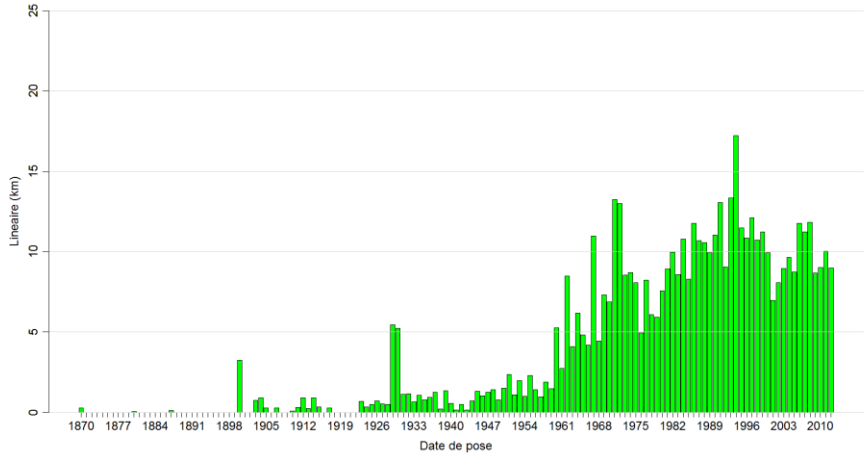


Figure 16 : Linéaire en service en 31/12/2012 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose (attention manque 4% du linéaire).

Nous avons supprimé le pic en 1900.

IV.2 Sortie

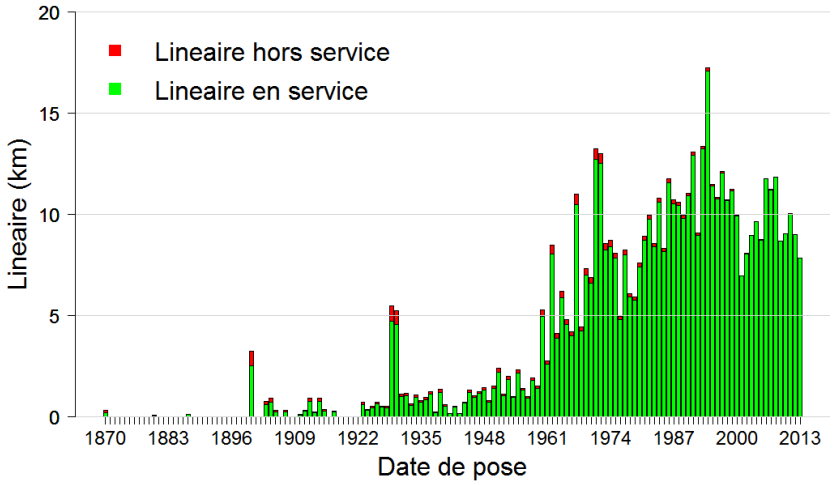


Figure 17 : Linéaire en service (ES) le 31/12/2013 et mis hors service (HS) entre [2012, 2013], prévision du futur, photographie de la situation en 2013

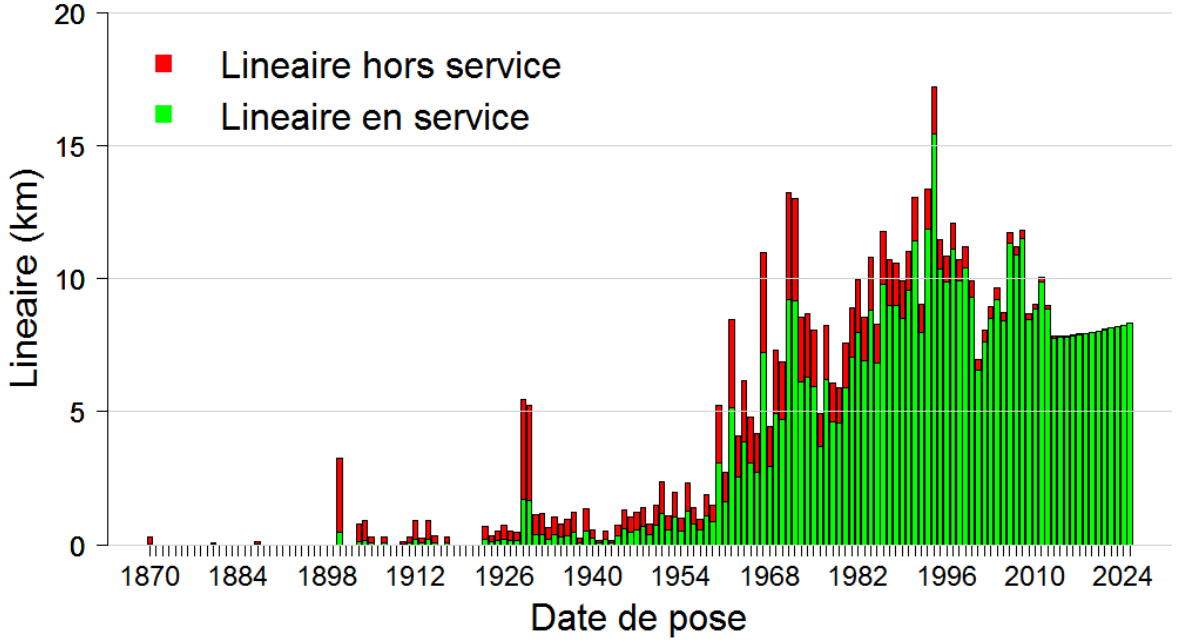


Figure 18 : Linéaire en service (ES) le 31/12/2025 et linéaire mis hors service (HS) entre [2012, 2025], prévision du futur, photographie de la situation en 2025

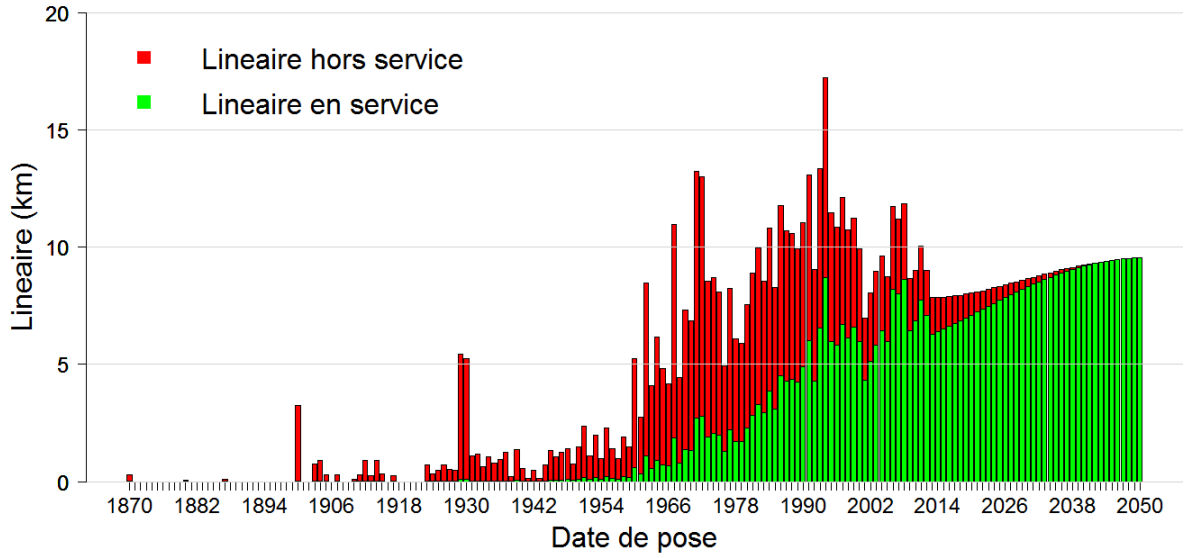


Figure 19 : Linéaire en service (ES) le 31/12/2050 et mis hors service (HS) entre [2012, 2050], prévision du futur, photographie de la situation en 2050

IV.1 Sortie I2R

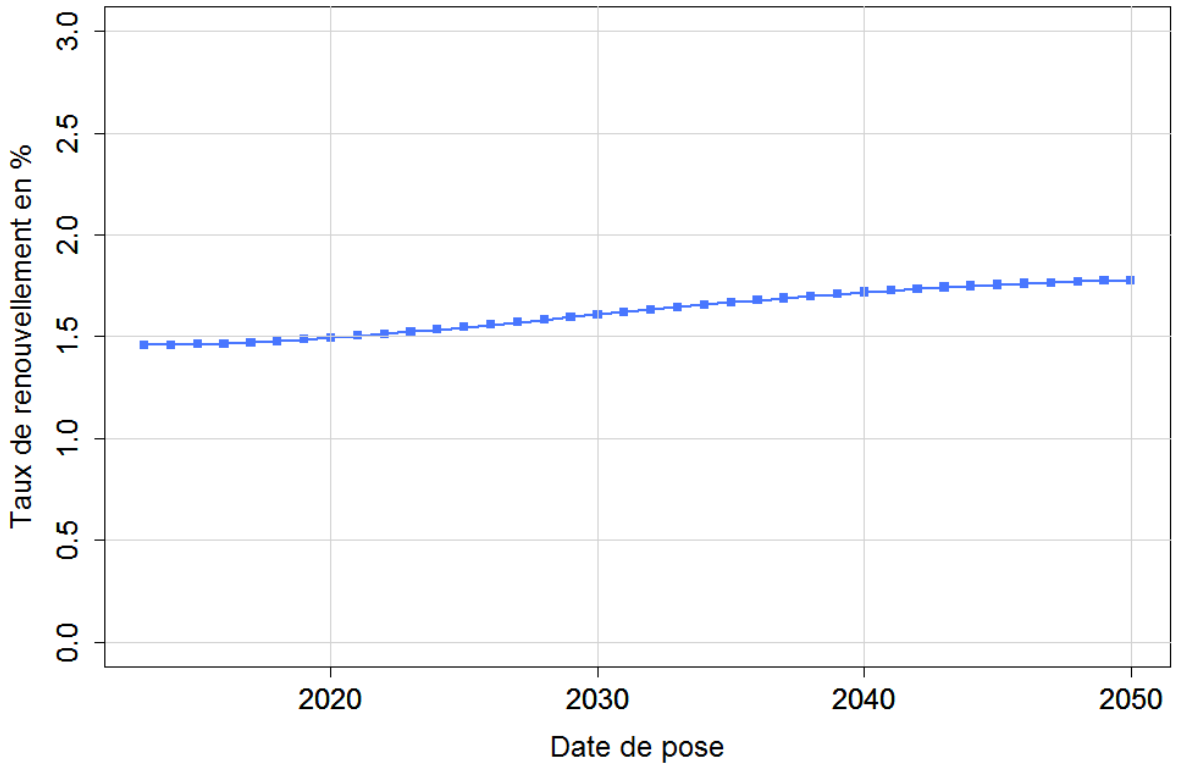


Figure 20 : Prévision des taux de renouvellement futurs de 2013 jusqu'en 2050

IV.2 Pour mémoire rappel de pratiques passées

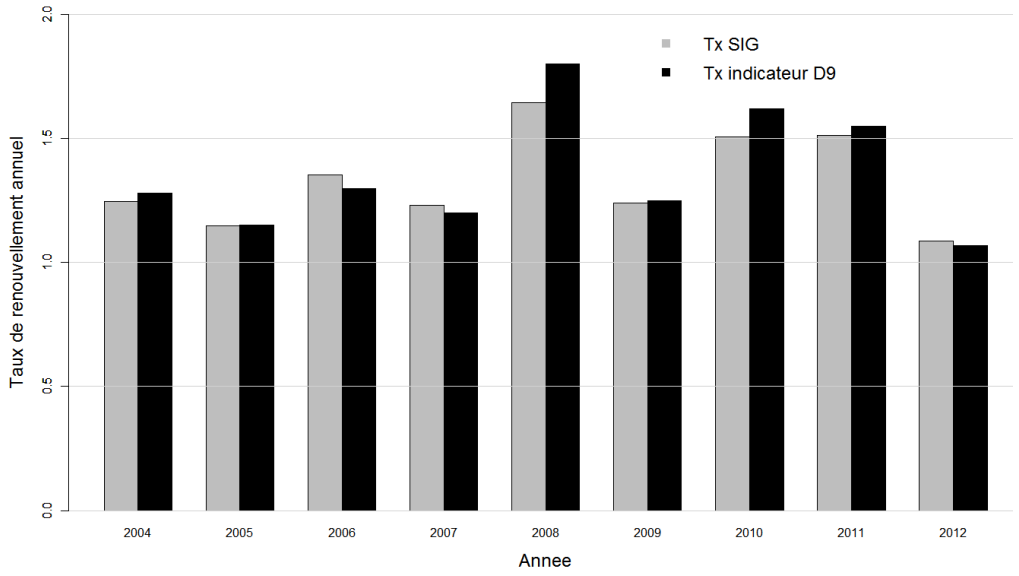


Figure 21 : Taux de renouvellement passé de 2004 à 2012

Figure 22 : Taux de renouvellement passé de 2004 à 2012

IV.3 Sortie I3R

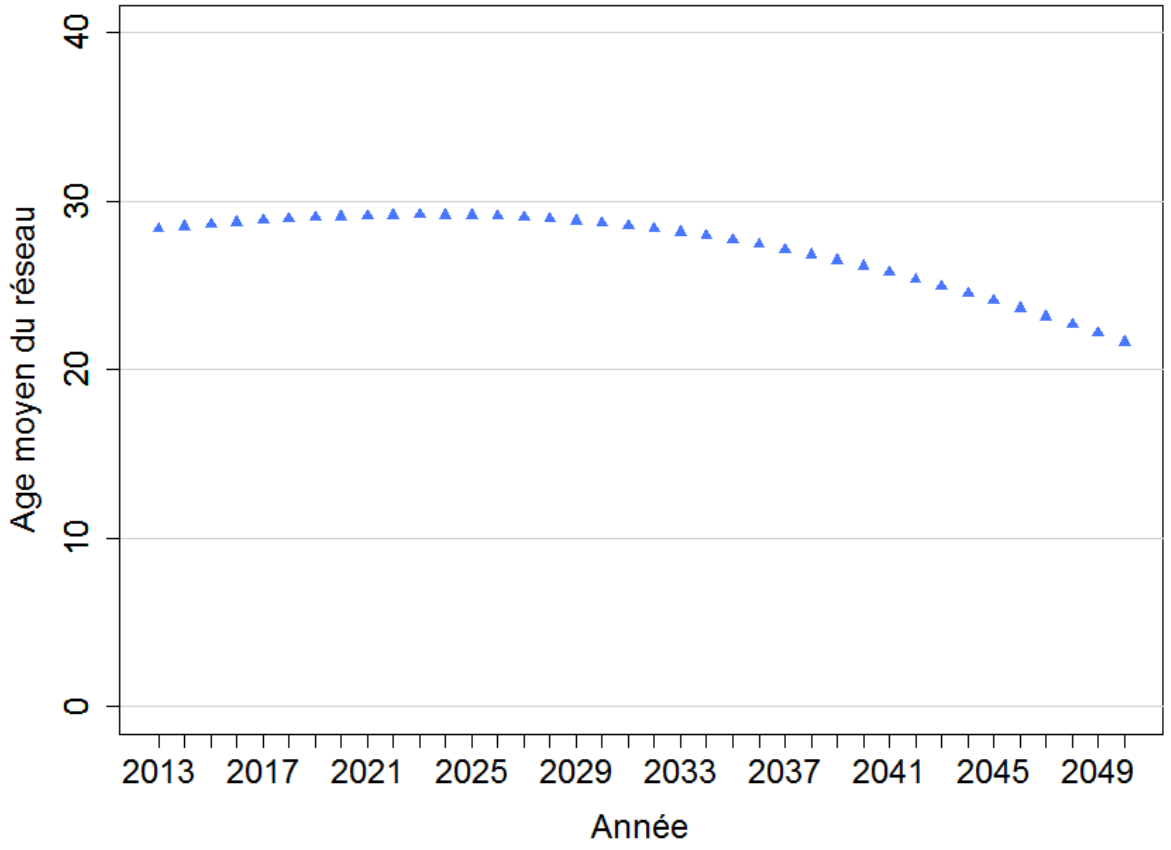


Figure 23 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2013 jusqu'en 2050 à eauservice Lausanne

V Calcul de l'indicateur I1F

V.1 Entrée

Nom de la strate	Coûts des travaux à la strate (CHF/m)
Tout réseau	765

V.2 Sortie

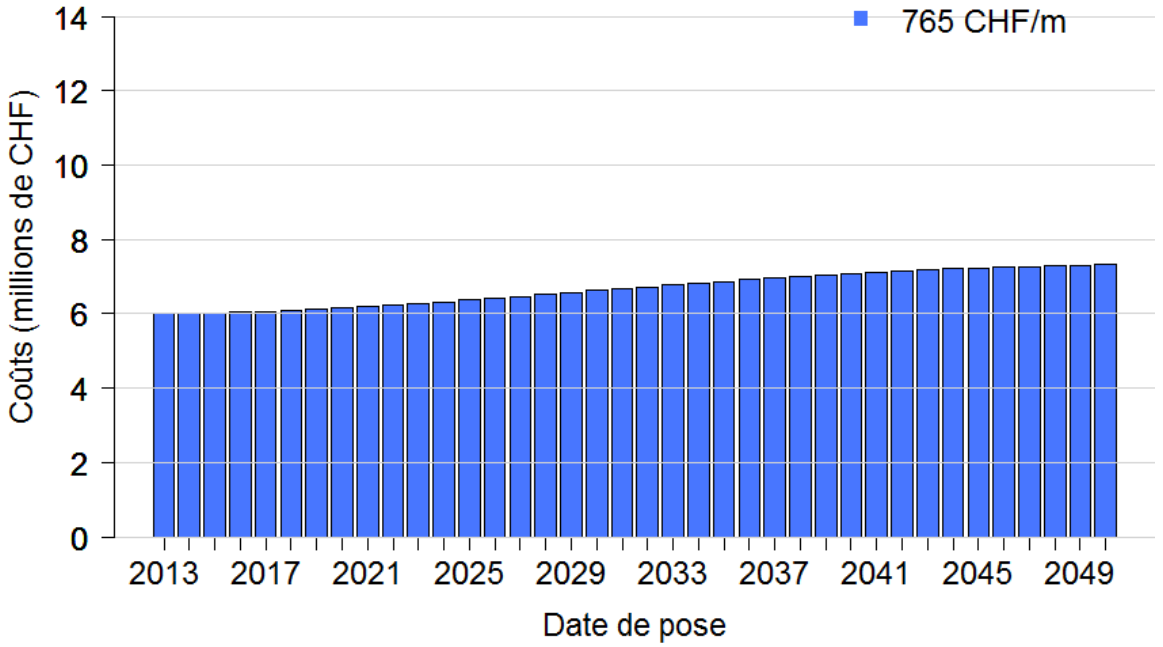


Figure 24 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2013 et 2050, scénario « statu quo.

Scénario 2 (code D)

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Périmètre	Tout le réseau		Réseau en ville									
Stratifié ?	Non	Ville/ Montagne	Non				Diamètre	NDOA	Matériaux		Vulnérabilité	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2001; 2012]		[2001; 2007]	[2001; 2013]								
Statu quo ?	Oui		Oui		On arrête de renouveler	On vise un TR de 1%	Oui			Plus drastique avec les fontes grises	Oui	> autour des éléments vulnérables

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

⇨ Donnée Linda 2013

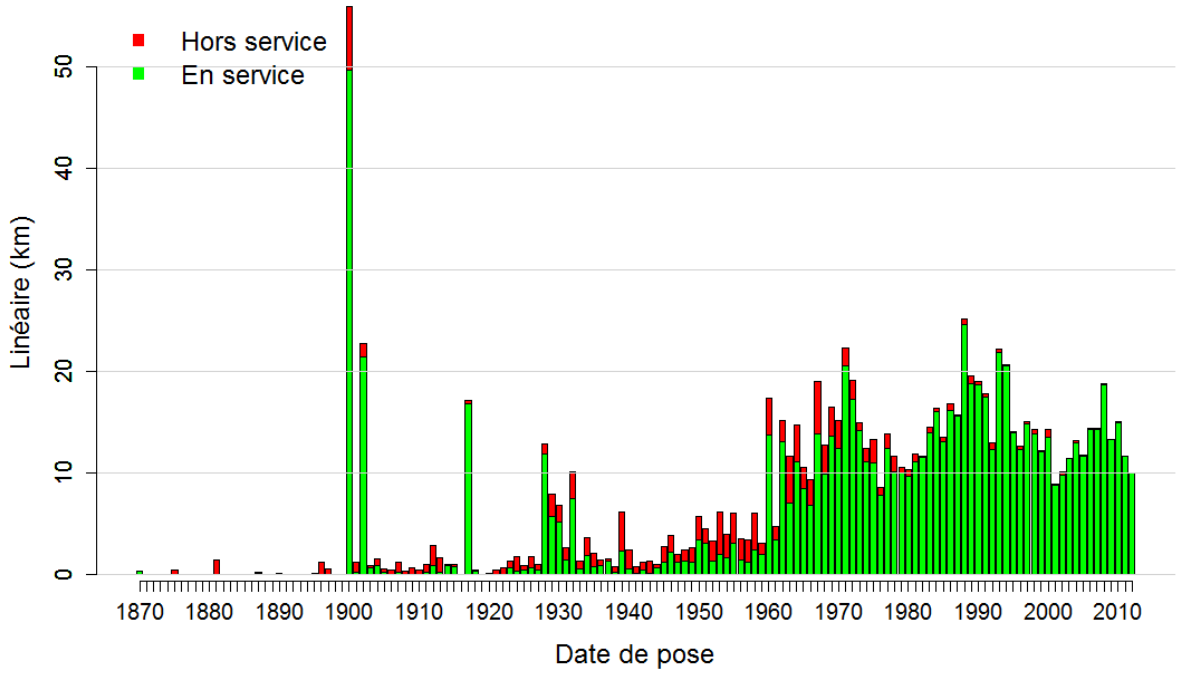


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service au 31/12/2012 (en vert) et mis Hors Service entre [2001 ; 2012] (en rouge) ayant une date de pose connue

On scinde le réseau en quatre strates :

1. **Adduction :** conduites d'adduction (du captage à la station de traitement)
2. **CAM :** conduite d'amenés (CAM), ce sont des conduites de transport (de la station de traitement jusqu'au réservoir ou entre les réservoirs) situés en altitude, en forêt en général. Elles sont souvent gravitaires.
3. **Distri dia<250 :** conduites de distribution (conduites d'alimentation des quartiers sur lesquelles les prises d'eau sont effectuées pour le raccordement des usagers) et de transport sans les CAM de diamètre inférieur strict à 250 mm.
4. **Distri dia ≥ 250** : conduites de distribution (conduites d'alimentation des quartiers sur lesquelles les prises sont effectuées pour le raccordement des immeubles) et de transport sans les CAM de diamètre supérieur ou égal à 250 mm.

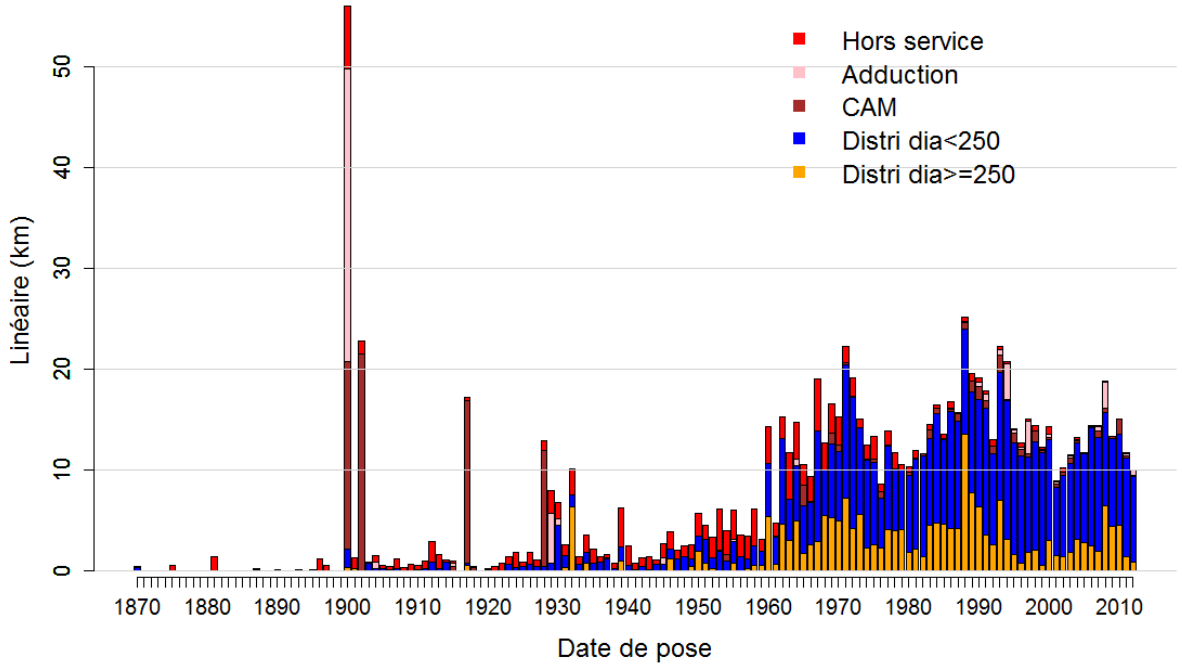


Figure 2 : Linéaire En Service au 31/12/2012, différencié selon quatre strates, et mis Hors Service entre [2001 ; 2012] (en rouge) à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose

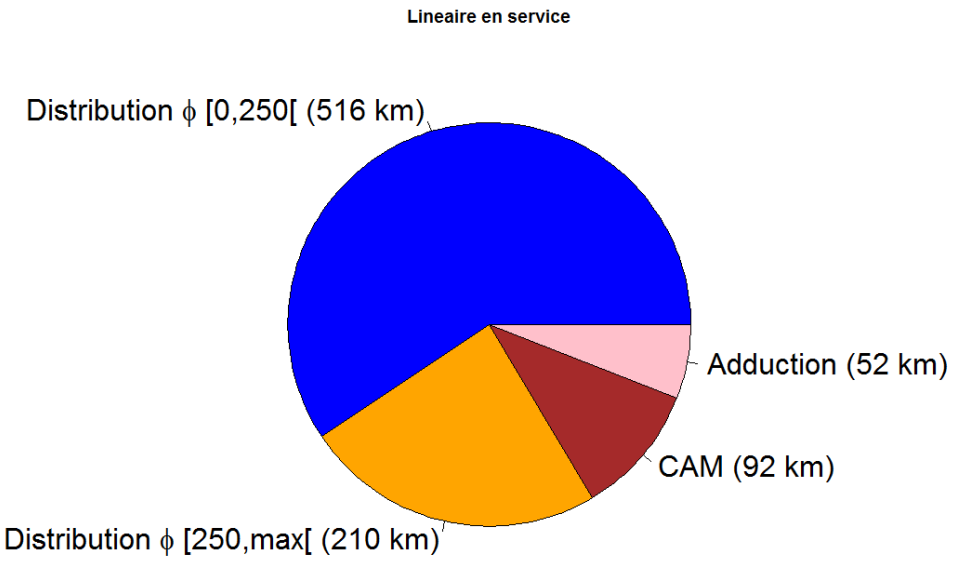


Figure 3 : Proportion de chaque strate du linéaire ES au 31/12/2012, ayant une DDP

I.2 Sortie en linéaire

I.2.1 Sortie en linéaire sans IC

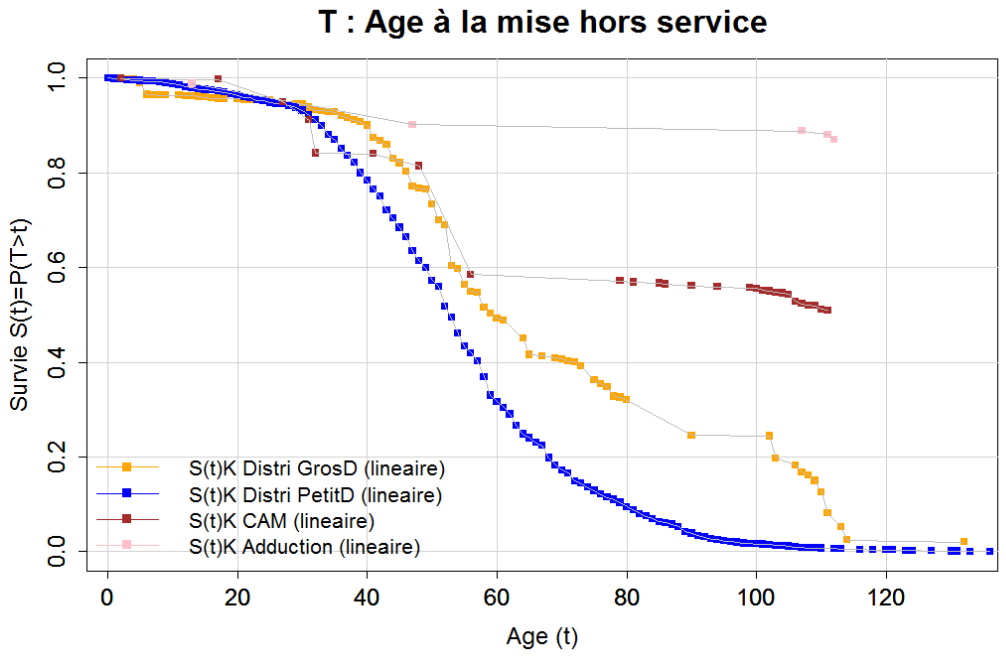


Figure 4 : Courbes de survie passée sur [2001, 2012] de Kaplan Meier en linéaire de tronçons selon quatre strates

I.2.2 Qualité des données d'entrée (en linéaire)

I.2.2.1 Qualité des données d'entrée : tronçons en service au 31/12/2012

Strate 1 : DDP inconnues de l'adduction : 36%
Strate 2 : DDP inconnues des CAM : 0.13%
Strate 3 et 4 : (DDP + diamètre) inconnues : 0.01%

I.2.2.2 Qualité des données d'entrée : tronçons mis hors service entre [2001, 2012]

Strate 1 : DDP inconnues de l'adduction : 1.9%
Strate 2 : DDP inconnues des CAM : 0.17%
Strate 3 et 4 : (DDP + diamètre) inconnues : 0.02%

I.2.3 Sortie en linéaire avec IC du modèle

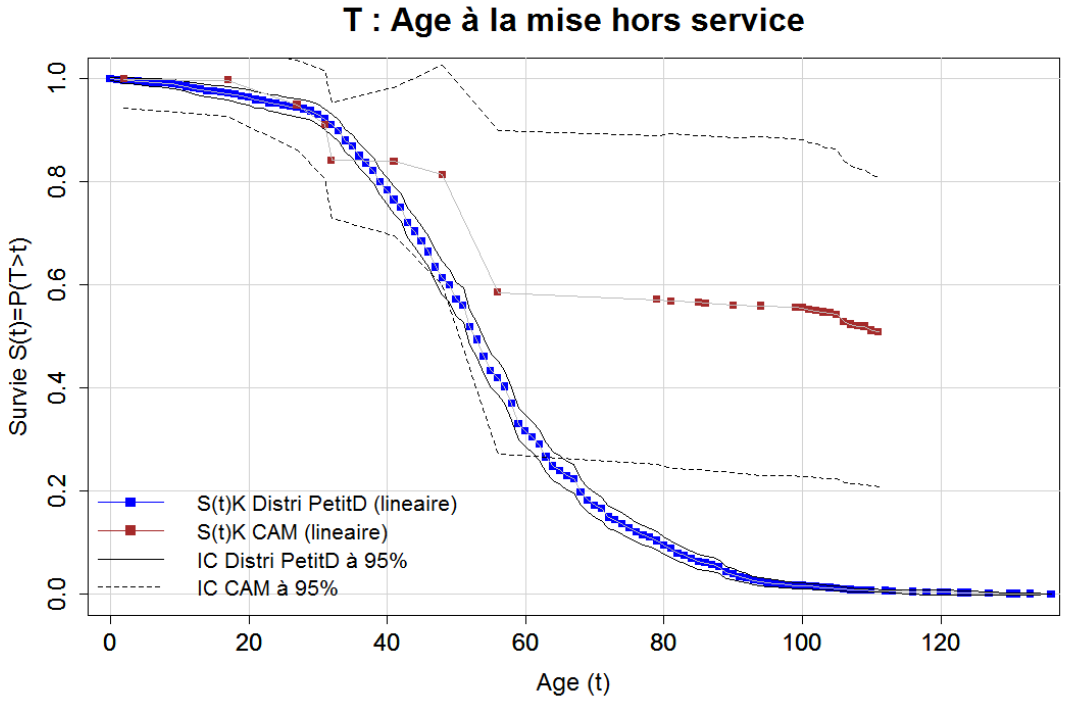


Figure 5 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en linéaire tronçons partitionnés par petit diamètre, et CAM. IC méthode sig (G=NB).

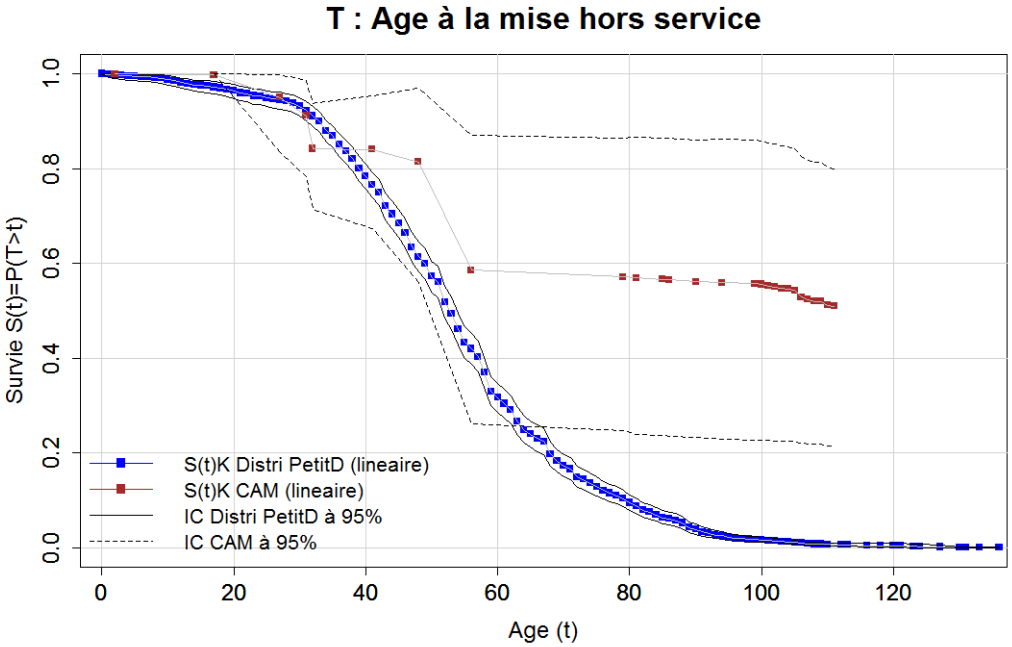


Figure 6 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en linéaire tronçons partitionnés par petit diamètre, et CAM. IC méthode beta (G=NB).

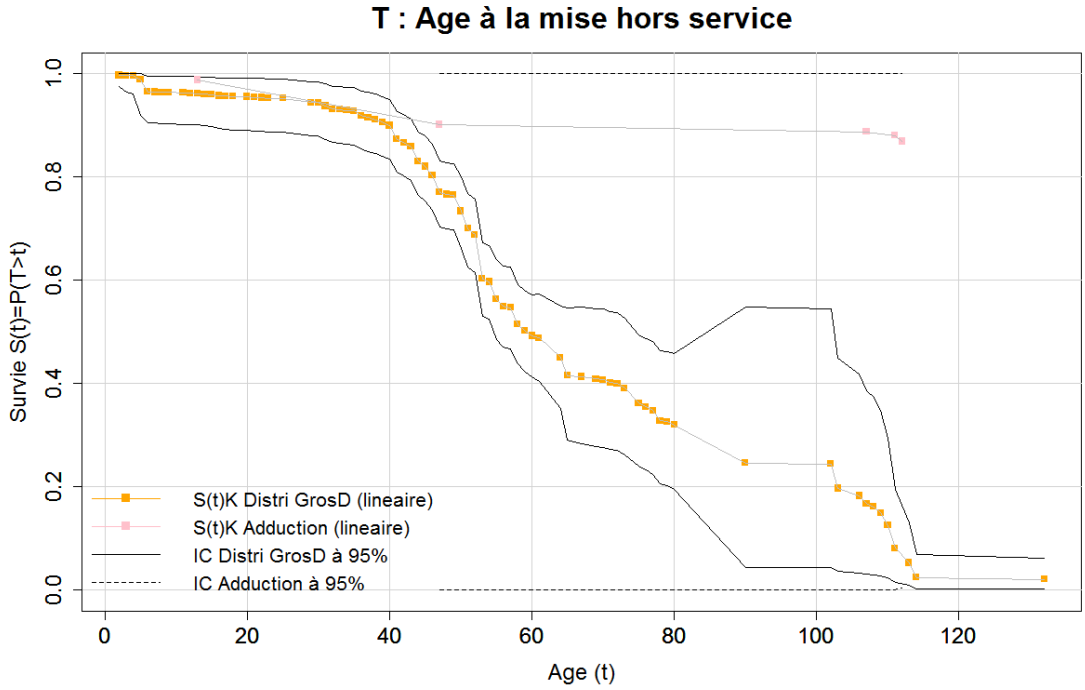


Figure 7 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en linéaire tronçons partitionnés par gros diamètre, et adduction. IC méthode beta (G=NB).

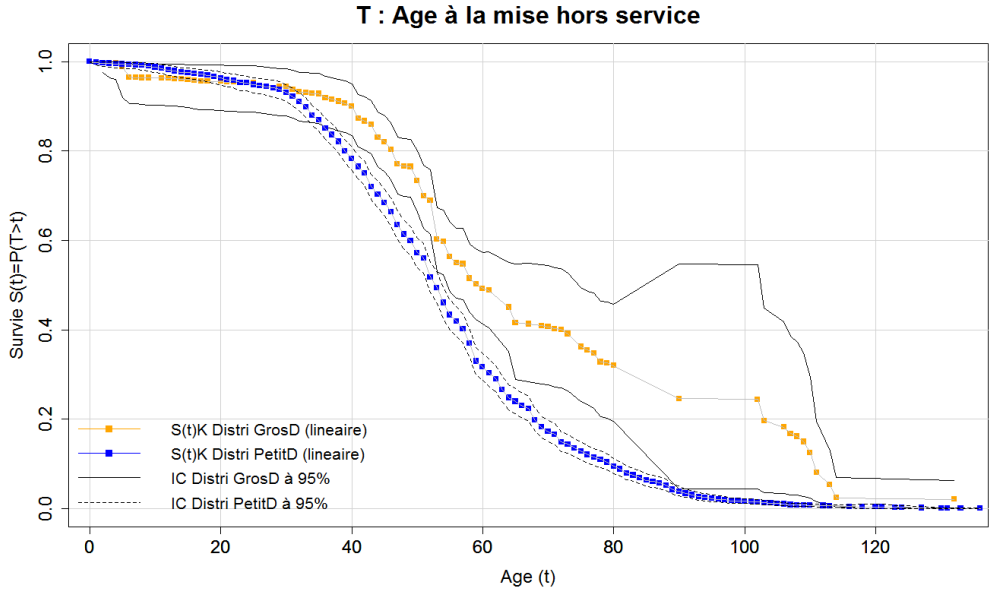


Figure 8 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en linéaire tronçons partitionnés par petit et gros diamètre de distribution. IC méthode beta (G=NB).

I.2.1 Sortie en linéaire avec IC du modèle et des données

I.3 Entrée en effectif

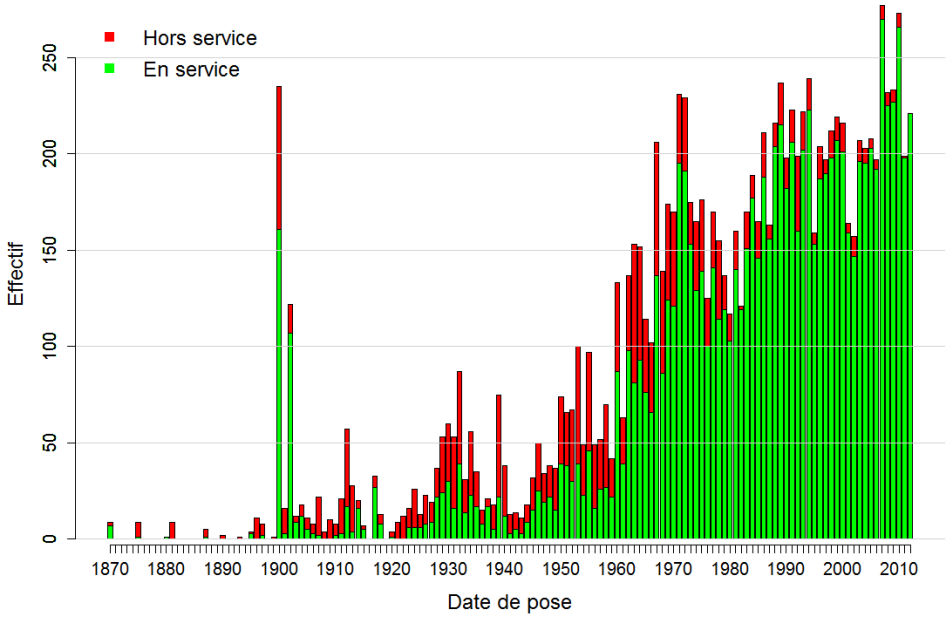


Figure 9 : Histogramme du nombre de tronçons En Service au 31/12/2012 (en vert) et mis Hors Service entre [2001 ; 2012] (en rouge) ayant une date de pose connue

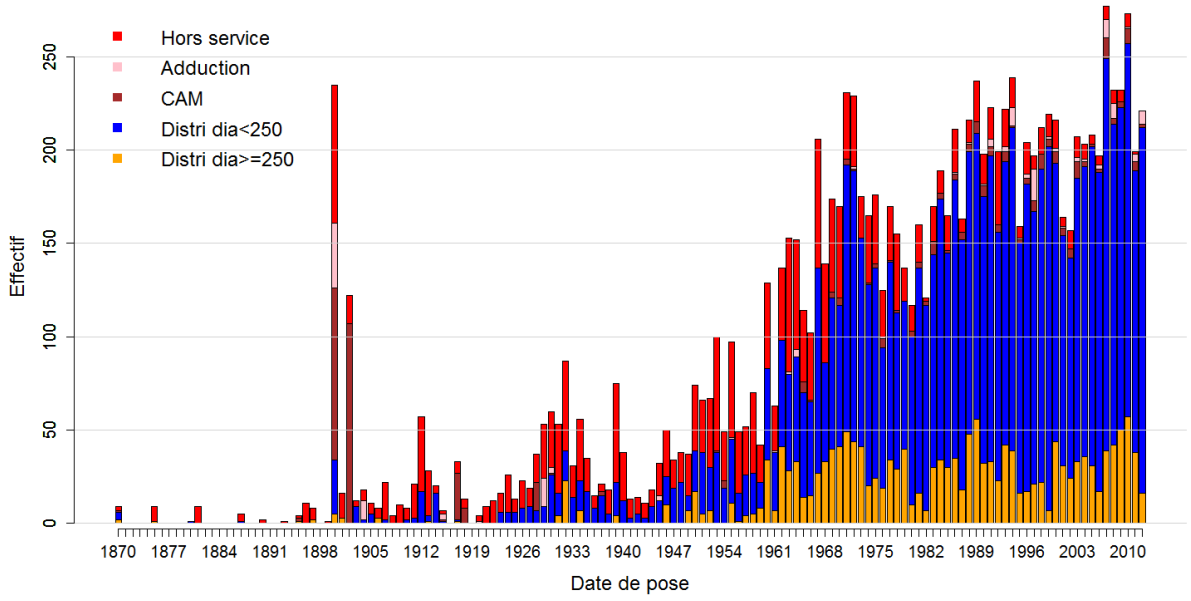


Figure 10 : Nombre de tronçons En Service au 31/12/2012, différencié selon quatre strates, et mis Hors Service entre [2001 ; 2012] (en rouge) à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose

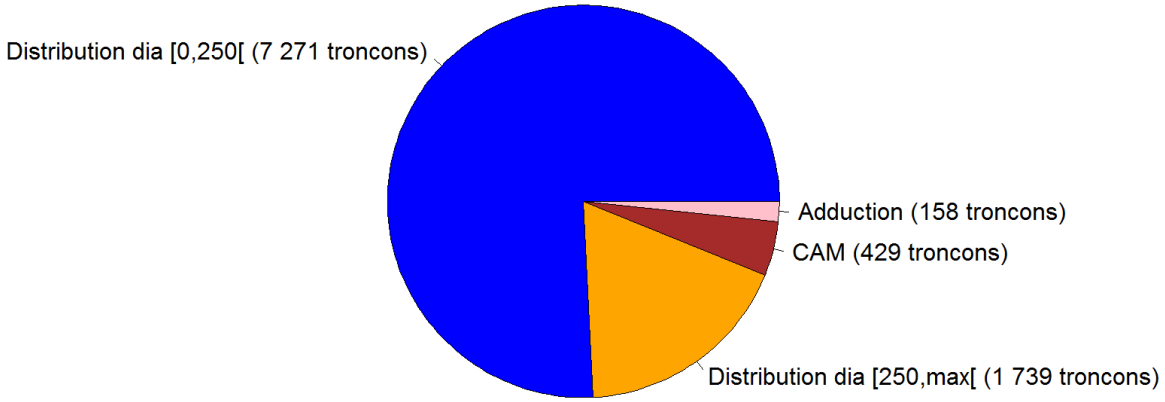


Figure 11 : Proportion du nombre de tronçons ES au 31/12/2012 avec DDP existantes

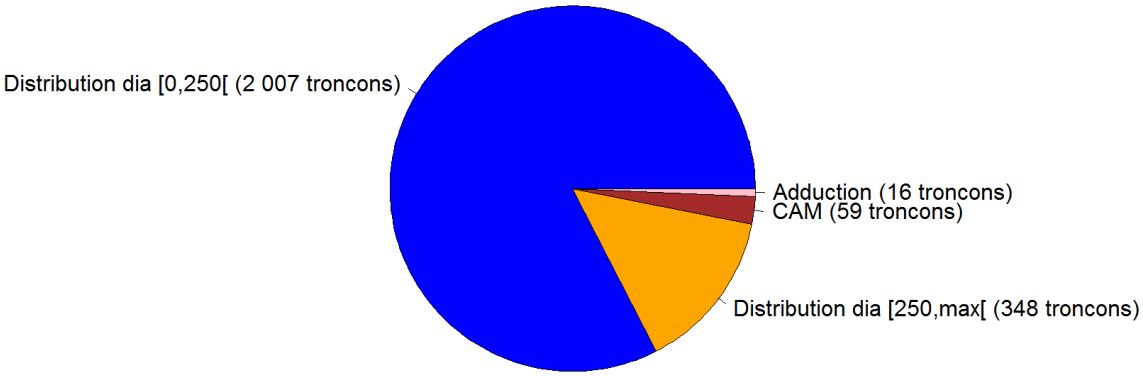


Figure 12 : Proportion du nombre de tronçon mis HS entre [2001,2012] avec DDP existantes

I.4 Sortie en effectif

I.4.1 Sortie en effectif sans IC

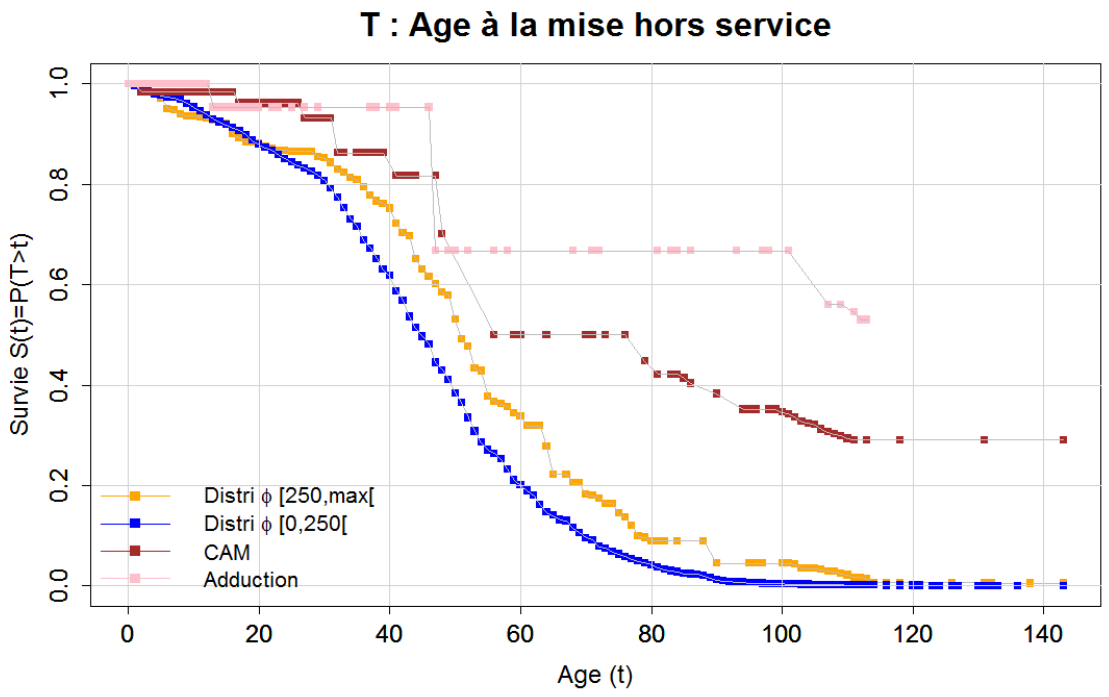


Figure 13 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en nombre de tronçons partitionnés par le diamètre, l'adduction et les conduites d'amenées

I.4.1 Qualité des données d'entrée (en effectif)

I.4.1.1 Qualité des données d'entrée : tronçons en service au 31/12/2012

Strate 1 : DDP inconnues de l'adduction : 45%
Strate 2 : DDP inconnues des CAM : 1.4%
Strate 3 et 4 : (DDP + diamètre) inconnues : 0.05%

I.4.1.2 Qualité des données d'entrée : tronçons mis hors service entre [2001, 2012]

Strate 1 : DDP inconnues de l'adduction : 2.7%
Strate 2 : DDP inconnues des CAM : 1.5%
Strate 3 et 4 : (DDP + diamètre) inconnues : 0.04%

I.4.2 Sortie en effectif avec IC du modèle

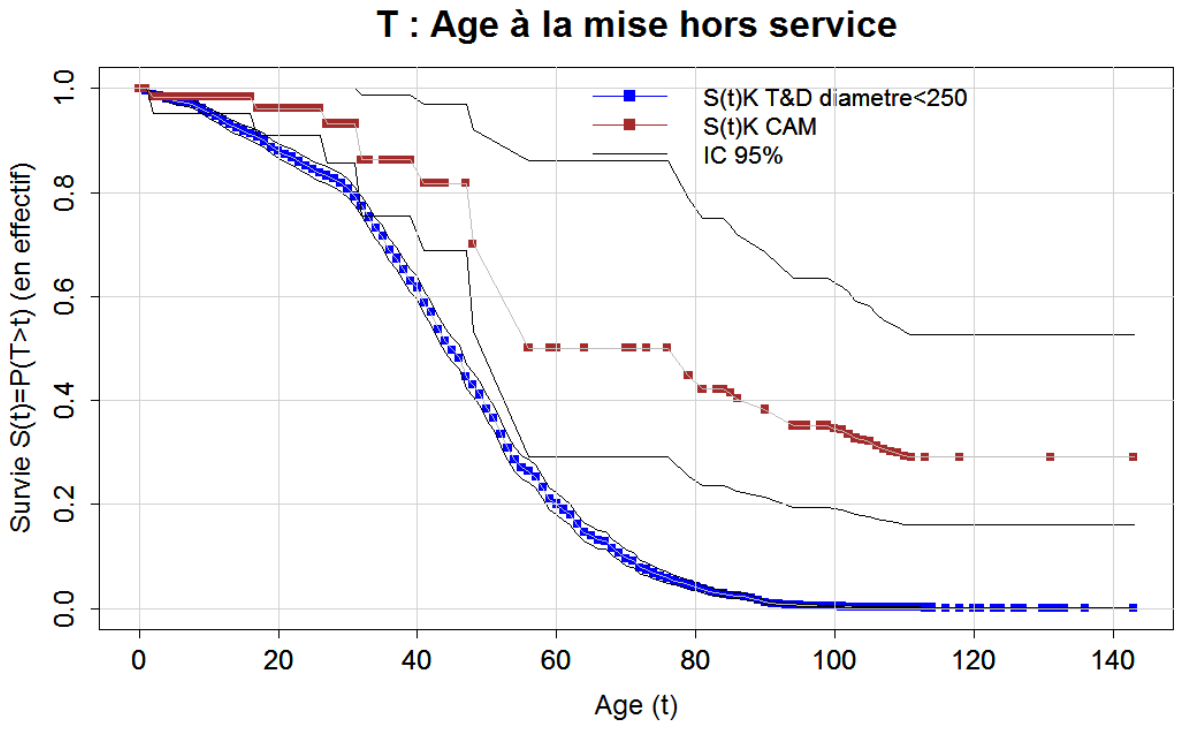


Figure 14 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en nombre de tronçons partitionnés par le diamètre <250, et les conduites d'amenées (avec leurs intervalles de confiance)

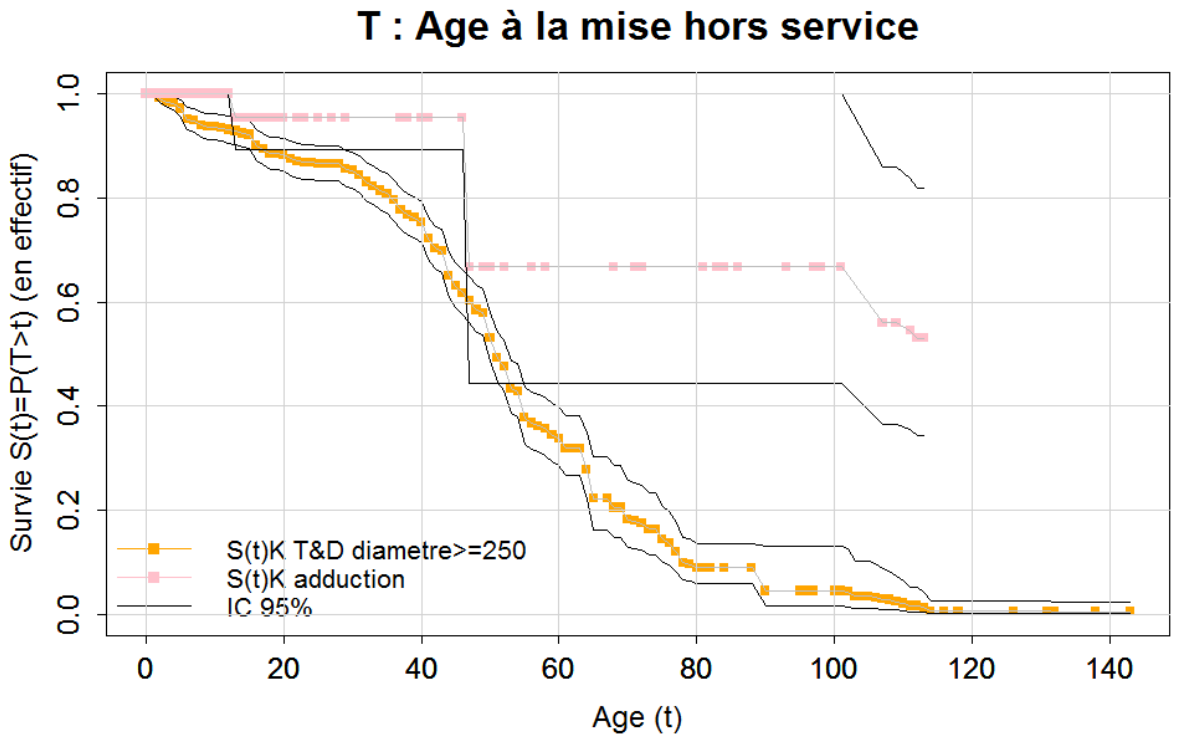


Figure 15 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en nombre de tronçons partitionnés par le diamètre >=250, et les conduites d'adduction (avec leurs intervalles de confiance)

I.4.1 Sortie en effectif avec IC du modèle et des données

II Scénario D

- scénario prospectif « Statu quo » : « A l' avenir la distribution des âges à la mise hors service des canalisations sera strictement identique à celle de Lausanne par le passé ».
- 4 strates de tronçons :
    1. **Adduction :** conduites d'adduction (du captage à la station de traitement)
    2. **CAM :** conduite d'amenés (CAM), ce sont des conduites de transport (de la station de traitement jusqu'au réservoir ou entre les réservoirs) situés en altitude, en forêt en général. Elles sont souvent gravitaires.
    3. **Distri dia<250 :** conduites de distribution (conduites d'alimentation des quartiers sur lesquelles les prises sont effectuées pour le raccordement des immeubles) et de transport sans les CAM de diamètre inférieur strict à 250 mm.
    4. **Distri dia>=250** : conduites de distribution (conduites d'alimentation des quartiers sur lesquelles les prises sont effectuées pour le raccordement des immeubles) et de transport sans les CAM de diamètre supérieur ou égal à 250 mm.
- Date export donné : 2012 par Linda
- Photographie des données au 31/12/2012
- Courbes de survie prospectives les même pour tous les matériaux que par le passé
- Date fin simulation : 2050
- Taux de travaux coordonnés : 80%. Taux des travaux non coordonnées : 20%. Les travaux coordonnés coûtent 25% moins cher que les travaux non coordonné.
- Pour continuer les courbes de survies qu'on n'a pas, les hypothèses sont les suivantes :
    - ✓ Pour les conduites d'amenés (CAM) on nous a indiqué :

Date HS	Nom Bloc ds les fichiers	Renouvellement/abandon	Linéaire ES+HS (km)
2018-2028	Pays d'Enhaut et	Renouvellement	33.8
2018-2028	Pont de Pierre	Renouvellement	32.3
2025	Prevondavaux	Abandon	14.5
Max survie 150 ans	Thierrens	Renouvellement	19.2

    - ✓ Pour les conduites d'adduction on nous a indiqué :

Adduction	Q m3/an (moyenne 2009-2013)	Longueur de conduite	Date Mise hors service
Pays d'Enhaut Jor - Sonzier		4109	2020
Pays d'Enhaut - Chambre des Bornels - Jor (galerie)		14952	2040
Pays d'Enhaut - Vallée Torneresse - Carrefour Etivaz		5596	2025
Pays d'Enhaut - Vallée Eau Froide - Chambre des Bornels		4720	2030
Pont de Pierre	1 800 000	1286	2025
Thierrens	600 000	333	2045
Prévondavaux	560 000	817	Abandon en 2025
St-Hippolyte	255 000	3771	2045
Les Cases	230 000	702	2045
Montaubion	210 000	2918	2045
Bressonne	195 000	5671	2045
Montagne du Château	190 000	6751	2050
Pierre-Ozaire	190 000	7982	2050
Froideville	120 000	2920	2055
Jorattez	110 000	2857	2055
Mont Supérieur	85 000	2452	2055
Cheseaux	70 000	1167	2055
Mauvernay	60 000	4892	2060
Mont Inférieur	60 000	4664	2060
Losiardes	40 000	18	2060
Montenailles	15 000	1817	2060

III Modèle de Cox

Variable	exp(coef)	IC max	IC min	P-value
Gros diamètre	0.87	0.98	0.78	< 0.05
Petit diamètre	Référence	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Longueur	0.99	0.99	0.99	< 0.05
FG	Référence	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Autre	0.79	0.88	0.71	< 0.05
CAM+Adduc	Référence	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Distribution	2.94	3.86	2.24	< 0.05
REHA non	Référence	Sans objet	Sans objet	Sans objet
REHA oui	0.17	0.31	0.10	< 0.05
NbrDefAn	15.76	21.41	11.60	< 0.05

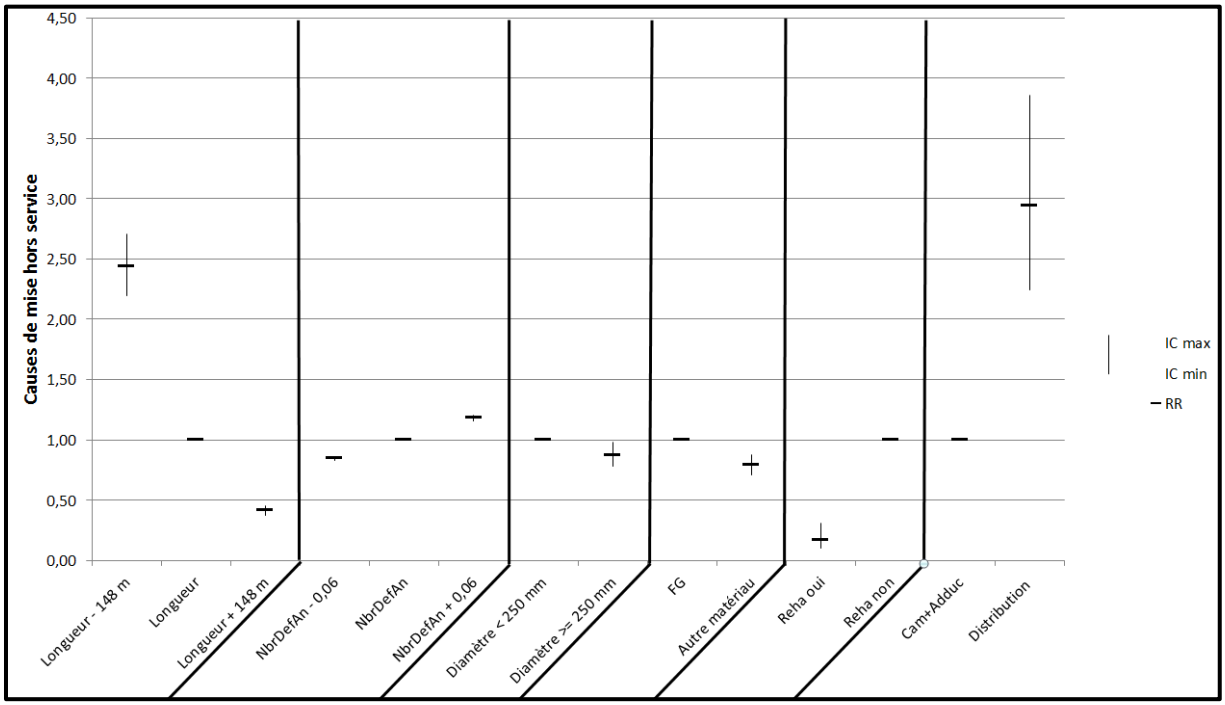


Figure 16 : Causes de mise HS en fonction des covariables

IV Weibull Covariable

Variable	Coefficient	Estimation	$\exp(\hat{\beta})$	Initialisation de Nelder & Mead	P-value
Age	$\widehat{\delta_1}$	2.03	Sans objet	1	< 0.05
Sans objet	$\widehat{\beta_0}$	-8.59	Sans objet	-4	< 0.05
Petit diamètre	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet
Gros diamètre	$\widehat{\beta_2}$	-0.001	0.99	0	< 0.05
Longueur	$\widehat{\beta_3}$	-0.0061	0.99	0	< 0.05
FG	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet
Autre	$\widehat{\beta_4}$	0.47	1.63	0	< 0.05
CAM+Adduc	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet
Distribution	$\widehat{\beta_5}$	1.24	2.36	1	< 0.05
REHA non	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet
REHA oui	$\widehat{\beta_6}$	-1.52	0.60	0	< 0.05
NbrDefAn	$\widehat{\beta_7}$	2.21	14.6	4	< 0.05

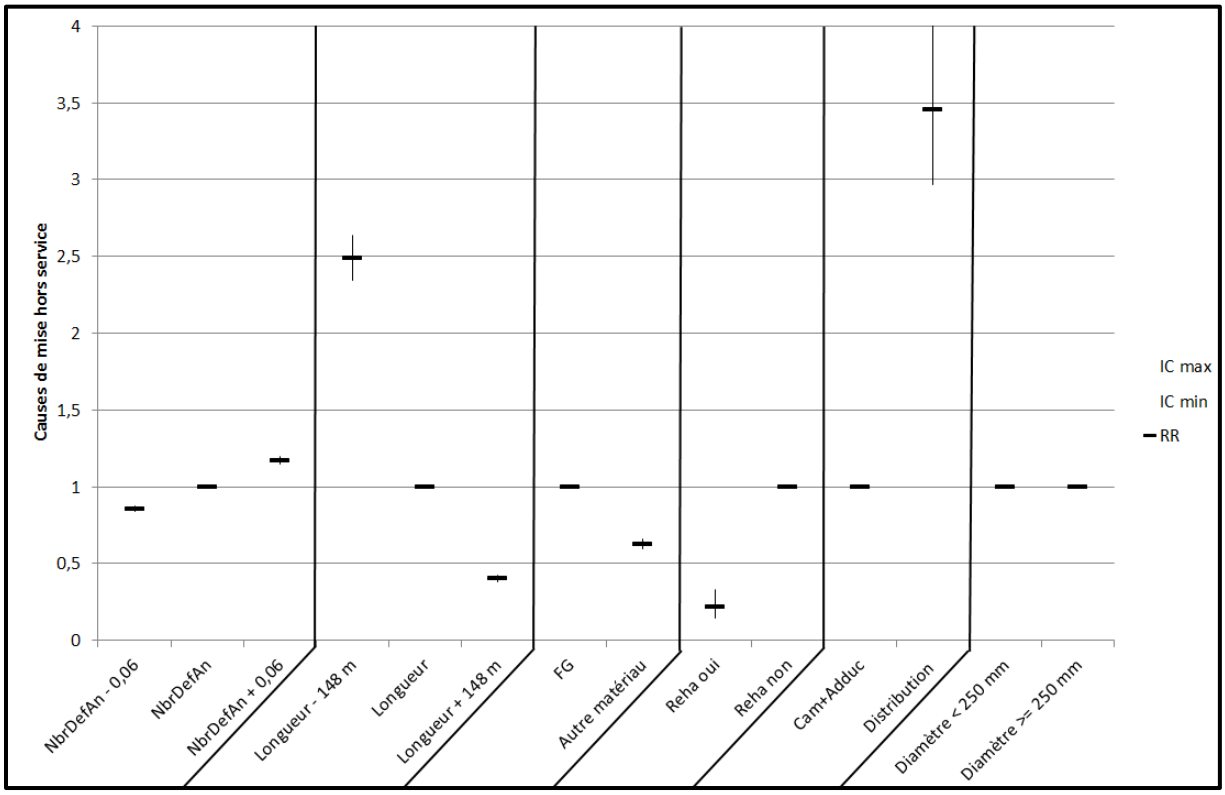


Figure 17 : Causes de mise HS en fonction des covariables

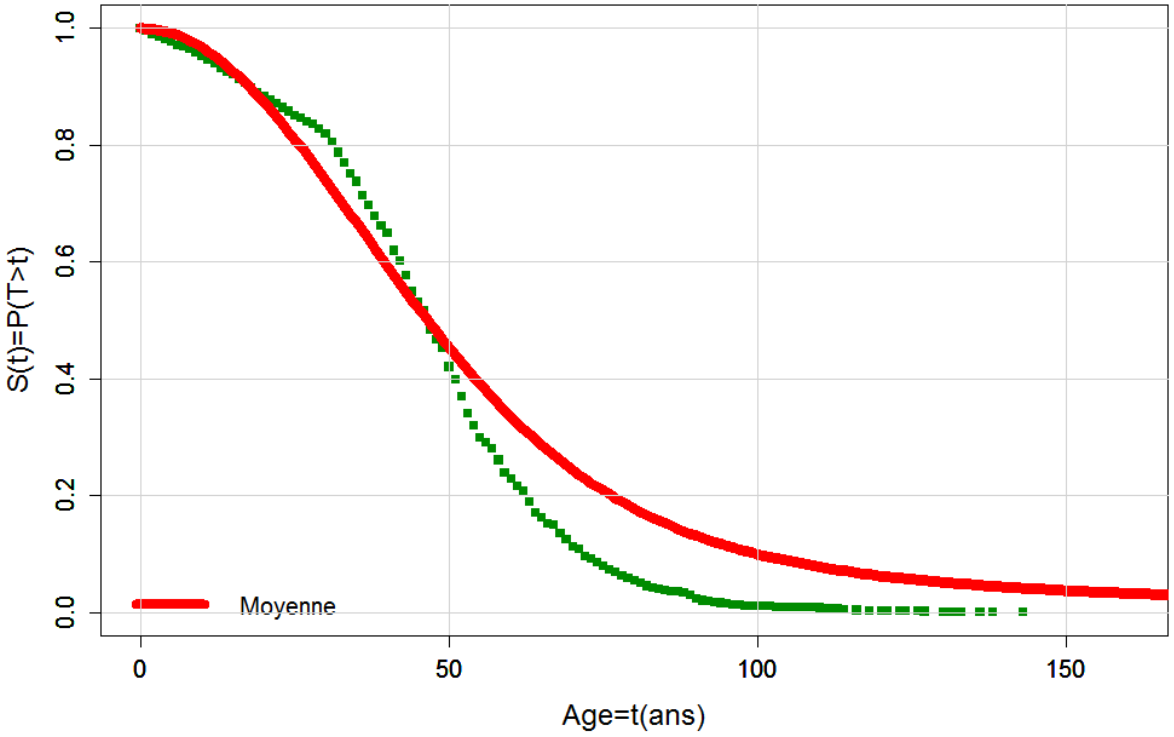


Figure 18 : Courbes de survie de Kaplan-Meier en linéaire tous tronçons et moyenne équation de Weibull covariable en linéaire

Scénario 3 (code Cbis)

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Périmètre	Tout le réseau		Réseau en ville									
Stratifié ?	Non	Ville/ Montagne	Non				Diamètre	NDOA	Matériaux		Vulnérabilité	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2001; 2012]		[2001; 2007]	[2001; 2013]								
Statu quo ?	Oui		Oui	On arrête de renouveler		On vise un TR de 1%	Oui			Plus drastique avec les fontes grises	Oui	> autour des éléments vulnérables

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

⇨ Donnée Christelle 2014

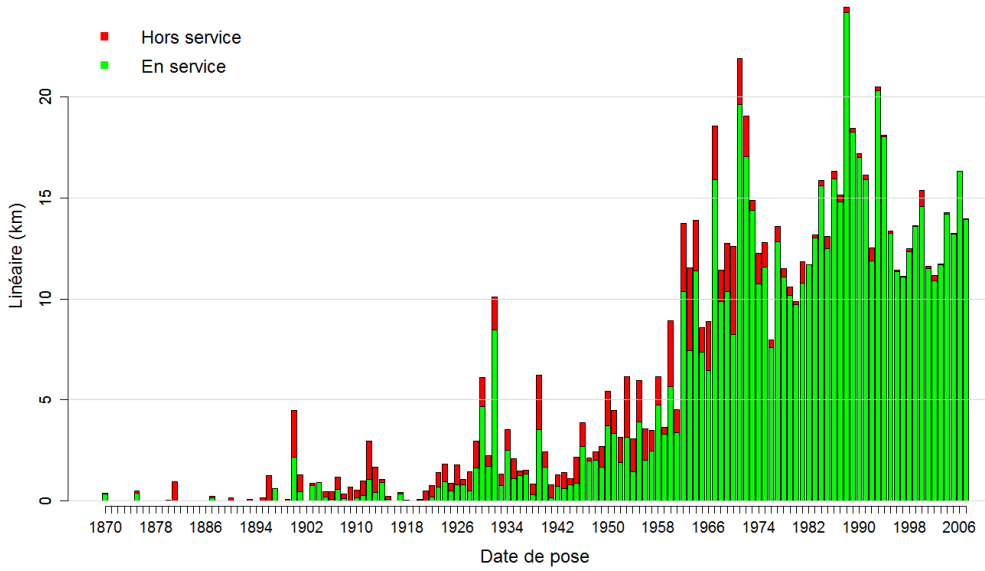


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service au 31/12/2006 (en vert) et mis Hors Service entre [2001,2007] (en rouge)

I.2 Sortie en linéaire

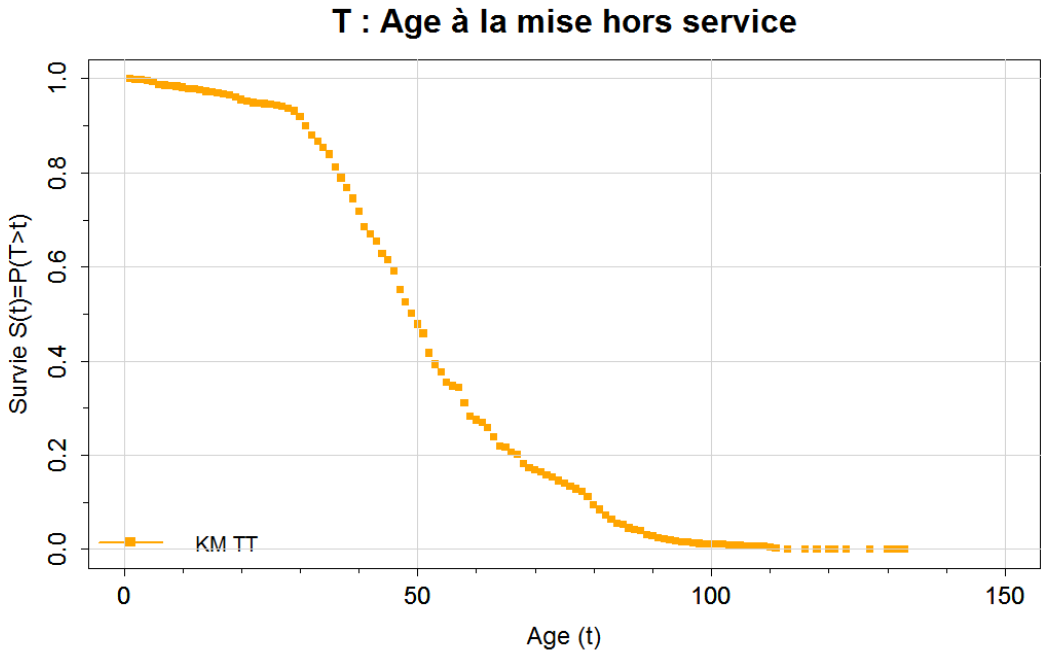


Figure 2 : Courbes de survie passée, sur la fenêtre [2001, 2007] (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons

II Scénario Cbis

- Groupe de tronçons : transport normal + distribution (moins Brêt et moins les moins de 6m)
- Date export données : 2014 par Christelle
- Photographie au 31 /12 /2007
- Pas de stratification
- Courbes de survie prospectives les mêmes que par le passé
- Taux de travaux coordonnés en général : 80%. Taux des travaux non coordonnées : 20%.
- Validation I1

III Construction scénario prospectif Cbis

III.1 Entrée en linéaire

Cf. : Figure 2

III.2 Sortie en linéaire

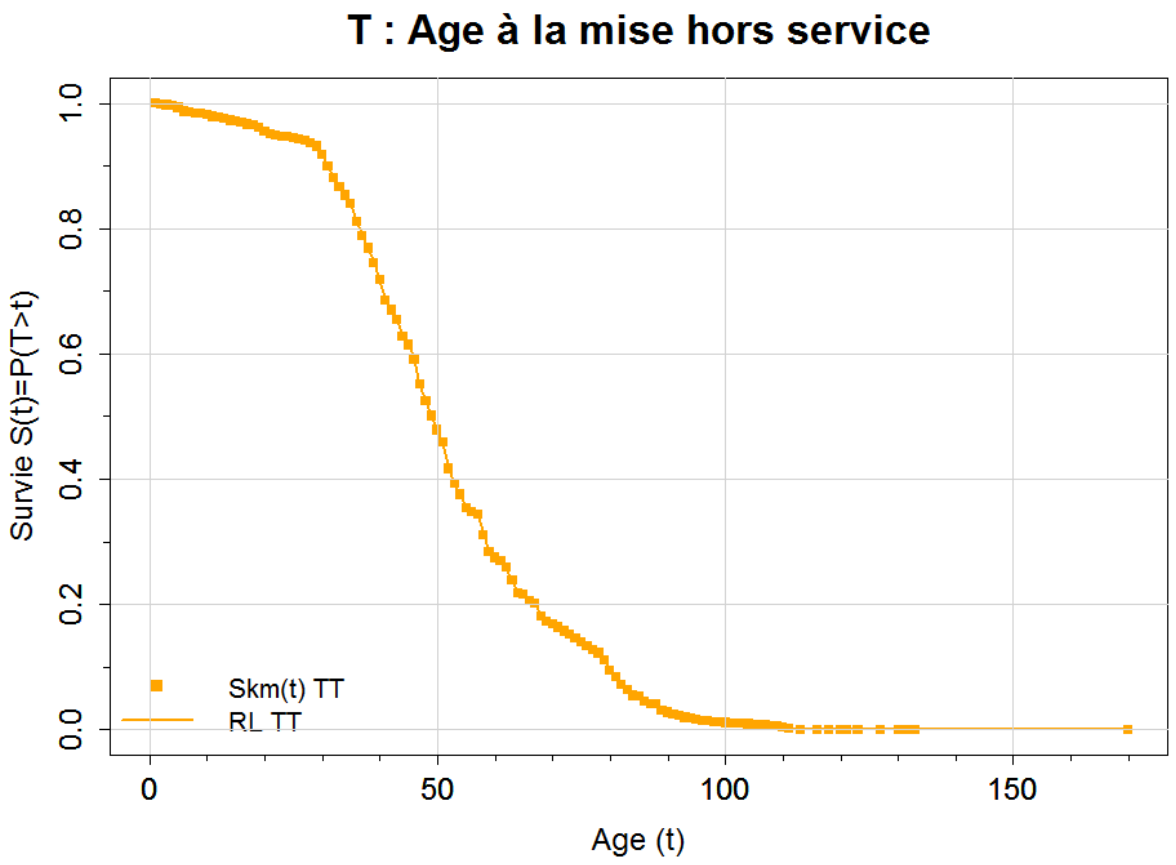


Figure 3 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait)

IV Calcul de l'indicateurs I1R

IV.1 Entrée

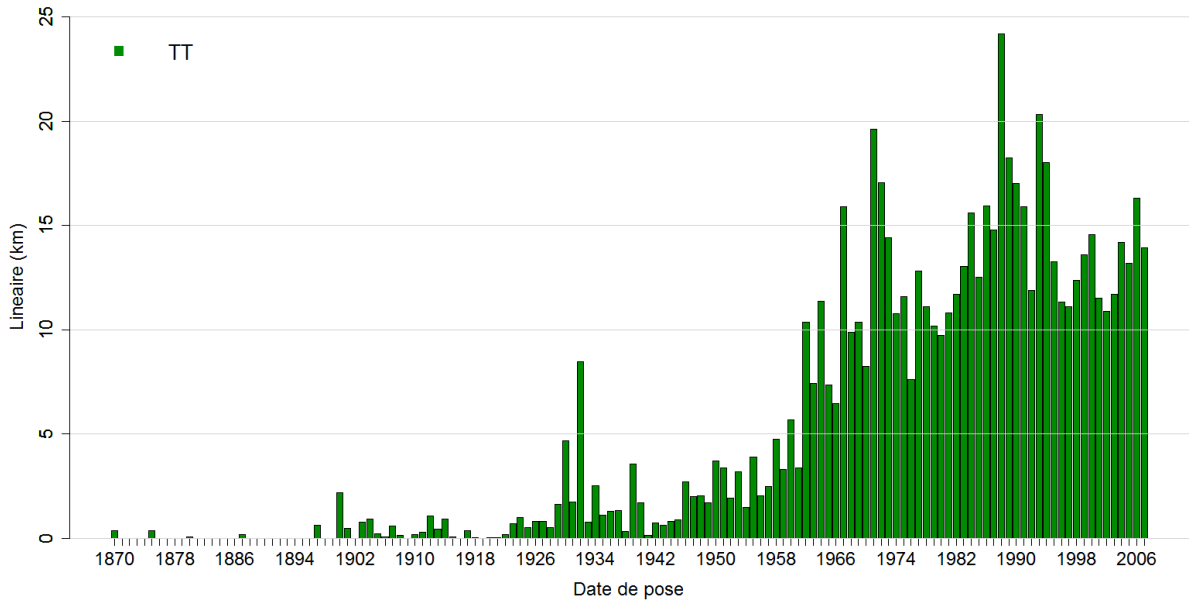


Figure 4 : Linéaire en service (ES) au 31/12/2007

IV.2 Sortie

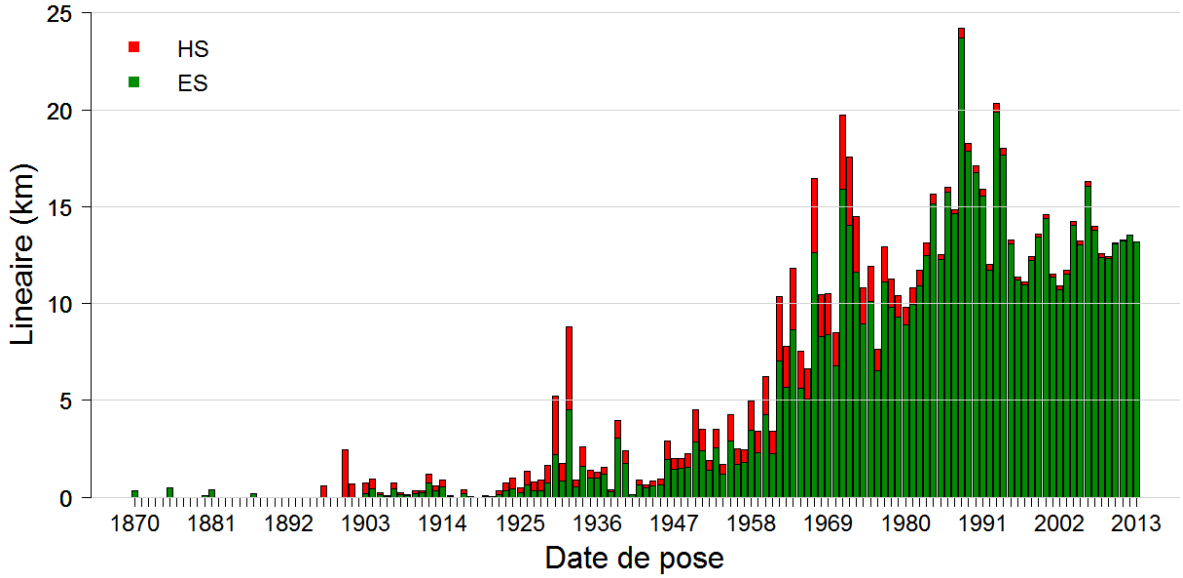


Figure 5 : Linéaire en service (ES) fin 2007 et mis hors service (HS) en 2007 prévision du futur, photographie de la situation fin 2013.

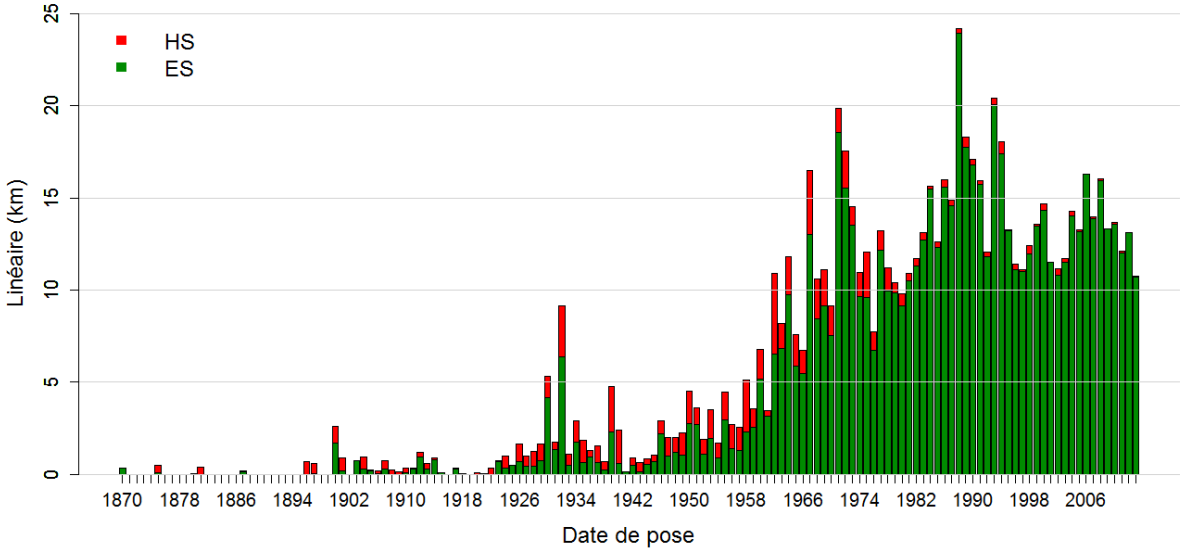


Figure 6 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2013 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2007 ; 2013])

Scénario 4 (code C)

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Périmètre	Tout le réseau		Réseau en ville									
Stratifié ?	Non	Ville/ Montagne			Non		Diamètre	NDOA	Matériaux		Vulnérabilité	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2001; 2012]		[2001; 2007]	[2001; 2013]								
Statu quo ?	Oui		Oui		On arrête de renouveler	On vise un TR de 1%	Oui			Plus drastique avec les fontes grises	Oui	> autour des éléments vulnérables

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

⇨ Donnée Christelle 2014

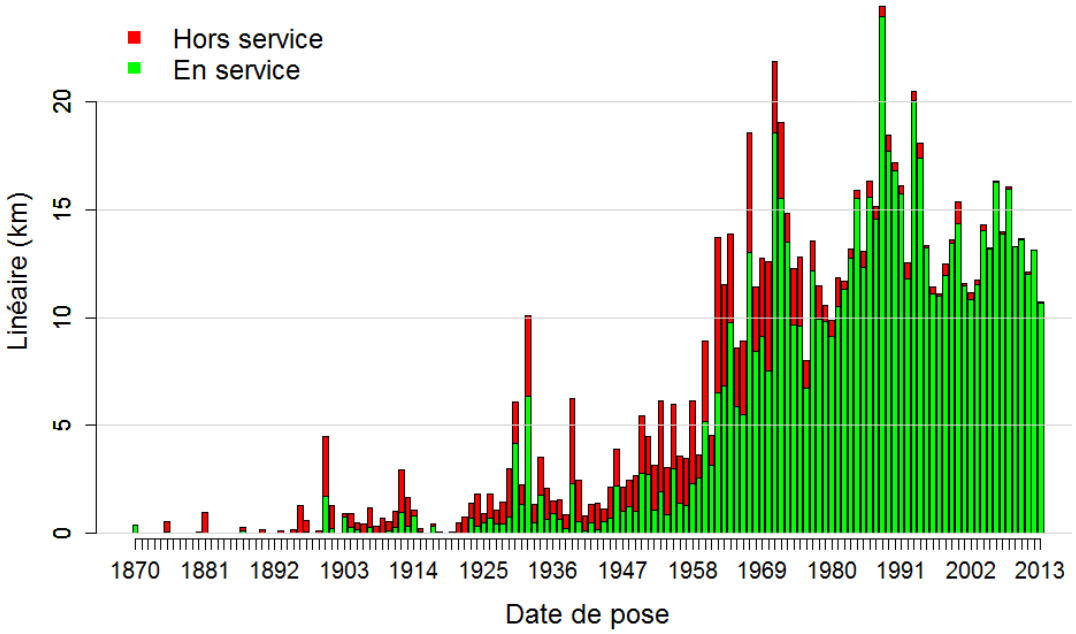


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service au 31/12/2013 (715 km) (en vert) et mis Hors Service entre [2001,2013] (156 km) (en rouge), ayant une date de pose connue

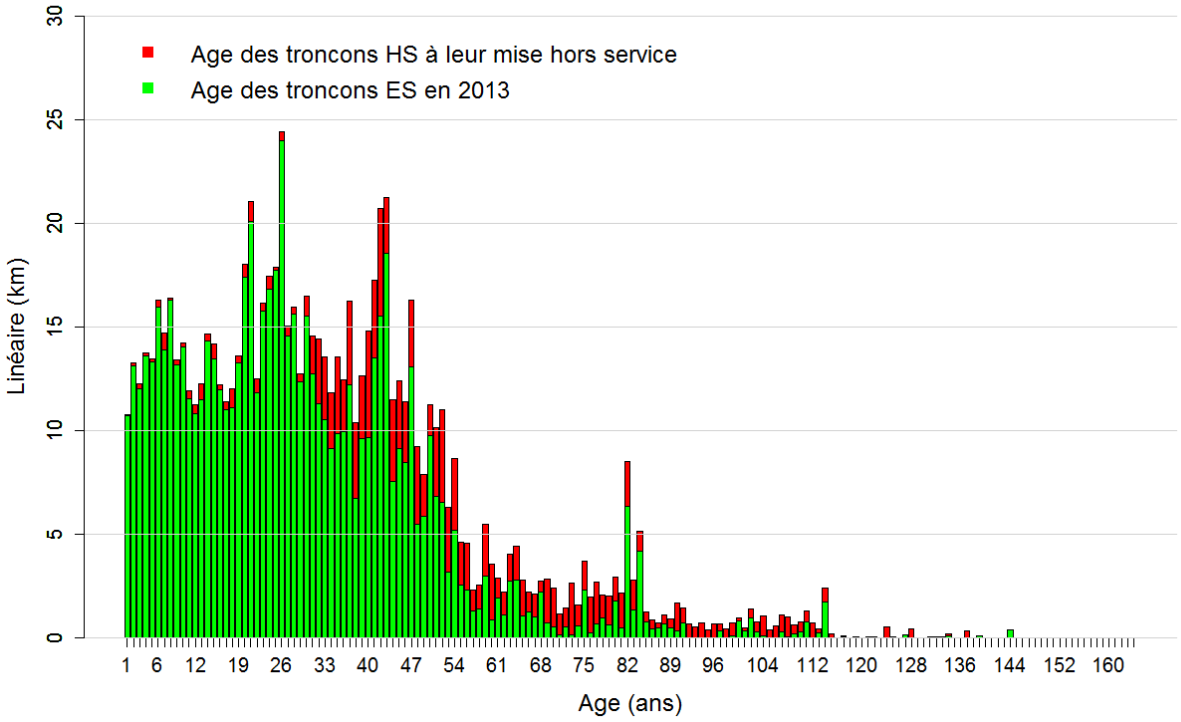


Figure 2 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2013 en fonction de leur âges (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2001 ; 2013])

I.2 Sortie en linéaire

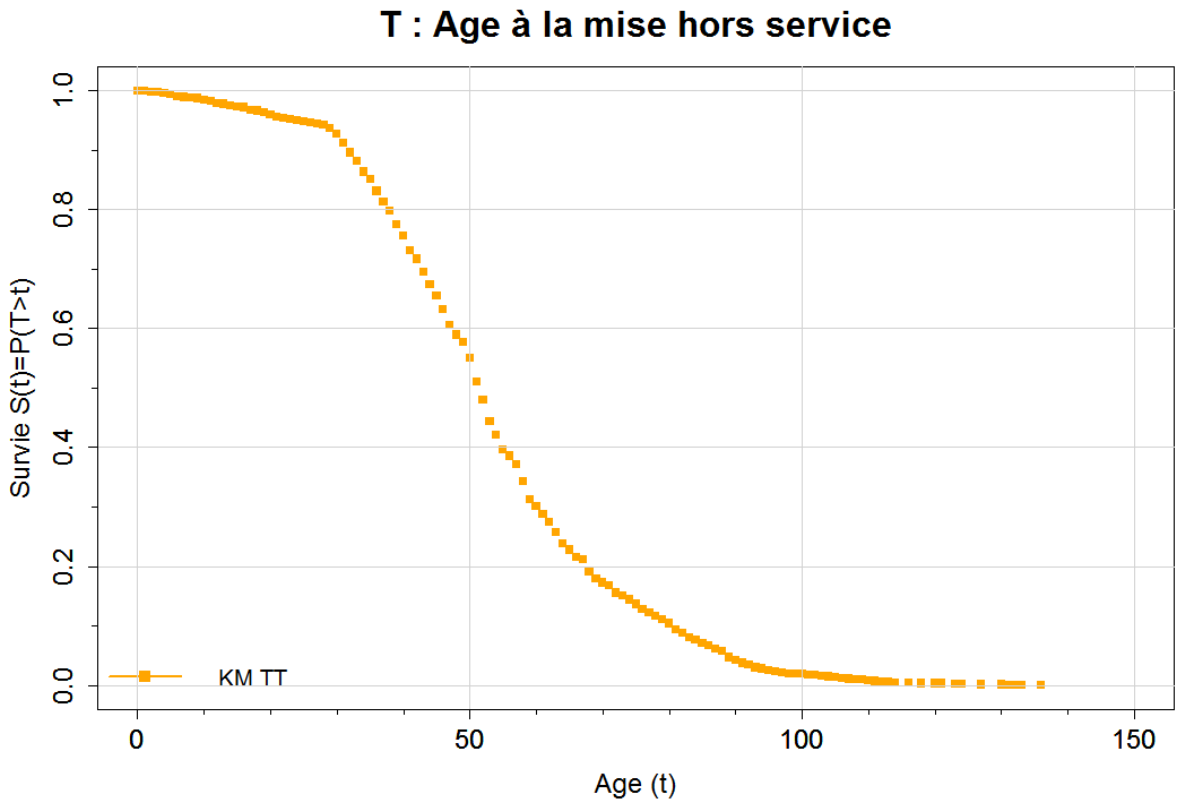


Figure 3 : Courbes de survie passée, sur la fenêtre [2001, 2013] (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons

I.1 Entrée en effectif

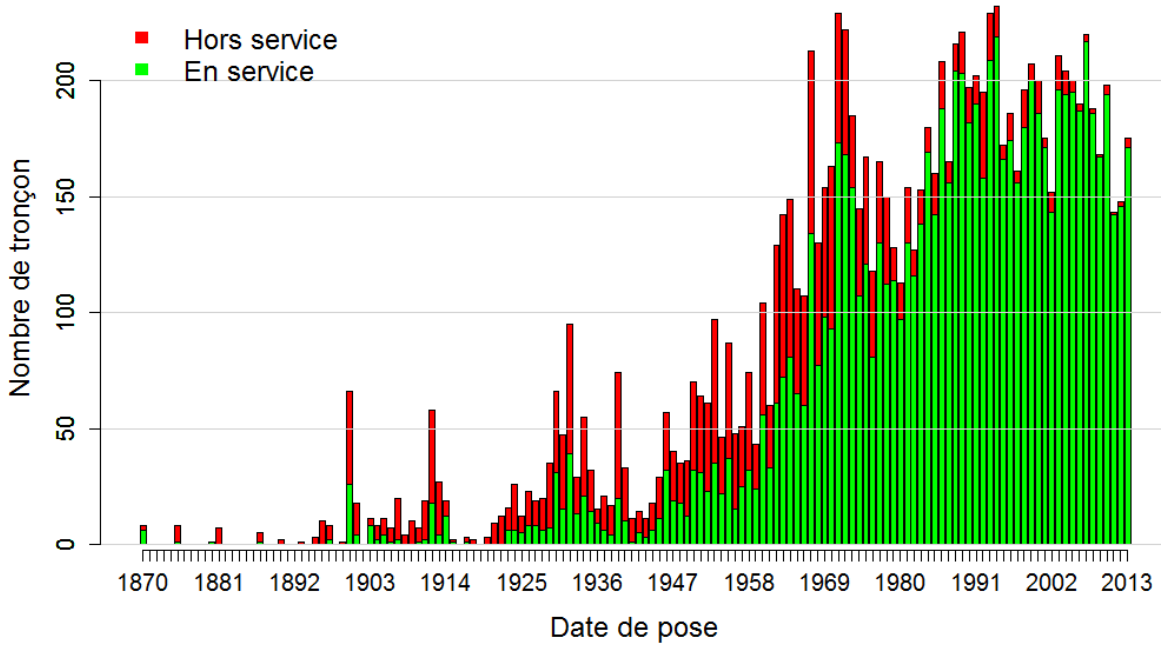


Figure 4 : Histogramme du nombre de tronçons En Service au 31/12/2013 (en vert) et mis Hors Service entre [2001, 2013] (en rouge), ayant une date de pose connue

I.2 Sortie en effectif

Figure 5 : Courbes de survie passée, sur la fenêtre [2001, 2013], (Kaplan Meier) en nombre de tronçons

II Scénario C

- Groupe de tronçons : transport normal + distribution (moins Brêt et moins les moins de 6m)
- Date export donné : 2014 par Christelle
- Photographie au 31 /12 /2013
- Pas de stratification
- Courbes de survie prospectives les même que par le passé
- Taux de travaux coordonnés en général : 80%. Taux des travaux non coordonnées : 20%.

III Construction scénario prospectif C

III.1 Entrée en linéaire

Cf. : Figure 3

III.2 Sortie en linéaire

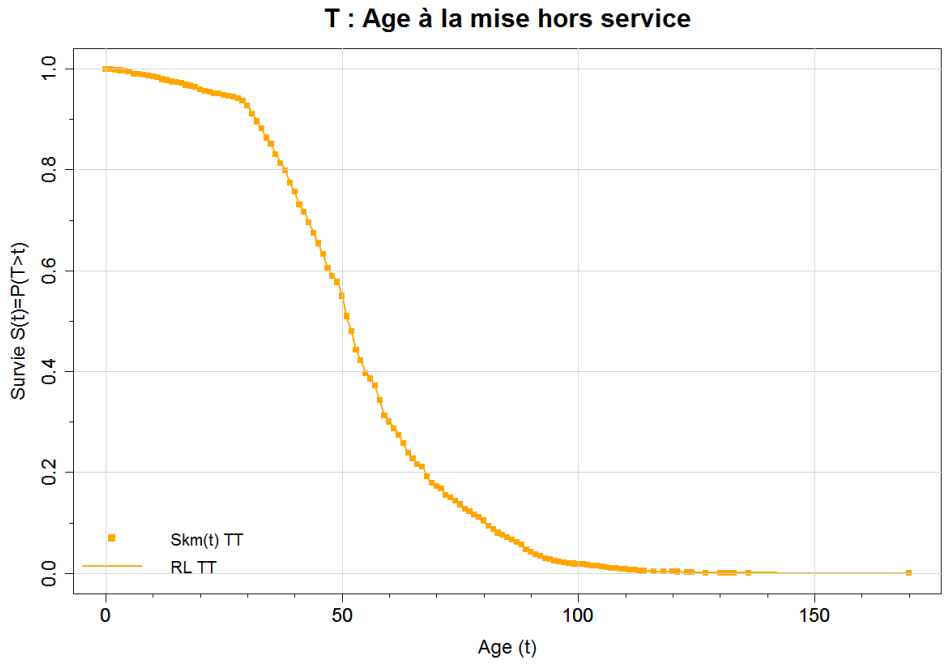


Figure 6 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait)

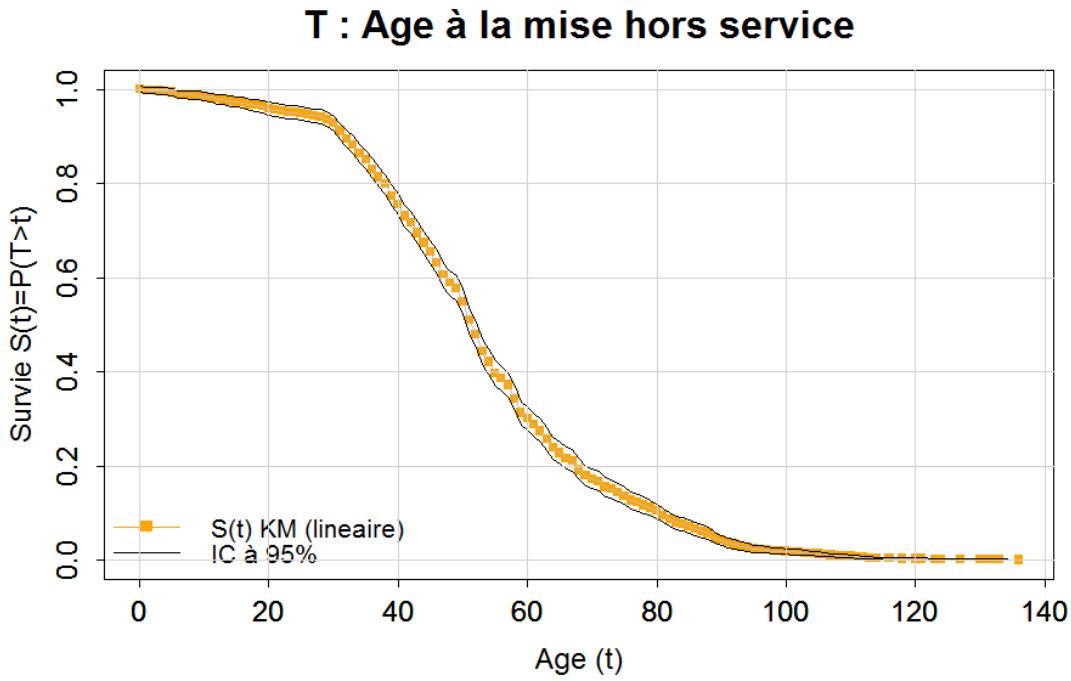


*Figure 7 : Courbes de survie prospective en linéaire avec intervalle de confiance à 95% (méthode S(t)+-1.96*sig)*

III.1 Entrée en effectif

Cf. : Figure 5

III.2 Sortie en effectif

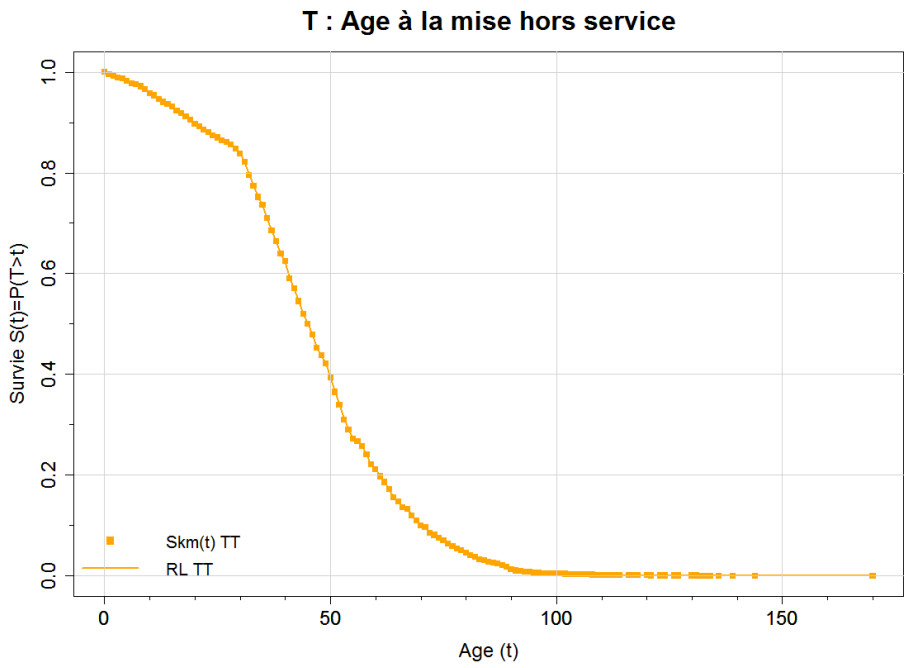


Figure 8 : Courbes de survie prospective en effectif (trait)

III.3 Comparaison des sorties en linéaire et en effectif

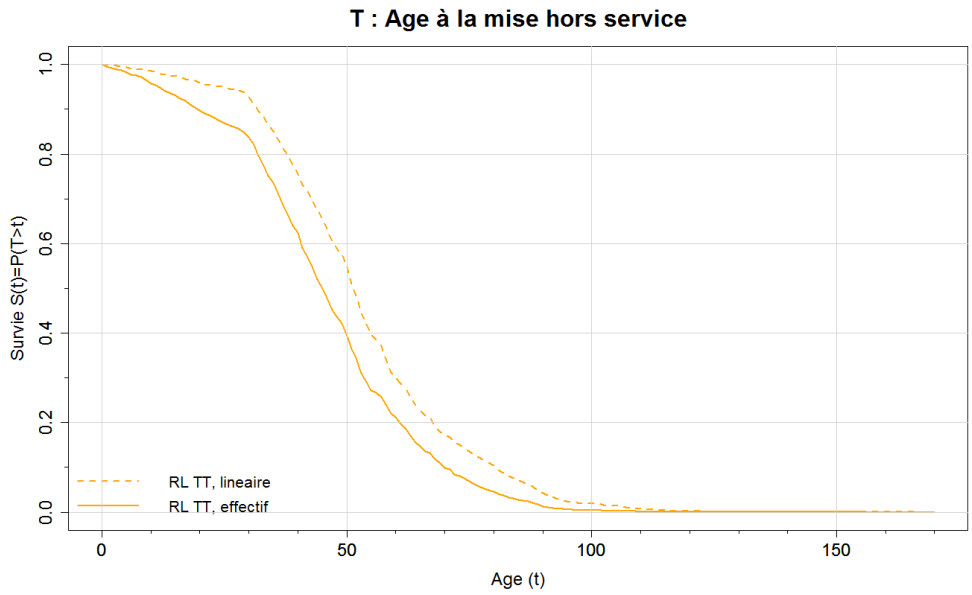


Figure 9 : Comparaison des courbes de survie prospectives en effectif et en linéaire

IV Calcul des indicateurs I1R, I2R et I3R

IV.1 Entrée

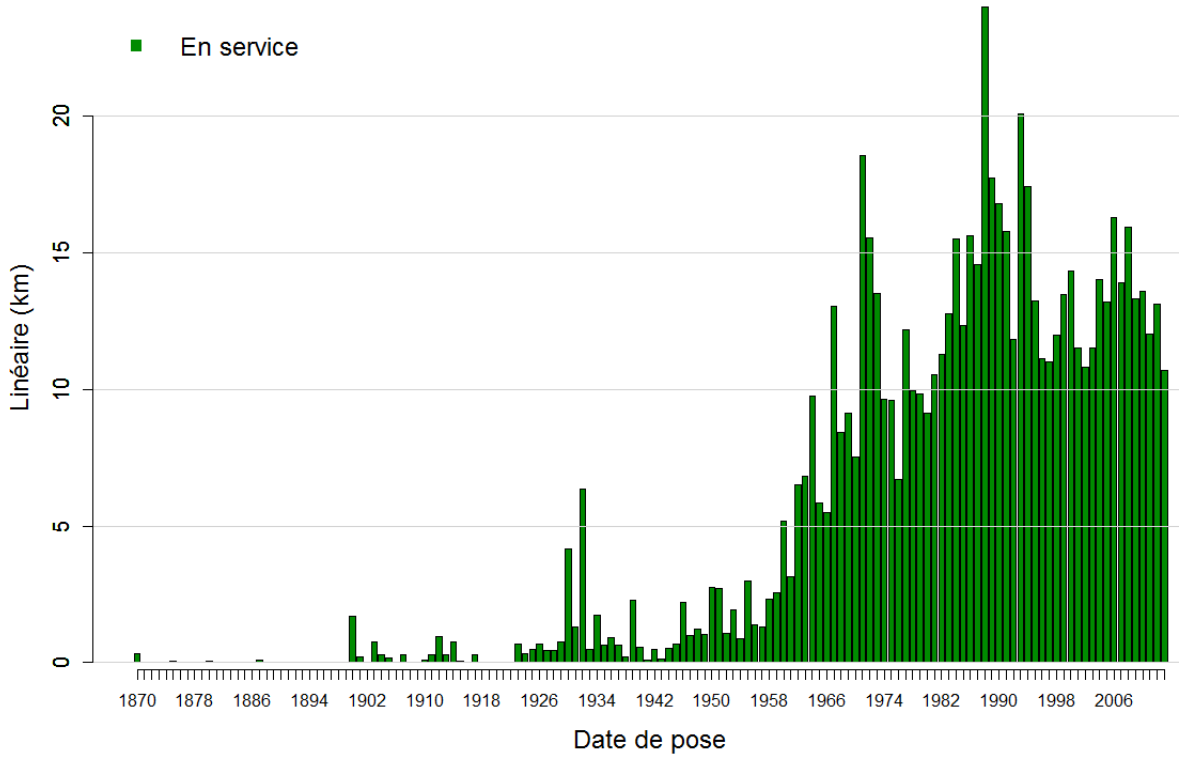


Figure 10 : Linéaire en service (ES) au 31/12/2013

IV.2 Sortie I1R

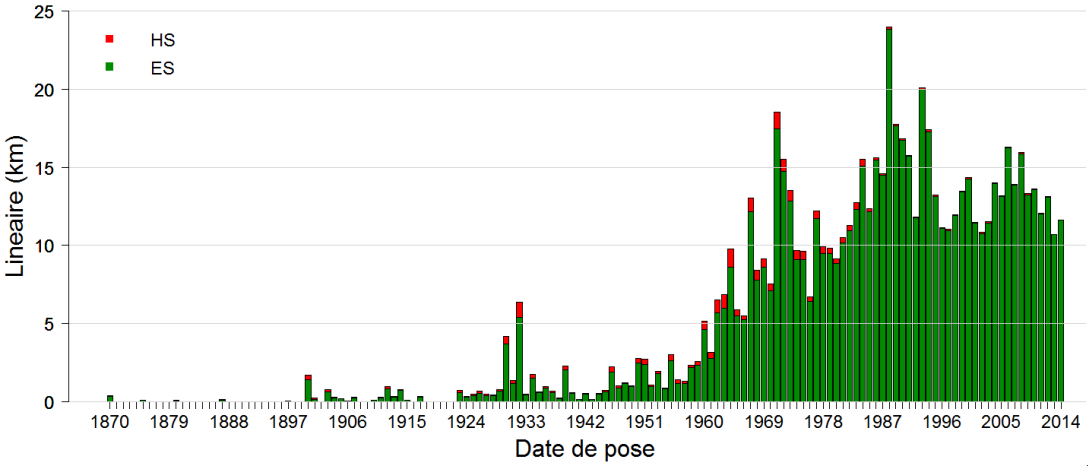


Figure 11 : Linéaire en service (ES) fin 2014 et mis hors service (HS) en 2014 prévision du futur, photographie de la situation fin 2014.

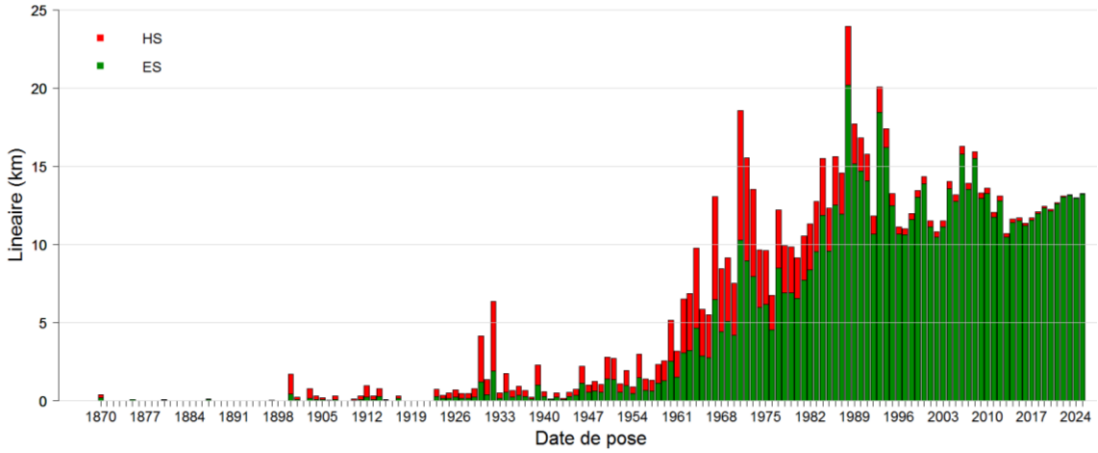


Figure 12 : Linéaire en service (ES) fin 2025 et mis hors service (HS) entre [2014,2025] , prévision du futur, photographie de la situation en 2025

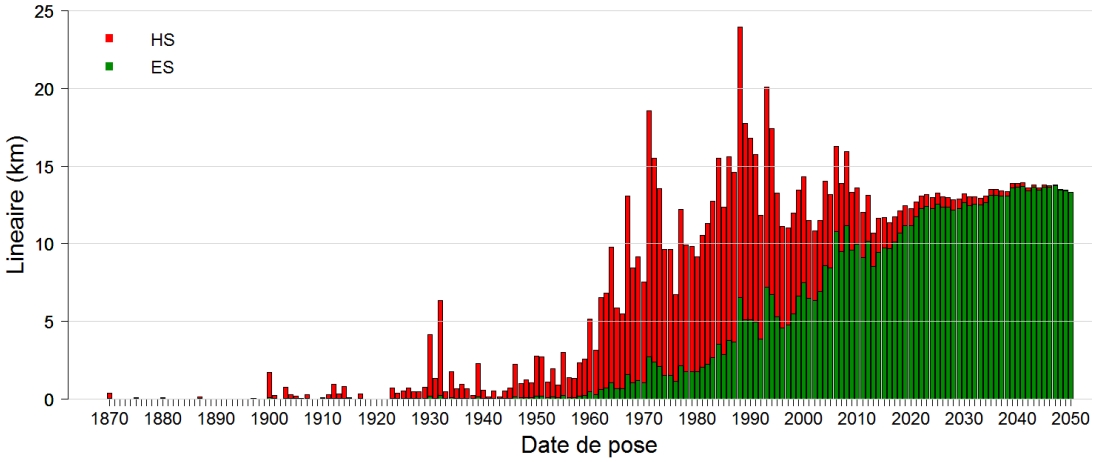


Figure 13 : Linéaire en service (ES) fin 2050 et mis hors service (HS) entre [2014,2050] , prévision du futur, photographie de la situation en 2050.

IV.1 Sortie I2R

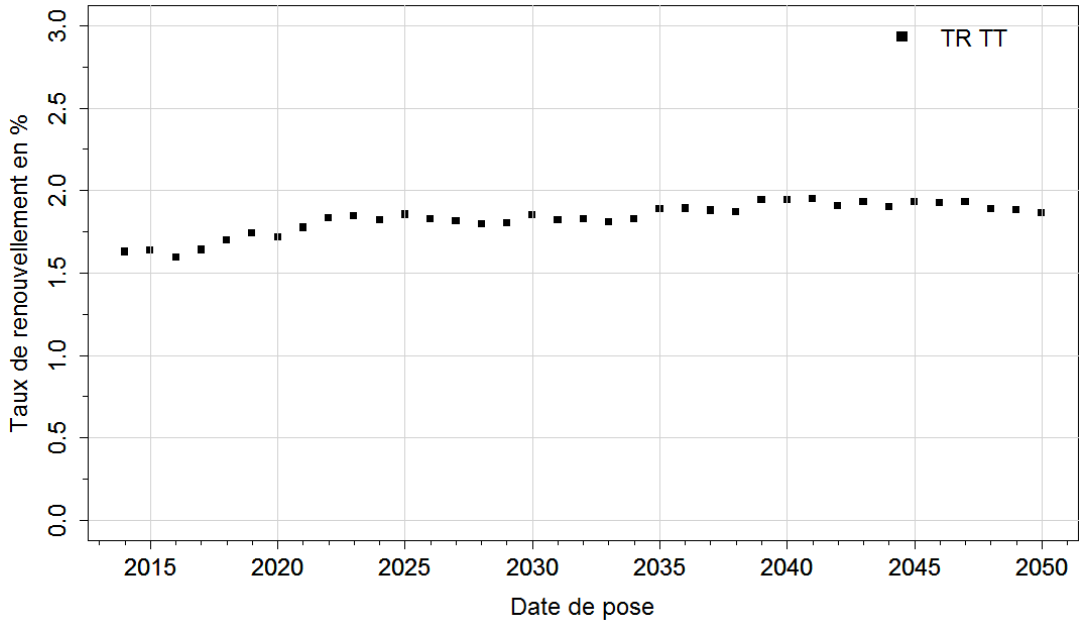


Figure 14 : Prévision des taux de renouvellement futurs de 2014 jusqu'en 2050. TR TT : Taux de renouvellement, tout le réseau

IV.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

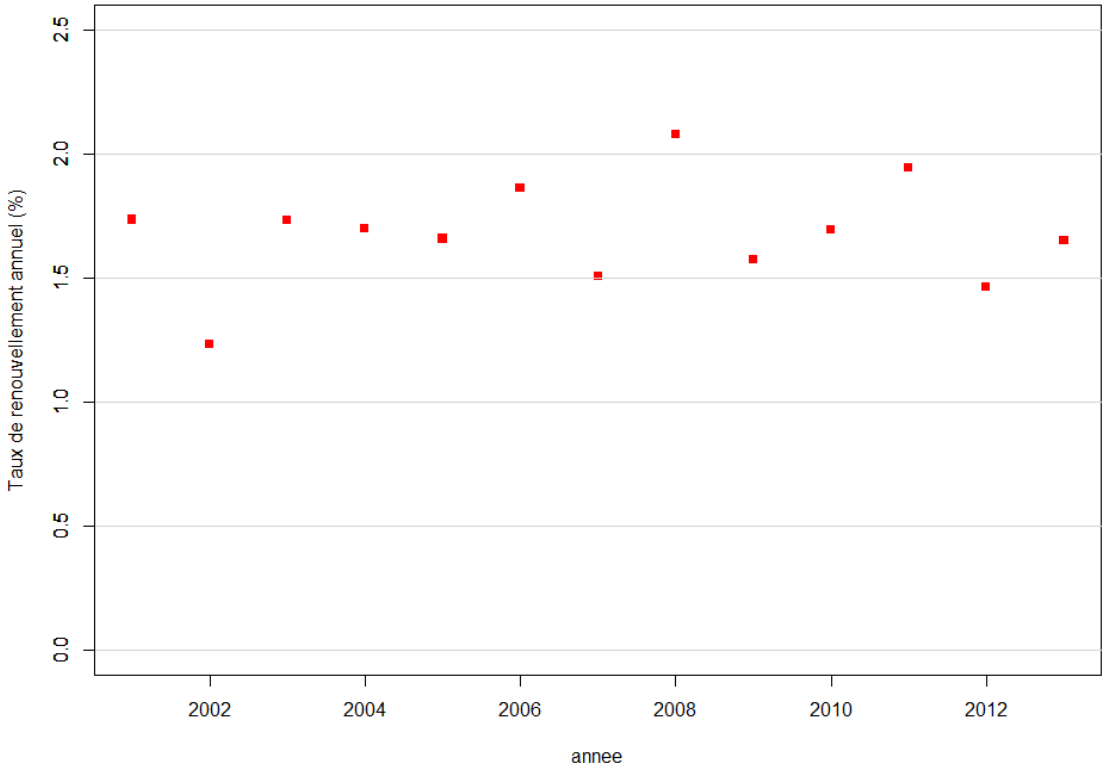


Figure 15 : Taux de renouvellement passé de 2001 à 2013

IV.1 Sortie I3R

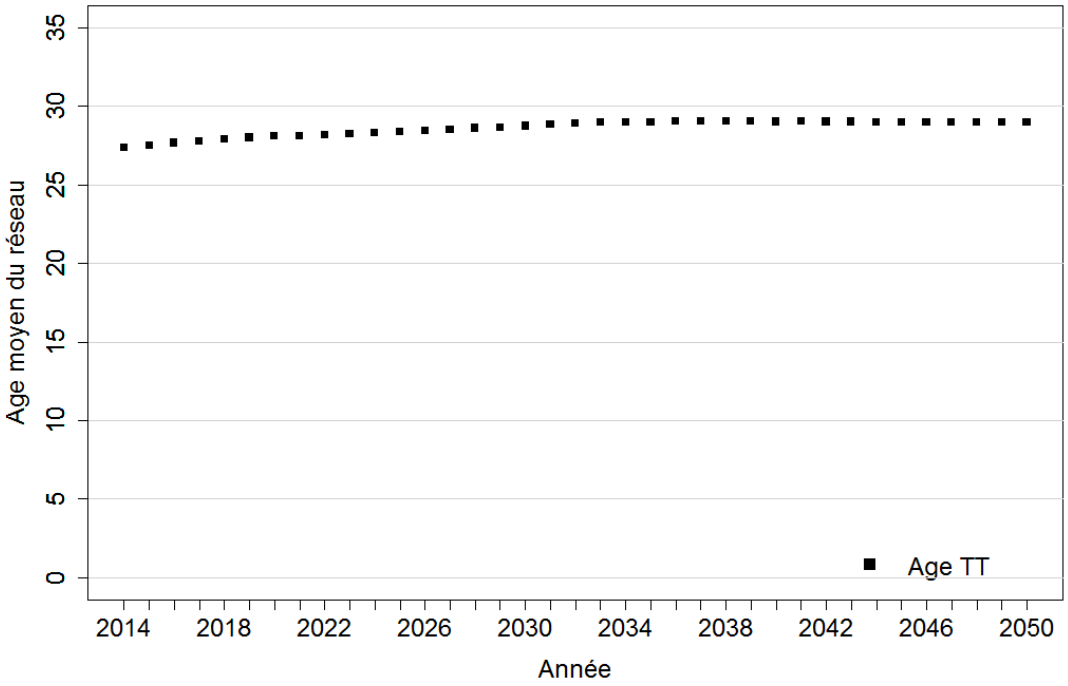


Figure 16 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2014 jusqu'en 2050 à eauservice Lausanne, scénario « statu quo».

V Calcul de l'indicateur I1F

V.1 Entrée

Nom de la strate	Diamètre médian de la strate (en linéaire)	Diamètre pris dans la fiche de coût	Coûts des travaux sans coordination (CHF/m)	Coûts des travaux avec coordination (CHF/m)	Coûts des travaux à la strate (CHF/m)
Toute strate	180 mm	200 mm	574	431	459
Commentaire				-25%	80% coordonnés

V.2 Sortie I1F

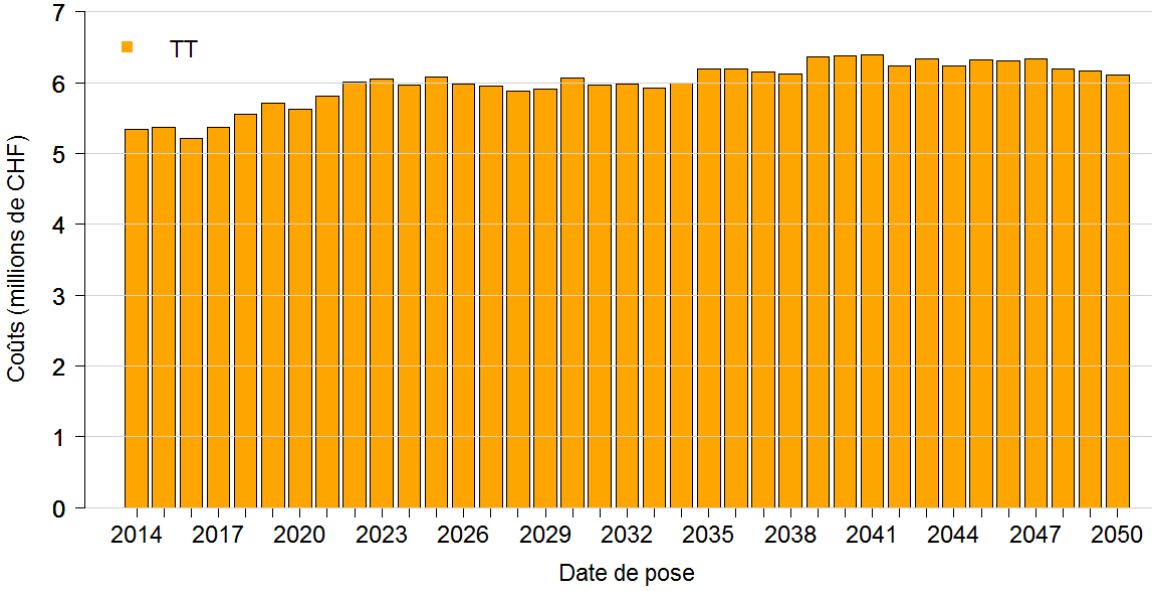


Figure 17 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2014 et 2050, scénario « statu quo».

VI Calcul de l'indicateur I1P

VI.1 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 6

				REHA2			Matériau		
Covariable	Age (t)	Longueur (Z_1)	Diamètre (Z_2)	Oui (Z_3)	Ref non	Pression (Z_4)	Autre matériau (Z_5)	Fonte grise (Z_6)	Ref FD/Acier
Unité	Siècle	m	mm			m			

Tableau 1 : Covariables (et leurs unités) employés dans le modèle LEYP

Paramètres / Nom strate	$\propto$	δ	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
Toute strate	2.9	1.57	-1.55	0.39	-0.0028	0.93	0.04	-0.75	-0.25

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle LEYP (bcp variables)

Paramètres / Nom strate	$\propto$	δ	β_0	β_1	β_2
Toute strate	3.7	1.33	-1.53	0.36	-0.002

Tableau 3 : Valeur des paramètres du modèle LEYP (peu de variable)

VI.1 Entrée en tronçon

- Cf. Figure 8
- Cf. Tableau 1 & Tableau 2

VI.2 Sorties en tronçons I1P

- Effectif :

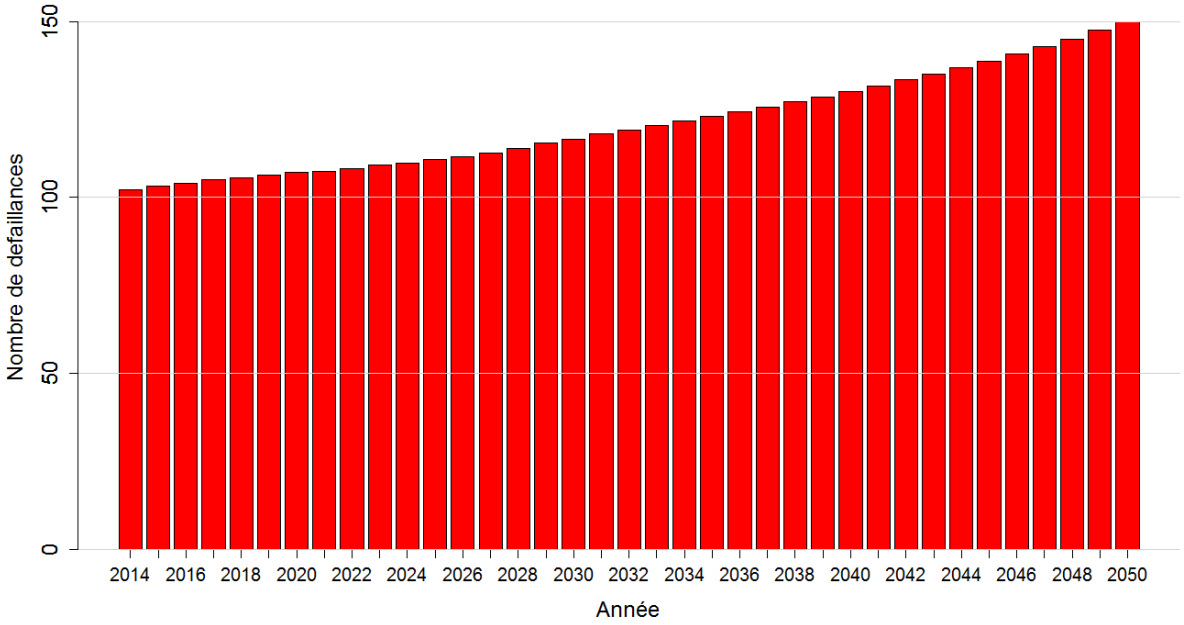


Figure 18 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2014 et 2050, scénario « statu quo ». Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif (grande fenêtre de validation et beaucoup de paramètres dans Casses)

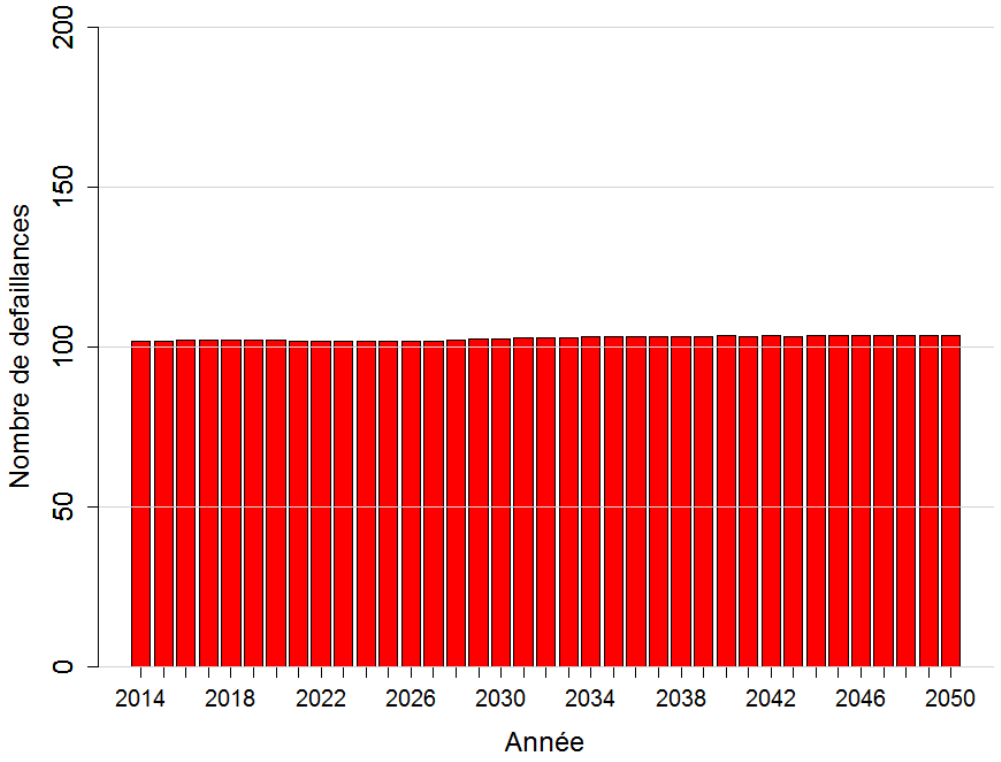


Figure 19 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2014 et 2050, scénario « statu quo ». Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif (grande fenêtre de validation et moins de paramètres dans Casses)

- Linéaire :

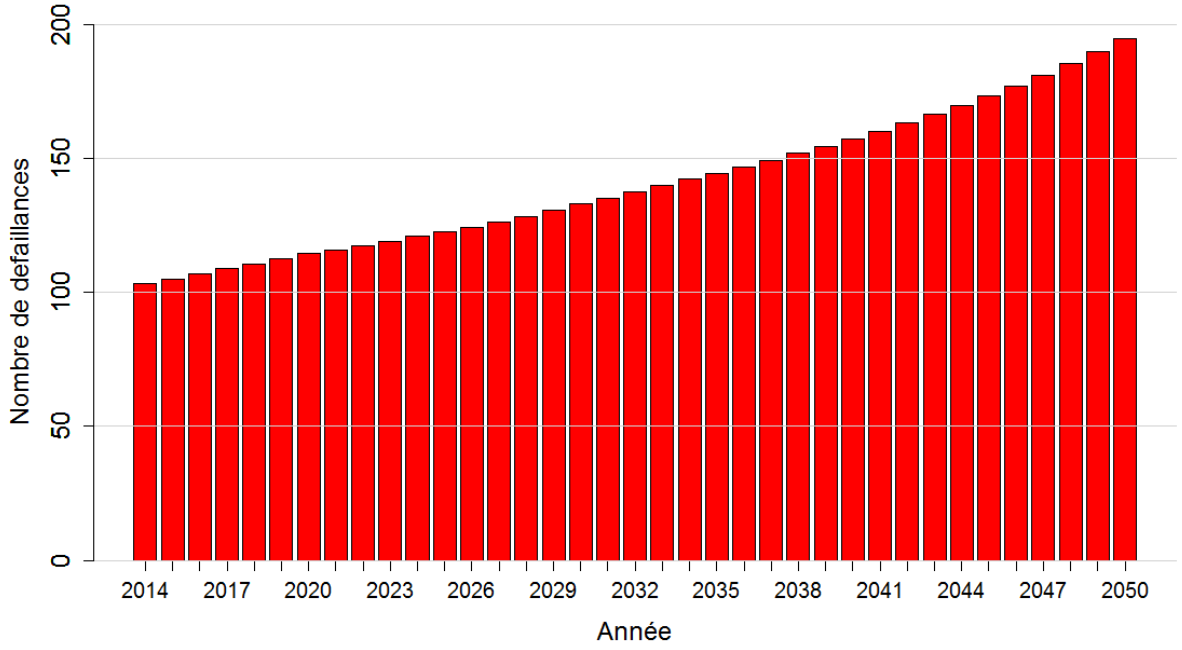


Figure 20 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2012 et 2050, scénario « statu quo ». Attention ici l'entrée est la courbe de survie en linéaire (petite fenêtre de validation et beaucoup de paramètres dans Casses)

VI.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

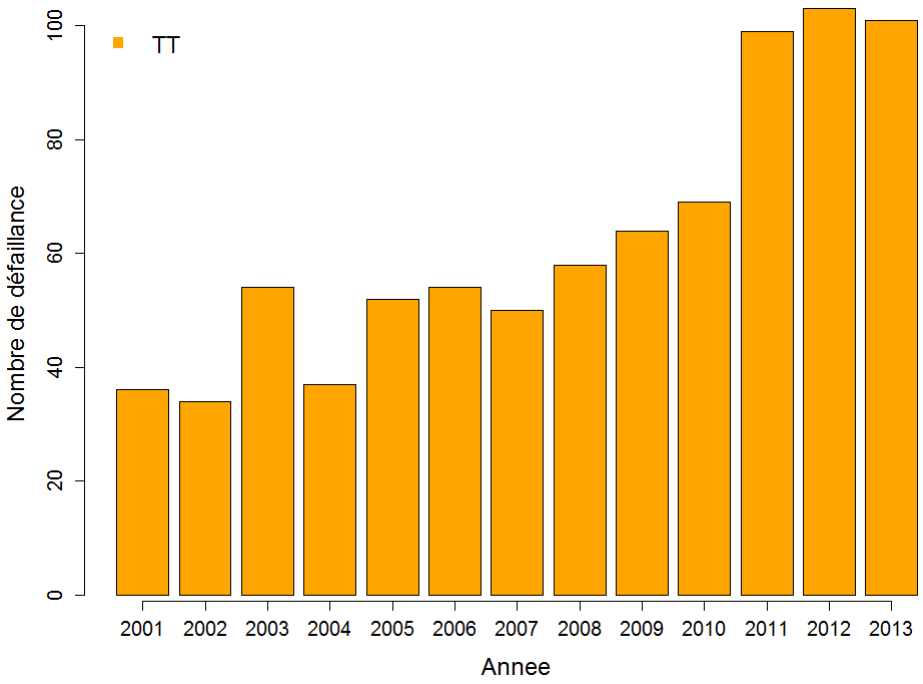


Figure 21 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2013

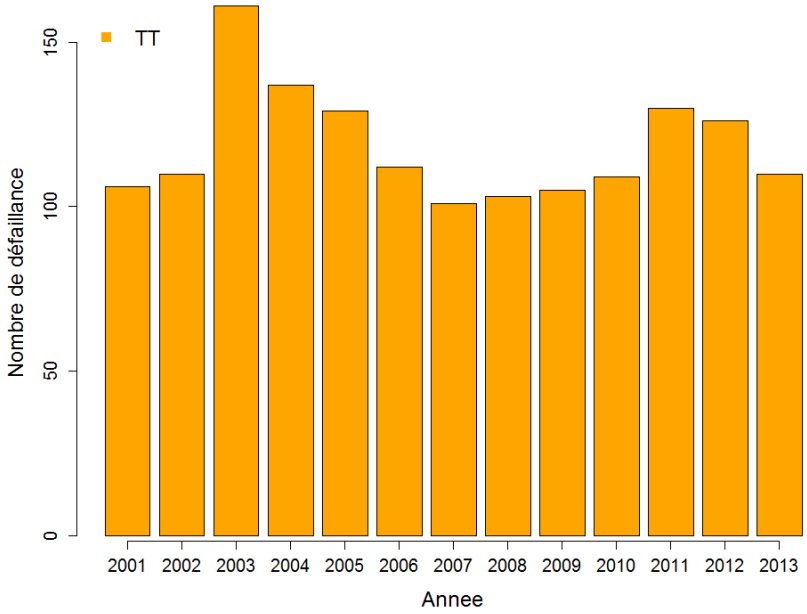


Figure 22 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service et hors service au 31/12/2013

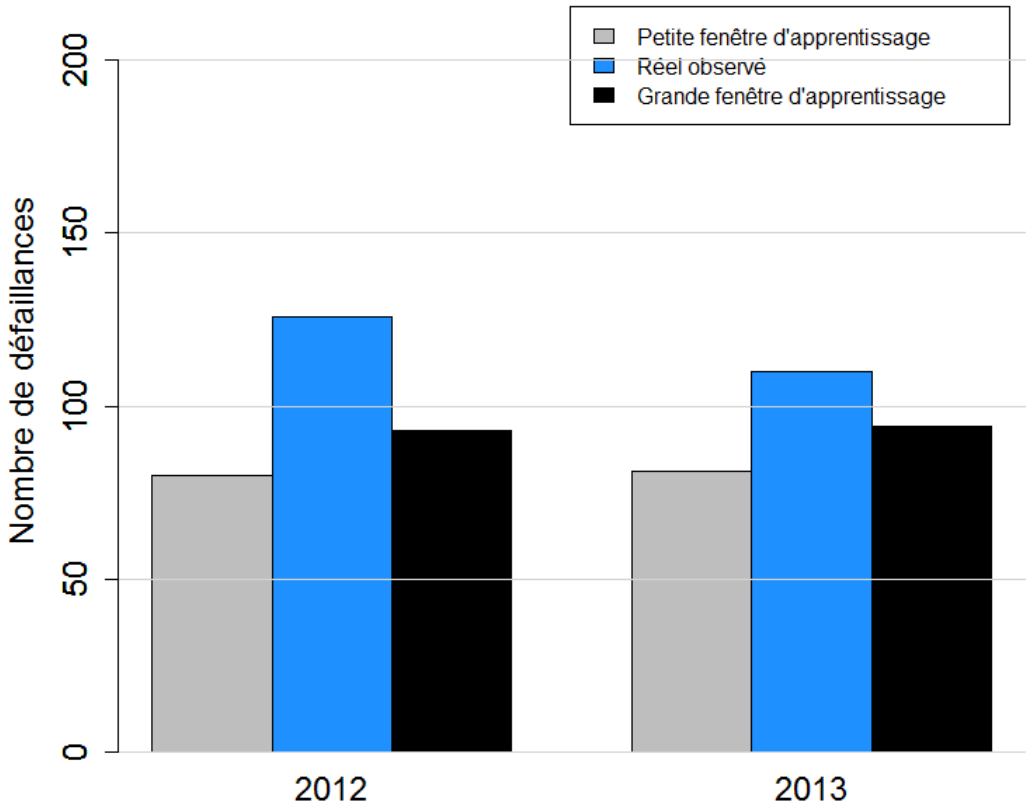


Figure 23 : Comparaison petite et grande fenêtre de validation « Casses » avec le nombre de défaillances réelles observées (survie en linéaire) Eq3

VII Calcul de l'indicateur I2F, coûts des réparations

VII.1 Entrée

Cf. Figure 18 (moins les tronçons mis HS en 2014)

CUR_p Coût [CHF]	Materiau	Diamètre (mm)
4 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi < 250$
6 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi \geq 250$
20 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BAT	$\phi < 250$
40 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BAT	$\phi \geq 250$

Tableau 4 : Valeur des coûts de réparation par tronçon

VII.2 Modèle

I2-F = NbDef x Curp

VII.3 Sortie I2F

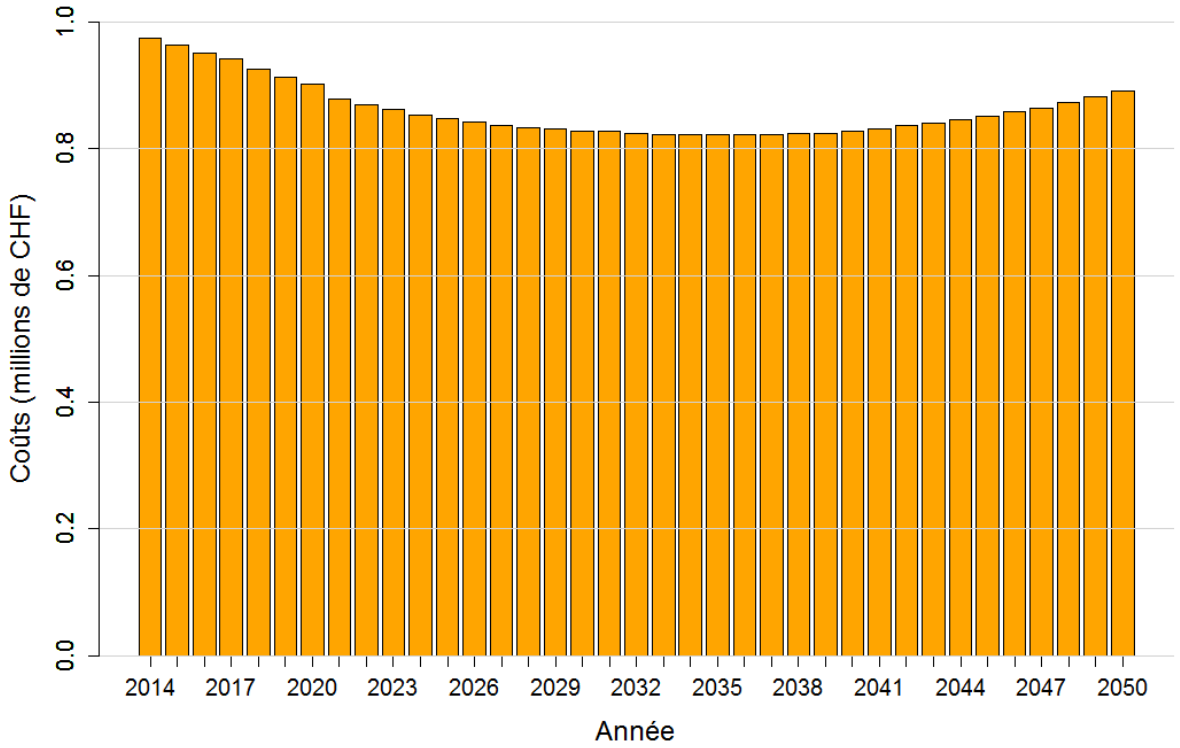


Figure 24 : Prévision pour l'indicateur I2-F entre 2014 et 2050, scénario « statu quo ».

VIII Calcul de l'indicateur I2P continuité

VIII.1 Entrée

Cf. Figure 18 (moins les tronçons mis HS en 2014)

Et

tr (Heures)	Matériau	Diamètre (mm)
3	Acier, fonte ductile, PE	$\phi < 250$
4	Acier, fonte ductile, PE	$\phi \geq 250$
6	Fonte grise, Eternit	$\phi < 250$
8	Fonte grise, Eternit	$\phi \geq 250$

Tableau 5 : Temps de réparation par tronçon

Et

Description	Valeurs de NBH
Haute densité	40
Moyenne densité	25
Centre village	20
Vieille ville	15
Z.I. sensible	5
Z.I. normale	5
Faible densité	5
Transport bouclage	0
Zone verte	0

Tableau 6 : Coefficient lié au nombre d'usager associé à ce tronçon

Valeurs SC	Description
1	Clients sensibles
0.6	Z.I. sensible
0.5	Z.I. normale
0.3	Haute densité
0.2	Vieille ville
0.2	Centre village
0.2	Moyenne densité
0.1	Faible densité
0	Transport bouclage
0	Zone verte

Tableau 7 : Coefficient lié à la vulnérabilité des usagers associé à ce tronçon

VIII.2 Modèle

I2P-continuite = NbDef x tr x NPS x SC

VIII.1 Sortie I2P

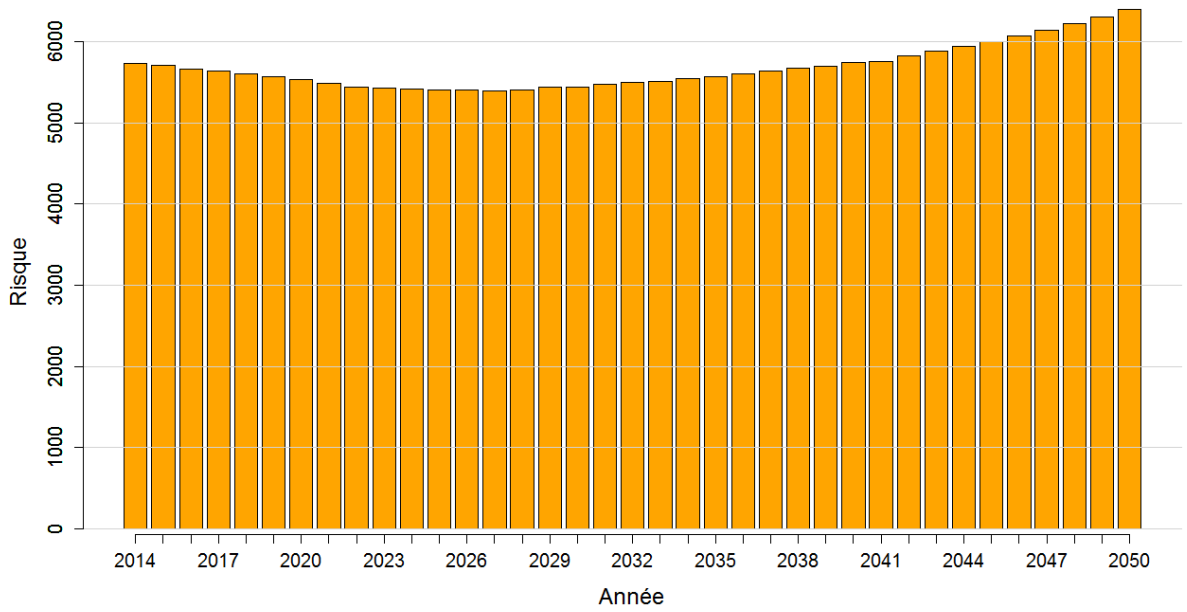


Figure 25 : Prévision pour l'indicateur I2-P_continuité entre 2014 et 2050, scénario « statu quo».

IX Calcul de l'indicateur I3P voirie

IX.1 Entrée

Cf. Figure 18 (moins les tronçons mis HS en 2014)

cf. Tableau 5

Valeur de SR	Transport en commun	Niveau du trafic
1	TL trolleybus	trafic $\geq$ 15000
0.9	TL trolleybus	trafic $<$ 15000
0.8	TL Bus	trafic $\geq$ 15000
0.7	TL Bus	trafic $<$ 15000
0.7	pas TL	trafic $\geq$ 20000
0.5	pas TL	20000 $>$ trafic $\geq$ 10000
0.4	pas TL	10000 $>$ trafic $\geq$ 5000
0.2	pas TL	5000 $>$ trafic $\geq$ 500
0.0	pas TL	trafic $<$ 500

Tableau 8 : Coefficient lié à la quantité et à la vulnérabilité du trafic routier associé à ce tronçon

IX.1.1 I3P voirie

I3P-voirie = NbDef x tr x SR

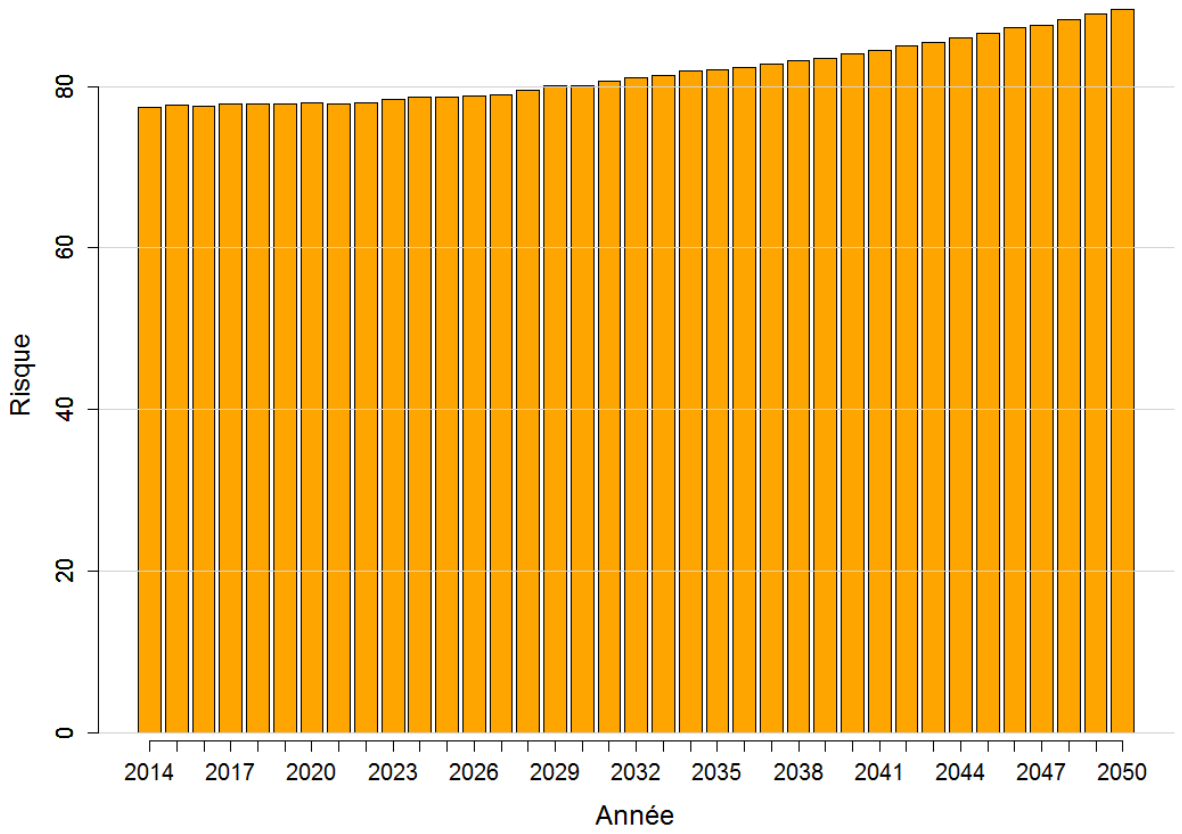


Figure 26 : Prévision pour l'indicateur I3-P_voirie entre 2014 et 2050, scénario « statu quo »

X Calcul de l'indicateur I4P inondation

X.1 Entrée

Cf. Figure 18 (moins les tronçons mis HS en 2014)
+ diamètre du tronçon (mm)
+ pression de l'eau dans le tronçon (m de colonne d'eau)

SI	Description
1	Vieille ville
0.8	Z.I. sensible
0.6	Haute densité
0.5	Centre village
0.4	Moyenne densité
0.4	Z.I. normale
0.2	Faible densité
0	Transport bouclage
0	Zone verte

Tableau 9 : Coefficient lié à la quantité, à la vulnérabilité et à la valeur des biens autour du tronçon

X.1 Modèle

I4P-innondation = NbDef x dia x dia x PRES x SI

X.1 Sortie I4P

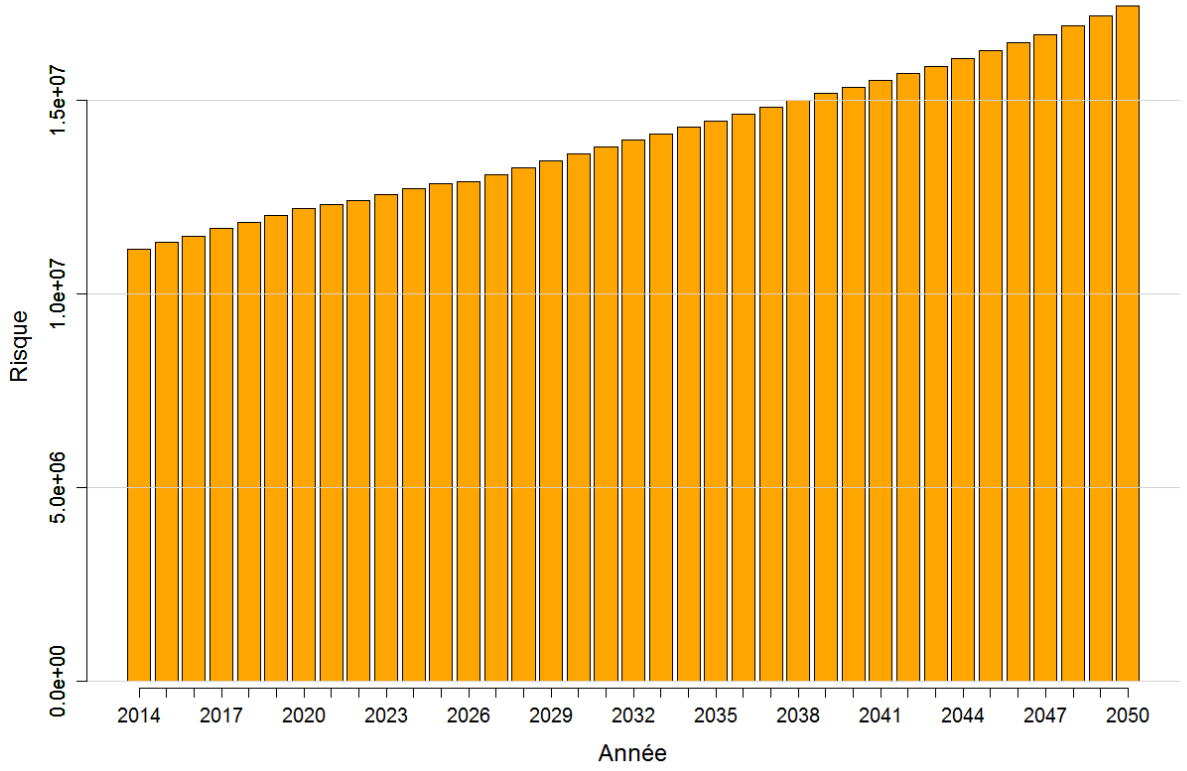


Figure 27 : Prévision pour l'indicateur I4-P_inondation entre 2014 et 2050, scénario « statu quo ».

XI Calcul de l'indicateur I6P Volume de fuite

XI.1 Entrée

Cf. Figure 18 (moins les tronçons mis HS en 2014)
+ diamètre du tronçon (mm)
+ régression linéaire diamètre volume d'eau perdu

XI.2 Modèle

I6P-fuite = NbDef x dia / mean(dia) x 290

XI.3 Sortie

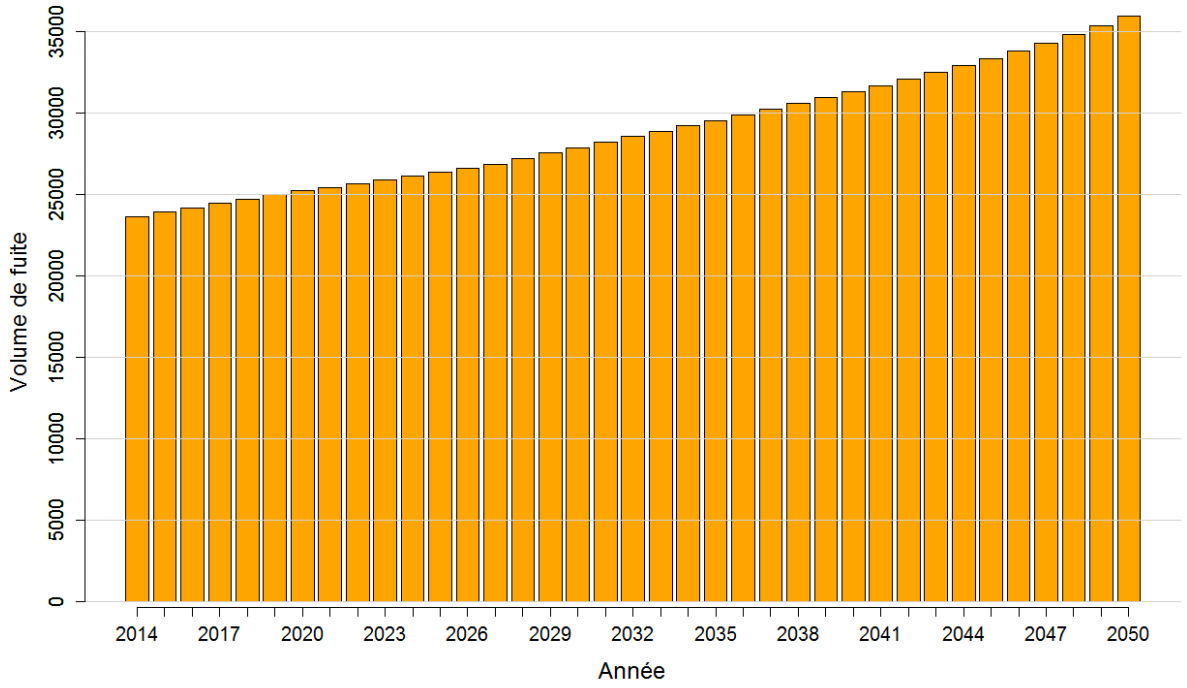


Figure 28 : Prévision pour l'indicateur IP6 entre 2014 et 2050, scénario « statu quo ».

XII Modèle de Cox

Variable	exp(coef)	IC max	IC min	P-value
Gros diamètre	0.70	0.78	0.63	< 0.05
Petit diamètre	Référence	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Longueur	0.99	0.99	0.99	< 0.05
FG	Référence	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Autre	0.84	0.94	0.75	< 0.05
SC	1.41	2.01	0.98	Sans objet
SI	1.65	2.11	1.29	< 0.05
REHA non	Référence	Sans objet	Sans objet	Sans objet
REHA oui	0.21	0.34	0.14	< 0.05
NbrDefAn	13.33	17.9	9.92	< 0.05
Hab_br	1.01	1.01	1.00	< 0.05

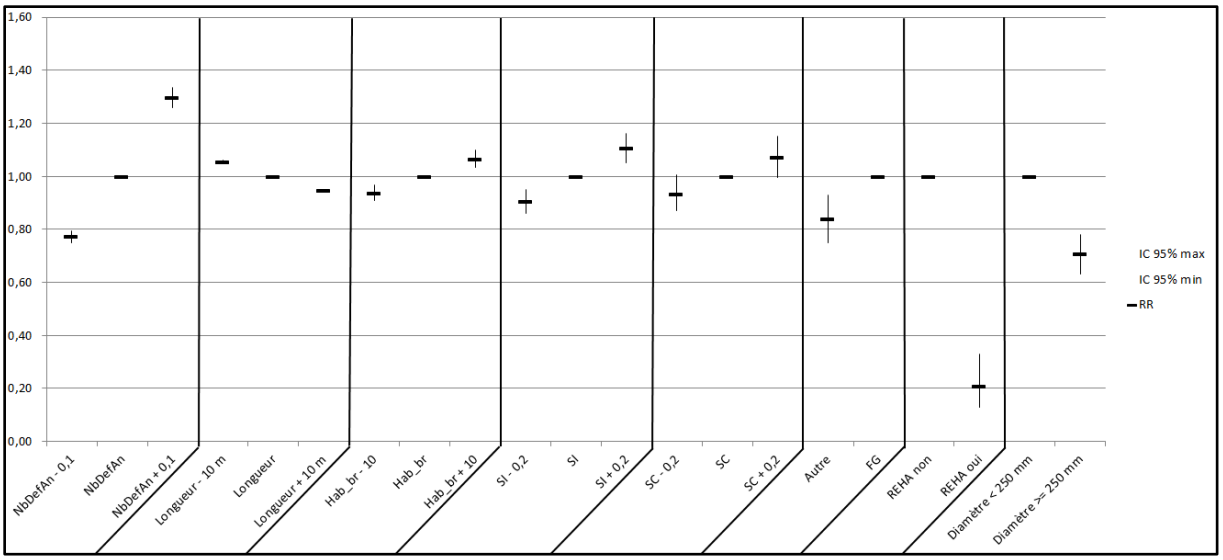
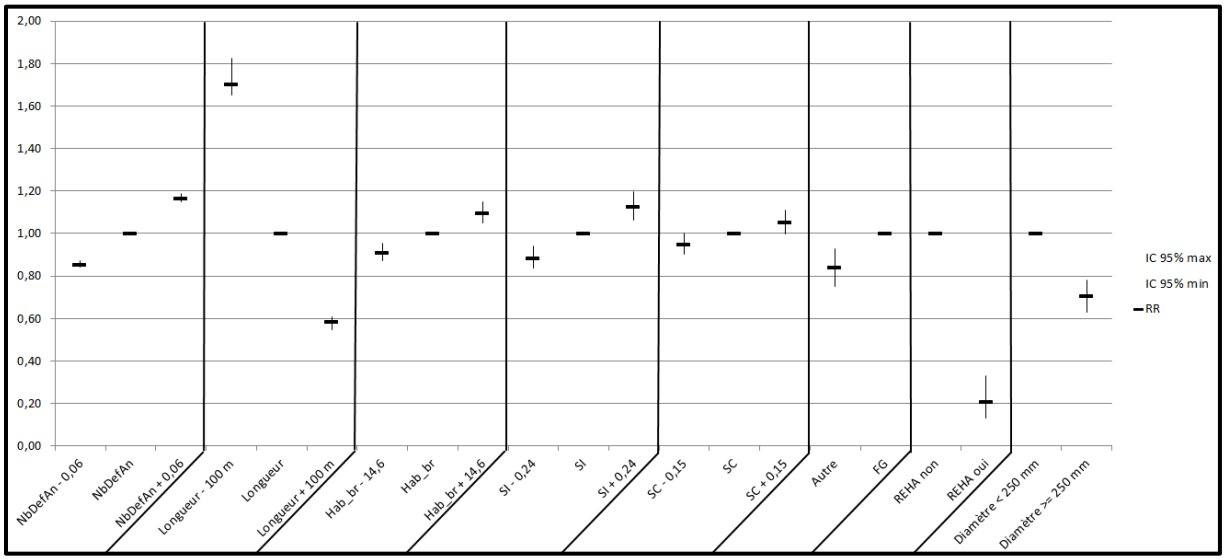


Figure 29 : Causes de mise HS en fonction des covariables



XIII Weibull Covariable

Variable	Coefficient	Estimation	$\exp(\hat{\beta})$	Initialisation de Nelder & Mead	P-value
Age	$\widehat{\delta_1}$	1.98	Sans objet	2	< 0.05
Sans objet	$\widehat{\beta_0}$	-7.37	Sans objet	0	< 0.05
Petit diamètre	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet
Gros diamètre	$\widehat{\beta_2}$	-0.34	0.71	0	< 0.05
Longueur	$\widehat{\beta_3}$	-0.005	0.99	0	< 0.05
FG	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet
Autre	$\widehat{\beta_4}$	-0.46	0.63	0	< 0.05
SI	$\widehat{\beta_4}$	0.5	1.64	0	< 0.05
Hab_br	$\widehat{\beta_5}$	0.009	1.01	0	< 0.05
REHA non	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet
REHA oui	$\widehat{\beta_6}$	-1.28	0.27	0	< 0.05
NbrDefAn	$\widehat{\beta_7}$	2.59	13.3	0	< 0.05

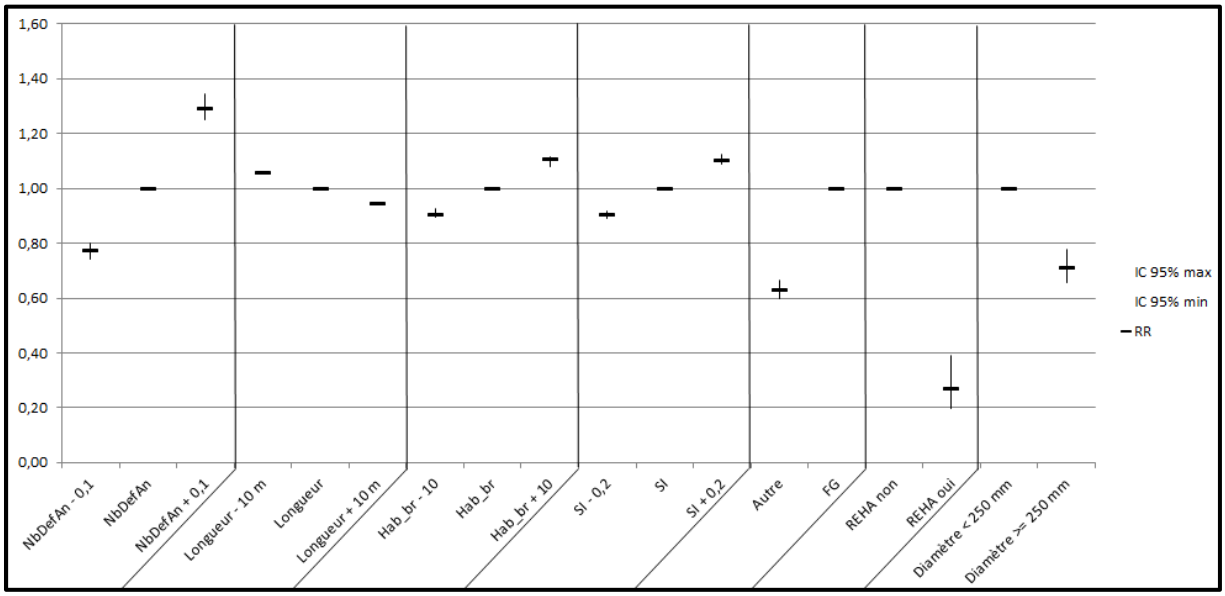


Figure 30 : Causes de mise HS en fonction des covariables

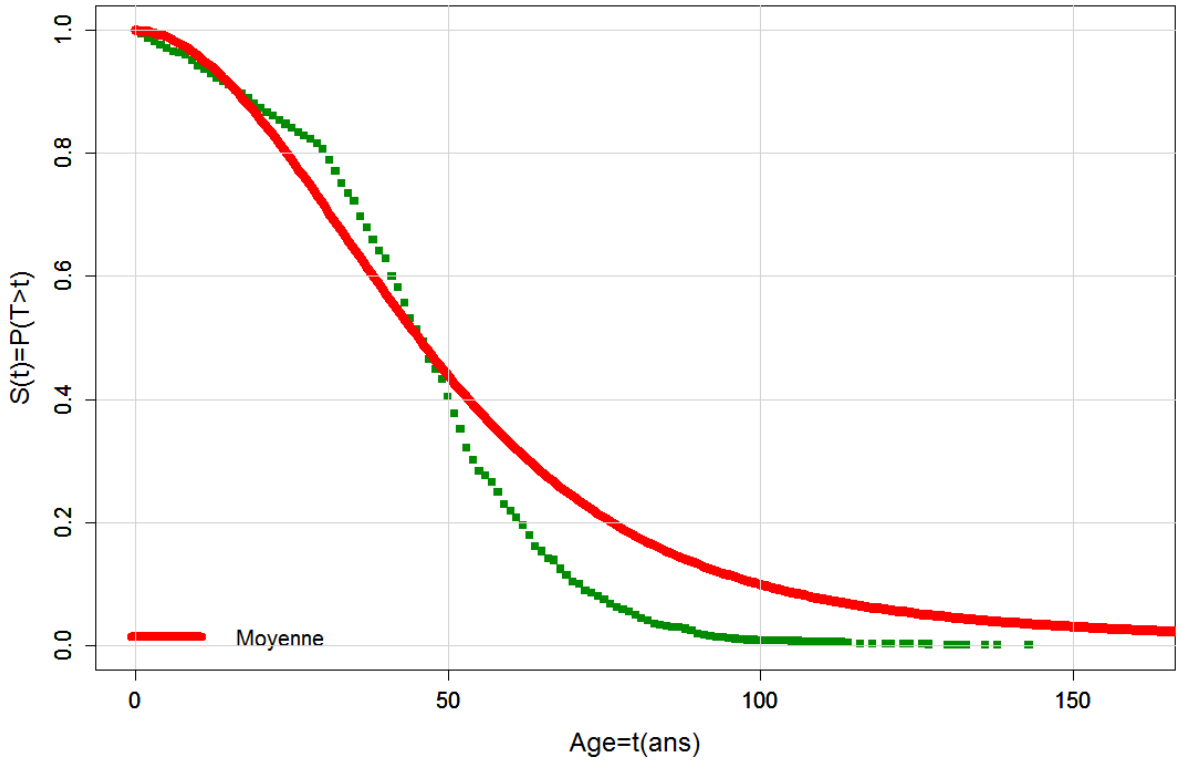


Figure 31 : Courbes de survie de Kaplan-Meier en linéaire tous tronçons et moyenne équation de Weibull covariable en linéaire

Scénario 5 (code P)

On arrête de renouveler

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Périmètre	Tout le réseau		Réseau en ville									
Stratifié ?	Non	Ville/ Montagne	Non				Diamètre	NDOA	Matériaux		Vulnérabilité	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2001; 2012]		[2001; 2007]	[2001; 2013]								
Statu quo ?	Oui		Oui	On arrête de renouveler		On vise un TR de 1%	Oui			Plus drastique avec les fontes grises	Oui	> autour des éléments vulnérables

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

⇨ Donnée Christelle 2014

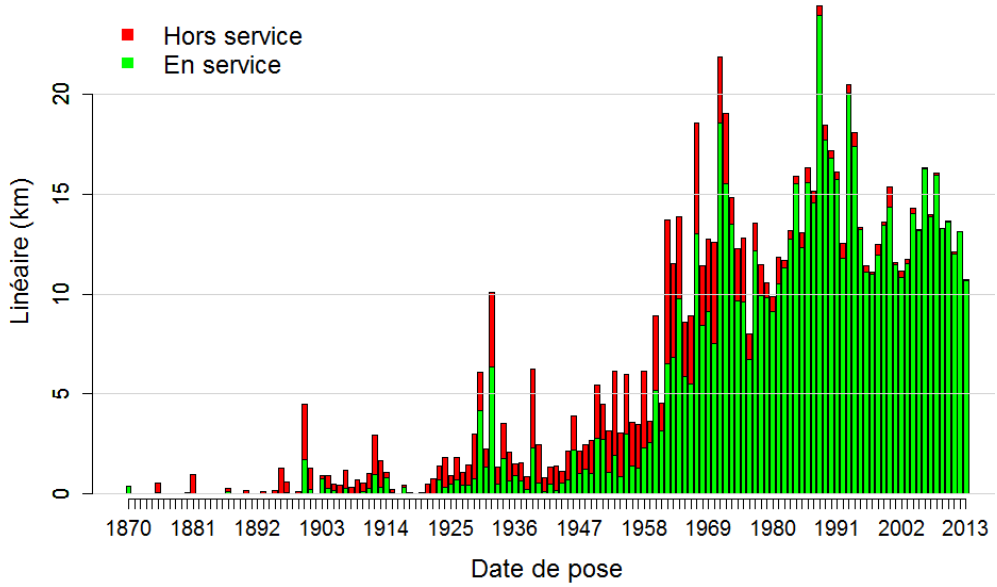


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service au 31/12/2013 (715 km) (en vert) et mis Hors Service entre [2001,2013] (156 km) (en rouge), ayant une date de pose connue

I.2 Sortie en linéaire

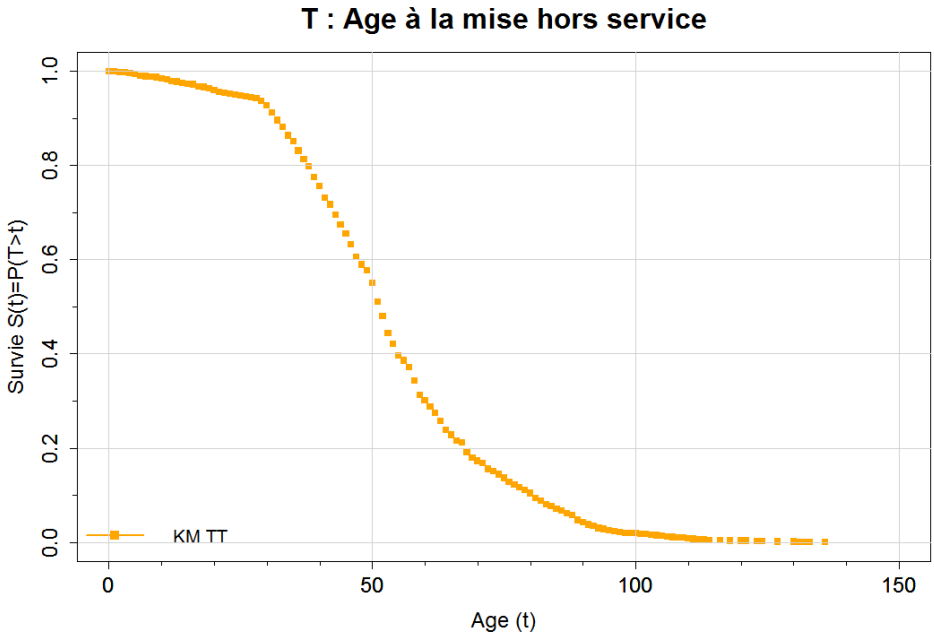


Figure 2 : Courbes de survie passée, sur la fenêtre [2001, 2013] (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons

II Scénario P

- Groupe de tronçons : transport normal + distribution (moins Brêt et moins les moins de 6m)
- Date export donné : 2014 par Christelle
- Photographie au 31 /12 /2013
- Pas de stratification
- On laisse vieillir le réseau. On arrête de renouveler le réseau.
- Taux de travaux coordonnés en général : 80%. Taux des travaux non coordonnées : 20%.

III Construction scénario prospectif P

III.1 Survie prospective en linéaire et en effectif

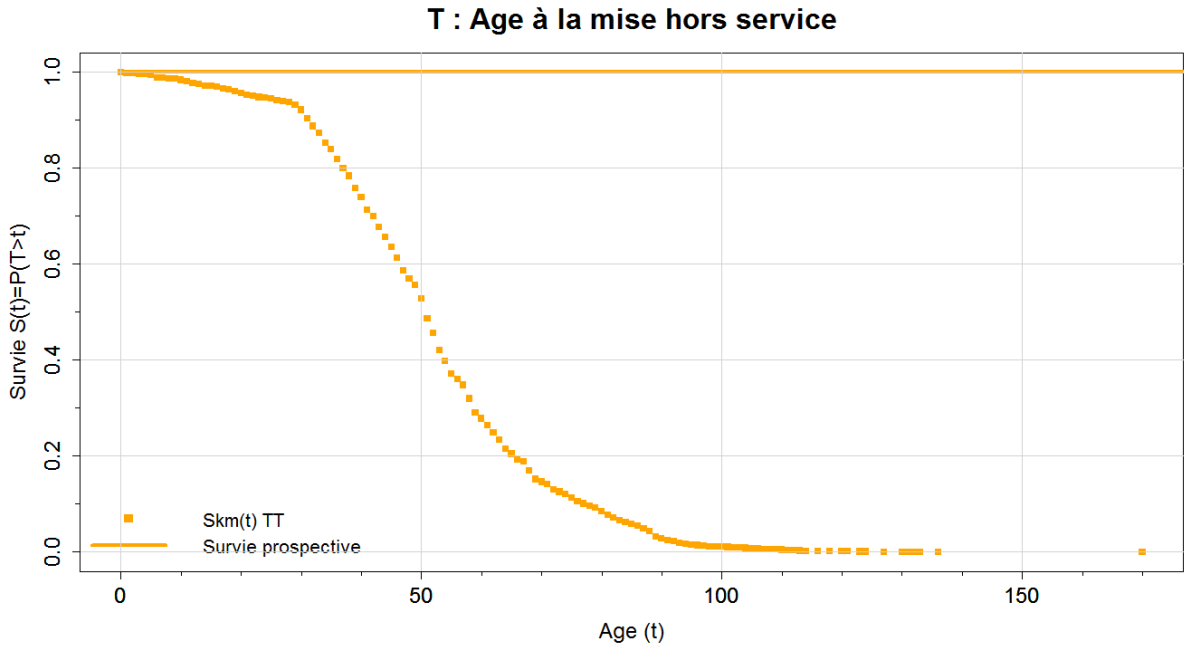


Figure 3 : Courbes de survie prospective (trait)

IV Calcul de l'indicateur I3R

Pas de renouvellement, donc pas d'indicateur I1R, I2R et I1F.

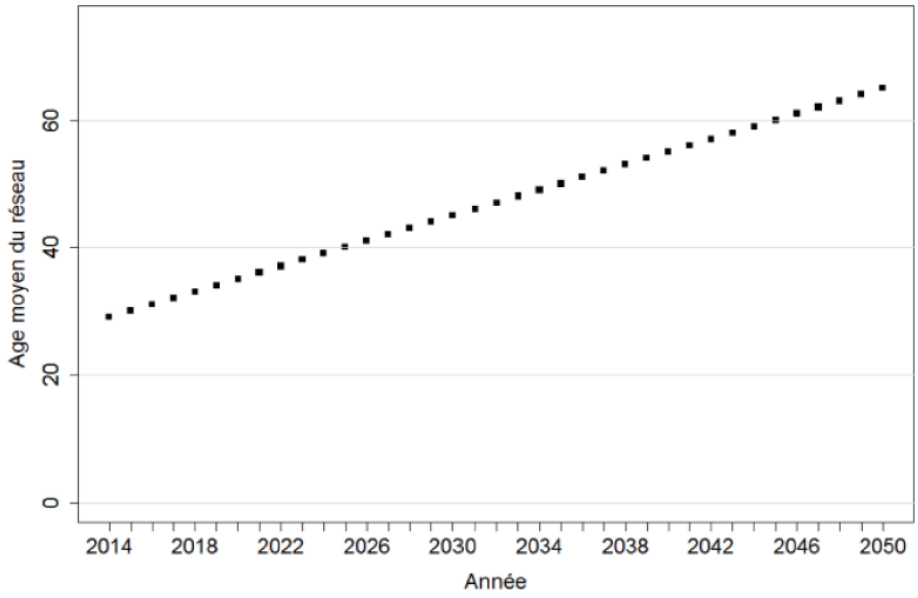


Figure 4 : Evolution de l'âge moyen du réseau (I3R)

V Calcul de l'indicateur I1P

V.1 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 3

				REHA2			Matériau		
Covariable	Age (t)	Longueur (Z_1)	Diamètre (Z_2)	Oui (Z_3)	Ref non	Pression (Z_4)	Autre matériau (Z_5)	Fonte grise (Z_6)	Ref FD/Acier
Unité	Siècle	m	mm			m			

Tableau 1 : Covariables (et leurs unités) employés dans le modèle LEYP

Paramètres / Nom strate	$\propto$	δ	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
Toute strate	2.9	1.57	-1.55	0.39	-0.0028	0.93	0.04	-0.75	-0.25

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle LEYP

V.1 Entrée en tronçon

- Cf. Tableau 1 & Tableau 2

V.2 Sorties en tronçons

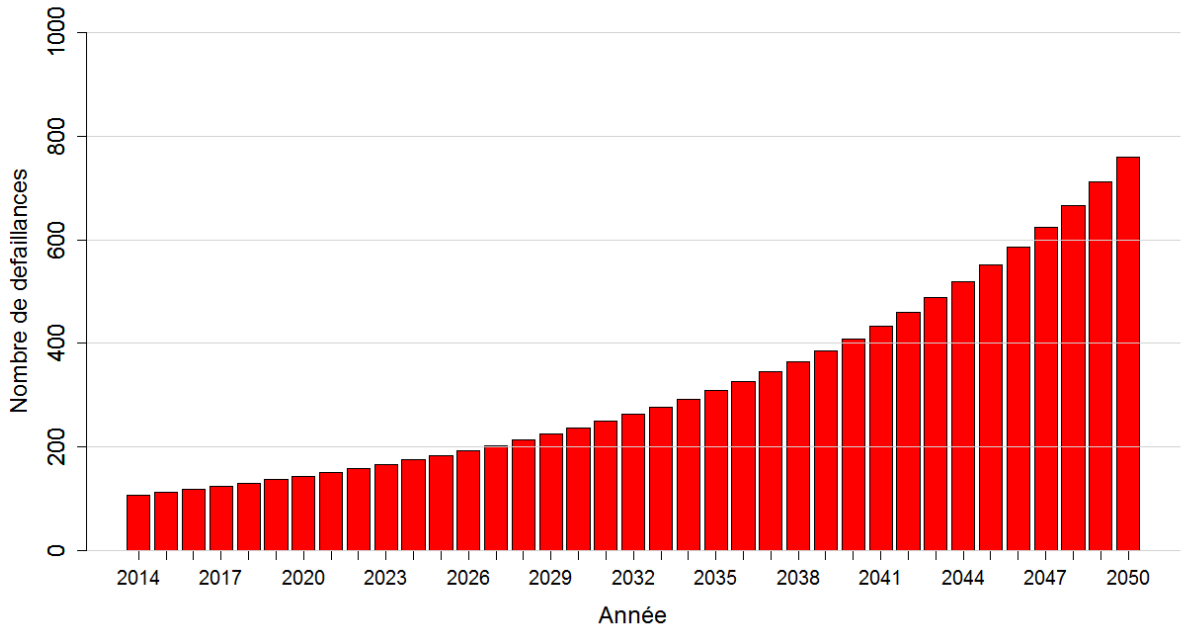


Figure 5 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2014 et 2050, scénario « on ne renouvelle plus »

V.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

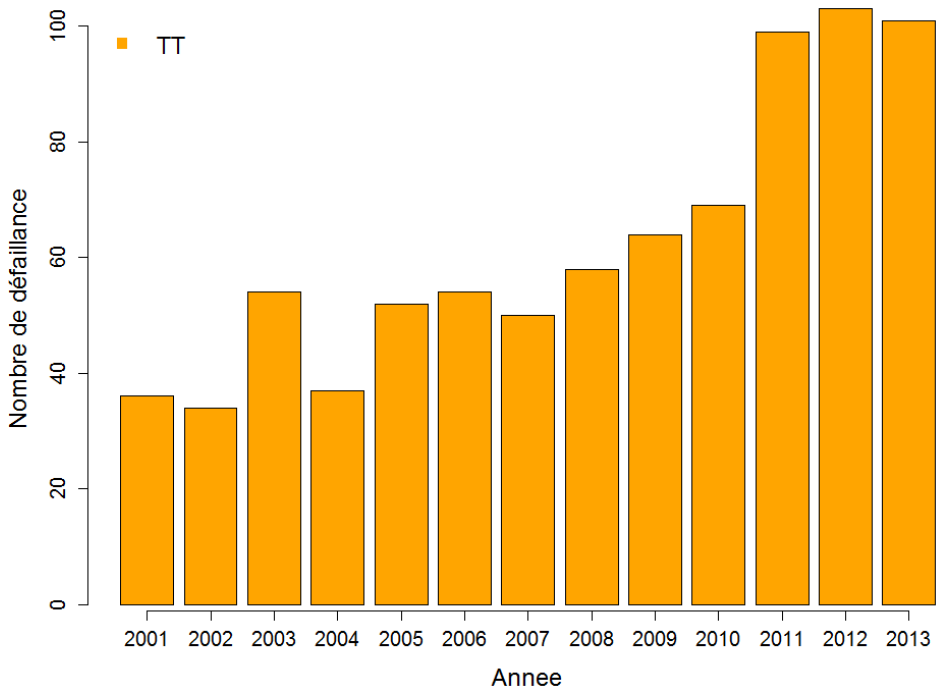


Figure 6 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2013

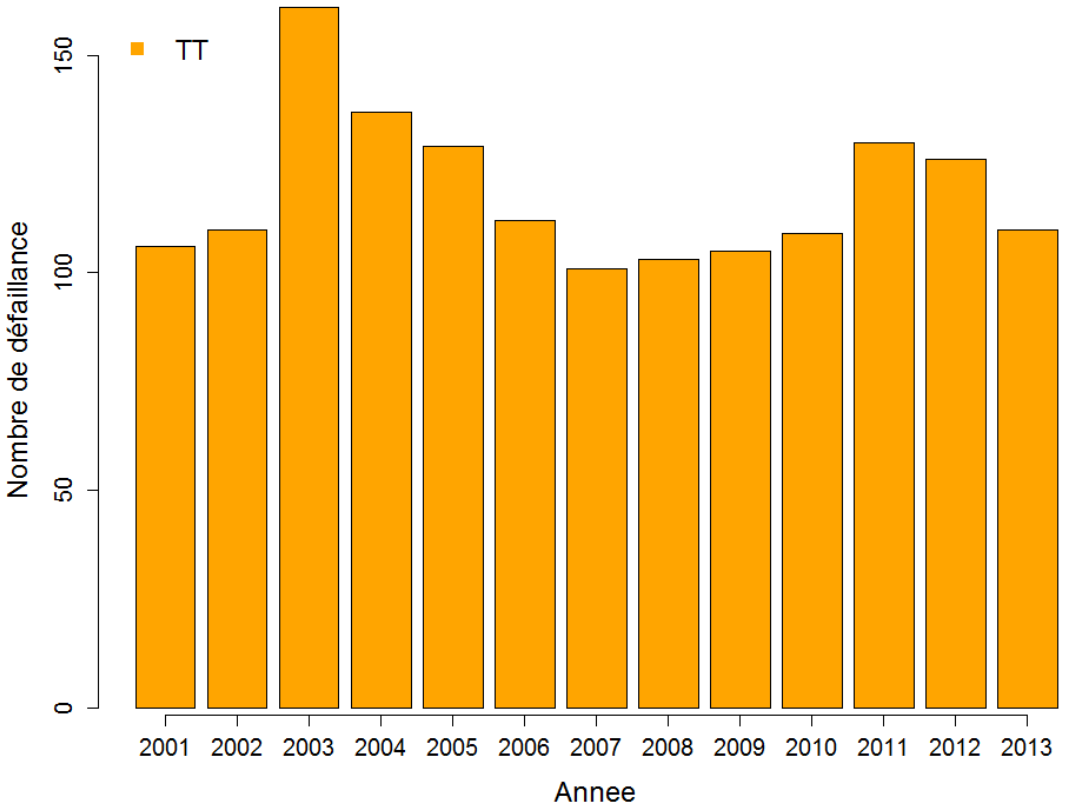


Figure 7 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service et hors service au 31/12/2013

VI Calcul de l'indicateur I2F, coûts des réparations

VI.1 Entrée

Cf. Figure 5 (moins les tronçons mis HS en 2014)

CUR_p Coût [CHF]	Materiau	Diamètre (mm)
4 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi < 250$
6 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi \geq 250$
20 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BAT	$\phi < 250$
40 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BAT	$\phi \geq 250$

Tableau 3 : Valeur des coûts de réparation par tronçon

VI.2 Modèle

I2-F = NbDef x Curp

VI.3 Sortie

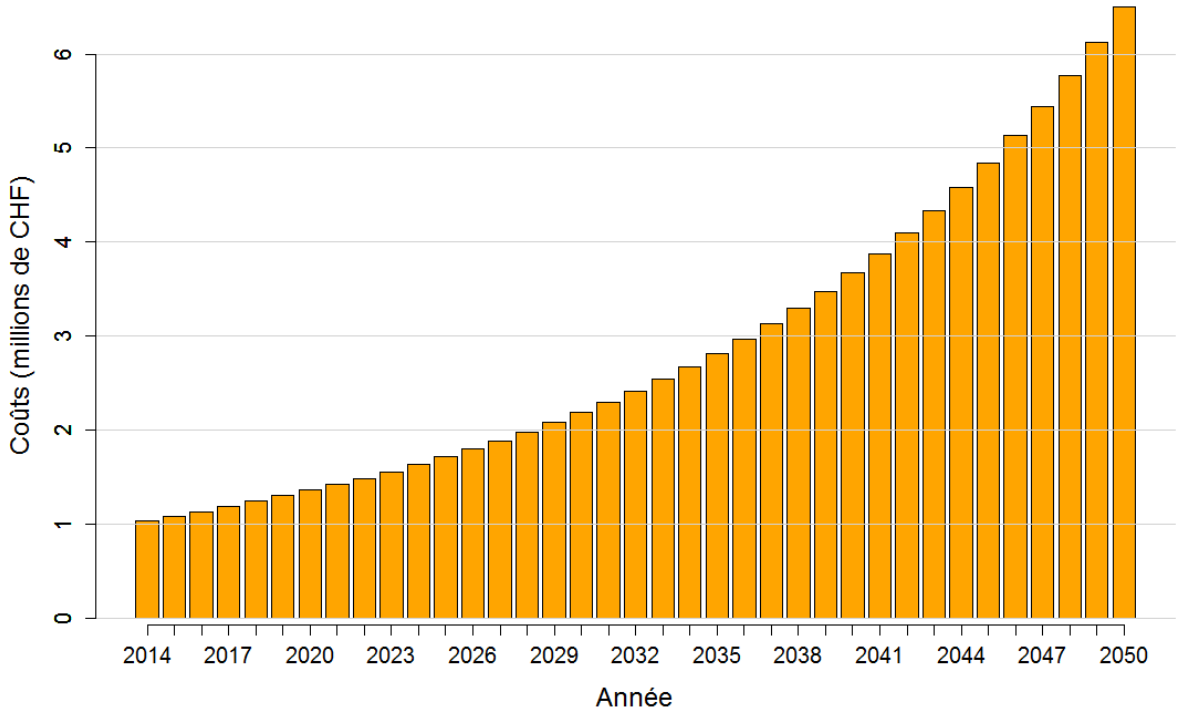


Figure 8 : Prévision pour l'indicateur I2-F entre 2014 et 2050, scénario « on ne renouvelle plus ».

VII Calcul de l'indicateur I2P continuité

VII.1 Entrée

Cf. Figure 5 (moins les tronçons mis HS en 2014)

Et

tr (Heures)	Matériau	Diamètre (mm)
3	Acier, fonte ductile, PE	$\phi < 250$
4	Acier, fonte ductile, PE	$\phi \geq 250$
6	Fonte grise, Eternit	$\phi < 250$
8	Fonte grise, Eternit	$\phi \geq 250$

Tableau 4 : Temps de réparation par tronçon

Et

Description	Valeurs de NBH
Haute densité	40
Moyenne densité	25
Centre village	20
Vieille ville	15
Z.I. sensible	5
Z.I. normale	5
Faible densité	5
Transport bouclage	0
Zone verte	0

Tableau 5 : Coefficient lié au nombre d'usager associé à ce tronçon

Valeurs SC	Description
1	Clients sensibles
0.6	Z.I. sensible
0.5	Z.I. normale
0.3	Haute densité
0.2	Vieille ville
0.2	Centre village
0.2	Moyenne densité
0.1	Faible densité
0	Transport bouclage
0	Zone verte

Tableau 6 : Coefficient lié à la vulnérabilité des usagers associé à ce tronçon

VII.2 Modèle

I2P-continuite = NbDef x tr x NPS x SC

VII.1 Sortie

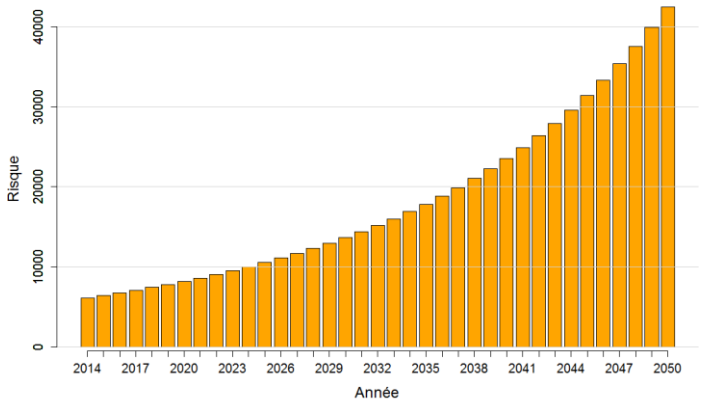


Figure 9 : Prévision pour l'indicateur I2-P_continuité entre 2014 et 2050, scénario « on ne renouvelle plus ».

VIII Calcul de l'indicateur I3P voirie

VIII.1 Entrée

Cf. Figure 5 (moins les tronçons mis HS en 2014)

cf. Tableau 4

Valeur de *SR*	Transport en commun	Niveau du trafic
1	TL trolleybus	trafic $\geq$ 15000
0.9	TL trolleybus	trafic $<$ 15000
0.8	TL Bus	trafic $\geq$ 15000
0.7	TL Bus	trafic $<$ 15000
0.7	pas TL	trafic $\geq$ 20000
0.5	pas TL	20000 $>$ trafic $\geq$ 10000
0.4	pas TL	10000 $>$ trafic $\geq$ 5000
0.2	pas TL	5000 $>$ trafic $\geq$ 500
0.0	pas TL	trafic $<$ 500

Tableau 7 : Coefficient lié à la quantité et à la vulnérabilité du trafic routier associé à ce tronçon

VIII.1.1 I3-P voirie

I3-P-voirie = NbDef x tr x SR

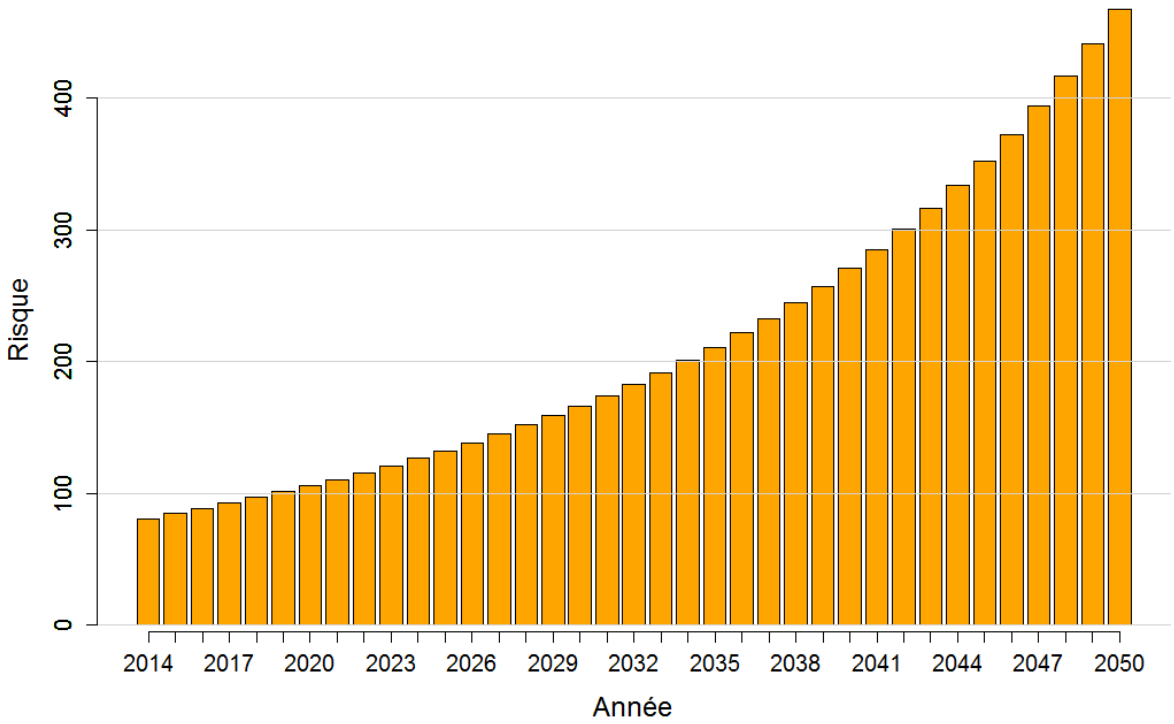


Figure 10 : Prévision pour l'indicateur I3-P_voirie entre 2014 et 2050, scénario « on ne renouvelle plus »

IX Calcul de l'indicateur I4P inondation

IX.1 Entrée

Cf. Figure 5 (moins les tronçons mis HS en 2014)
+ diamètre du tronçon (mm)
+ pression de l'eau dans le tronçon (m de colonne d'eau)

SI	Description
1	Vieille ville
0.8	Z.I. sensible
0.6	Haute densité
0.5	Centre village
0.4	Moyenne densité
0.4	Z.I. normale
0.2	Faible densité
0	Transport bouclage
0	Zone verte

Tableau 8 : Coefficient lié à la quantité, à la vulnérabilité et à la valeur des biens autour du tronçon

IX.1 Modèle

I4P-innondation = NbDef x dia x dia x PRES x SI

IX.1 Sortie

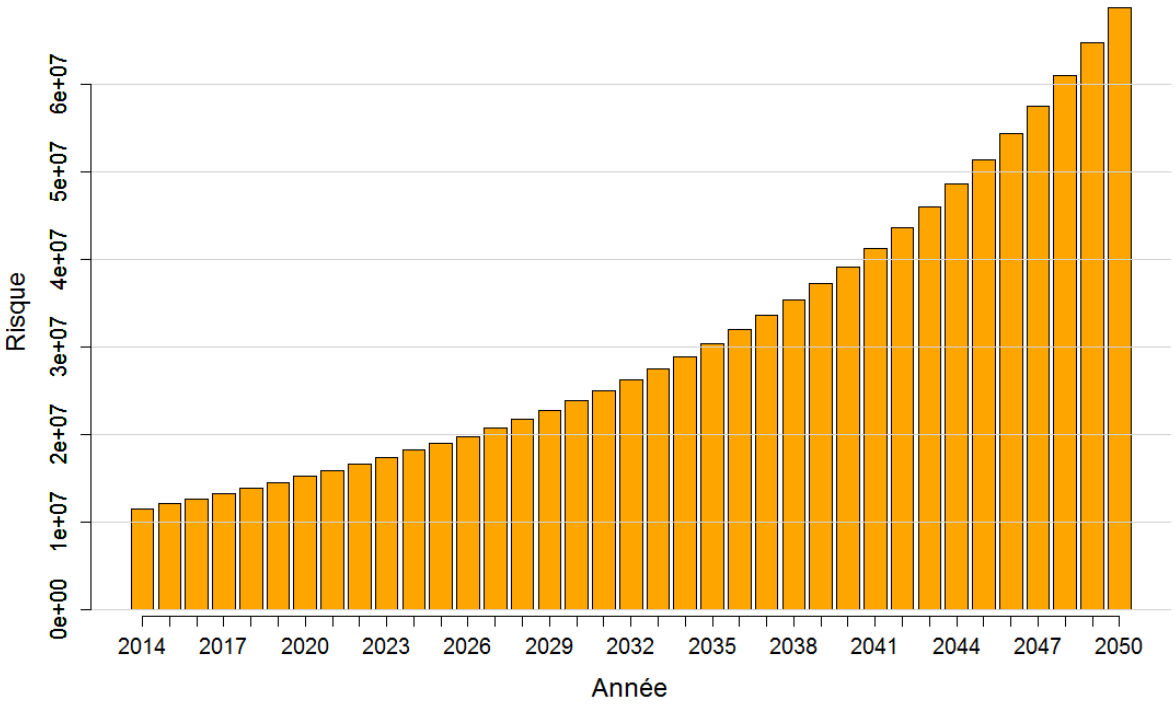


Figure 11 : Prévision pour l'indicateur I4-P_inondation entre 2014 et 2050, scénario « on ne renouvelle plus ».

X Calcul de l'indicateur I6P Volume de fuite

X.1 Entrée

Cf. Figure 5 (moins les tronçons mis HS en 2014)
+ diamètre du tronçon (mm)
+ régression linéaire diamètre volume d'eau perdu

X.2 Modèle

I6P-fuite = NbDef x dia / mean(dia) x 290

X.3 Sortie

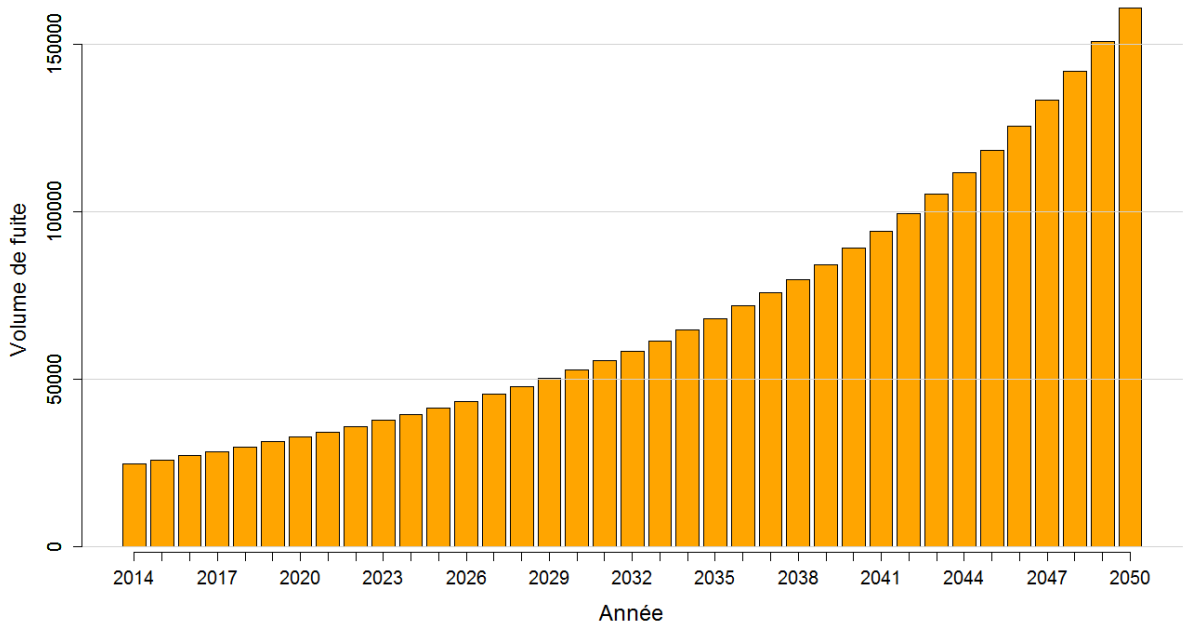


Figure 12 : Prévision pour l'indicateur IP6 entre 2014 et 2050, scénario « on ne renouvelle plus ».

Scénario 6 (code F)

On vise un TR de 1%

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Périmètre	Tout le réseau		Réseau en ville									
Stratifié ?	Non	Ville/ Montagne	Non				Diamètre	NDOA	Matériaux		Vulnérabilité	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2001; 2012]		[2001; 2007]	[2001; 2013]								
Statu quo ?	Oui		Oui		On arrête de renouveler	On vise un TR de 1%	Oui			Plus drastique avec les fontes grises	Oui	> autour des éléments vulnérables

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

⇨ Donnée Christelle 2014

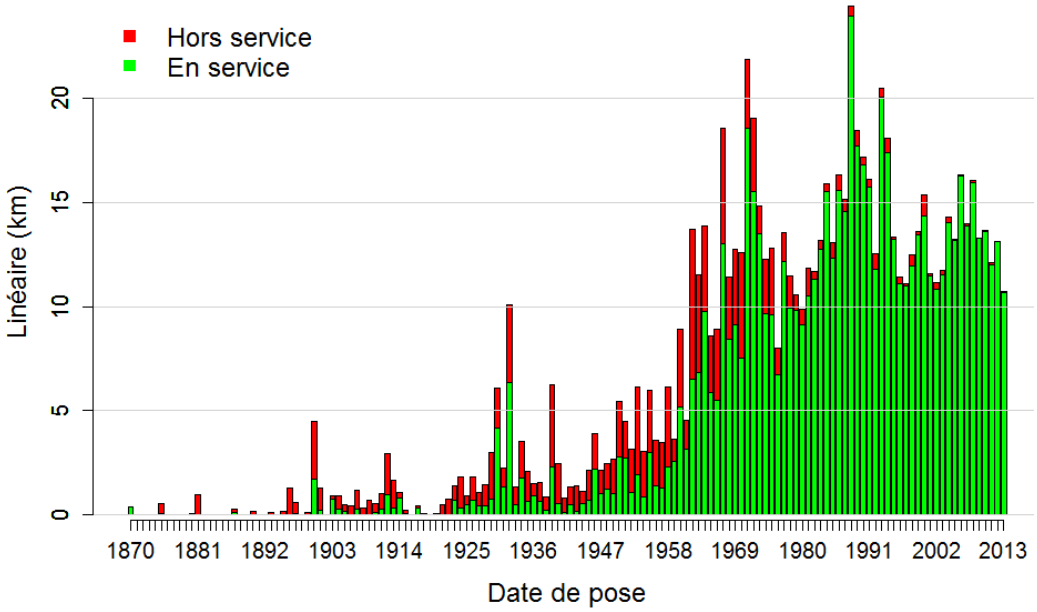


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service au 31/12/2013 (715 km) (en vert) et mis Hors Service entre [2001,2013] (156 km) (en rouge), ayant une date de pose connue

I.2 Sortie en linéaire

Figure 2 : Courbes de survie passée, sur la fenêtre [2001, 2013] (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons

I.1 Entrée en effectif

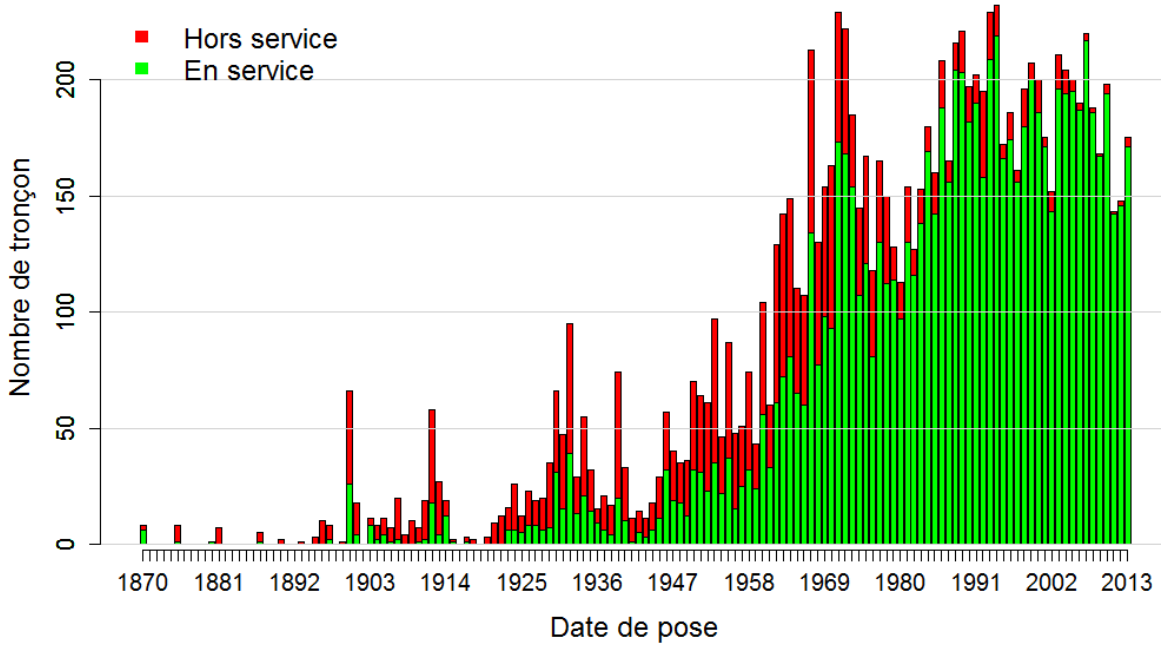


Figure 3 : Histogramme du nombre de tronçons En Service au 31/12/2013 (en vert) et mis Hors Service entre [2001, 2013] (en rouge), ayant une date de pose connue

I.2 Sortie en effectif

Figure 4 : Courbes de survie passée, sur la fenêtre [2001, 2013], (Kaplan Meier) en nombre de tronçons

II Scénario F

- Groupe de tronçons : transport normal + distribution (moins Brêt et moins les moins de 6m)
- Date export donné : 2014 par Christelle
- Photographie au 31 /12 /2013
- Pas de stratification
- Objectif : taux de renouvellement < 1%
- Taux de travaux coordonnés en général : 80%. Taux des travaux non coordonnées : 20%.

III Construction scénario prospectif F

III.1 Entrée en linéaire

Cf. : Figure 2

III.2 Sortie en linéaire

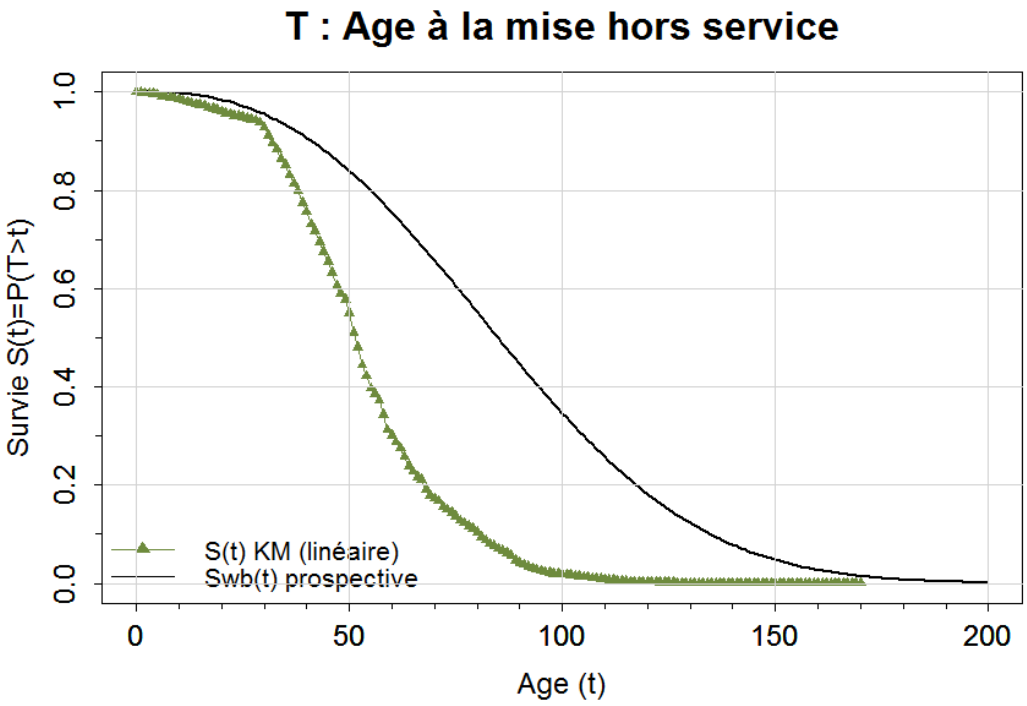


Figure 5 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait)

Eq WB = exp(-t $^{2.6}$ x exp(-11.91))

III.1 Entrée en effectif

Cf. : Figure 4

III.2 Sortie en effectif

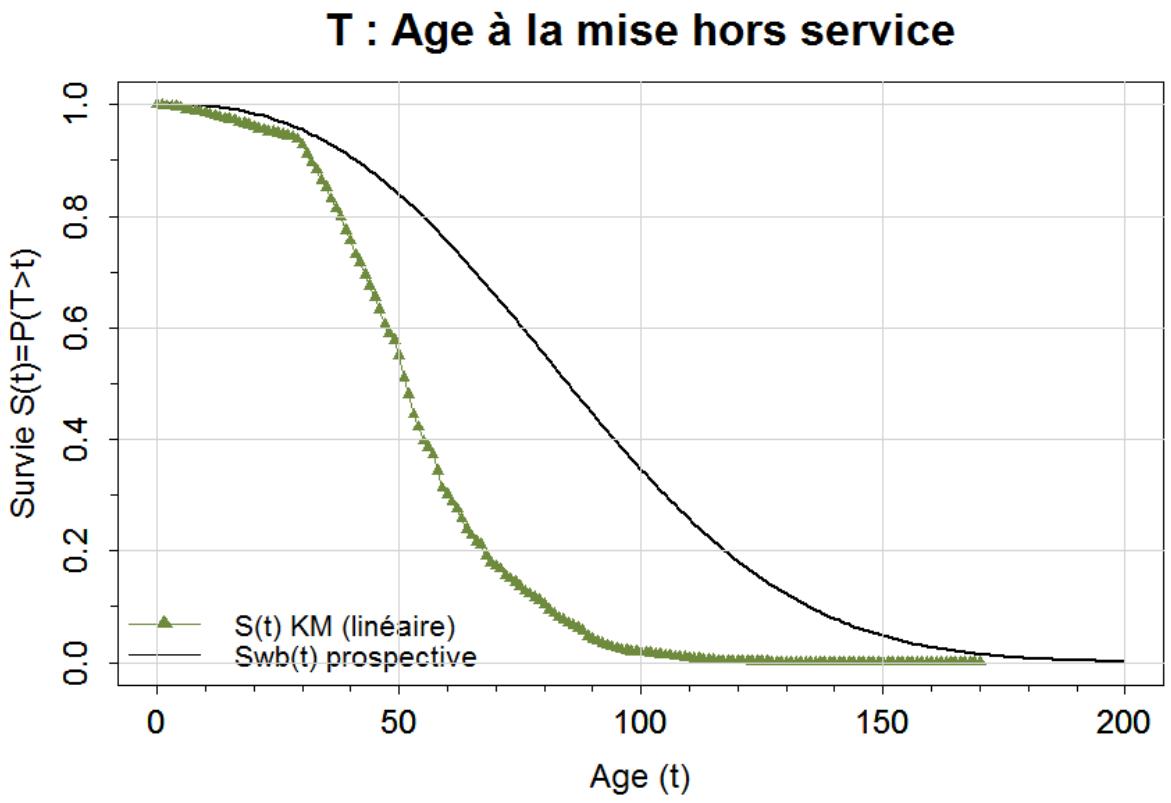


Figure 6 : Courbes de survie prospective en effectif (trait)

IV Calcul des indicateurs I1R, I2R et I3R

IV.1 Entrée

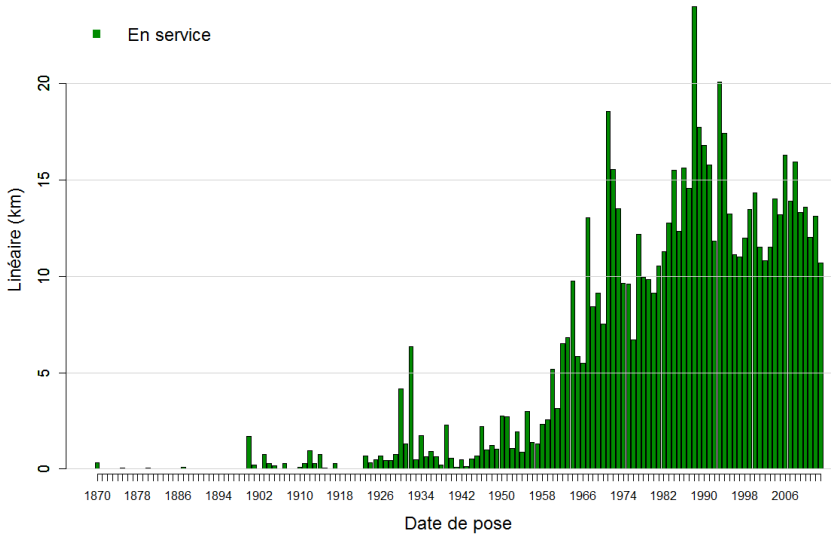


Figure 7 : Linéaire en service (ES) au 31/12/2013

IV.2 Sortie

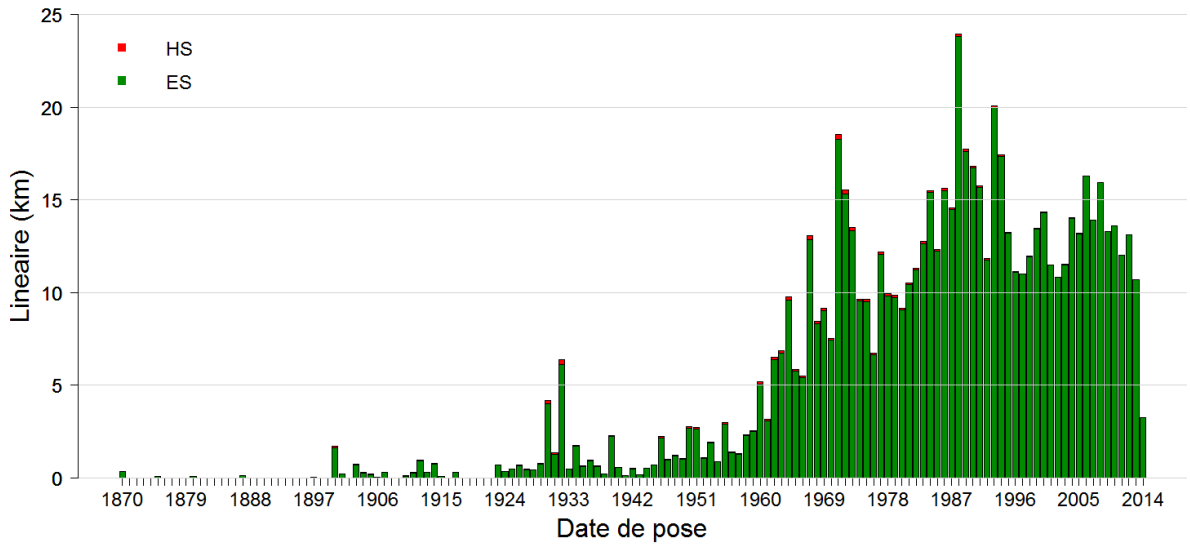


Figure 8 : Linéaire en service (ES) fin 2014 et mis hors service (HS) en 2014 prévision du futur, photographie de la situation fin 2014.

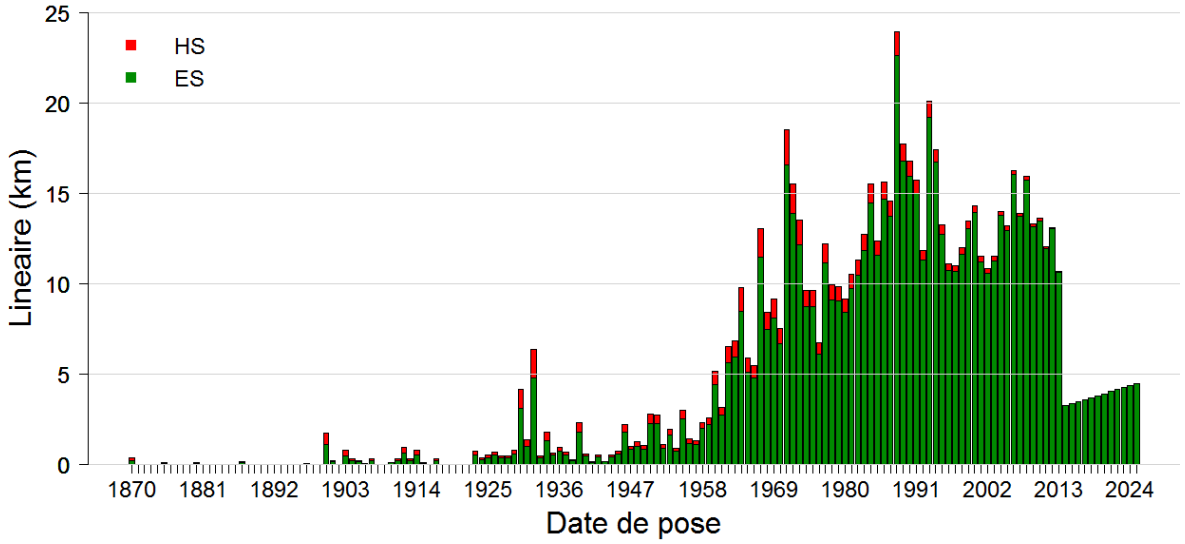


Figure 9 : Linéaire en service (ES) fin 2025 et mis hors service (HS) entre [2014,2025] , prévision du futur, photographie de la situation en 2025

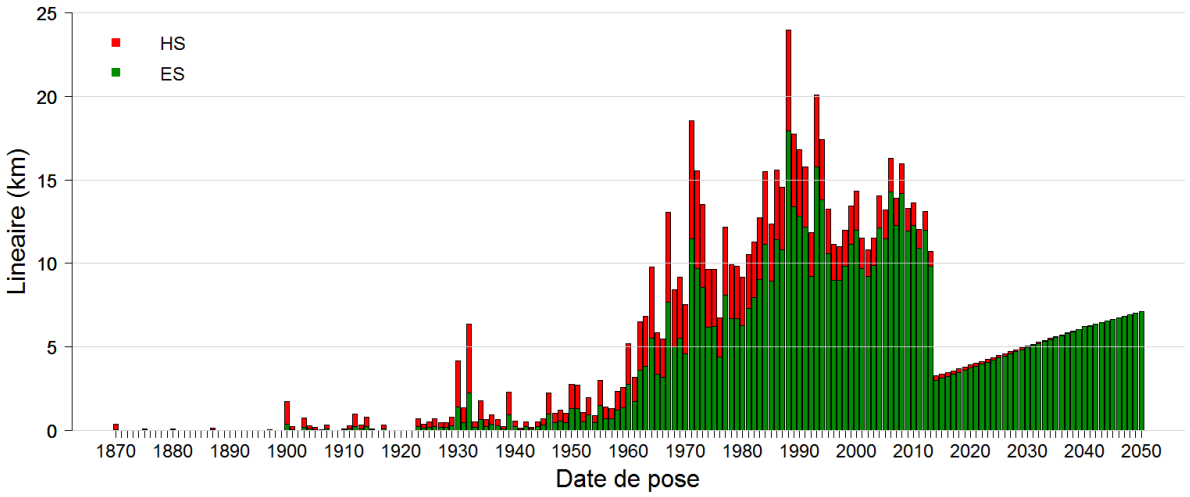


Figure 10 : Linéaire en service (ES) fin 2050 et mis hors service (HS) entre [2014,2050] , prévision du futur, photographie de la situation en 2050.

IV.1 Sortie I2R

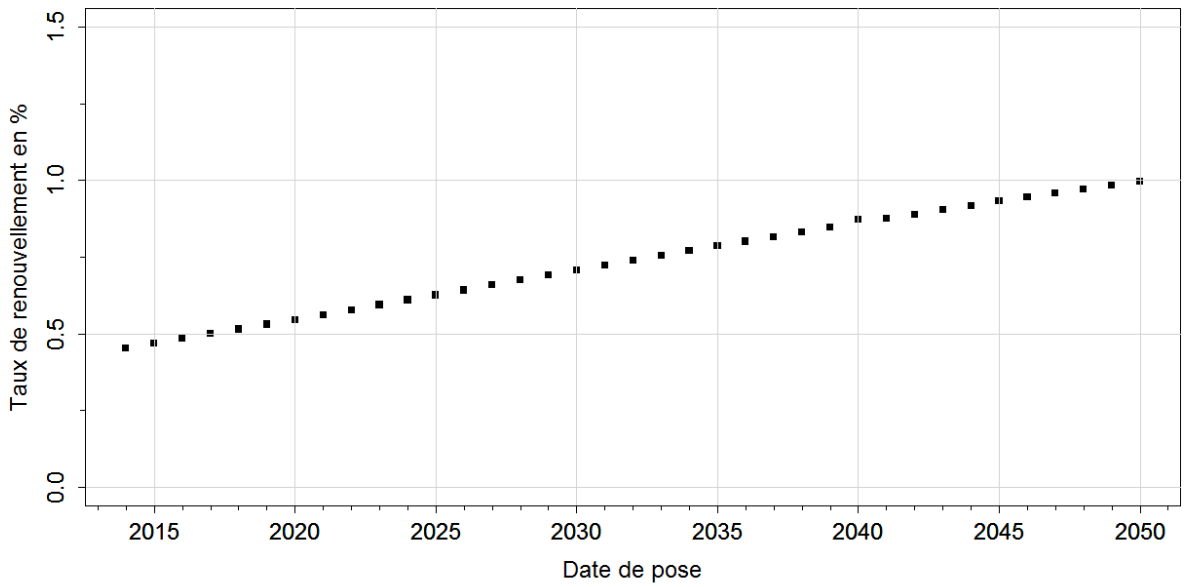


Figure 11 : Prévision des taux de renouvellement futurs de 2014 jusqu'en 2050

IV.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

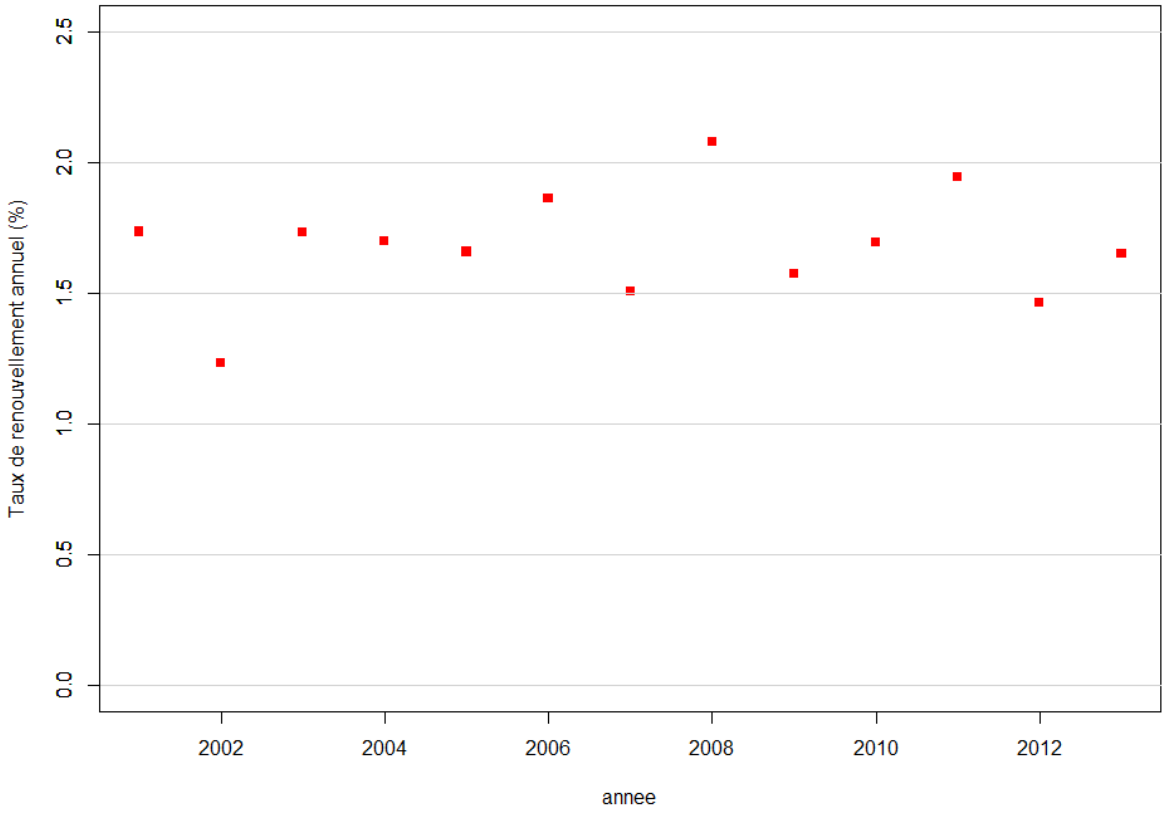


Figure 12 : Taux de renouvellement passé de 2001 à 2013

IV.1 Sortie I3R

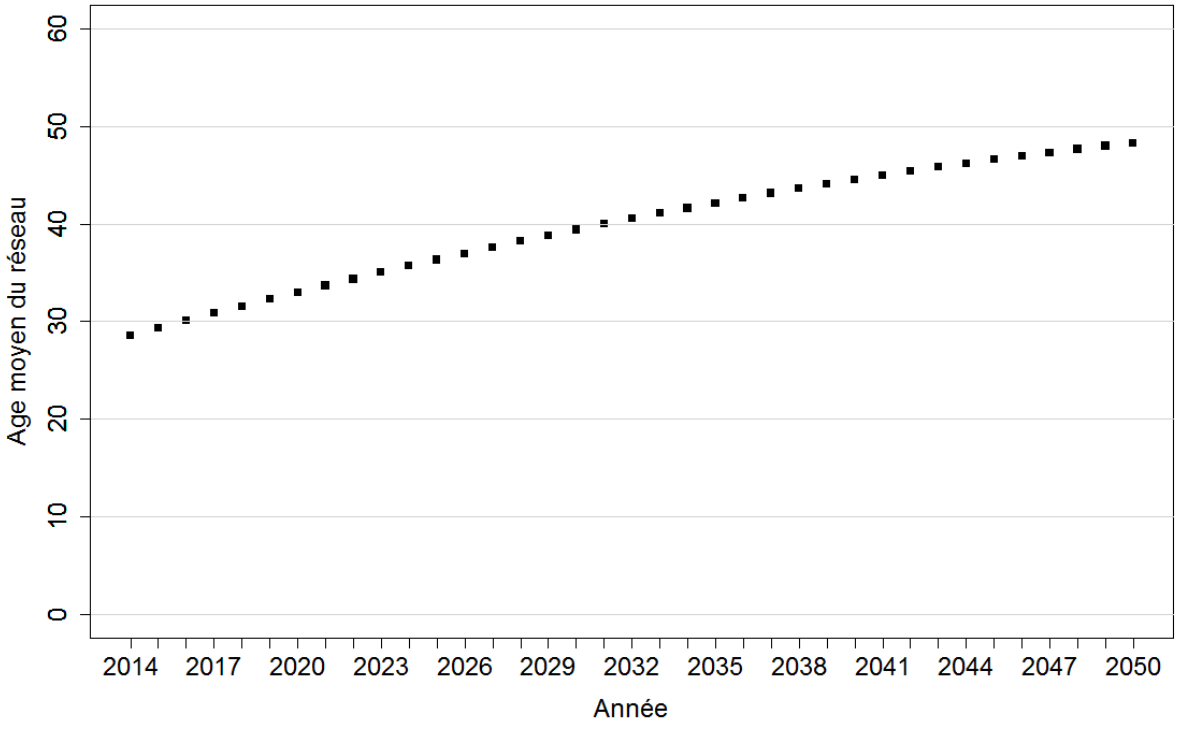


Figure 13 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2014 jusqu'en 2050 à eauservice Lausanne, scénario « statu quo».

V Calcul de l'indicateur I1F

V.1 Entrée

Nom de la strate	Diamètre médian de la strate (en linéaire)	Diamètre pris dans la fiche de coût	Coûts des travaux sans coordination (CHF/m)	Coûts des travaux avec coordination (CHF/m)	Coûts des travaux à la strate (CHF/m)
Toute strate	180 mm	200 mm	574	431	459
Commentaire				-25%	80% coordonnés

V.2 Sortie

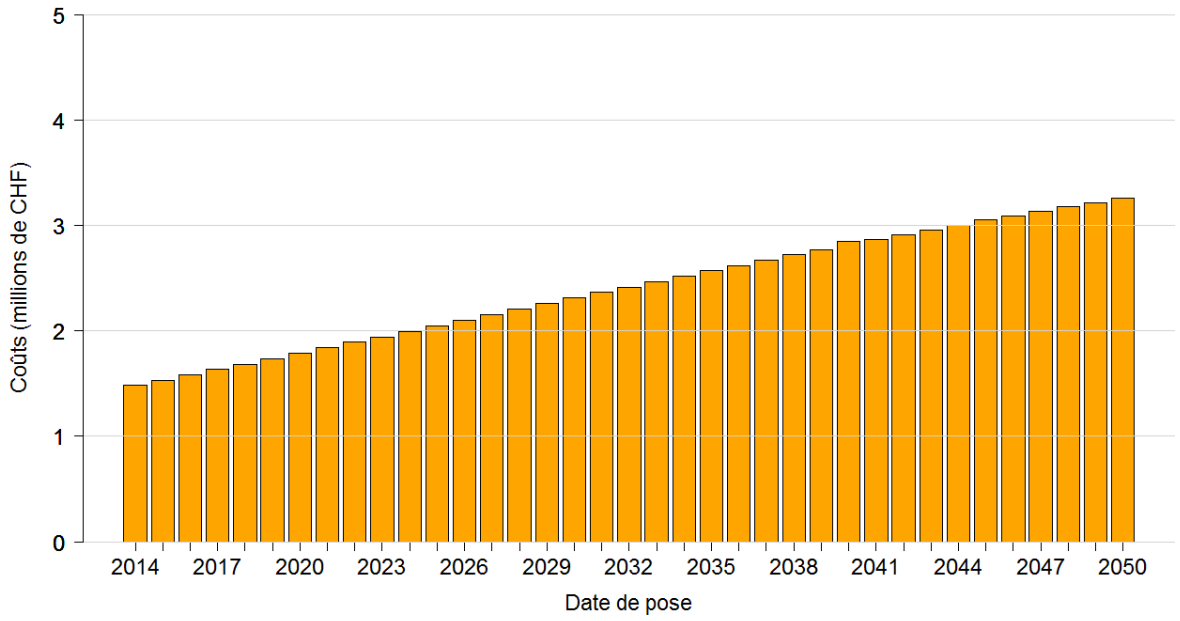


Figure 14 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2014 et 2050, scénario « statu quo».

VI Calcul de l'indicateur I1P

VI.1 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 5

				REHA2			Matériau		
Covariable	Age (t)	Longueur (Z_1)	Diamètre (Z_2)	Oui (Z_3)	Ref non	Pression (Z_4)	Autre matériau (Z_5)	Fonte grise (Z_6)	Ref FD/Acier
Unité	Siècle	m	mm			m			

Tableau 1 : Covariables (et leurs unités) employés dans le modèle LEYP

Paramètres / Nom strate	$\propto$	δ	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
Toute strate	2.9	1.57	-1.55	0.39	-0.0028	0.93	0.04	-0.75	-0.25

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle LEYP

VI.1 Entrée en tronçon

- Cf. Figure 6
- Cf. Tableau 1 & Tableau 2

VI.2 Sorties en tronçons

- Effectif :

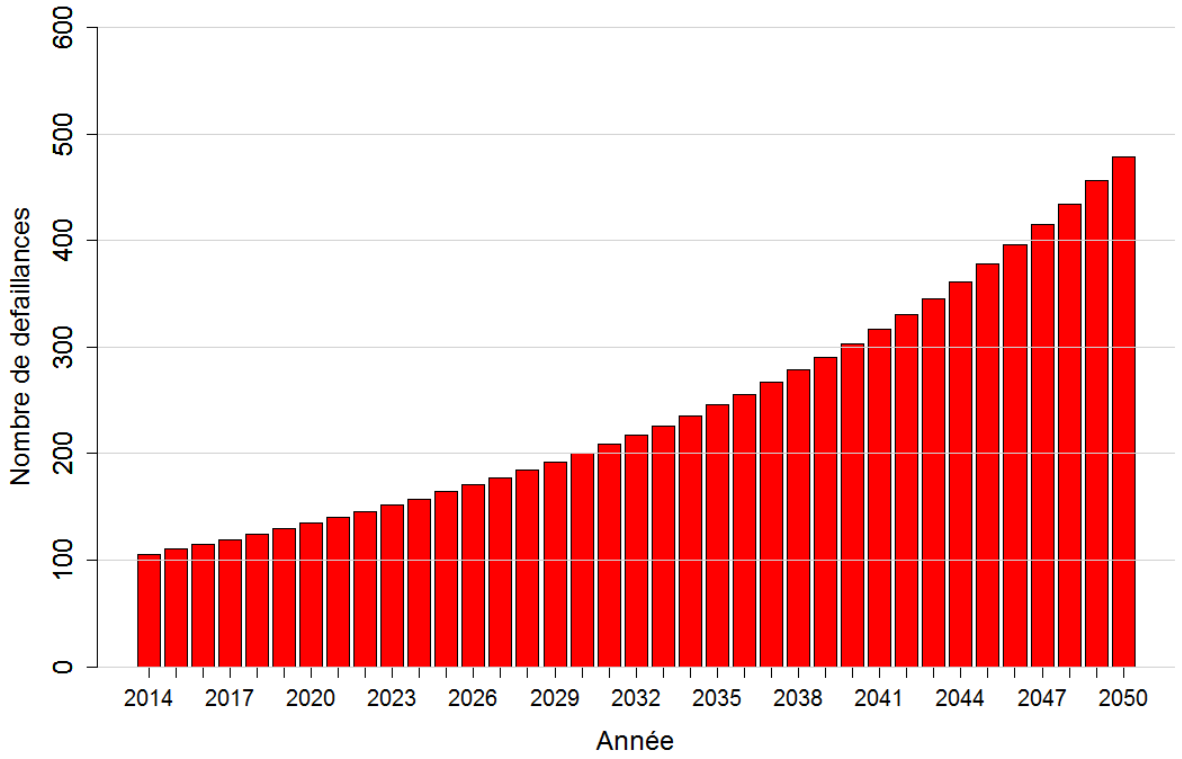


Figure 15 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2014 et 2050, scénario F. Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif

VI.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

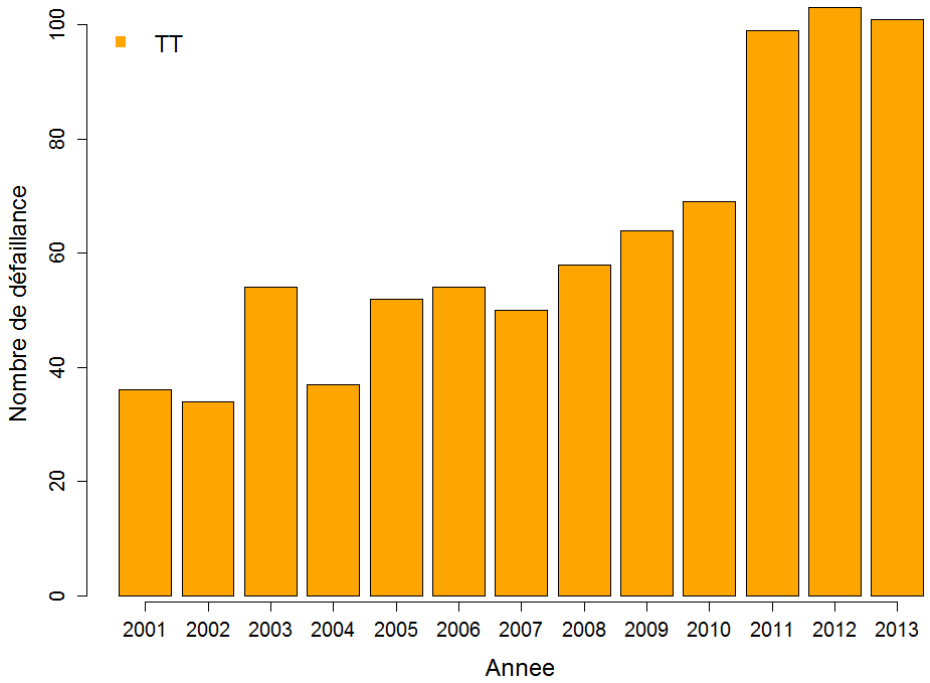


Figure 16 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2013

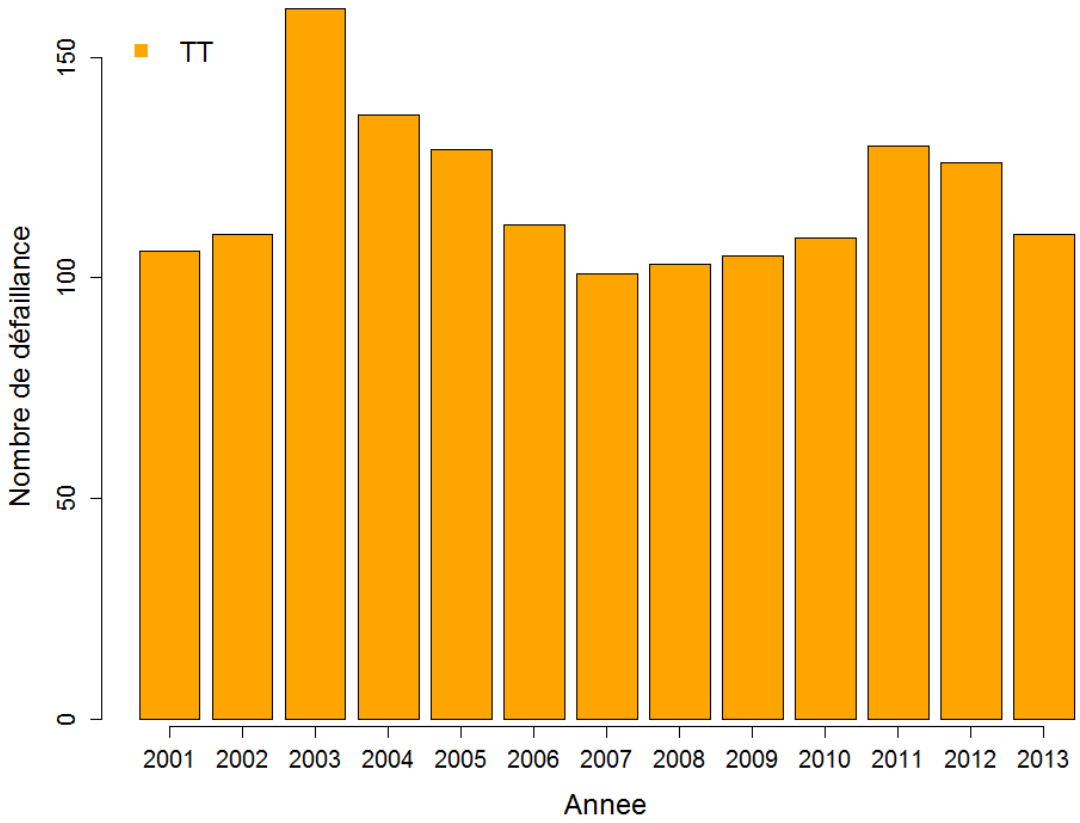


Figure 17 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service et hors service au 31/12/2013

VII Calcul de l'indicateur I2F, coûts du renouvellement

VII.1 Entrée

Cf. Figure 15 (moins les tronçons mis HS en 2014)

CUR_p Coût [CHF]	Materiau	Diamètre (mm)
4 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi < 250$
6 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi \geq 250$
20 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BAT	$\phi < 250$
40 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BAT	$\phi \geq 250$

Tableau 3 : Valeur des coûts de réparation par tronçon

VII.2 Modèle

I2-F = NbDef x Curp

VII.3 Sortie

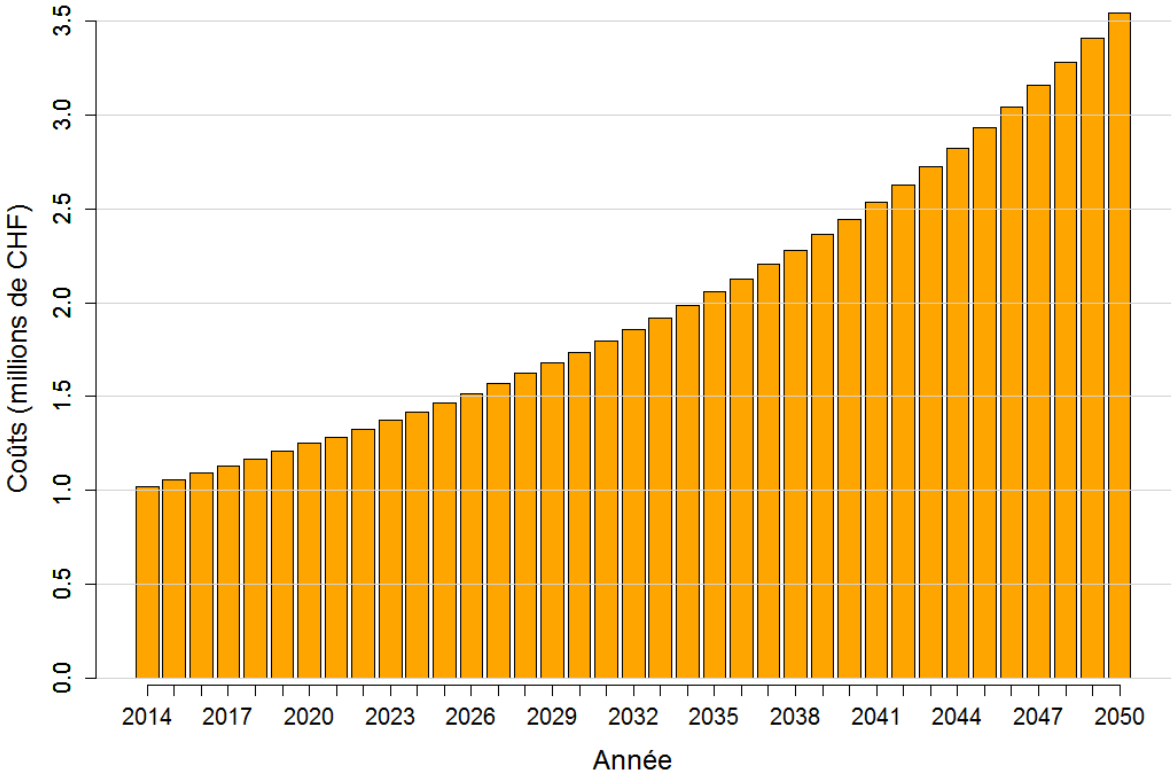


Figure 18 : Prévision pour l'indicateur I6-F entre 2014 et 2050, scénario « statu quo ».

VIII Calcul de l'indicateur I2P continuité

VIII.1 Entrée

Cf. Figure 15 (moins les tronçons mis HS en 2014)

Et

tr (Heures)	Matériau	Diamètre (mm)
3	Acier, fonte ductile, PE	$\phi < 250$
4	Acier, fonte ductile, PE	$\phi \geq 250$
6	Fonte grise, Eternit	$\phi < 250$
8	Fonte grise, Eternit	$\phi \geq 250$

Tableau 4 : Temps de réparation par tronçon

Et

Description	Valeurs de NBH
Haute densité	40
Moyenne densité	25
Centre village	20
Vieille ville	15
Z.I. sensible	5
Z.I. normale	5
Faible densité	5
Transport bouclage	0
Zone verte	0

Tableau 5 : Coefficient lié au nombre d'usager associé à ce tronçon

Valeurs SC	Description
1	Clients sensibles
0.6	Z.I. sensible
0.5	Z.I. normale
0.3	Haute densité
0.2	Vieille ville
0.2	Centre village
0.2	Moyenne densité
0.1	Faible densité
0	Transport bouclage
0	Zone verte

Tableau 6 : Coefficient lié à la vulnérabilité des usagers associé à ce tronçon

VIII.2 Modèle

I2-P-continuite = NbDef x tr x NPS x SC

VIII.1 Sortie

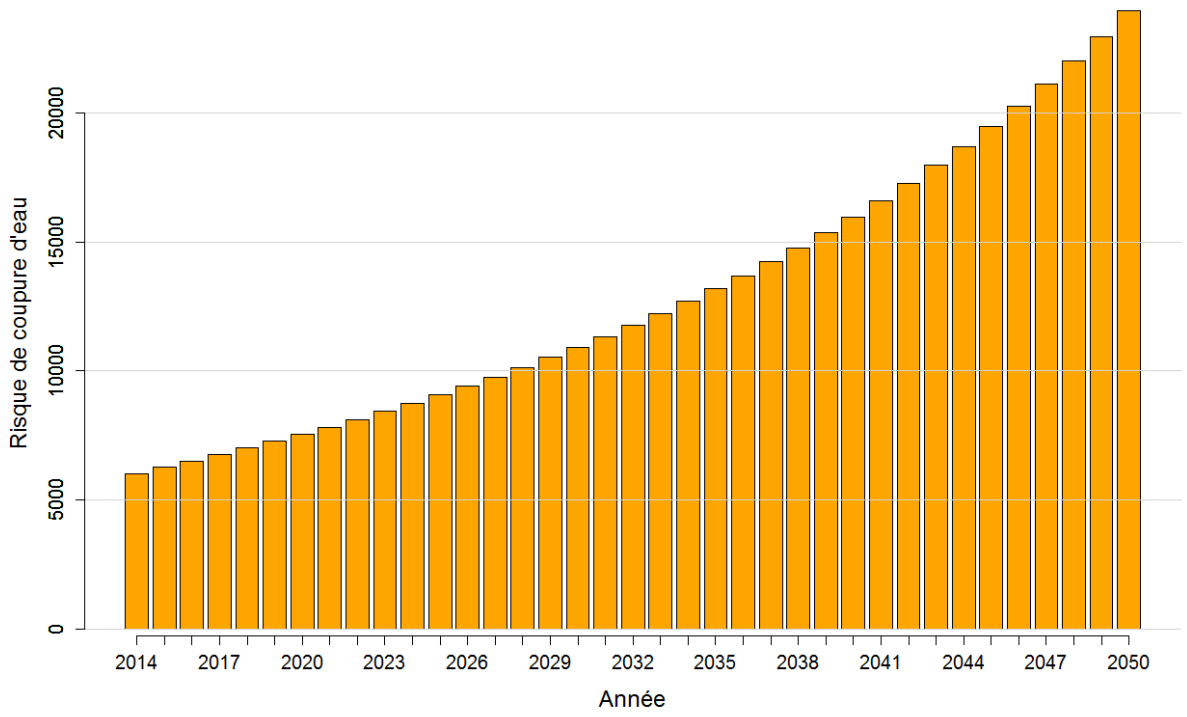


Figure 19 : Prévision pour l'indicateur I7-P_continuité entre 2014 et 2050, scénario « statu quo».

IX Calcul de l'indicateur I3P voirie

IX.1 Entrée

Cf. Figure 15 (moins les tronçons mis HS en 2014)

cf. Tableau 4

Valeur de SR	Transport en commun	Niveau du trafic
1	TL trolleybus	trafic $\geq$ 15000
0.9	TL trolleybus	trafic $<$ 15000
0.8	TL Bus	trafic $\geq$ 15000
0.7	TL Bus	trafic $<$ 15000
0.7	pas TL	trafic $\geq$ 20000
0.5	pas TL	20000 $>$ trafic $\geq$ 10000
0.4	pas TL	10000 $>$ trafic $\geq$ 5000
0.2	pas TL	5000 $>$ trafic $\geq$ 500
0.0	pas TL	trafic $<$ 500

Tableau 7 : Coefficient lié à la quantité et à la vulnérabilité du trafic routier associé à ce tronçon

IX.1.1 I3P voirie

I8-P-voirie = NbDef x tr x SR

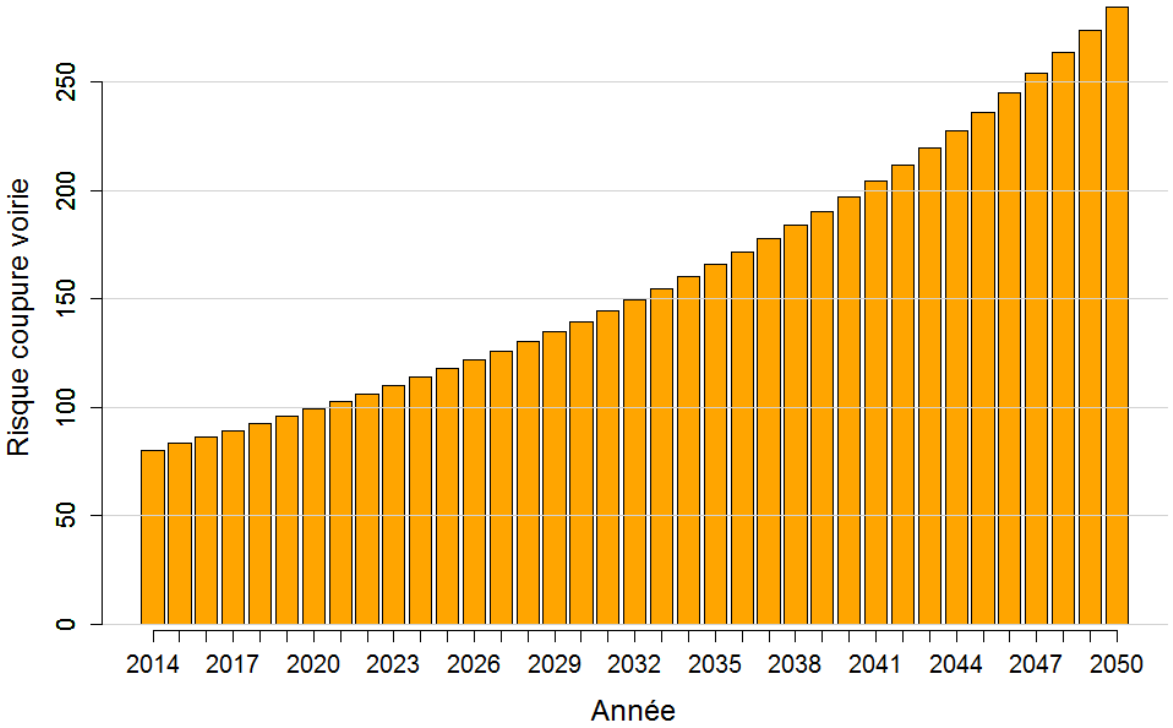


Figure 20 : Prévision pour l'indicateur I7-P_voirie entre 2014 et 2050, scénario « statu quo »

X Calcul de l'indicateur I4P inondation

X.1 Entrée

Cf. Figure 15 (moins les tronçons mis HS en 2014)
+ diamètre du tronçon (mm)
+ pression de l'eau dans le tronçon (m de colonne d'eau)

SI	Description
1	Vieille ville
0.8	Z.I. sensible
0.6	Haute densité
0.5	Centre village
0.4	Moyenne densité
0.4	Z.I. normale
0.2	Faible densité
0	Transport bouclage
0	Zone verte

Tableau 8 : Coefficient lié à la quantité, à la vulnérabilité et à la valeur des biens autour du tronçon

X.1 Modèle

I9-P-innondation = NbDef x dia x dia x PRES x SI

X.1 Sortie

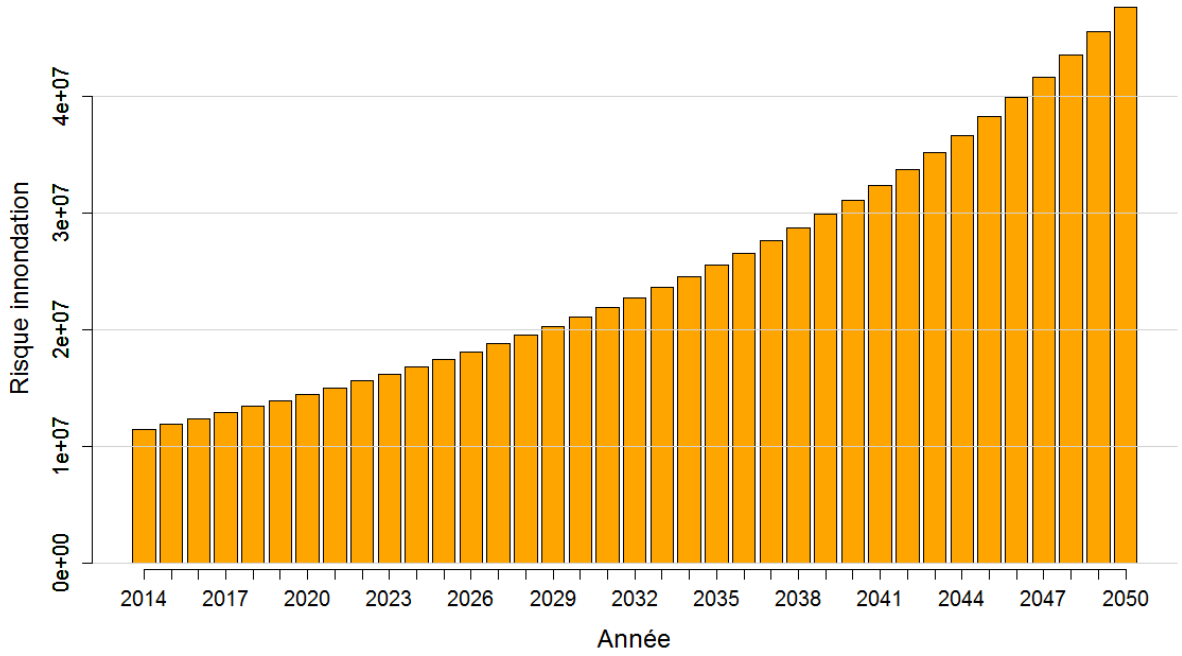


Figure 21 : Prévision pour l'indicateur I7-P_inondation entre 2014 et 2050, scénario « statu quo ».

XI Calcul de l'indicateur I6P Volume de fuite

XI.1 Entrée

Cf. Figure 15 (moins les tronçons mis HS en 2014)
+ diamètre du tronçon (mm)
+ régression linéaire diamètre volume d'eau perdu

XI.2 Modèle

I9-P-innondation = NbDef x dia / mean(dia) x 290

XI.3 Sortie

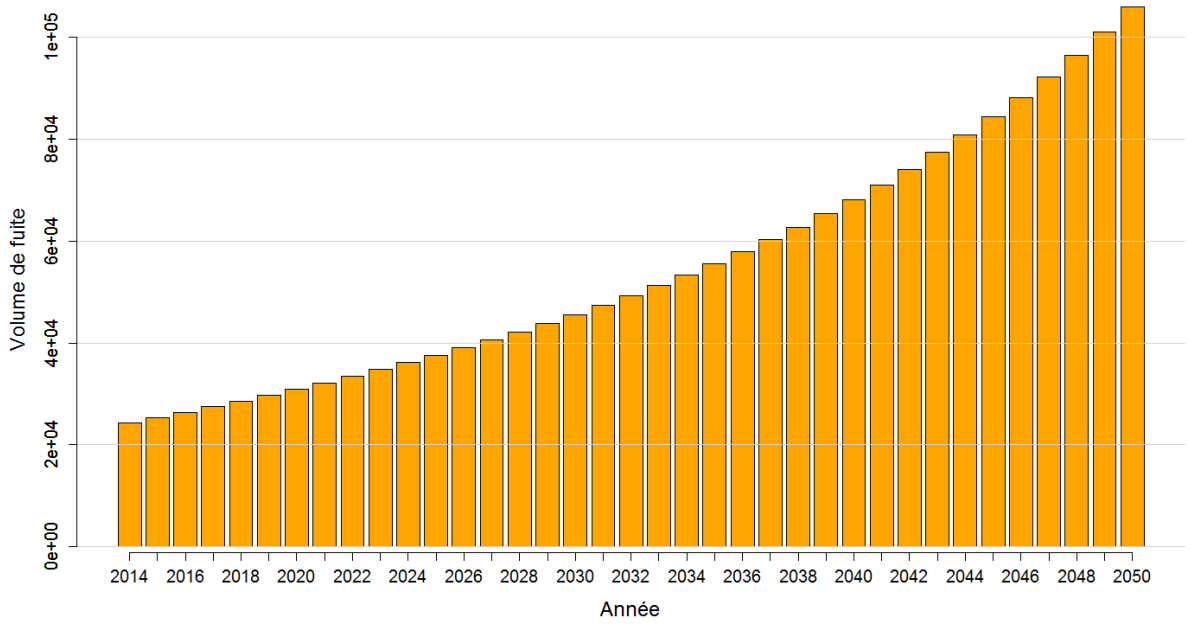


Figure 22 : Prévision pour l'indicateur IP6 entre 2014 et 2050, scénario « statu quo ».

XII Modèle de Cox

Variable	exp(coef)	IC max	IC min	P-value
Gros diamètre	0.70	0.78	0.63	< 0.05
Petit diamètre	Référence	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Longueur	0.99	0.99	0.99	< 0.05
FG	Référence	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Autre	0.84	0.94	0.75	< 0.05
SC	1.41	2.01	0.98	Sans objet
SI	1.65	2.11	1.29	< 0.05
REHA non	Référence	Sans objet	Sans objet	Sans objet
REHA oui	0.21	0.34	0.14	< 0.05
NbrDefAn	13.33	17.9	9.92	< 0.05
Hab_br	1.01	1.01	1.00	< 0.05

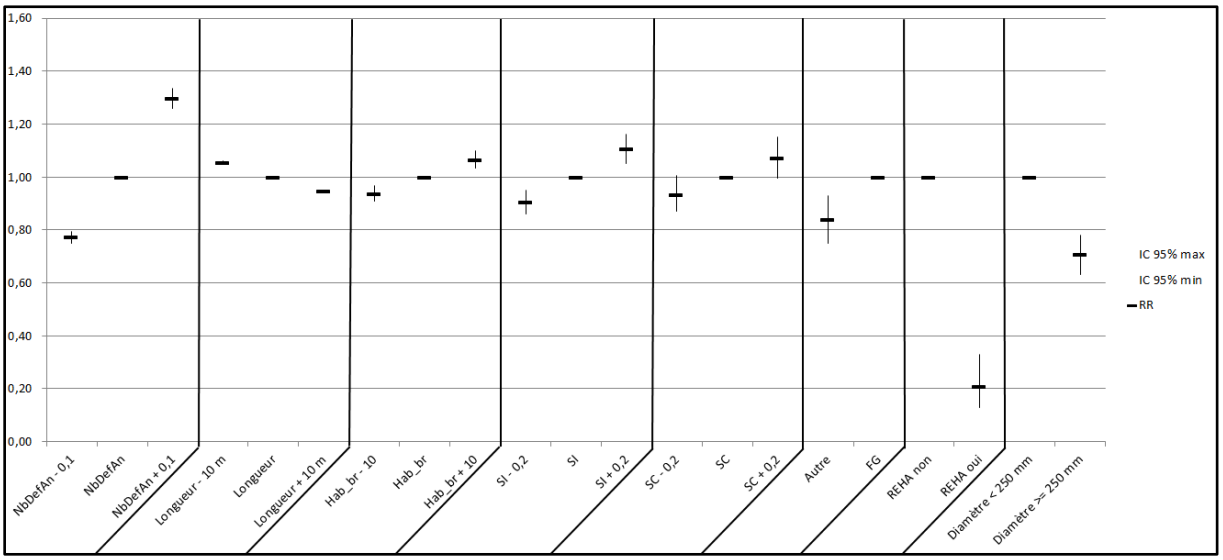


Figure 23 : Causes de mise HS en fonction des covariables

XIII Weibull Covariable

Variable	Coefficient	Estimation	$\exp(\hat{\beta})$	Initialisation de Nelder & Mead	P-value
Age	$\widehat{\delta_1}$	1.98	Sans objet	2	< 0.05
Sans objet	$\widehat{\beta_0}$	-7.37	Sans objet	0	< 0.05
Petit diamètre	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet
Gros diamètre	$\widehat{\beta_2}$	-0.34	0.71	0	< 0.05
Longueur	$\widehat{\beta_3}$	-0.005	0.99	0	< 0.05
FG	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet
Autre	$\widehat{\beta_4}$	-0.46	0.63	0	< 0.05
SI	$\widehat{\beta_4}$	0.5	1.64	0	< 0.05
Hab_br	$\widehat{\beta_5}$	0.009	1.01	0	< 0.05
REHA non	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet
REHA oui	$\widehat{\beta_6}$	-1.28	0.27	0	< 0.05
NbrDefAn	$\widehat{\beta_7}$	2.59	13.3	0	< 0.05

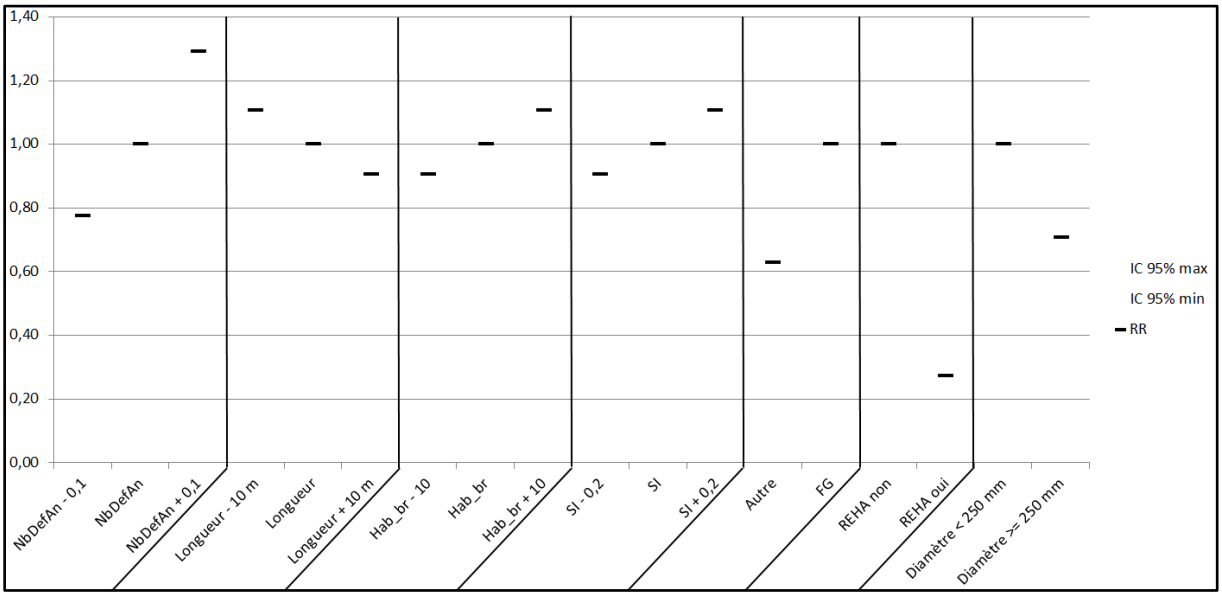


Figure 24 : Causes de mise HS en fonction des covariables

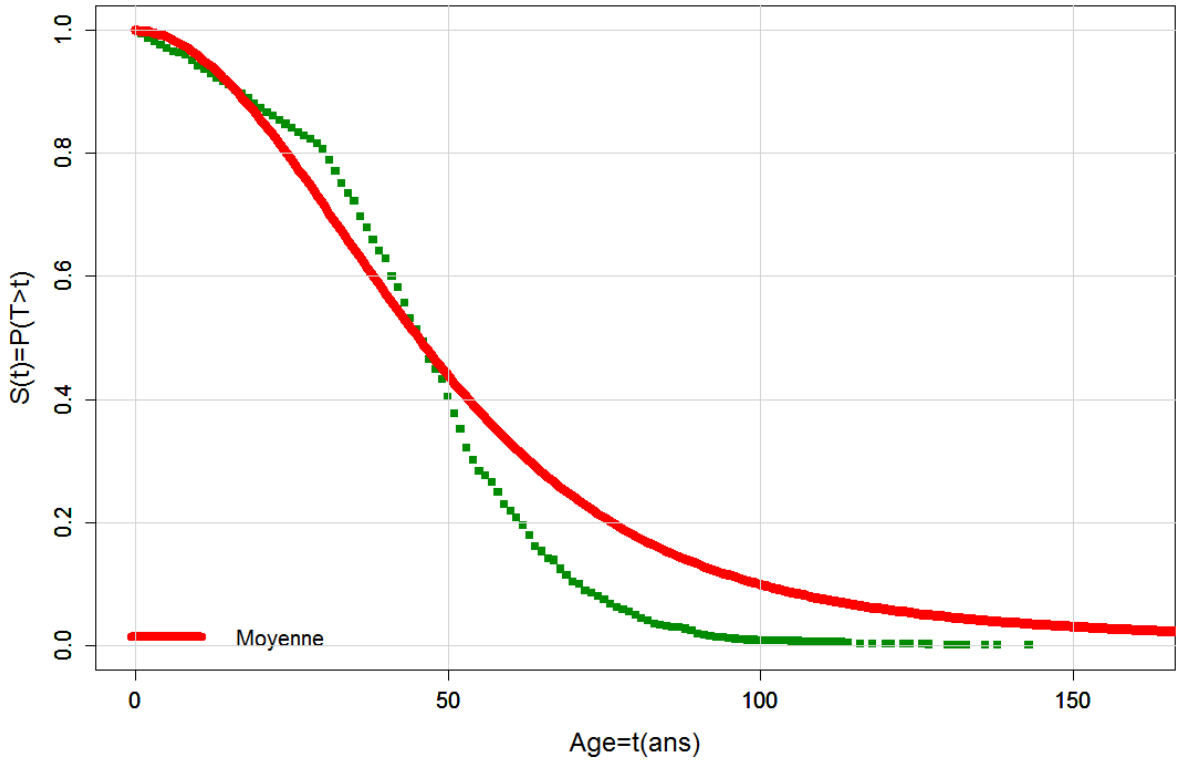


Figure 25 : Courbes de survie de Kaplan-Meier en linéaire tous tronçons et moyenne équation de Weibull covariable en linéaire

Scénario 7 (code K)

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Périmètre	Tout le réseau		Réseau en ville									
Stratifié ?	Non	Ville/ Montagne	Non				Diamètre	NDOA	Matériaux		Vulnérabilité	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2001; 2012]		[2001; 2007]	[2001; 2013]								
Statu quo ?	Oui		Oui		On arrête de renouveler	On vise un TR de 1%	Oui			Plus drastique avec les fontes grises	Oui	> autour des éléments vulnérables

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

⇨ Donnée Christelle 2014

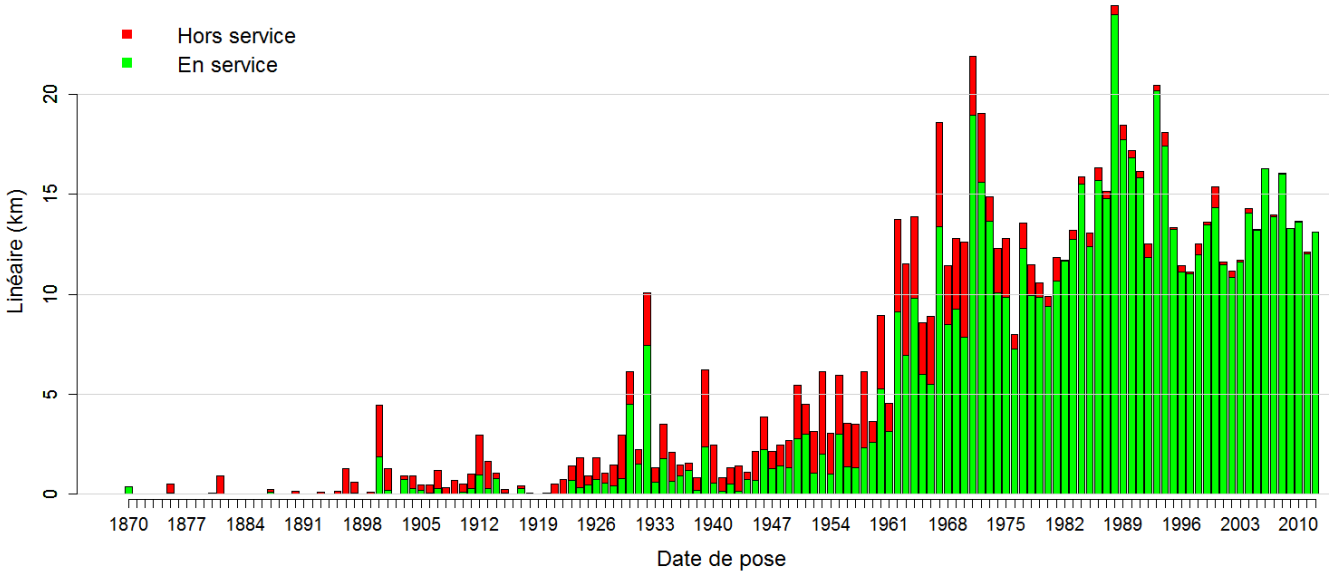


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service (715 km) et Hors Service (144 km) au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2001 ; 2012])

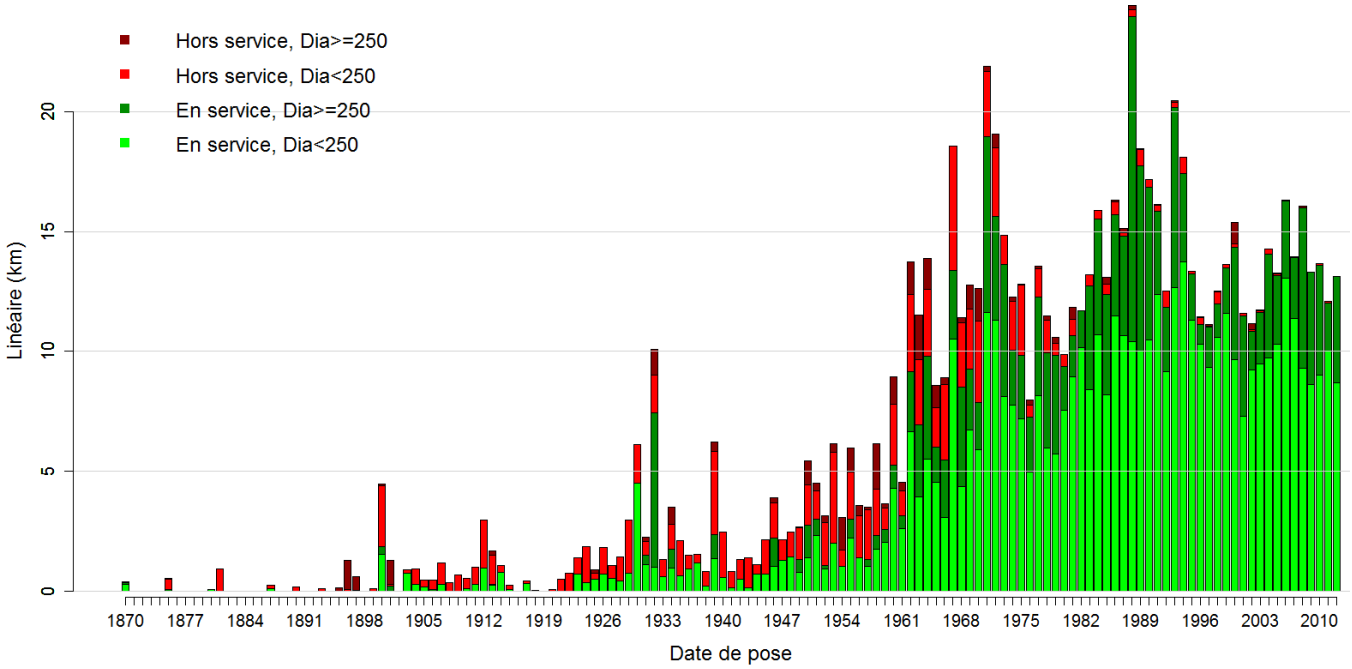


Figure 2 : Linéaire en service en 31/12/2012 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon deux classes de diamètre et selon le statut.

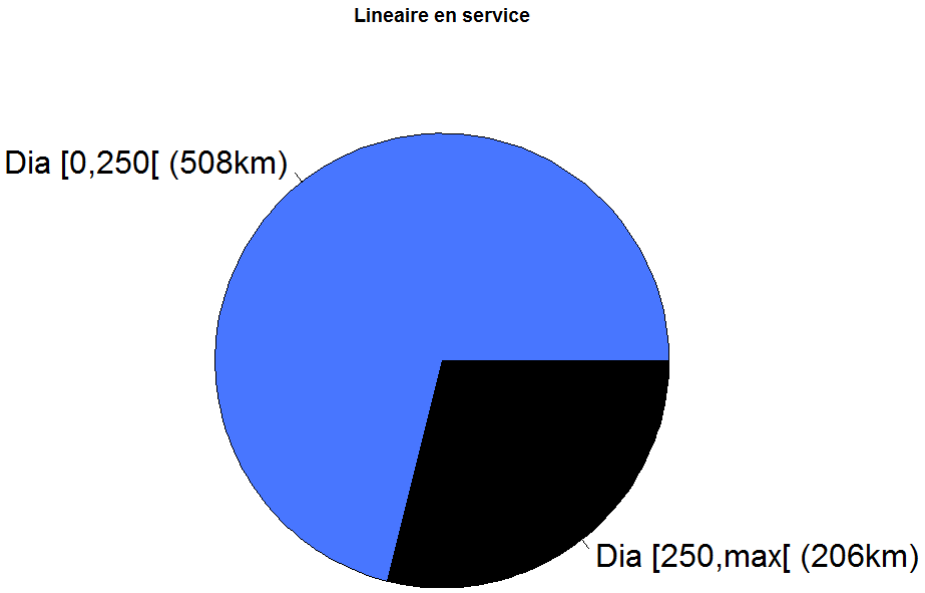


Figure 3 : Proportion du linéaire ES en fonction de deux classes de diamètre

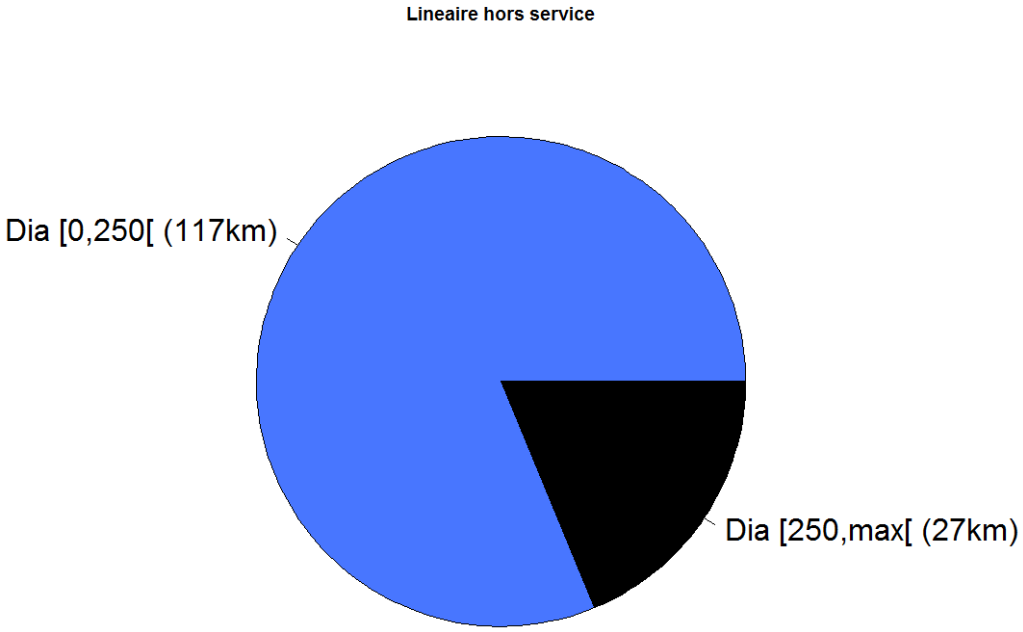


Figure 4 : Proportion du linéaire HS en fonction de deux classes de diamètre

I.2 Sortie en linéaire

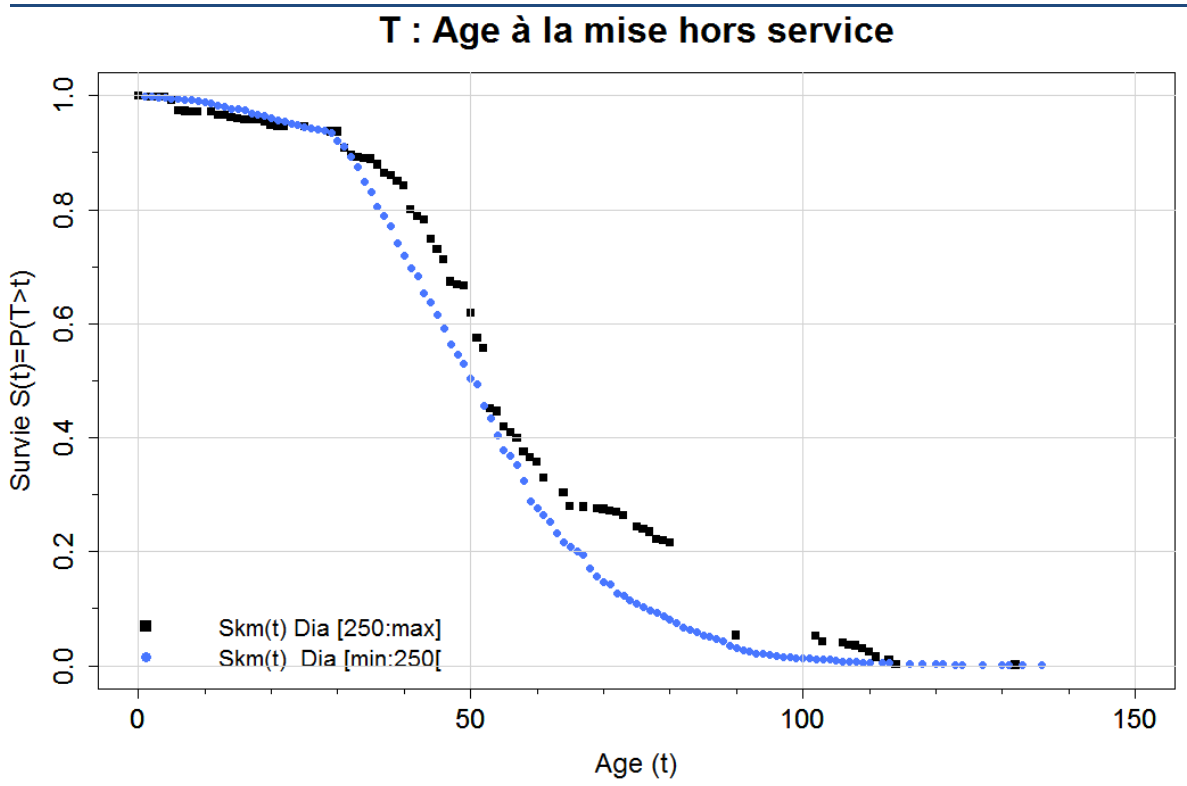


Figure 5 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en linéaire tronçons partitionnés par le diamètre

I.1 Entrée en effectif

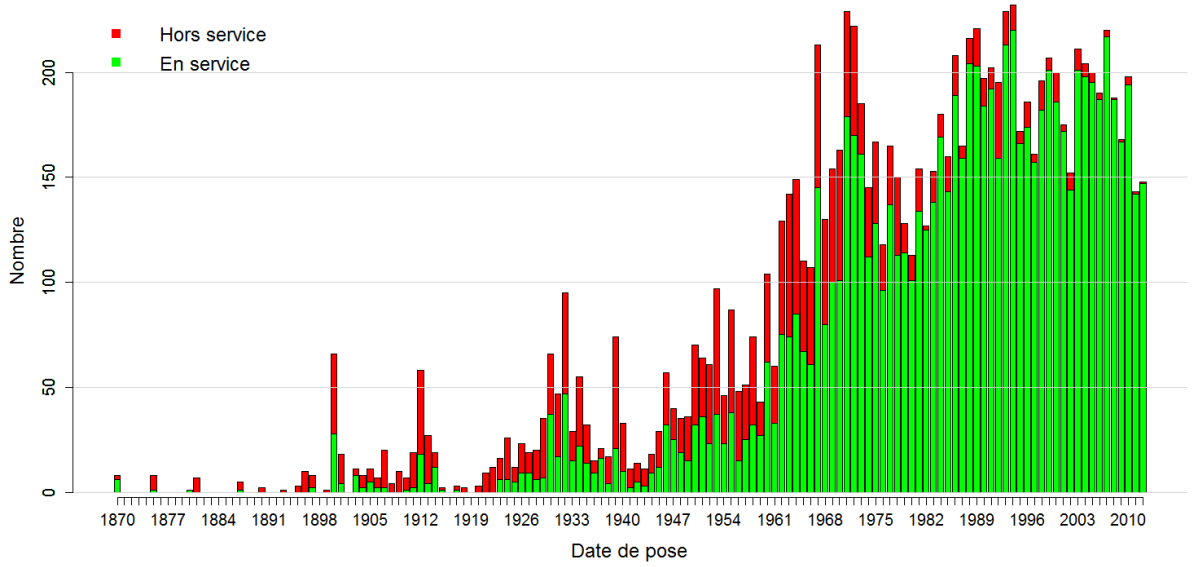


Figure 6 : Histogramme du nombre de tronçons En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2001 ; 2012])

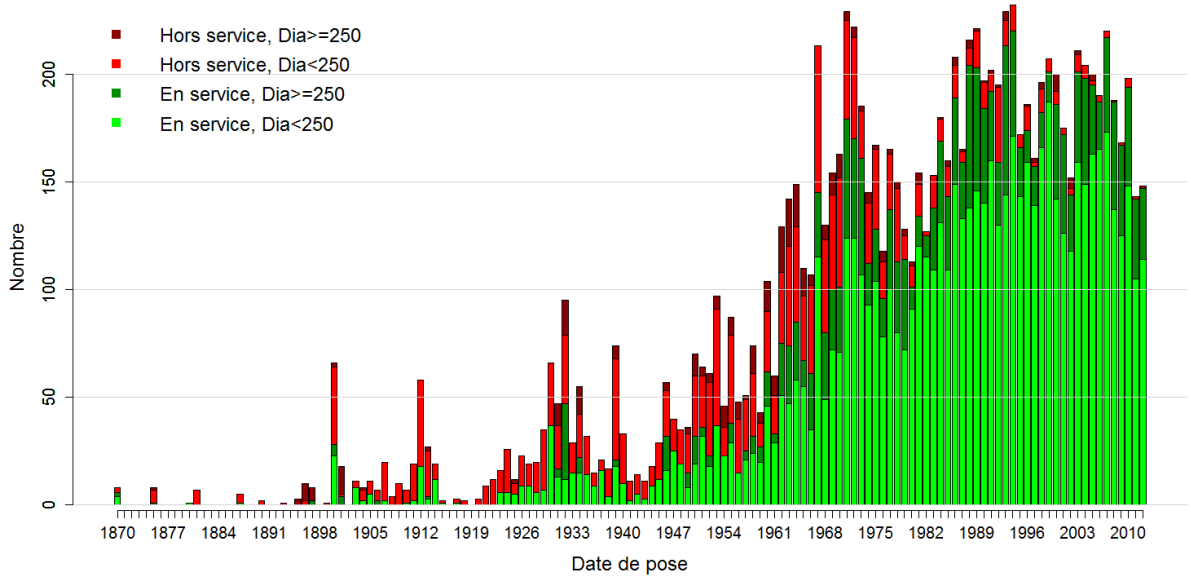


Figure 7 : Nombre de tronçons en service en 31/12/2012 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon deux classes de diamètre et selon le statut.

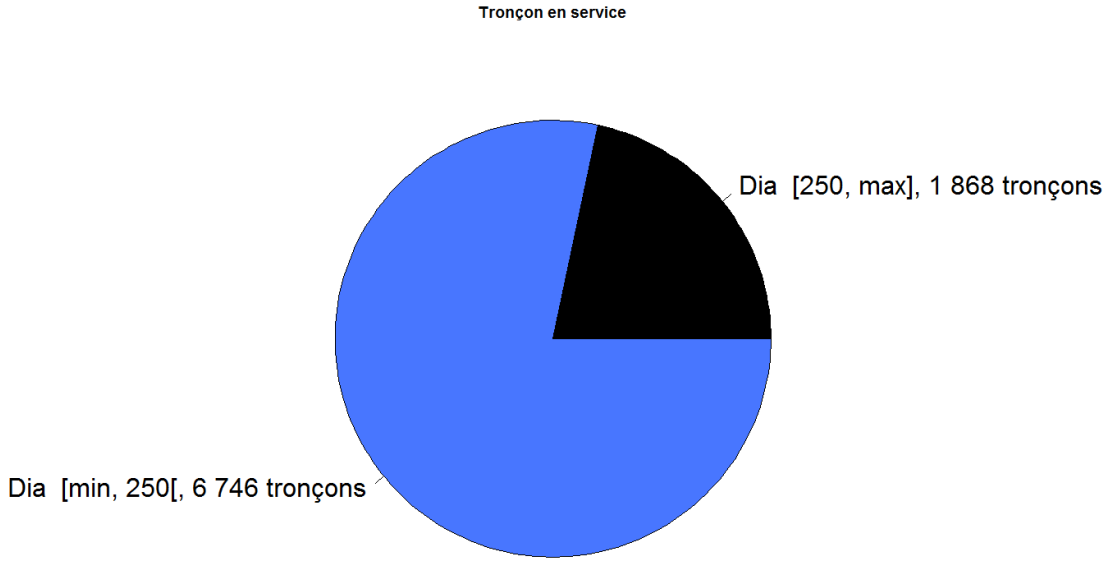


Figure 8 : Proportion du nombre de tronçon ES en fonction de deux classes de diamètre

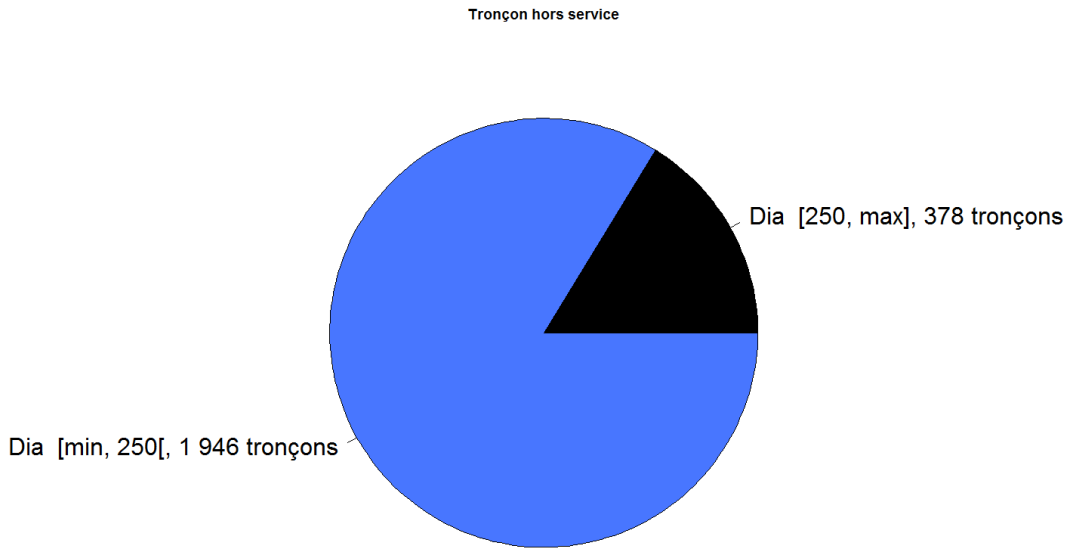


Figure 9 : Proportion du nombre de tronçon HS en fonction de deux classes de diamètre

I.2 Sortie en effectif

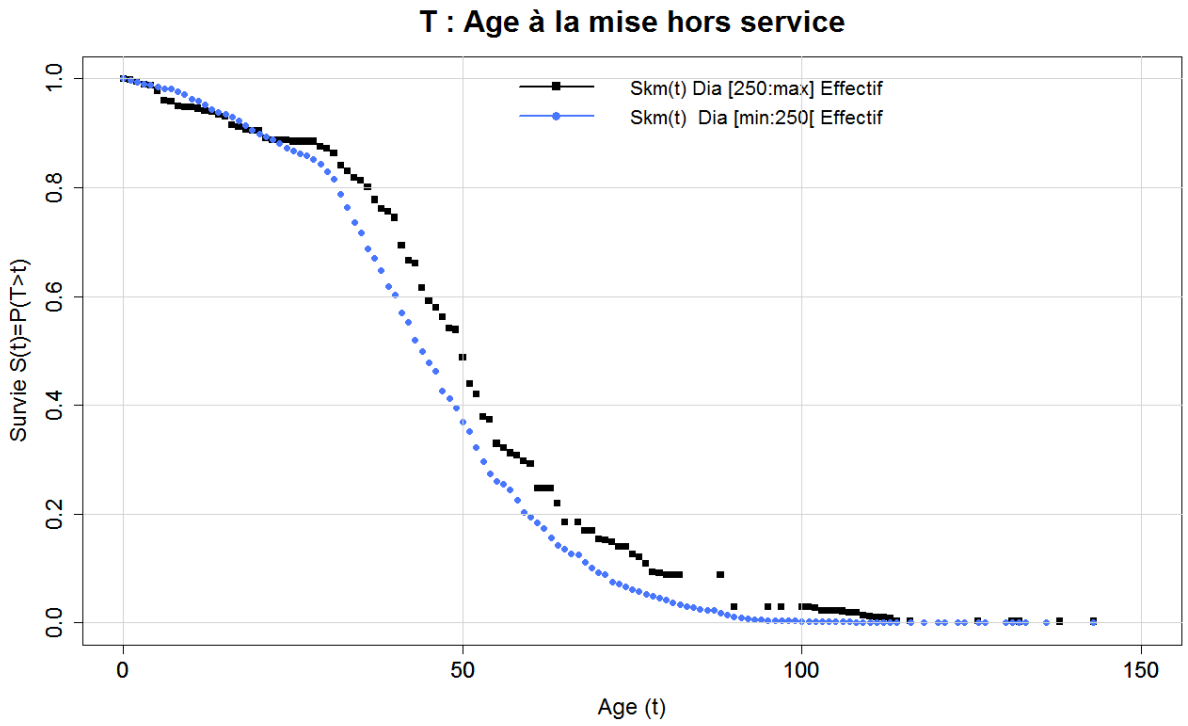


Figure 10 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en nombre de tronçons partitionnés par le diamètre

II Scénario K

- scénario prospectif « Statu quo » : « A l' avenir la distribution des âges à la mise hors service des canalisations sera strictement identique à celle de Lausanne par le passé ».

- Groupe de tronçons : transport normal + distribution (moins Brêt et moins les moins de 6m)
- Date export donné : 2014 par Christelle
- Photographe des données au 31/12/2012
- stratification selon le diamètre
    - Diamètre [min, 250[
    - [250 ; max [
- Courbes de survie prospectives les même pour tous les matériaux que par le passé
- Date fin simulation : 2050
- Taux de travaux coordonnés : 80%. Taux des travaux non coordonnées : 20%. Les travaux coordonnés coûtent 25% moins cher que les travaux non coordonné.

III Construction scénario prospectif K

III.1 Entrée en linéaire

Cf. : Figure 5

III.2 Sortie en linéaire

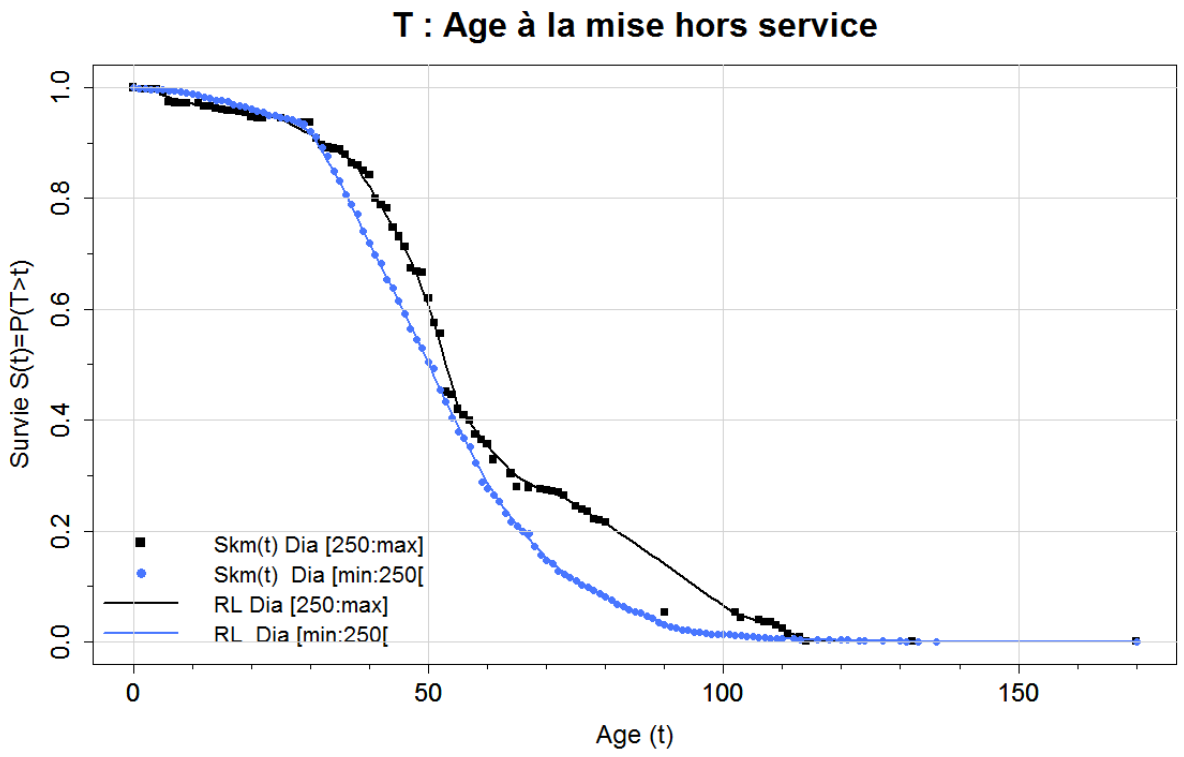


Figure 11 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait) par classe de diamètres

III.1 Entrée en effectif

Cf. : Figure 10

III.2 Sortie en effectif

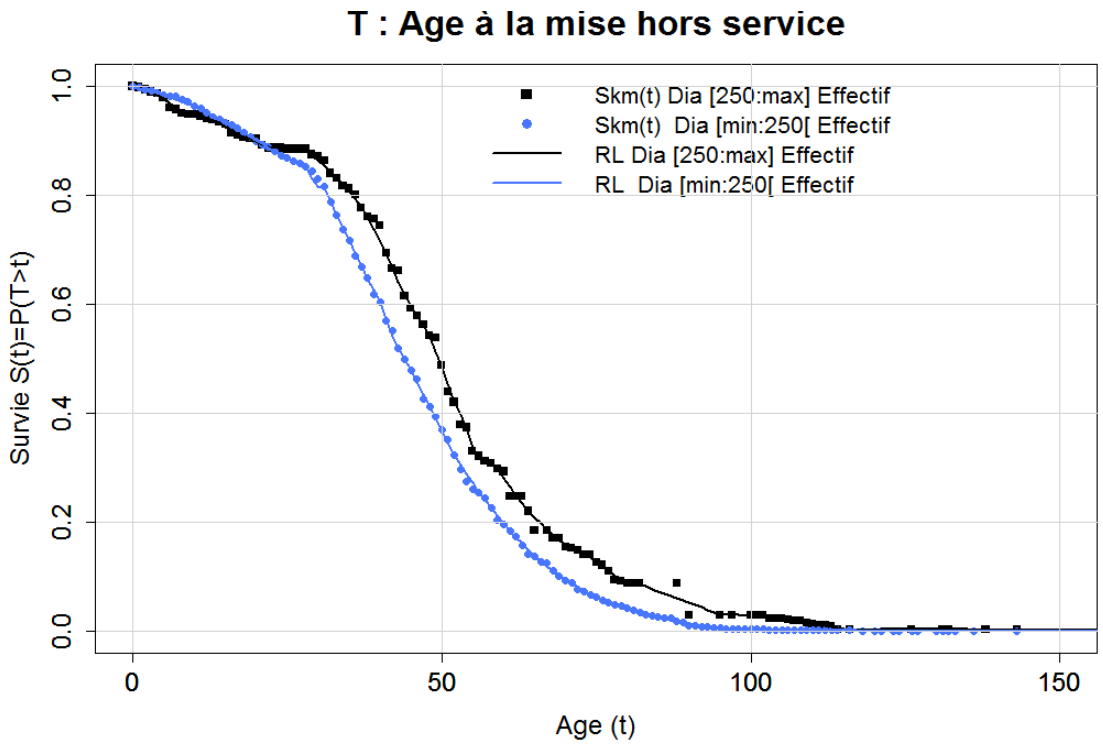


Figure 12 : Courbes de survie prospective en effectif (trait) par classe de diamètres

III.3 Comparaison des sorties en linéaire et en effectif

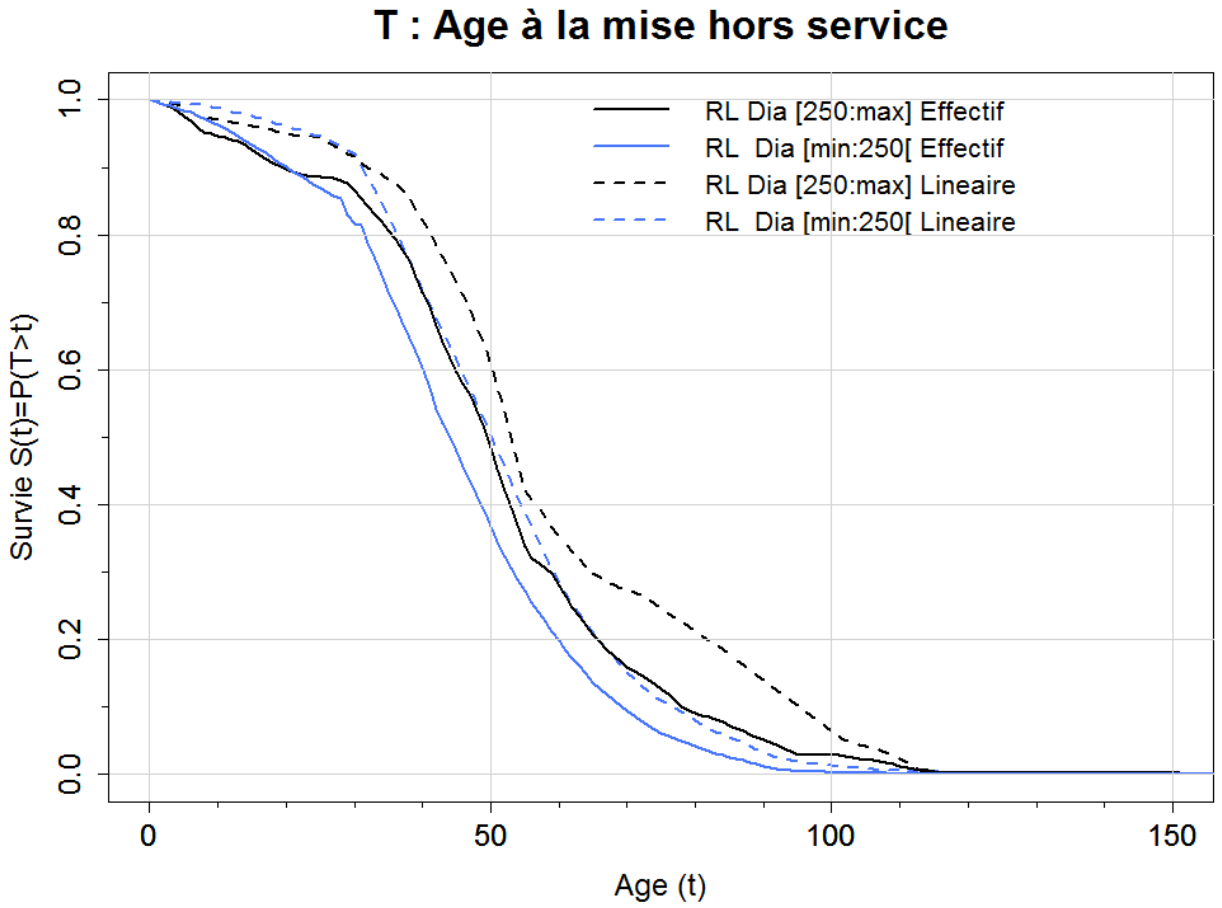


Figure 13 : Comparaison courbes de survie prospective en effectif et en linéaire par classe de diamètres

IV Calcul des indicateurs I1R, I2R et I3R

IV.1 Entrée

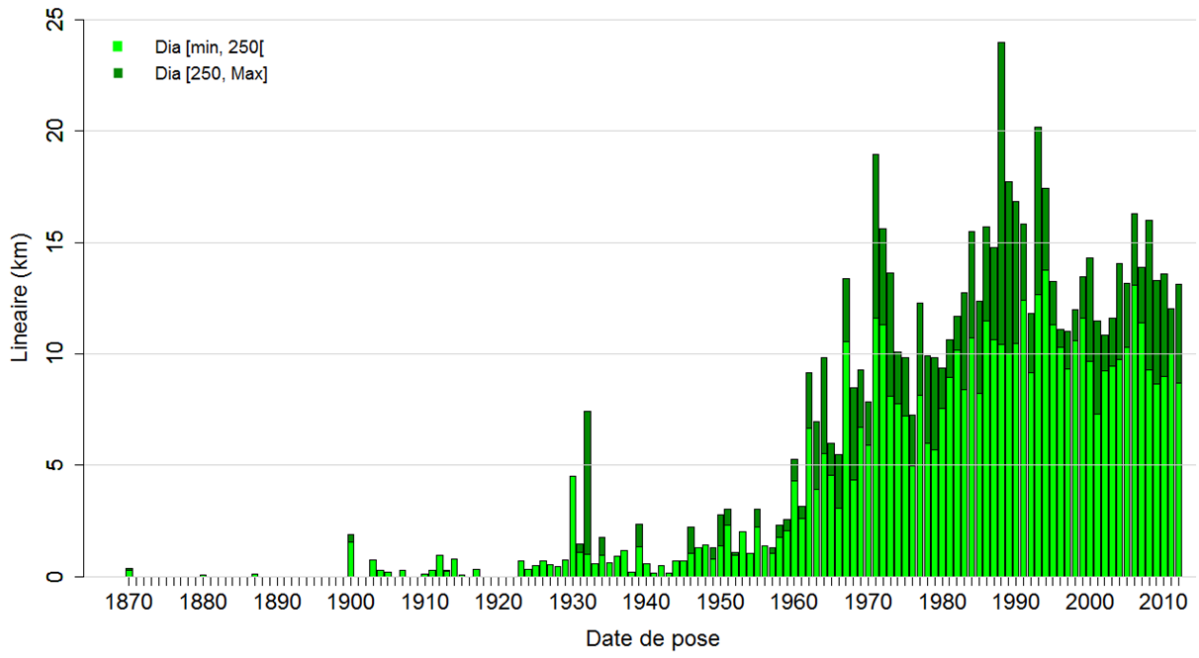


Figure 14 : Linéaire en service en 31/12/2012 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon deux classes de diamètre.

IV.2 Sortie

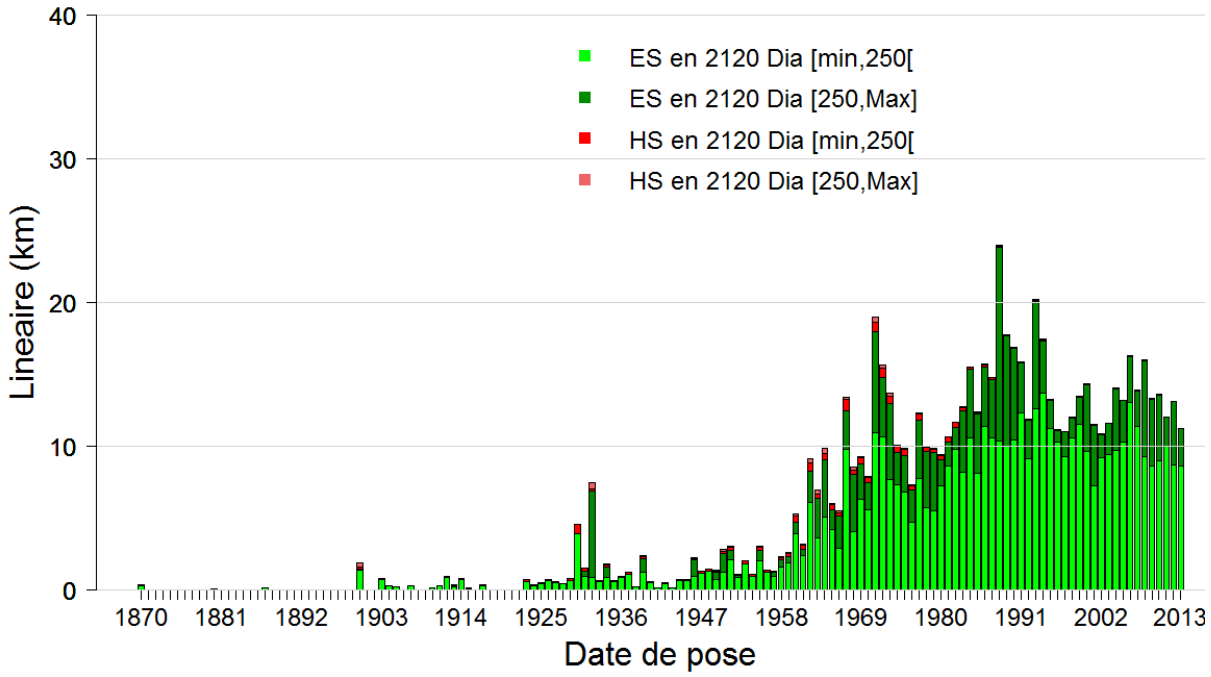


Figure 15 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2013, photographie de la situation en 2013, tronçons partitionnés en deux strates selon le diamètre

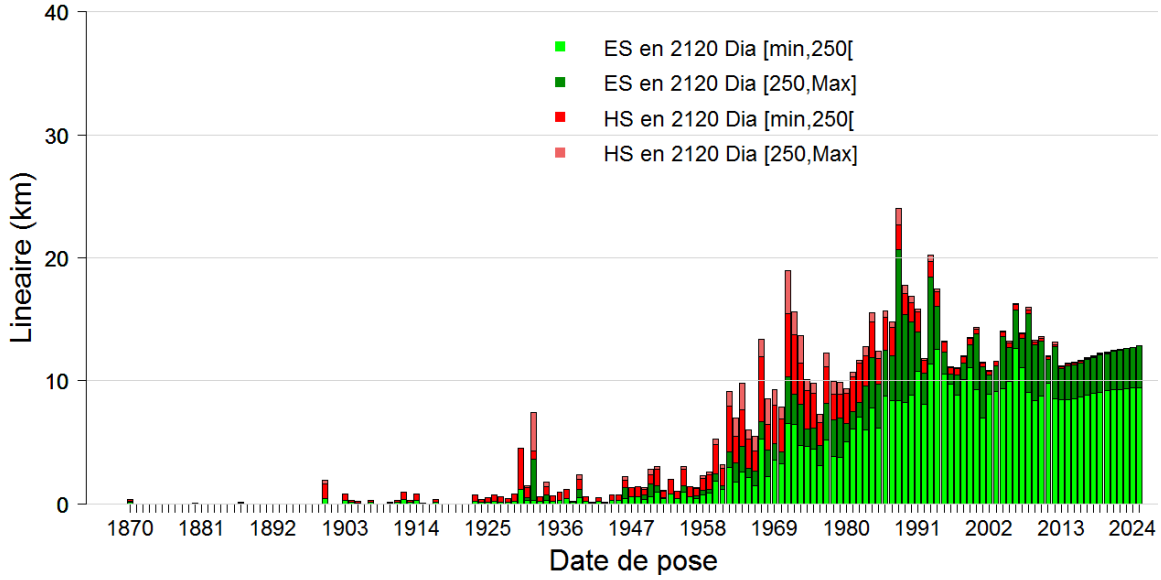


Figure 16 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2025, photographie de la situation en 2025, tronçons partitionnés en deux strates selon le diamètre

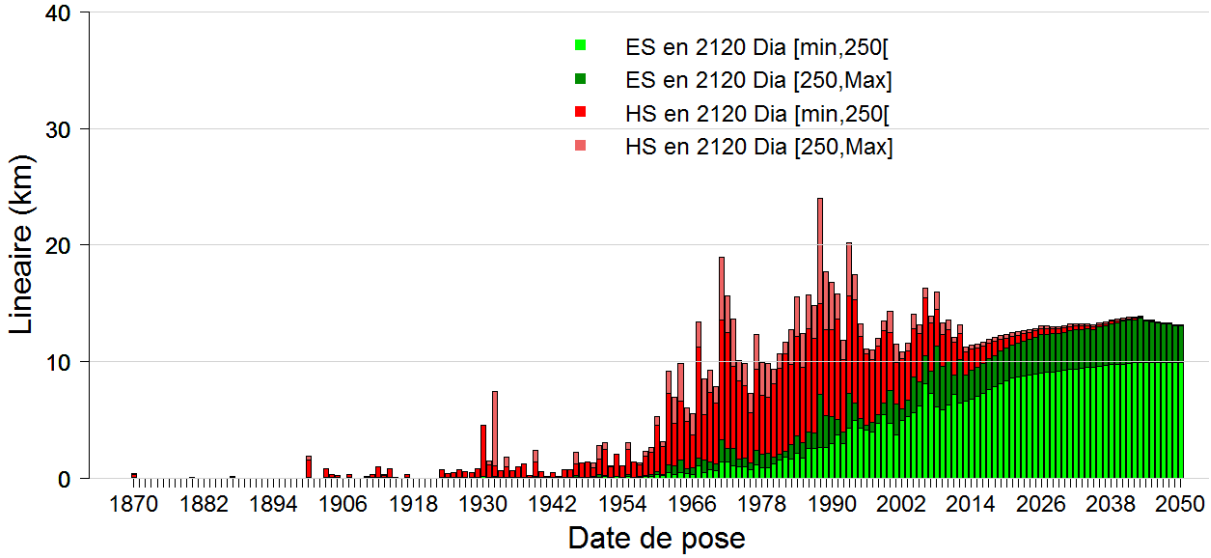


Figure 17 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2050, photographie de la situation en 2050, tronçons partitionnés en deux strates selon le diamètre

IV.1 Sortie I2R

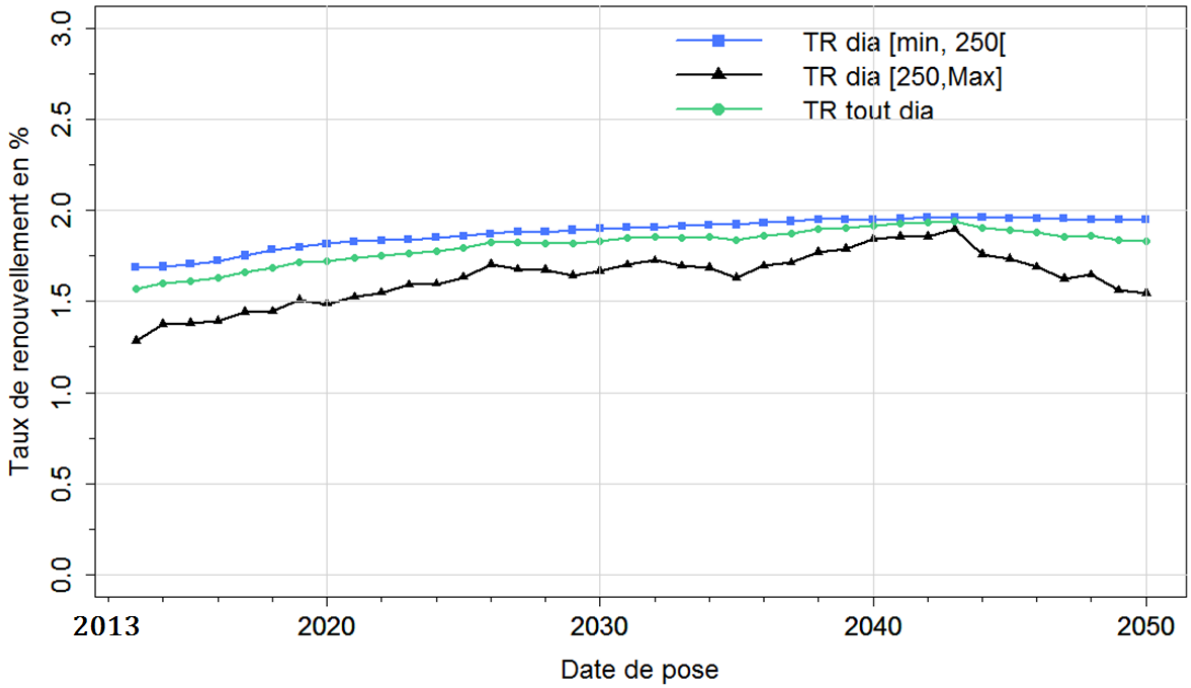


Figure 18 : Prévision des taux de renouvellement futurs de 2013 jusqu'en 2050 pour les tronçons de « gros diamètres », de « petits diamètres » et « tous diamètres », à eauservice avec le scénario « satu quo : plusieurs courbes DIA »

IV.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

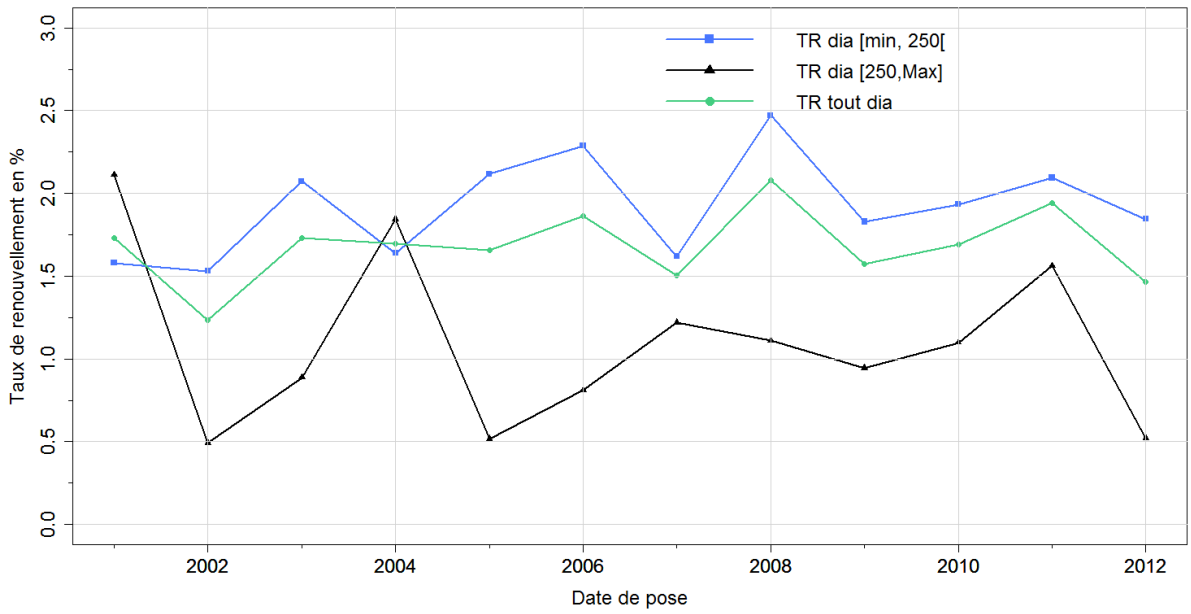


Figure 19 : Taux de renouvellement passé de 2001 à 2012 pour les tronçons de « gros diamètres », de « petits diamètres » et « tous diamètres », à eauservice

IV.1 Sortie I3R

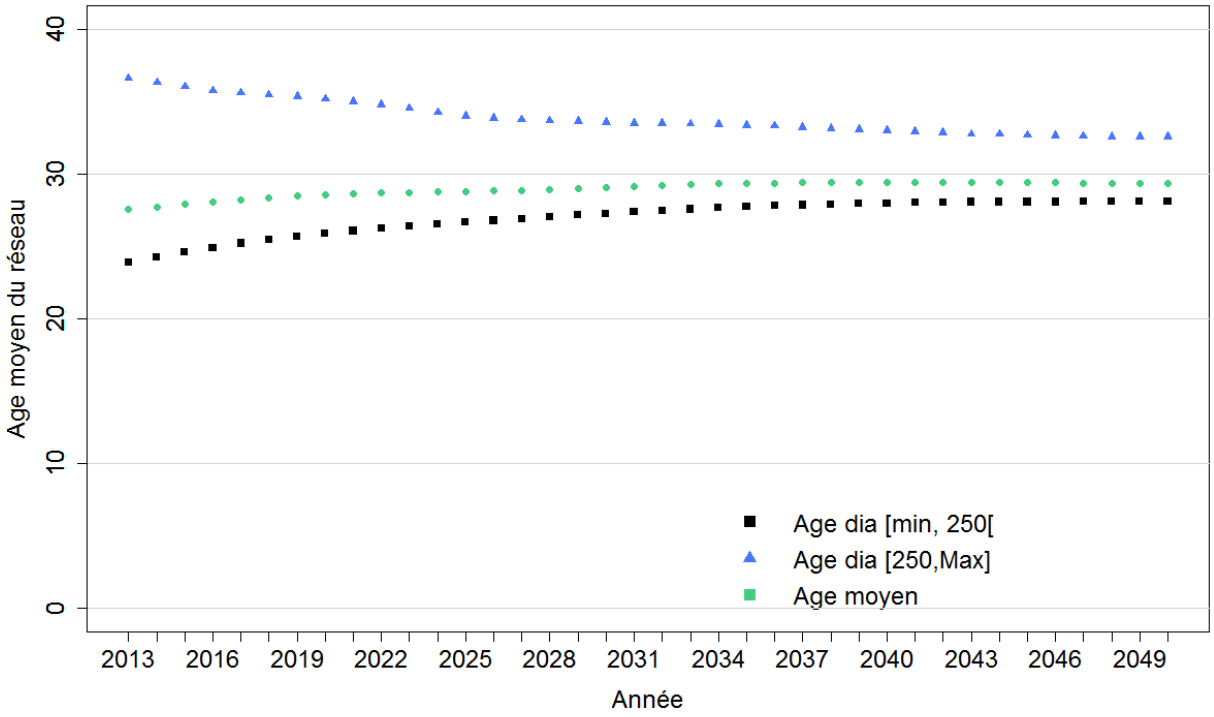


Figure 20 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2013 jusqu'en 2050 à eauservice Lausanne, scénario « statu quo, plusieurs courbes DIA», tronçons partitionnés par diamètre.

V Calcul de l'indicateur I1F

V.1 Entrée

Nom de la strate	Diamètre médian en linéaire de la strate (tronçon ES)	Diamètre pris dans la fiche de coût	Coûts des travaux sans coordination (CHF/m)	Coûts des travaux avec coordination (CHF/m)	Coûts des travaux à la strate (CHF/m)
Dia [min, 250[	110 mm	100 mm normal	640	480	512
Dia [250, max]	390 mm	400 mm normal	1548	1161	1238
Commentaire				-25%	80% coordonnés

V.2 Sortie

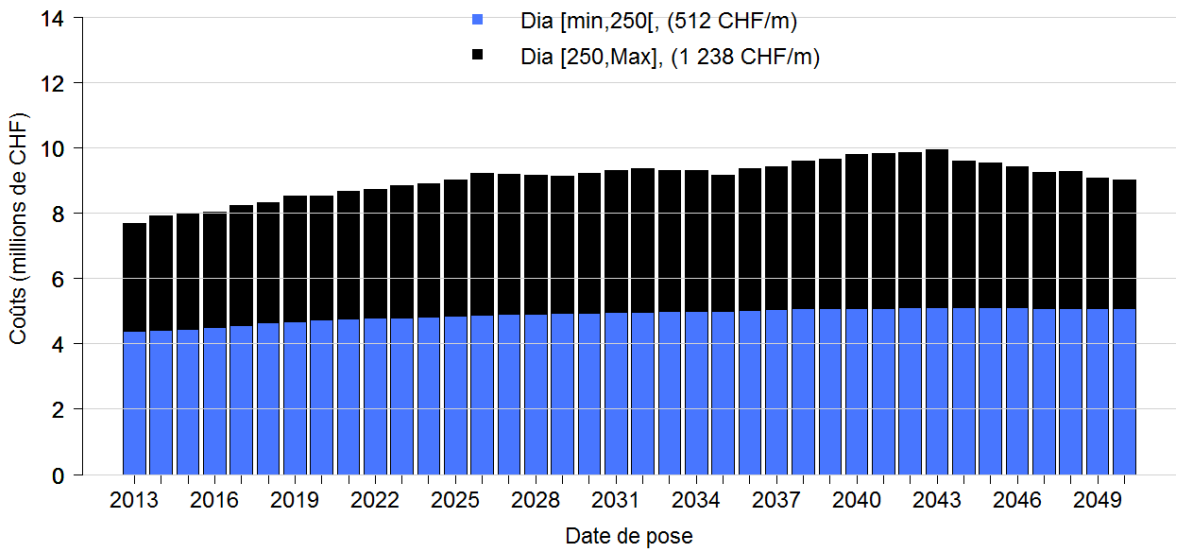


Figure 21 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2013 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes DIA », tronçons partitionnés par diamètre.

VI Calcul de l'indicateur I1P

VI.1 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 11

Covariable	Age (t)	Longueur (Z_1)	Diamètre (Z_2)	REHA (Z_3)	PCAT (Z_4)	Matériau (Z_5)	Matériau (Z_6)
Unité	Siècle	m	mm	oui	Courant continu	FG	Autre

Tableau 1 : Covariables (et leurs unités) employés dans le modèle LEYP sur fenêtre 2001:2012

Paramètres / Nom strate	$\propto$	δ	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_7	β_6
Gros diamètre	4.87	1.39	-1.43	0.33	-0.0025	0.83	0.89	0	0
Petit diamètre	2.96	1.54	-1.53	0.39	-0.0029	0.88	0	-0.27	-0.76

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle LEYP par strate sur fenêtre 2001:2012

VI.1 Entrée en tronçon

- Cf. Figure 12
- Cf. Tableau 1 & Tableau 2

VI.2 Sorties en tronçons

- Effectif :

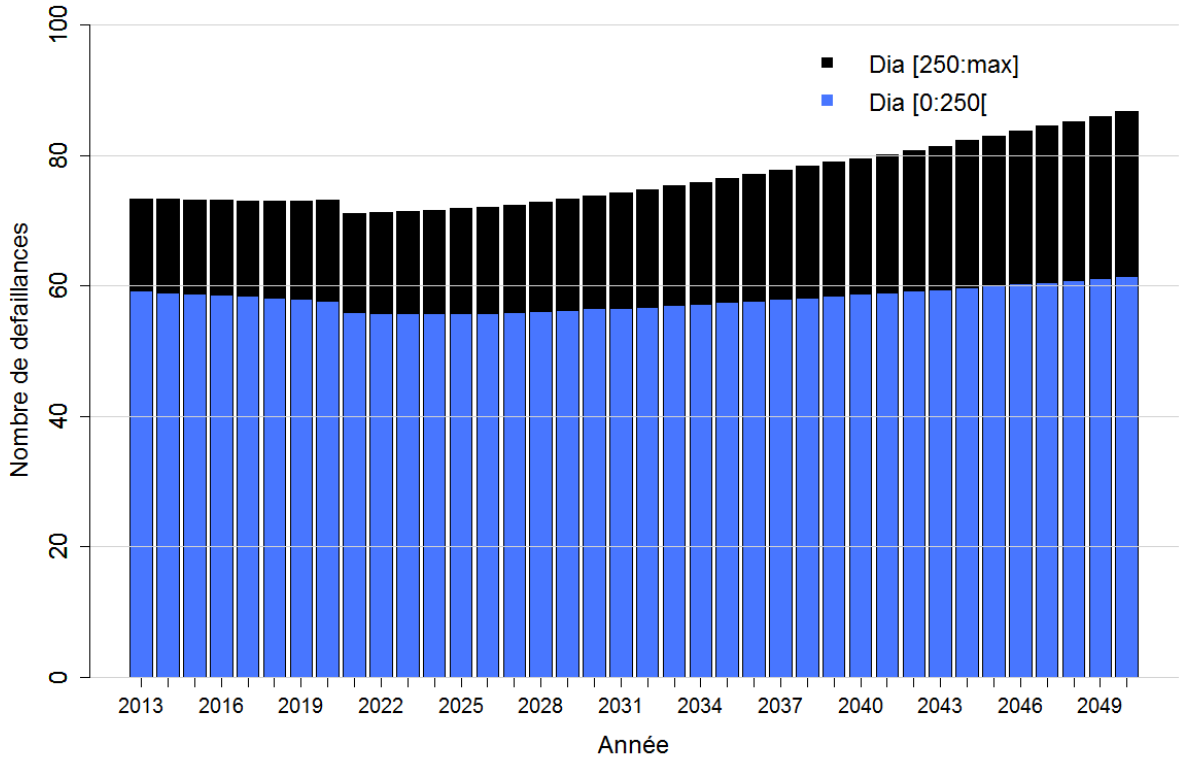


Figure 22 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2013 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes DIA », tronçons partitionnés par diamètre. Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif (sur fenêtre 2001:2012)

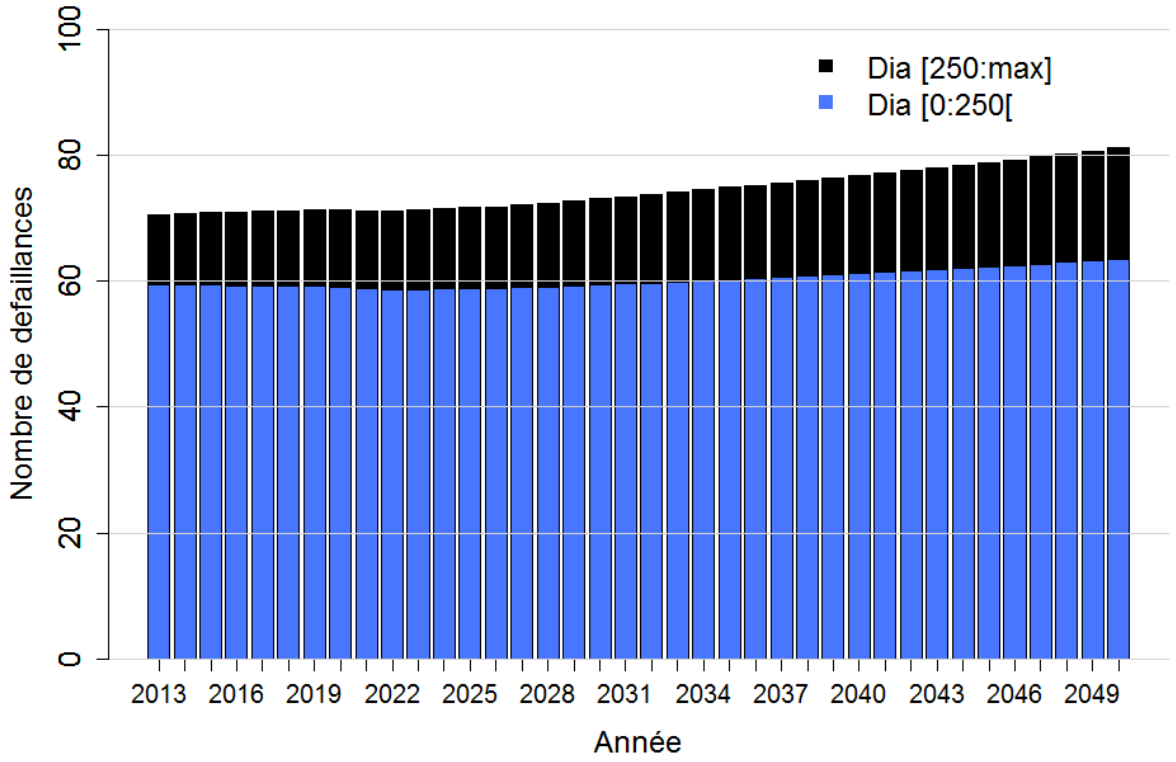


Figure 23 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2013 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes DIA », tronçons partitionnés par diamètre. Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif (sur fenêtre 2001:2012)-Eq3

VI.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

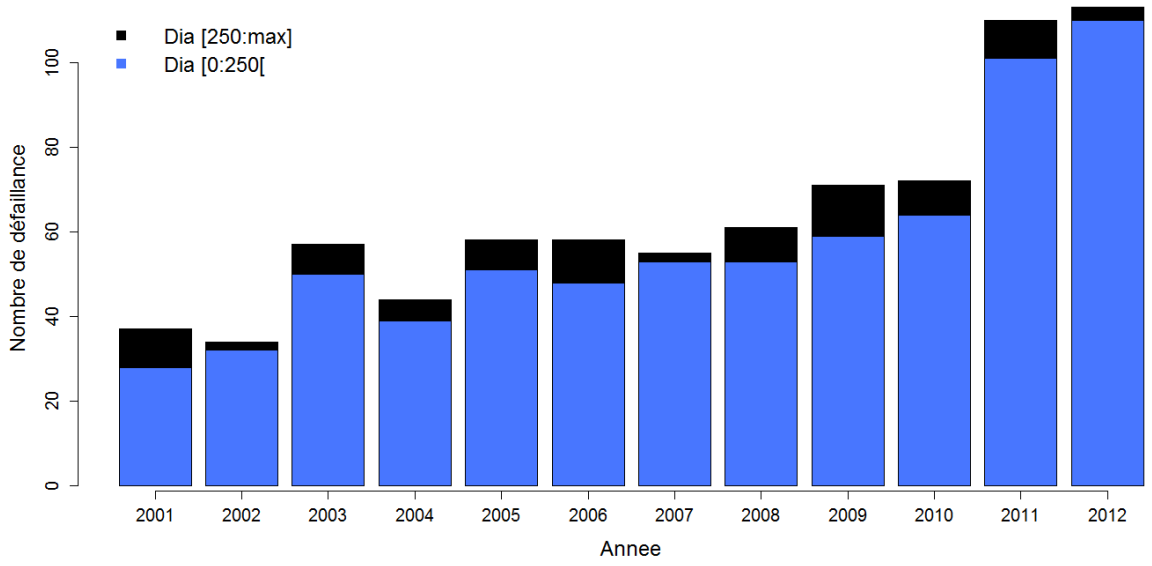


Figure 24 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2012, partitionné par le diamètre

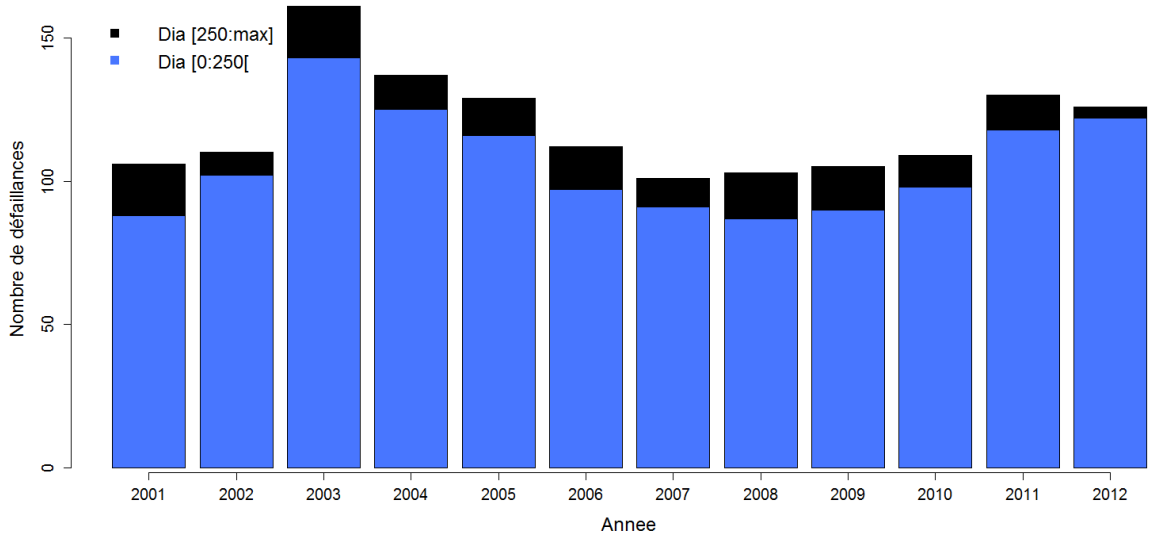


Figure 25 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2012 et mis hors service entre [2001, 2012], partitionné par le diamètre

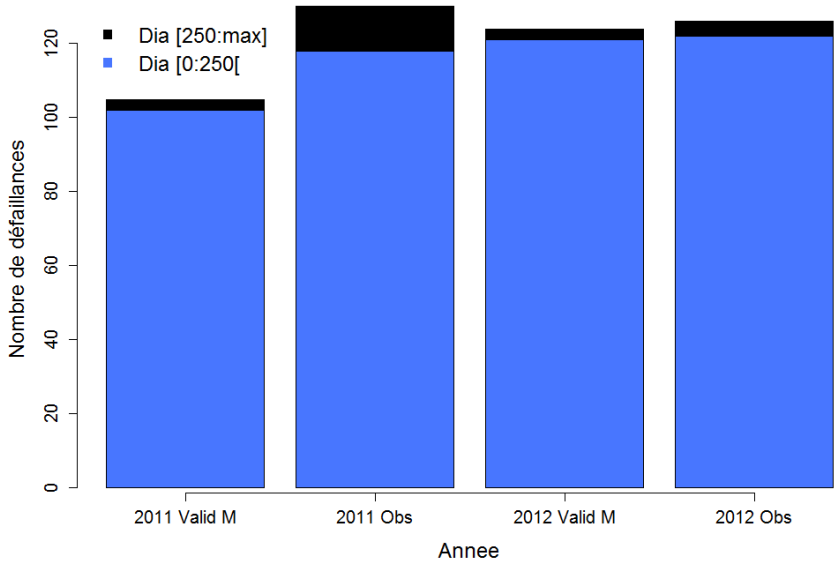


Figure 26 : Comparaison validation OSMA avec le nombre de de défaillance réelle observé

Nb Def / Methode	*Petit diamètre*	*Gros diamètre*
Validation OSMA	224	5.5

Validation Casses	147	22
Observé	240	16

Tableau 3 : Comparaison validation OSMA et validation Casses avec le nombre de de défaillance réelle observé

Covariable	Age (t)	Longueur (Z_1)	Diamètre (Z_2)	REHA (Z_3)	Matériau (Z_4)	Matériau (Z_5)	Pression (Z_6)
Unité	Siècle	m	mm	oui	FG	Autre	m

Tableau 4 : Covariables (et leurs unités) employés dans le modèle LEYP sur fenêtre 2001:2010

Paramètres / Nom strate	$\propto$	δ	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
Gros diamètre	4.52	1.53	-2.91	0.35	0	0	0	0	-0.058
Petit diamètre	2.34	1.79	-1.47	0.43	-0.0052	-0.49	-0.96	1.07	0

Tableau 5 : Valeur des paramètres du modèle LEYP par strate sur fenêtre 2001:2010

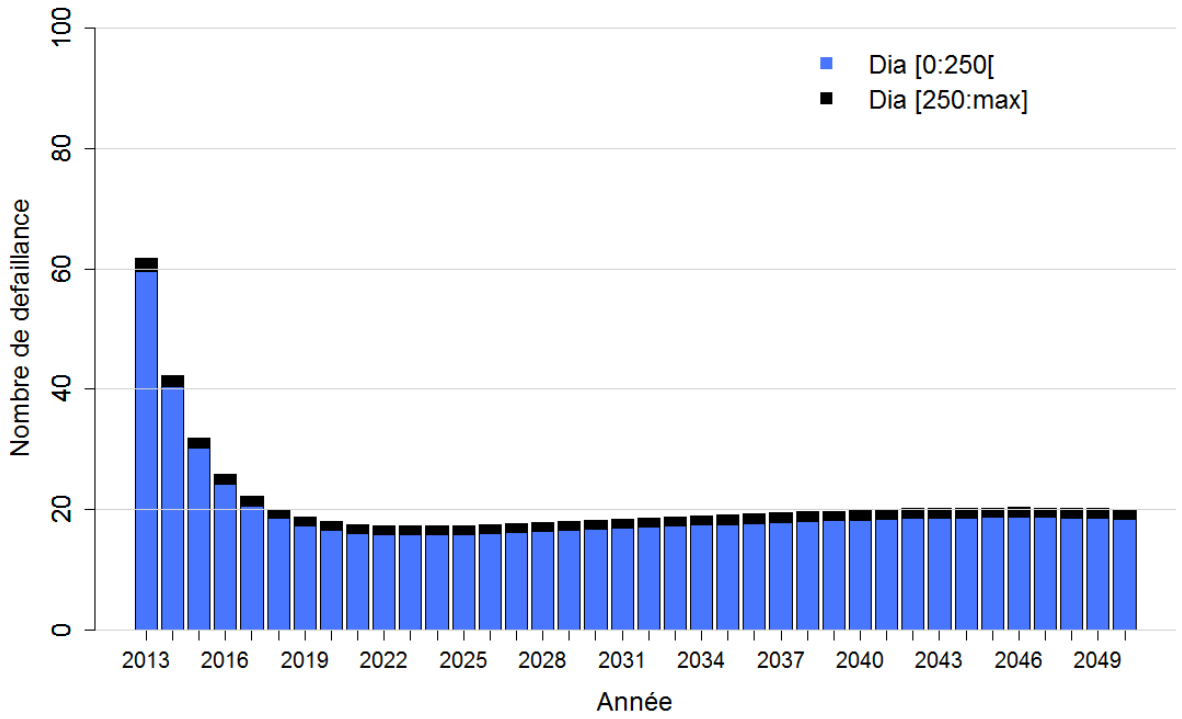


Figure 27 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2013 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes DIA », tronçons partitionnés par diamètre. Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif (sur fenêtre 2001:2012) Eq validation.

Scénario 8 (code Obis)

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Périmètre	Tout le réseau		Réseau en ville									
Stratifié ?	Non	Ville/ Montagne	Non				Diamètre	NDOA	Matériaux		Vulnérabilité	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2001; 2012]		[2001; 2007]	[2001; 2013]								
Statu quo ?	Oui		Oui		On arrête de renouveler	On vise un TR de 1%	Oui			Plus drastique avec les fontes grises	Oui	> autour des éléments vulnérables

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

⇨ Donnée Christelle 2014

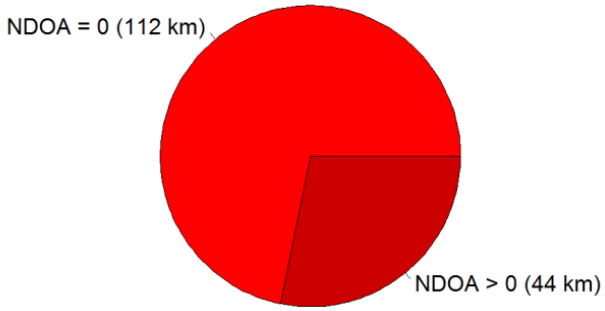


Figure 1 : Proportion du linéaire HS en fonction de deux classes du nombre de défaillances

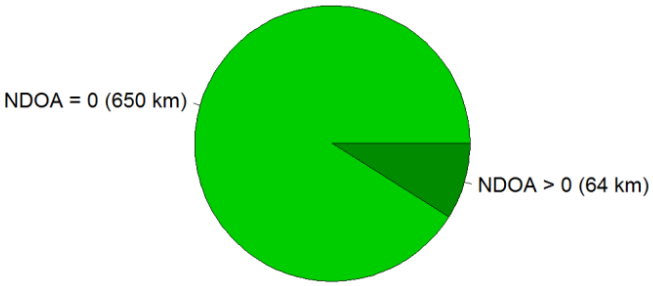


Figure 2 : Proportion du linéaire ES en fonction de deux classes du nombre de défaillances

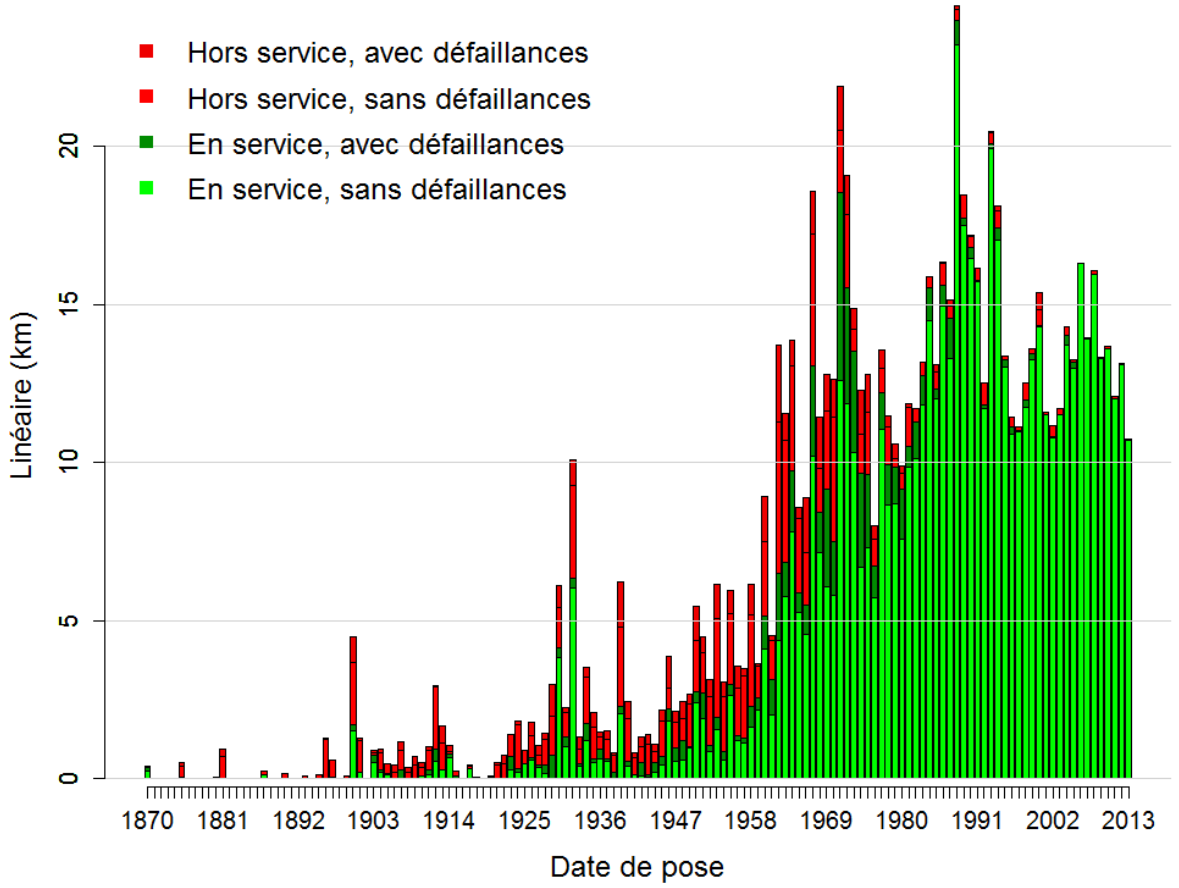


Figure 3 : Histogramme du linéaire En Service au 31/12/2013 (en vert) et mis Hors Service entre [2001,2013] (en rouge), ayant une date de pose connue

I.2 Entrée en effectif

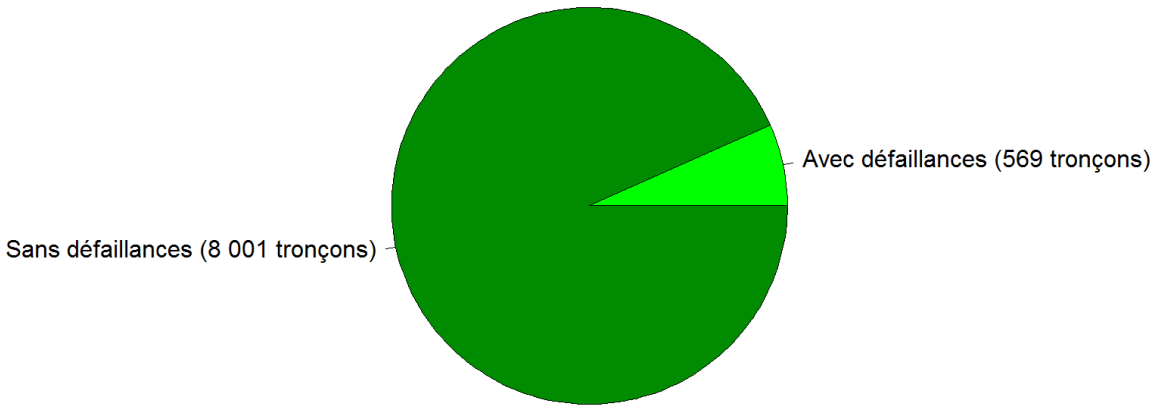


Figure 4 : Proportion en effectif ES en fonction de deux classes du nombre de défaillances

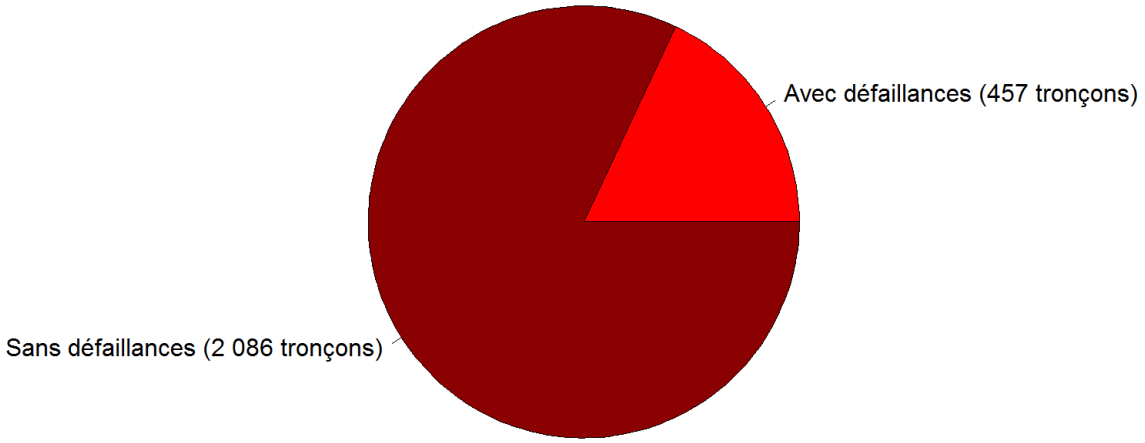


Figure 5 : Proportion en effectif HS en fonction de deux classes du nombre de défaillances

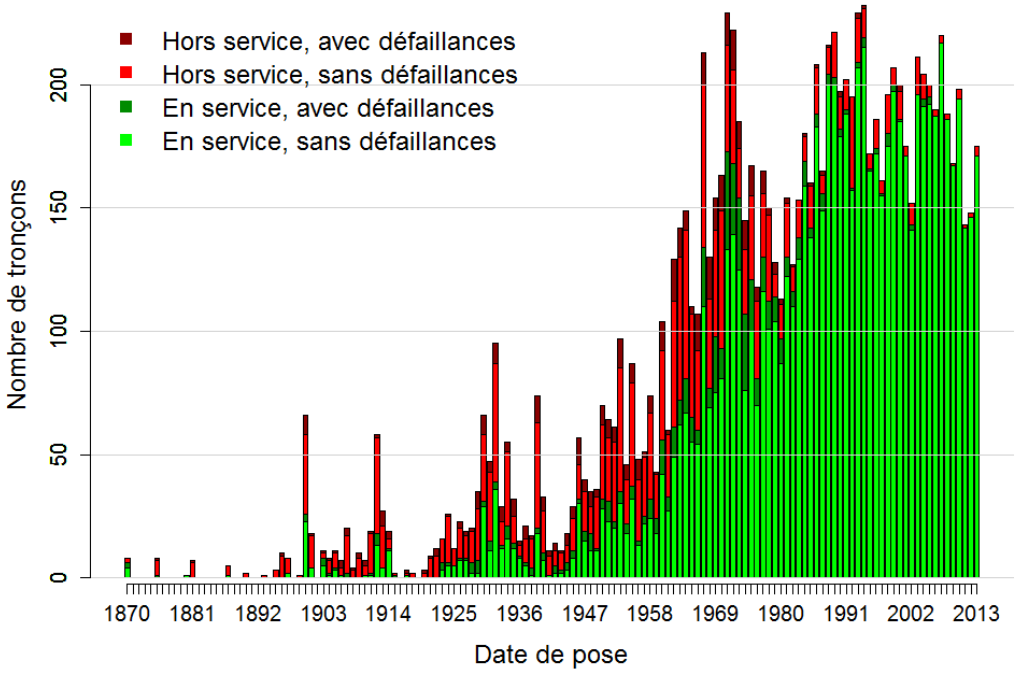


Figure 6 : Histogramme du nombre de tronçons En Service au 31/12/2013 (en vert) et mis Hors Service entre [2001,2013] (en rouge), ayant une date de pose connue

II Construction scénario prospectif Obis

II.1 Sortie en linéaire

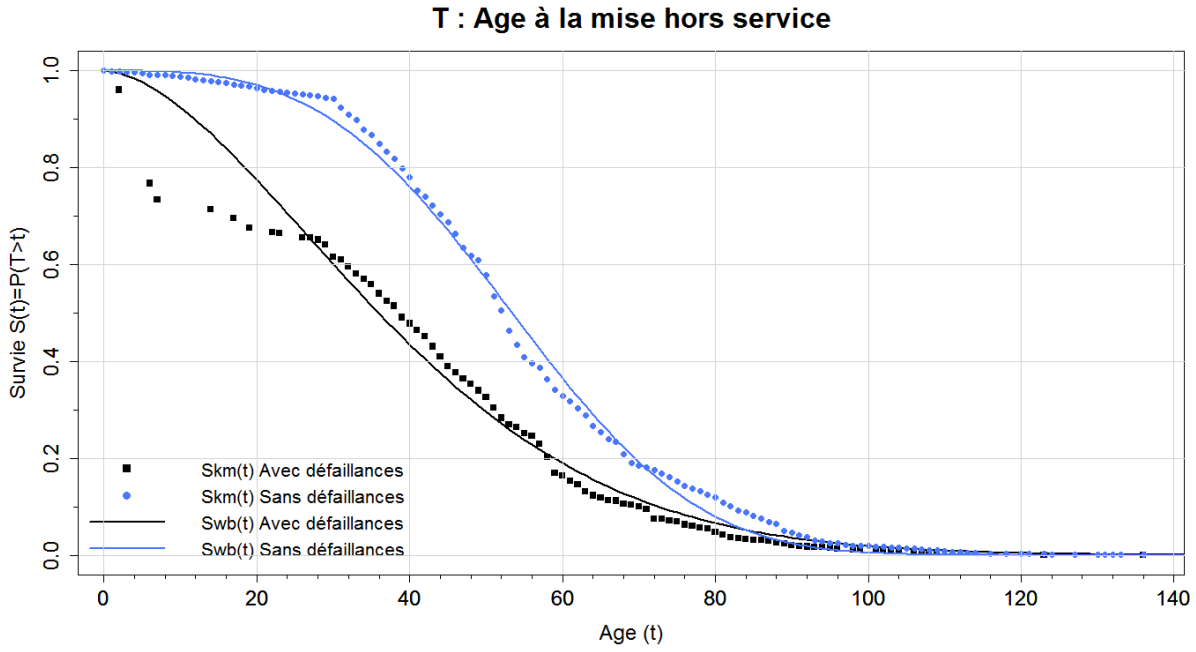


Figure 7 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait)

II.2 Sortie en effectif

Figure 8 : Courbes de survie prospective en effectif (trait)

III Calcul des indicateurs I1R et I2R

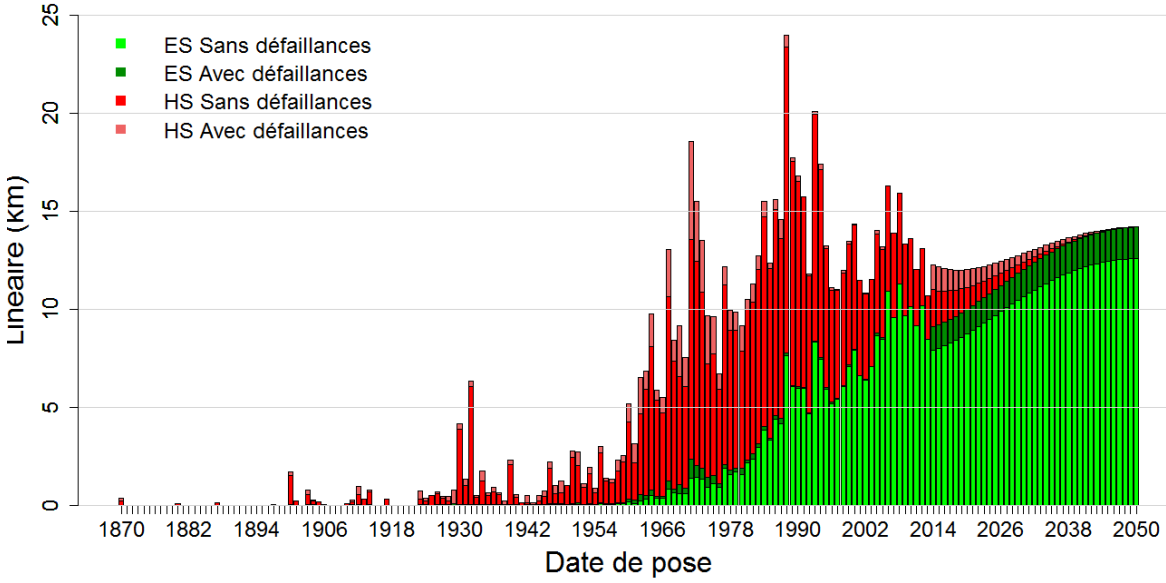


Figure 9 : Linéaire en service (ES) fin 2050 et mis hors service (HS) entre [2014,2050], prévision du futur, photographie de la situation en 2050.

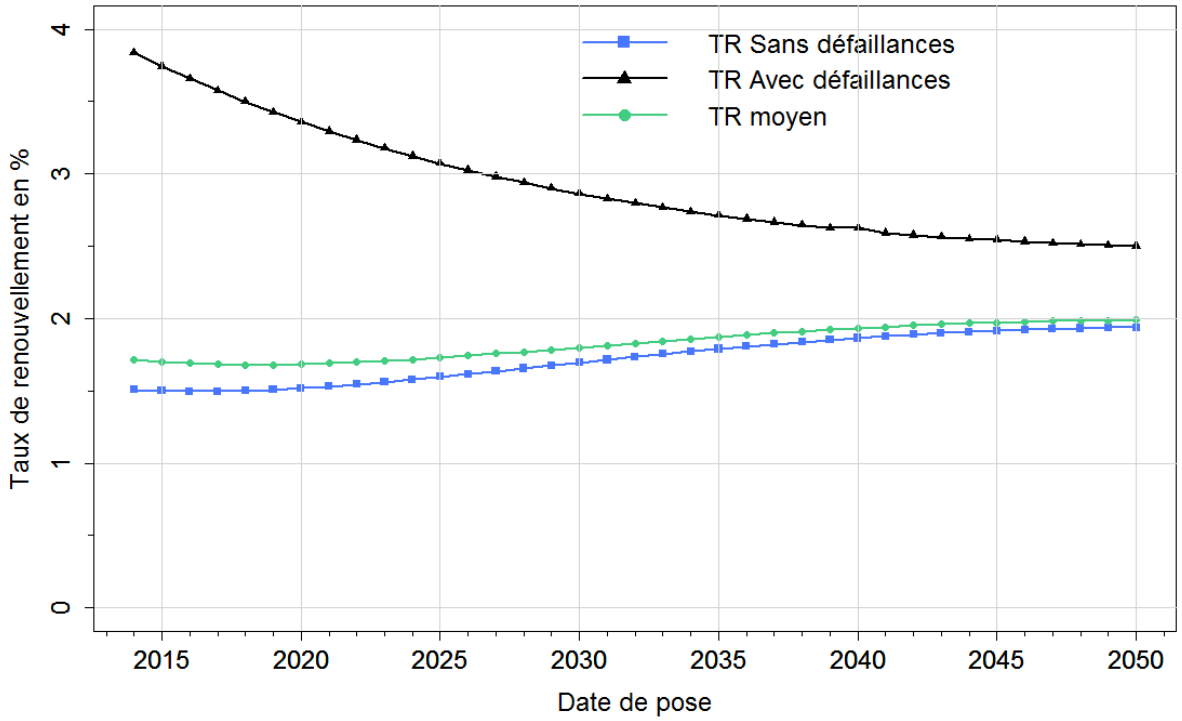


Figure 10 : Prévision des taux de renouvellement futurs de 2014 jusqu'en 2050

Scénario 9 (code B)

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Périmètre	Tout le réseau		Réseau en ville									
Stratifié ?	Non	Ville/ Montagne	Non				Diamètre	NDOA		Matériaux	Vulnérabilité	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2001; 2012]		[2001; 2007]	[2001; 2013]								
Statu quo ?	Oui		Oui		On arrête de renouveler	On vise un TR de 1%	Oui			Plus drastique avec les fontes grises	Oui	> autour des éléments vulnérables

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

⇨ Données Christelle 2014

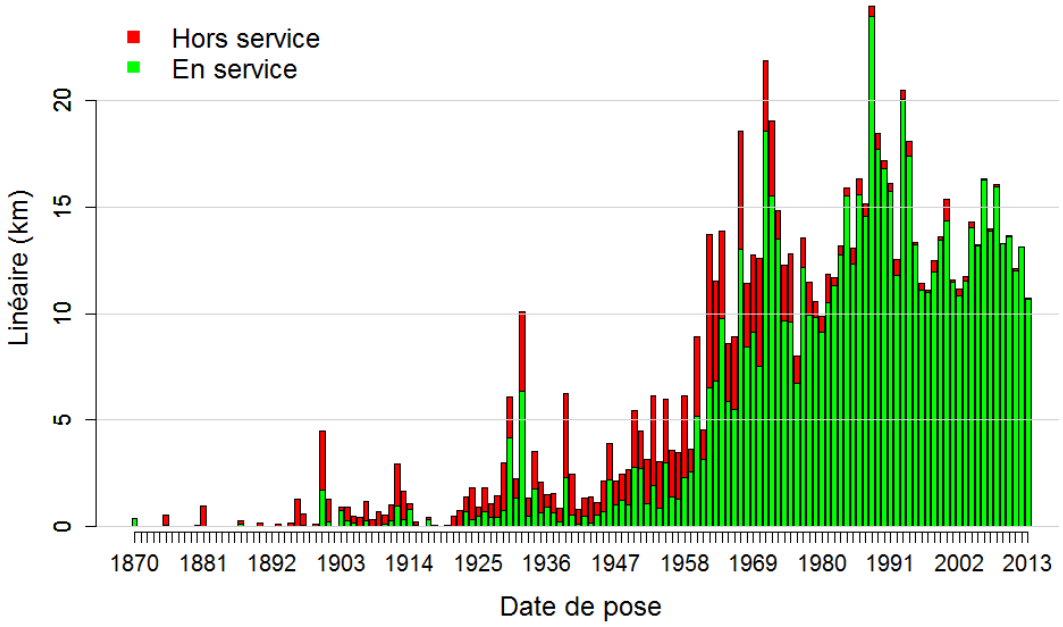


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service (715 km) et Hors Service (156 km) au 31/12/2013 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2001 ; 2013])

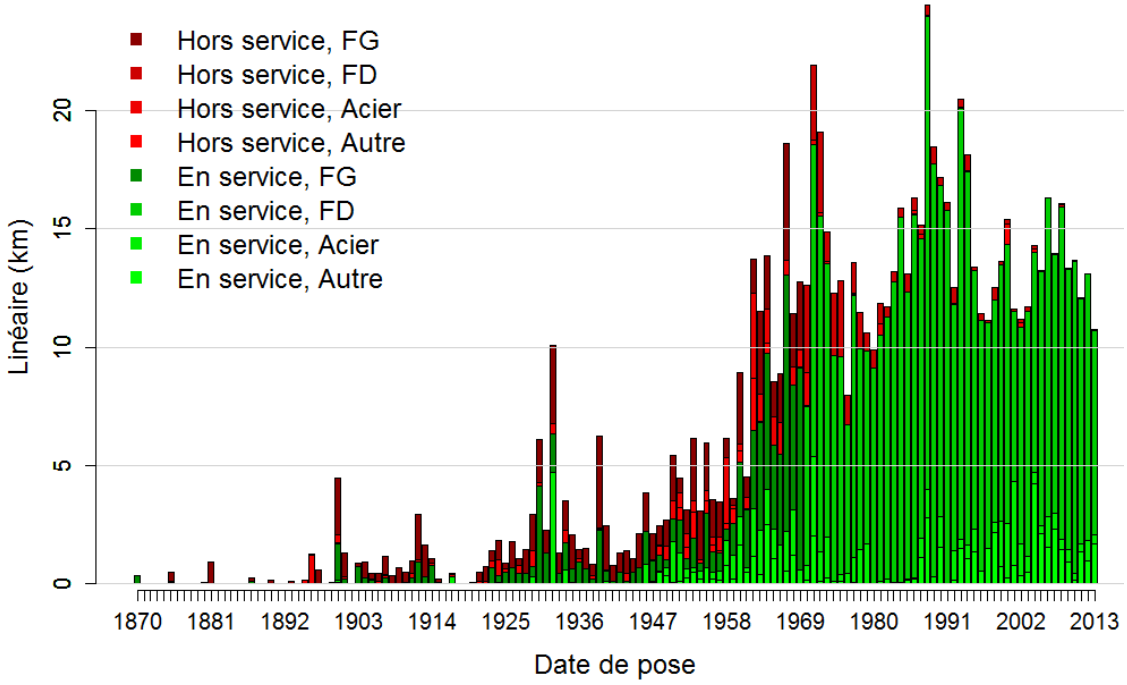


Figure 2 : Linéaire en service en 31/12/2013 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon 4 strates de matériau et selon le statu.

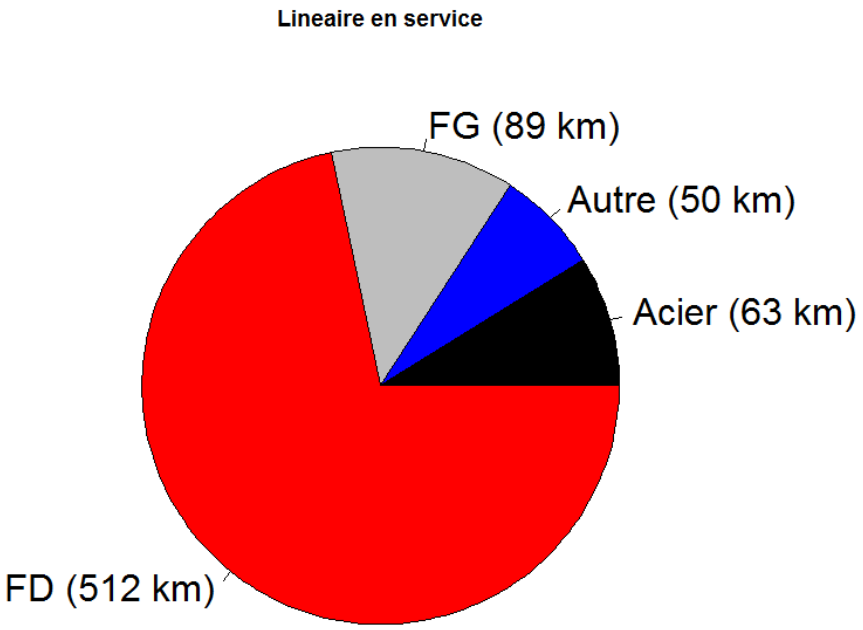


Figure 3 : Proportion du linéaire ES au 31/12/2013 en fonction des quatre strates de matériau

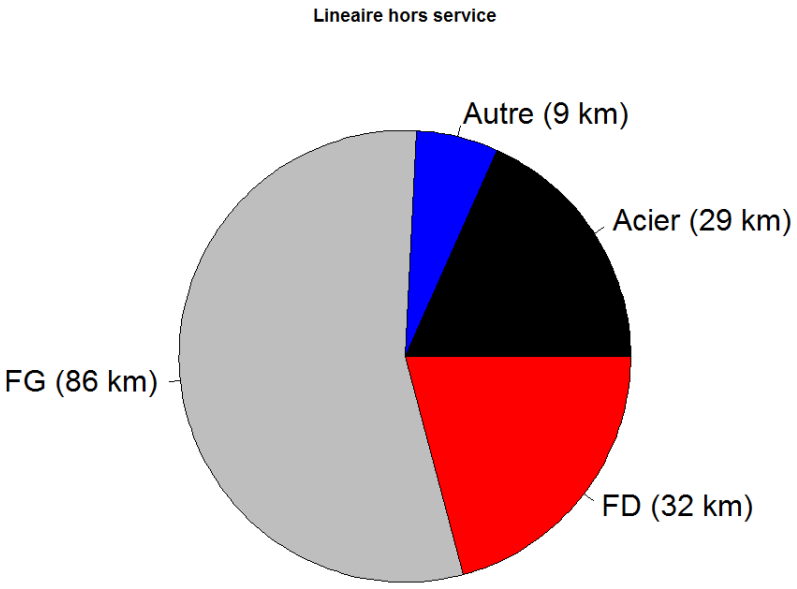


Figure 4 : Proportion du linéaire mis HS entre [2001, 2013] en fonction des quatre strates de matériau

I.2 Sortie en linéaire

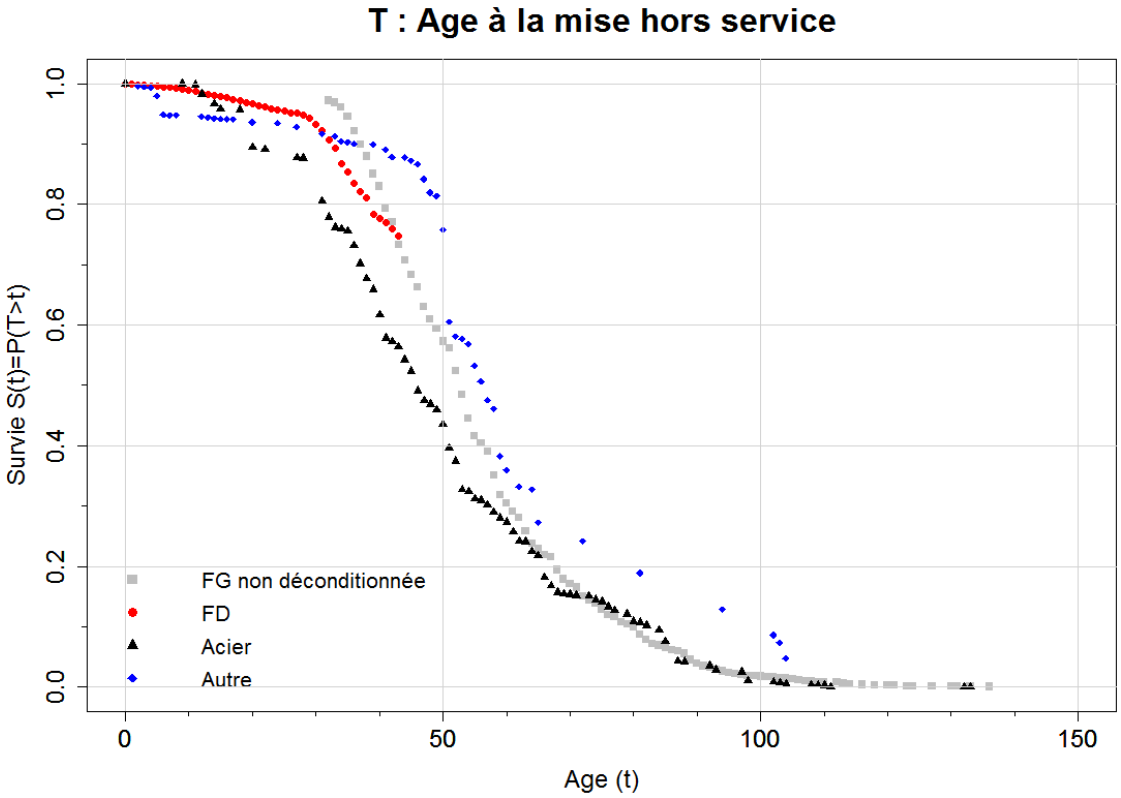


Figure 5 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire de tronçons par strate de matériau

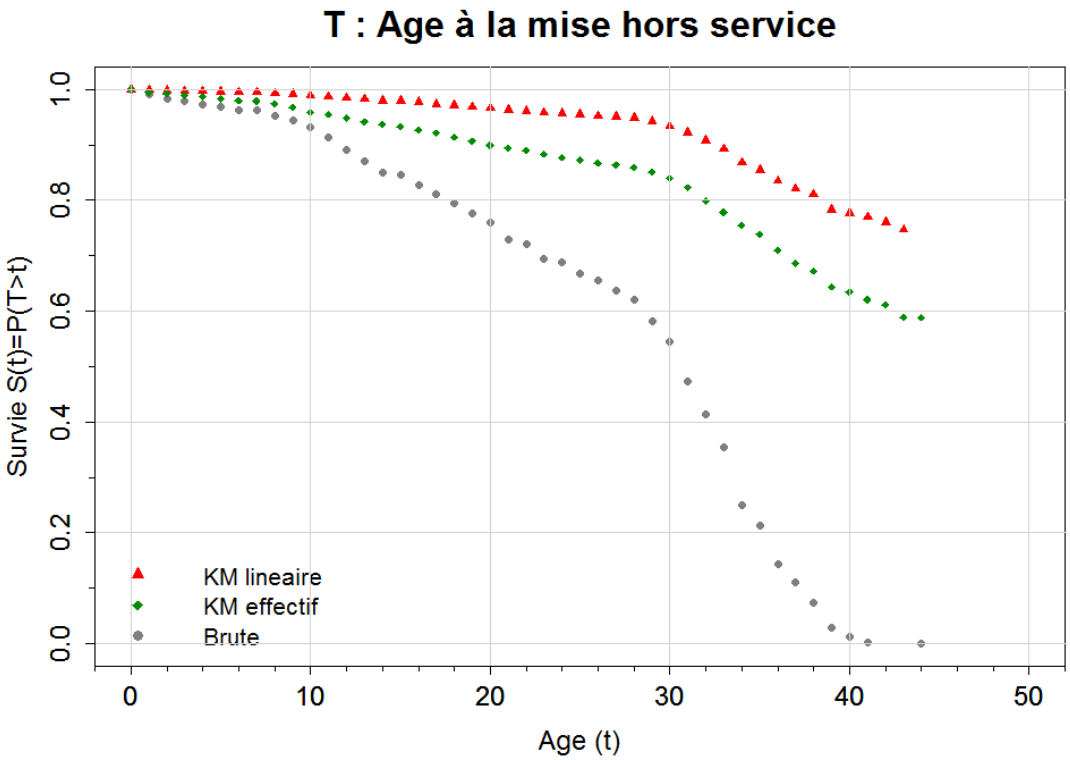


Figure 6 : Comparaison des courbes de survie, pour la strate fonte ductile (en effectif, en linaire et brute)

I.1 Entrée en effectif

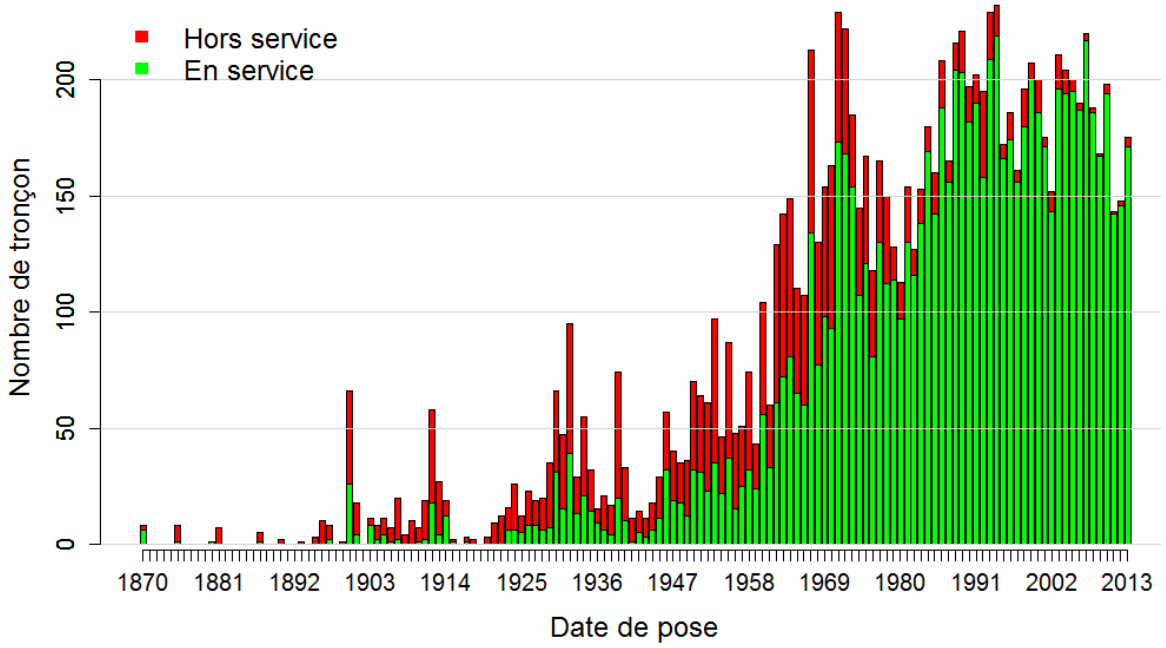


Figure 7 : Histogramme du nombre de tronçons En Service et Hors Service au 31/12/2013 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2001 ; 2013])

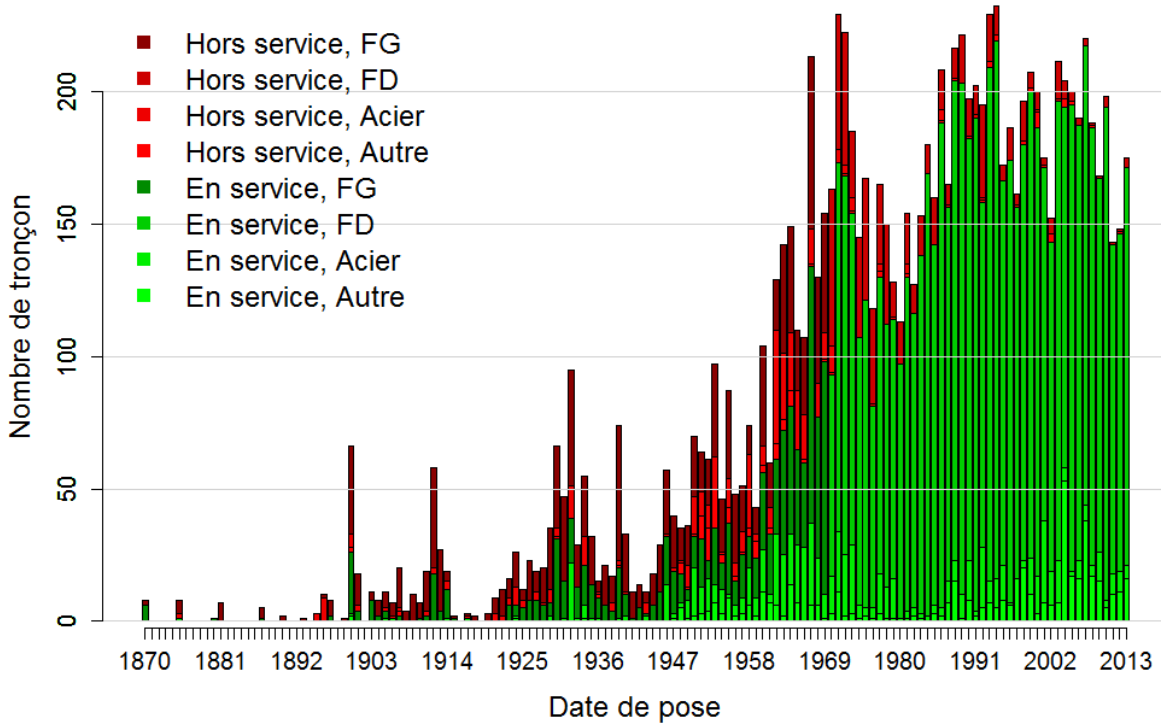


Figure 8 : Nombre de tronçons en service en 31/12/2013 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon 4 strates de matériau et selon le statut.

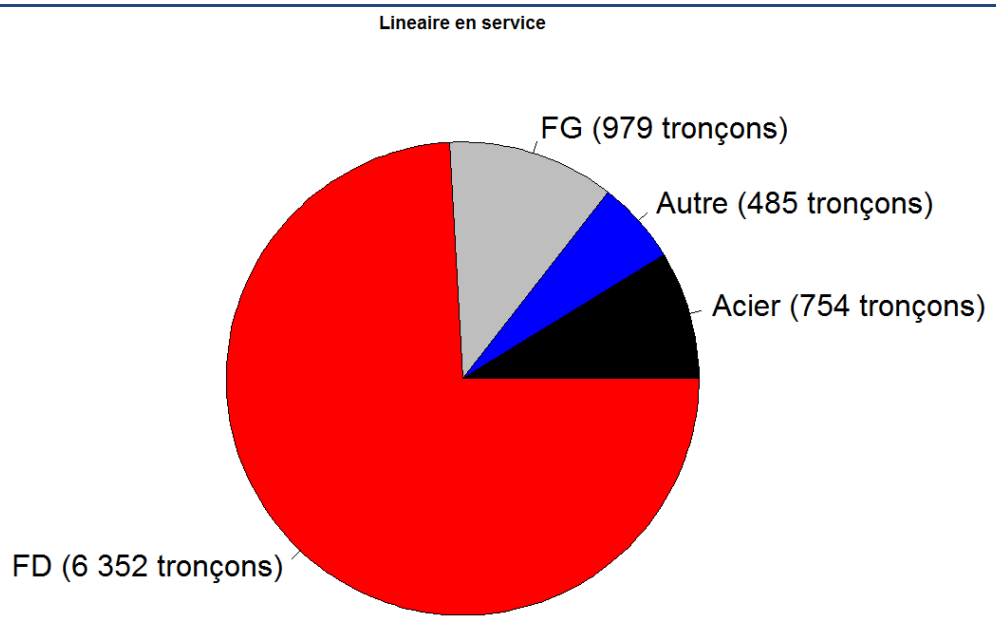


Figure 9 : Proportion du nombre de tronçon ES en fonction de quatre strates de matériau

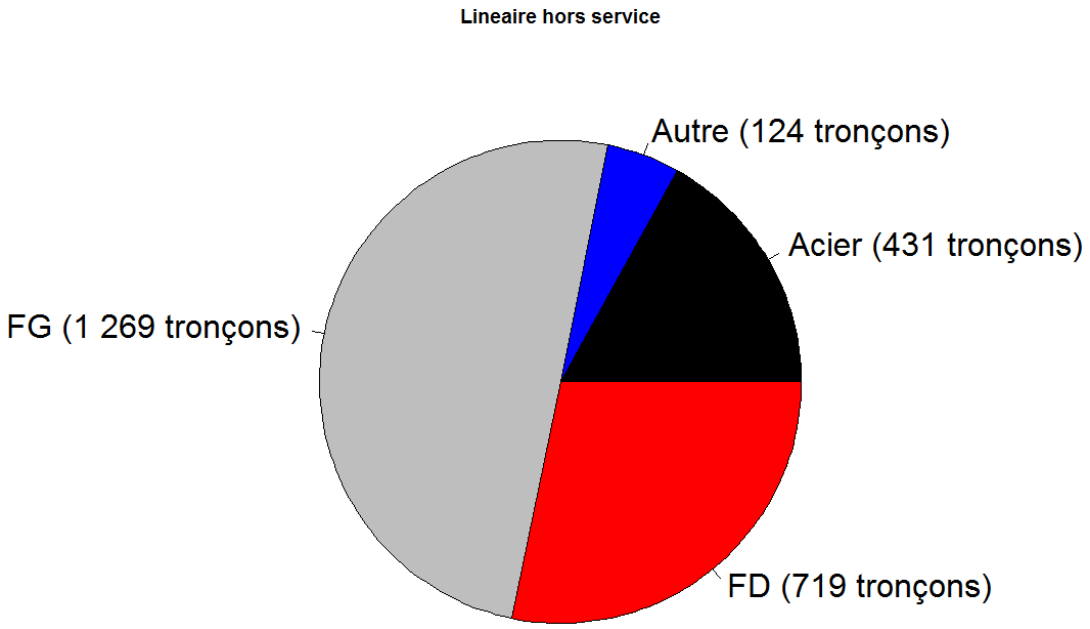


Figure 10 : Proportion du nombre de tronçon HS en fonction de quatre strates de matériau

I.2 Sortie en effectif

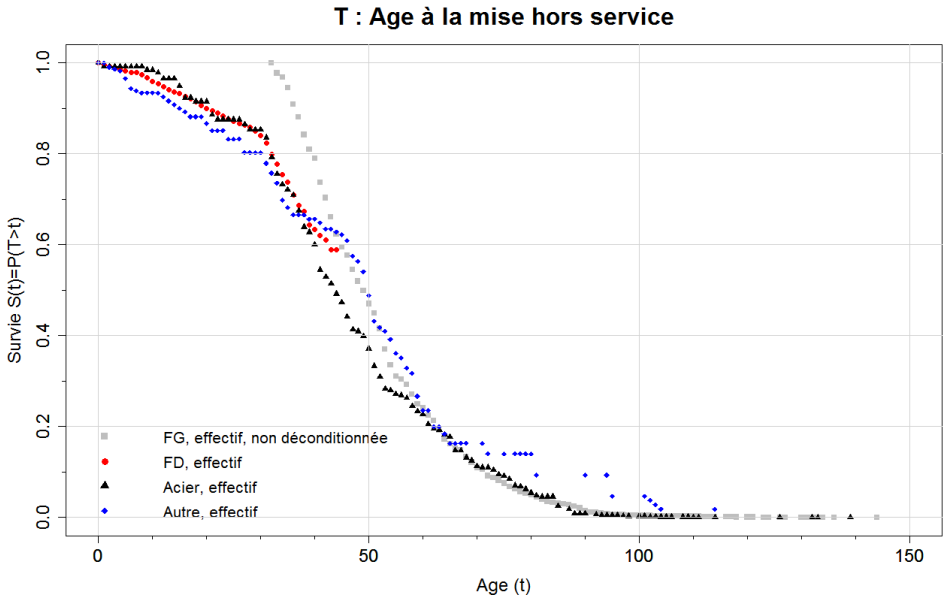


Figure 11 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en nombre de tronçons par strate de matériau

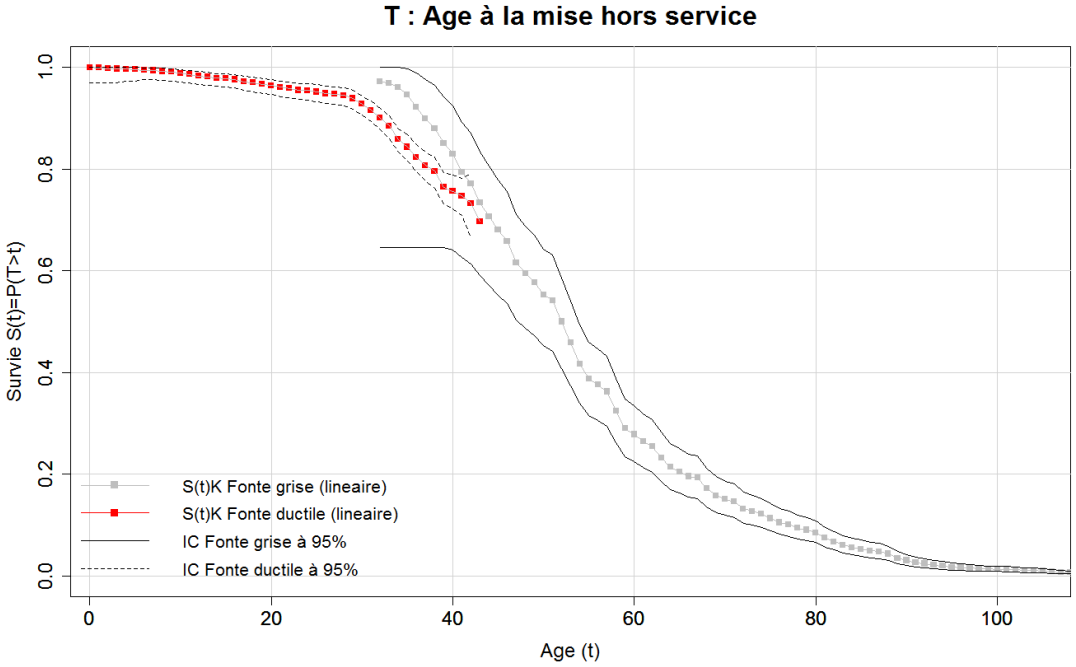


Figure 12 : Intervalles de confiance des courbes de survie fonte grise et fonte ductile

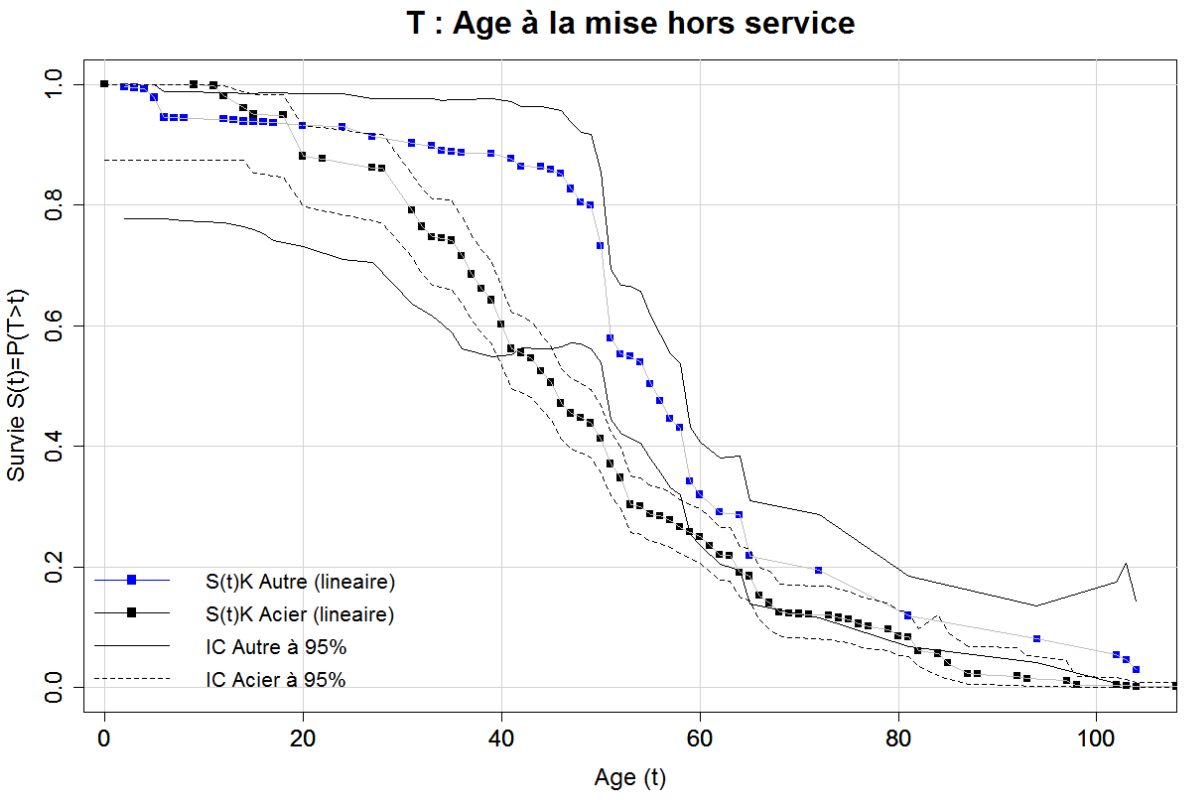


Figure 13 : Intervalles de confiance des courbes de survie acier et autre

II Scénario B

- Groupe de tronçons : transport normal + distribution (moins Brêt et moins les tronçons de 6 m)
- Date export donné : 2014 par Christelle
- Photographie au 31 /12 /2013
- stratification par matériaux :
  - fonte grise
  - fonte ductile
  - Acier
  - Autre
- On renouvelle la fonte grise par de la fonte ductile
- Courbes de survie prospectives les même pour tous les matériaux que par le passé, déconditionner méthode Weibull
- Taux de travaux coordonnés en général : 80%. Taux des travaux non coordonnées : 20%.

III Construction scénario prospectif B

III.1 Entrée en linéaire

Cf. : Figure 5

III.2 Sortie en linéaire

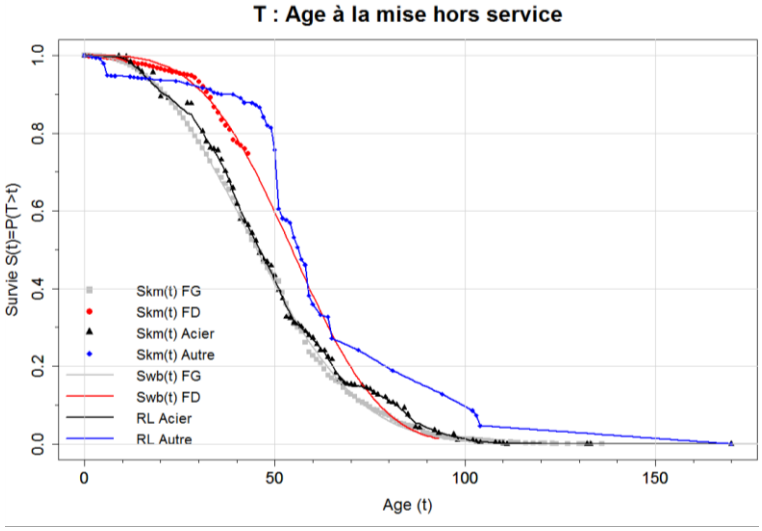


Figure 14 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait) par strate de matériau. Swb(t) : méthode de Weibull, RL : régression locale

III.1 Entrée en effectif

Cf. : Figure 11

III.2 Sortie en effectif

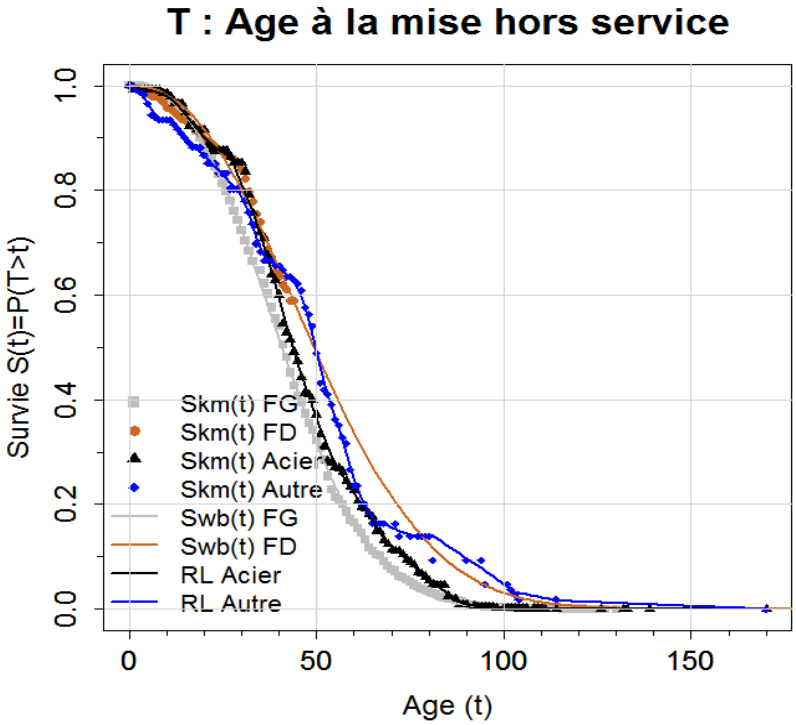


Figure 15 : Courbes de survie prospective en effectif (trait) par strates de matériau

III.3 Comparaison des sorties en linéaire et en effectif

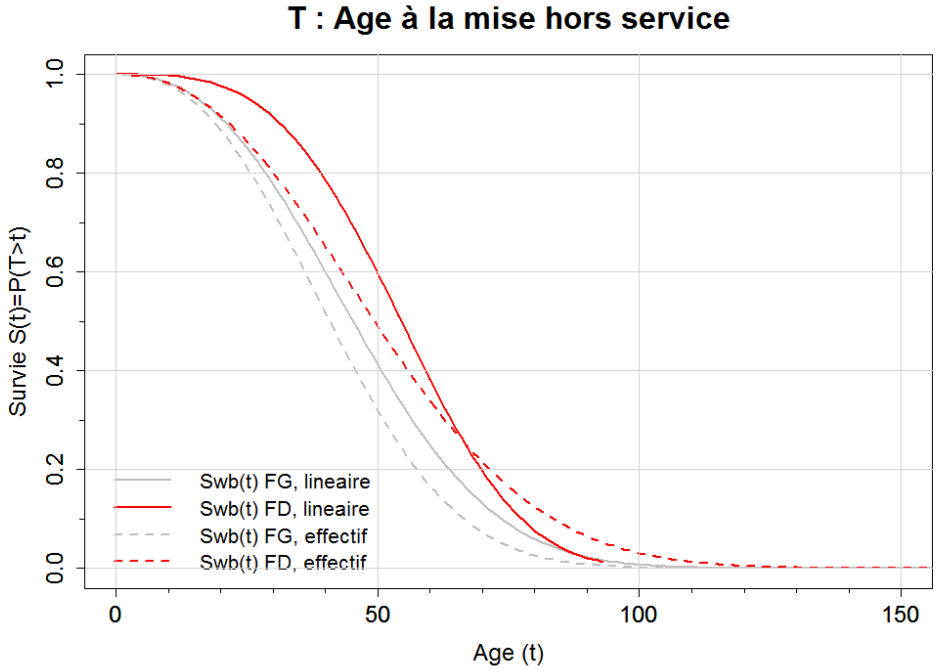


Figure 16 : Comparaison des courbes de survie prospectives en effectif et en linéaire par strates de matériaux

IV Calcul des indicateurs I1R, I2R et I3R

IV.1 Entrée

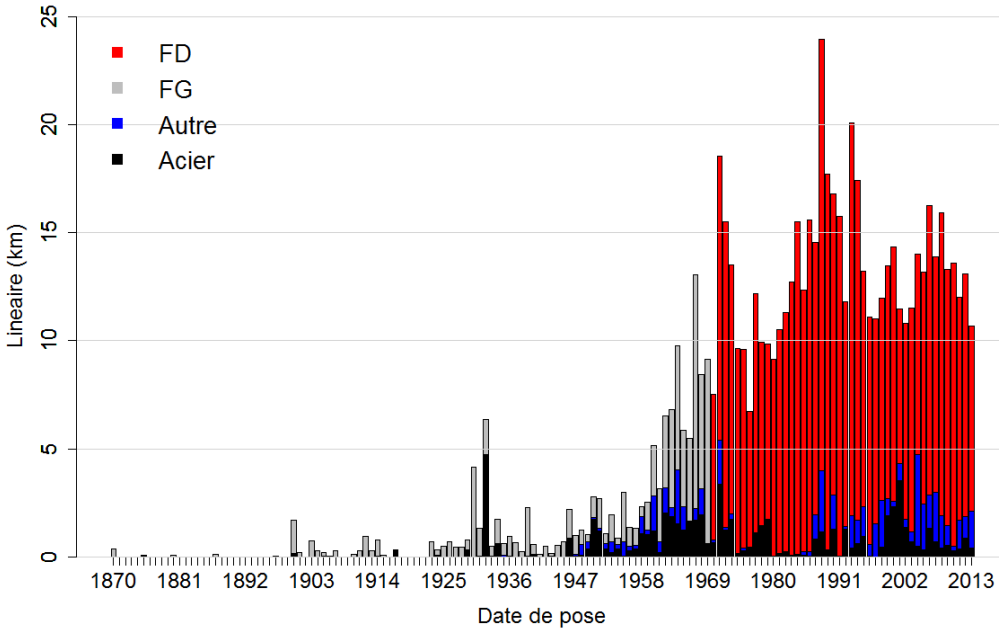


Figure 17 : Linéaire en service en 31/12/2013 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon quatre strates de matériau.

IV.2 Sortie

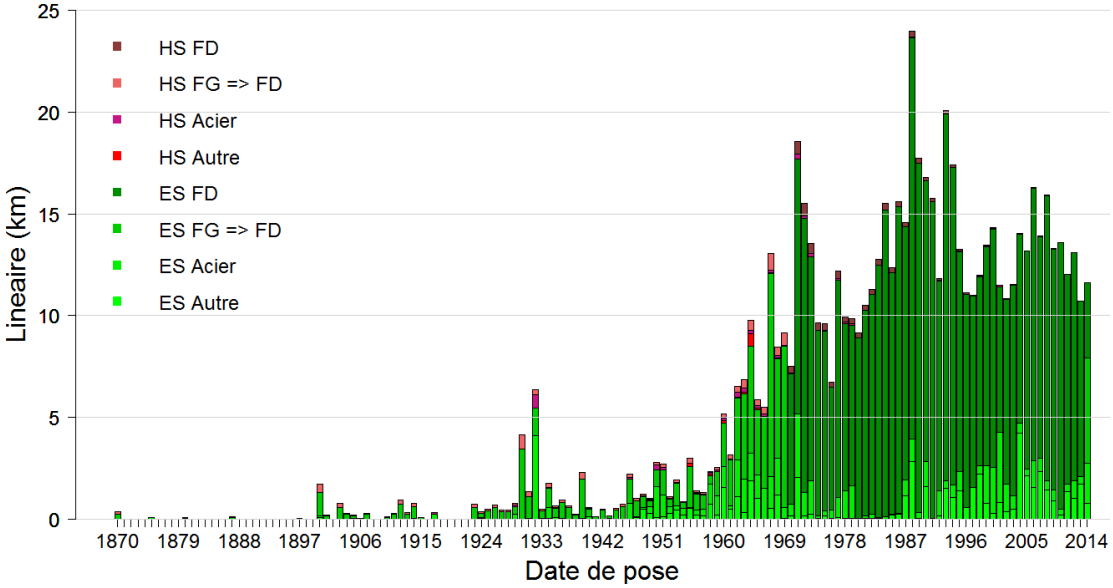


Figure 18 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2014, photographie de la situation en 2014, tronçons partitionnés en quatre strates de matériaux.

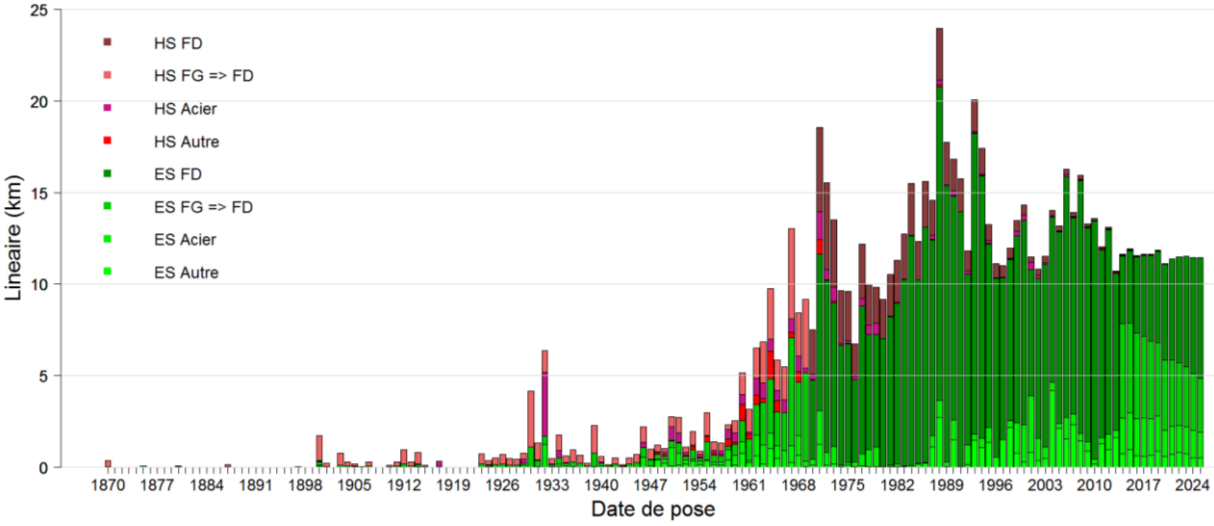


Figure 19 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2025, photographie de la situation en 2025, tronçons partitionnés en quatre strates de matériaux.

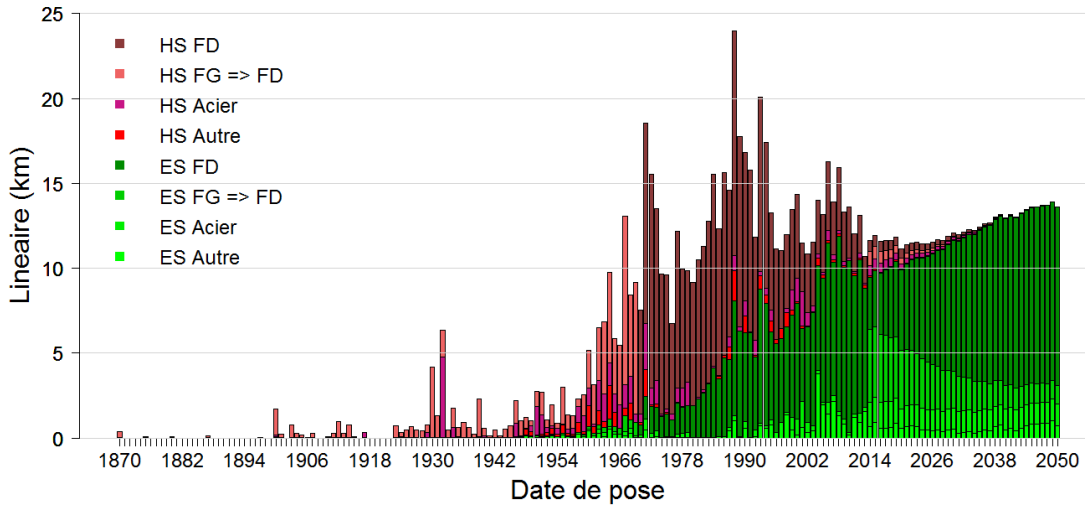


Figure 20 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2050, photographie de la situation en 2050, tronçons partitionnés en quatre strates de matériaux.

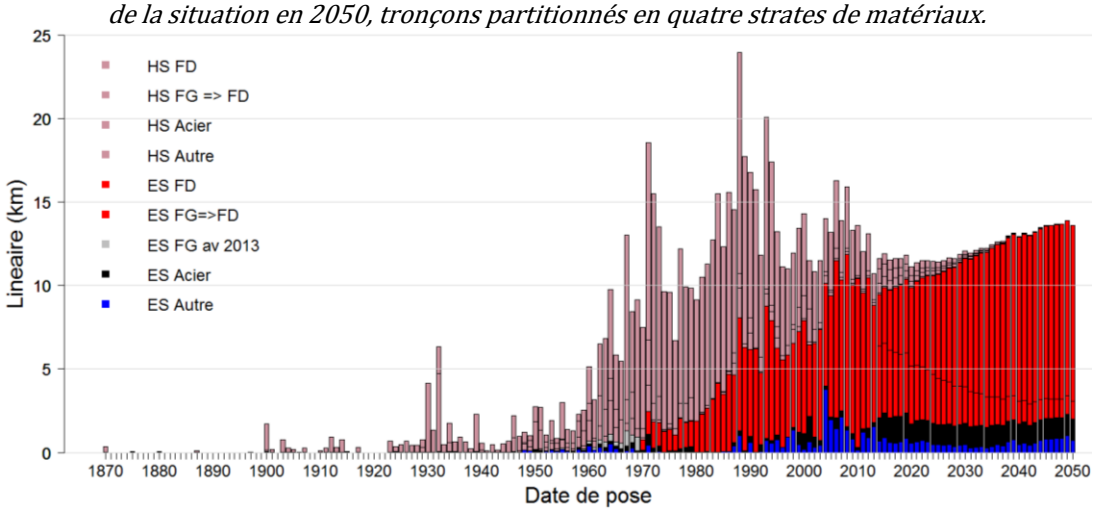


Figure 21 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2050, photographie de la situation en 2050, tronçons partitionnés en quatre strates de matériaux.

IV.1 Sortie I2R

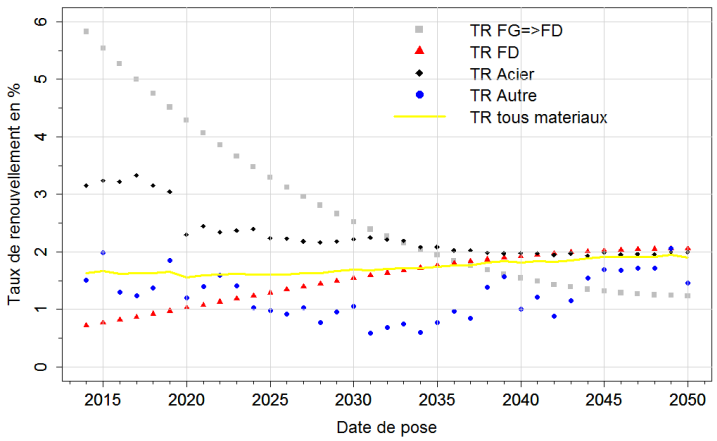


Figure 22 : Prévision des taux de renouvellement futurs de 2014 jusqu'en 2050 pour les tronçons en acier, FG, FD, Autre et tous matériaux confondus.

IV.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

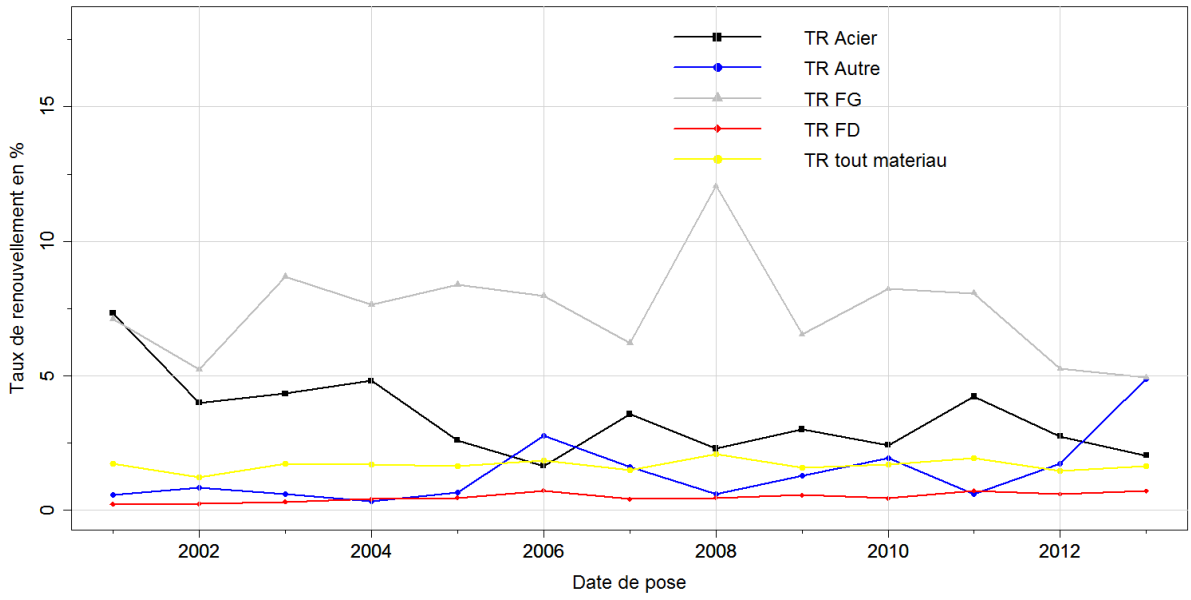


Figure 23 : Taux de renouvellement passé de 2001 à 2013 pour les tronçons en acier, FG, FD, Autre et tous matériaux confondus.

IV.1 Sortie I3R

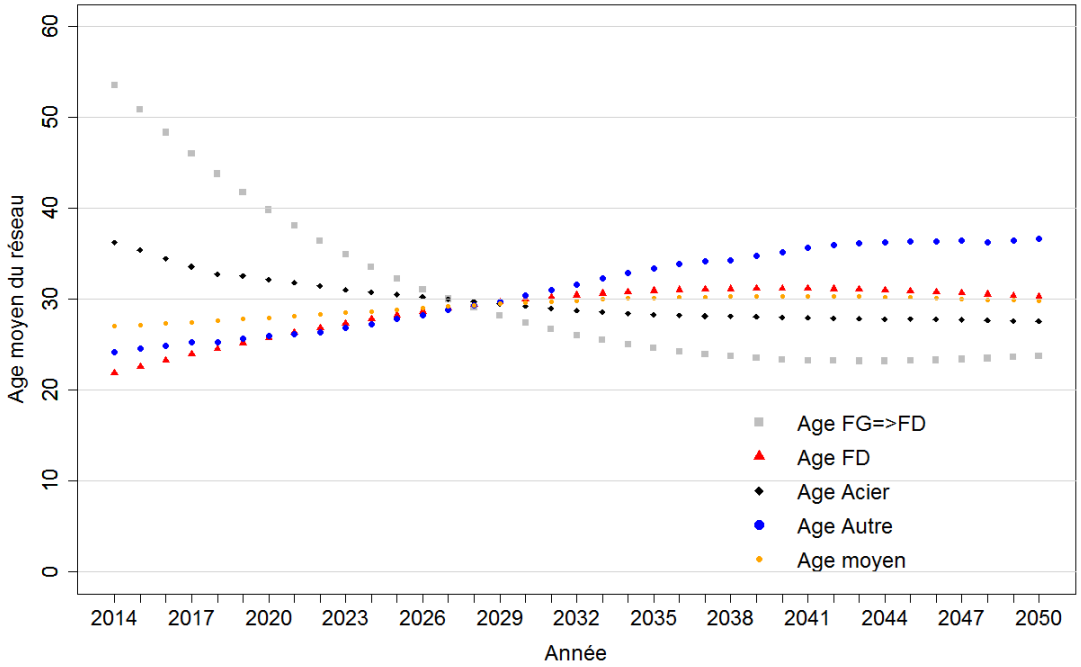


Figure 24 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2014 jusqu'en 2050 à eauservice Lausanne, scénario « statu quo, plusieurs courbes Matériaux», tronçons partitionnés par matériaux.

V Calcul de l'indicateur I1F

V.1 Entrée

Nom de la strate	Diamètre médian de la strate (en linéaire)	Diamètre pris dans la fiche de coût	Coûts des travaux sans coordination (CHF/m)	Coûts des travaux avec coordination (CHF/m)	Coûts des travaux à la strate (CHF/m)
Acier	300 mm	300 mm normal	1290	968	1032
Autre	180 mm	200 mm	574	431	459
FD	200 mm	200 mm	574	431	459
FG=>FD	180 mm	200 mm	574	431	459
Commentaire				-25%	80% coordonnés

V.2 Sortie

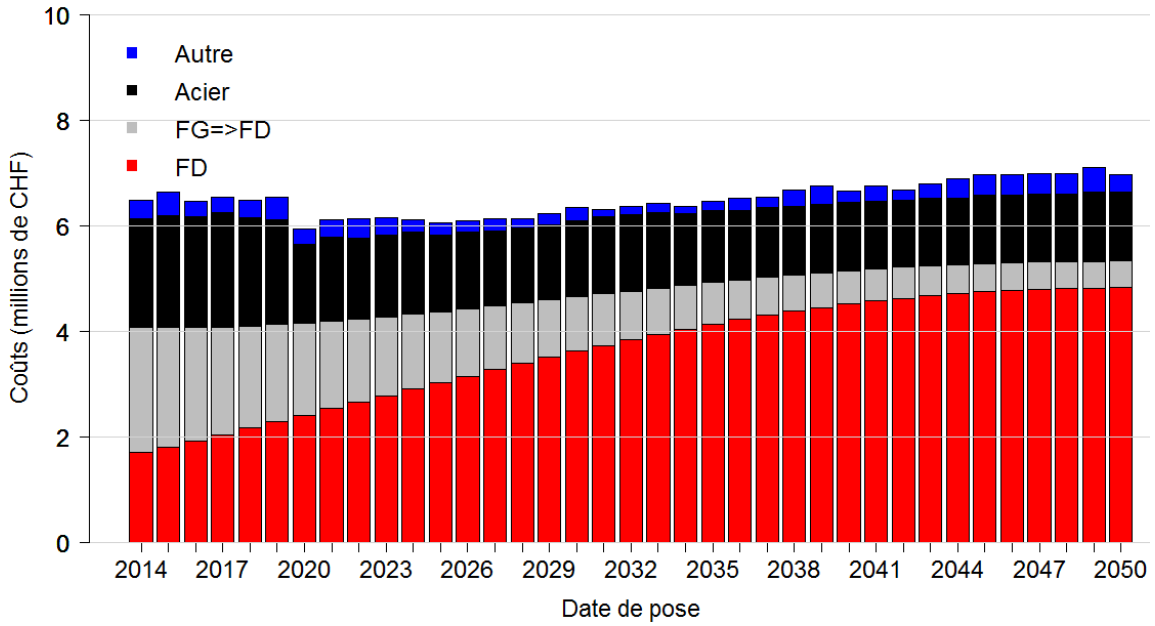


Figure 25 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2014 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes matériau », tronçons partitionnés par matériau.

VI Calcul de l'indicateur I1P

VI.1 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 14

Covariable	Age (t)	Longueur (Z_1)	Diamètre (Z_2)	Reha2(Z_3)	Pression(Z_4)
Unité	Siècle	m	mm	oui	m

Tableau 1 : Covariables (et leurs unités) employés dans le modèle LEYP

Paramètres / Nom strate	$\propto$	δ	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
Acier	3.17	1.31	-1.53	0.44	-0.0027	0.7	_
Autre	3.68	1.35	-0.82	_	_	_	_
FD	2.93	2.36	-0.45	0.39	-0.0044	1.01	0.03
FG	1.38	1	-1.26	0.31	-0.0022	0.51	0.05

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle LEYP par strate

VI.1 Entrée en tronçon

- Cf. Figure 15
- Cf. Tableau 1 & Tableau 2

VI.2 Sorties en tronçons

- Effectif :

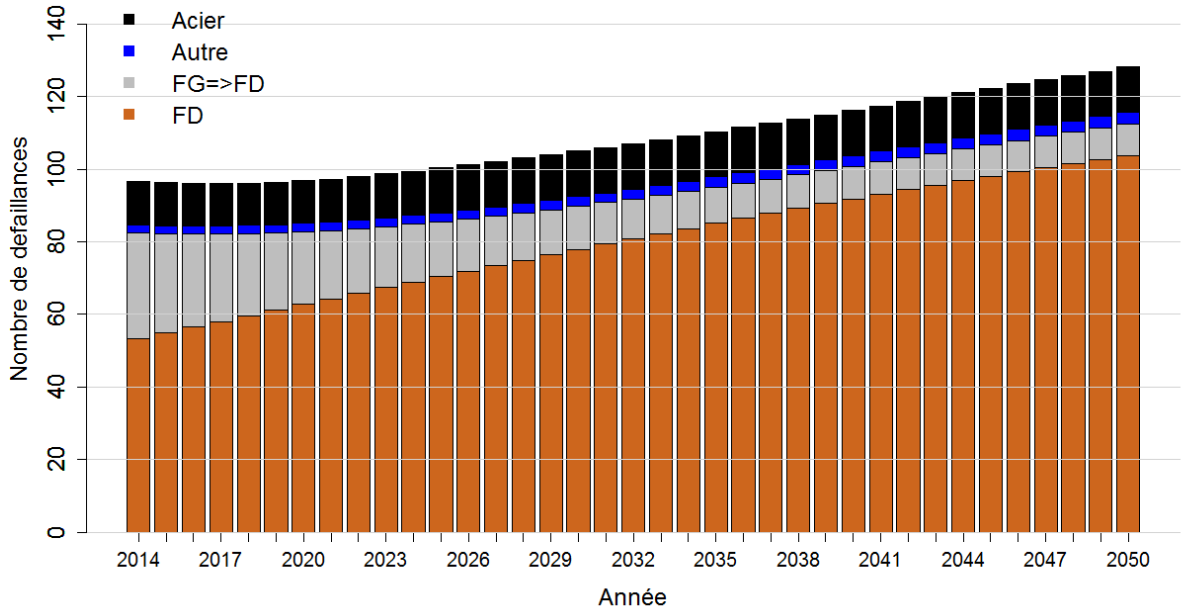


Figure 26 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2014 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes matériaux », tronçons partitionnés par matériau. Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif (Eq3)

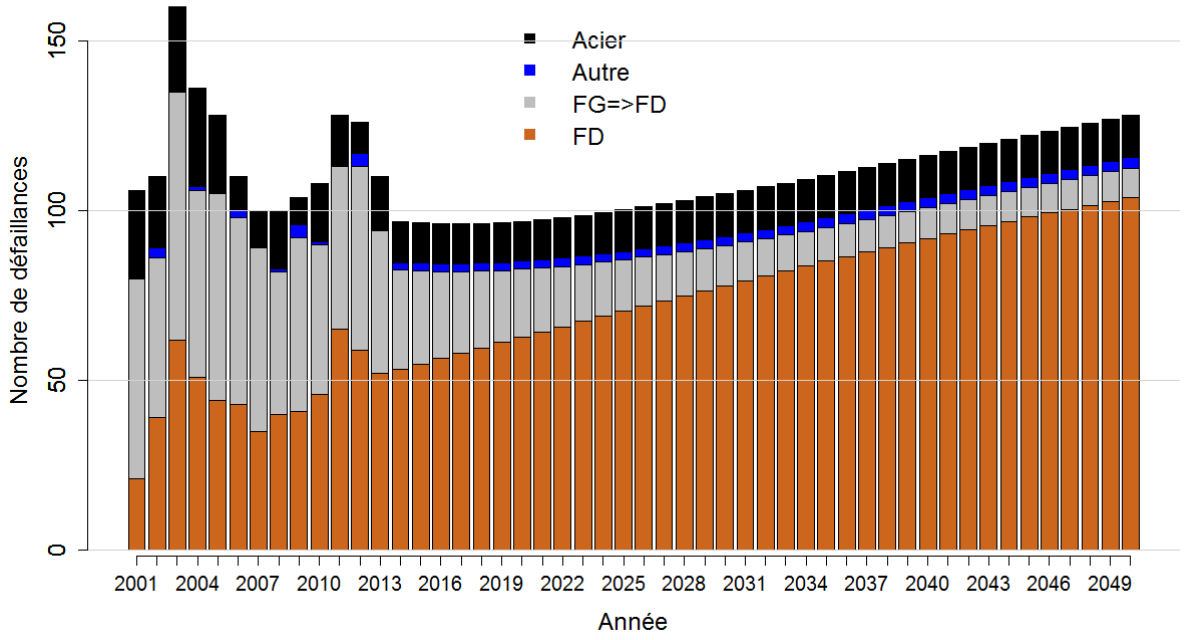


Figure 27 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2014 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes matériaux », tronçons partitionnés par matériau. Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif (Eq3) + passée

VI.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

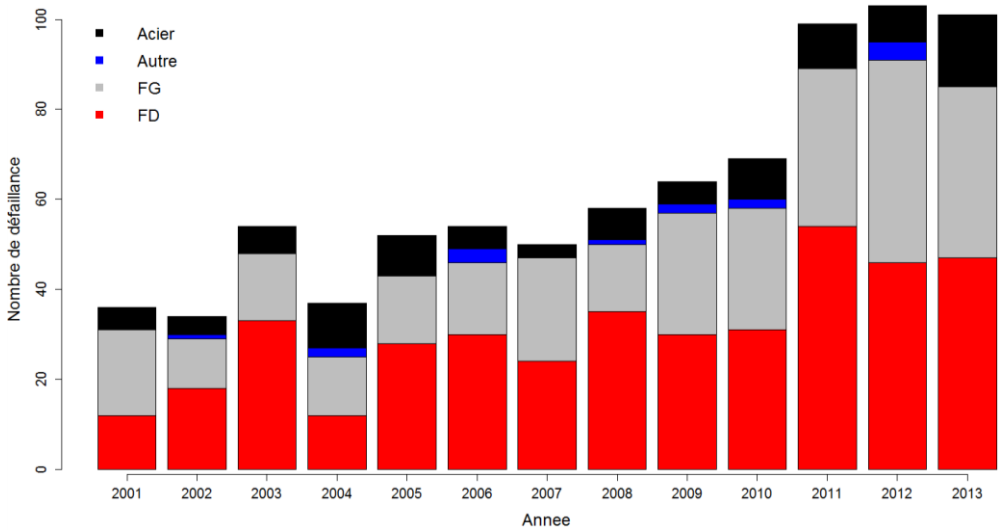


Figure 28 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2013, partitionné par le matériau

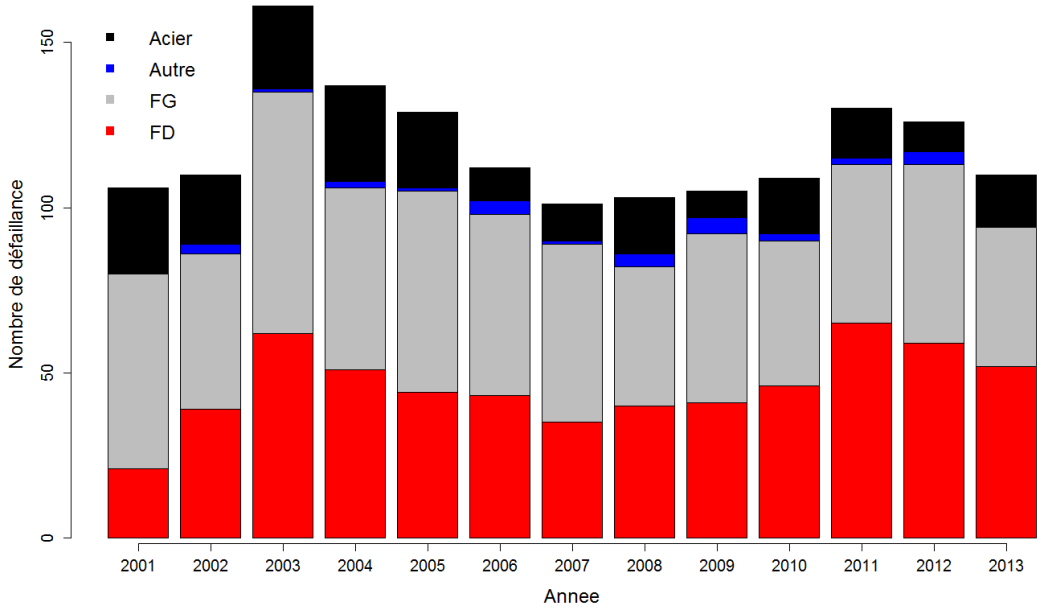


Figure 29 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2013 et mis hors service entre [2001, 2013], partitionné par le matériau

VII Calcul de l'indicateur I2F, coûts du renouvellement

VII.1 Entrée

Cf. Figure 26 (moins les tronçons mis HS en 2014)

CUR_p Coût [CHF]	Materiau	Diamètre (mm)
4 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi < 250$
6 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi \geq 250$
20 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BAT	$\phi < 250$
40 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BAT	$\phi \geq 250$

Tableau 3 : Valeur des coûts de réparation par tronçon

VII.2 Modèle

I2F = NbDef x Curp

VII.3 Sortie

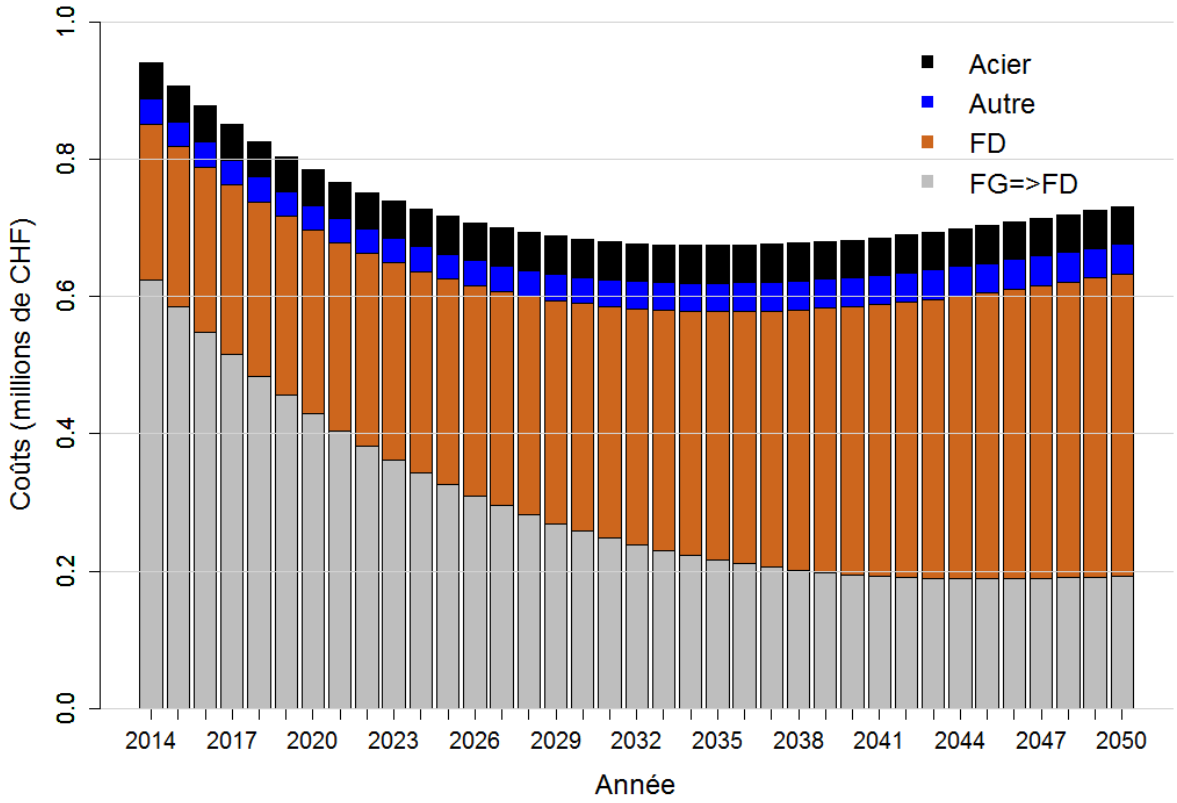


Figure 30 : Prévision pour l'indicateur I6-F entre 2014 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes matériau », tronçons partitionnés par matériau.

VIII Calcul de l'indicateur I2P continuité

VIII.1 Entrée

Cf. Figure 26 (moins les tronçons mis HS en 2014)

Et

tr (Heures)	Matériau	Diamètre (mm)
3	Acier, fonte ductile, PE	$\phi < 250$
4	Acier, fonte ductile, PE	$\phi \geq 250$
6	Fonte grise, Eternit	$\phi < 250$
8	Fonte grise, Eternit	$\phi \geq 250$

Tableau 4 : Temps de réparation par tronçon

Et

Description	Valeurs de NBH
Haute densité	40
Moyenne densité	25
Centre village	20
Vieille ville	15
Z.I. sensible	5
Z.I. normale	5
Faible densité	5
Transport bouclage	0
Zone verte	0

Tableau 5 : Coefficient lié au nombre d'usager associé à ce tronçon

Valeurs SC	Description
1	Clients sensibles
0.6	Z.I. sensible
0.5	Z.I. normale
0.3	Haute densité
0.2	Vieille ville
0.2	Centre village
0.2	Moyenne densité
0.1	Faible densité
0	Transport bouclage
0	Zone verte

Tableau 6 : Coefficient lié à la vulnérabilité des usagers associé à ce tronçon

VIII.2 Modèle

I2P-continuite = NbDef x tr x NPS x SC

VIII.1 Sortie

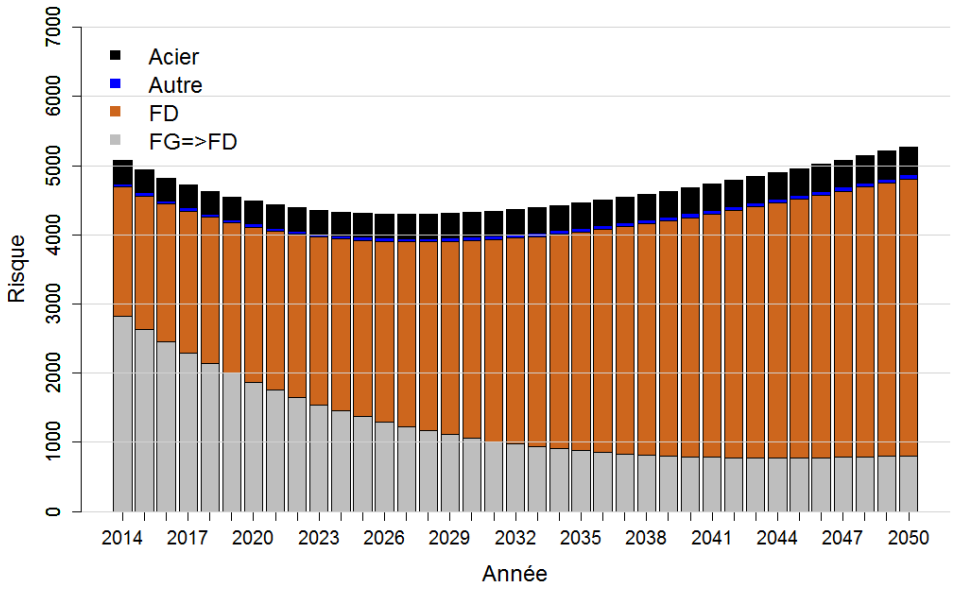


Figure 31 : Prévision pour l'indicateur I7-P_continuité entre 2014 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes matériau », tronçons partitionnés par matériau.

IX Calcul de l'indicateur I3P voirie

IX.1 Entrée

Cf. Figure 26 (moins les tronçons mis HS en 2014)

cf. suivant

Valeur de SR	Transport en commun	Niveau du trafic
1	TL trolleybus	trafic $\geq$ 15000
0.9	TL trolleybus	trafic $<$ 15000
0.8	TL Bus	trafic $\geq$ 15000
0.7	TL Bus	trafic $<$ 15000
0.7	pas TL	trafic $\geq$ 20000
0.5	pas TL	20000 $>$ trafic $\geq$ 10000
0.4	pas TL	10000 $>$ trafic $\geq$ 5000
0.2	pas TL	5000 $>$ trafic $\geq$ 500
0.0	pas TL	trafic $<$ 500

Tableau 7 : Coefficient lié à la quantité et à la vulnérabilité du trafic routier associé à ce tronçon

IX.1 Modèle

I3P-voirie = NbDef x tr x SR

IX.1 Sortie

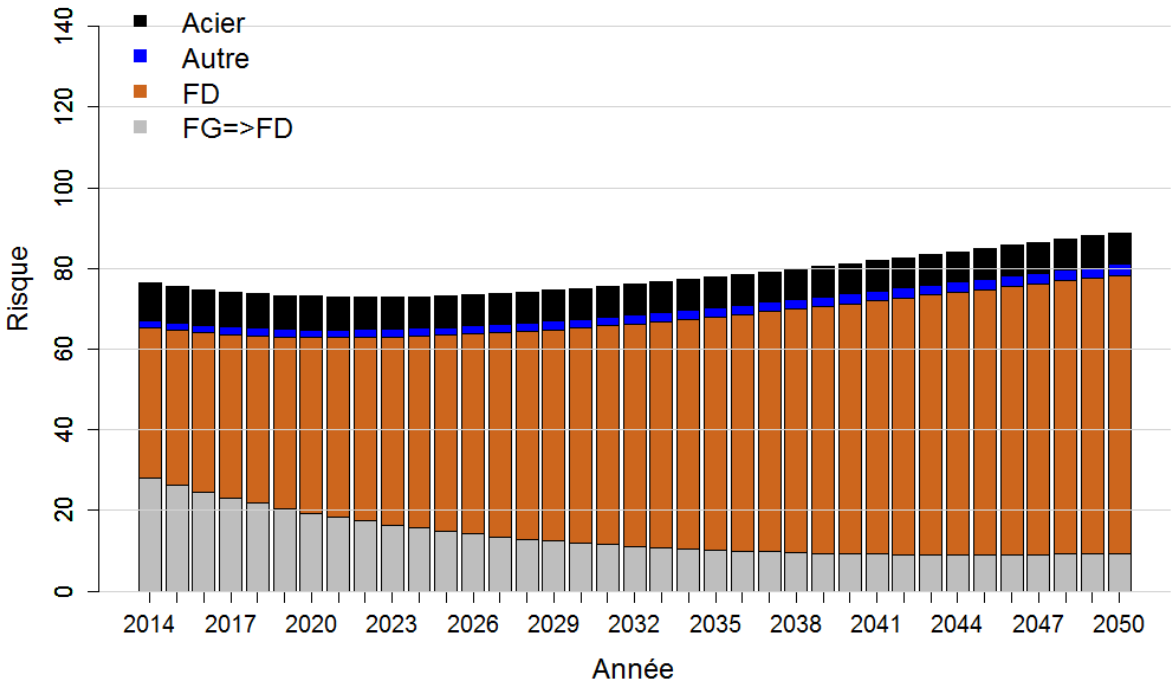


Figure 32 : Prévision pour l'indicateur I7-P_voirie entre 2014 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes matériau », tronçons partitionnés par matériau.

X Calcul de l'indicateur I4P inondation

X.1 Entrée

Cf. Figure 26 (moins les tronçons mis HS en 2014)
+ diamètre du tronçon (mm)
+ pression de l'eau dans le tronçon (m de colonne d'eau)

SI	Description
1	Vieille ville
0.8	Z.I. sensible
0.6	Haute densité
0.5	Centre village
0.4	Moyenne densité
0.4	Z.I. normale
0.2	Faible densité
0	Transport bouclage
0	Zone verte

Tableau 8 : Coefficient lié à la quantité, à la vulnérabilité et à la valeur des biens autour du tronçon

X.1 Modèle

I4P-innondation = NbDef x dia x dia x PRES x SI

X.1 Sortie

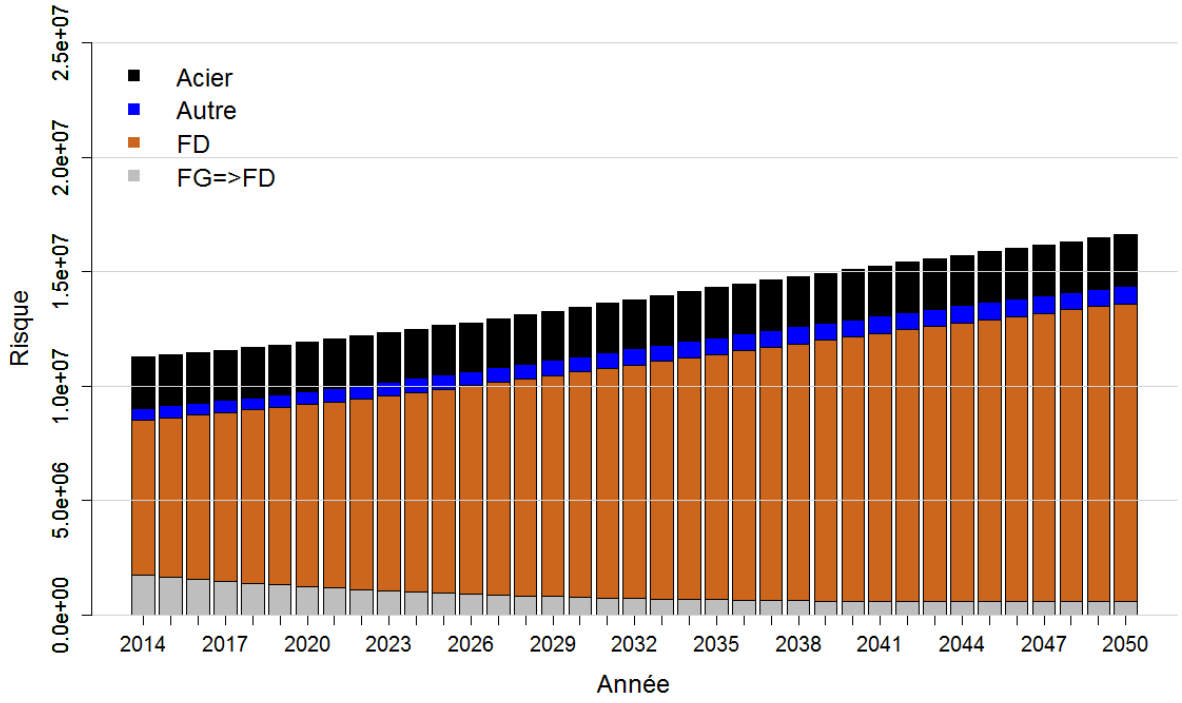


Figure 33 : Prévision pour l'indicateur I7-P_inondation entre 2014 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes matériau », tronçons partitionnés par matériau.

Scénario 10 (code G)

Plus drastique avec les fontes grises

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Périmètre	Tout le réseau		Réseau en ville									
Stratifié ?	Non	Ville/ Montagne	Non				Diamètre	NDOA		Matériaux	Vulnérabilité	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2001; 2012]		[2001; 2007]	[2001; 2013]								
Statu quo ?	Oui		Oui		On arrête de renouveler	On vise un TR de 1%	Oui			Plus drastique avec les fontes grises	Oui	> autour des éléments vulnérables

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

⇨ Donnée Christelle 2014

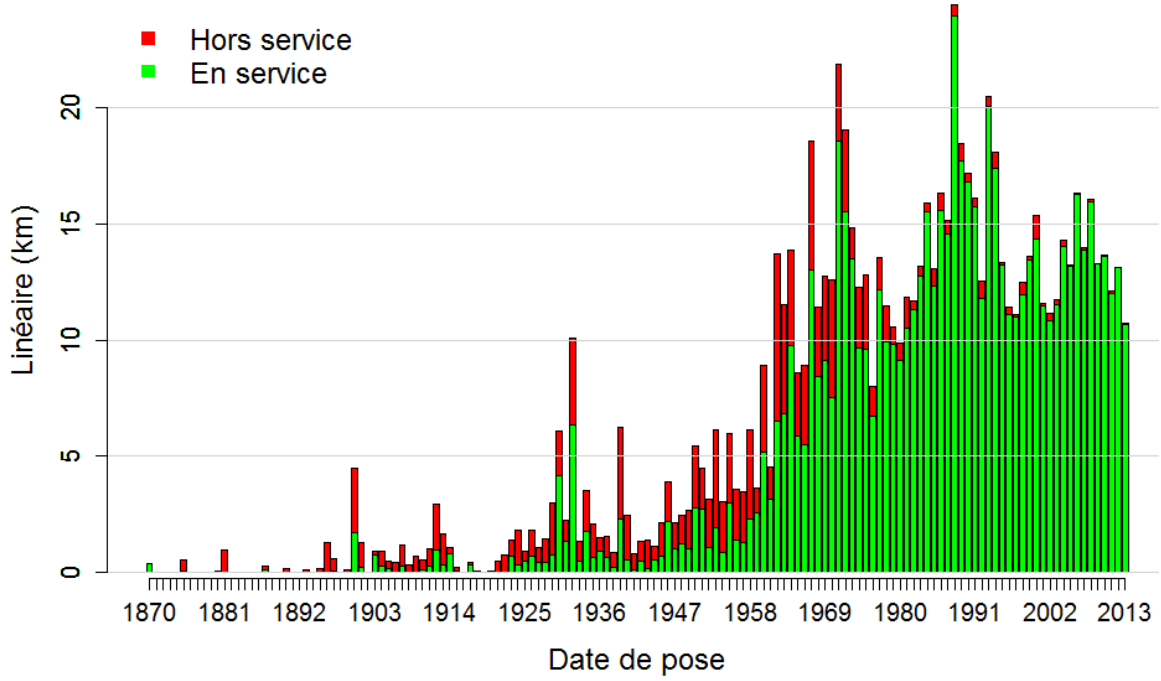


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service (715 km) et Hors Service (156 km) au 31/12/2013 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2001 ; 2013])

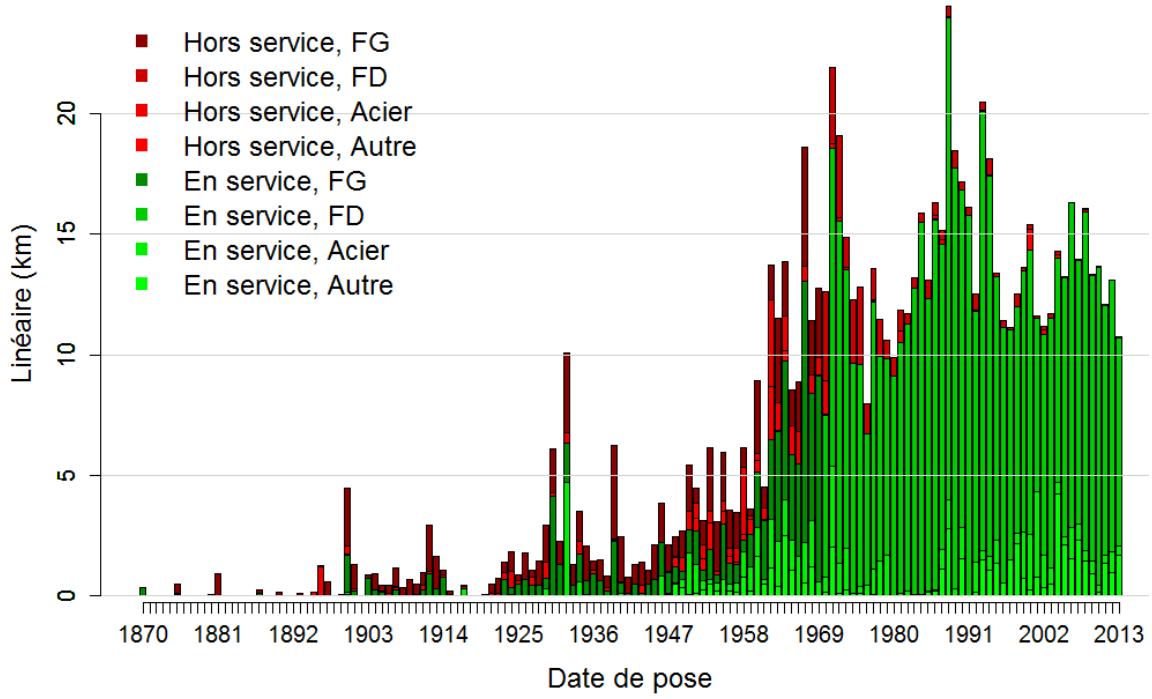


Figure 2 : Linéaire en service en 31/12/2013 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon 4 strates de matériau et selon le statut.

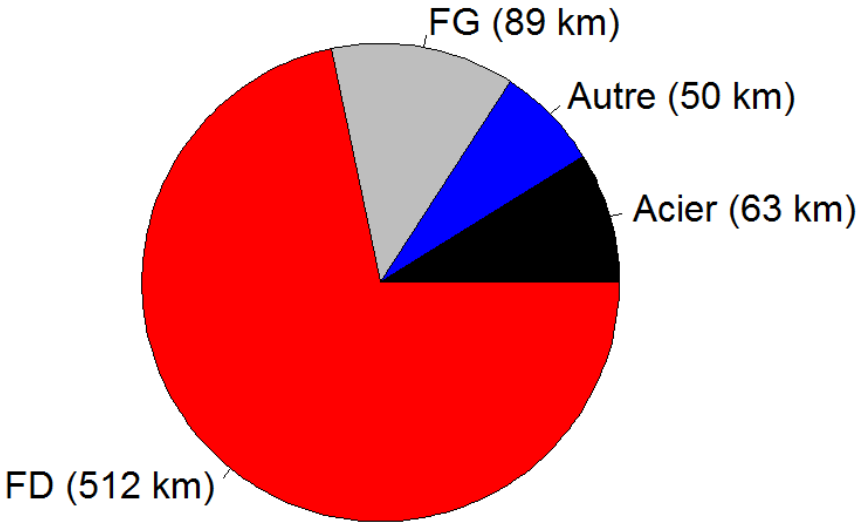


Figure 3 : Proportion du linéaire ES au 31/12/2013 en fonction des quatre strates de matériau

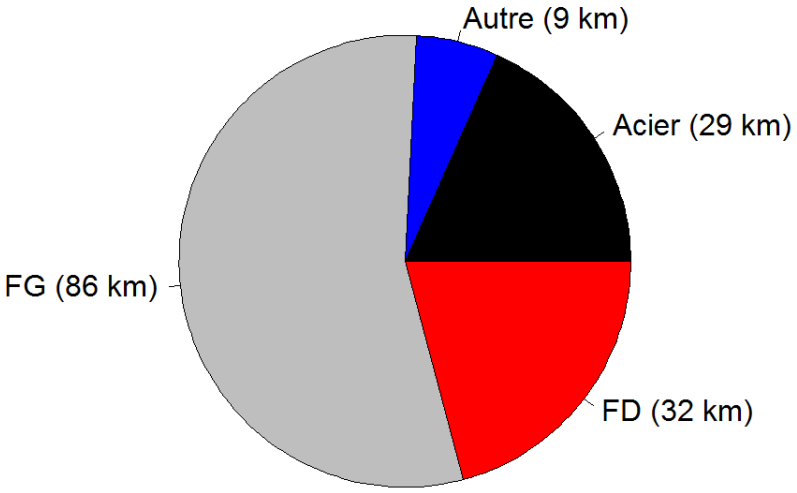


Figure 4 : Proportion du linéaire mis HS entre [2001, 2013] en fonction des quatre strates de matériau

I.2 Sortie en linéaire

I.2.1 Sans IC

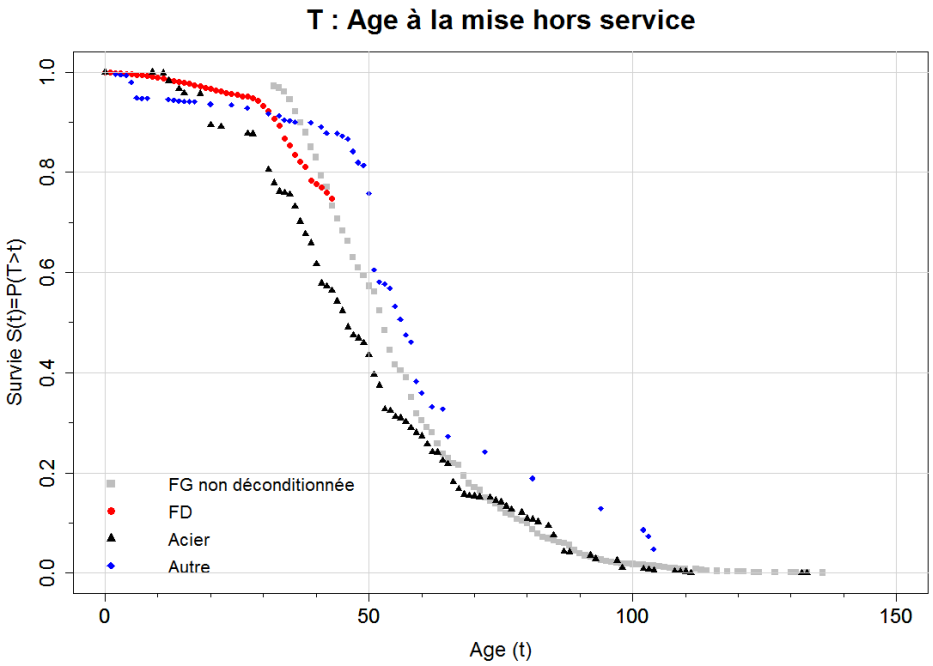


Figure 5 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tronçons par strate de matériau

I.2.2 Avec Intervalle de Confiance

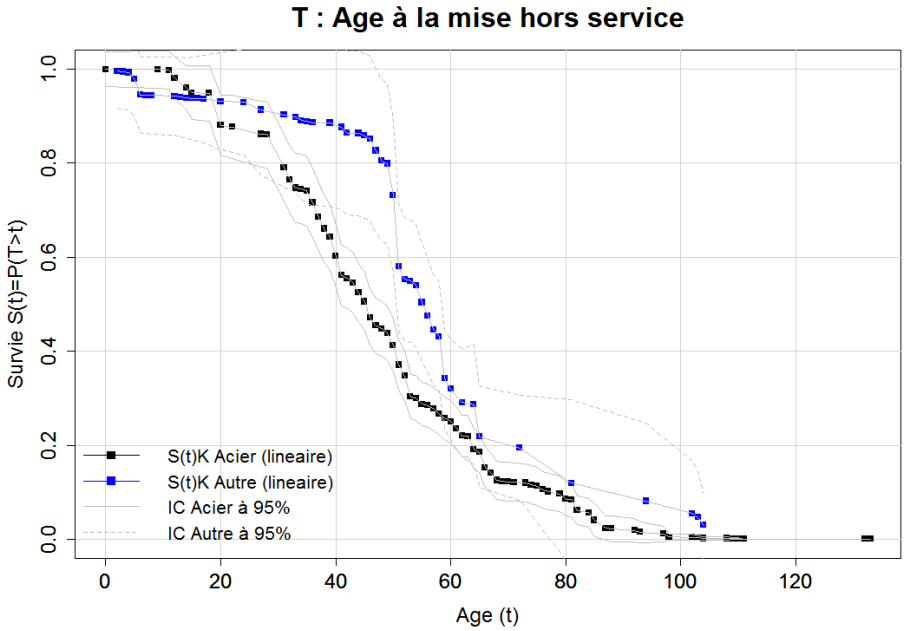


Figure 6 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tronçons par strate de matériau (IC sig NB)

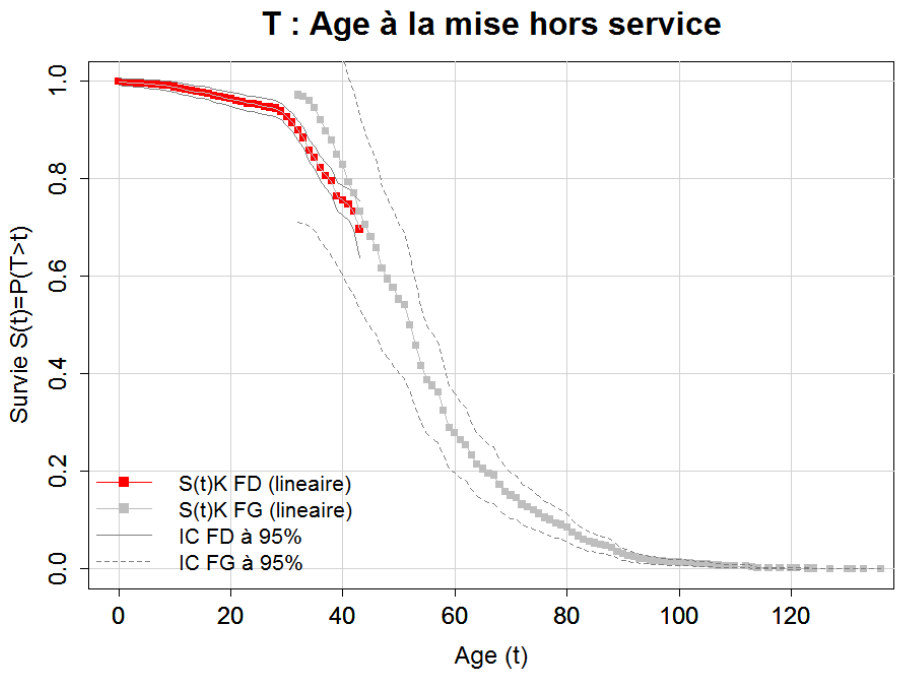


Figure 7 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tronçons par strate de matériau (IC sig NB)

I.1 Entrée en effectif

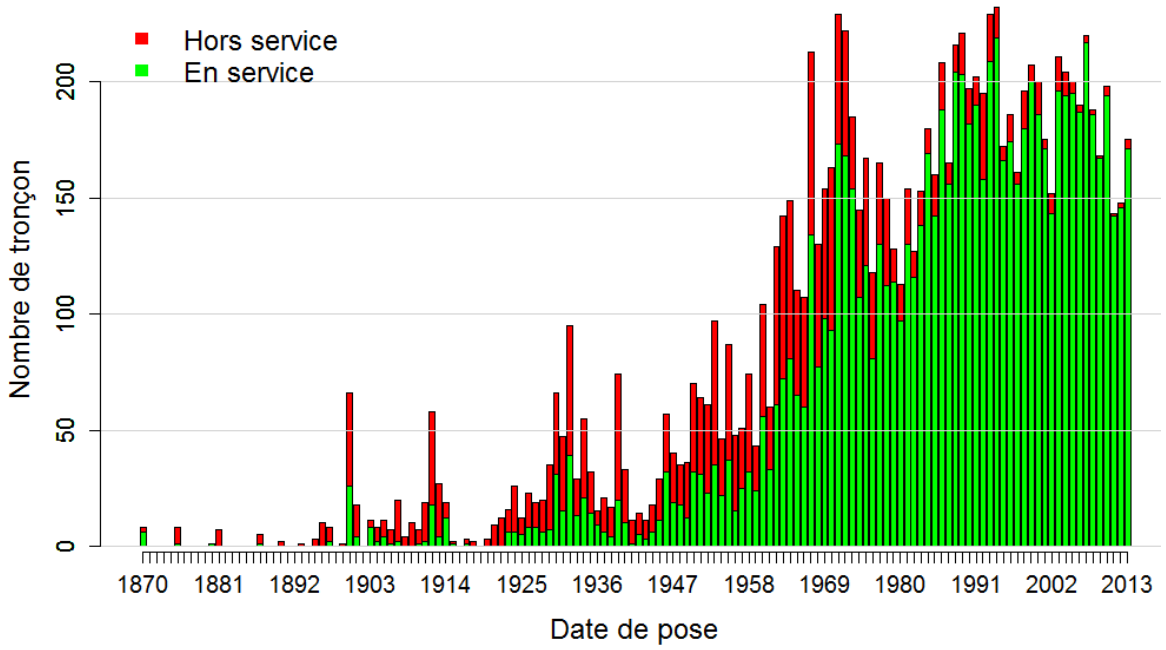


Figure 8 : Histogramme du nombre de tronçons En Service et Hors Service au 31/12/2013 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2001 ; 2013])

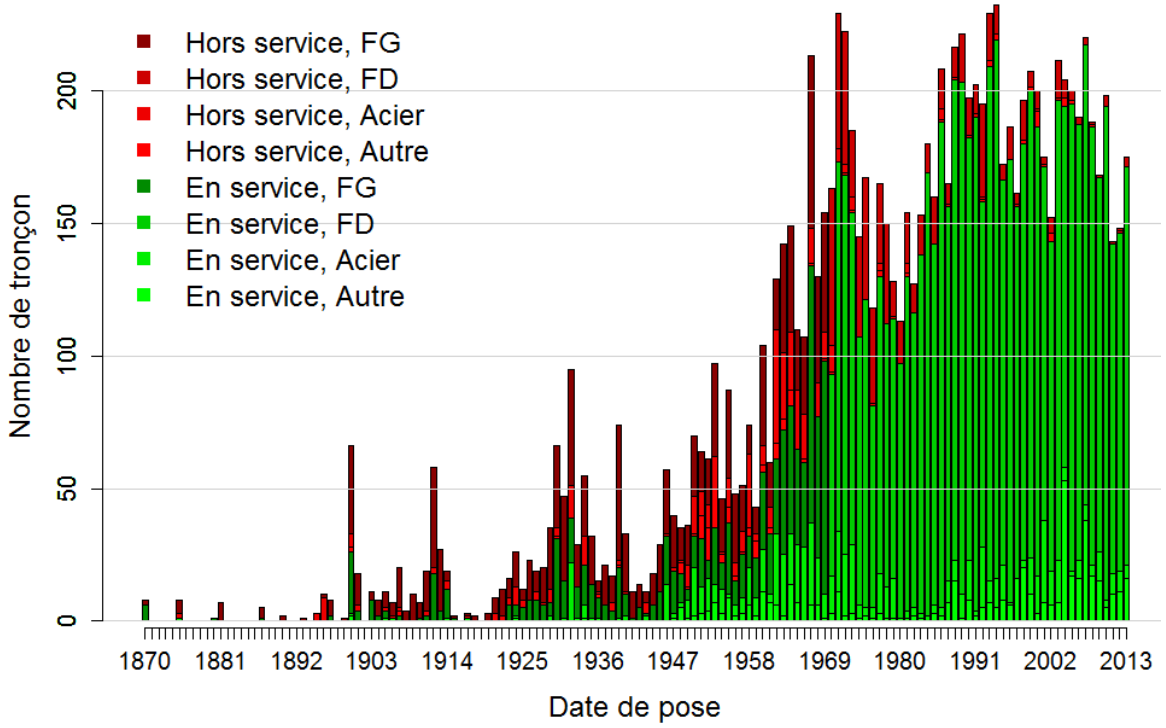


Figure 9 : Nombre de tronçons en service en 31/12/2013 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon 4 strates de matériau et selon le statut.

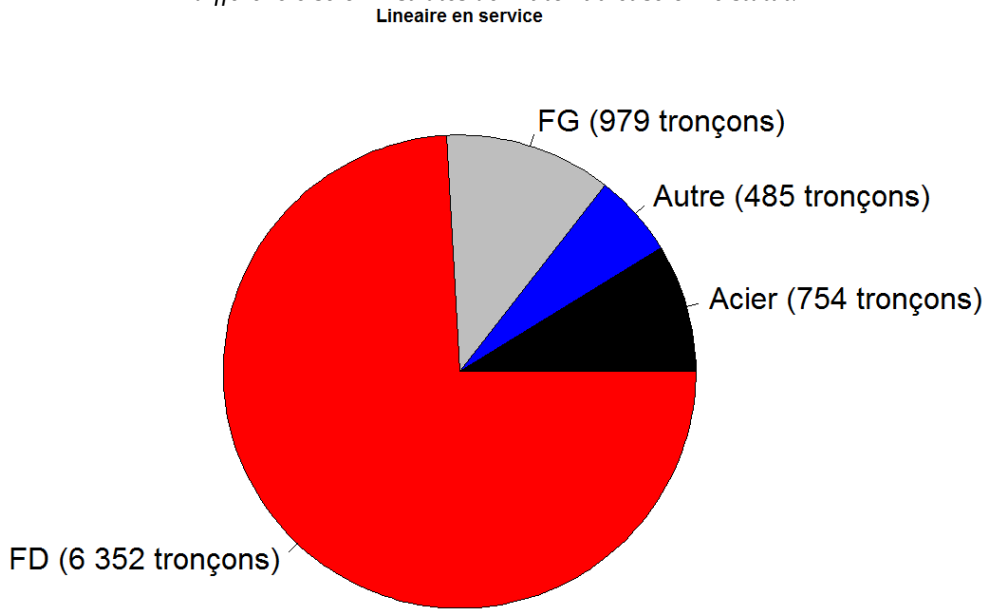


Figure 10 : Proportion du nombre de tronçon ES en fonction de quatre strates de matériau

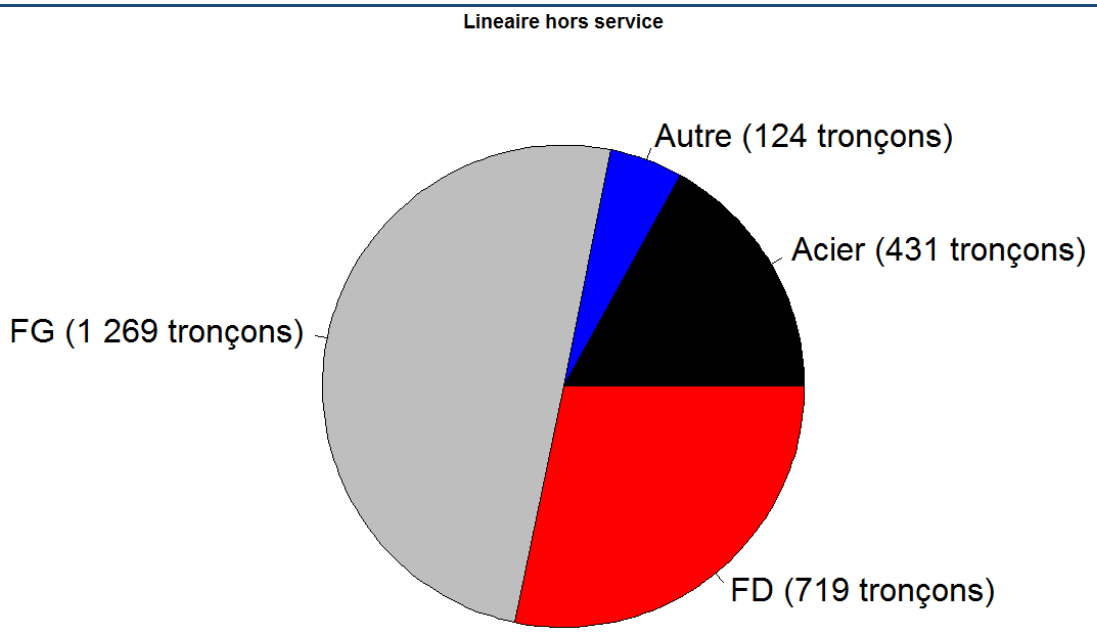


Figure 11 : Proportion du nombre de tronçon HS en fonction de quatre strates de matériau

I.2 Sortie en effectif

I.2.1 Sans Intervalle de Confiance

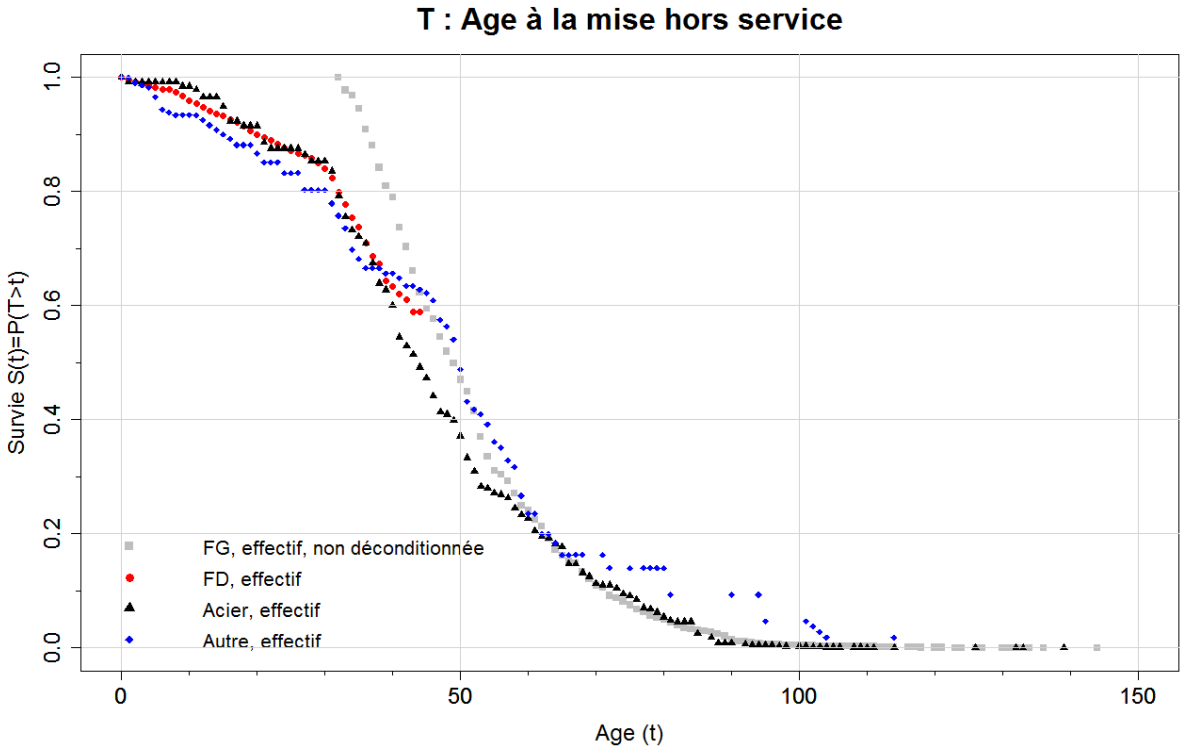


Figure 12 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en nombre de tronçons par strate de matériau

I.2.2 Avec Intervalle de Confiance

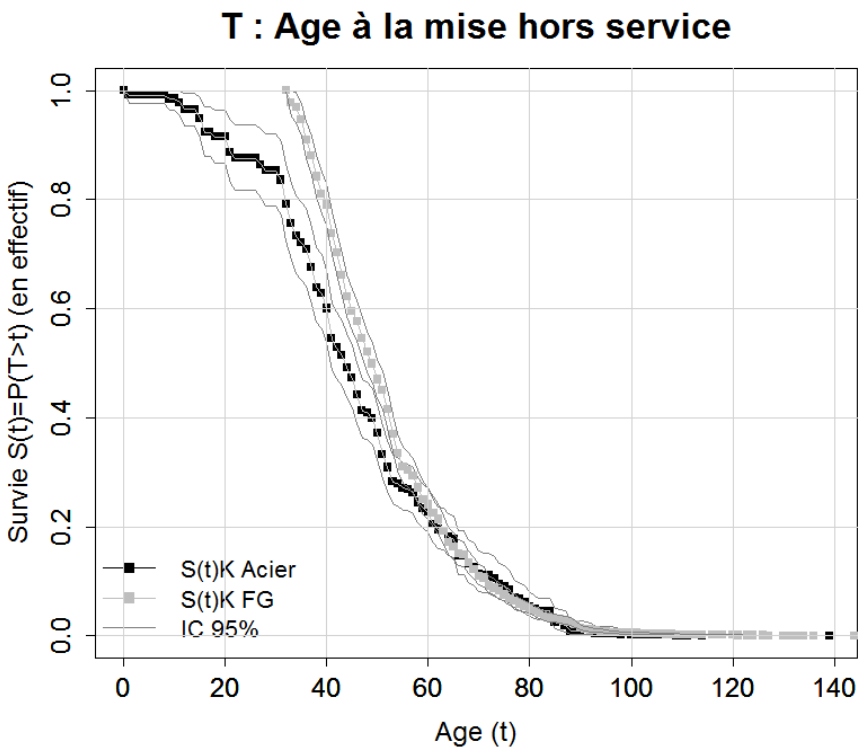


Figure 13 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en nombre de tronçons par strate de matériau (IC log NB)

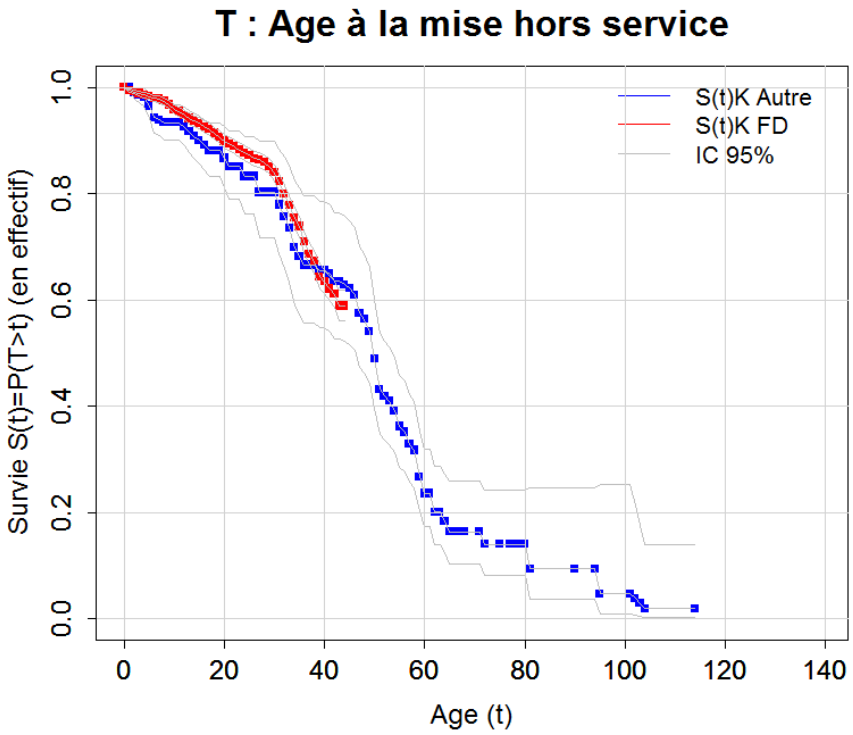


Figure 14 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en nombre de tronçons par strate de matériau (IC log NB)

II Scénario G

- Groupe de tronçons : transport normal + distribution (moins Brêt et moins les moins de 6m)
- Date export donné : 2014 par Christelle
- Photographie au 31 /12 /2013
- stratification par matériaux :
  - fonte grise
  - fonte ductile
  - Acier
  - Autre
- On renouvelle la fonte grise par de la fonte ductile
- Courbes de survie prospectives les même pour tous les matériaux que par le passé, déconditionner méthode Weibull (Yves) sauf pour la fonte grise (plus drastique)
- Taux de travaux coordonnés en général : 80%. Taux des travaux non coordonnées : 20%.

III Construction scénario prospectif G

III.1 Entrée en linéaire

Cf. : Figure 5

III.2 Sortie en linéaire

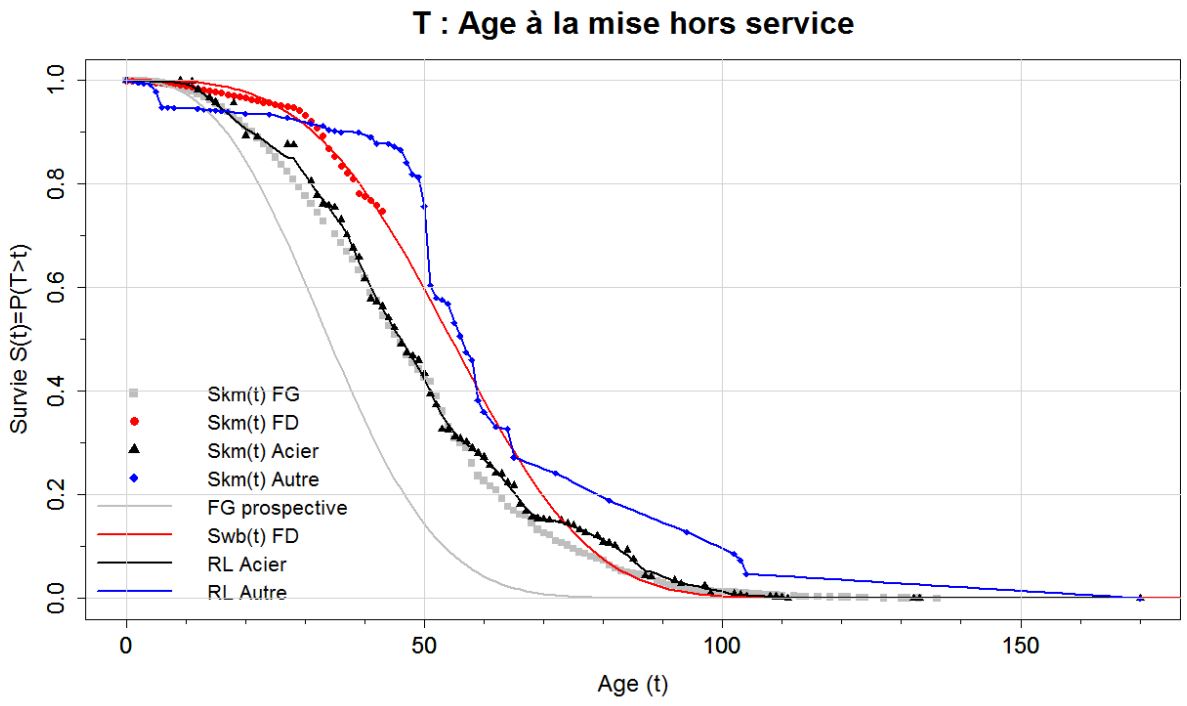


Figure 15 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait) par strate de matériau

III.1 Entrée en effectif

Cf. : Figure 12

III.2 Sortie en effectif

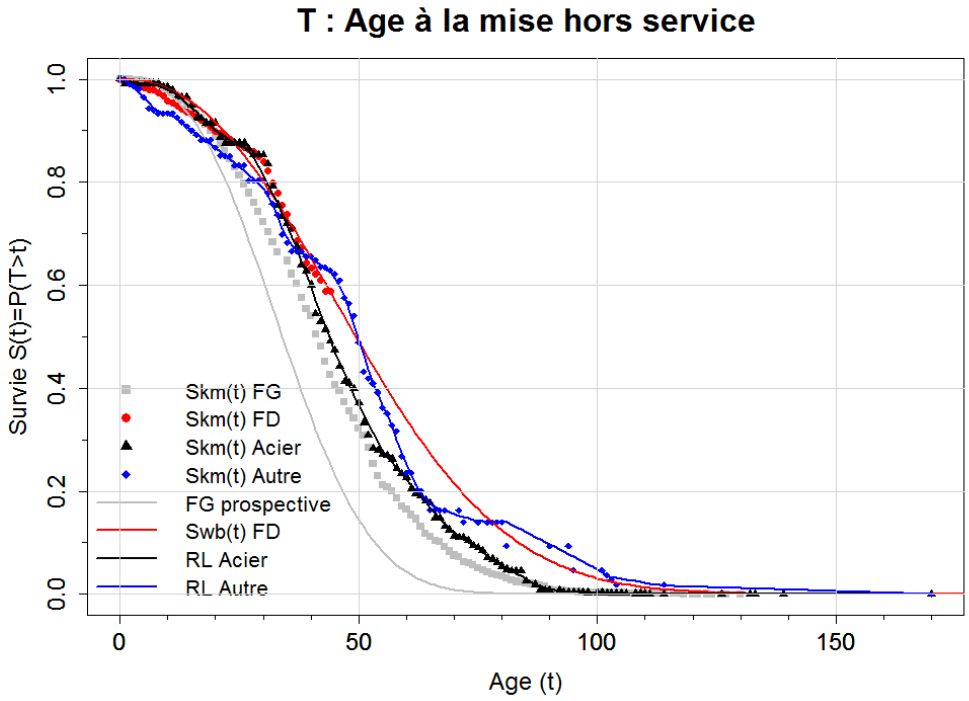


Figure 16 : Courbes de survie prospective en effectif (trait) par strates de matériau

III.3 Comparaison des sorties en linéaire et en effectif

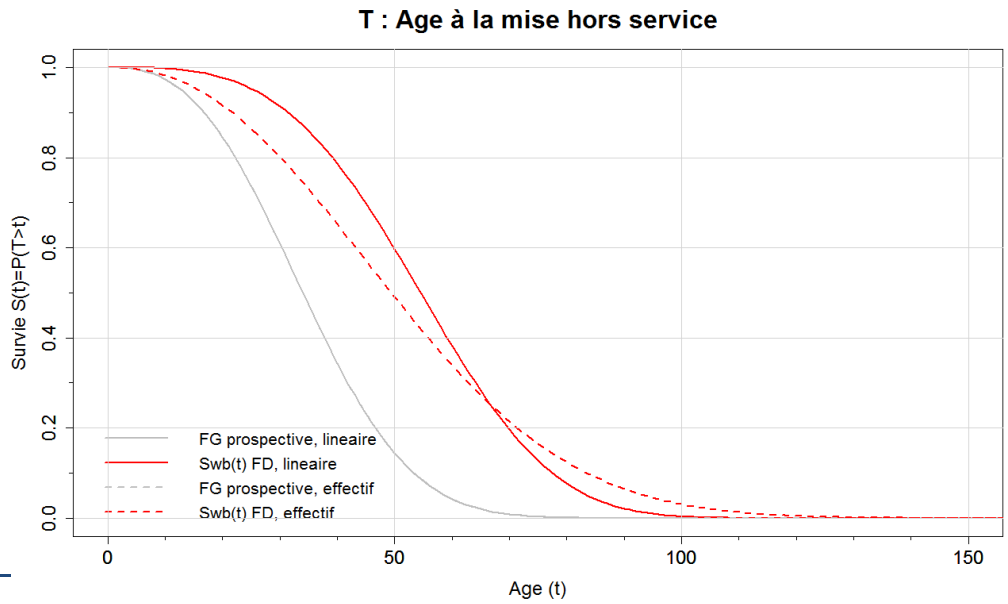


Figure 17 : Comparaison des courbes de survie prospectives en effectif et en linéaire par strates de matériaux

IV Calcul des indicateurs I1R, I2R et I3R

IV.1 Entrée

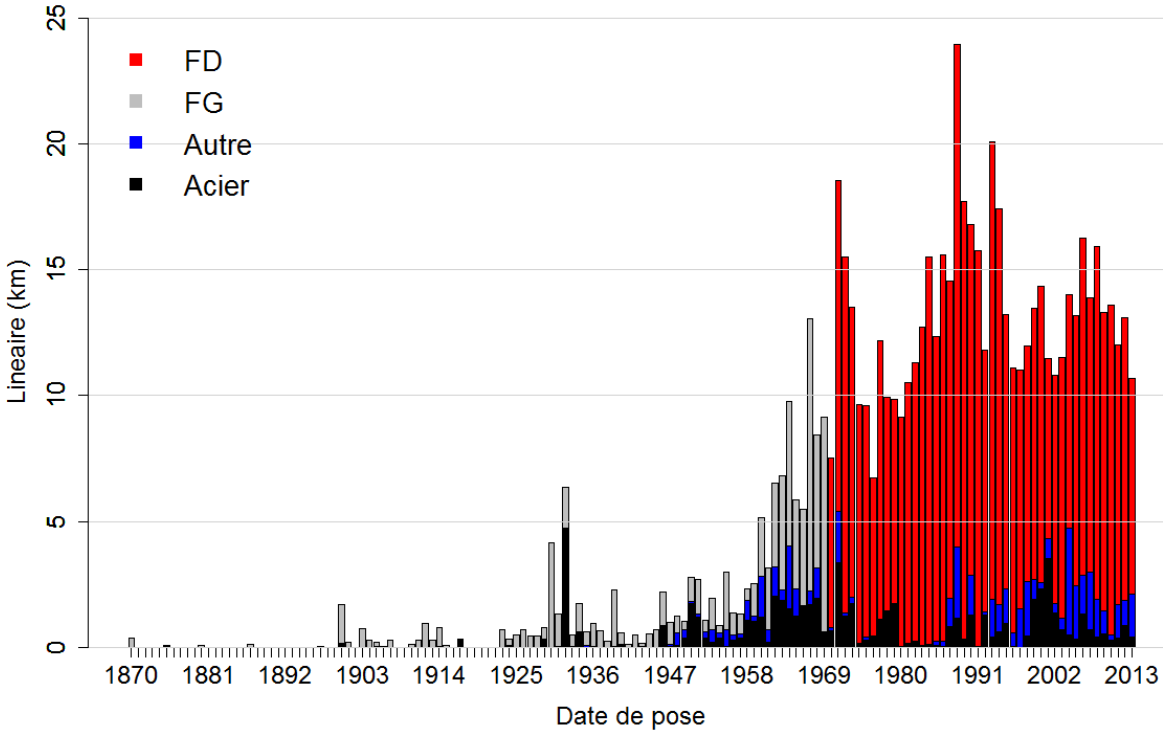


Figure 18 : Linéaire en service en 31/12/2013 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon quatre strates de matériaux.

IV.2 Sortie

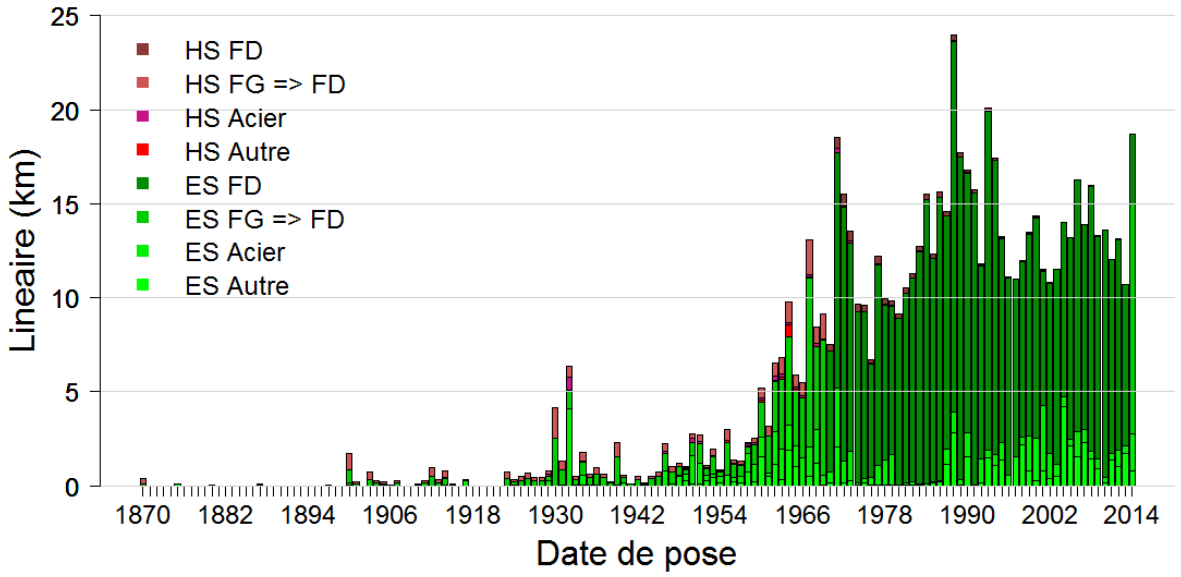


Figure 19 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2014, photographie de la situation en 2014, tronçons partitionnés en quatre strates de matériaux.

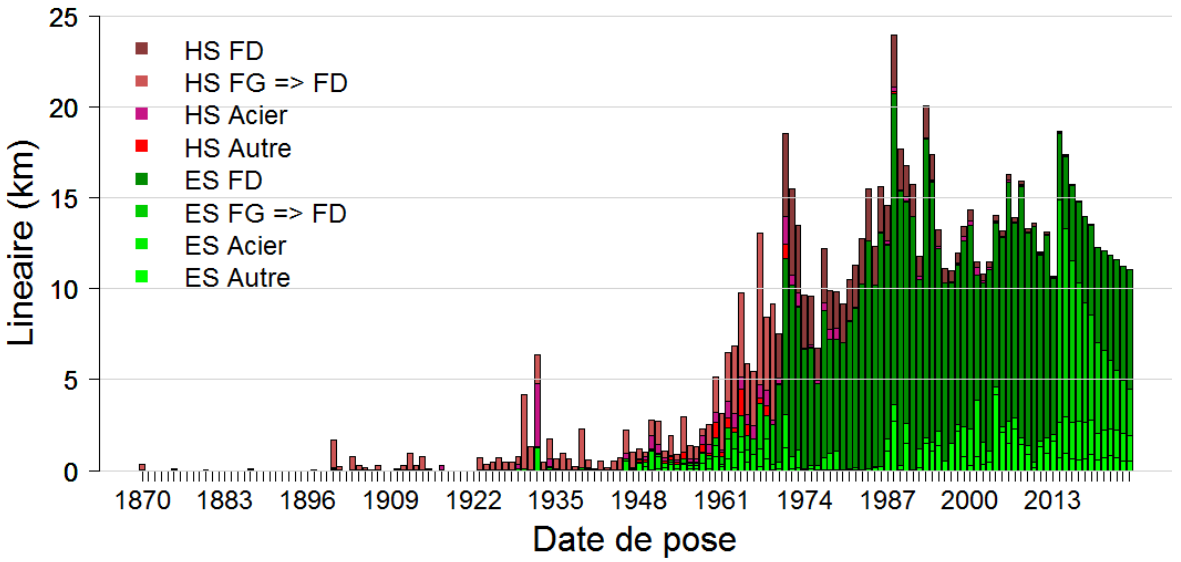


Figure 20 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2025, photographie de la situation en 2025, tronçons partitionnés en quatre strates de matériaux.

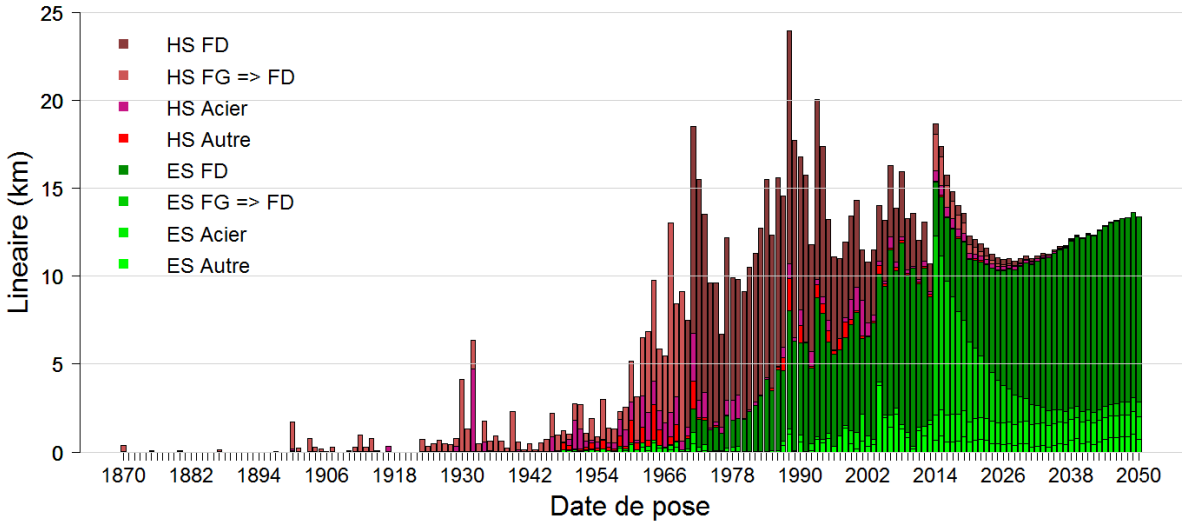


Figure 21 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2050, photographie de la situation en 2050, tronçons partitionnés en quatre strates de matériaux.

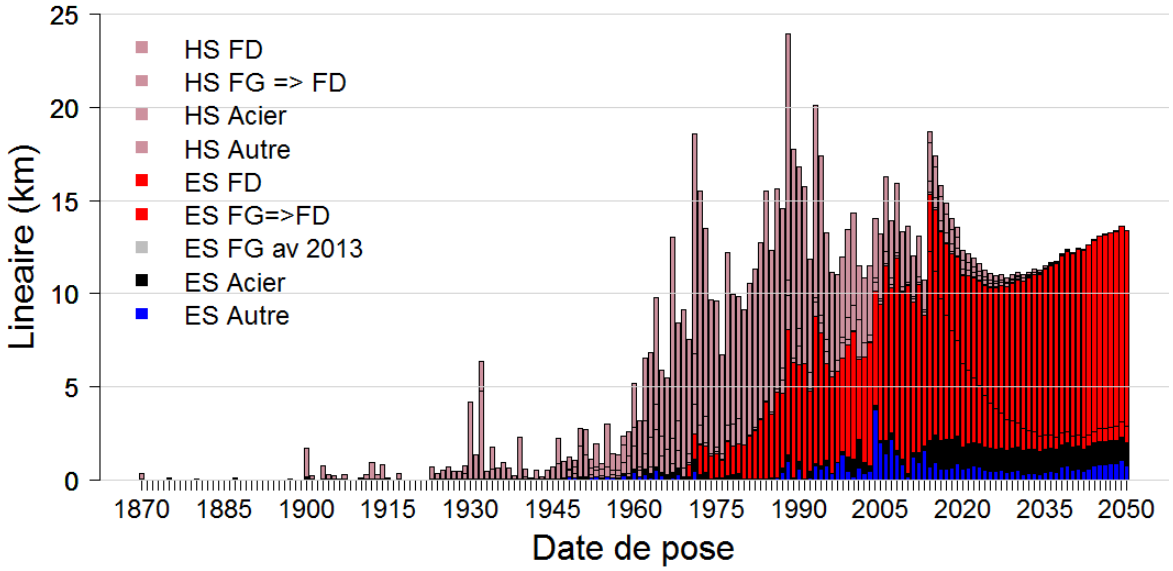


Figure 22 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2050, photographie de la situation en 2050, tronçons partitionnés en quatre strates de matériaux.

IV.1 Sortie I2R

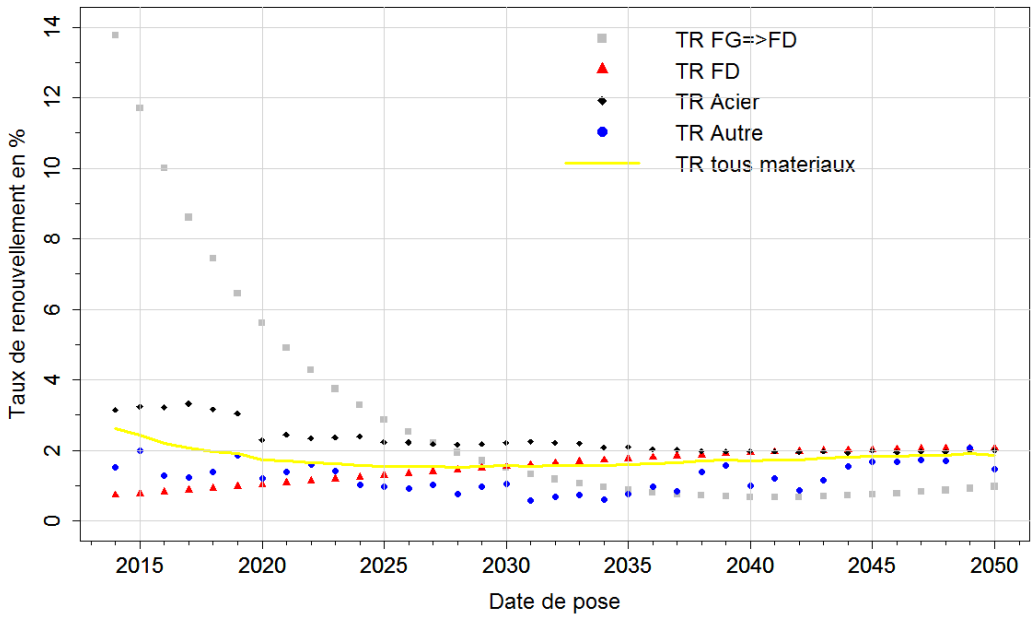


Figure 23 : Prévision des taux de renouvellement futurs de 2014 jusqu'en 2050 pour les tronçons en acier, FG, FD, Autre et tous matériaux confondus.

IV.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

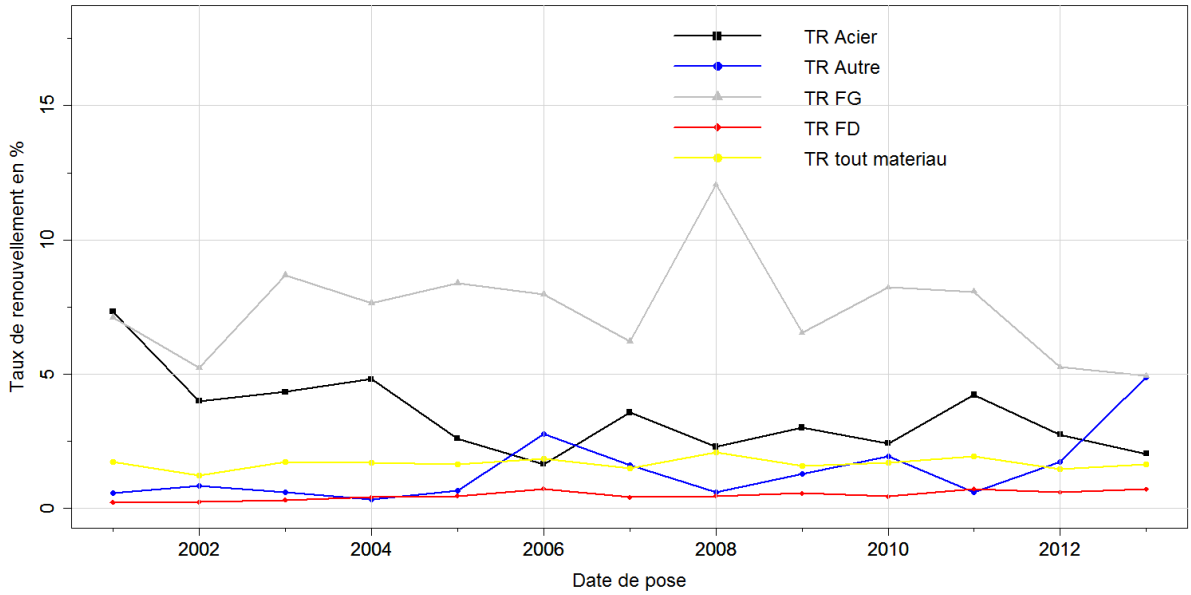


Figure 24 : Taux de renouvellement passé de 2001 à 2013 pour les tronçons en acier, FG, FD, Autre et tous matériaux confondus.

IV.1 Sortie I3R

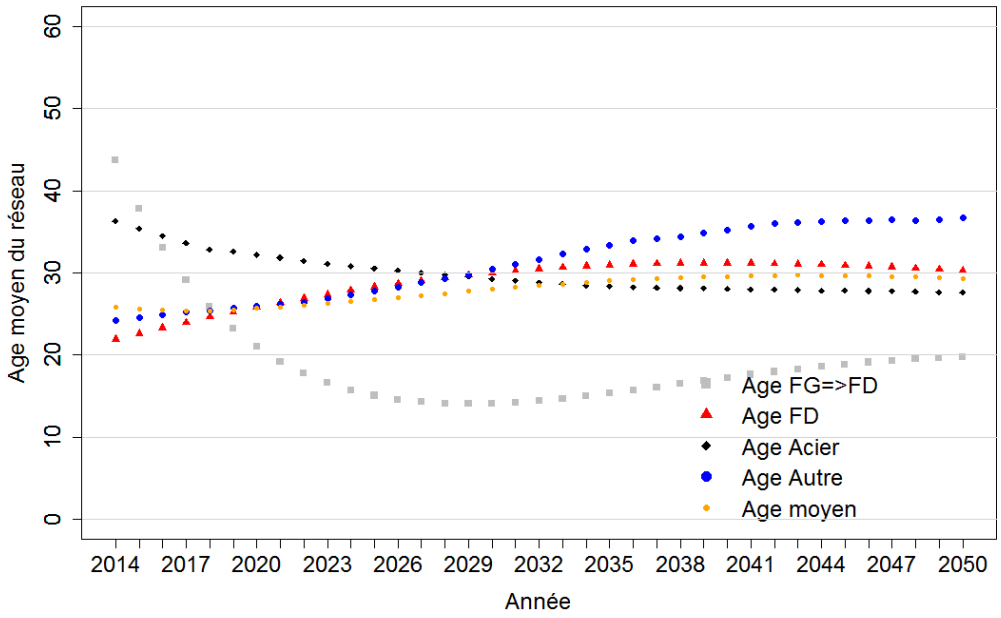


Figure 25 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2014 jusqu'en 2050 à eauservice Lausanne, scénario « plus drastique avec les fontes grise, plusieurs courbes Matériaux», tronçons partitionnés par matériaux.

V Calcul de l'indicateur I1F : coût du renouvellement

V.1 Entrée

Nom de la strate	Diamètre médian de la strate (en linéaire)	Diamètre pris dans la fiche de coût	Coûts des travaux sans coordination (CHF/m)	Coûts des travaux avec coordination (CHF/m)	Coûts des travaux à la strate (CHF/m)
Acier	300 mm	300 mm normal	1290	968	1032
Autre	180 mm	200 mm	574	431	459
FD	200 mm	200 mm	574	431	459
FG=>FD	180 mm	200 mm	574	431	459
Commentaire				-25%	80% coordonnés

V.2 Sortie

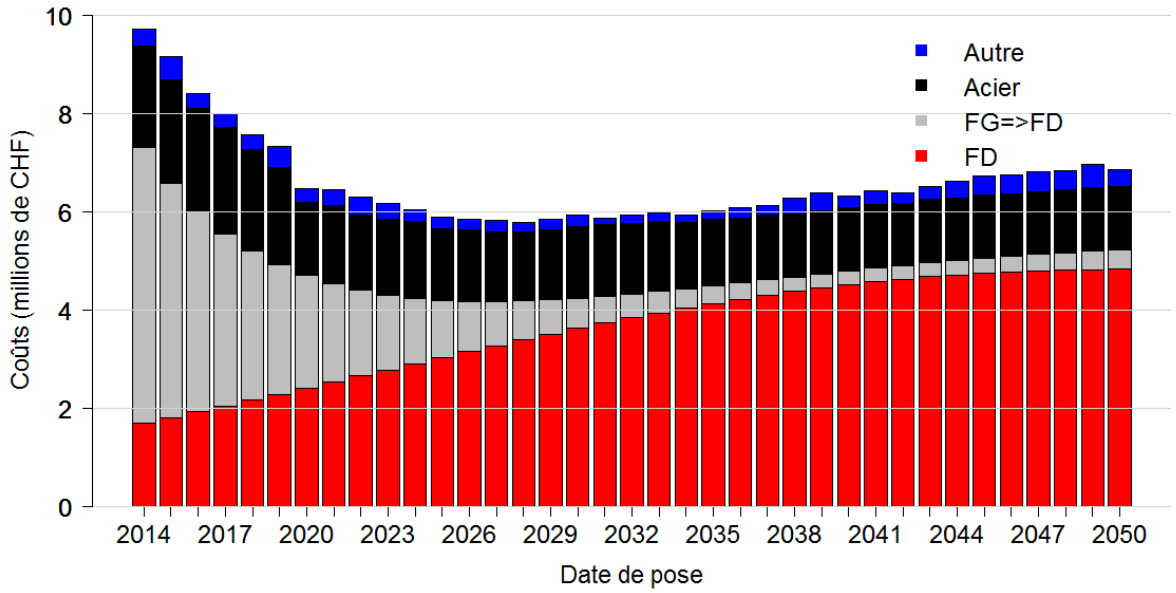


Figure 26 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2014 et 2050, scénario « plus drastique avec les fontes grise, plusieurs courbes matériau », tronçons partitionnés par matériau.

VI Calcul de l'indicateur I1P

VI.1 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 15

Covariable	Age (t)	Longueur (Z_1)	Diamètre (Z_2)	Reha2(Z_3)	Pression(Z_4)
Unité	Siècle	m	mm	oui	m

Tableau 1 : Covariables (et leurs unités) employés dans le modèle LEYP

Paramètres / Nom strate	$\propto$	δ	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
Acier	3.17	1.31	-1.53	0.44	-0.0027	0.7	_
Autre	3.68	1.35	-0.82	_	_	_	_
FD	2.63	1.48	-1.71	0.37	-0.002	-	0.04
FG	1.38	1	-1.26	0.31	-0.0022	0.51	0.05

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle LEYP par strate

VI.1 Entrée en tronçon

- Cf. Figure 16
- Cf. Tableau 1 & Tableau 2

VI.2 Sorties en tronçons

- Effectif :

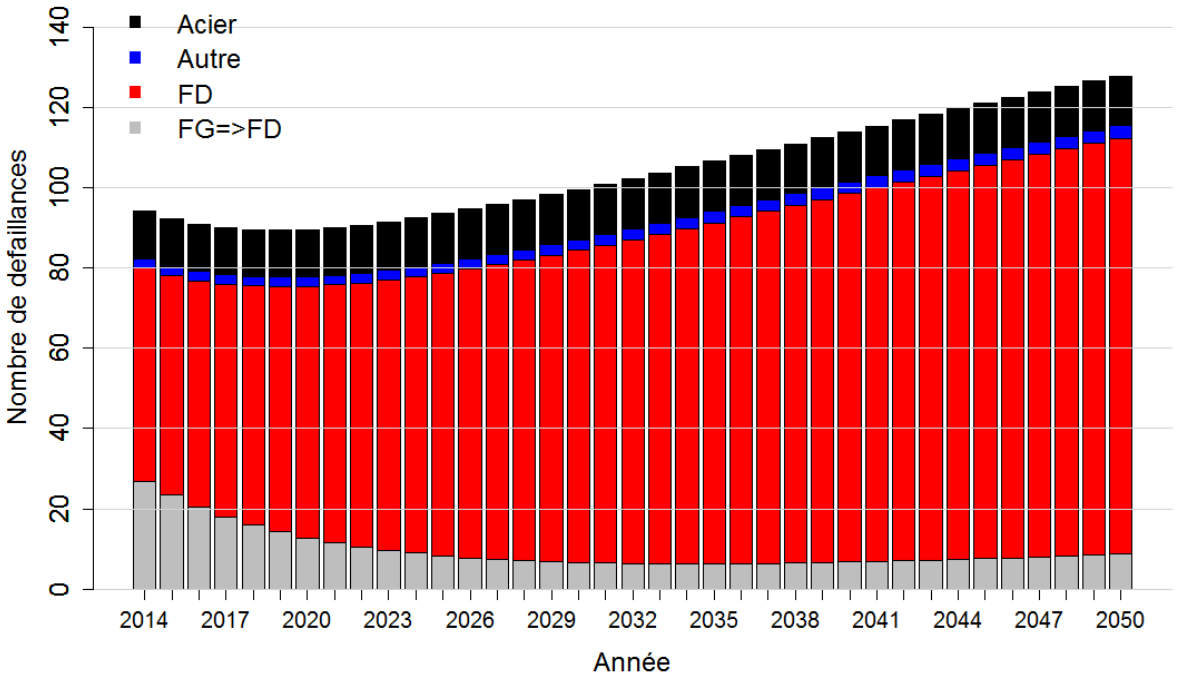


Figure 27 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2014 et 2050, scénario « plus drastique avec les fontes grise, plusieurs courbes matériaux », tronçons partitionnés par matériau. Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif

VI.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

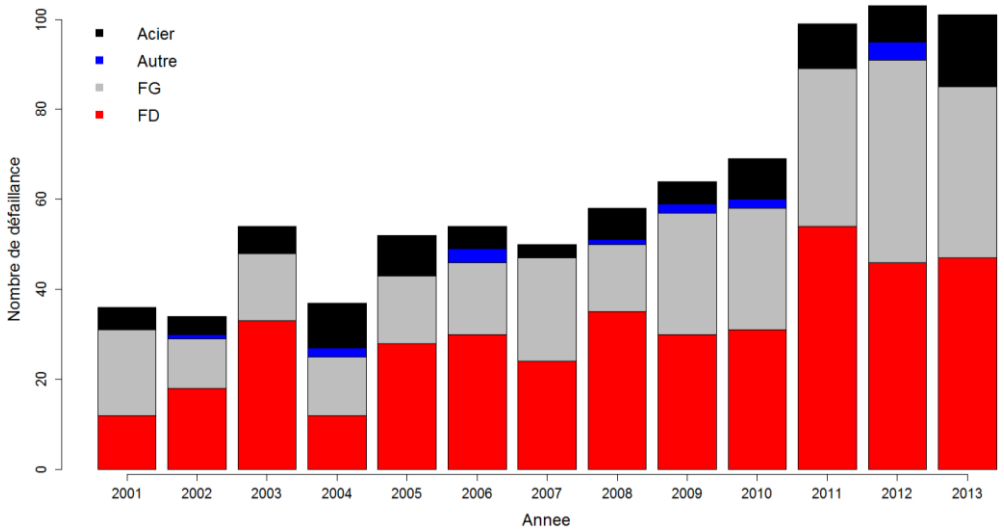


Figure 28 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2013, partitionné par le matériau

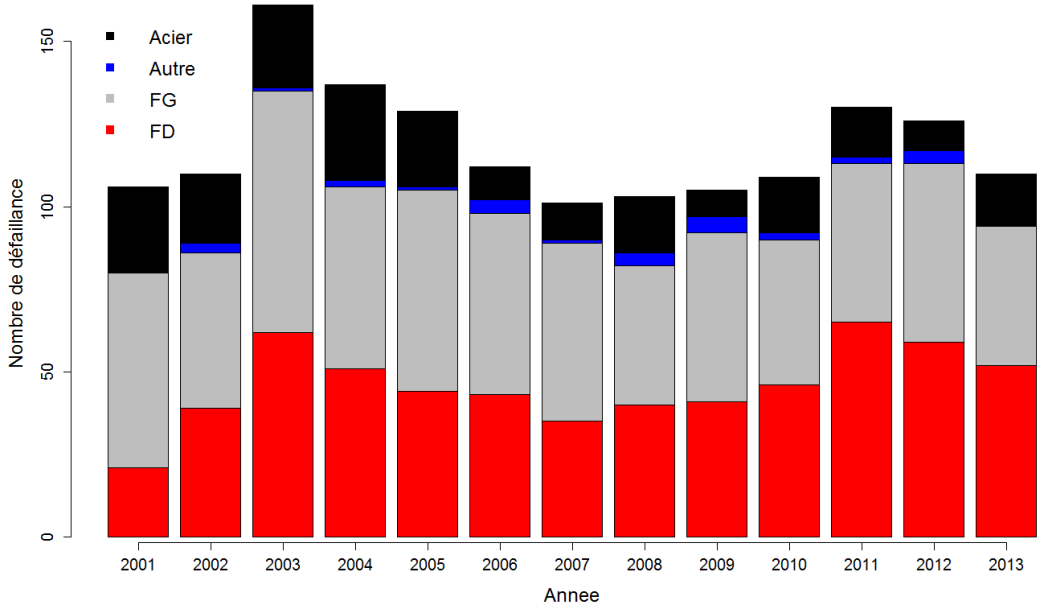


Figure 29 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2013 et mis hors service entre [2001, 2013], partitionné par le matériau

VII Calcul de l'indicateur I2F, coût des réparations

VII.1 Entrée

Cf. Figure 27 (moins les tronçons mis HS en 2014)

CUR_p Coût [CHF]	Materiau	Diamètre (mm)
4 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi < 250$
6 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi \geq 250$
20 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BAT	$\phi < 250$
40 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BAT	$\phi \geq 250$

Tableau 3 : Valeur des coûts de réparation par tronçon

VII.2 Modèle

I2F = NbDef x Curp

VII.3 Sortie

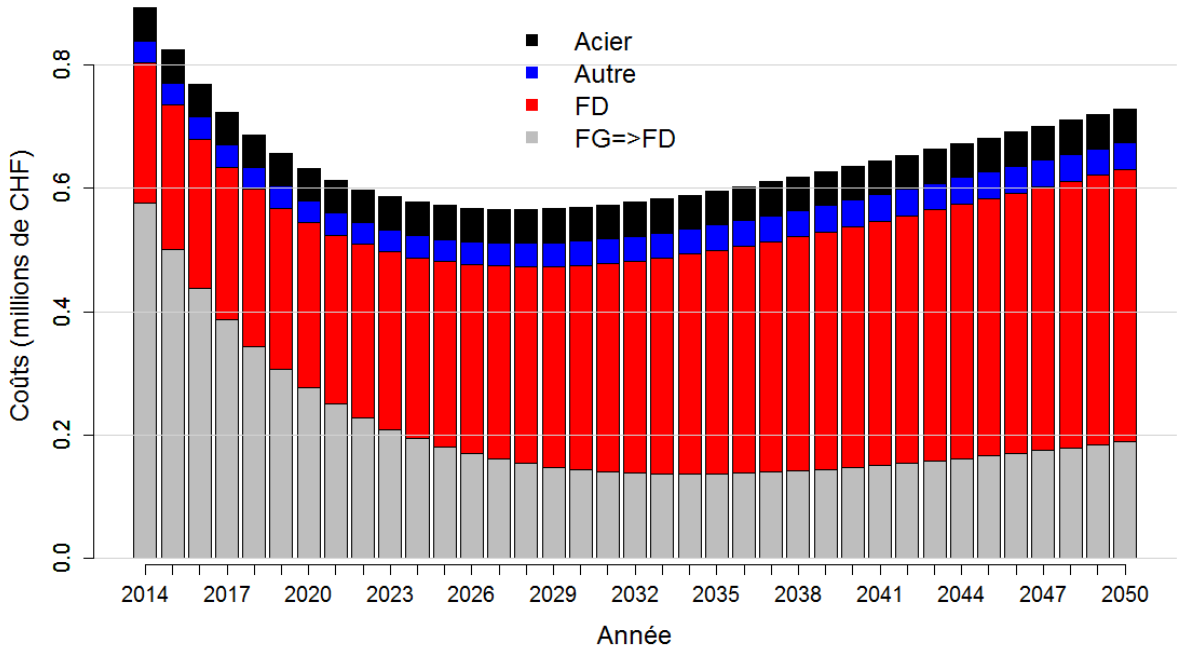


Figure 30 : Prévision pour l'indicateur I2-F entre 2014 et 2050, scénario « plus drastique avec les fontes grise, plusieurs courbes matériau », tronçons partitionnés par matériau.

VIII Calcul de l'indicateur I2P continuité

VIII.1 Entrée

Cf. Figure 27 (moins les tronçons mis HS en 2014)

Et

tr (Heures)	Matériau	Diamètre (mm)
3	Acier, fonte ductile, PE	$\phi < 250$
4	Acier, fonte ductile, PE	$\phi \geq 250$
6	Fonte grise, Eternit	$\phi < 250$
8	Fonte grise, Eternit	$\phi \geq 250$

Tableau 4 : Temps de réparation par tronçon

Et

Description	Valeurs de NBH
Haute densité	40
Moyenne densité	25
Centre village	20
Vieille ville	15
Z.I. sensible	5
Z.I. normale	5
Faible densité	5
Transport bouclage	0
Zone verte	0

Tableau 5 : Coefficient lié au nombre d'usager associé à ce tronçon

Valeurs SC	Description
1	Clients sensibles
0.6	Z.I. sensible
0.5	Z.I. normale
0.3	Haute densité
0.2	Vieille ville
0.2	Centre village
0.2	Moyenne densité
0.1	Faible densité
0	Transport bouclage
0	Zone verte

Tableau 6 : Coefficient lié à la vulnérabilité des usagers associé à ce tronçon

VIII.2 Modèle

I2P-continuite = NbDef x tr x NPS x SC

VIII.1 Sortie

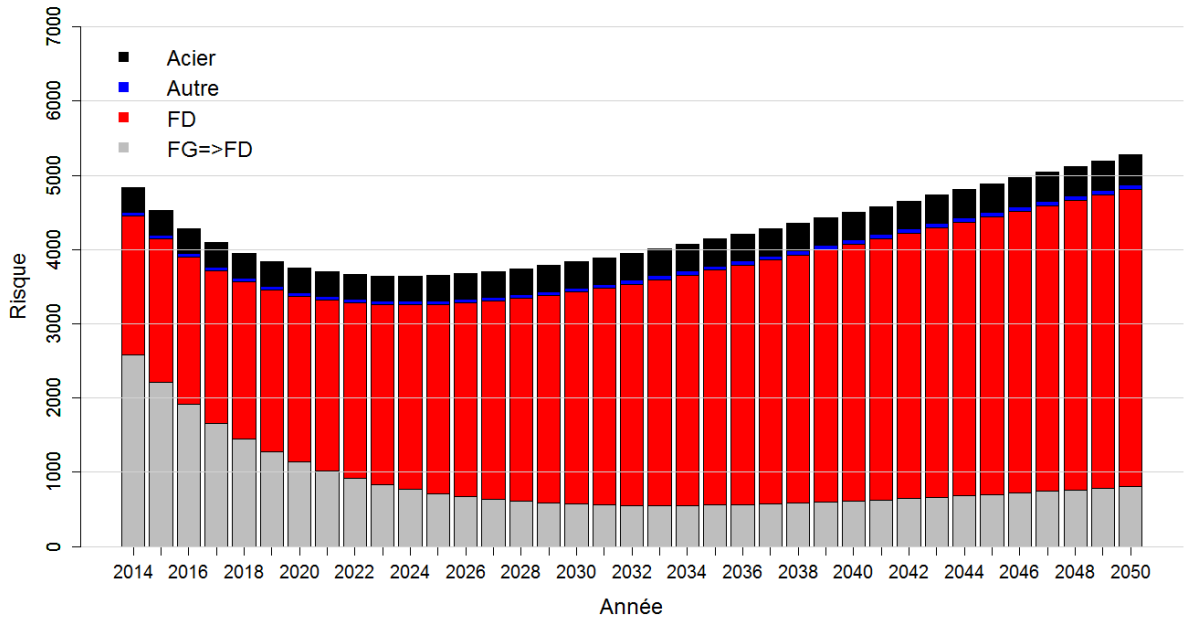


Figure 31 : Prévision pour l'indicateur I2-P_continuité entre 2014 et 2050, scénario « plus drastique avec les fontes grise, plusieurs courbes matériau », tronçons partitionnés par matériau.

IX Calcul de l'indicateur I3P voirie

IX.1 Entrée

Cf. Figure 27 (moins les tronçons mis HS en 2014)

cf. Tableau 4

Valeur de SR	Transport en commun	Niveau du trafic
1	TL trolleybus	trafic $\geq$ 15000
0.9	TL trolleybus	trafic $<$ 15000
0.8	TL Bus	trafic $\geq$ 15000
0.7	TL Bus	trafic $<$ 15000
0.7	pas TL	trafic $\geq$ 20000
0.5	pas TL	20000 $>$ trafic $\geq$ 10000
0.4	pas TL	10000 $>$ trafic $\geq$ 5000
0.2	pas TL	5000 $>$ trafic $\geq$ 500
0.0	pas TL	trafic $<$ 500

Tableau 7 : Coefficient lié à la quantité et à la vulnérabilité du trafic routier associé à ce tronçon

IX.1.1 I8-P voirie

I3P-voirie = NbDef x tr x SR

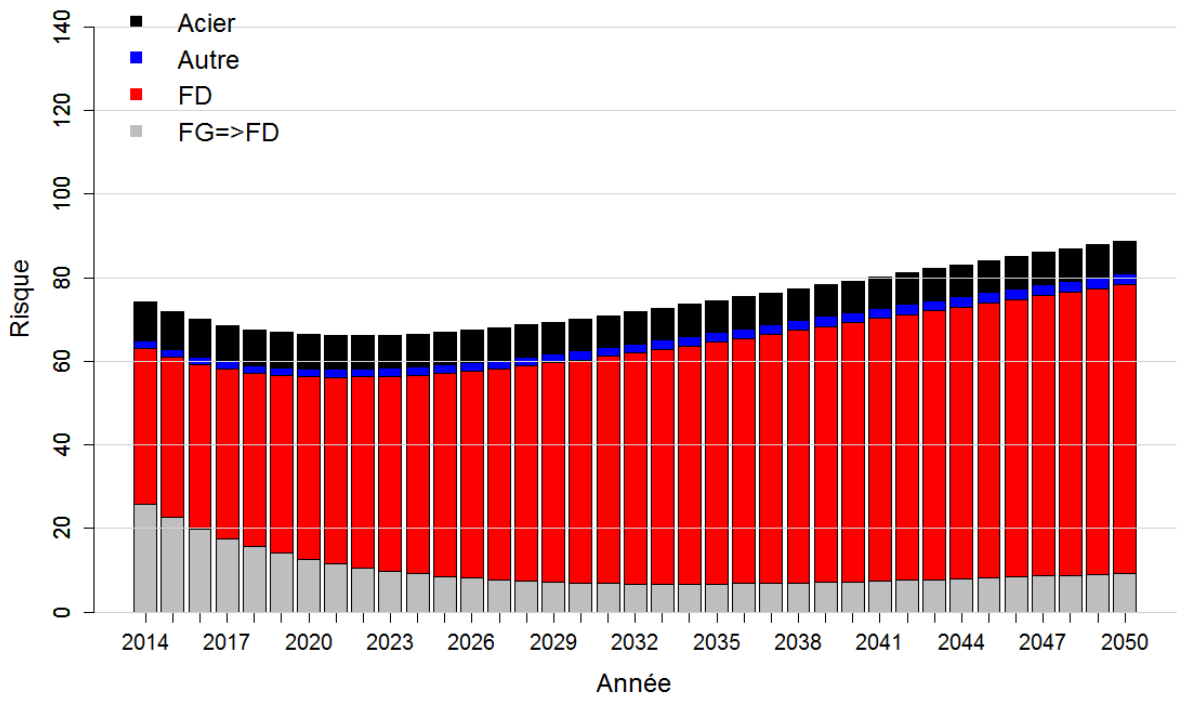


Figure 32 : Prévision pour l'indicateur I7-P_voirie entre 2014 et 2050, scénario « plus drastique avec les fontes grise, plusieurs courbes matériau », tronçons partitionnés par matériau.

X Calcul de l'indicateur I4P inondation

X.1 Entrée

Cf. Figure 27 (moins les tronçons mis HS en 2014)
+ diamètre du tronçon (mm)
+ pression de l'eau dans le tronçon (m de colonne d'eau)

SI	Description
1	Vieille ville
0.8	Z.I. sensible
0.6	Haute densité
0.5	Centre village
0.4	Moyenne densité
0.4	Z.I. normale
0.2	Faible densité
0	Transport bouclage
0	Zone verte

Tableau 8 : Coefficient lié à la quantité, à la vulnérabilité et à la valeur des biens autour du tronçon

X.1 Modèle

I4P-innondation = NbDef x dia x dia x PRES x SI

X.1 Sortie

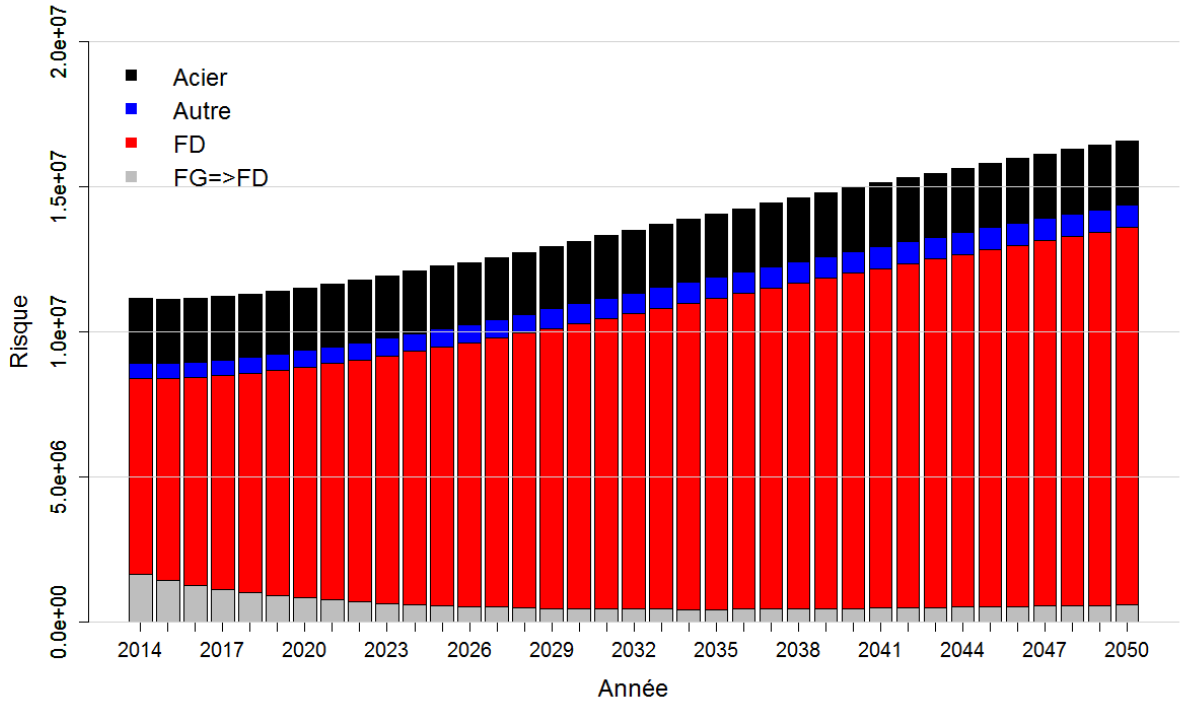


Figure 33 : Prévision pour l'indicateur I7-P_inondation entre 2014 et 2050, scénario « plus drastique avec les fontes grise, plusieurs courbes matériau », tronçons partitionnés par matériau.

Scénario 11 (code R)

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Périmètre	Tout le réseau		Réseau en ville									
Stratifié ?	Non	Ville/ Montagne	Non				Diamètre	NDOA	Matériaux		Vulnérabilité	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2001; 2012]		[2001; 2007]	[2001; 2013]								
Statu quo ?	Oui		Oui		On arrête de renouveler	On vise un TR de 1%	Oui			Plus drastique avec les fontes grises	Oui	> autour des éléments vulnérables

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

⇨ Donnée Christelle 2014

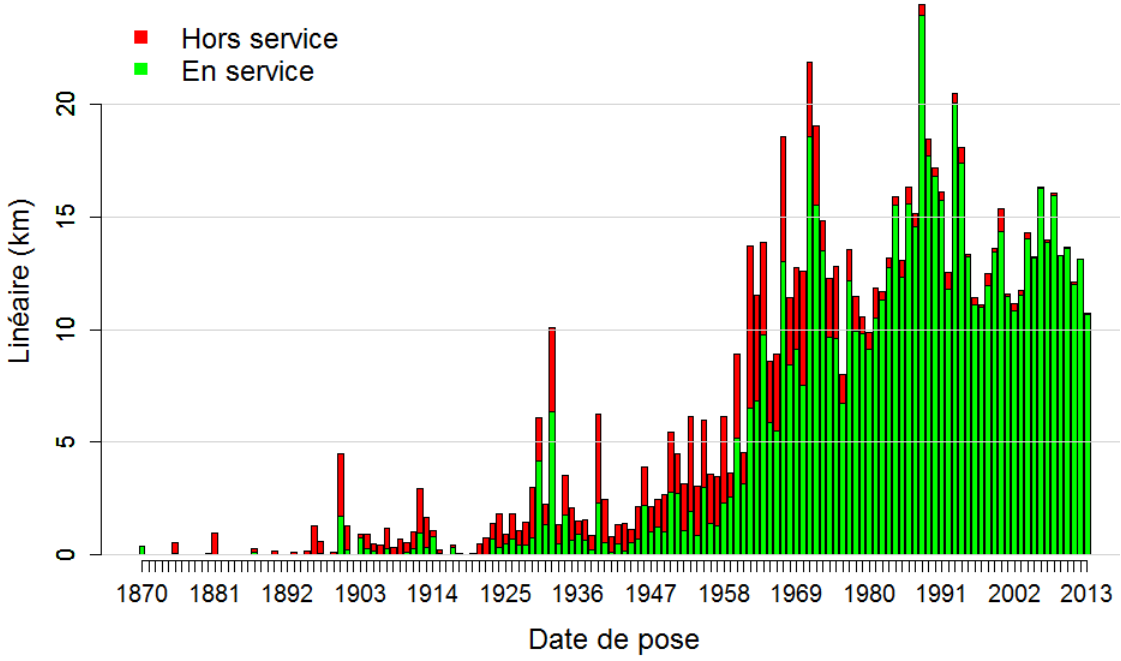


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service (715 km) et Hors Service (156 km) au 31/12/2013 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2001 ; 2013])

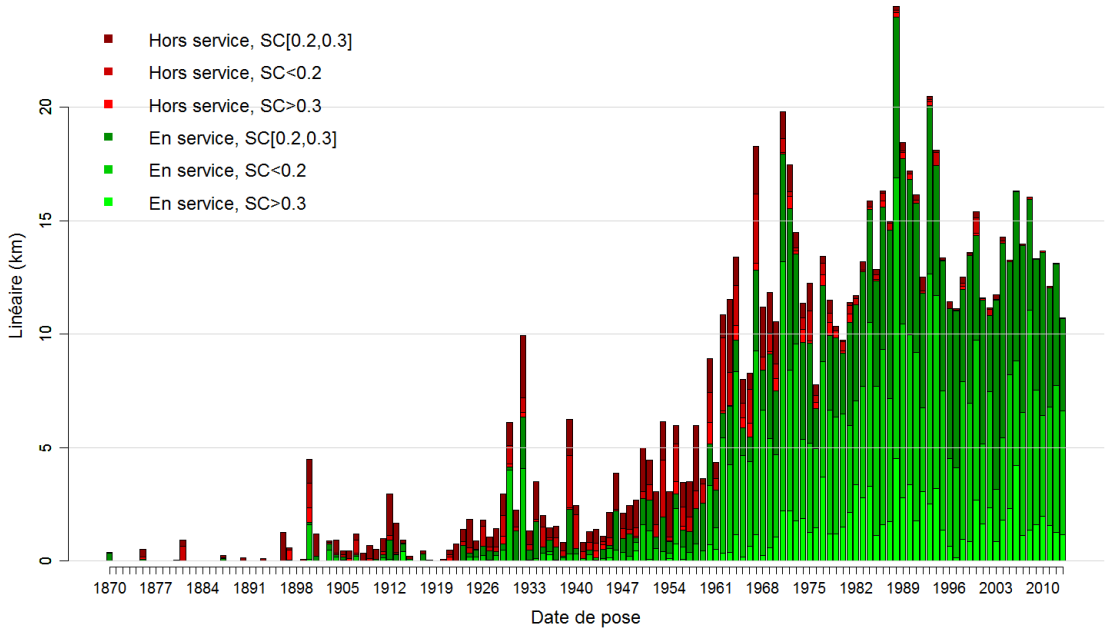


Figure 2 : Linéaire en service en 31/12/2013 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon 3 strates de SC et selon le statut.

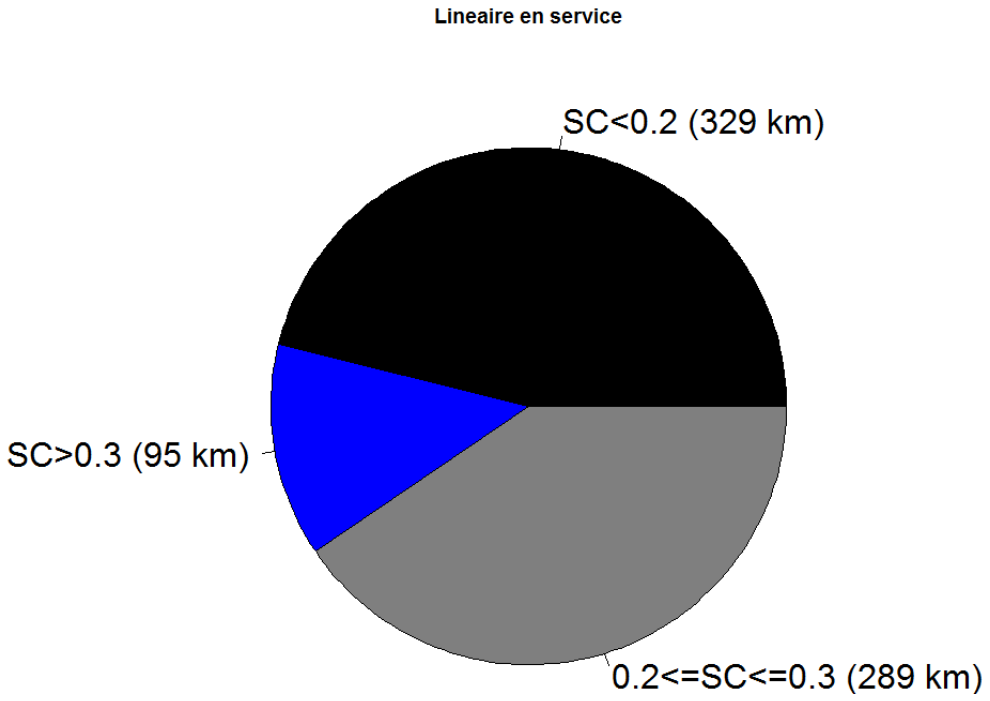


Figure 3 : Proportion du linéaire ES au 31/12/2013 en fonction des 3 strates de SC

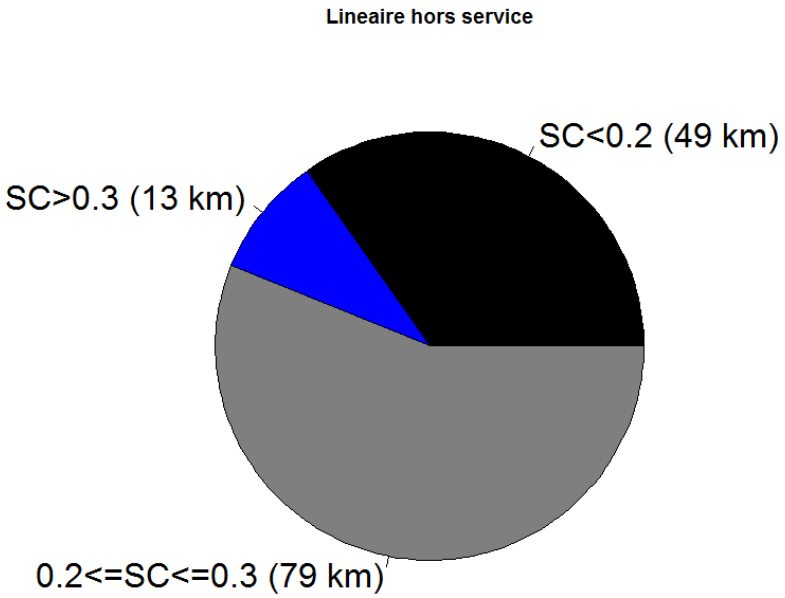


Figure 4 : Proportion du linéaire mis HS entre [2001, 2013] en fonction des quatre strates de matériau

I.2 Sortie en linéaire

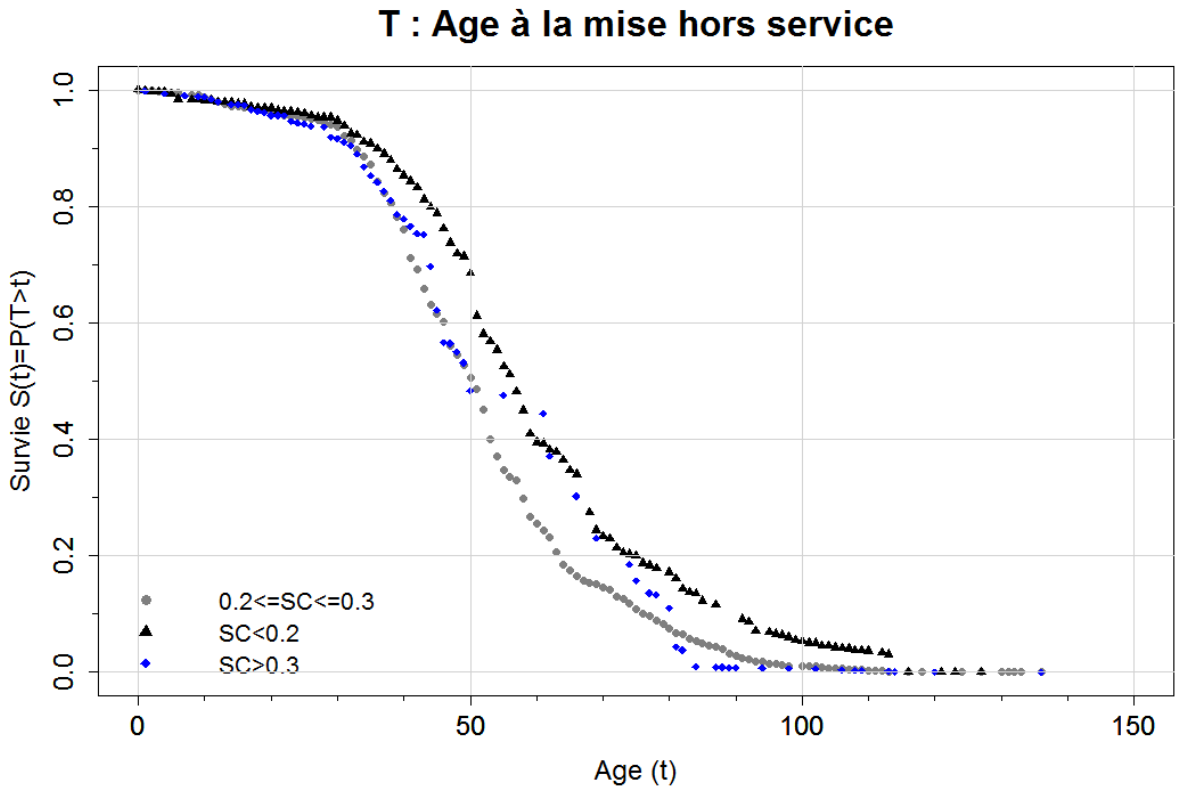


Figure 5 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tronçons par strate de SC

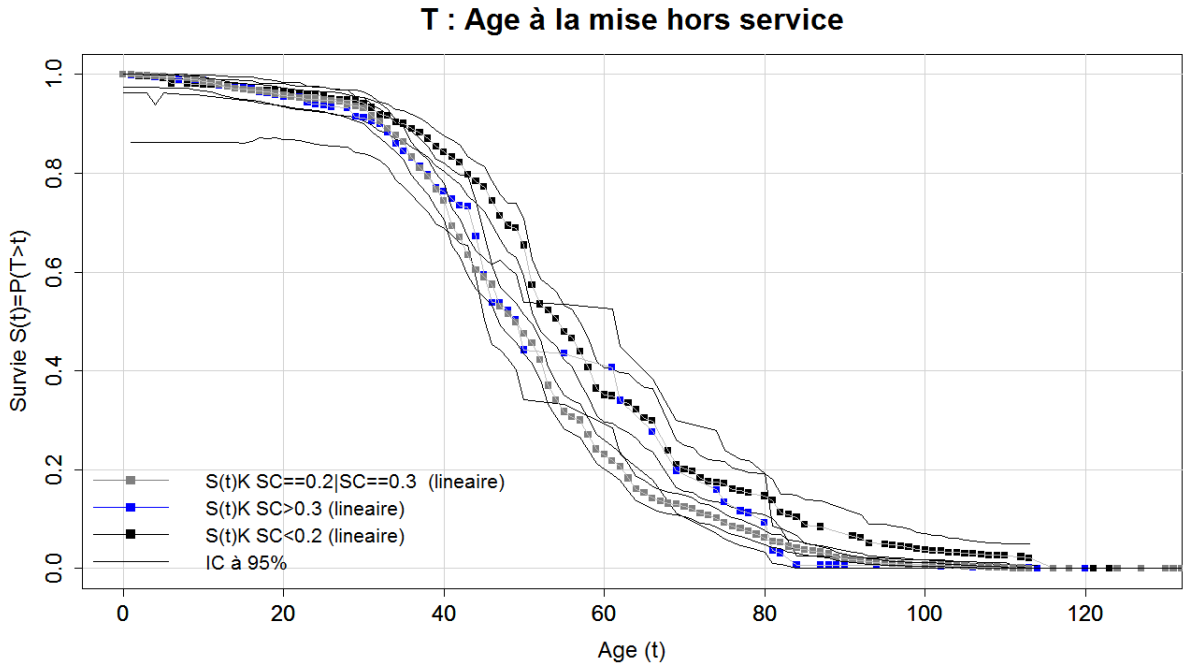


Figure 6 : Courbes de survie passées en linéaire (trait) par strate de SC + IC

I.1 Entrée en effectif

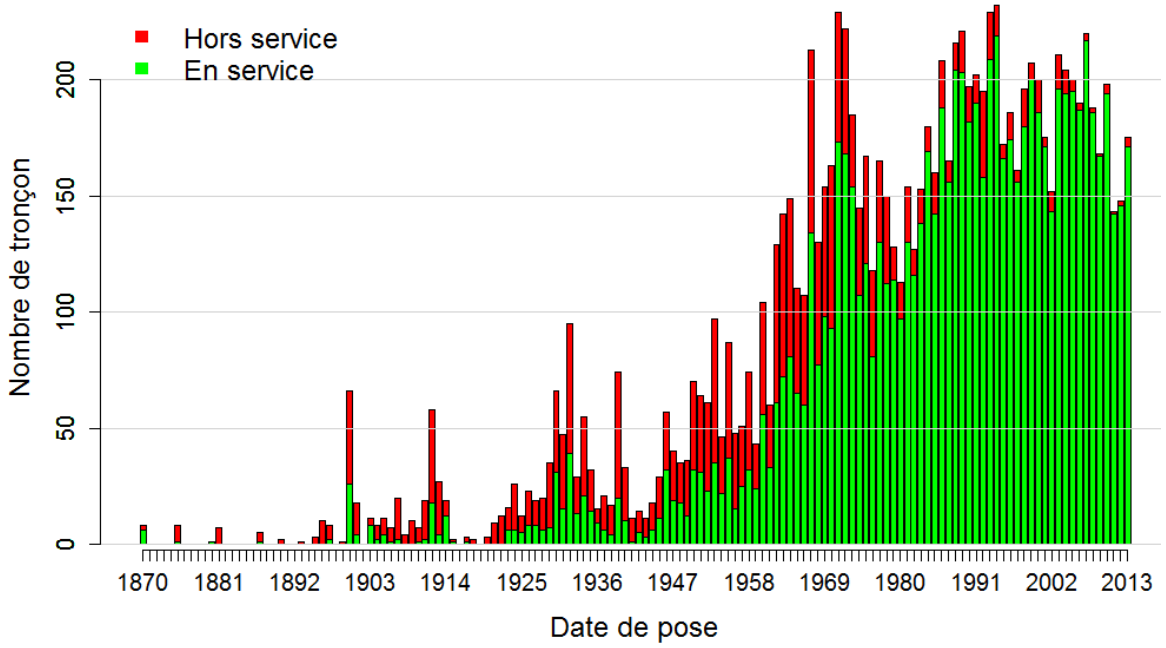


Figure 7 : Histogramme du nombre de tronçons En Service et Hors Service au 31/12/2013 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2001 ; 2013])

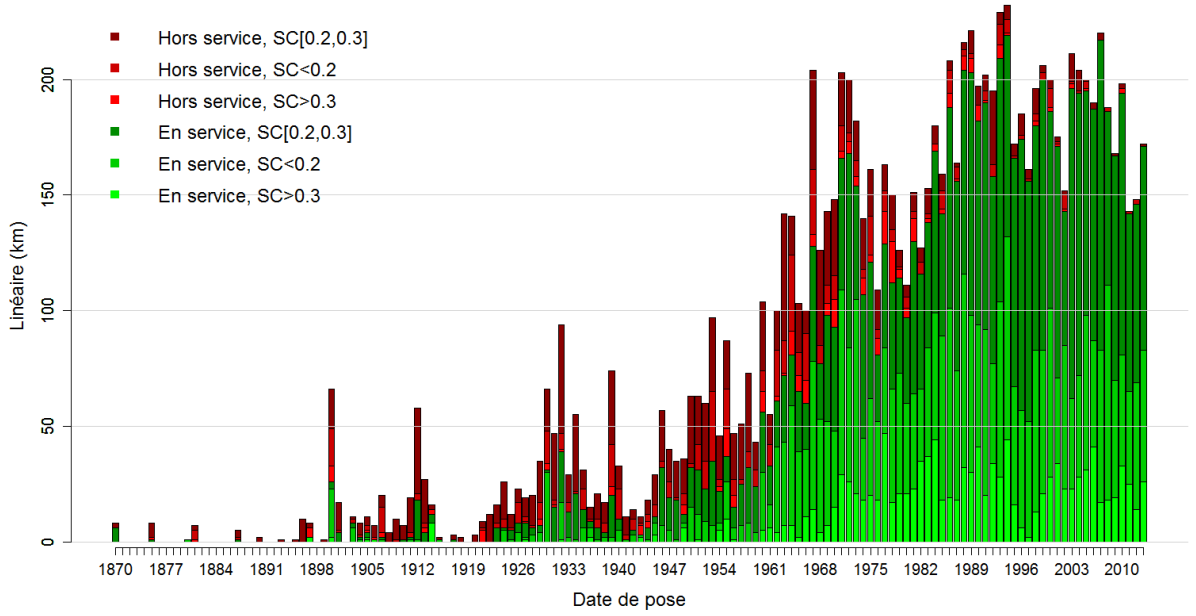


Figure 8 : Nombre de tronçons en service en 31/12/2013 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon 3 strates de SC et selon le statut.

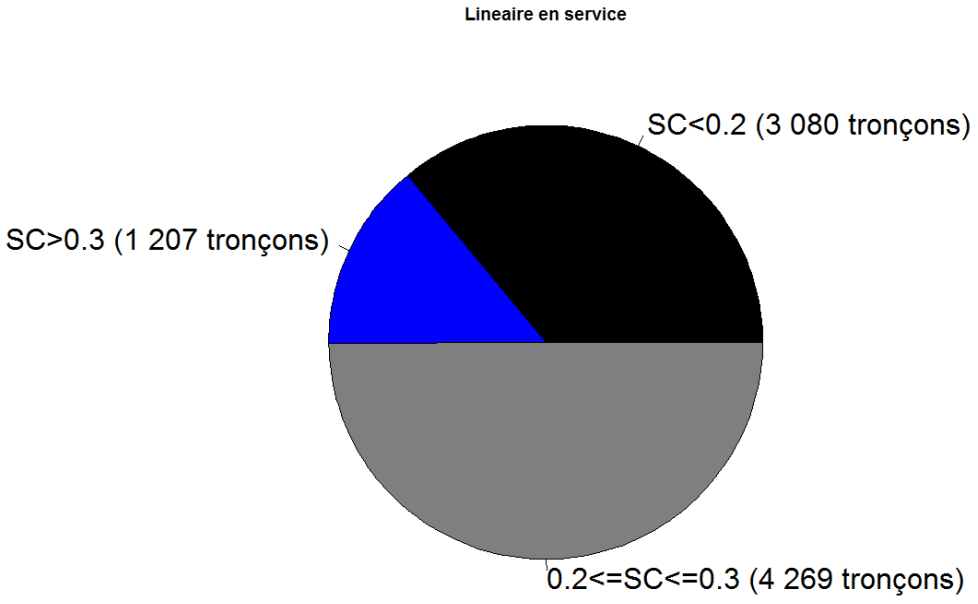


Figure 9 : Proportion du nombre de tronçon ES en fonction de 3 strates de SC

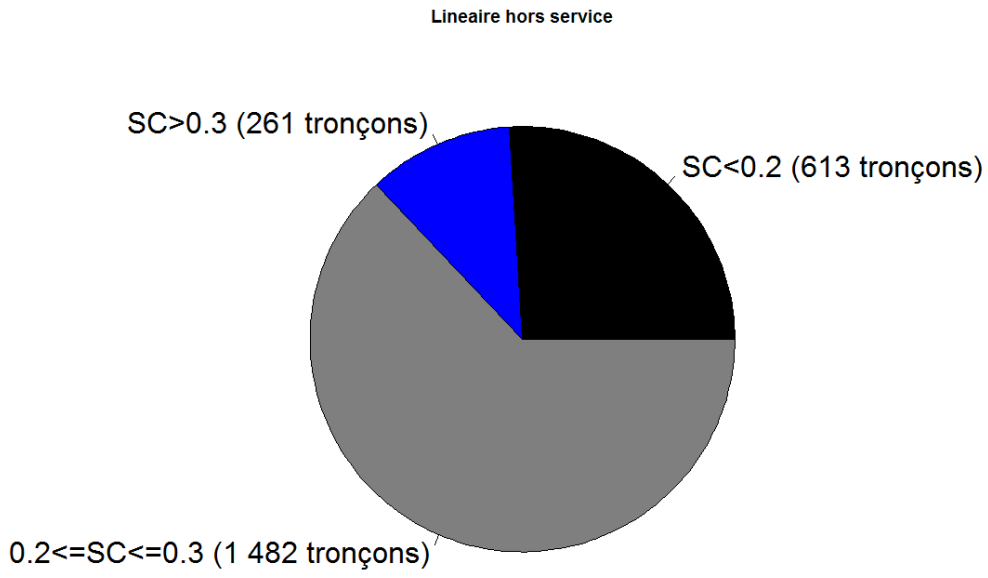


Figure 10 : Proportion du nombre de tronçon HS en fonction de 3 strates de SC

II Scénario 11 (code R)

- Groupe de tronçons : transport normal + distribution (moins Brêt et moins les moins de 6m)
- Date export donné : 2014 par Christelle
- Photographie au 31 /12 /2013
- stratification par le critère SC
- Courbes de survie prospectives les même pour tous les SC que par le passé, déconditionner méthode Weibull (Yves)
- Taux de travaux coordonnés en général : 80%. Taux des travaux non coordonnées : 20%.

III Construction scénario prospectif R

III.1 Entrée en linéaire

Cf. : Figure 5

III.2 Sortie en linéaire

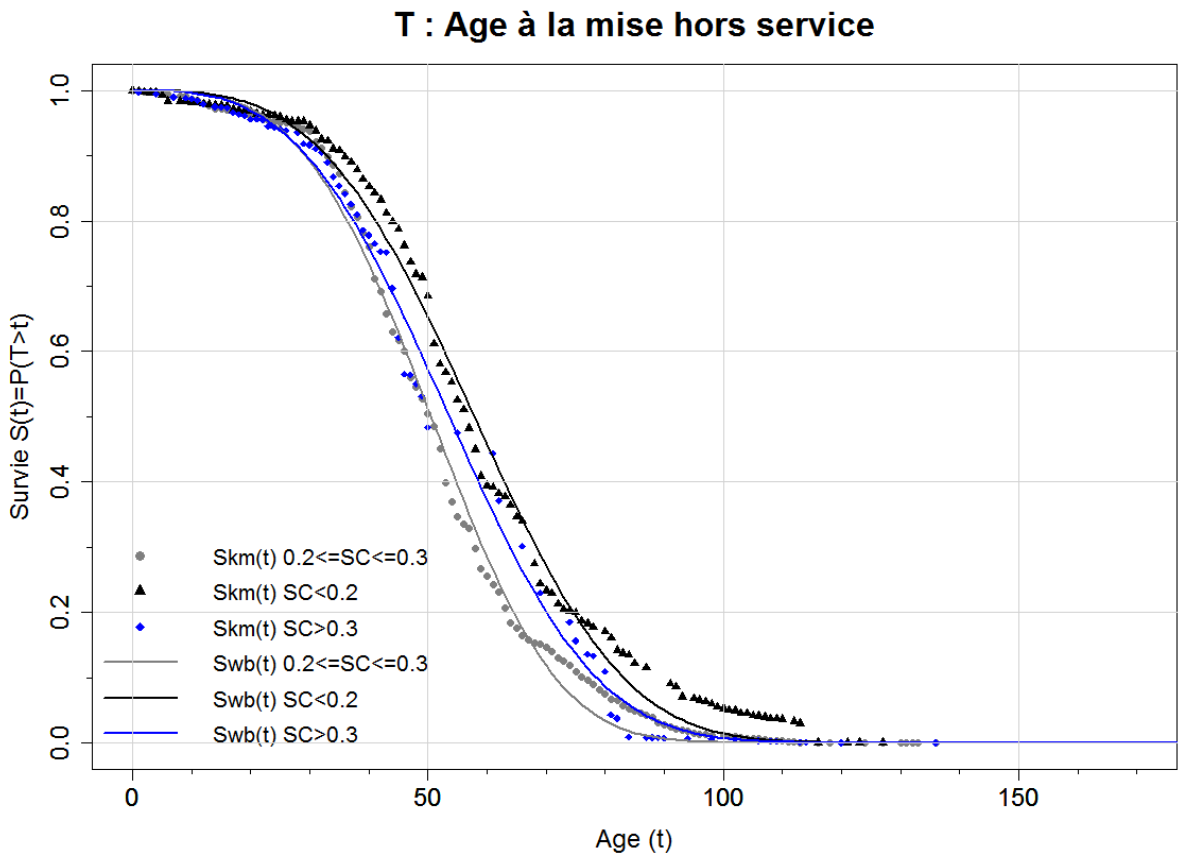


Figure 11 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait) par strate de SC

III.1 Sortie en effectif

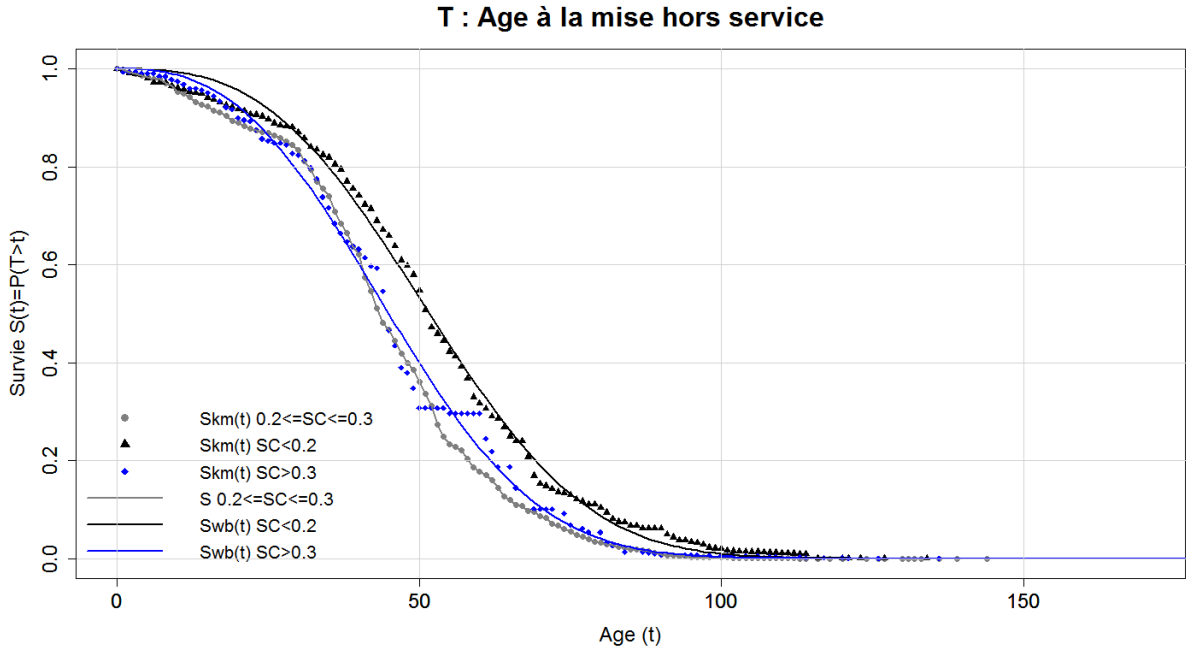


Figure 12 : Courbes de survie passé en effectif et prospective en effectif (trait) par strate de SC

IV Calcul des indicateurs I1R, I2R et I3R

IV.1 Entrée

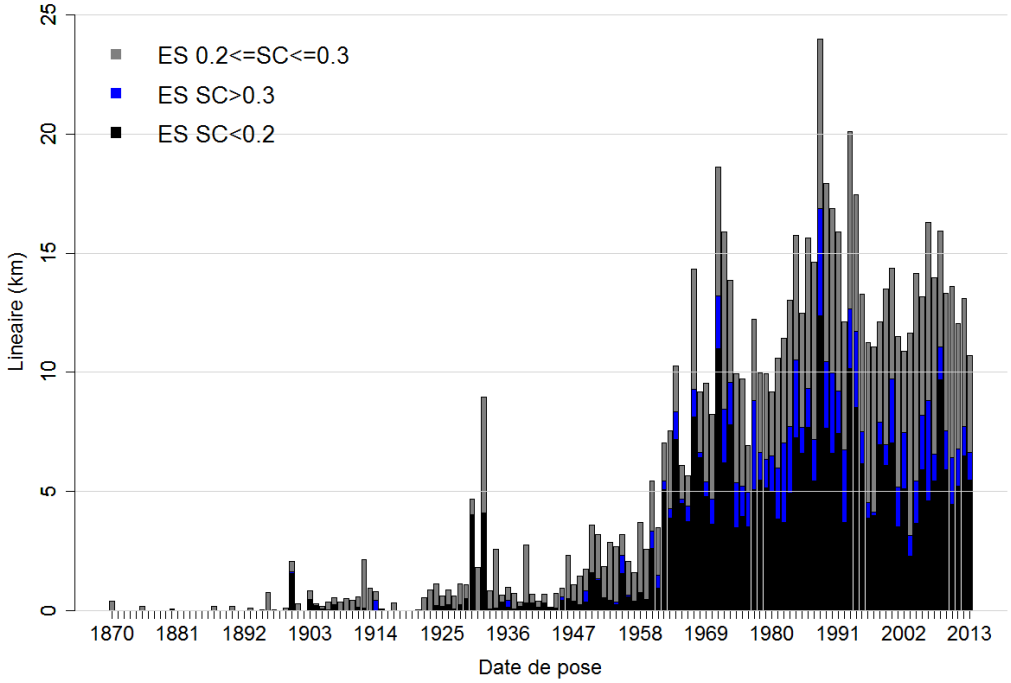


Figure 13 : Linéaire en service en 31/12/2013 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon 3 strates de SC.

IV.2 Sortie

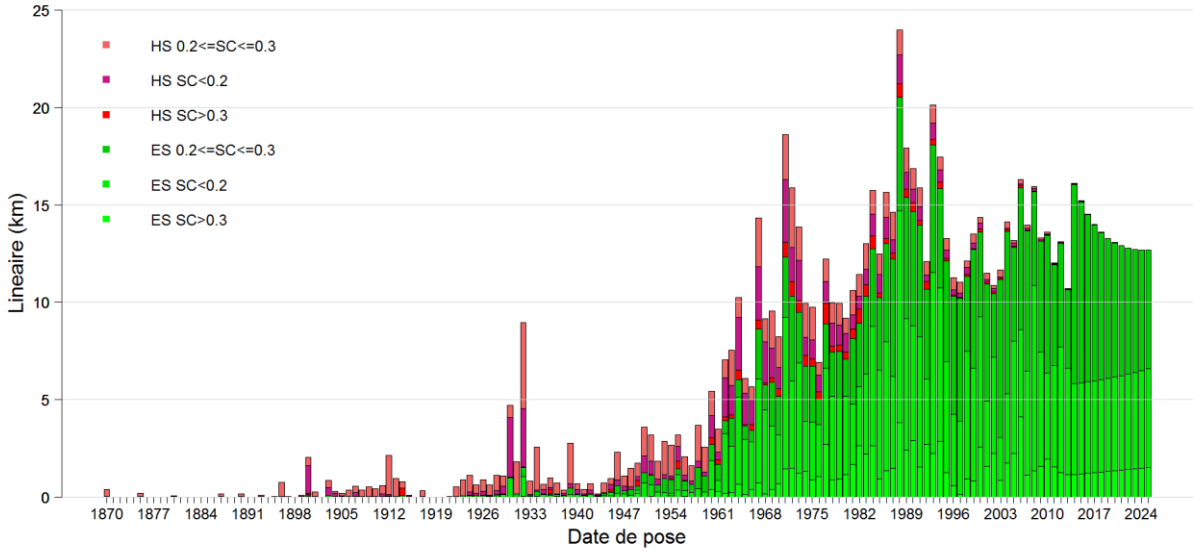


Figure 14 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2025, photographie de la situation en 2025, tronçons partitionnés en 3 strates de SC.

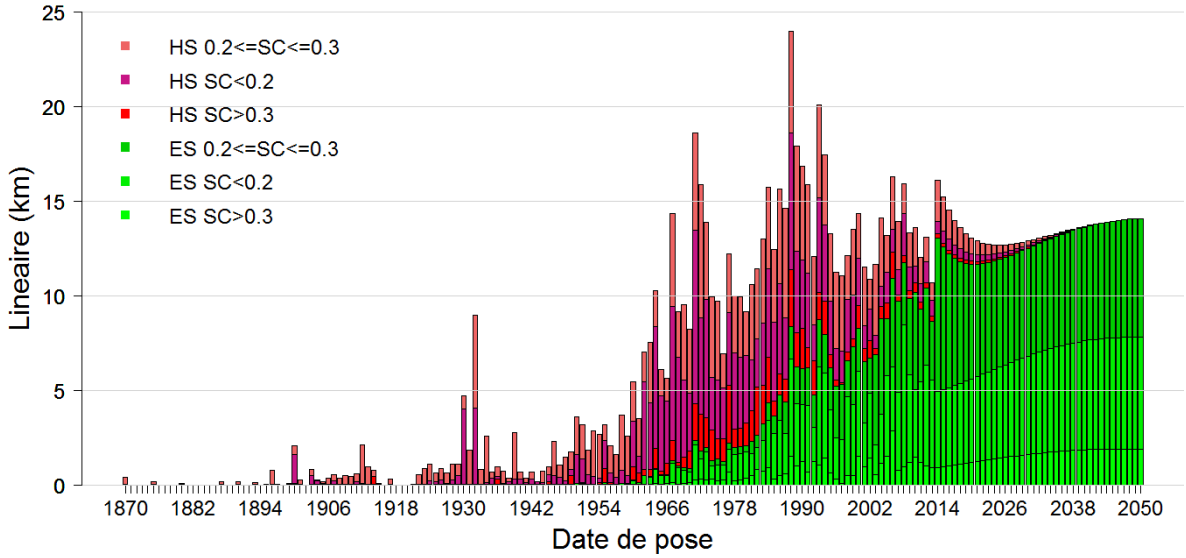


Figure 15 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2050, photographie de la situation en 2050, tronçons partitionnés en 3 strates de SC.

IV.1 Sortie I2R

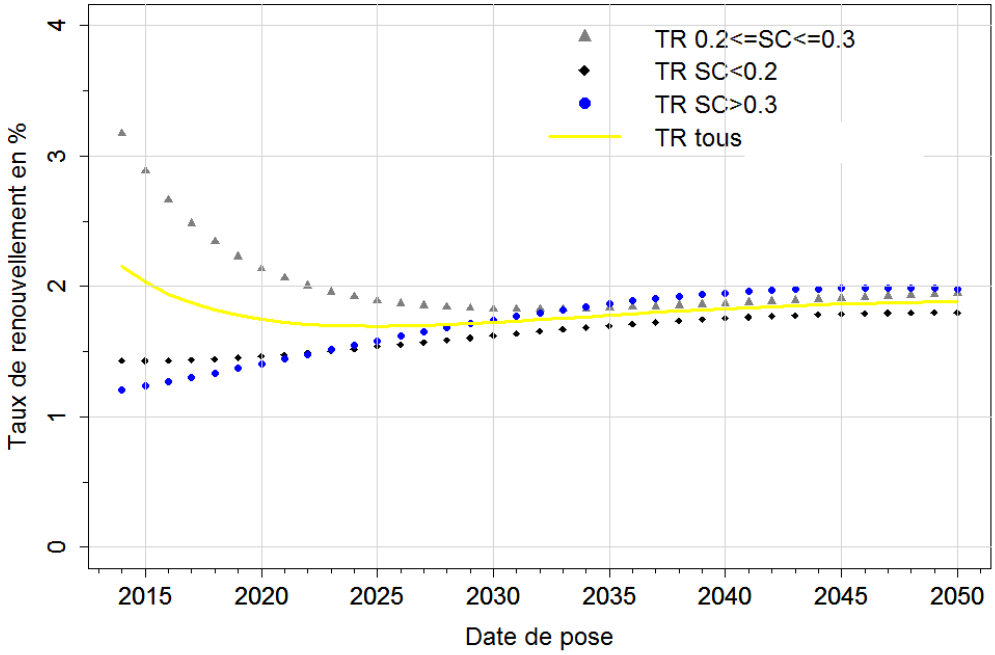


Figure 16 : Prévision des taux de renouvellement futurs de 2014 jusqu'en 2050

IV.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

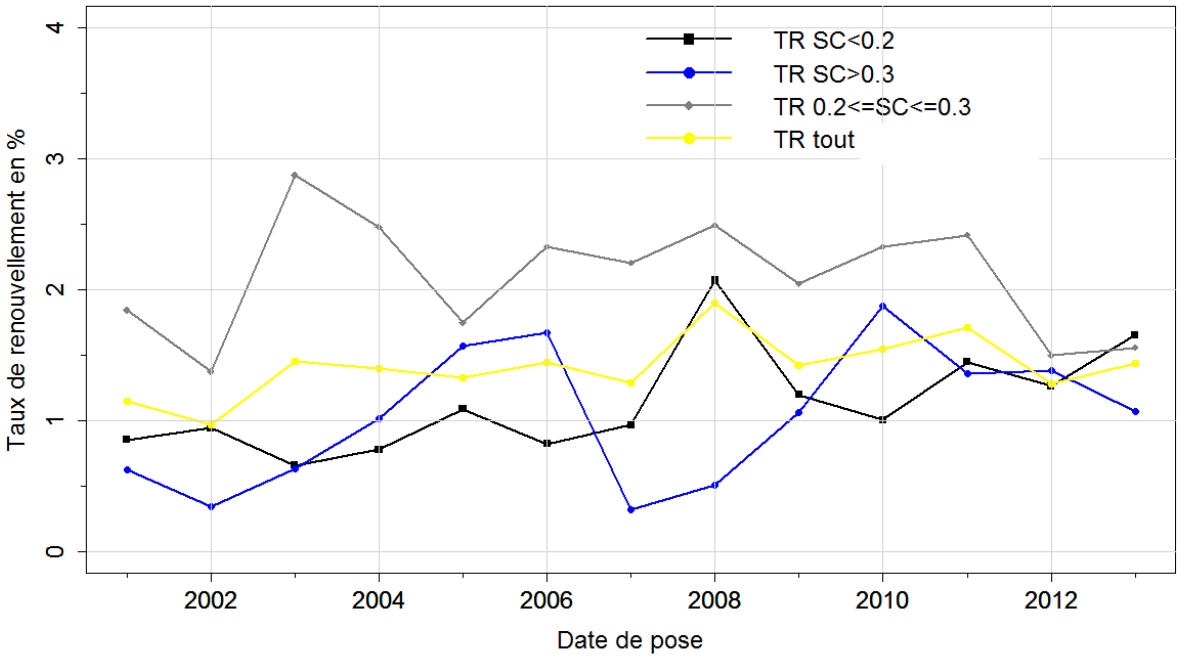


Figure 17 : Taux de renouvellement passé de 2001 à 2013

IV.1 Sortie I3R

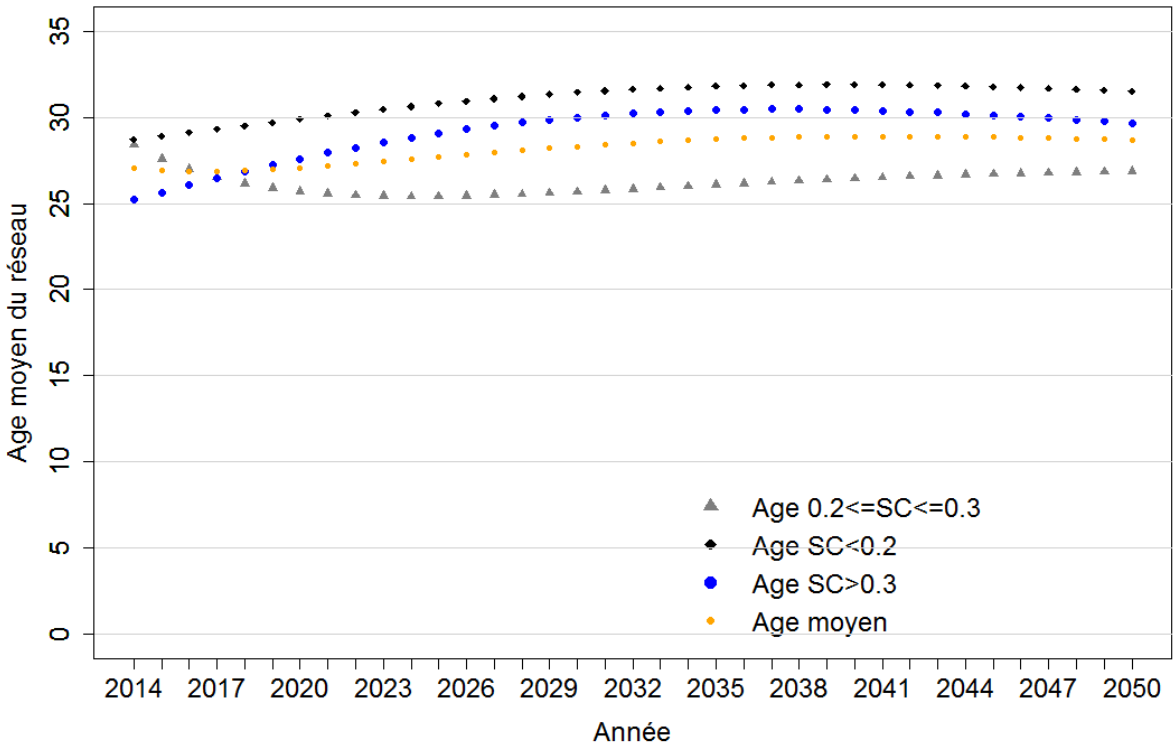


Figure 18 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2014 jusqu'en 2050 à eauservice Lausanne, scénario « statu quo, plusieurs courbes SC», tronçons partitionnés par SC.

V Calcul de l'indicateur I1F

V.1 Entrée

Nom de la strate	Coûts des travaux à la strate (CHF/m)
SC	459
Commentaire	80% coordonnés

V.2 Sortie

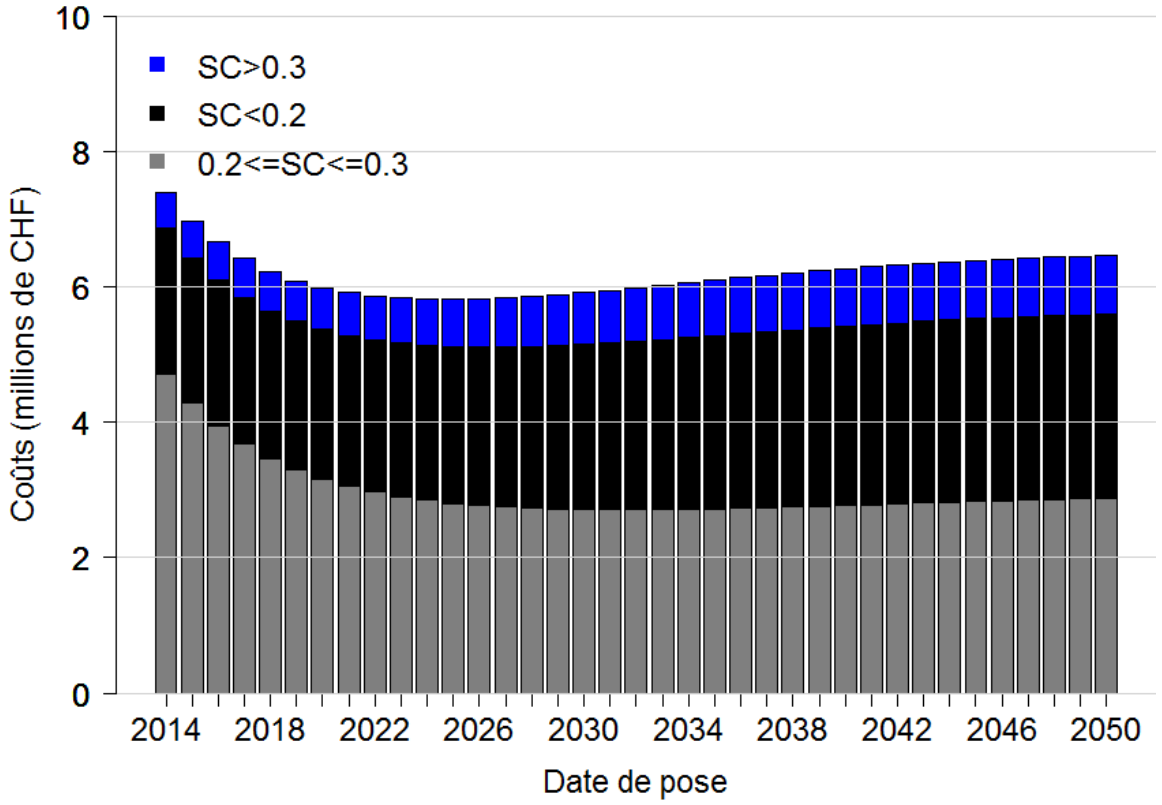


Figure 19 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2014 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes SC », tronçons partitionnés par SC.

VI Calcul de l'indicateur I1P

VI.1 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 11

VI.1 Sorties en tronçons

- Effectif :

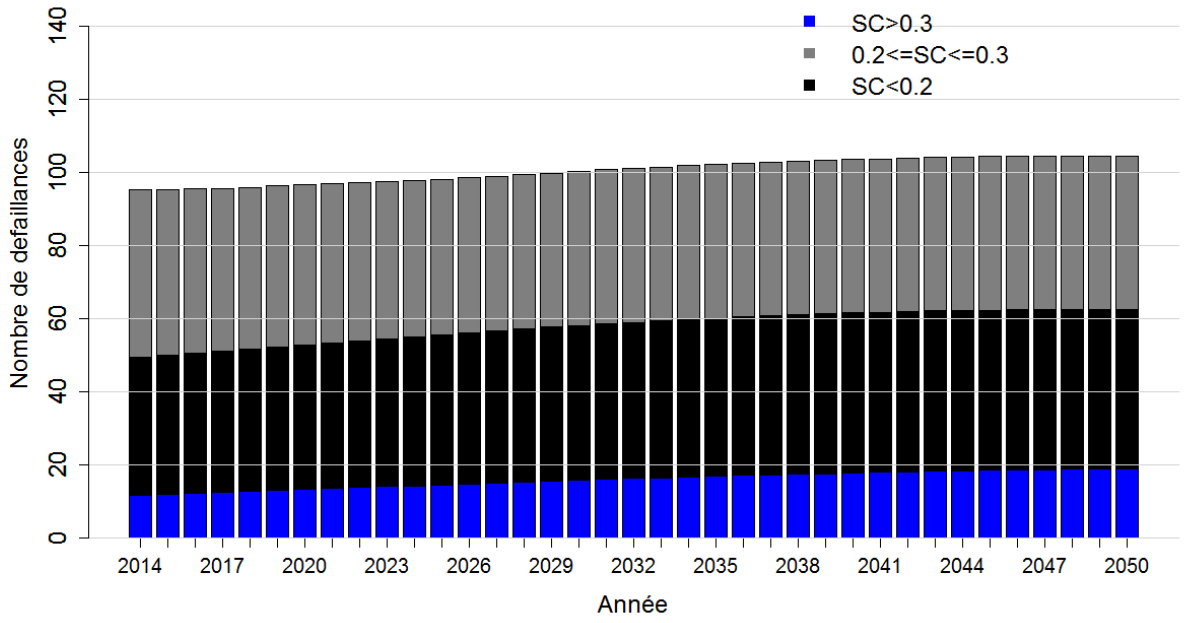


Figure 20 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2014 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes SC », tronçons partitionnés par SC. Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif

VII Calcul de l'indicateur I2F, coûts du renouvellement

VII.1 Entrée

Tous (moins les tronçons mis HS en 2014)

CUR_p Coût [CHF]	Materiau	Diamètre (mm)
4 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi < 250$
6 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi \geq 250$
20 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BAT	$\phi < 250$
40 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BAT	$\phi \geq 250$

Tableau 1 : Valeur des coûts de réparation par tronçon

VII.2 Modèle

I2-F = NbDef x Curp

VII.3 Sortie

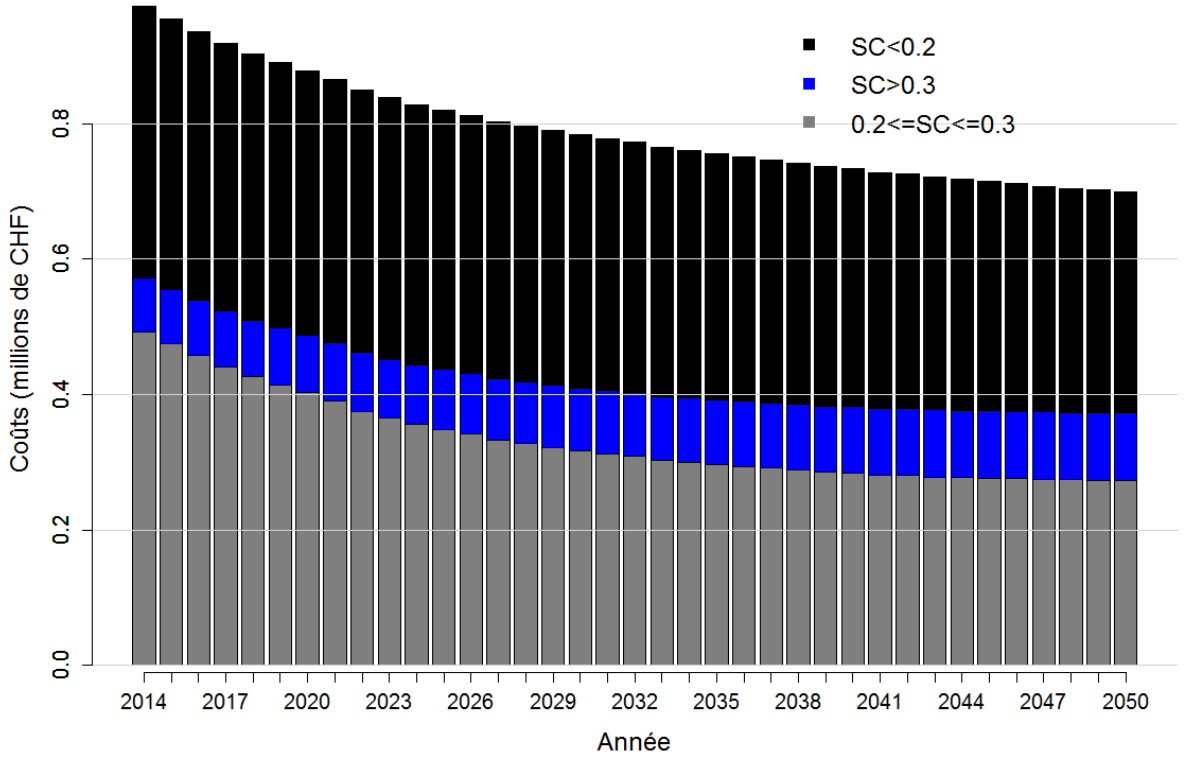


Figure 21 : Prévision pour l'indicateur I2-F entre 2014 et 2050, scénario « statu quo ».

VIII Calcul de l'indicateur I2P continuité

VIII.1 Entrée

(moins les tronçons mis HS en 2014)

Et

tr (Heures)	Matériau	Diamètre (mm)
3	Acier, fonte ductile, PE	$\phi < 250$
4	Acier, fonte ductile, PE	$\phi \geq 250$
6	Fonte grise, Eternit	$\phi < 250$
8	Fonte grise, Eternit	$\phi \geq 250$

Tableau 2 : Temps de réparation par tronçon

Et

Description	Valeurs de NBH
Haute densité	40
Moyenne densité	25
Centre village	20
Vieille ville	15
Z.I. sensible	5
Z.I. normale	5
Faible densité	5
Transport bouclage	0
Zone verte	0

Tableau 3 : Coefficient lié au nombre d'usager associé à ce tronçon

Valeurs SC	Description
1	Clients sensibles
0.6	Z.I. sensible
0.5	Z.I. normale
0.3	Haute densité
0.2	Vieille ville
0.2	Centre village
0.2	Moyenne densité
0.1	Faible densité
0	Transport bouclage
0	Zone verte

Tableau 4 : Coefficient lié à la vulnérabilité des usagers associé à ce tronçon

VIII.2 Modèle

I2P-continuite = NbDef x tr x NPS x SC

VIII.3 Sortie

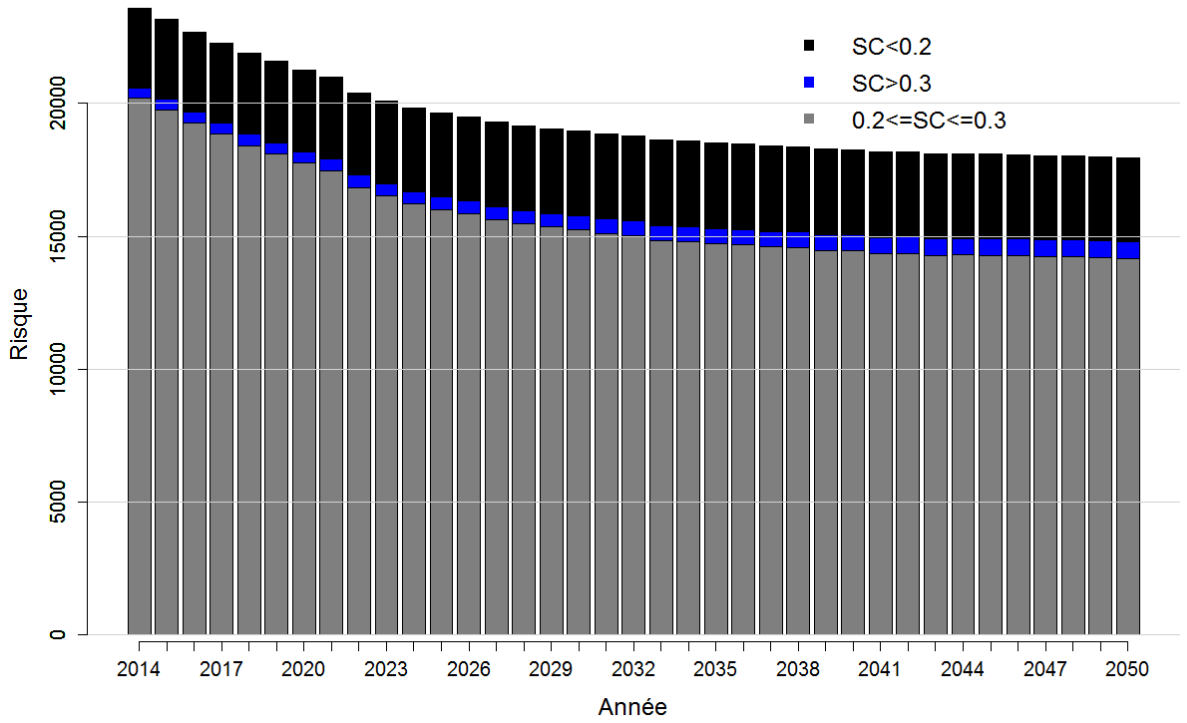


Figure 22 : Prévision pour l'indicateur I2P_continuité entre 2014 et 2050, scénario « statu quo».

IX Calcul de l'indicateur I3P voirie

IX.1 Entrée

(moins les tronçons mis HS en 2014)

cf. Tableau 2

Valeur de SR	Transport en commun	Niveau du trafic
1	TL trolleybus	trafic $\geq$ 15000
0.9	TL trolleybus	trafic $<$ 15000
0.8	TL Bus	trafic $\geq$ 15000
0.7	TL Bus	trafic $<$ 15000
0.7	pas TL	trafic $\geq$ 20000
0.5	pas TL	20000 $>$ trafic $\geq$ 10000
0.4	pas TL	10000 $>$ trafic $\geq$ 5000
0.2	pas TL	5000 $>$ trafic $\geq$ 500
0.0	pas TL	trafic $<$ 500

Tableau 5 : Coefficient lié à la quantité et à la vulnérabilité du trafic routier associé à ce tronçon

IX.1.1 I3P voirie

I3P-voirie = NbDef x tr x SR

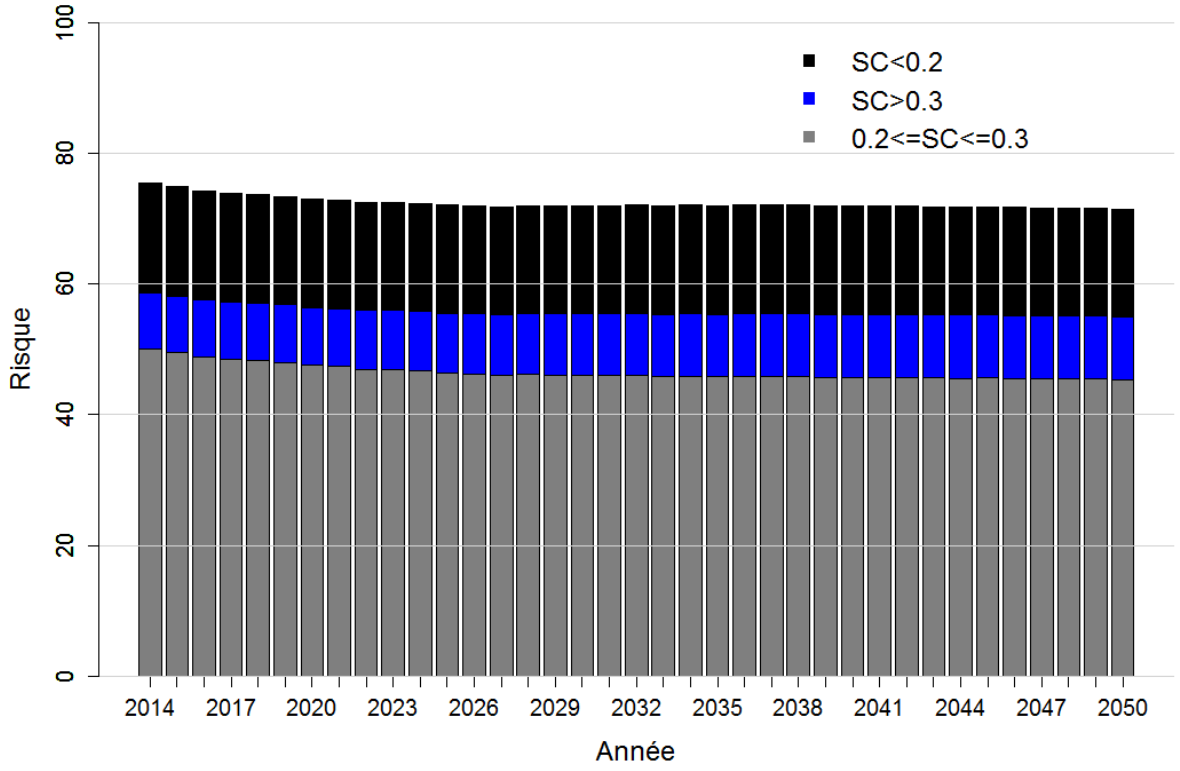


Figure 23 : Prévision pour l'indicateur I3P_voirie entre 2014 et 2050, scénario « statu quo »

X Calcul de l'indicateur I4P inondation

X.1 Entrée

(moins les tronçons mis HS en 2014)
+ diamètre du tronçon (mm)
+ pression de l'eau dans le tronçon (m de colonne d'eau)

SI	Description
1	Vieille ville
0.8	Z.I. sensible
0.6	Haute densité
0.5	Centre village
0.4	Moyenne densité
0.4	Z.I. normale
0.2	Faible densité
0	Transport bouclage
0	Zone verte

Tableau 6 : Coefficient lié à la quantité, à la vulnérabilité et à la valeur des biens autour du tronçon

X.2 Modèle

I4P-innondation = NbDef x dia x dia x PRES x SI

X.3 Sortie

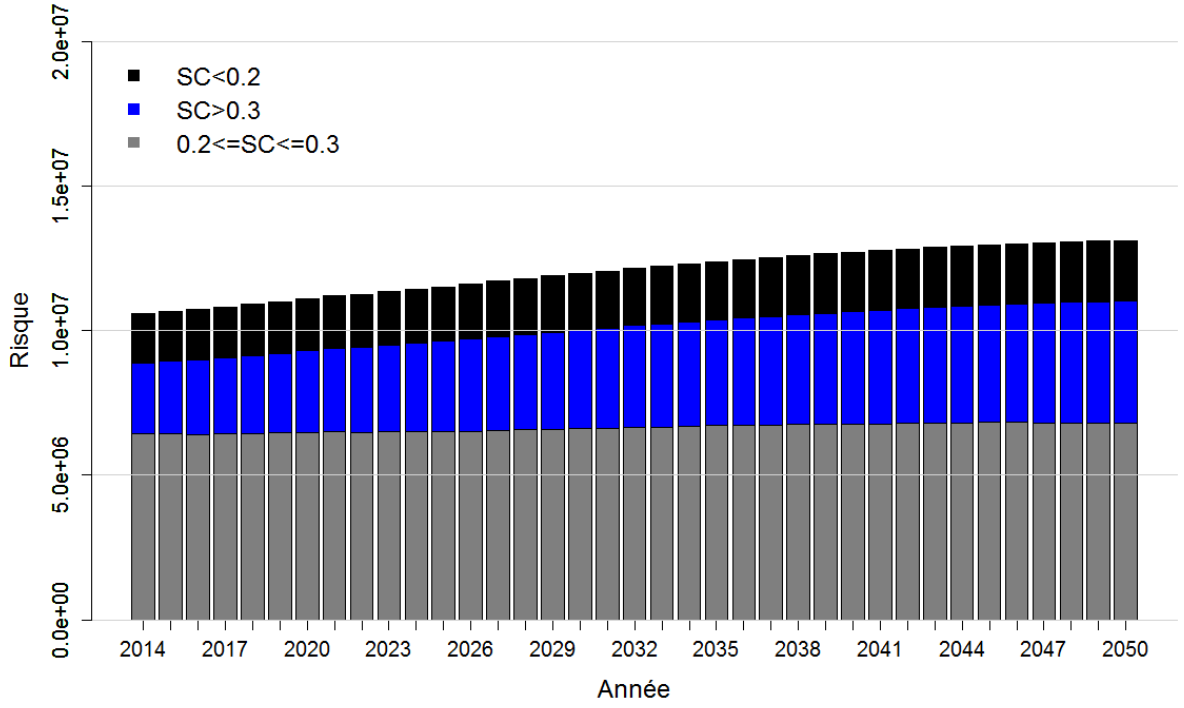


Figure 24 : Prévision pour l'indicateur I4P_inondation entre 2014 et 2050, scénario « statu quo ».

Scénario 12 (code S)

> autour des éléments vulnérables

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Périmètre	Tout le réseau		Réseau en ville									
Stratifié ?	Non	Ville/ Montagne	Non				Diamètre	NDOA	Matériaux		Vulnérabilité	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2001; 2012]		[2001; 2007]	[2001; 2013]								
Statu quo ?	Oui		Oui		On arrête de renouveler	On vise un TR de 1%	Oui			Plus drastique avec les fontes grises	Oui	> autour des éléments vulnérables

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

⇨ Donnée Christelle 2014

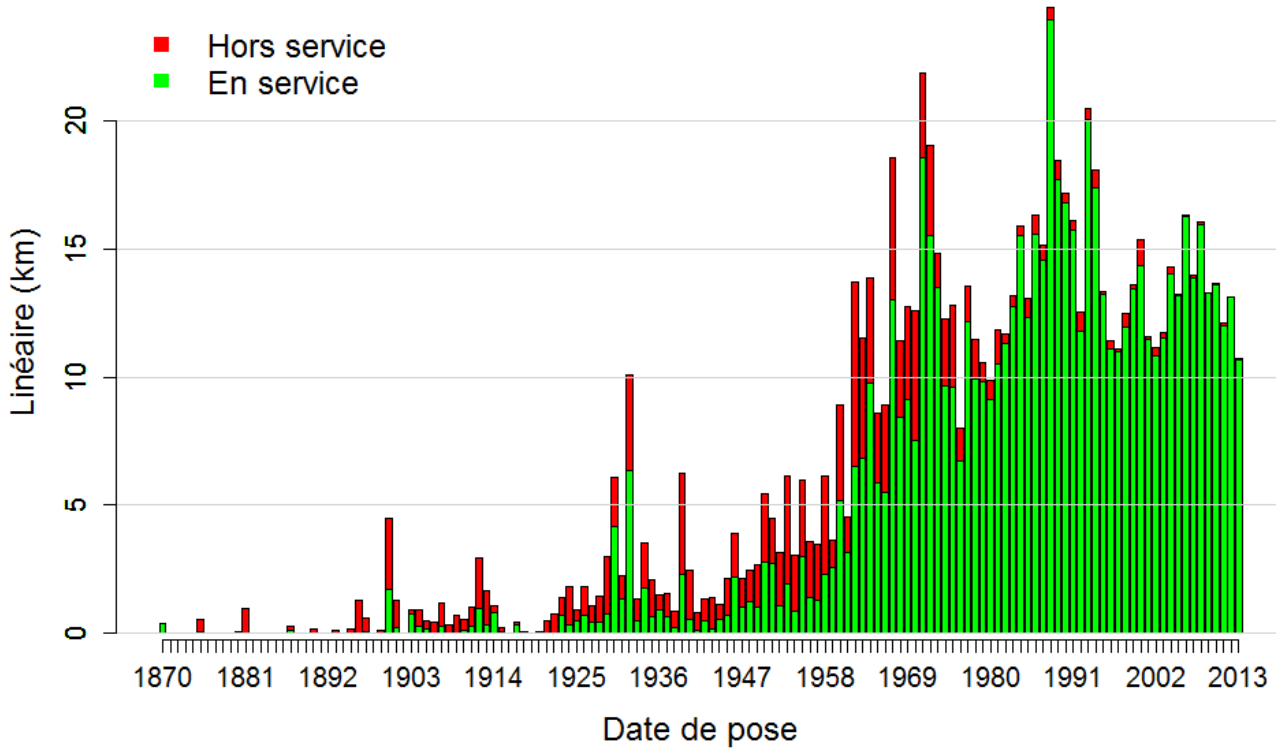


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service (715 km) et Hors Service (156 km) au 31/12/2013 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2001 ; 2013])

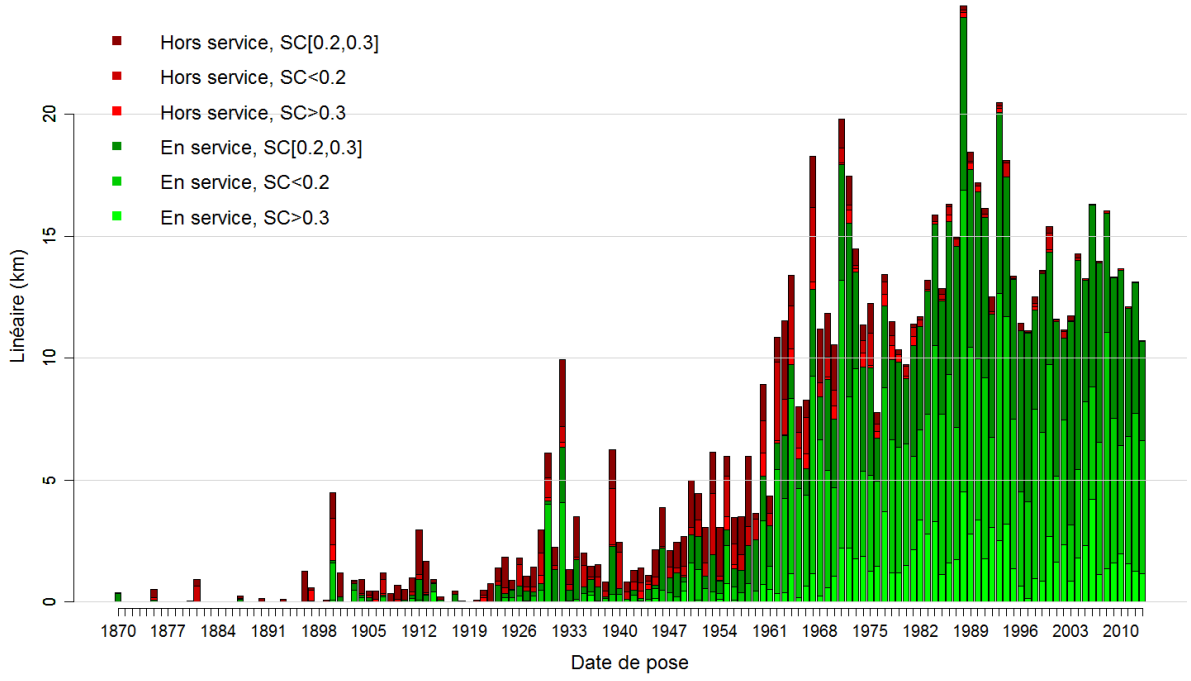


Figure 2 : Linéaire en service en 31/12/2013 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon 3 strates de SC et selon le statut.

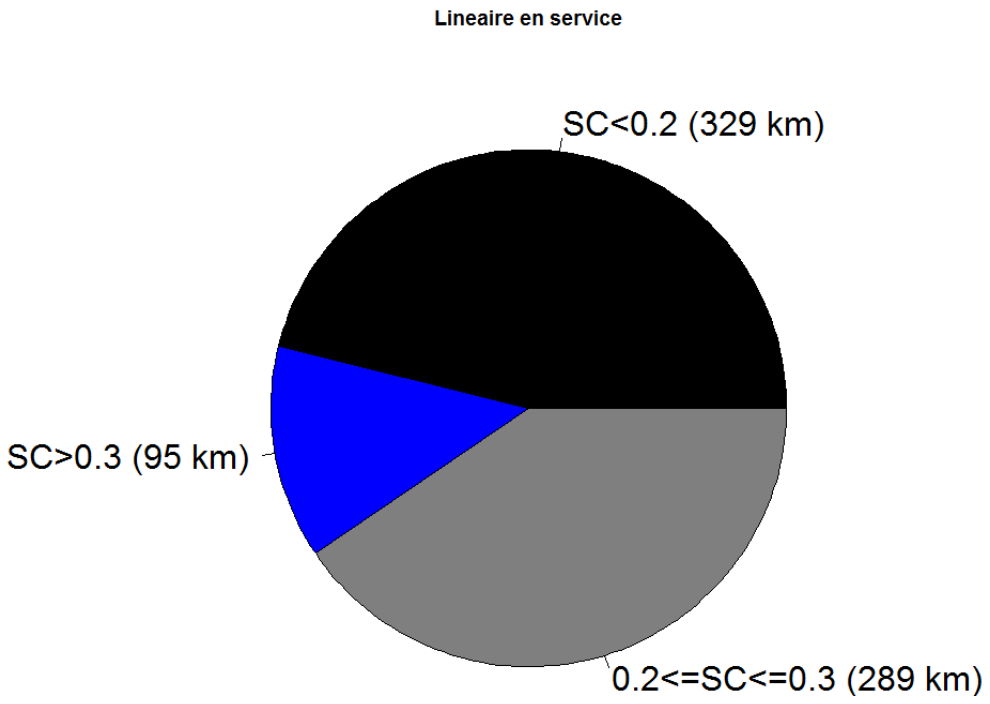


Figure 3 : Proportion du linéaire ES au 31/12/2013 en fonction des 3 strates de SC

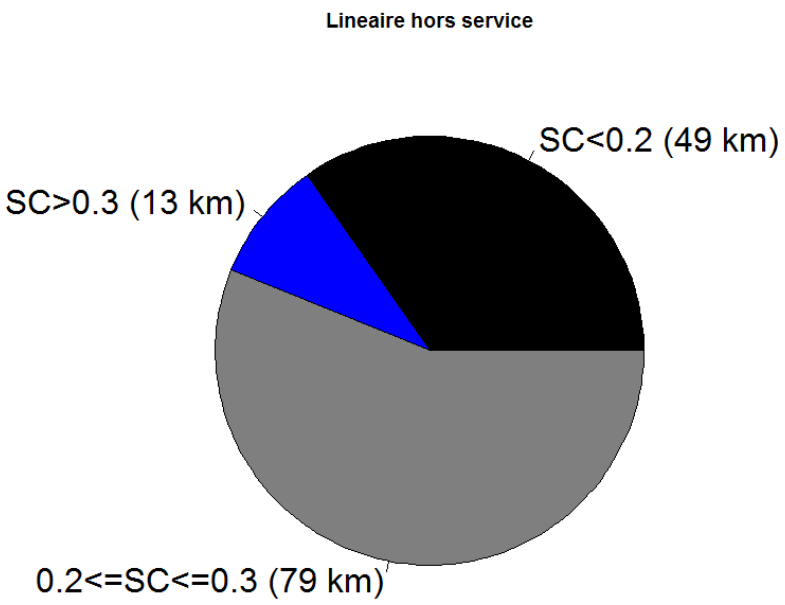


Figure 4 : Proportion du linéaire mis HS entre [2001, 2013] en fonction des quatre strates de matériau

I.2 Sortie en linéaire

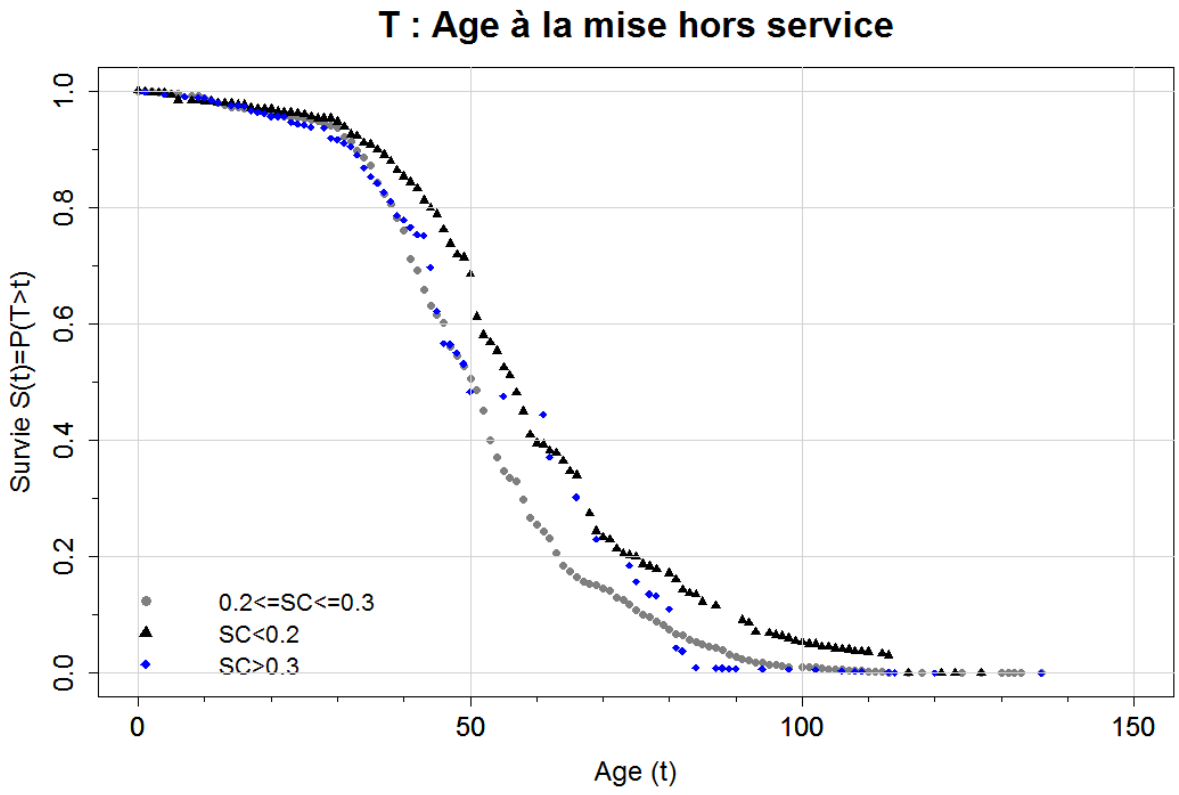


Figure 5 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tronçons par strate de SC

I.1 Entrée en effectif

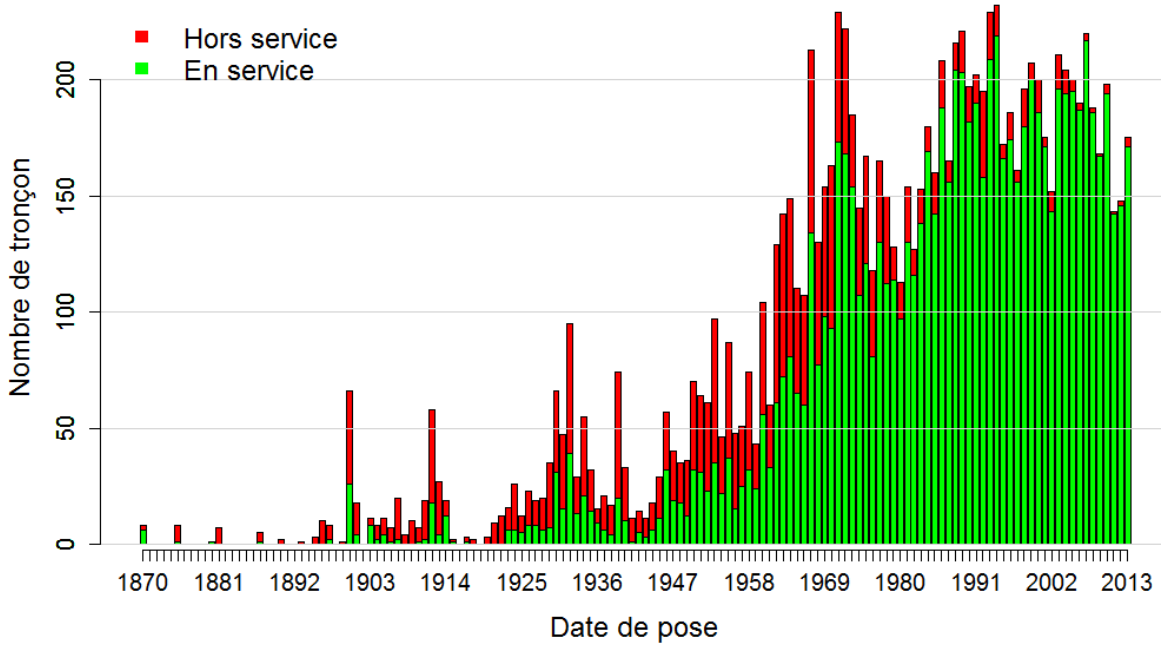


Figure 6 : Histogramme du nombre de tronçons En Service et Hors Service au 31/12/2013 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2001 ; 2013])

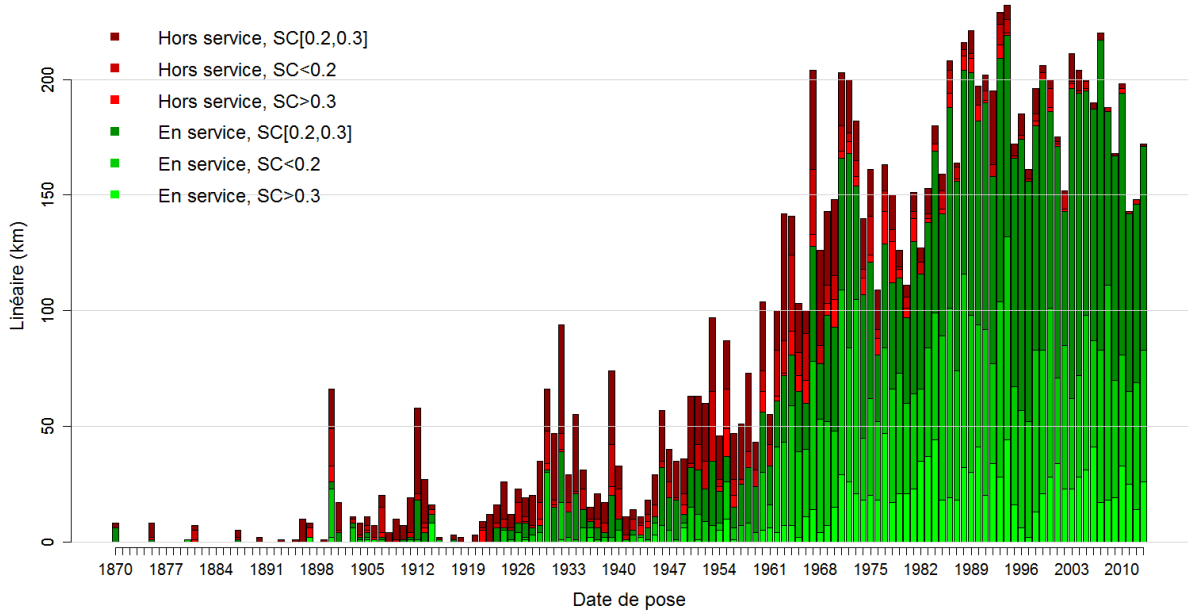


Figure 7 : Nombre de tronçons en service en 31/12/2013 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon 3 strates de SC et selon le statut.

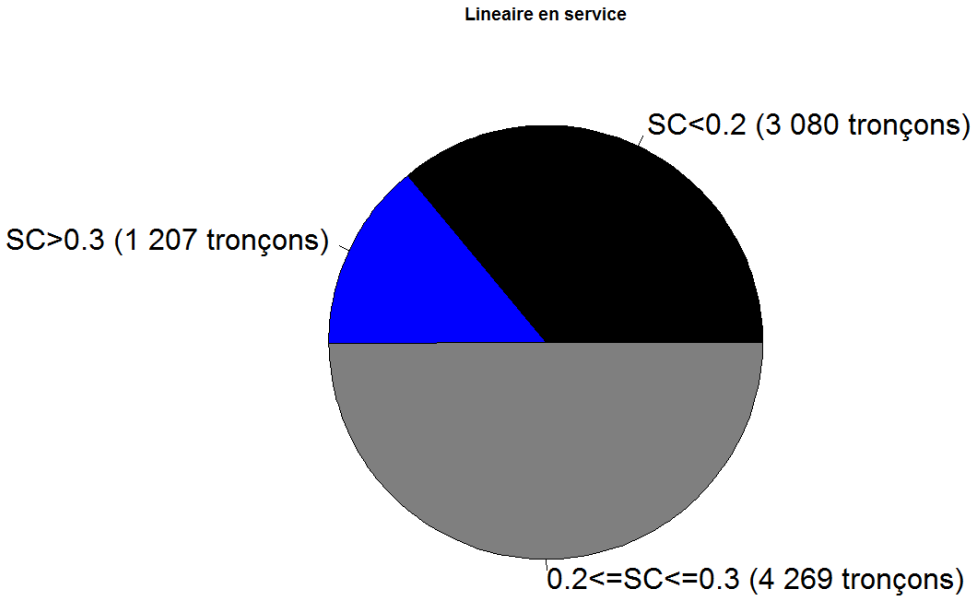


Figure 8 : Proportion du nombre de tronçon ES en fonction de 3 strates de SC

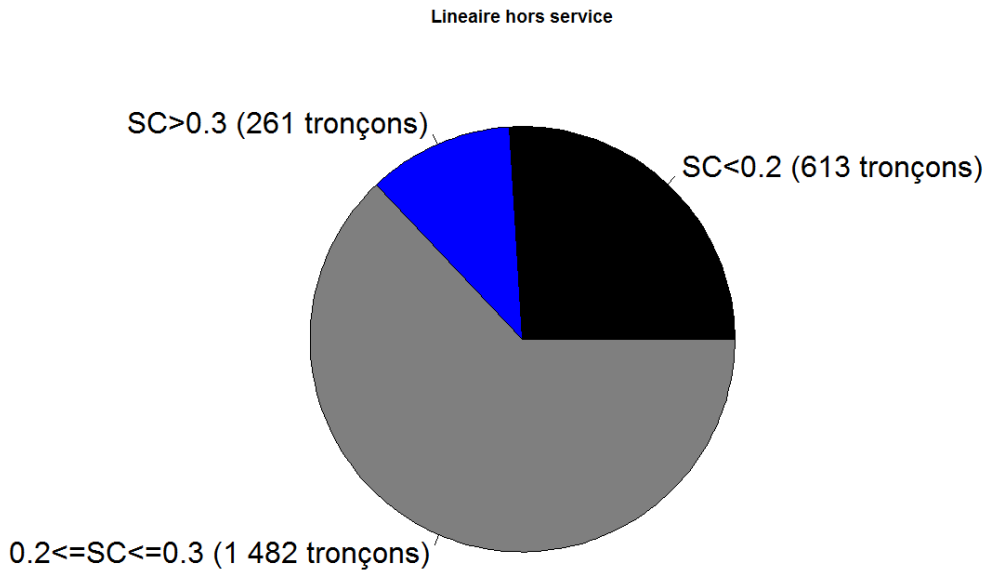


Figure 9 : Proportion du nombre de tronçon HS en fonction de 3 strates de SC

II Scénario 12 (code S)

- Groupe de tronçons : transport normal + distribution (moins Brêt et moins les moins de 6m)
- Date export donné : 2014 par Christelle
- Photographie au 31 /12 /2013
- stratification par SC

- Courbe de survie prospective la même SC faible que par le passé, déconditionner méthode Weibull ,
- On décale vers la gauche SC>0.3 et 0.2≤SC≤0.3
- Taux de travaux coordonnés en général : 80%. Taux des travaux non coordonnées : 20%.

III Construction scénario prospectif

III.1 Entrée en linéaire

Cf. : Figure 5

III.2 Sortie en linéaire

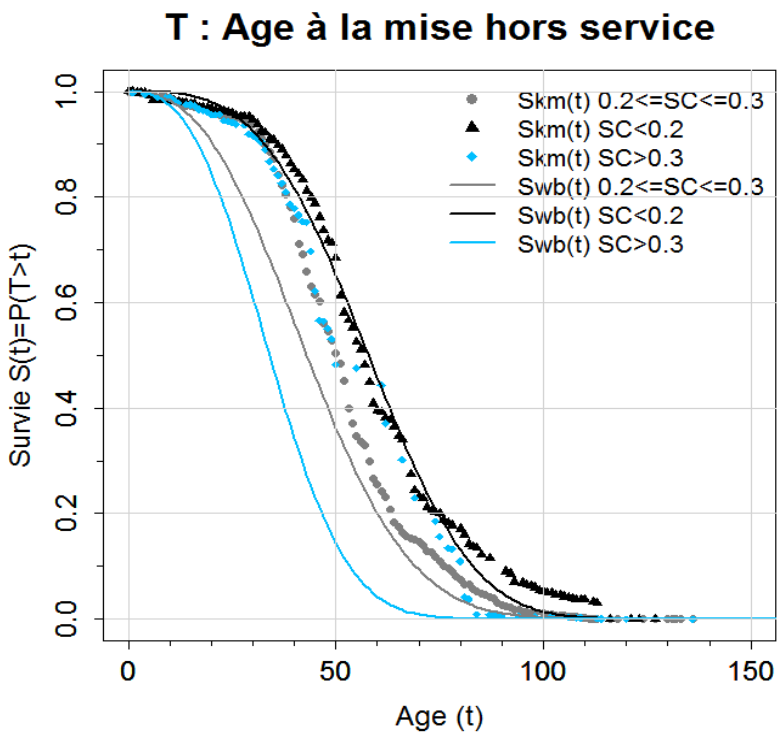


Figure 10 : Courbes de survie prospective (même pour linéaire et effectif) (trait) par strate de SC

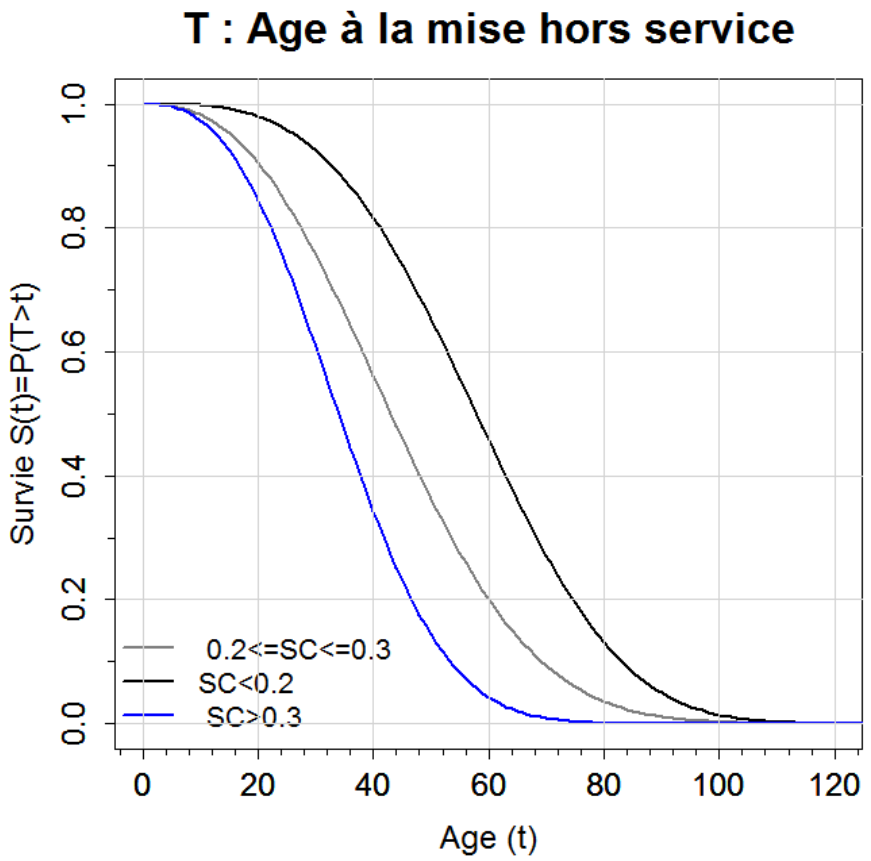


Figure 11 : Courbes de survie prospective (même pour linéaire et effectif) (trait) par strate de SC – scénario R

IV Calcul des indicateurs I1R, I2R et I3R

IV.1 Entrée

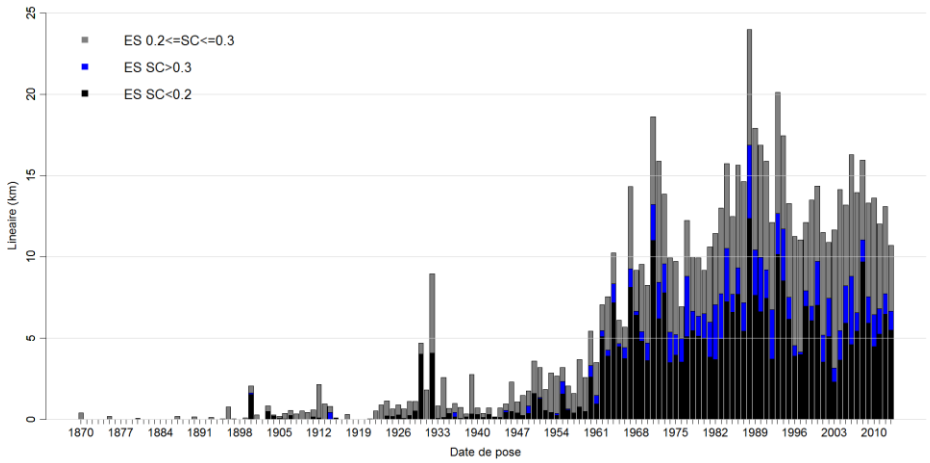


Figure 12 : Linéaire en service en 31/12/2013 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon 3 strates de SC.

IV.2 Sortie

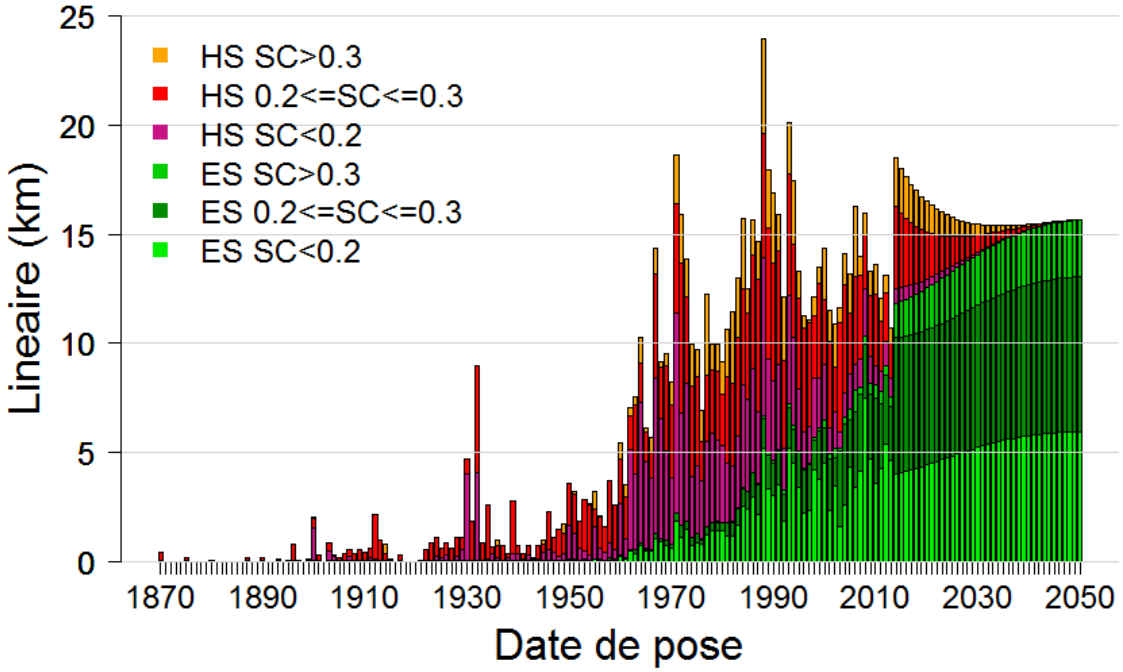


Figure 13 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2050, photographie de la situation en 2050, tronçons partitionnés en 3 strates de SC.

IV.1 Sortie I2R

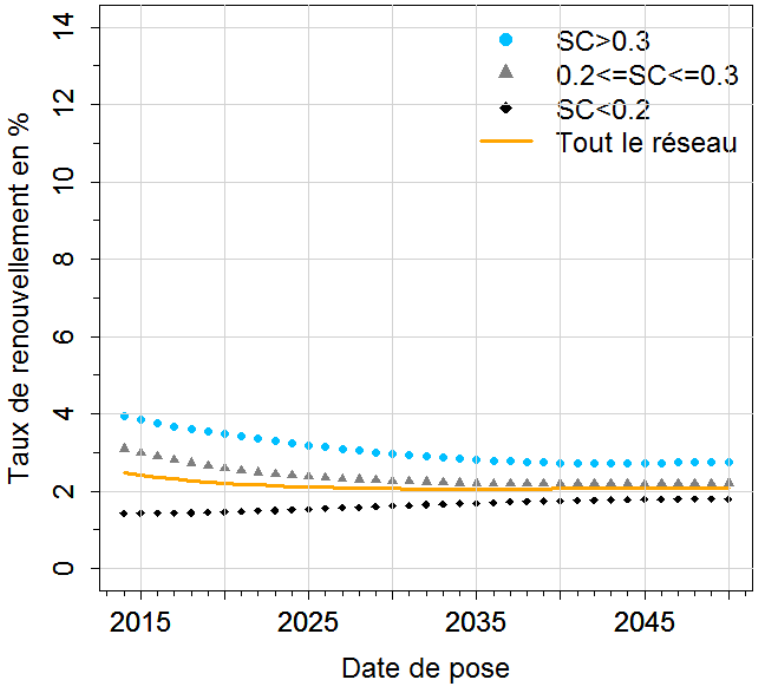


Figure 14 : Prévision des taux de renouvellement futurs de 2014 jusqu'en 2050

IV.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

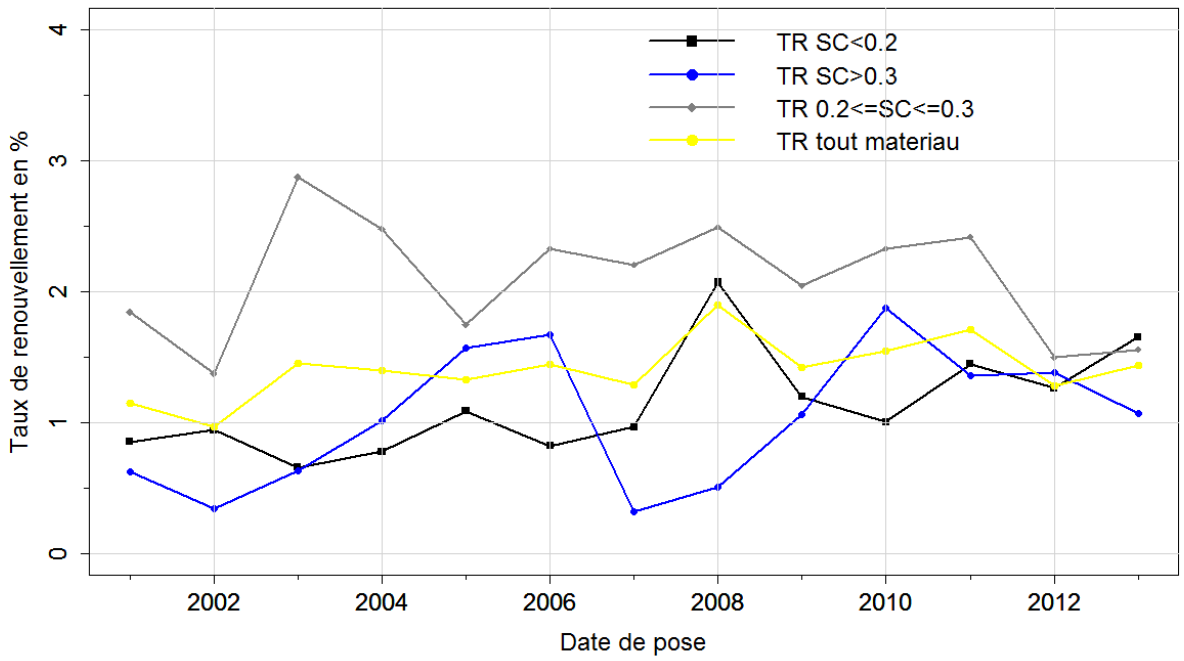


Figure 15 : Taux de renouvellement passé de 2001 à 2013

IV.1 Sortie I3R

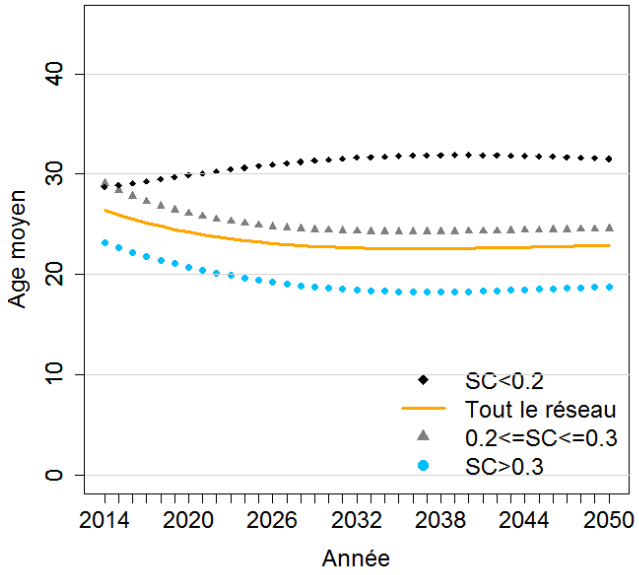


Figure 16 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2014 jusqu'en 2050 à eauservice Lausanne, scénario « statu quo, plusieurs courbes SC», tronçons partitionnés par SC.

V Calcul de l'indicateur I1F

V.1 Entrée

Nom de la strate	Coûts des travaux à la strate (CHF/m)
SC	459
Commentaire	80% coordonnés

V.2 Sortie

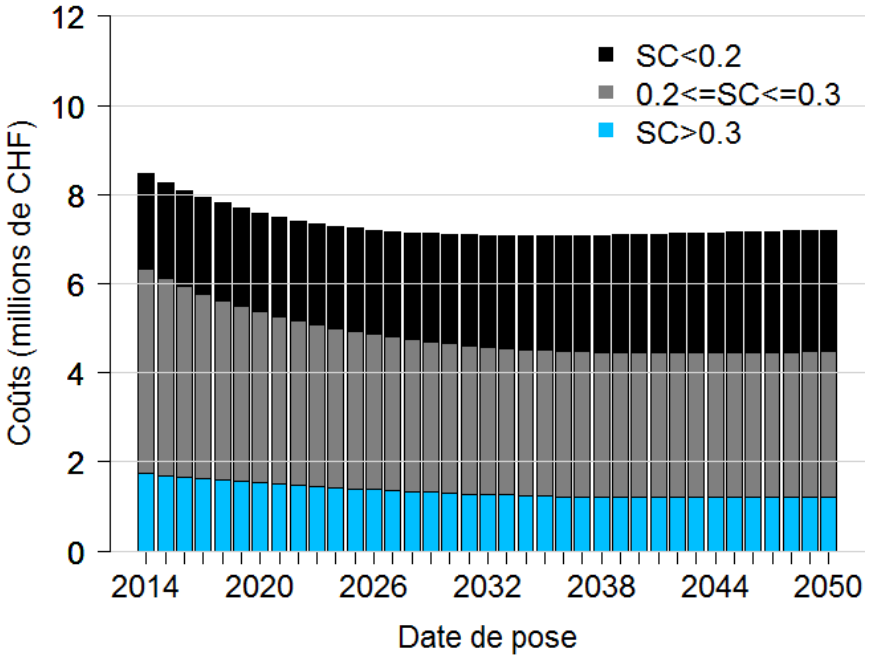


Figure 17 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2014 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes SC », tronçons partitionnés par SC.

VI Calcul de l'indicateur I1P

VI.1 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 10

VI.1 Entrée en tronçon

VI.2 Sorties en tronçons

- Effectif :

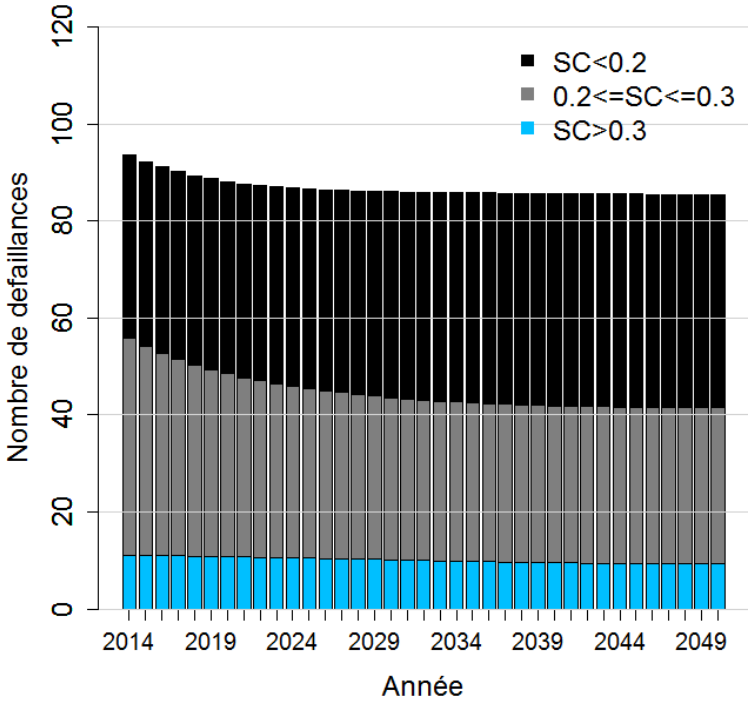


Figure 18 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2014 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes SC », tronçons partitionnés par SC. Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif

Strate inf 0,0.2

```
alpha <- 3.7912
delta <-1.3216
beta0 <-(-1.928)
beta1 <-0.369
beta2 <-(-0.002812)
beta3 <-0.0426
```

Z[i]	theta	ref	std	chi2	pval
Alpha	3.7912E0	0.0000E0	4.9081E-1	7.3783E2	0.0000
Delta	1.3216E0	1.0000E0	7.5169E-2	4.4615E1	0.0000
Zeta0	-3.0000E1	-3.0000E1	NaN	NaN	NaN
Zeta1	0.0000E0	0.0000E0	NaN	NaN	NaN
Beta0	-1.9284E0	0.0000E0	2.2212E-1	7.5376E1	0.0000
LNL	3.6987E-1	0.0000E0	4.3074E-2	7.3734E1	0.0000
PRES	4.2637E-2	0.0000E0	1.2133E-2	1.2349E1	0.0004
DIA	-2.8127E-3	0.0000E0	4.5716E-4	3.7852E1	0.0000

```
alpha <- 2.63
delta <-1.484
beta0 <-(-1.712)
beta1 <-0.3722
beta2 <-(-0.00205)
beta3 <-0.0408
```

Strate 0.2 ;0.3

Z[i]	theta	ref	std	chi2	pval
Alpha	2.6336E0	0.0000E0	3.2405E-1	8.1318E2	0.0000
Delta	1.4842E0	1.0000E0	6.2123E-2	1.4304E2	0.0000
Zeta0	-3.0000E1	-3.0000E1	NaN	NaN	NaN
Zeta1	0.0000E0	0.0000E0	NaN	NaN	NaN
Beta0	-1.7127E0	0.0000E0	1.7251E-1	9.8565E1	0.0000
LNL	3.7221E-1	0.0000E0	3.3623E-2	1.2255E2	0.0000
PRES	4.0811E-2	0.0000E0	1.0779E-2	1.4336E1	0.0002
DIA	-2.0531E-3	0.0000E0	3.4621E-4	3.5169E1	0.0000

```
alpha <- 4.0347
delta <-1.47
beta0 <-(-2.198)
beta1 <-0.409
beta2 <-(-0.00248)
beta3 <-0.0611
```

Strate sup 0.3

Z[i]	theta	ref	std	chi2	pval
Alpha	4.0347E0	0.0000E0	9.5890E-1	2.0018E2	0.0000
Delta	1.4702E0	1.0000E0	1.3110E-1	4.2557E1	0.0000
Zeta0	-3.0000E1	-3.0000E1	NaN	NaN	NaN
Zeta1	0.0000E0	0.0000E0	NaN	NaN	NaN
Beta0	-2.1980E0	0.0000E0	4.3299E-1	2.5768E1	0.0000
LNL	4.0963E-1	0.0000E0	6.9732E-2	3.4508E1	0.0000
PRES	6.1187E-2	0.0000E0	2.7118E-2	5.0911E0	0.0240
DIA	-2.4871E-3	0.0000E0	8.4703E-4	8.6218E0	0.0033

```
alpha <- 2.59
delta <-1.47
beta0 <-(-1.69)
beta1 <-0.3712
beta2 <-(-0.0021)
beta3 <-0.041
beta4<- -0.57
```

Dessous on l'utilise pas Strate 0.2 ;0.3 avec plus de cov

Z[i]	theta	ref	std	chi2	pval
Alpha	2.5977E0	0.0000E0	3.1937E-1	8.1147E2	0.0000
Delta	1.4747E0	1.0000E0	6.1881E-2	1.3881E2	0.0000
Zeta0	-3.0000E1	-3.0000E1	NaN	NaN	NaN
Zeta1	0.0000E0	0.0000E0	NaN	NaN	NaN
Beta0	-1.6917E0	0.0000E0	1.7355E-1	9.5011E1	0.0000
LNL	3.7128E-1	0.0000E0	3.3696E-2	1.2141E2	0.0000
DIA	-2.1053E-3	0.0000E0	3.5184E-4	3.5806E1	0.0000
PRES	4.1039E-2	0.0000E0	1.0760E-2	1.4548E1	0.0001
MAT[fonte grise]	0.0000E0	0.0000E0	NaN	NaN	NaN
MAT[fonte ductile]	0.0000E0	0.0000E0	NaN	NaN	NaN
MAT[acier]	0.0000E0	0.0000E0	NaN	NaN	NaN
MAT[autre]	-5.7089E-1	0.0000E0	2.8375E-1	4.0481E0	0.0442

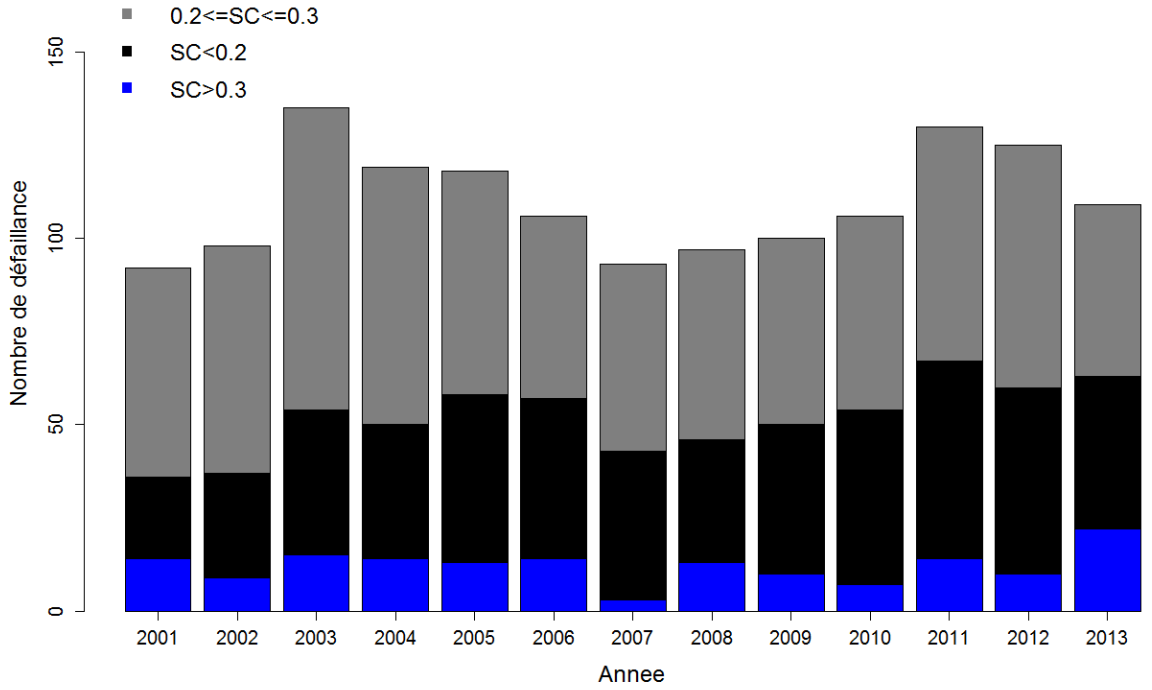


Figure 19 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2013 et mis hors service entre [2001, 2013], partitionné par SC

VII Calcul de l'indicateur I2F, coûts du renouvellement

VII.1 Entrée

(moins les tronçons mis HS en 2014)

CUR_p Coût [CHF]	Materiau	Diamètre (mm)
4 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi < 250$
6 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi \geq 250$
20 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BAT	$\phi < 250$
40 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BAT	$\phi \geq 250$

Tableau 1 : Valeur des coûts de réparation par tronçon

VII.2 Modèle

I2F = NbDef x Curp

VII.3 Sortie

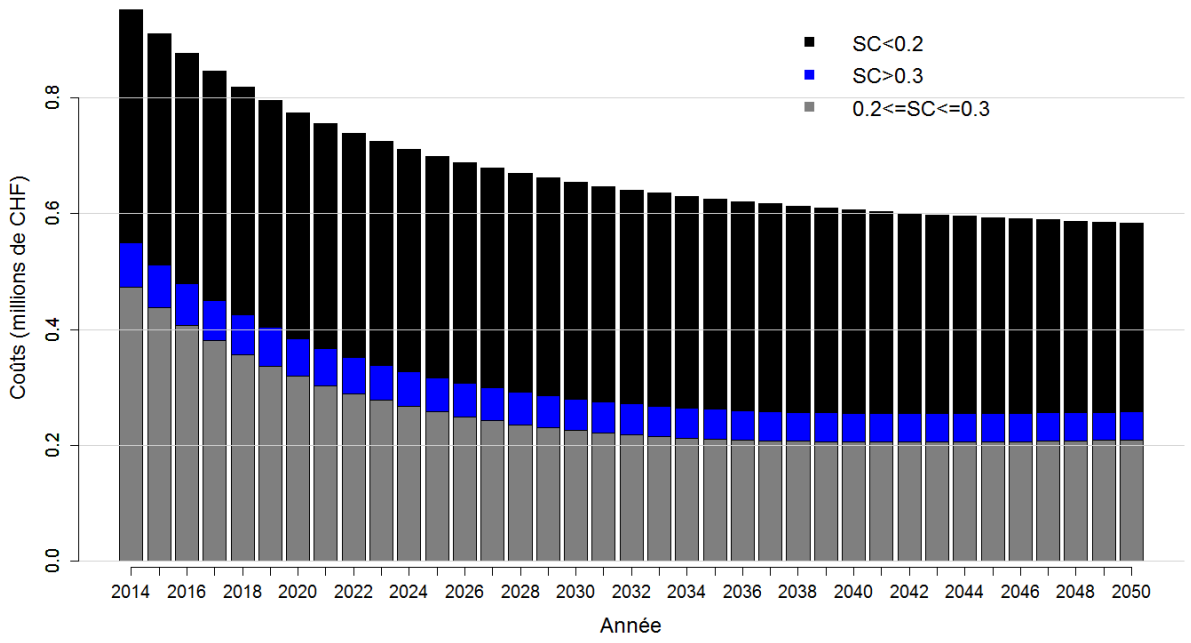


Figure 20 : Prévision pour l'indicateur I2F entre 2014 et 2050, scénario « statu quo ».

VIII Calcul de l'indicateur I2P continuité

VIII.1 Entrée

(moins les tronçons mis HS en 2014)

Et

tr (Heures)	Matériau	Diamètre (mm)
3	Acier, fonte ductile, PE	$\phi < 250$
4	Acier, fonte ductile, PE	$\phi \geq 250$
6	Fonte grise, Eternit	$\phi < 250$
8	Fonte grise, Eternit	$\phi \geq 250$

Tableau 2 : Temps de réparation par tronçon

Et

Description	Valeurs de NBH
Haute densité	40
Moyenne densité	25
Centre village	20
Vieille ville	15
Z.I. sensible	5
Z.I. normale	5
Faible densité	5
Transport bouclage	0
Zone verte	0

Tableau 3 : Coefficient lié au nombre d'usager associé à ce tronçon

Valeurs SC	Description
1	Clients sensibles
0.6	Z.I. sensible
0.5	Z.I. normale
0.3	Haute densité
0.2	Vieille ville
0.2	Centre village
0.2	Moyenne densité
0.1	Faible densité
0	Transport bouclage
0	Zone verte

Tableau 4 : Coefficient lié à la vulnérabilité des usagers associé à ce tronçon

VIII.2 Modèle

I2P-continuite = NbDef x tr x NPS x SC

VIII.3 Sortie

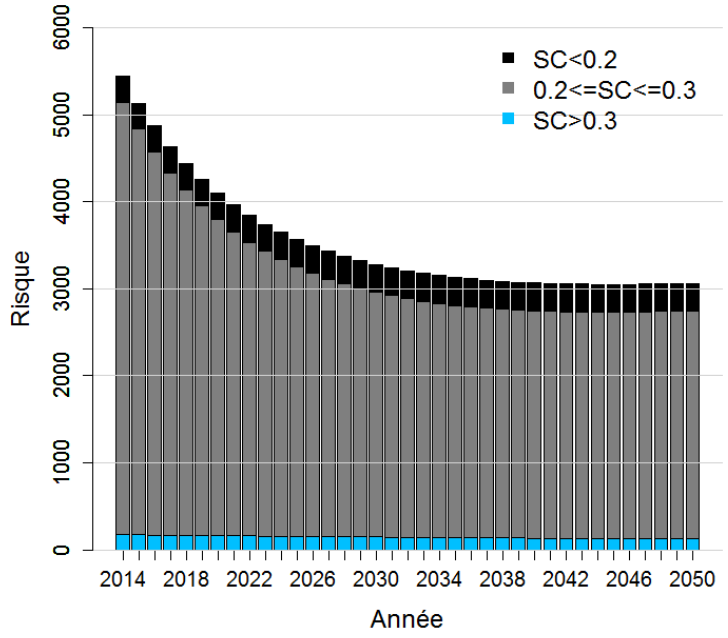


Figure 21 : Prévision pour l'indicateur I2P_continuité entre 2014 et 2050, scénario « statu quo».

IX Calcul de l'indicateur I3P voirie

IX.1 Entrée

(moins les tronçons mis HS en 2014)

cf. Tableau 2

Valeur de SR	Transport en commun	Niveau du trafic
1	TL trolleybus	trafic $\geq$ 15000
0.9	TL trolleybus	trafic $<$ 15000
0.8	TL Bus	trafic $\geq$ 15000
0.7	TL Bus	trafic $<$ 15000
0.7	pas TL	trafic $\geq$ 20000
0.5	pas TL	20000 $>$ trafic $\geq$ 10000
0.4	pas TL	10000 $>$ trafic $\geq$ 5000
0.2	pas TL	5000 $>$ trafic $\geq$ 500
0.0	pas TL	trafic $<$ 500

Tableau 5 : Coefficient lié à la quantité et à la vulnérabilité du trafic routier associé à ce tronçon

IX.1.1 I3P voirie

I3P-voirie = NbDef x tr x SR

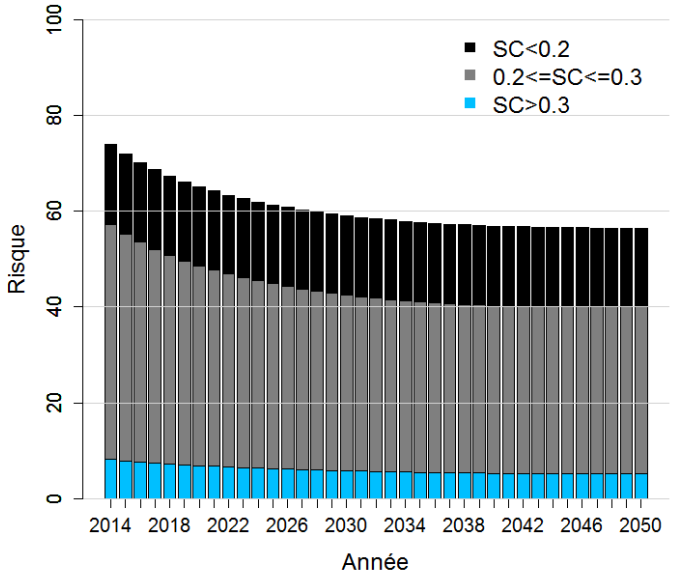


Figure 22 : Prévision pour l'indicateur I3P_voirie entre 2014 et 2050, scénario « statu quo »

X Calcul de l'indicateur I4P inondation

X.1 Entrée

(moins les tronçons mis HS en 2014)
+ diamètre du tronçon (mm)
+ pression de l'eau dans le tronçon (m de colonne d'eau)

SI	Description
1	Vieille ville
0.8	Z.I. sensible
0.6	Haute densité
0.5	Centre village
0.4	Moyenne densité
0.4	Z.I. normale
0.2	Faible densité
0	Transport bouclage
0	Zone verte

Tableau 6 : Coefficient lié à la quantité, à la vulnérabilité et à la valeur des biens autour du tronçon

X.2 Modèle

I4P-innondation = NbDef x dia x dia x PRES x SI

X.3 Sortie

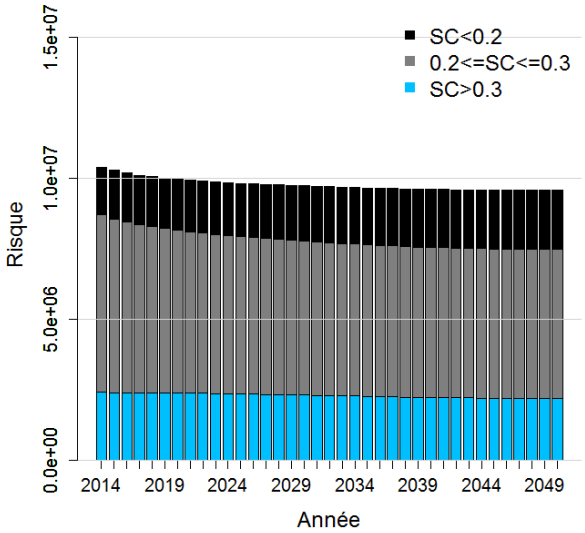


Figure 23 : Prévision pour l'indicateur I4P_inondation entre 2014 et 2050, scénario « statu quo ».

XI Calcul de l'indicateur I6P Volume de fuite

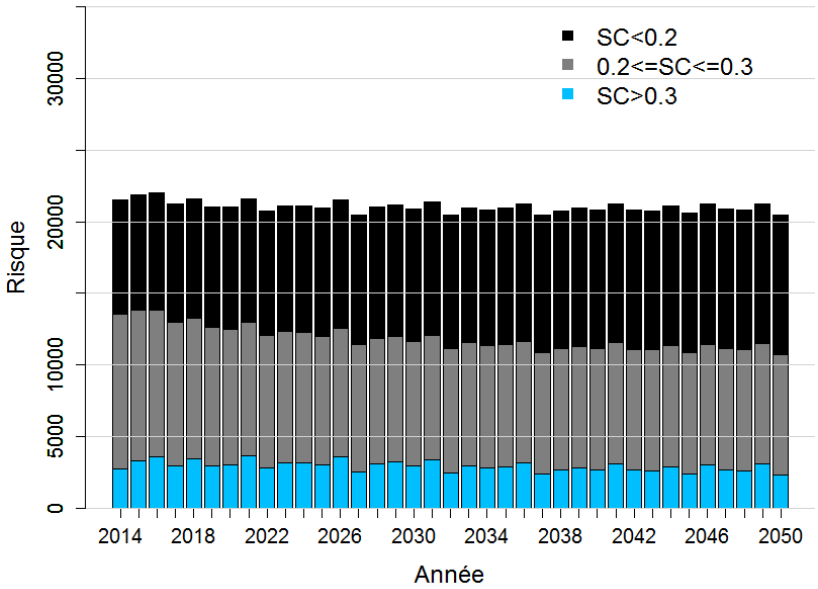


Figure 24 : Prévision pour l'indicateur I6P_volume fuite entre 2014 et 2050, scénario « statu quo

Annexe K : Scénarios à partir des données du SEDIF

	Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7
	Stratifié ?	Non			Diamètres	NDOA	Matériaux	
	Fenêtre d'apprentissage du modèle	[1995; 2004]	[1995; 2012]					
	Statu quo ?	Oui		On arrête de renouveler	Oui			On arrête de renouveler
	Numéro scénario / Indicateurs	1	2	3	4	5	6	7
	Survie passée	X	X	X	X	X	X	X
I1R	Linéaire	X	X	X	X		X	X
I2R	Tx renouvellement		X	X	X		X	X
I3R	Âge moyen		X	X	X		X	X
I1F	Coût renouvellement		X	X	X		X	X
I1P	Nb Def Eq3		X	X	X		X eq2	X eq2
I2F	Coût réparation				X			

Scénario 1 (code Abis)

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7
Stratifié ?	Non			Diamètres	NDOA	Matériaux	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[1995; 2004]	[1995; 2012]					
Statu quo ?	Oui		On arrête de renouveler	Oui			On arrête de renouveler

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

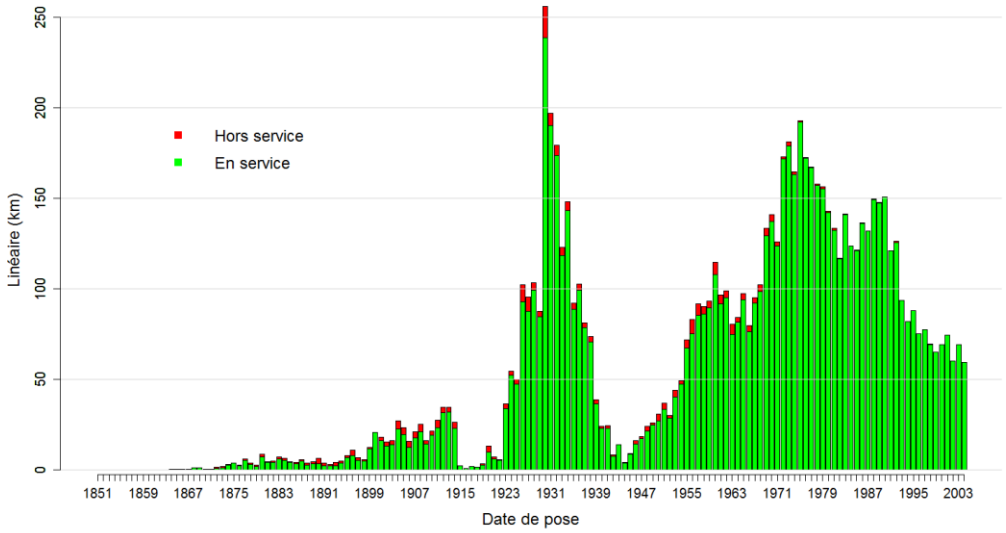


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2004 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [1995 ; 2004])

I.2 Sortie en linéaire

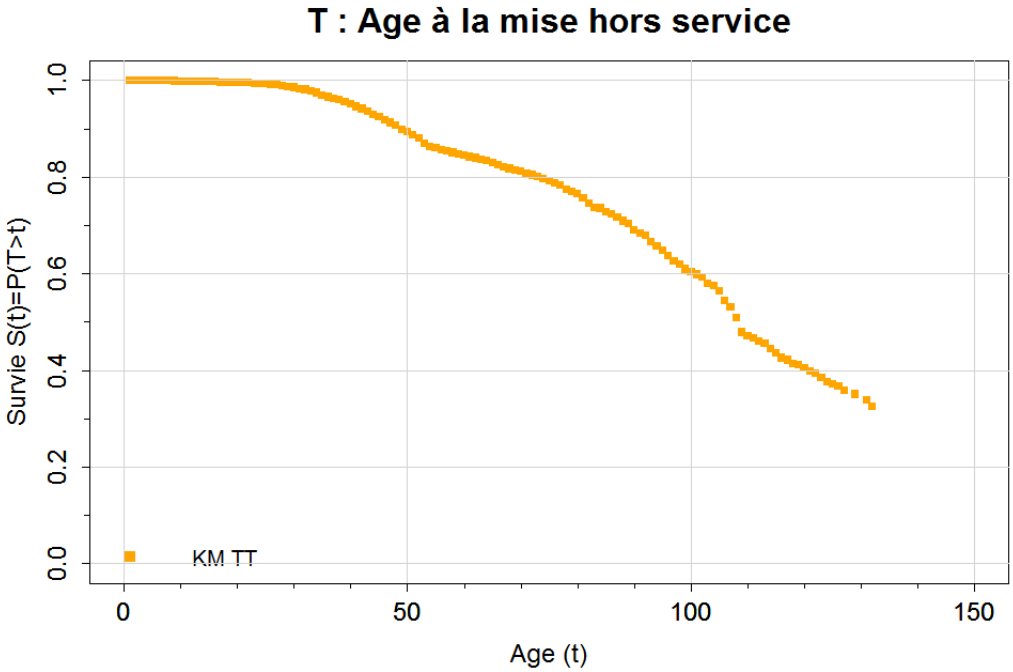


Figure 2 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons

II Scénario 1 (code Abis)

- Groupe de tronçons : transport normal + distribution (moins Brêt et moins les moins de 6m)
- Photographie au 31 /12 /2004
- Pas de stratification
- Courbes de survie prospectives les même que par le passé
- Taux de travaux coordonnés en général : 80%. Taux des travaux non coordonnées : 20%.

III Construction scénario prospectif C

III.1 Entrée en linéaire

Cf. : Figure 2

III.2 Sortie en linéaire

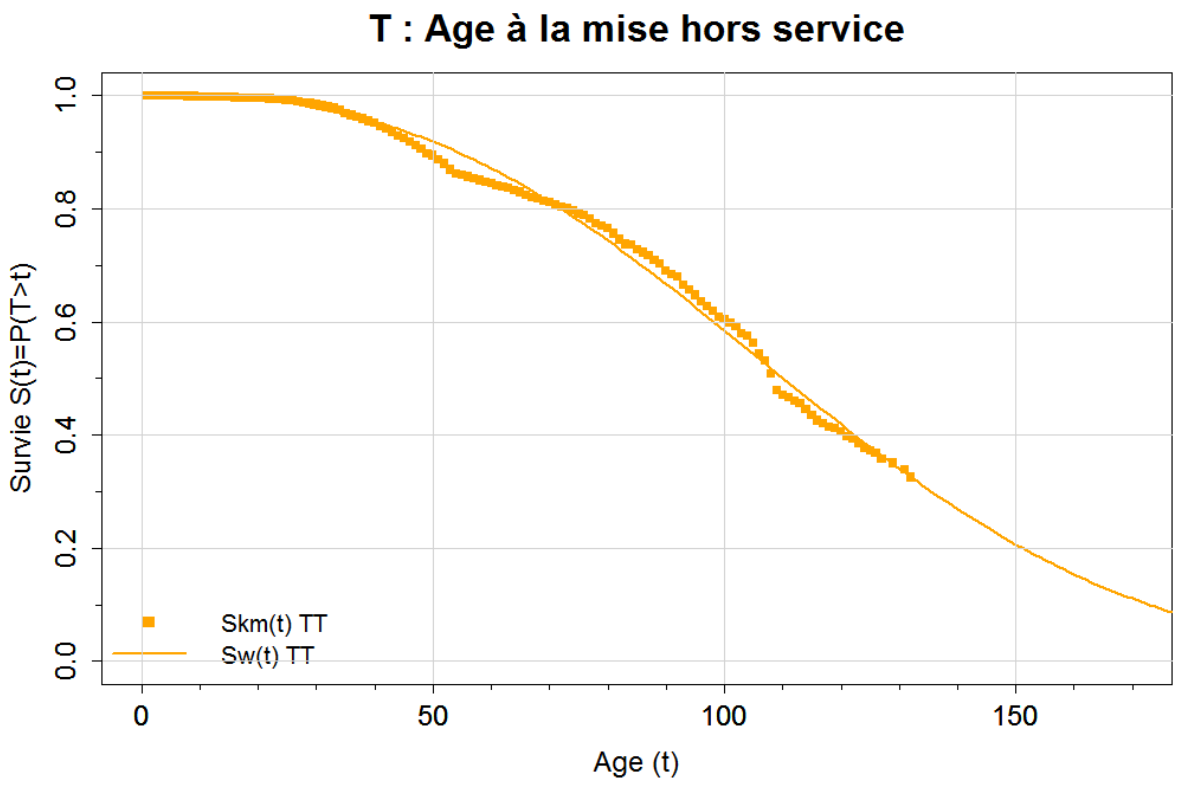


Figure 3 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait)

IV Calcul de indicateur I1R

IV.1 Entrée

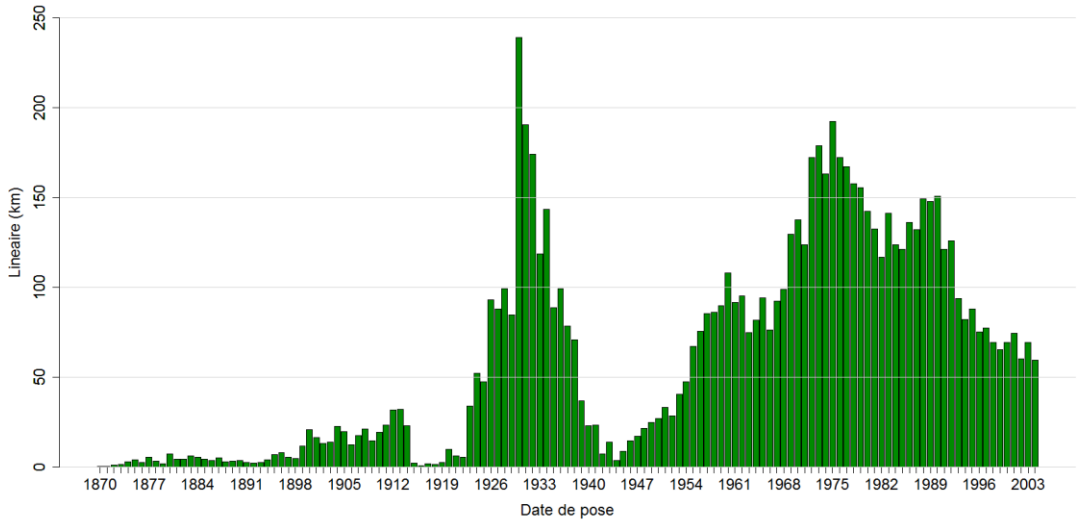


Figure 4 : Linéaire en service (ES) au 31/12/2004

IV.2 Sortie

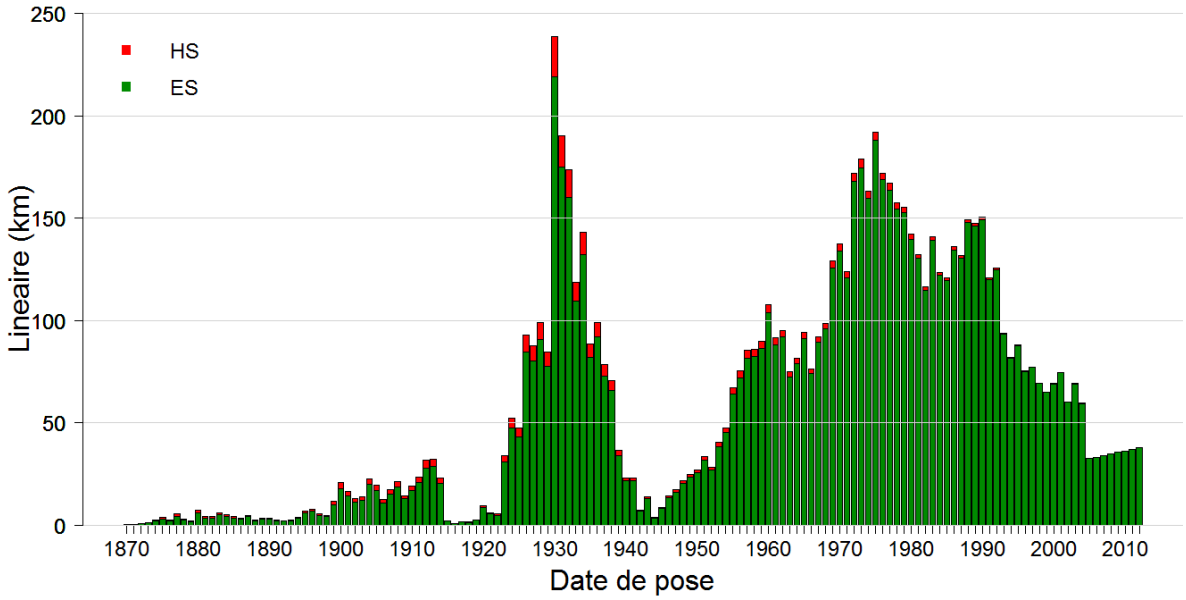


Figure 5 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2012, photographie de la situation en 2012.

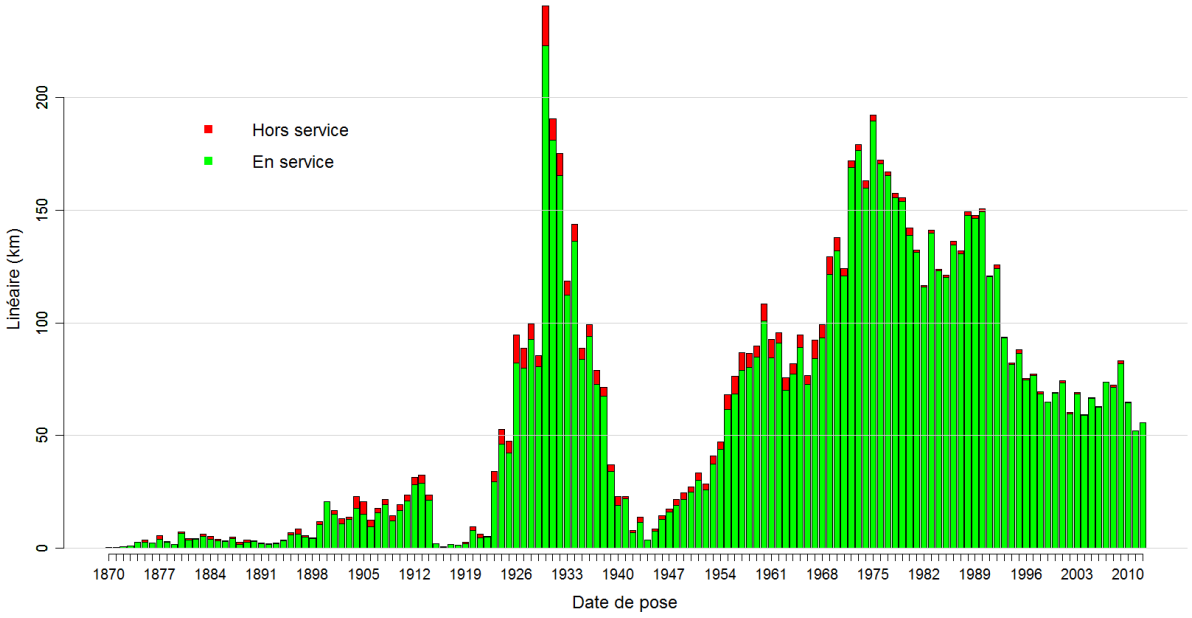


Figure 6 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2005 ; 2012])

Scénario 2 (code A)

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7
Stratifié ?	Non			Diamètres	NDOA	Matériaux	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[1995; 2004]	[1995; 2012]					
Statu quo ?	Oui		On arrête de renouveler	Oui			On arrête de renouveler

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

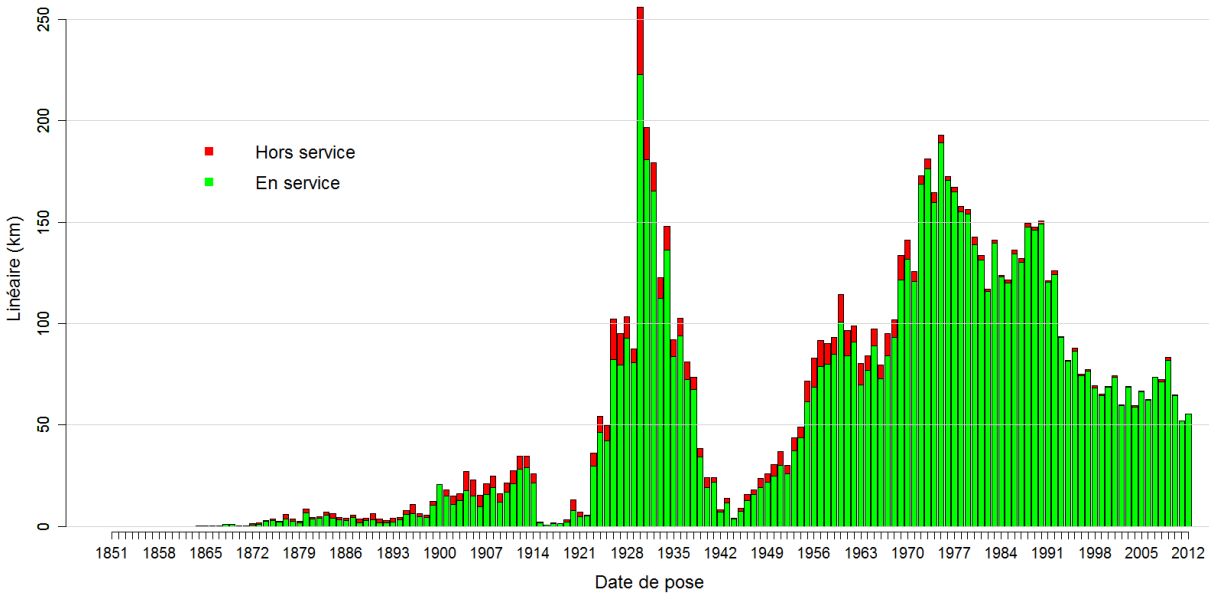


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [1995 ; 2012])

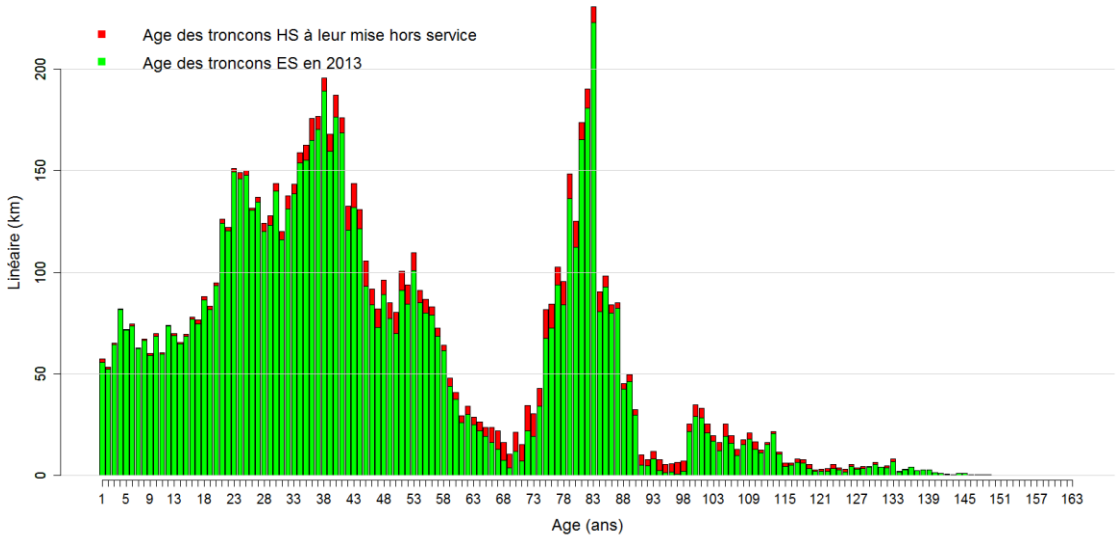


Figure 2 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2012 en fonction de leur âges (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [1995 ; 2012])

I.2 Sortie en linéaire

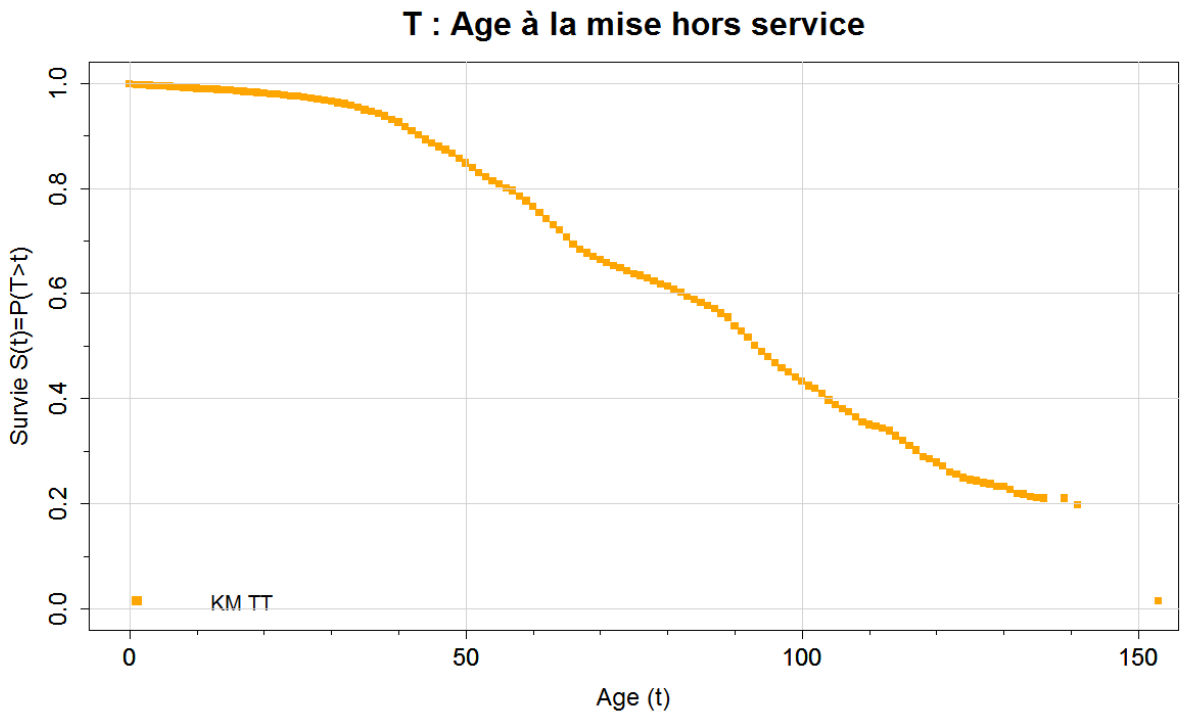


Figure 3 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons

I.1 Entrée en effectif

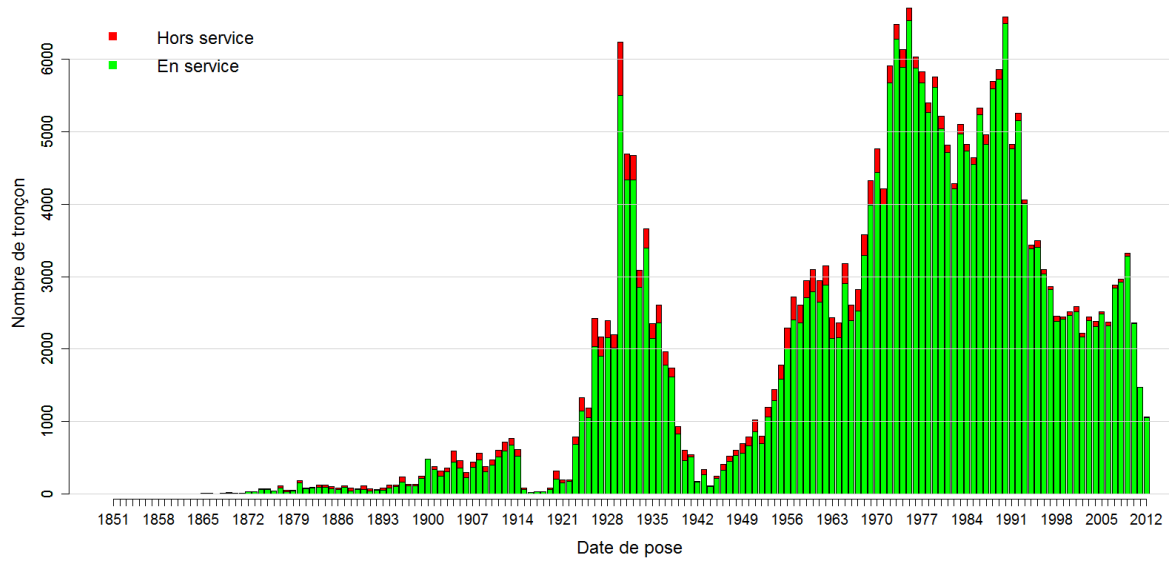


Figure 4 : Histogramme du nombre de tronçons En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [1995 ; 2012])

I.2 Sortie en effectif

Figure 5 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en nombre de tronçons

II Scénario 2 (code A)

- Groupe de tronçons : transport normal + distribution (moins Brêt et moins les moins de 6m)
- Photographie au 31 /12 /2012
- Pas de stratification
- Courbes de survie prospectives les même que par le passé
- Taux de travaux coordonnés en général : 80%. Taux des travaux non coordonnées : 20%.

III Construction scénario prospectif

III.1 Entrée en linéaire

Cf. : Figure 3

III.2 Sortie en linéaire

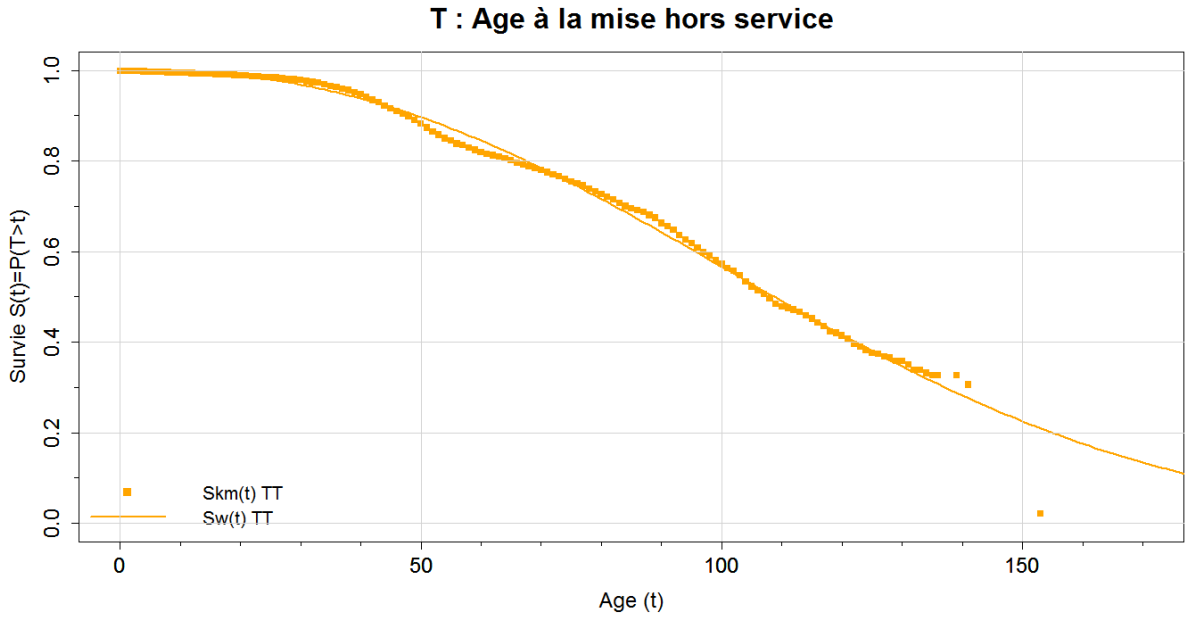


Figure 6 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait)

III.1 Entrée en effectif

Cf. : Figure 5

III.2 Sortie en effectif

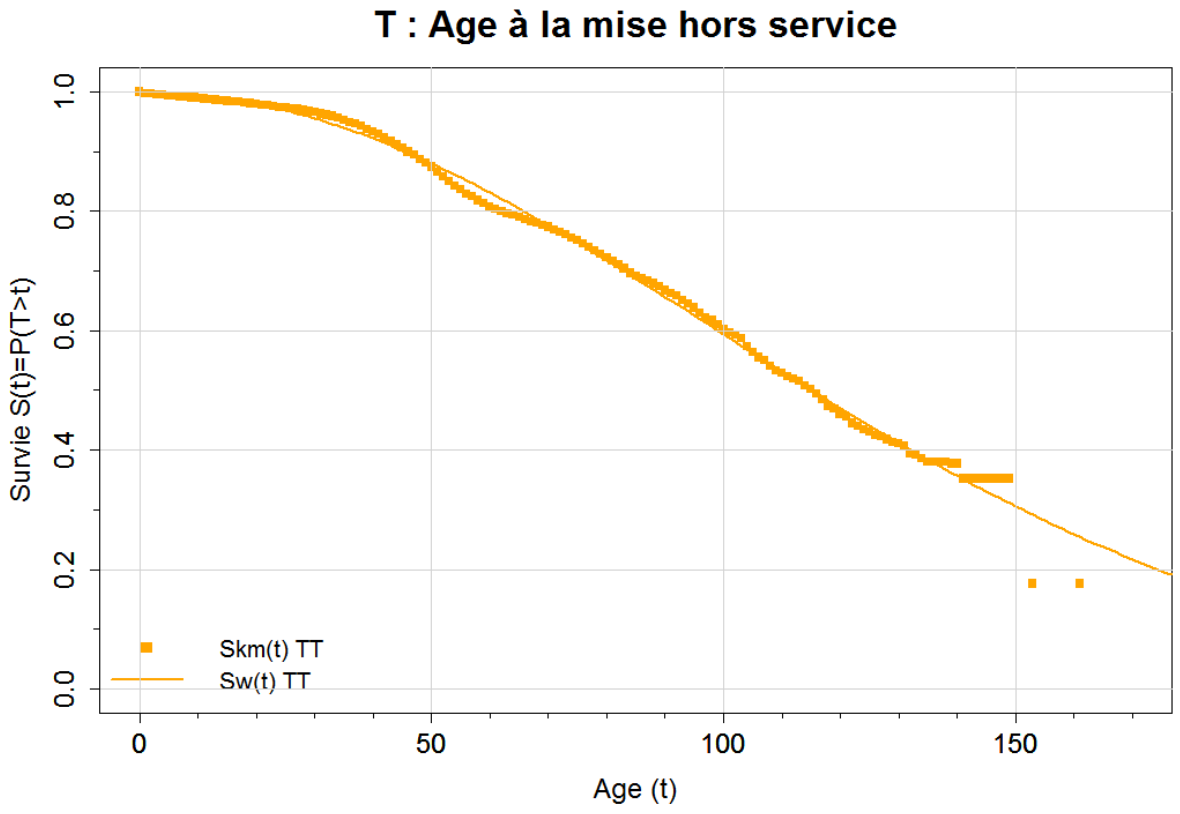


Figure 7 : Courbes de survie prospective en effectif (trait)

III.3 Comparaison des sorties en linéaire et en effectif

Figure 8 : Comparaison des courbes de survie prospectives en effectif et en linéaire

IV Calcul des indicateurs I1R, I2R et I3R

IV.1 Entrée

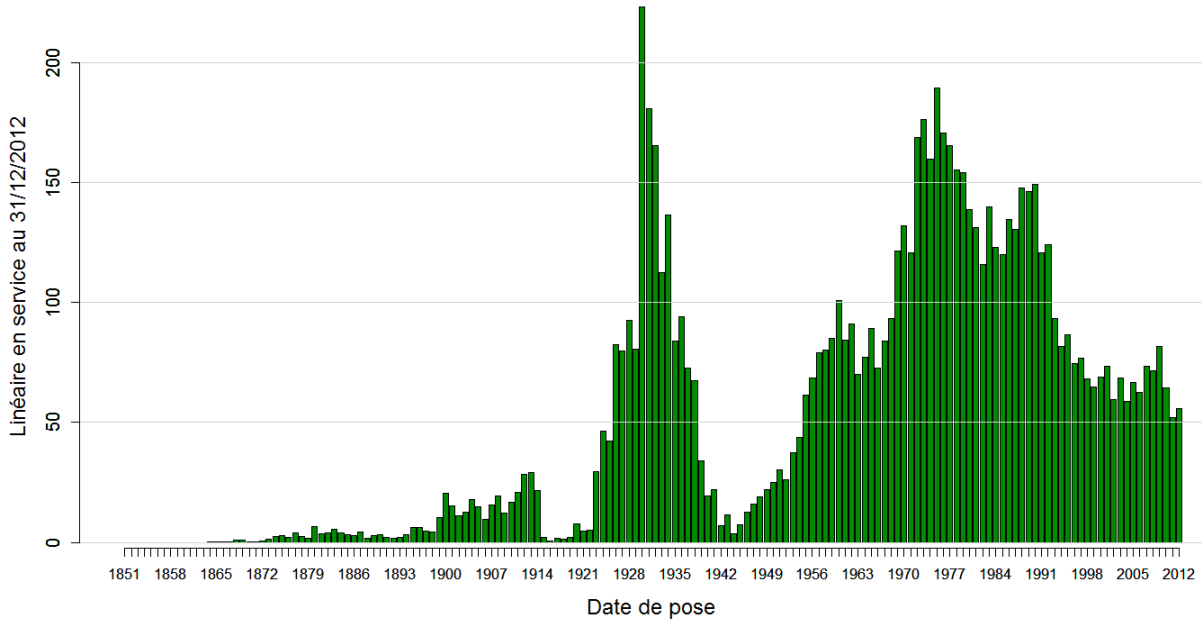


Figure 9 : Linéaire en service (ES) au 31/12/2012

IV.2 Sortie

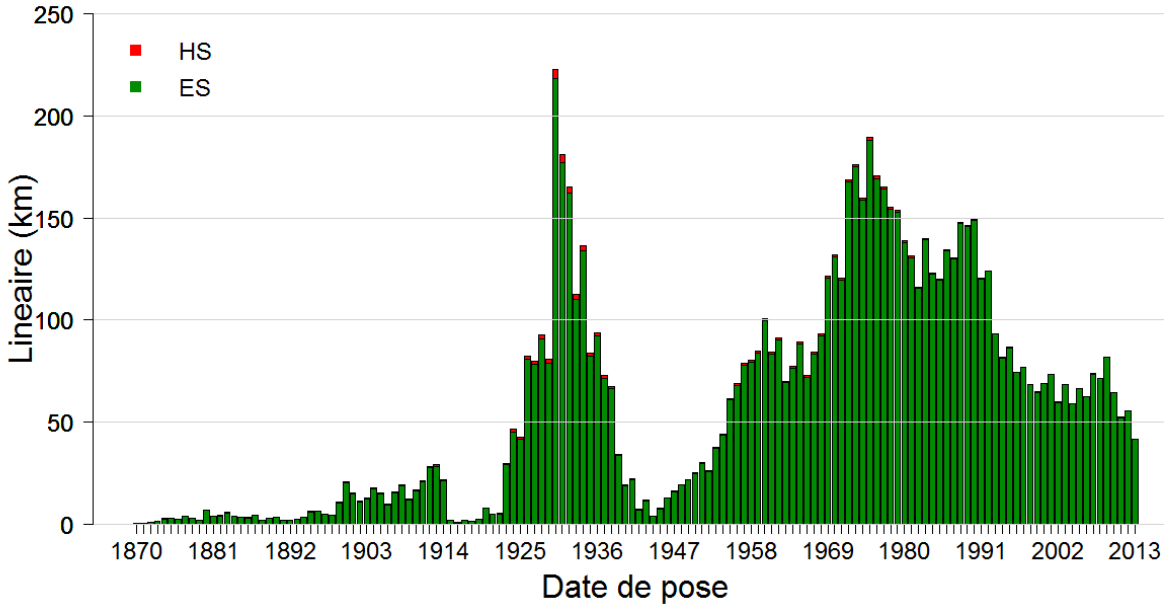


Figure 10 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2013, photographie de la situation en 2013.

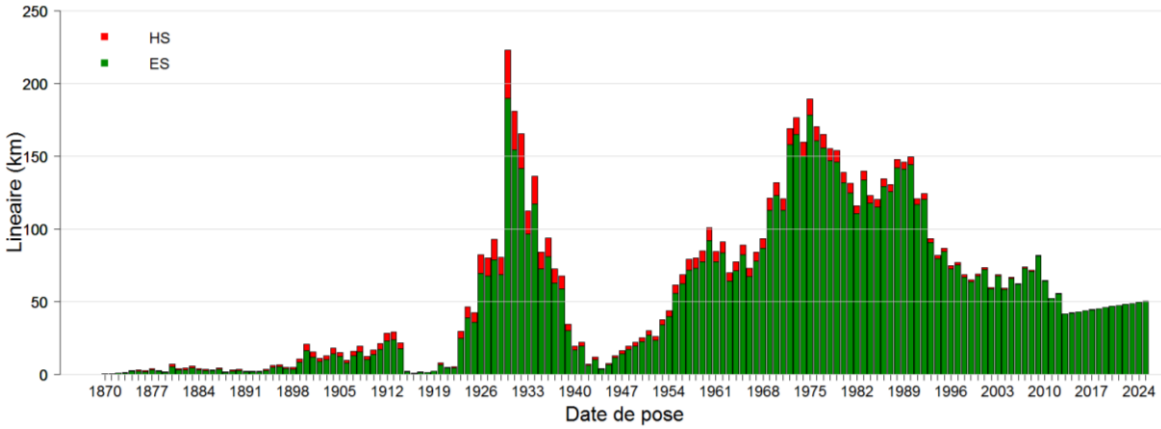


Figure 11 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2025, photographie de la situation en 2025

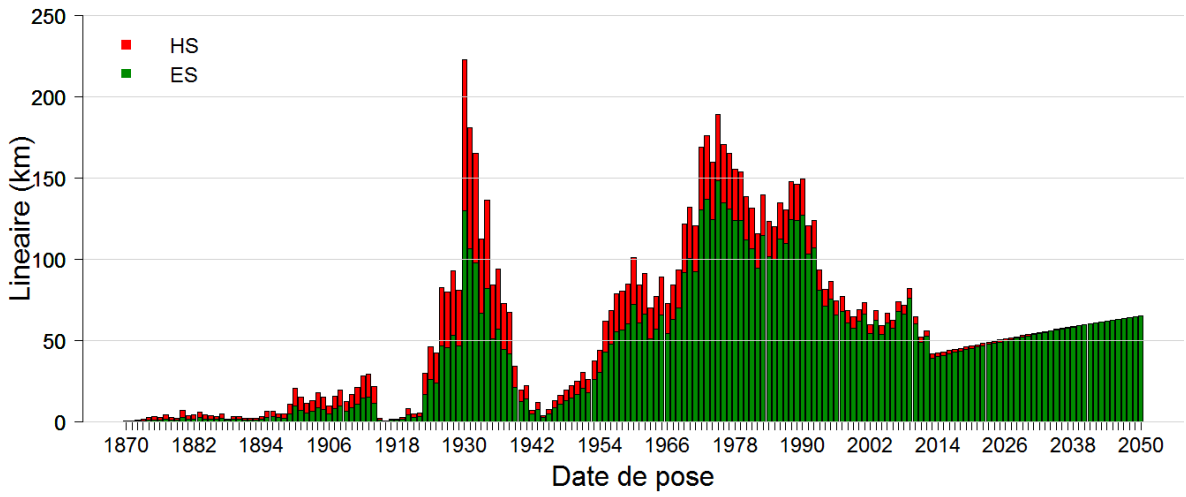


Figure 12 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2050, photographie de la situation en 2050.

IV.1 Sortie I2R

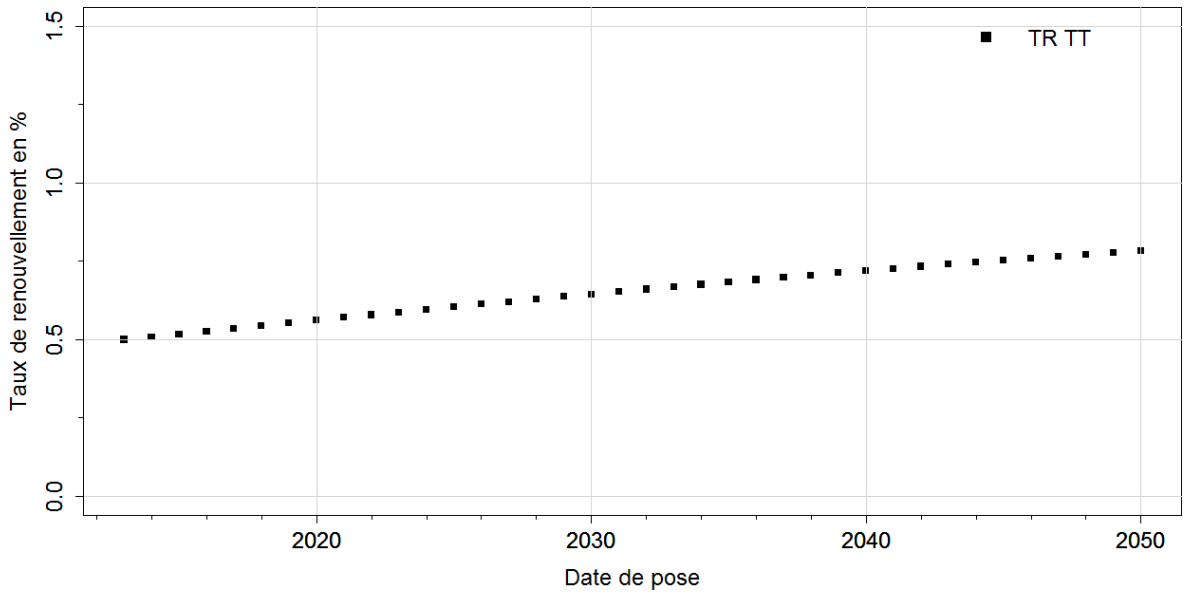


Figure 13 : Prévision des taux de renouvellement futurs de 2013 jusqu'en 2050 pour les tronçons. TT : tout le réseau

IV.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

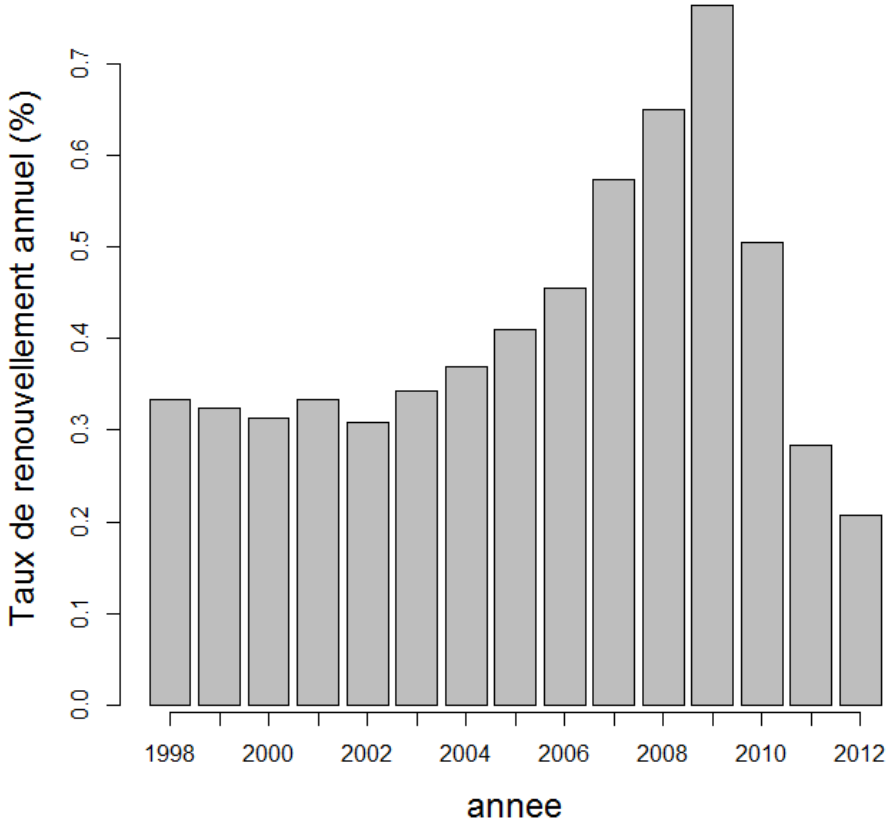


Figure 14 : Taux de renouvellement passé de 2001 à 2013 pour les tronçon calculés à partir du SIG.

IV.1 Sortie I3R

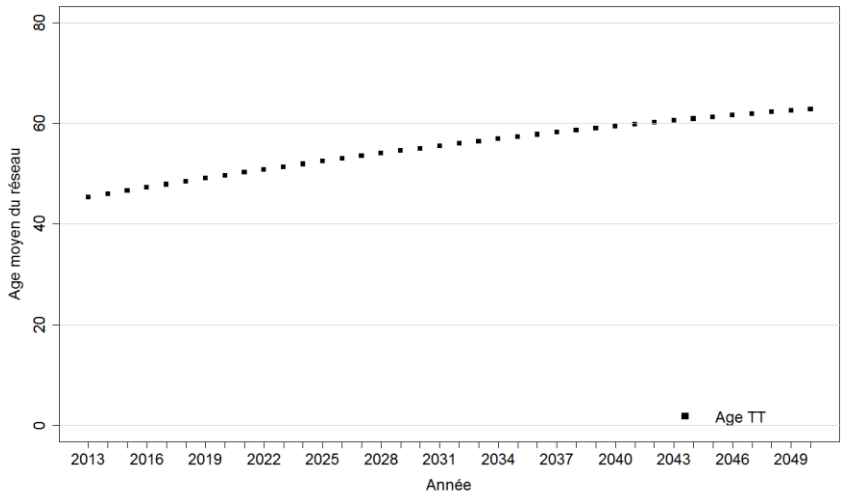


Figure 15 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2013 jusqu'en 2050 au SEDIF, scénario « statu quo».

V Calcul de l'indicateur I1F

V.1 Entrée

Nom de la strate	Diamètre médian de la strate (en linéaire)	Coûts des travaux sans coordination (€/m)
Toute strate	180 mm	530

V.2 Sortie

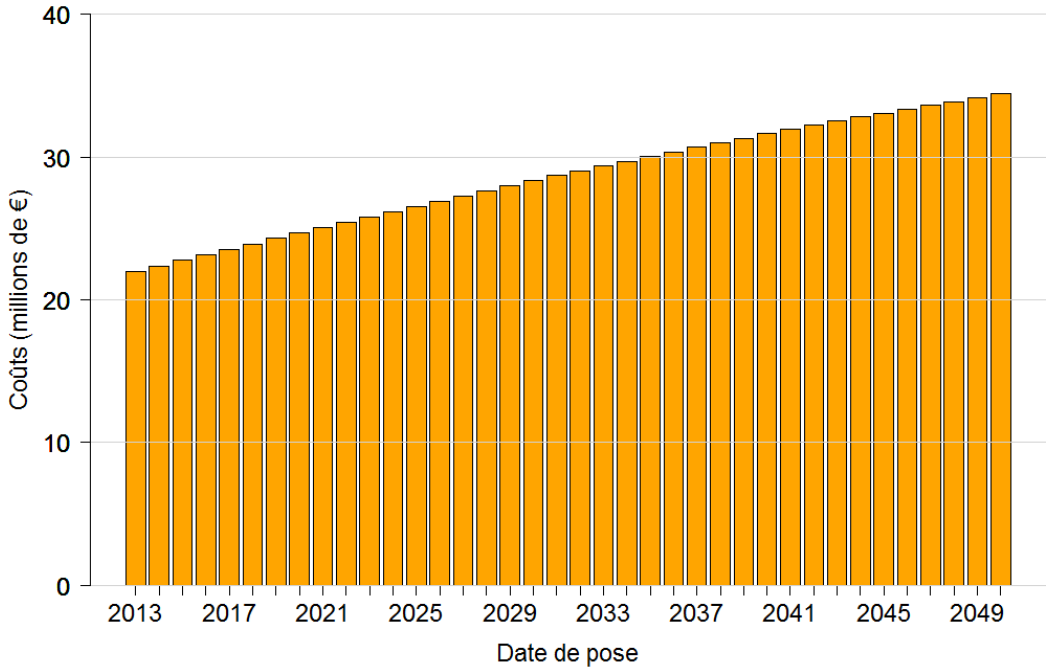


Figure 16 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2013 et 2050, scénario « statu quo».

VI Calcul de l'indicateur I1P

VI.1 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 6

Covariable	Nb de défaillances cumulées passée jusqu'à t- (j)	Age (t)	Longueur (Z_1)	Diamètre (Z_2)	Reha2(Z_3)	Pression (Z_4)	Autre matériau (Z_5)	Fonte grise (Z_6)
Unité		Siècle	m	mm		m		

Tableau 1 : Covariables (et leurs unités) employés dans le modèle LEYP

Paramètres / Nom strate	$\propto$	δ	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
Toute strate	2.9	1.57	-1.55	0.39	-0.0028	0.93	0.04	-0.75	-0.25

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle LEYP

VI.1 Entrée en tronçon

- Cf. Figure 7
- Cf. Tableau 1 & Tableau 2

VI.2 Sorties en tronçons

- Effectif :

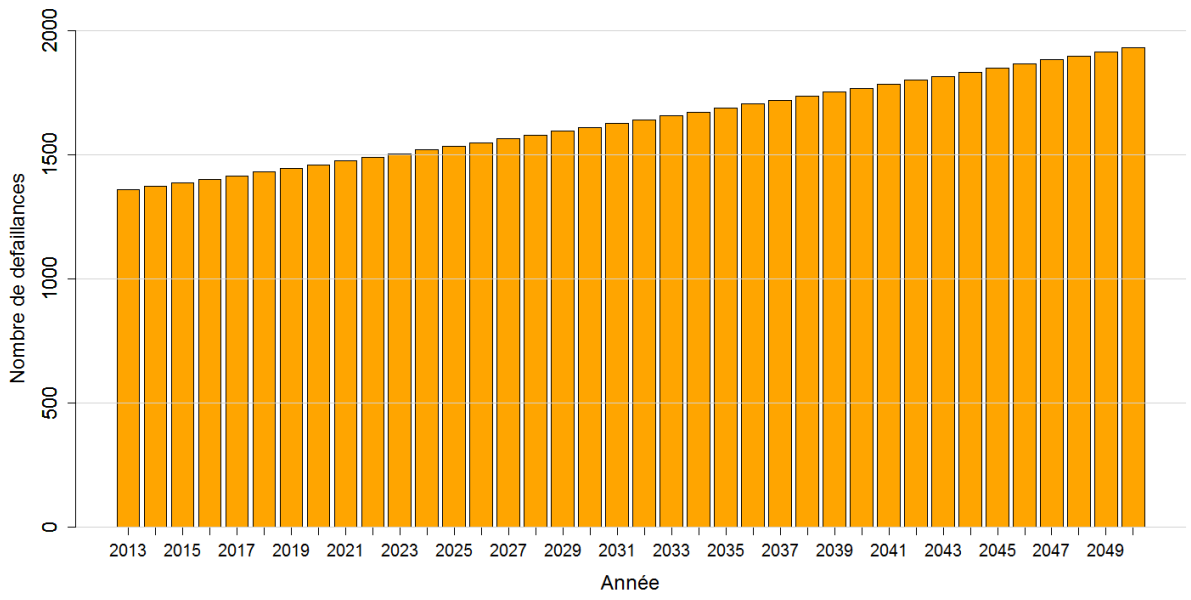


Figure 17 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2013 et 2050, scénario « statu quo » . Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif

VI.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

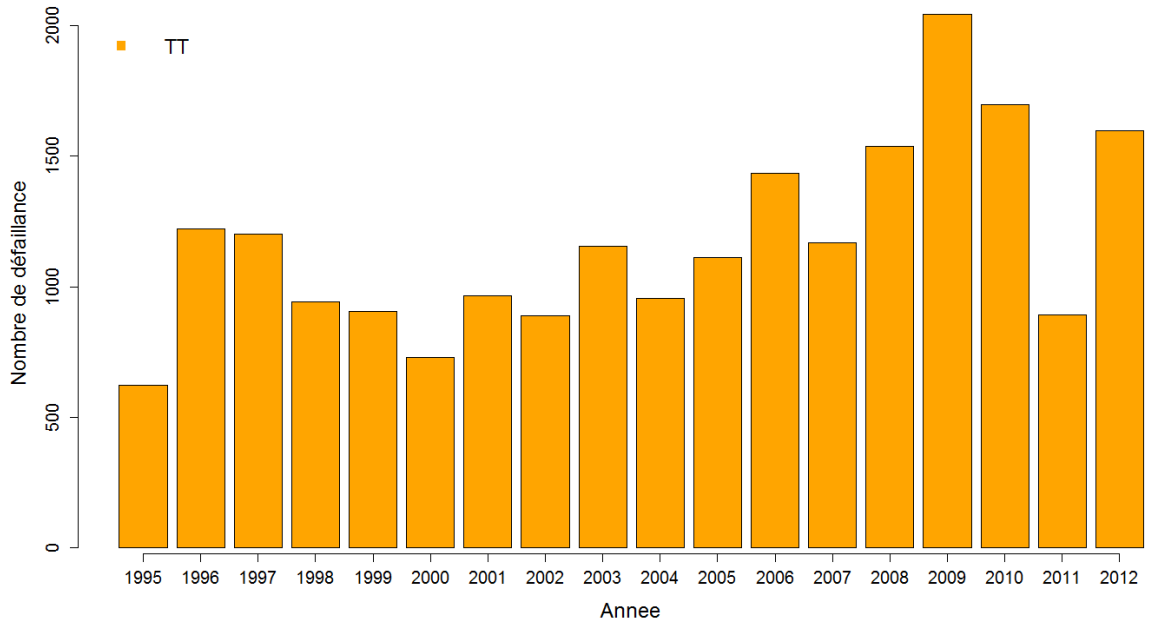
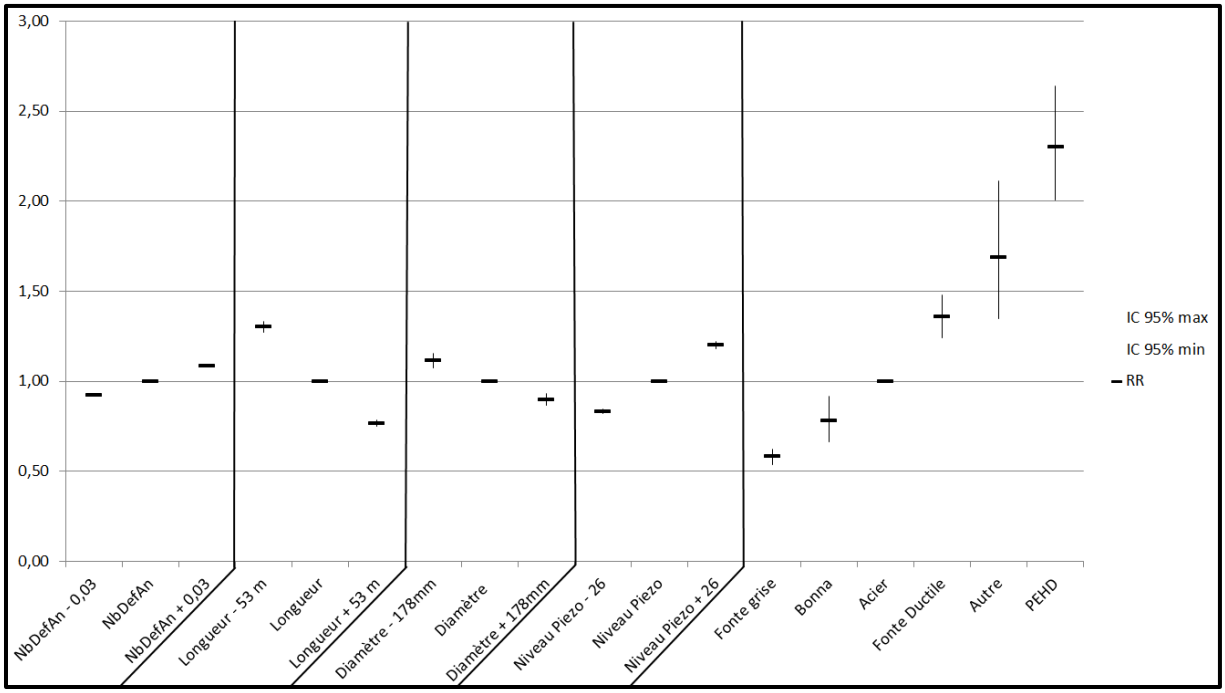


Figure 18 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2012

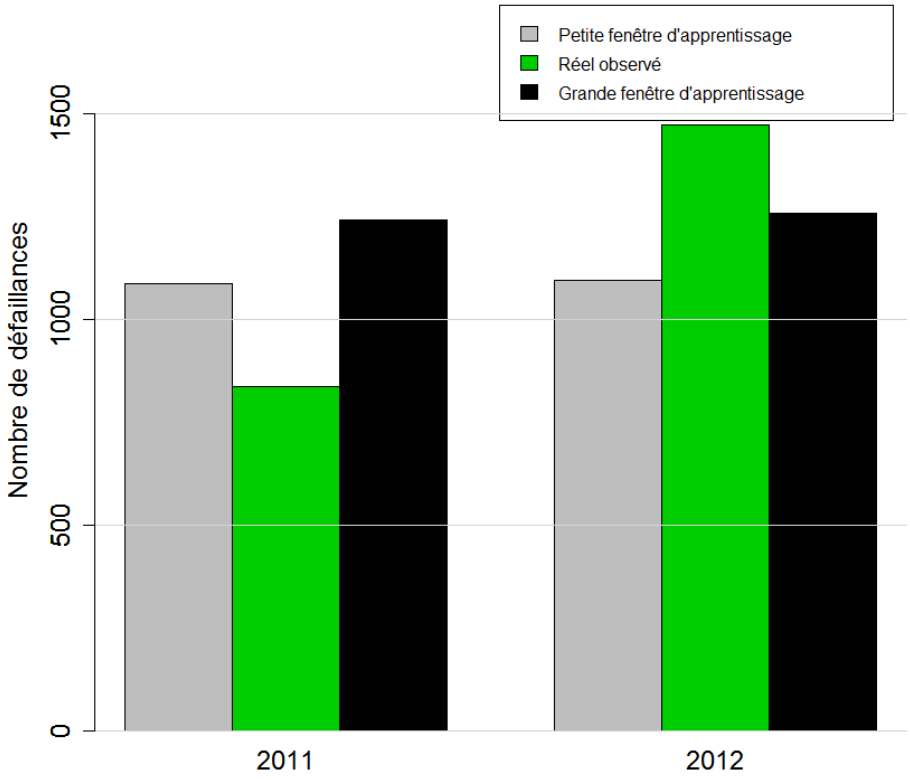
VI.1 Modèle WeiCo



Casses PF

Z[i]	theta	ref	std	chi2	pval
Alpha	3.1265E0	0.0000E0	8.6845E-2	1.4069E4	0.0000
Delta	1.0000E0	1.0000E0	NaN	NaN	NaN
Zeta0	-3.0000E1	-3.0000E1	NaN	NaN	NaN
Zeta1	0.0000E0	0.0000E0	NaN	NaN	NaN
Beta0	-2.2615E0	0.0000E0	7.4525E-2	9.2085E2	0.0000
LNL	3.6254E-1	0.0000E0	5.1335E-3	4.9874E3	0.0000
NIV	3.1989E-3	0.0000E0	2.1855E-4	2.1423E2	0.0000
DIA	-1.1944E-3	0.0000E0	8.6541E-5	1.9048E2	0.0000
MAT[Bonna]	0.0000E0	0.0000E0	NaN	NaN	NaN
MAT[Fonte ductile]	-1.0505E0	0.0000E0	5.9707E-2	3.0953E2	0.0000
MAT[PEHD]	-1.2176E0	0.0000E0	7.4414E-2	2.6774E2	0.0000
MAT[Acier]	-4.0409E-1	0.0000E0	6.2153E-2	4.2271E1	0.0000
MAT[Autre]	-6.2339E-1	0.0000E0	1.0701E-1	3.3937E1	0.0000
MAT[Fonte grise]	-2.9132E-1	0.0000E0	5.8444E-2	2.4846E1	0.0000

VI.1 Validation du nombre de défaillances



Scénario 3 (code E)

On arrête de renouveler

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7
Stratifié ?	Non			Diamètres	NDOA	Matériaux	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[1995; 2004]	[1995; 2012]					
Statu quo ?	Oui		On arrête de renouveler	Oui			On arrête de renouveler

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

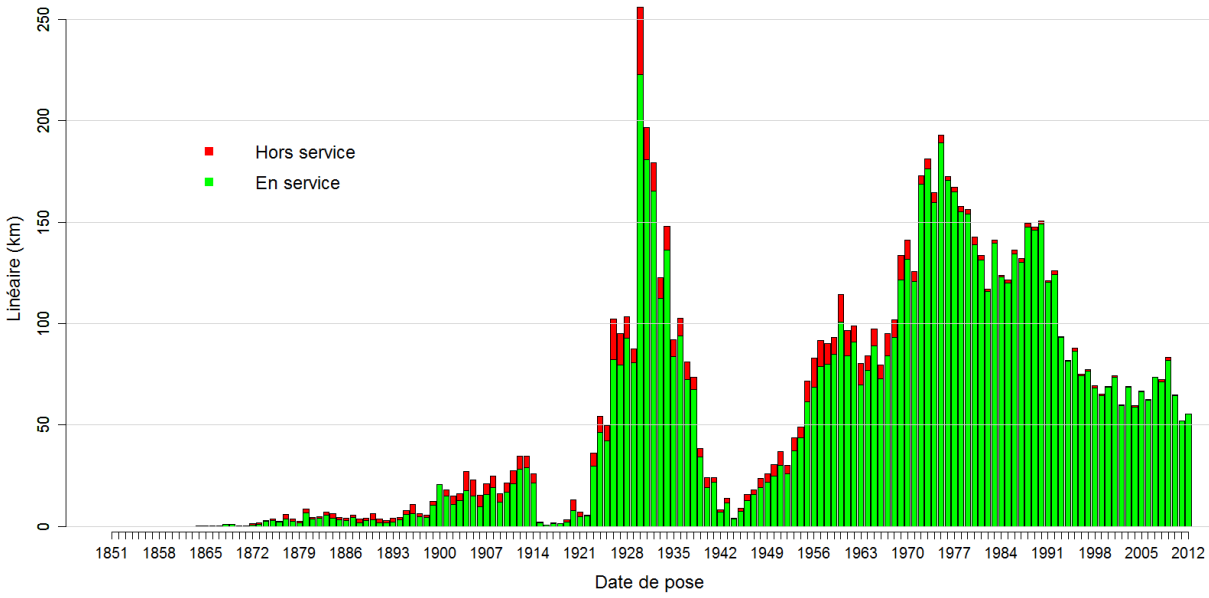


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [1995 ; 2012])

I.2 Sortie en linéaire

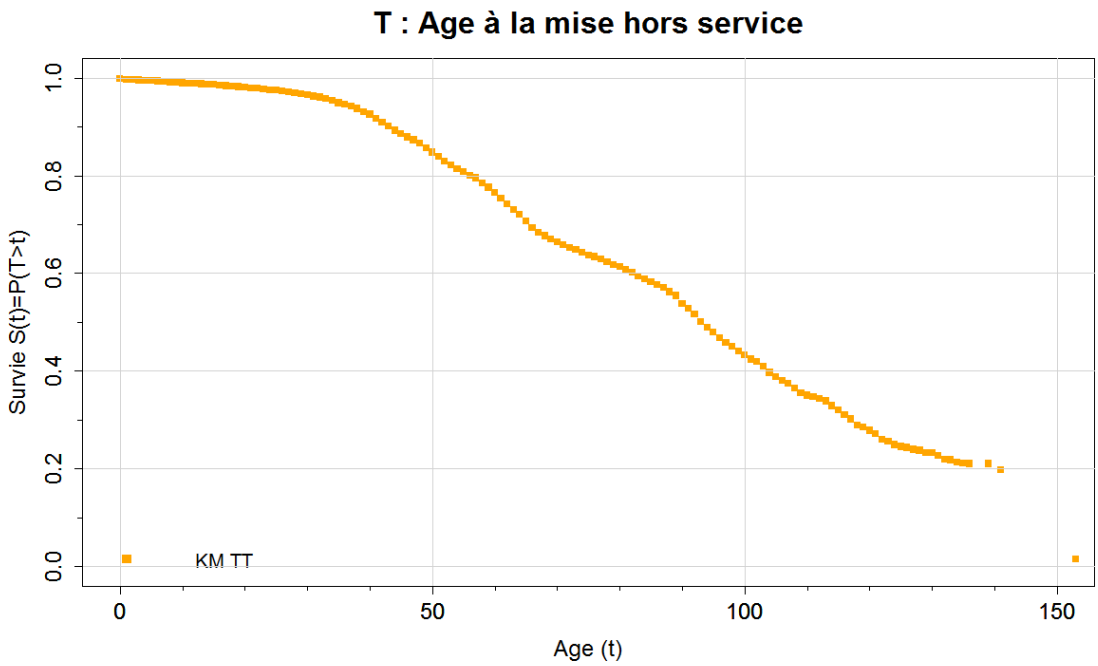


Figure 2 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons

II Scénario 3 (code E)

- Groupe de tronçons : transport normal + distribution (moins Brêt et moins les moins de 6m)
- Photographie au 31 /12 /2012
- Pas de stratification
- On laisse vieillir le réseau
- Taux de travaux coordonnés en général : 80%. Taux des travaux non coordonnées : 20%.

III Construction scénario prospectif

III.1 Survie prospective en linéaire et en effectif

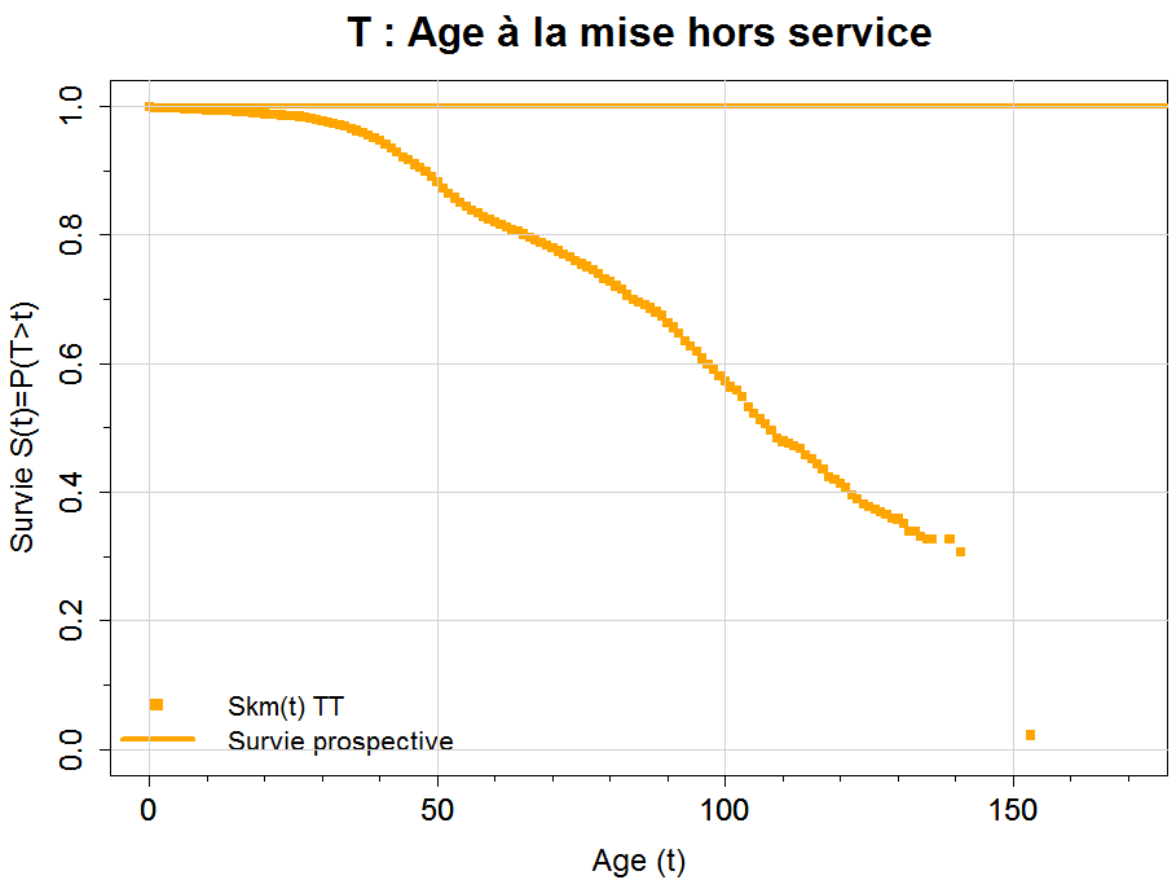


Figure 3 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait)

IV Calcul de l'indicateur I3R

Pas de renouvellement, donc pas d'indicateur I1R, I2R et I1F

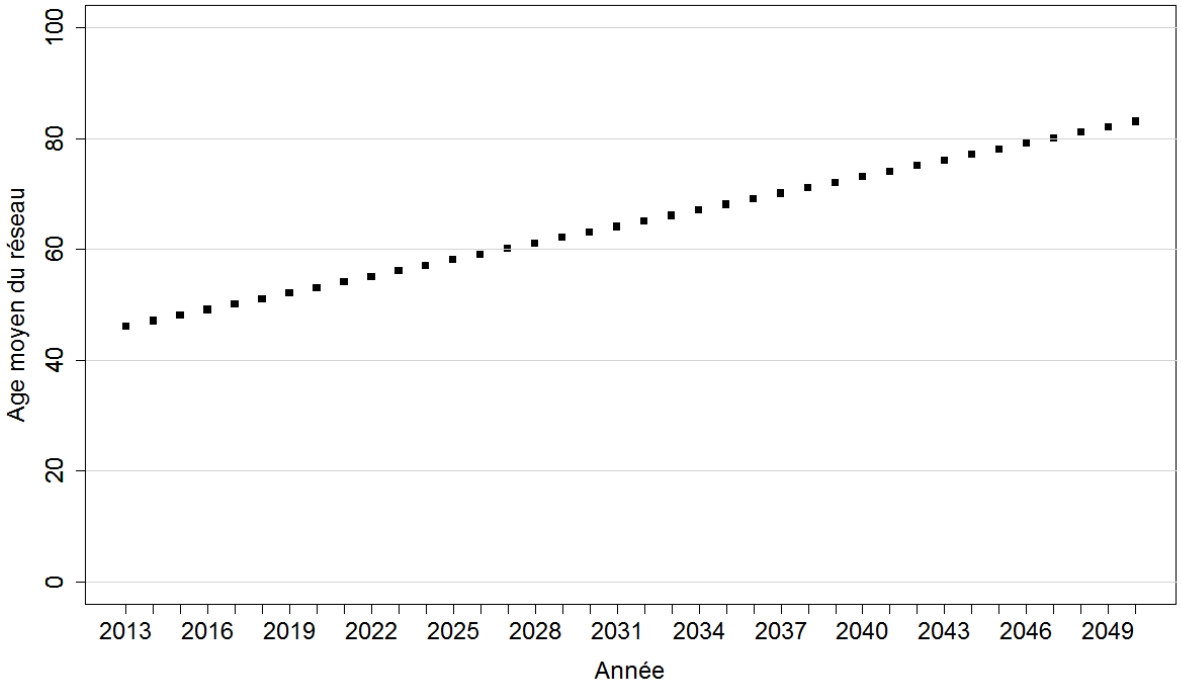


Figure 4 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2013 jusqu'en 2050 au SEDIF, scénario « on ne renouvelle plus ».

V Calcul de l'indicateur I1P

V.1 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 3

Covariable	Nb de défaillances cumulées passée jusqu'à t- (j)	Age (t)	Longueur (Z_1)	Diamètre (Z_2)	Reha2(Z_3)	Pression (Z_4)	Autre matériau (Z_5)	Fonte grise (Z_6)
Unité		Siècle	m	mm		m		

Tableau 1 : Covariables (et leurs unités) employés dans le modèle LEYP

Paramètres / Nom strate	$\propto$	δ	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
Toute strate	2.9	1.57	-1.55	0.39	-0.0028	0.93	0.04	-0.75	-0.25

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle LEYP

V.1 Entrée en tronçon

- Cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**
- Cf. Tableau 1 & Tableau 2

V.2 Sorties en tronçons

- Effectif :

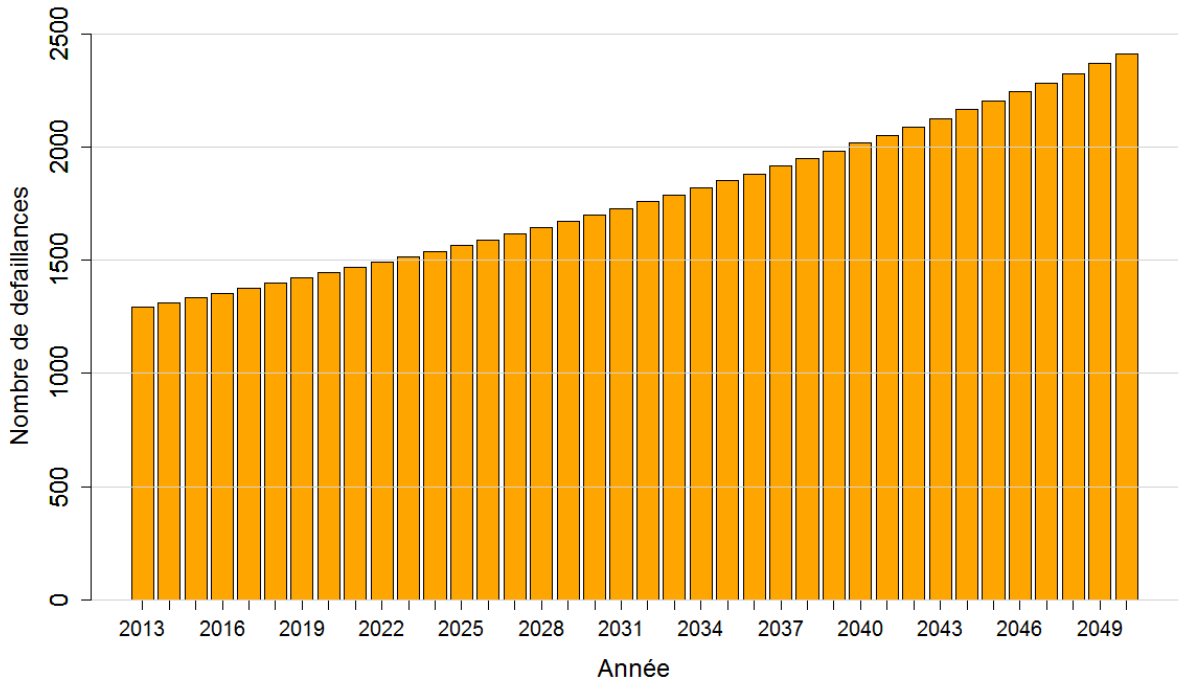


Figure 5 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2013 et 2050, scénario « on ne renouvelle plus ».

V.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

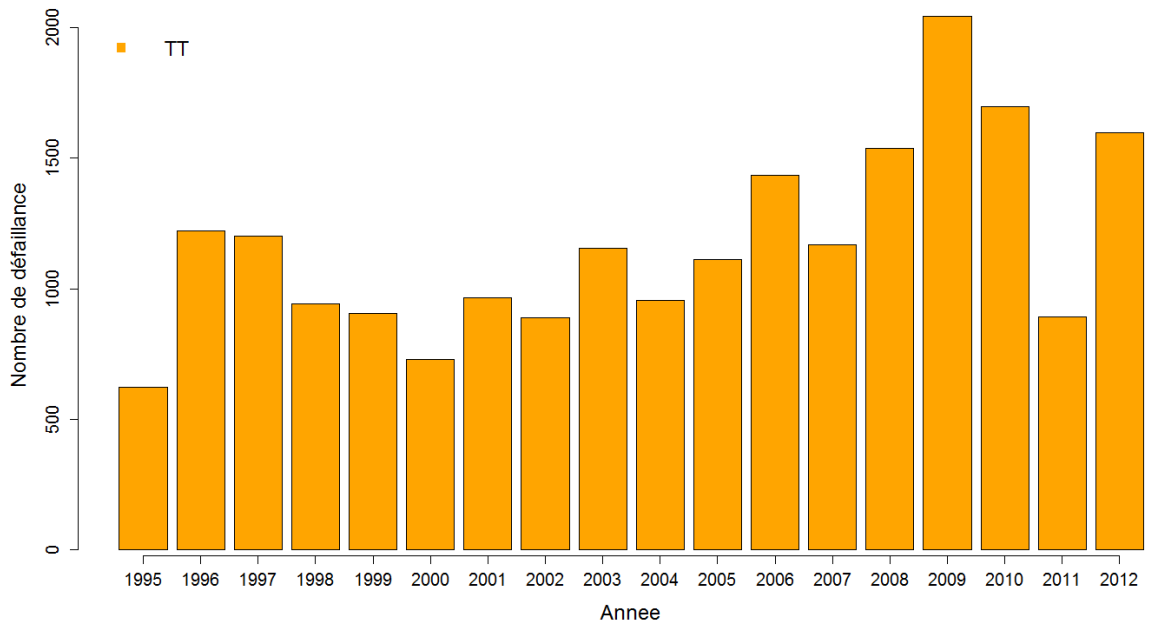


Figure 6 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2012

Simulation 4 (code B)

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7
Stratifié ?	Non			Diamètres	NDOA	Matériaux	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[1995; 2004]	[1995; 2012]					
Statu quo ?	Oui		On arrête de renouveler	Oui			On arrête de renouveler

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

⇨ Donnée

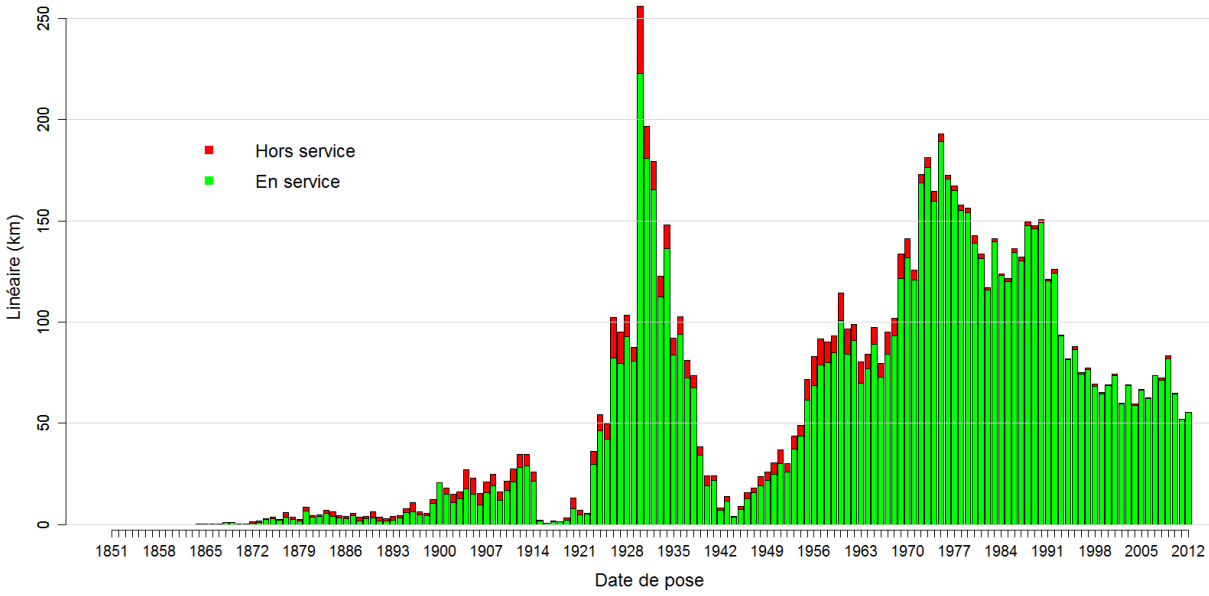


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [1995 ; 2012])

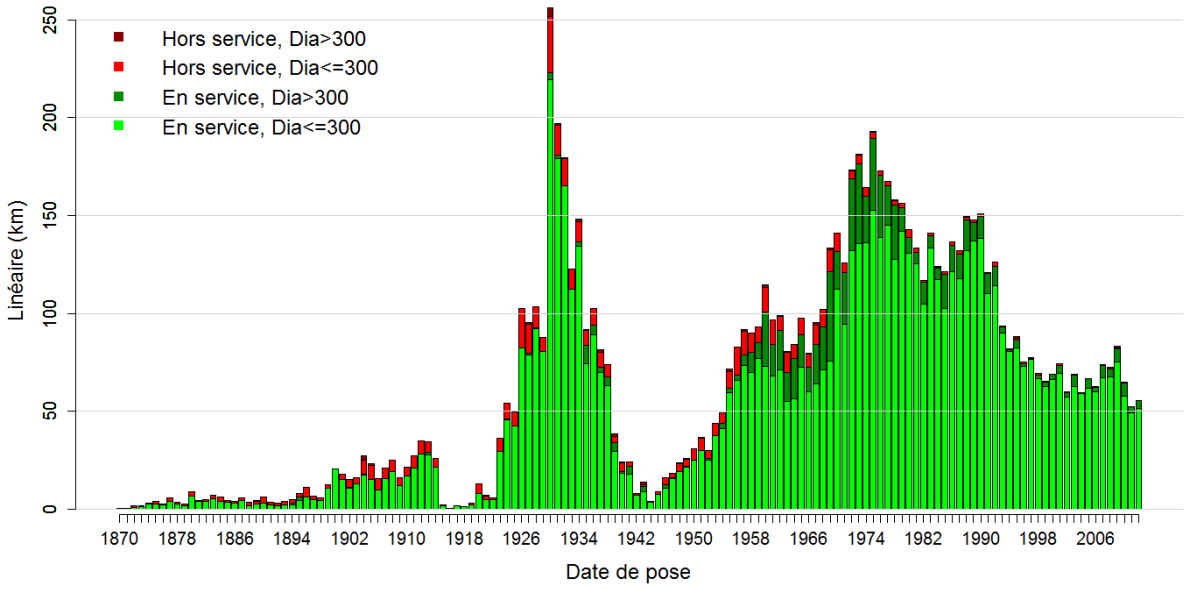


Figure 2 : Linéaire en service en 31/12/2012 au SEDIF en fonction des dates de pose, différencié selon deux classes de diamètre et selon le statut.

Figure 3 : Proportion du linéaire ES en fonction de deux classes de diamètre

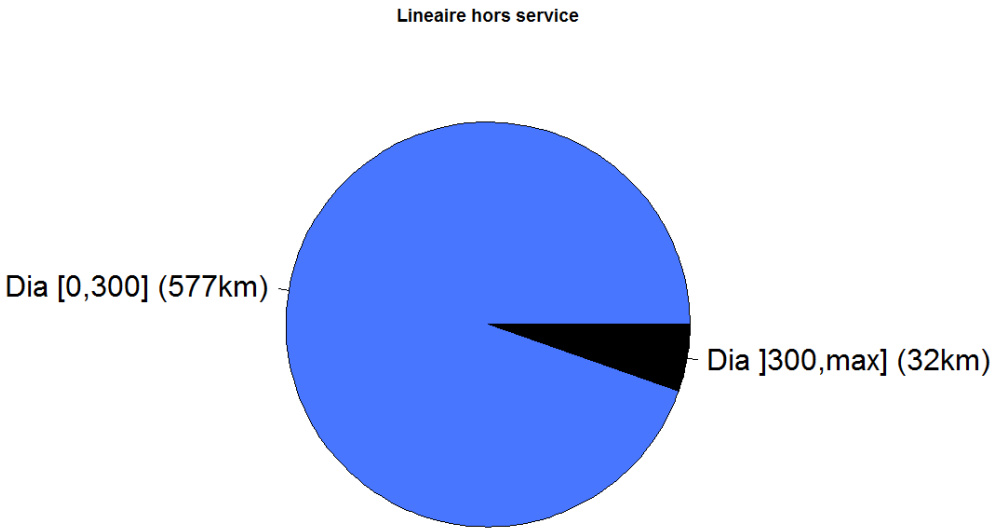


Figure 4 : Proportion du linéaire HS en fonction de deux classes de diamètre

I.2 Sortie en linéaire

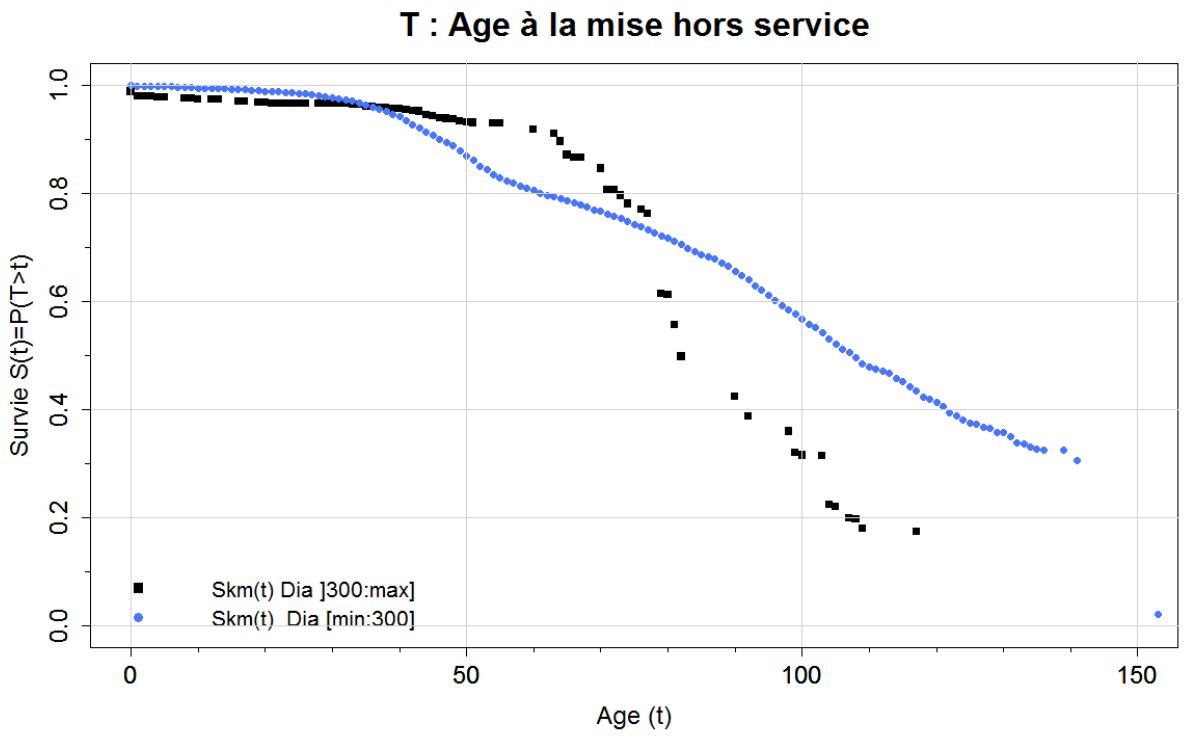
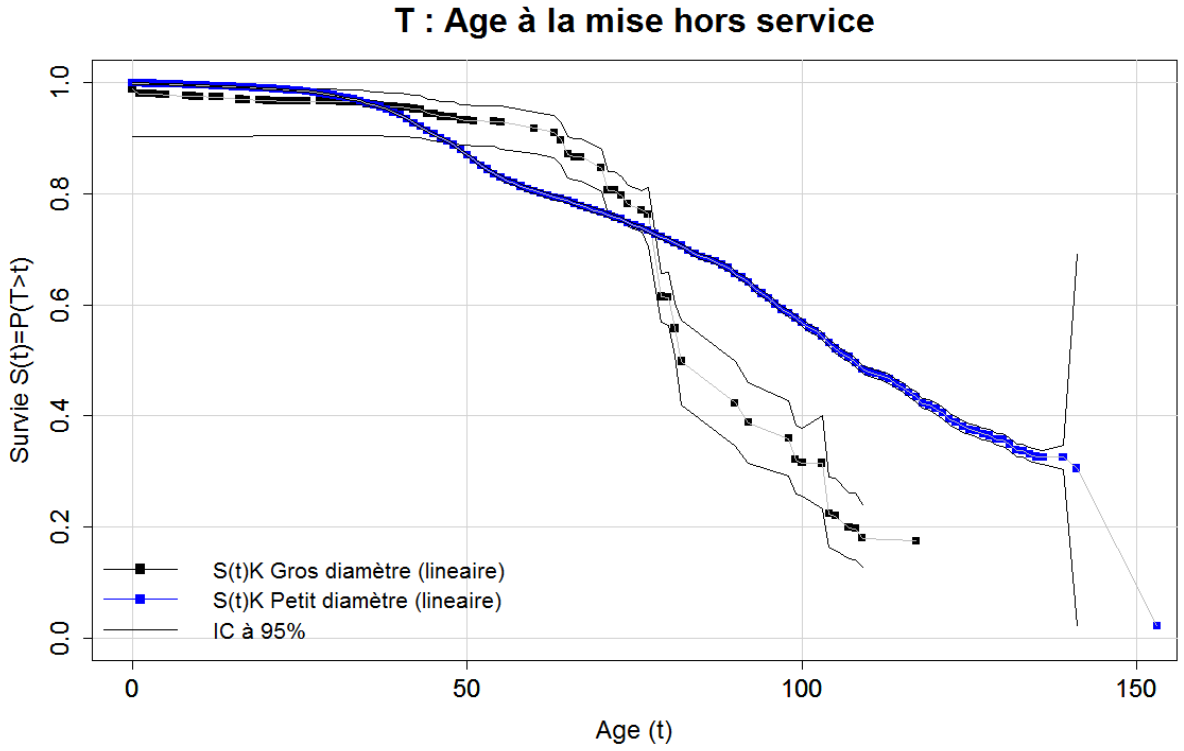


Figure 5 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en linéaire tronçons partitionnés par le diamètre



I.1 Entrée en effectif

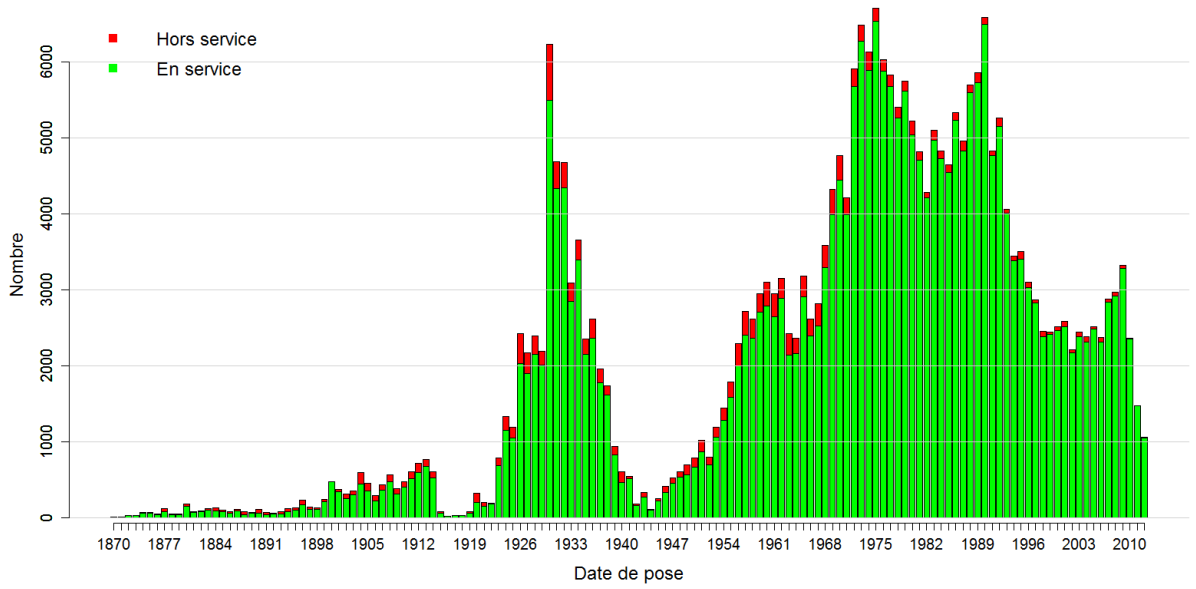


Figure 6 : Histogramme du nombre de tronçons En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [1995 ; 2012])

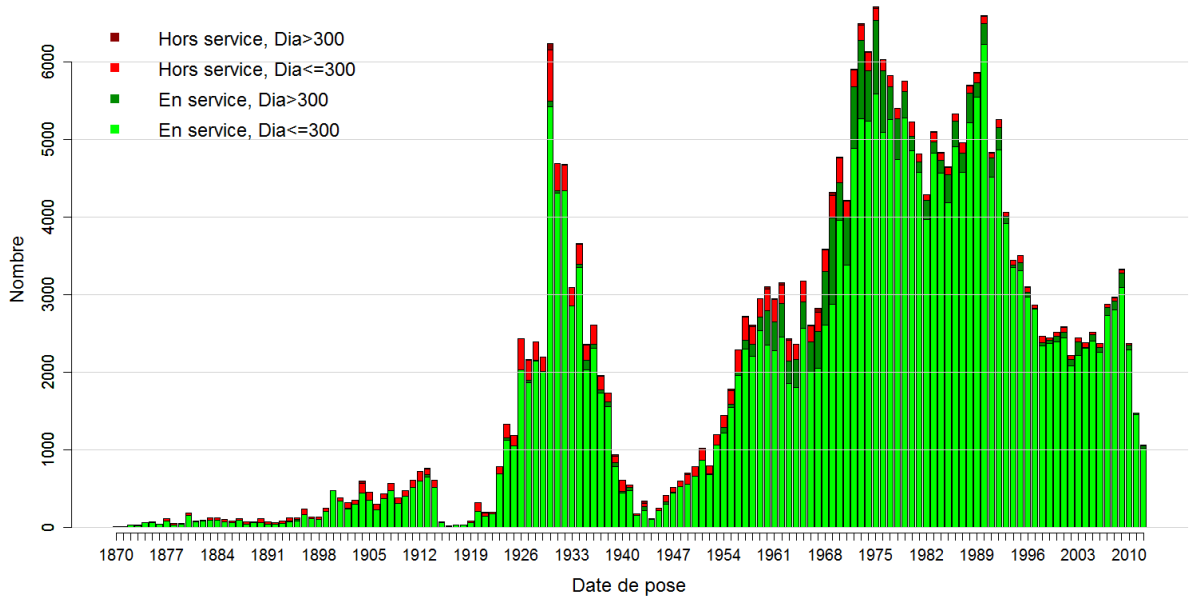


Figure 7 : Nombre de tronçons en service en 31/12/2012 au SEDIF en fonction des dates de pose, différencié selon deux classes de diamètre et selon le statut.

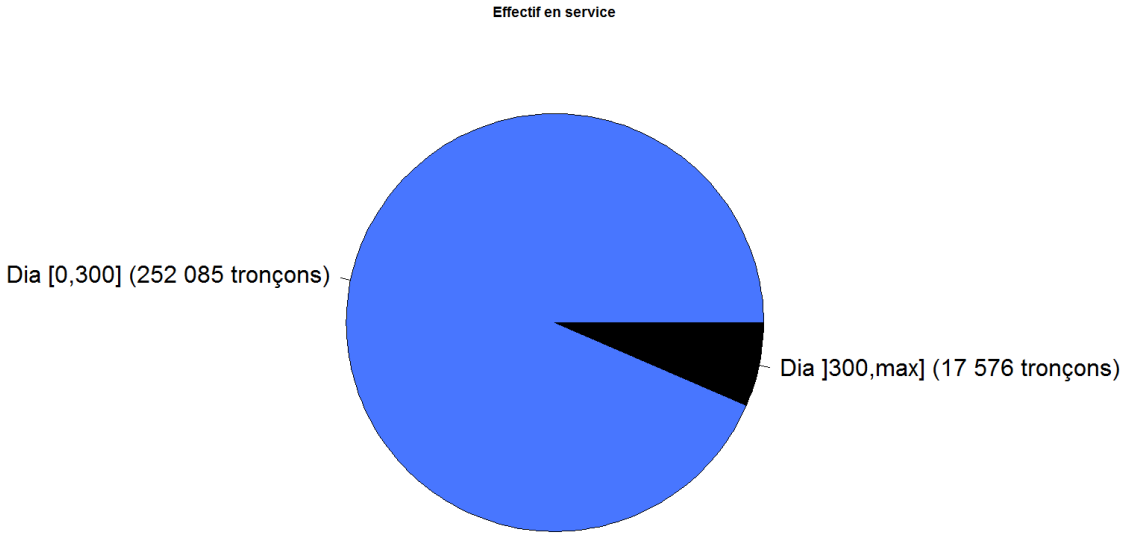


Figure 8 : Proportion du nombre de tronçon ES en fonction de deux classes de diamètre

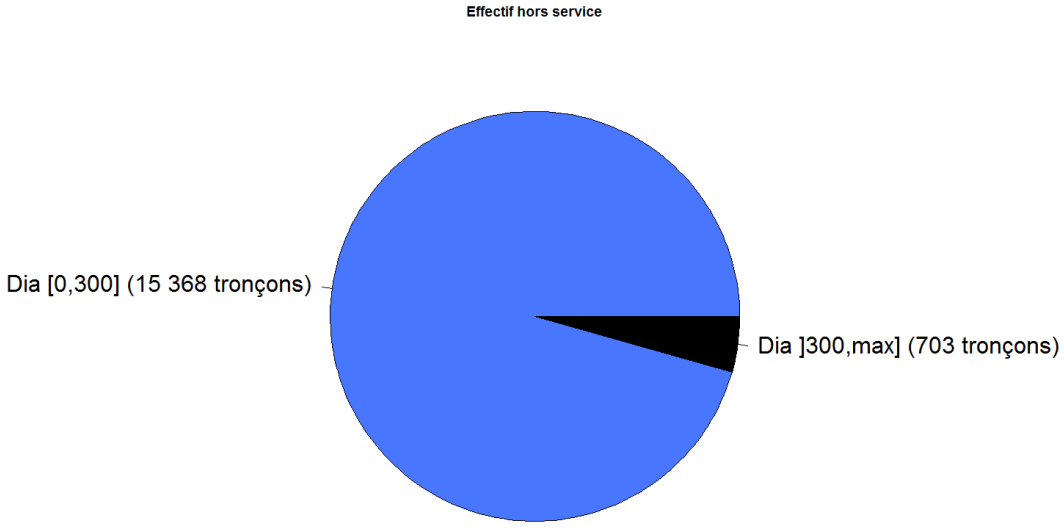


Figure 9 : Proportion du nombre de tronçon HS en fonction de deux classes de diamètre

I.2 Sortie en effectif

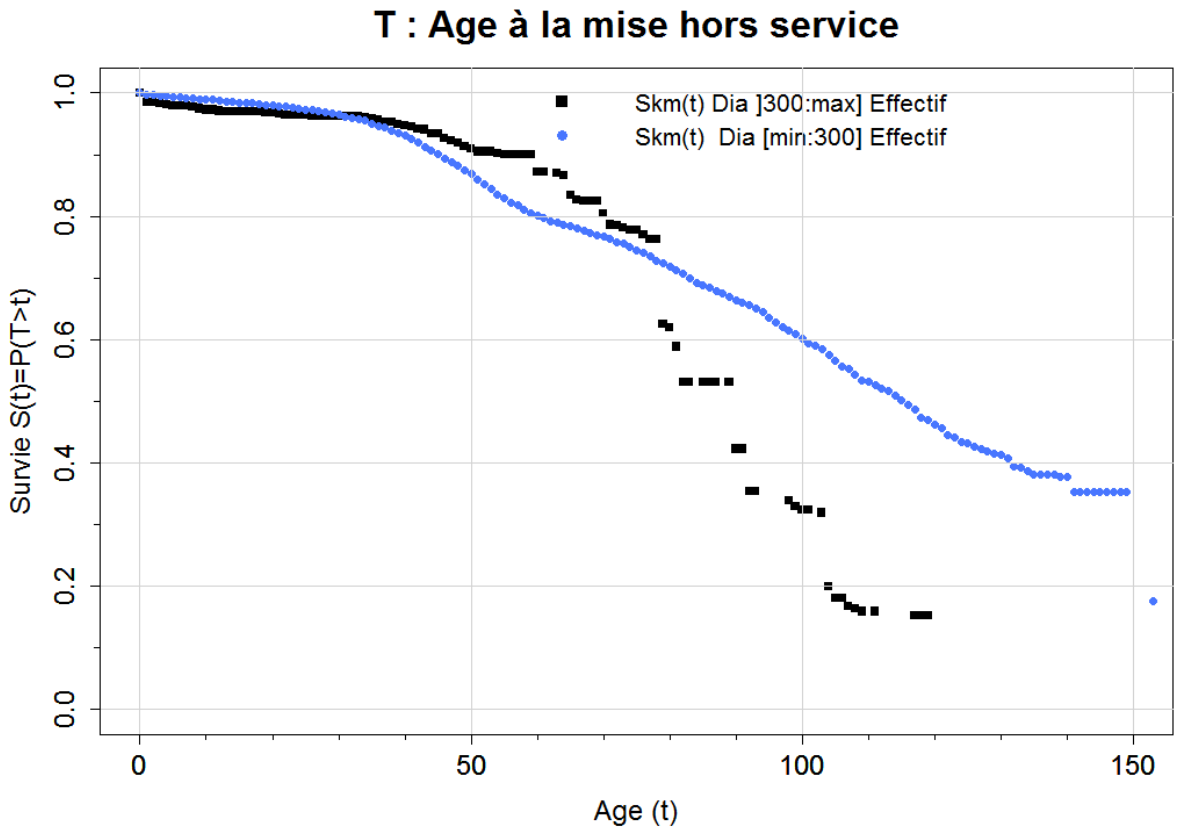


Figure 10 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en nombre de tronçons partitionnés par le diamètre

II Scénario 4 (code B)

- scénario prospectif « Statu quo » : « A l' avenir la distribution des âges à la mise hors service des canalisations sera strictement identique à celle de Lausanne par le passé ».

- Photographe des données au 31/12/2012
- stratification selon le diamètre
    - Diamètre [min, 300]
    -]300 ; max [
- Courbes de survie prospectives les même pour tous les matériaux que par le passé
- Date fin simulation : 2050

III Construction scénario prospectif

III.1 Entrée en linéaire

Cf. : Figure 5

III.2 Sortie en linéaire

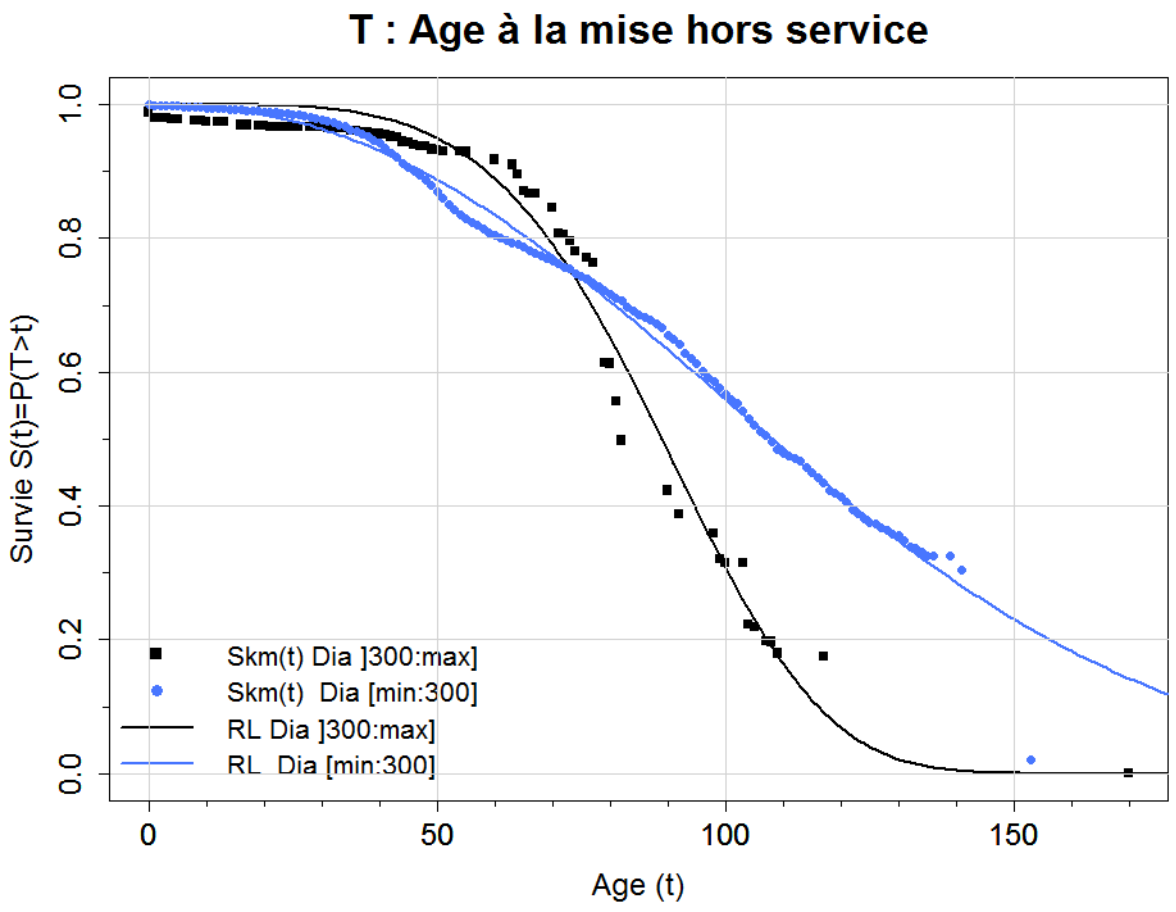


Figure 11 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait) par classe de diamètres

III.1 Entrée en effectif

Cf. : Figure 10

III.2 Sortie en effectif

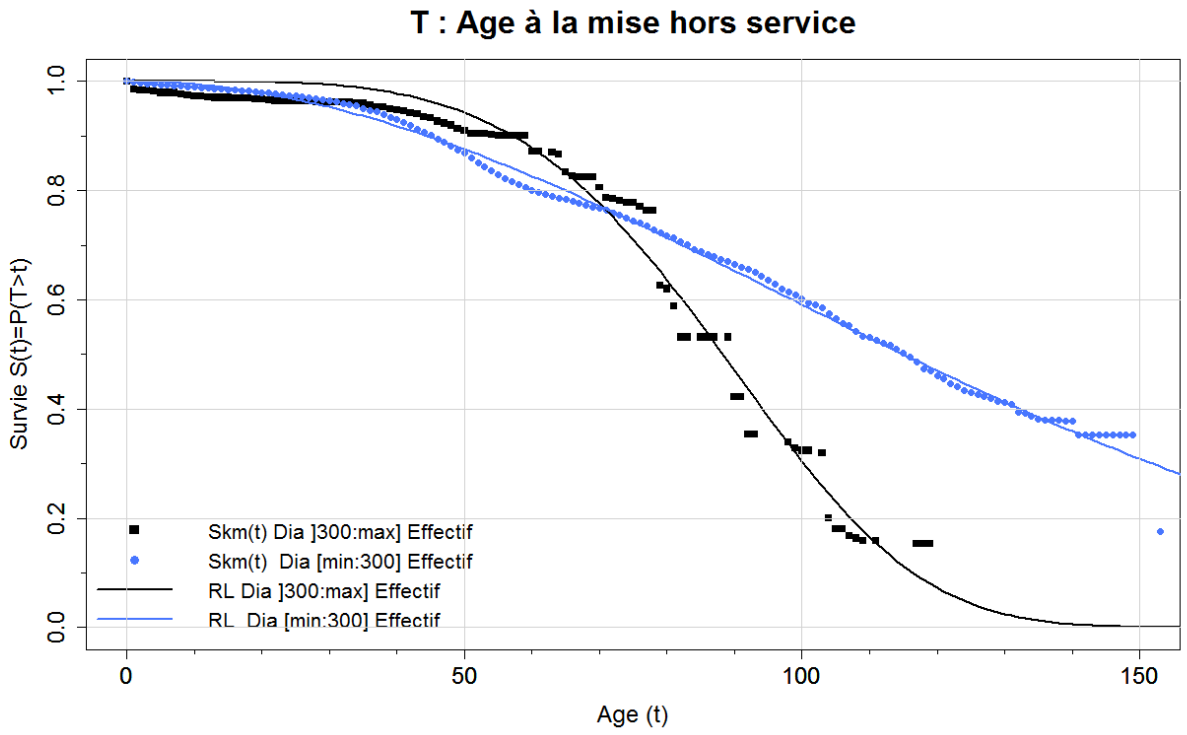


Figure 12 : Courbes de survie prospective en effectif (trait) par classe de diamètres

III.3 Comparaison des sorties en linéaire et en effectif

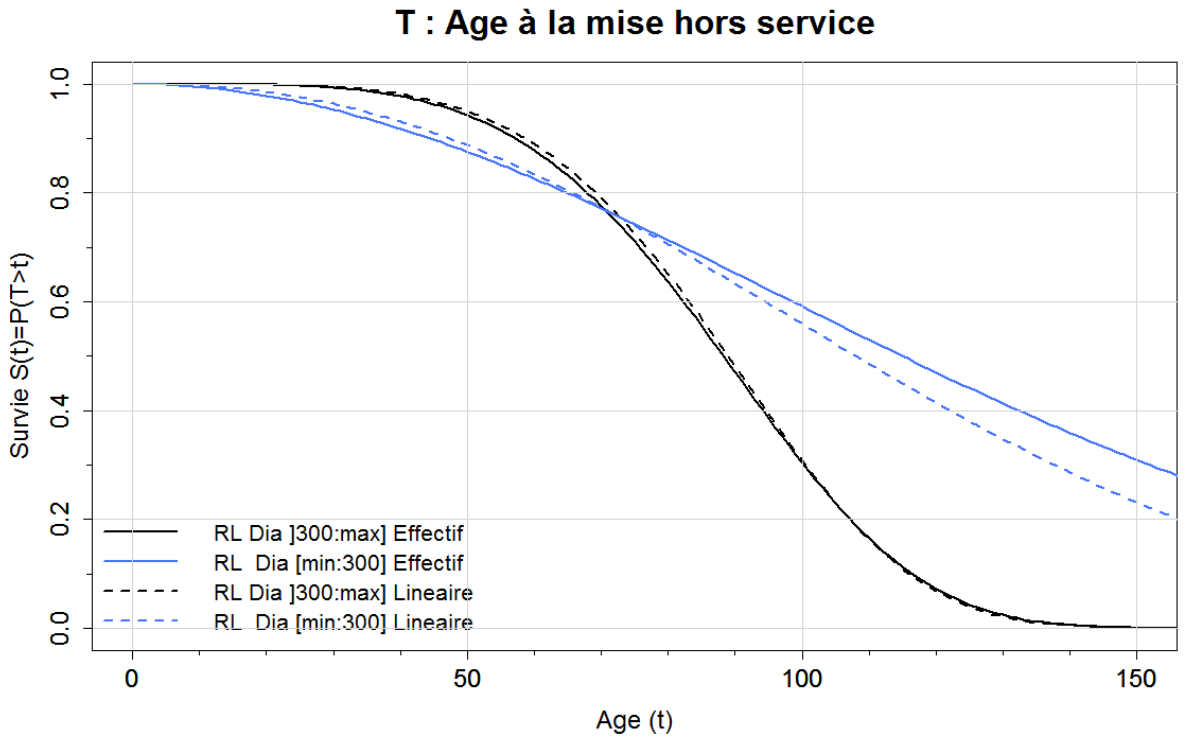


Figure 13 : Comparaison courbes de survie prospective en effectif et en linéaire par classe de diamètres

IV Calcul des indicateurs I1R, I2R et I3R

IV.1 Entrée

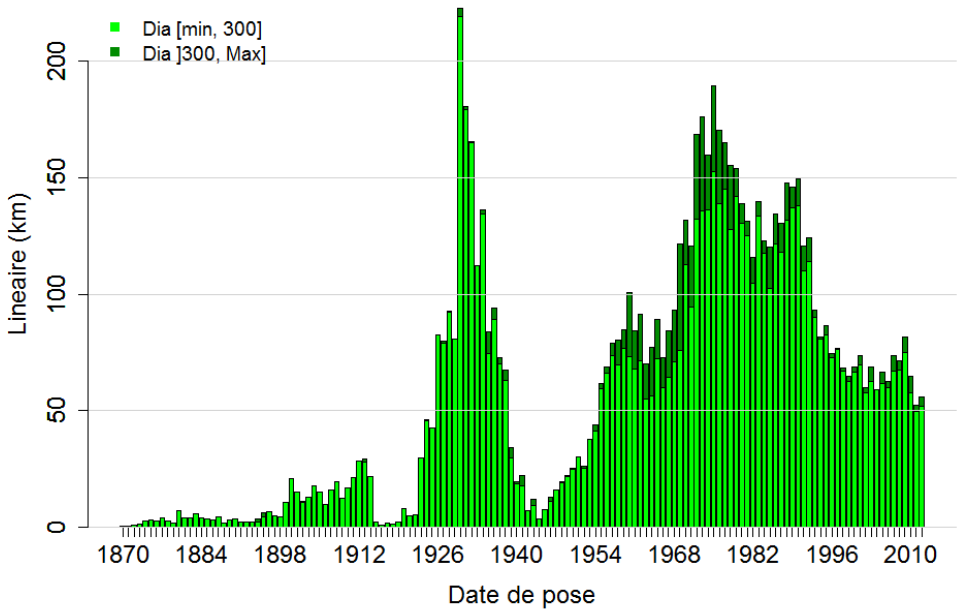


Figure 14 : Linéaire en service en 31/12/2012 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon deux classes de diamètre.

IV.2 Sortie

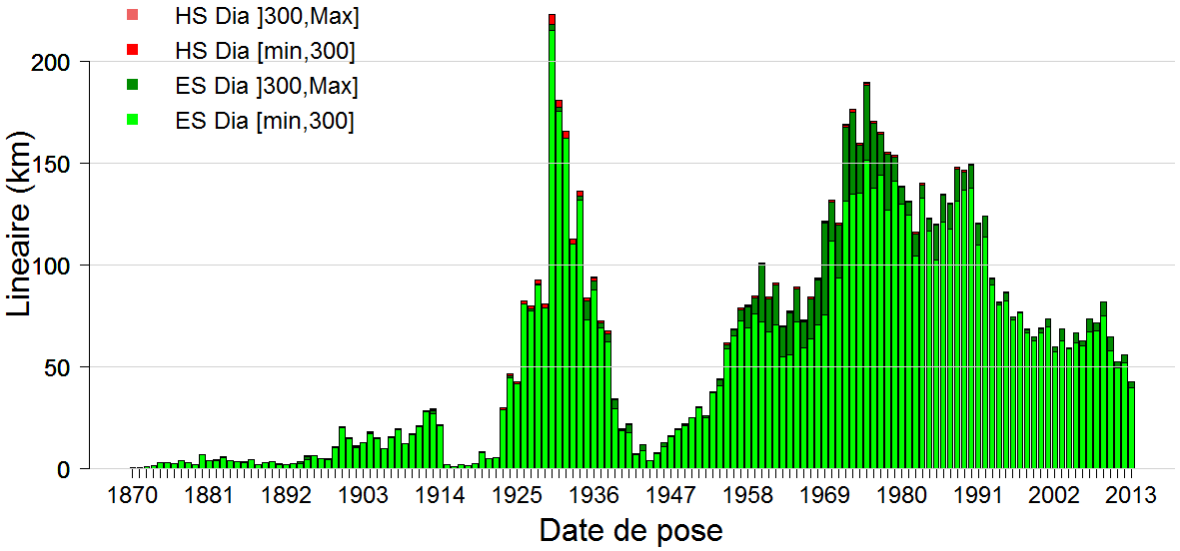


Figure 15 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2013, photographie de la situation en 2013, tronçons partitionnés en deux strates selon le diamètre

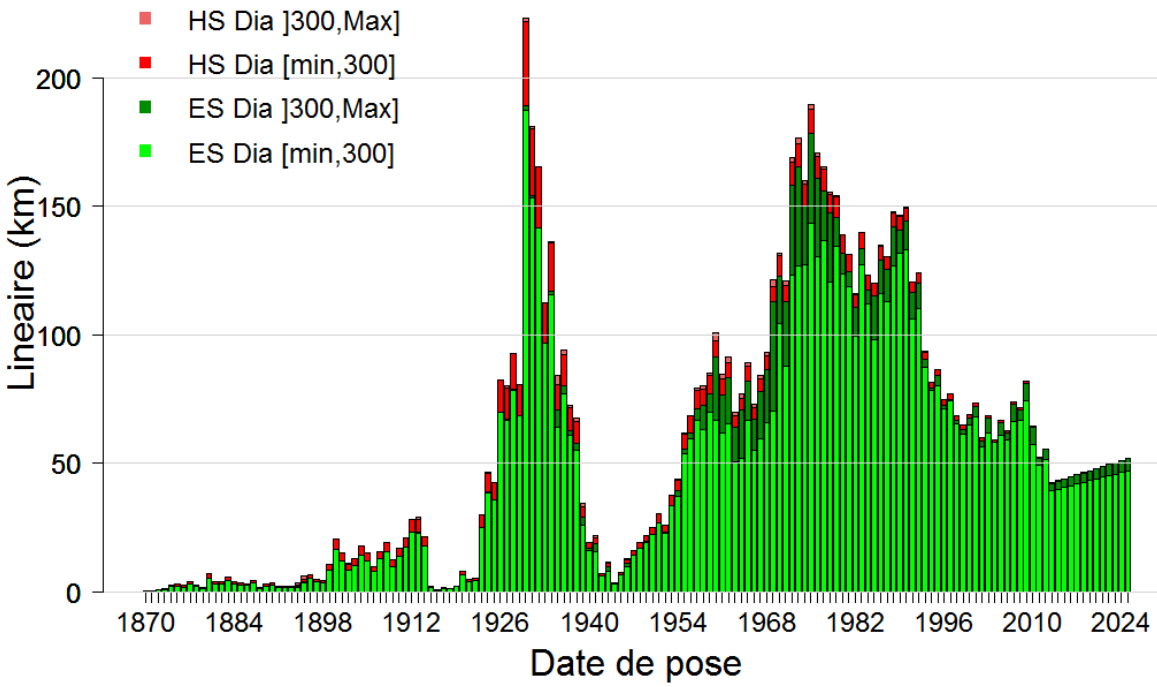


Figure 16 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2025, photographie de la situation en 2025, tronçons partitionnés en deux strates selon le diamètre

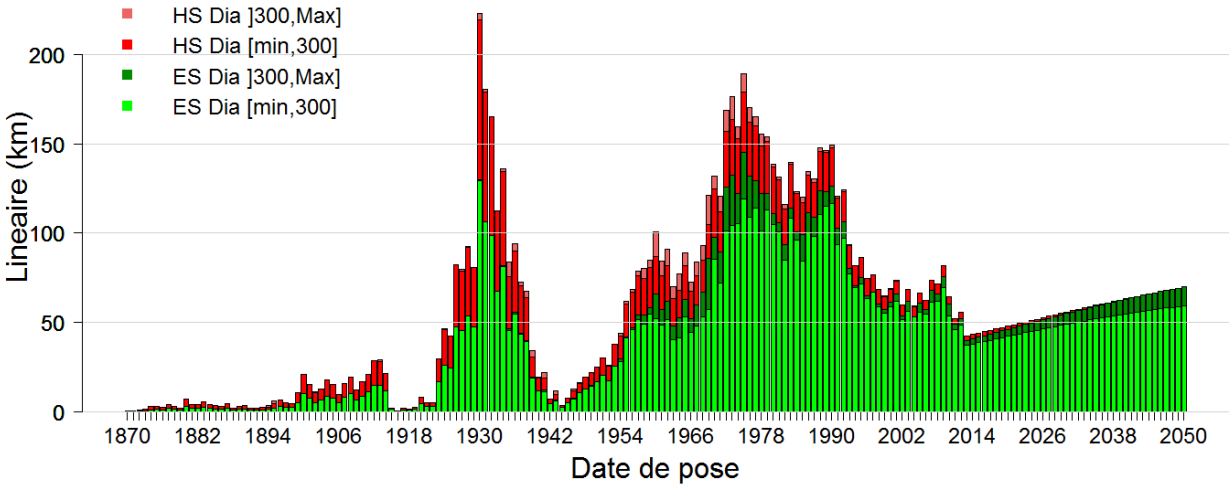


Figure 17 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2050, photographie de la situation en 2050, tronçons partitionnés en deux strates selon le diamètre

IV.1 Sortie I2R

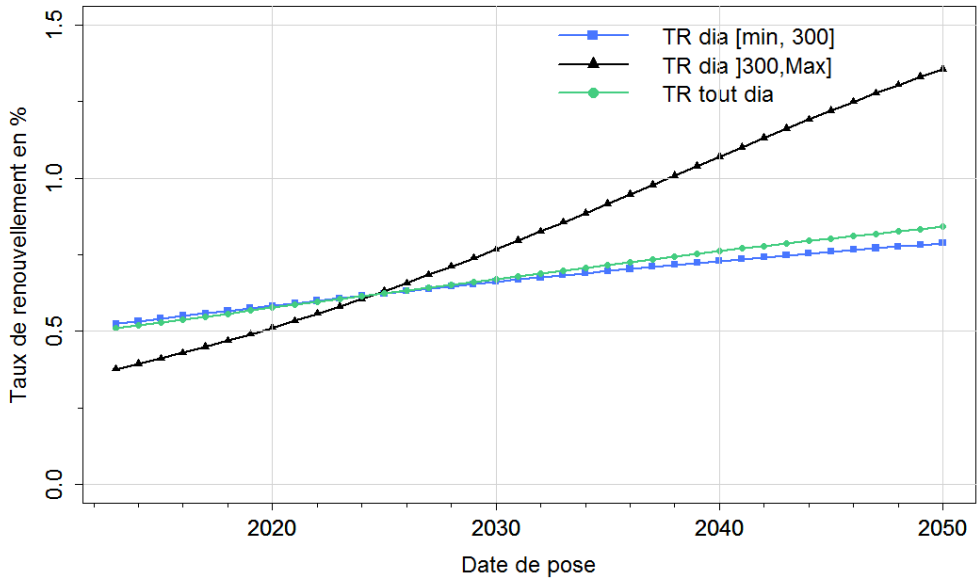


Figure 18 : Prévision des taux de renouvellement futurs de 2013 jusqu'en 2050 pour les tronçons de « gros diamètres », de « petits diamètres » et « tous diamètres », au SEDIF avec le scénario « satu quo : plusieurs courbes DIA »

IV.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

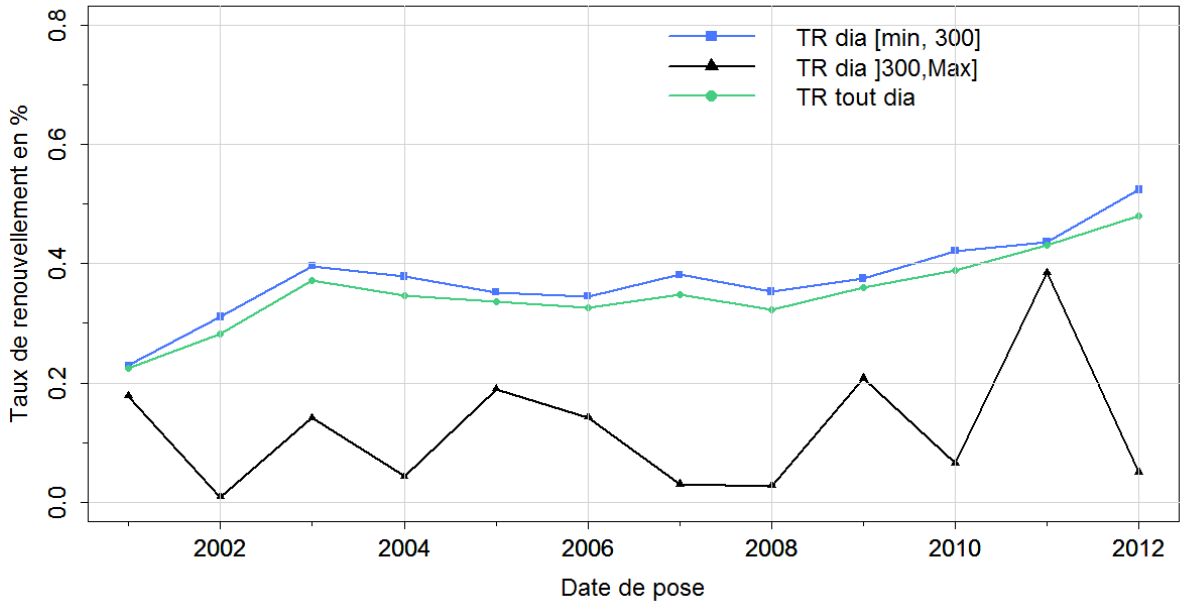


Figure 19 : Taux de renouvellement passé de 2001 à 2012 pour les tronçons de « gros diamètres », de « petits diamètres » et « tous diamètres », au SEDIF

IV.1 Sortie I3R

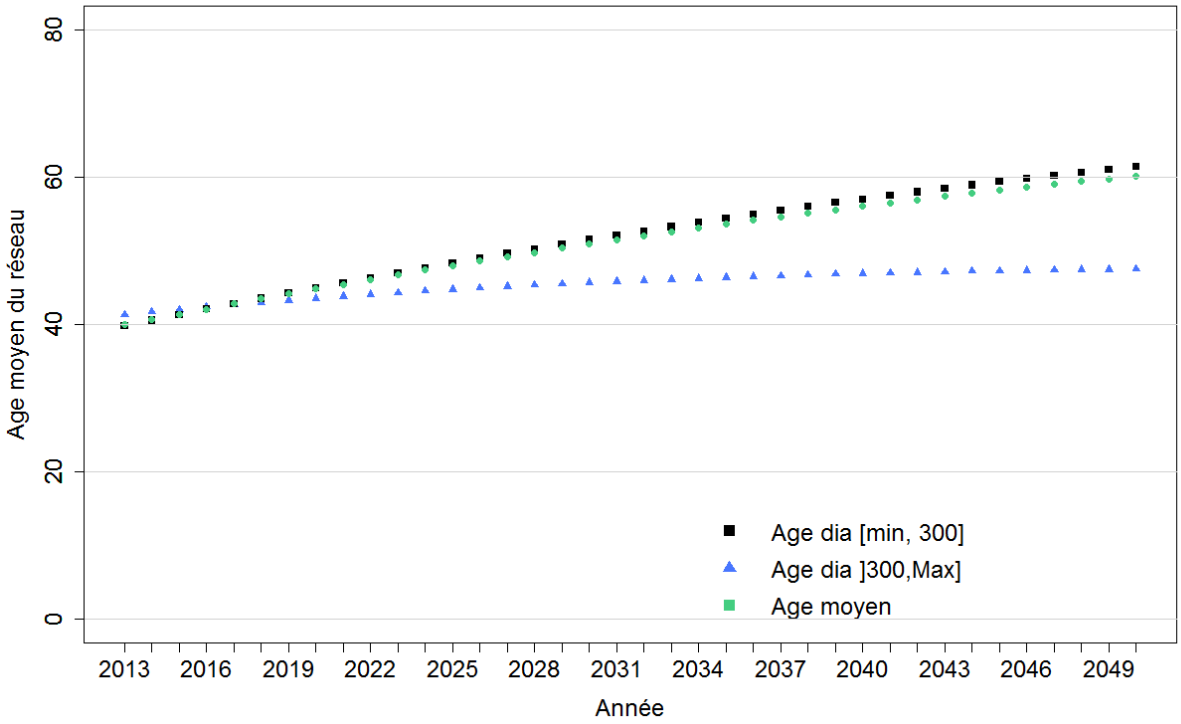


Figure 20 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2013 jusqu'en 2050 au SEDIF, scénario « statu quo, plusieurs courbes DIA», tronçons partitionnés par diamètre.

V Calcul de l'indicateur I1F

V.1 Entrée

Nom de la strate	Diamètre moyen en linéaire de la strate (tronçon ES)	Diamètre pris dans la fiche de coût	Coûts des travaux sans coordination (€/m)
Dia [min, 300]	130 mm	130 mm normal	600
Dia]300, max]	750 mm	800 mm normal	2505
Commentaire			

Le coût moyen des **gros diamètres** a été obtenu en moyennant les coûts des chantiers de renouvellement des tronçons de 800 mm au SEDIF.

Coût moyen des **petits diamètres** :
Programme 2015, 2016, 2017 : 119 millions d'euros de travaux : 198 km

- 455 €/mL travaux
- 50 €/mL de maitrise d'œuvre (MO) lié à la pose de la cana
- 67€/mL de prestation associée : analyse, contrôle de compactage, DT-DICT
- 30 €/mL aléa

Total : 600 €/mL

V.2 Sortie

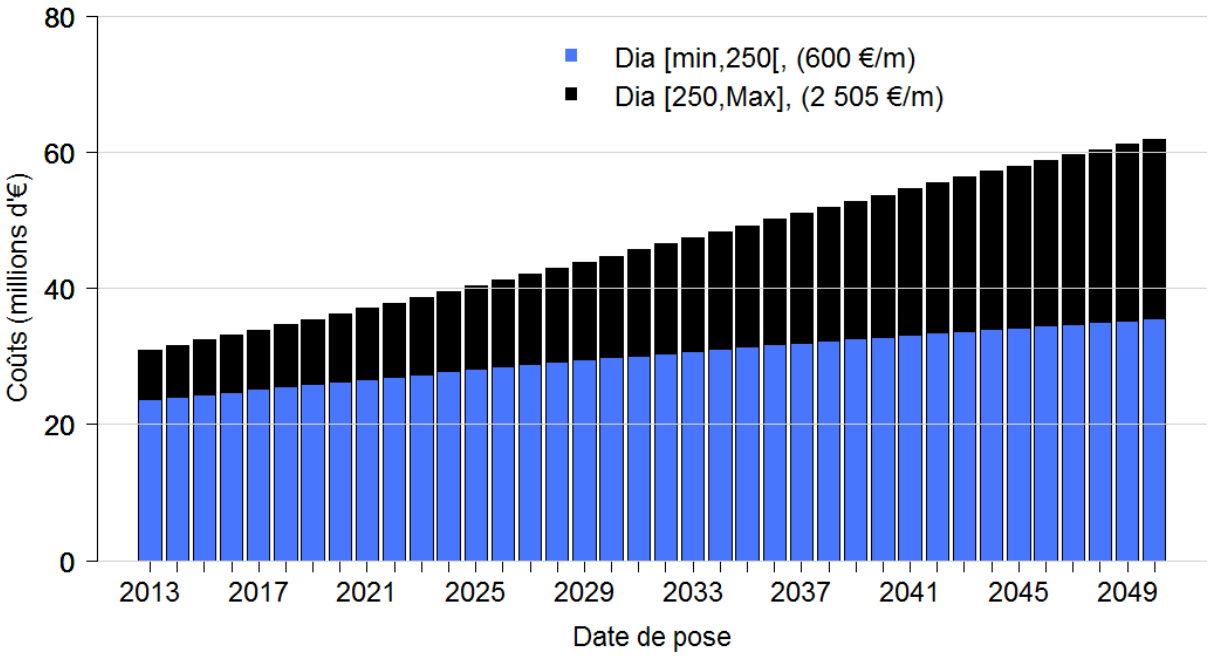


Figure 21 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2013 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes DIA », tronçons partitionnés par diamètre.

VI Calcul de l'indicateur I1P

VI.1 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 11

Covariable	Age (t)	Longueur (Z_1)	Diamètre (Z_2)
Unité	Siècle	m	mm

Tableau 1 : Covariables (et leurs unités) employés dans le modèle LEYP

Paramètres / Nom strate	$\propto$	δ	β_0	β_1	β_2
Gros diamètre	6.11	1.25	-1.67	0.29	-0.0014
Petit diamètre	3.93	1.33	-1.82	0.36	_

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle LEYP par strate

VI.1 Entrée en tronçon

- Cf. Figure 12
- Cf. Tableau 1 & Tableau 2

VI.2 Sorties en tronçons

- Effectif :

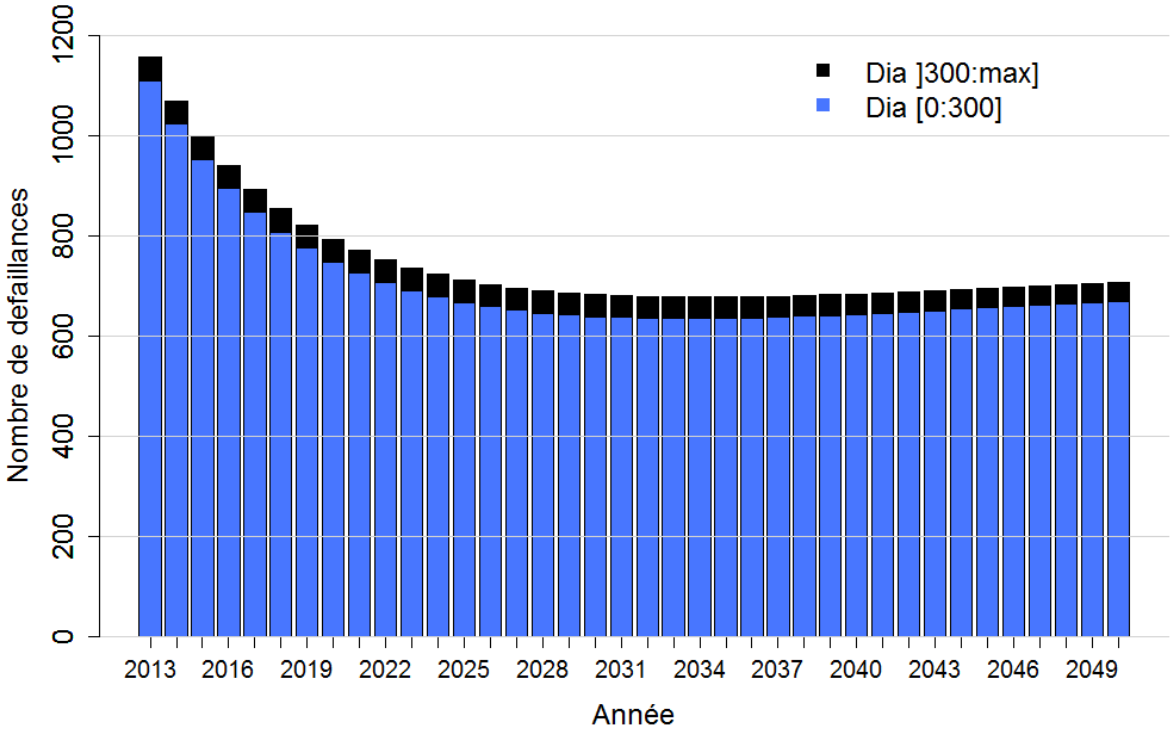


Figure 22 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2013 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes DIA », tronçons partitionnés par diamètre. Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif

VI.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

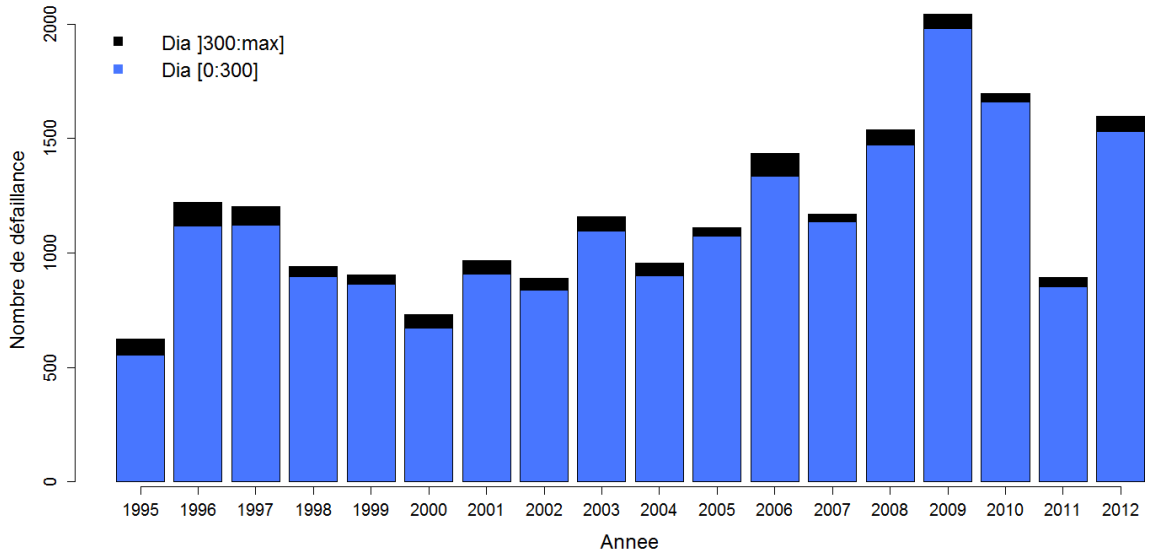


Figure 23 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2012, partitionné par le diamètre

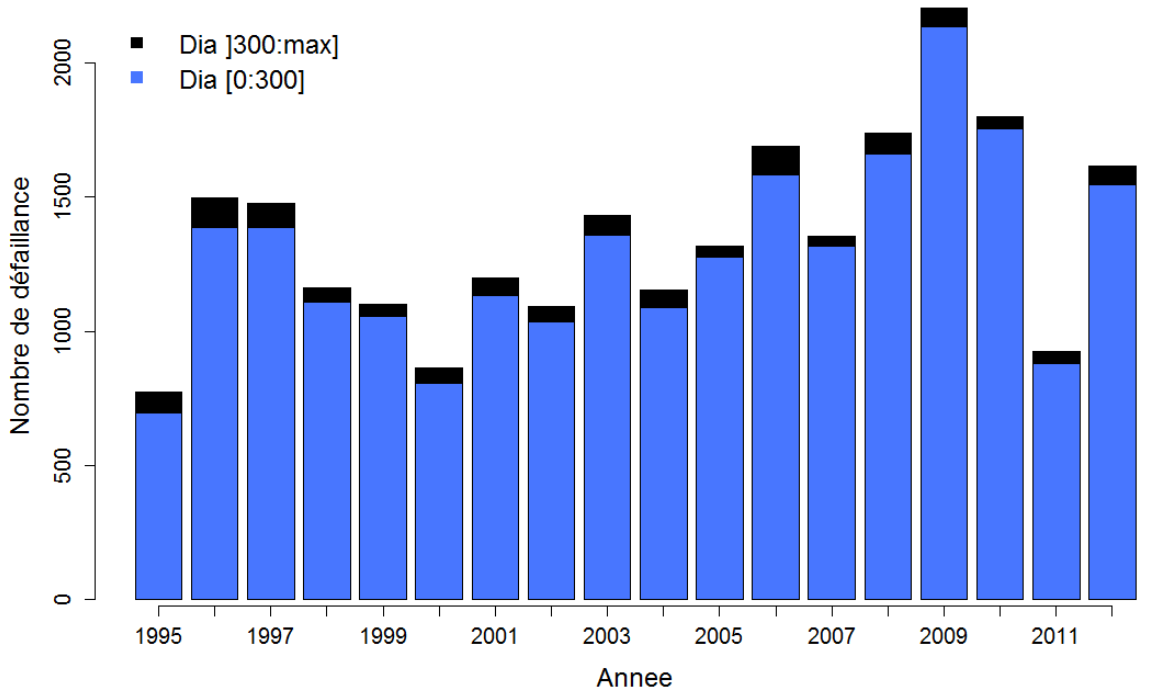


Figure 24 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service et HS au 31/12/2012 et mis hors service entre [1995, 2012], partitionné par le diamètre

VII Calcul de l'indicateur I2F, coûts du renouvellement

VII.1 Entrée

Cf. Figure 22

Diamètre	Coûts (Curp)
<=300	2800€/m
>300	4200€/m

Tableau 3 : Valeur des coûts de réparation par tronçon

Ces coûts ont été obtenu grâce à ceux de Lausanne auxquelles nous avons retiré 30% (30% étant le pourcentage d'augmentation du prix d'un panier de course moyen entre la France et la Suisse).

VII.2 Modèle

I2-F = NbDef x Curp

VII.3 Sortie

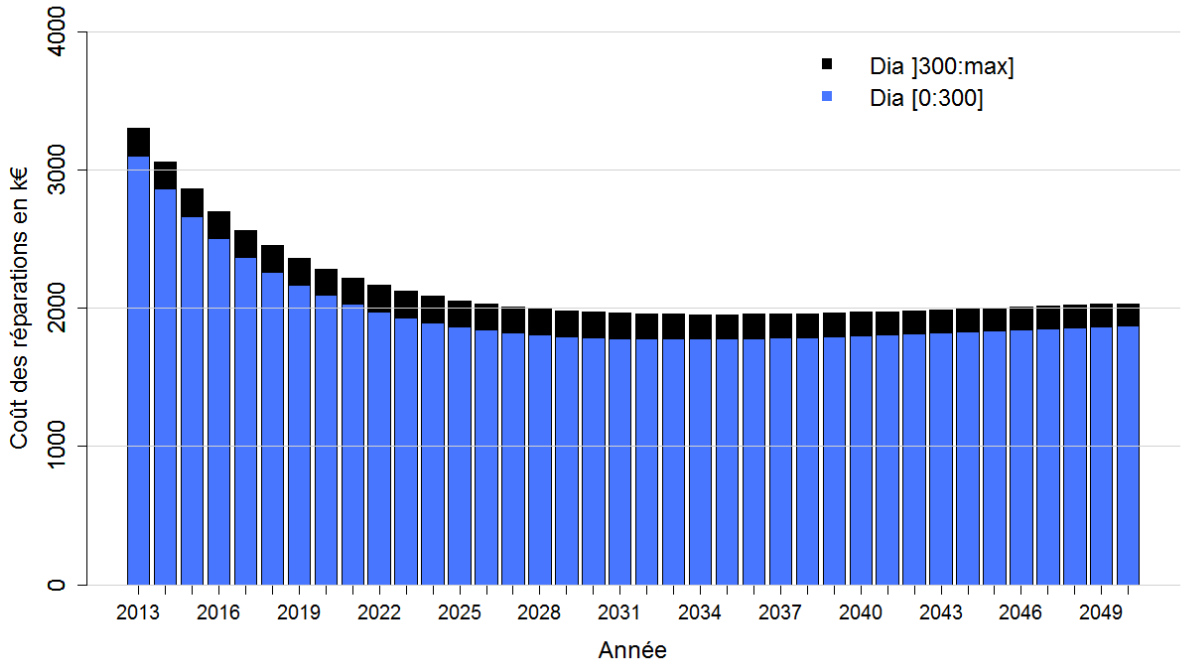


Figure 25 : Prévision pour l'indicateur I2-F entre 2013 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes DIA », tronçons partitionnés par diamètre.

Scénario 5 (code D)

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7
Stratifié ?	Non			Diamètres	NDOA	Matériaux	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[1995; 2004]	[1995; 2012]					
Statu quo ?	Oui		On arrête de renouveler	Oui			On arrête de renouveler

1. Stratification

Figure 1 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en linéaire tronçons partitionnés par le nombre de défaillances+ IC

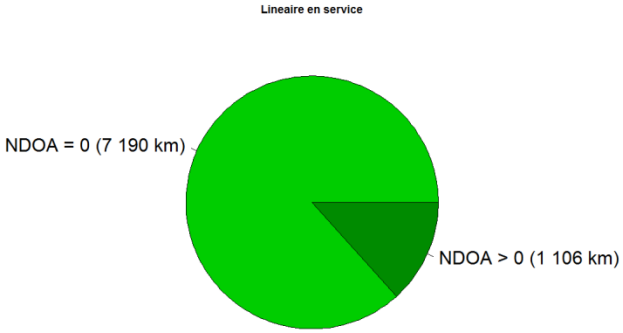


Figure 2 : Proportion du linéaire ES en fonction de deux classes du nombre de défaillances

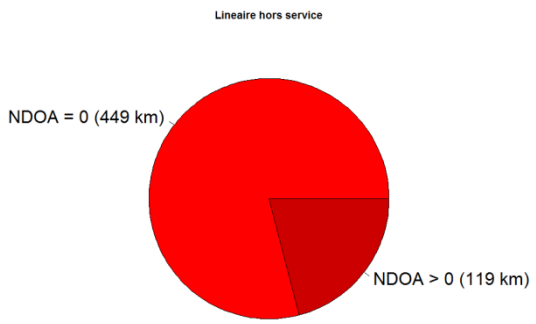


Figure 3 : Proportion du linéaire HS en fonction de deux classes du nombre de défaillances

2. Changement de la censure

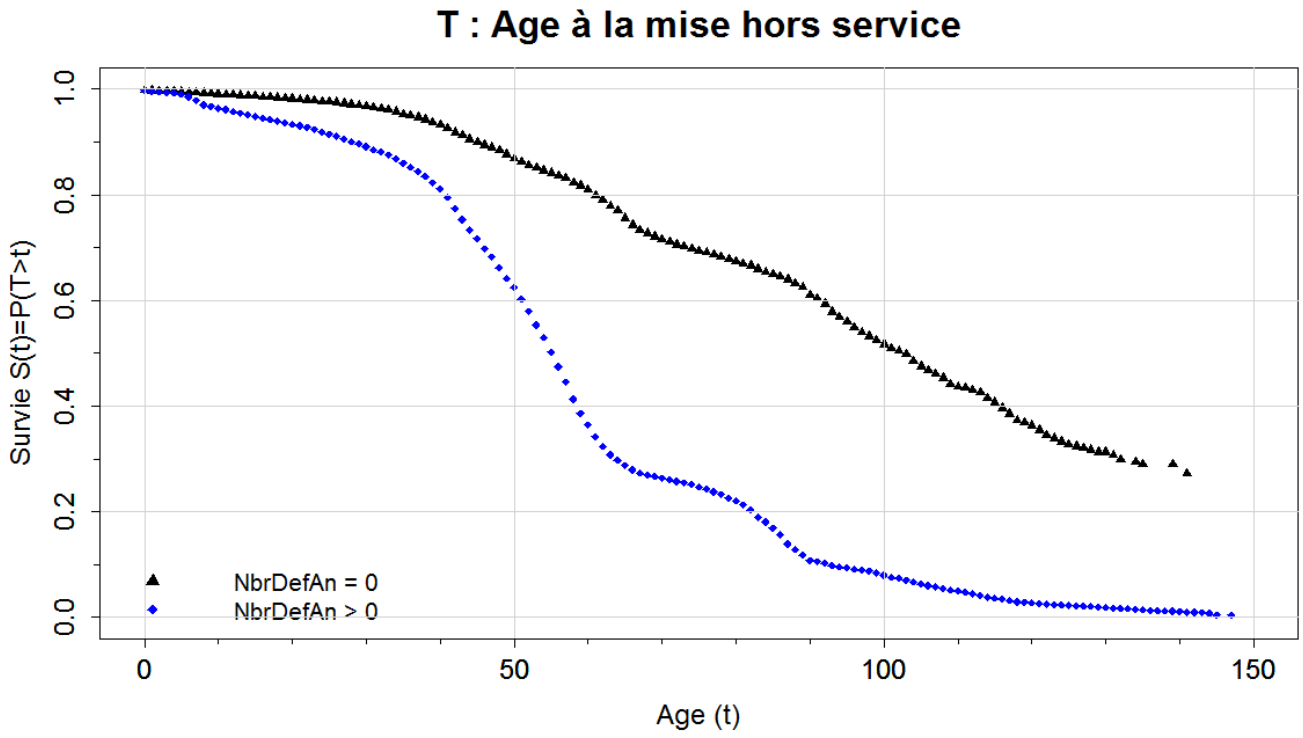


Figure 4 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en linéaire tronçons partitionnés par le nombre de défaillances

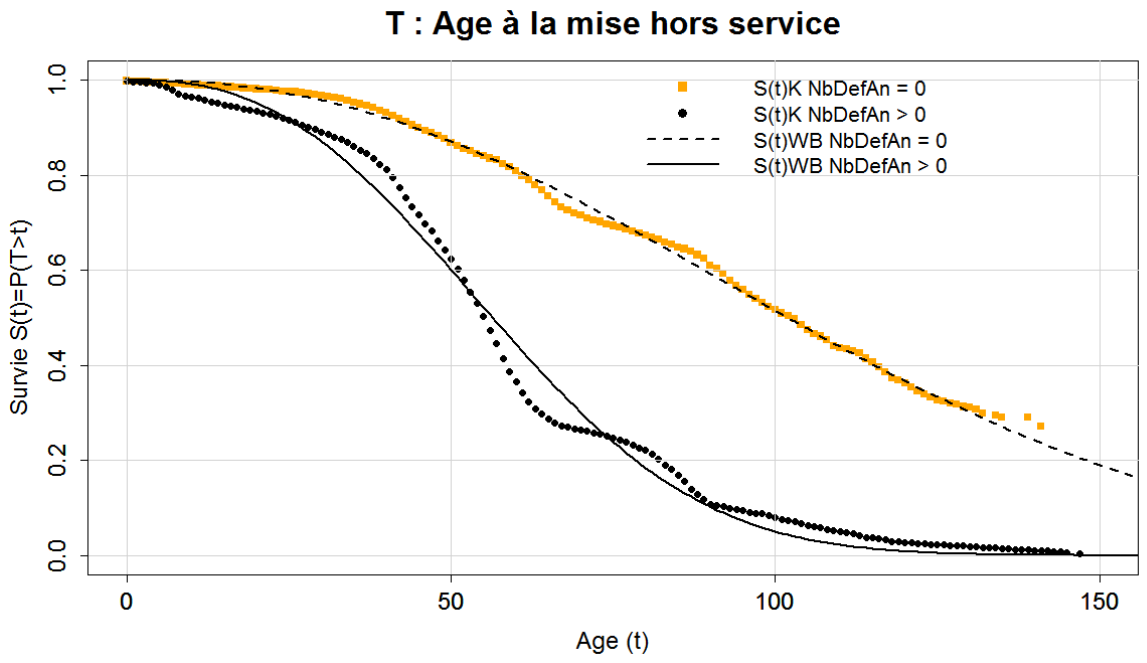


Figure 5 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en linéaire tronçons partitionnés par le nombre de défaillances + ajustement de Weibull

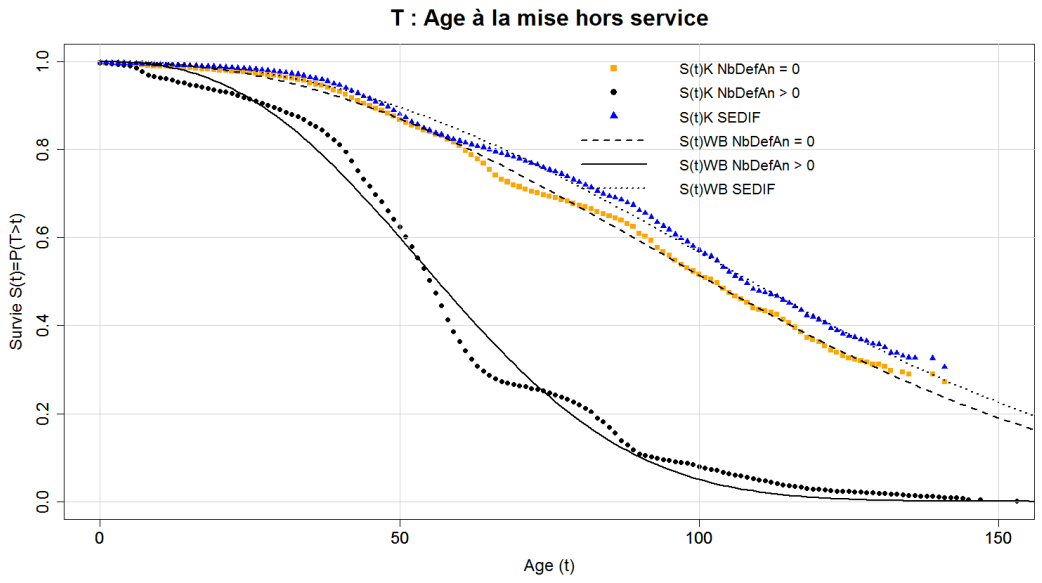


Figure 6 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en linéaire tronçons partitionnés par le nombre de défaillances + ajustement de Weibull + Kaplan Meier SEDIF

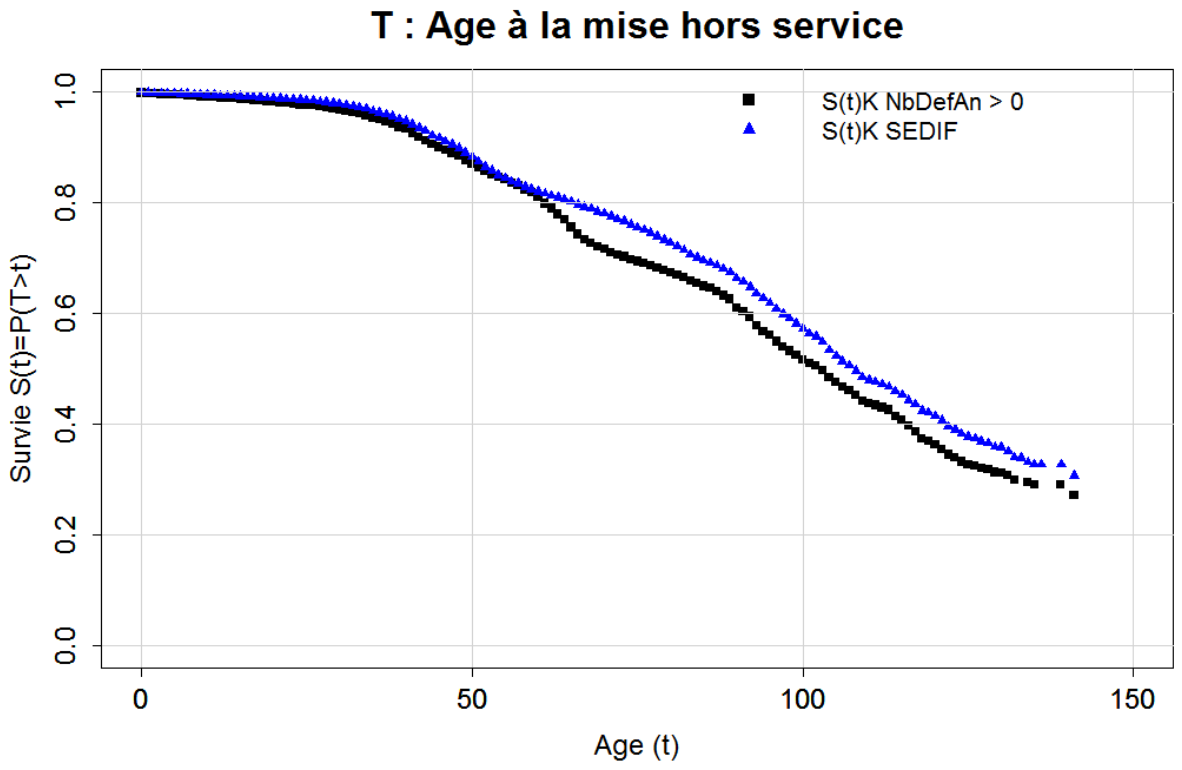


Figure 7 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en linéaire nombre de défaillances > 0 + Kaplan Meier SEDIF

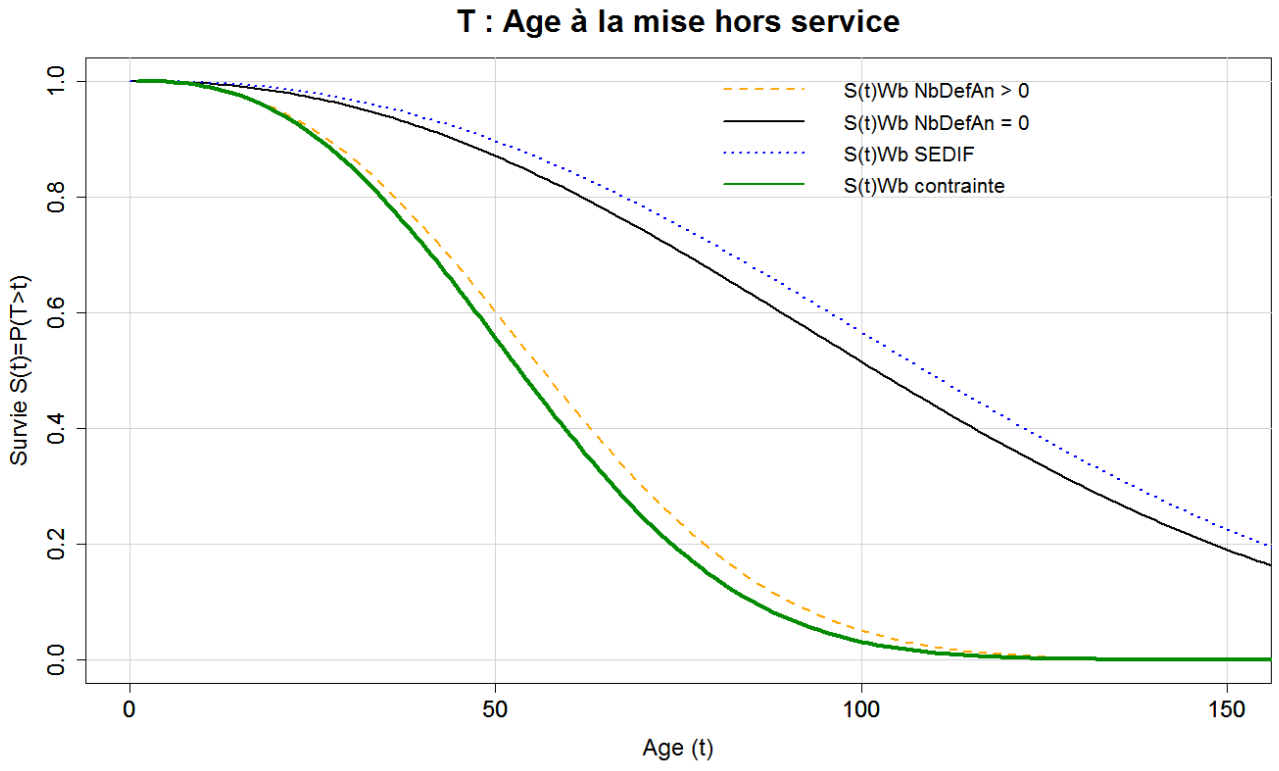


Figure 8 : Ajustement de Weibull + Swb Contrainte = SEDIF x NbDefAn > 0

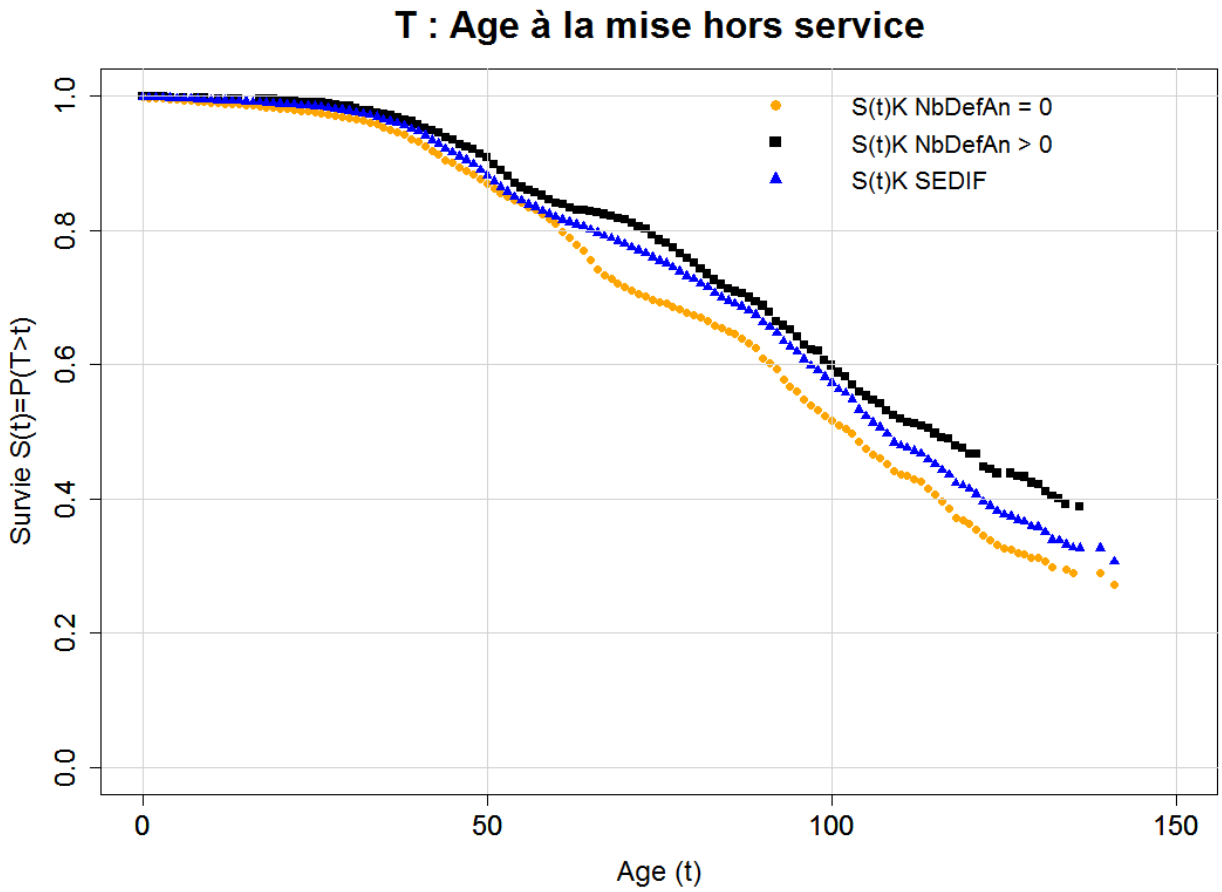


Figure 9 : Courbes de survie empirique de Kaplan Meier en linéaire tronçons partitionnés par le nombre de défaillances (méthode stratification pour la noir, méthode censure pour la orange), + survie SEDIF

Scénario 6 (Code C)

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7
Stratifié ?	Non			Diamètres	NDOA	Matériaux	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[1995; 2004]	[1995; 2012]					
Statu quo ?	Oui		On arrête de renouveler	Oui			On arrête de renouveler

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

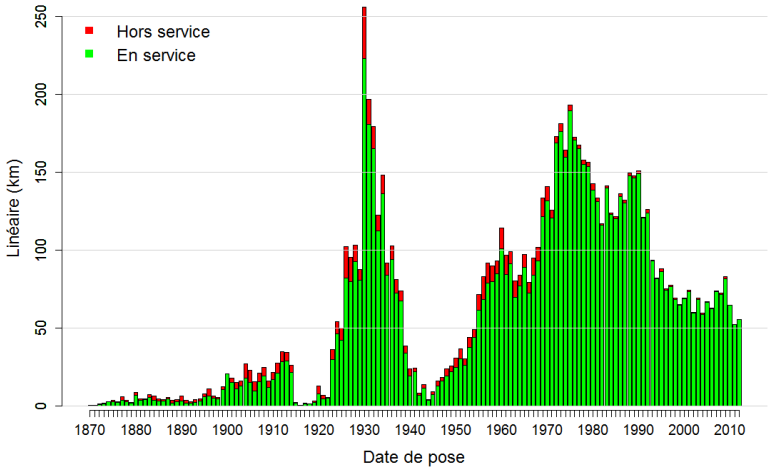


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [1995 ; 2012])

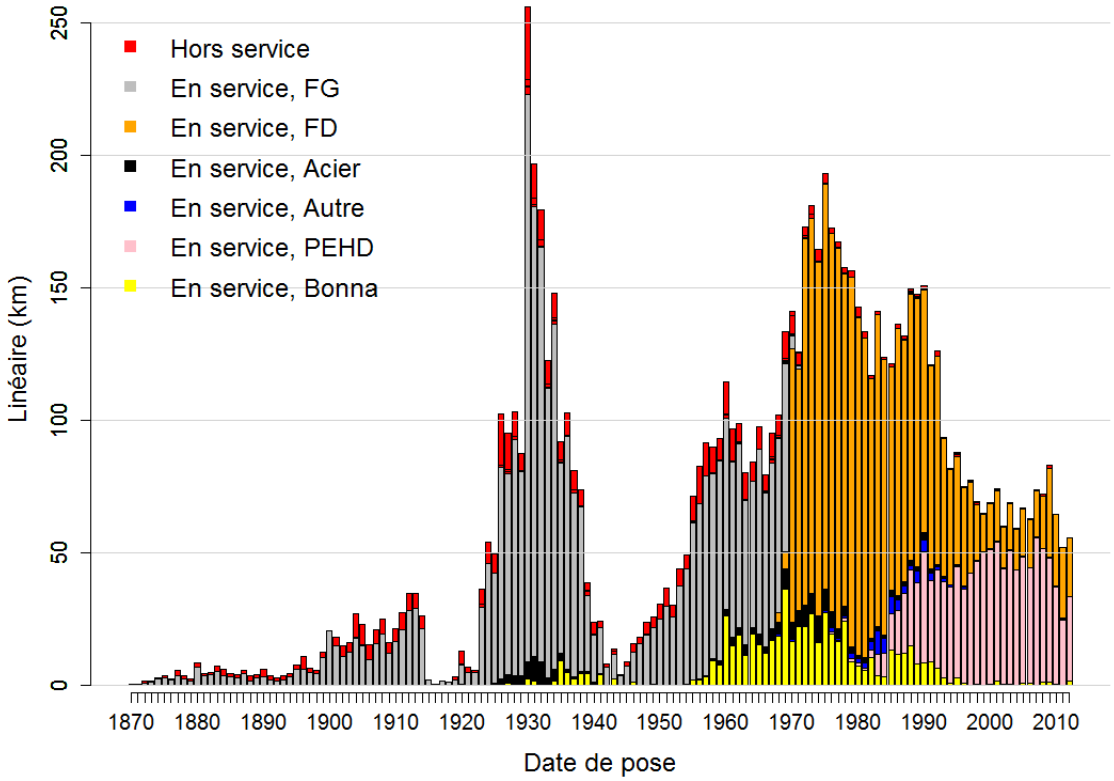


Figure 2 : Linéaire en service en 31/12/2013 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon 6 strates de matériau et selon le statut.

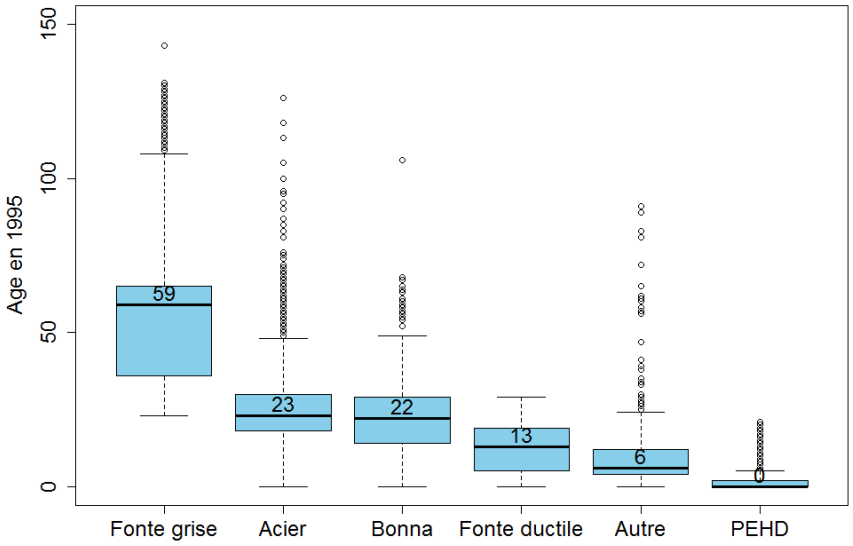


Figure 3 : Boite à moustache de l'âge par matériaux

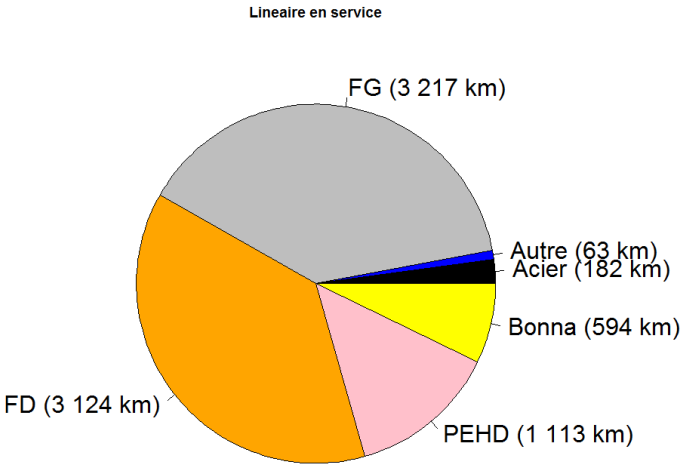


Figure 4 : Proportion du linéaire ES au 31/12/2012 en fonction des quatre strates de matériau

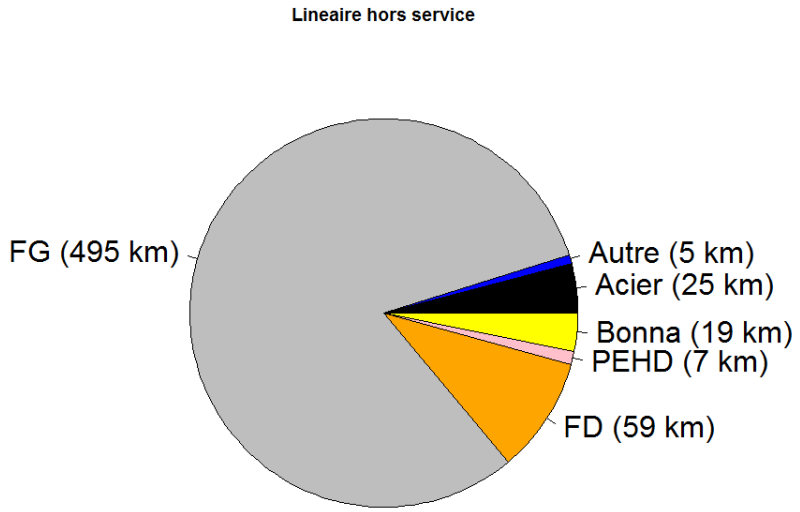


Figure 5 : Proportion du linéaire mis HS entre [1995, 2012] en fonction des quatre strates de matériau

I.2 Sortie en linéaire

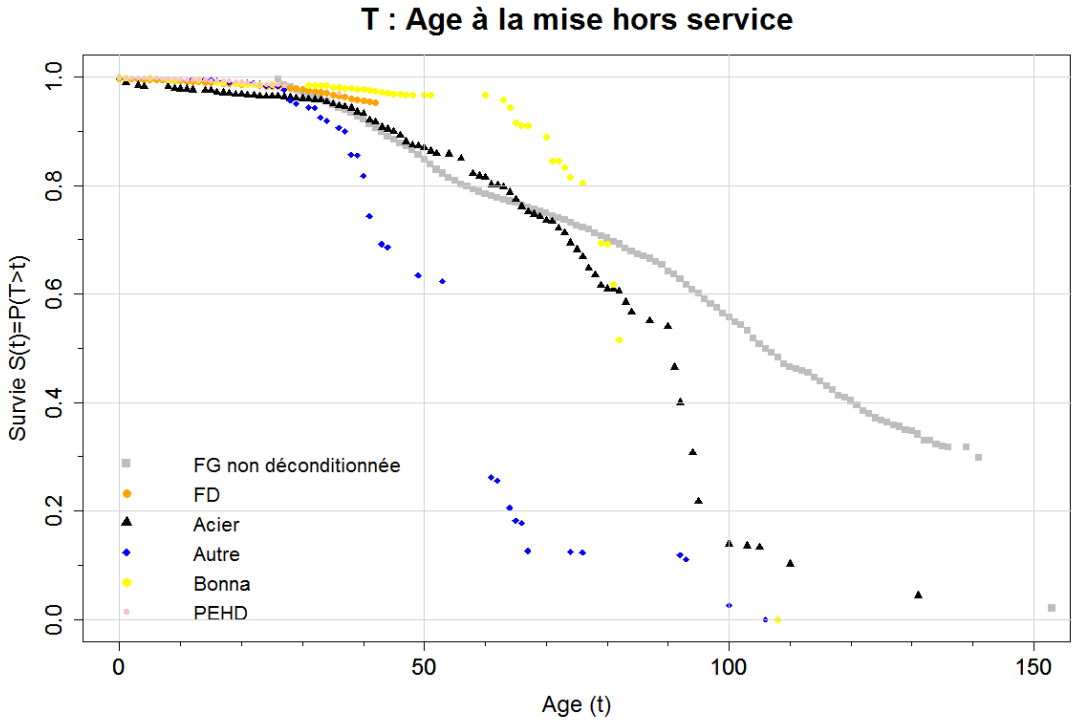


Figure 6 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tronçons par strate de matériau

I.1 Entrée en effectif

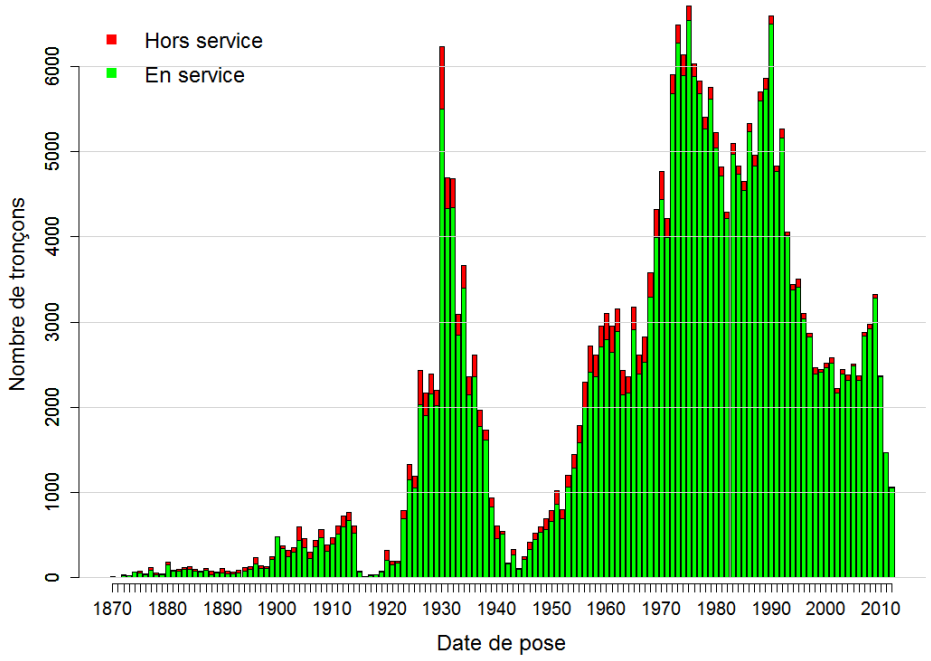


Figure 7 : Histogramme du nombre de tronçons En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [1995 ; 2012])

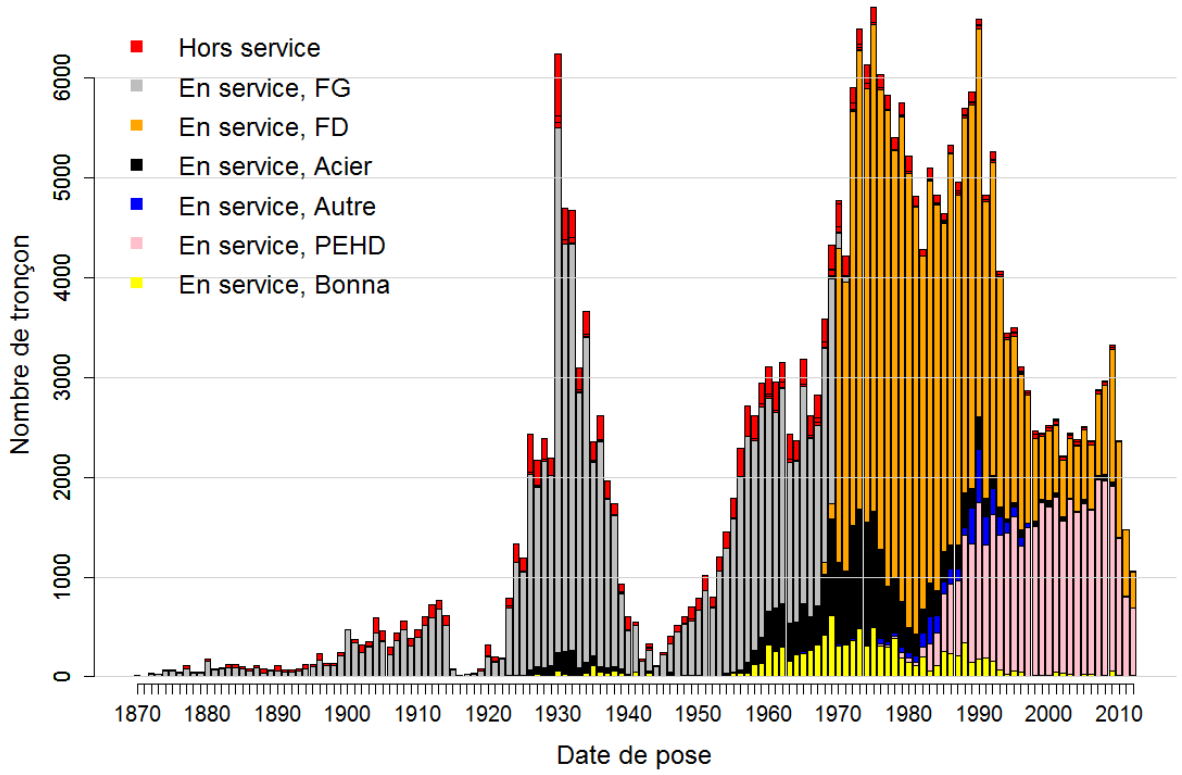


Figure 8 : Nombre de tronçons en service en 31/12/2012 au SEDIF en fonction des dates de pose, différencié selon 6 strates de matériau et selon le statut.

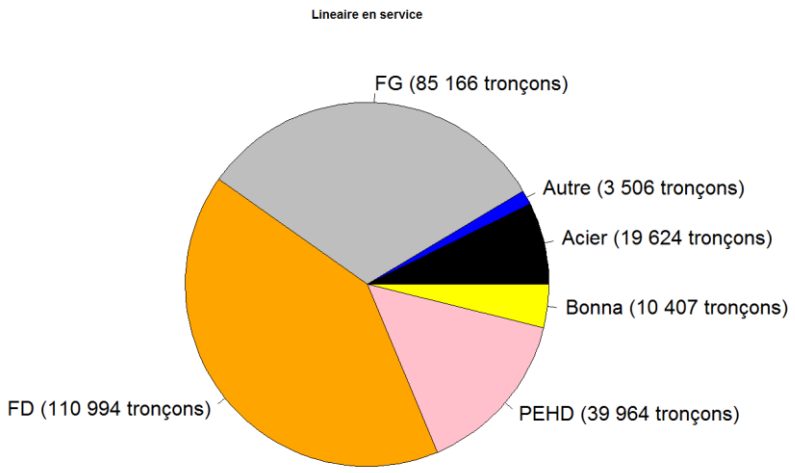


Figure 9 : Proportion du nombre de tronçon ES en fonction de quatre strates de matériau

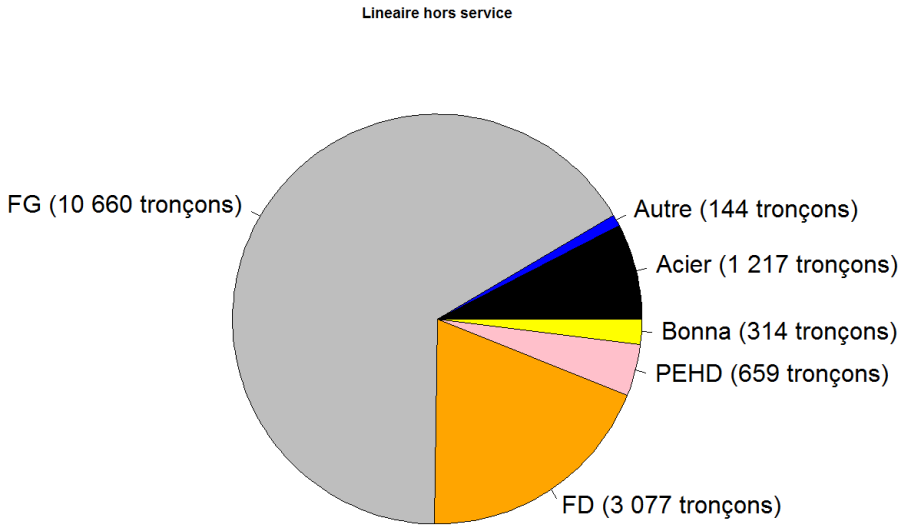


Figure 10 : Proportion du nombre de tronçon HS en fonction de quatre strates de matériau

I.2 Sortie en effectif

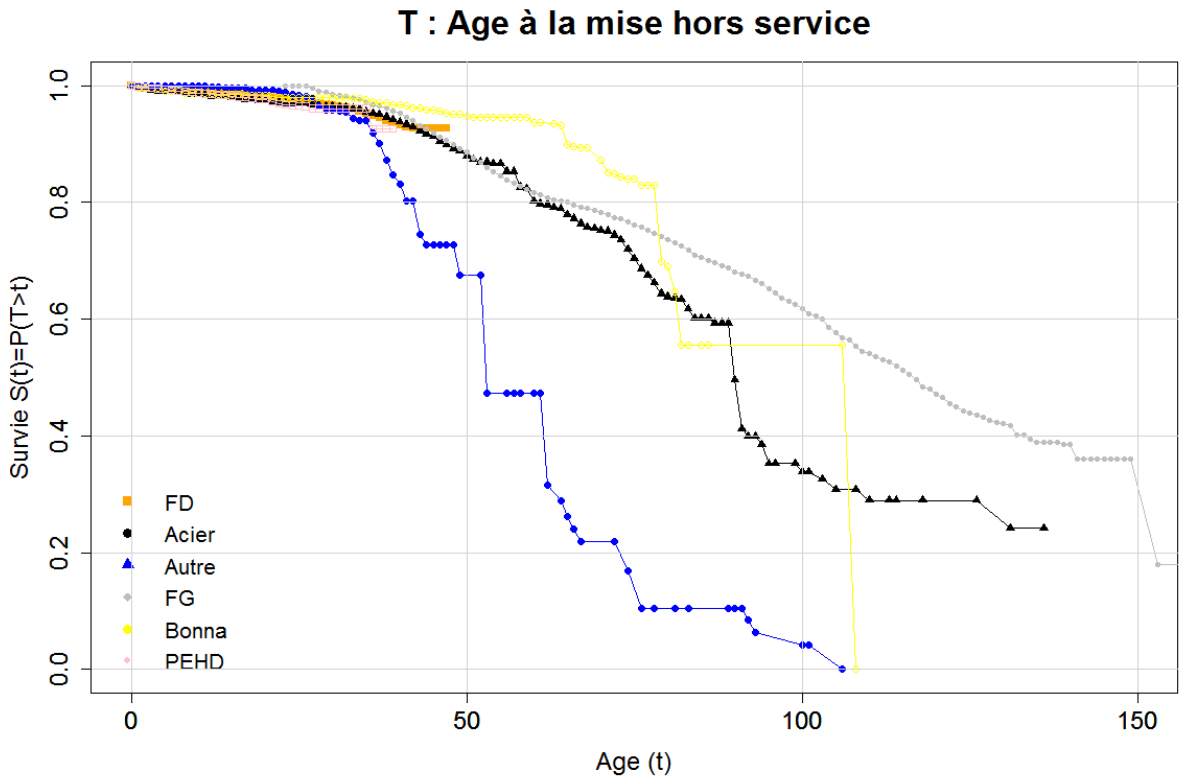


Figure 11 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en nombre de tronçons par strate de matériau

II Scénario C

- Photographie au 31 /12 /2012
- stratification par matériaux :
  - fonte grise
  - fonte ductile
  - Acier
  - Autre
  - Bonna
  - PEHD
- On renouvelle la fonte grise par de la fonte ductile
- Courbes de survie prospectives les même pour tous les matériaux que par le passé, déconditionner méthode Weibull (Yves)

III Construction scénario prospectif C

III.1 Entrée en linéaire

Cf. : Figure 6

III.2 Sortie en linéaire

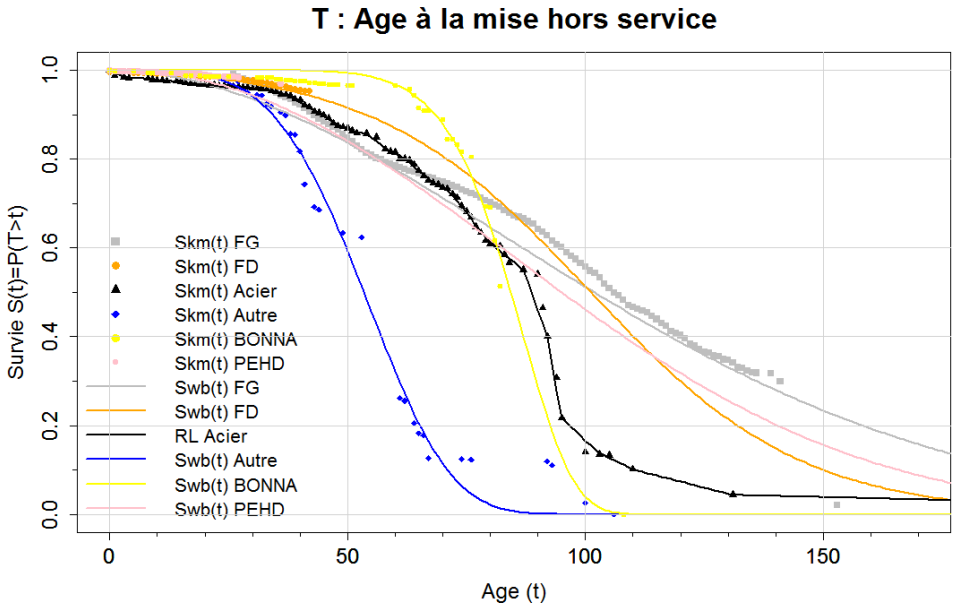


Figure 12 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait) par strate de matériau

III.1 Entrée en effectif

Cf. : Figure 11

III.2 Sortie en effectif

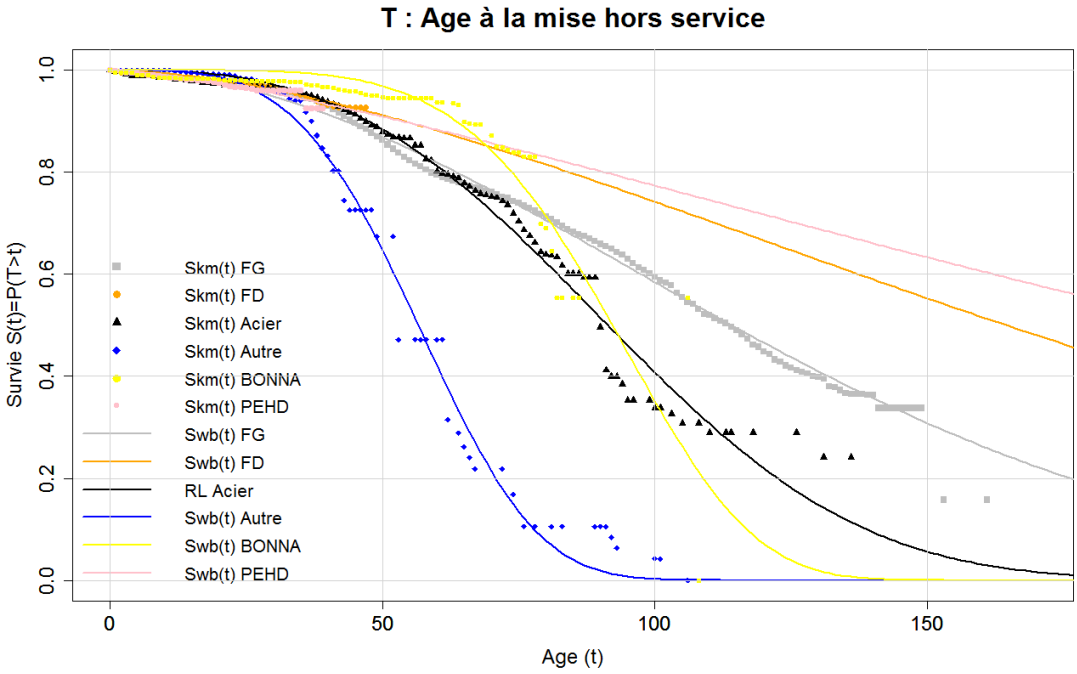


Figure 13 : Courbes de survie prospective en effectif (trait) par strates de matériau

IV Calcul des indicateurs I1R, I2R et I3R

IV.1 Entrée

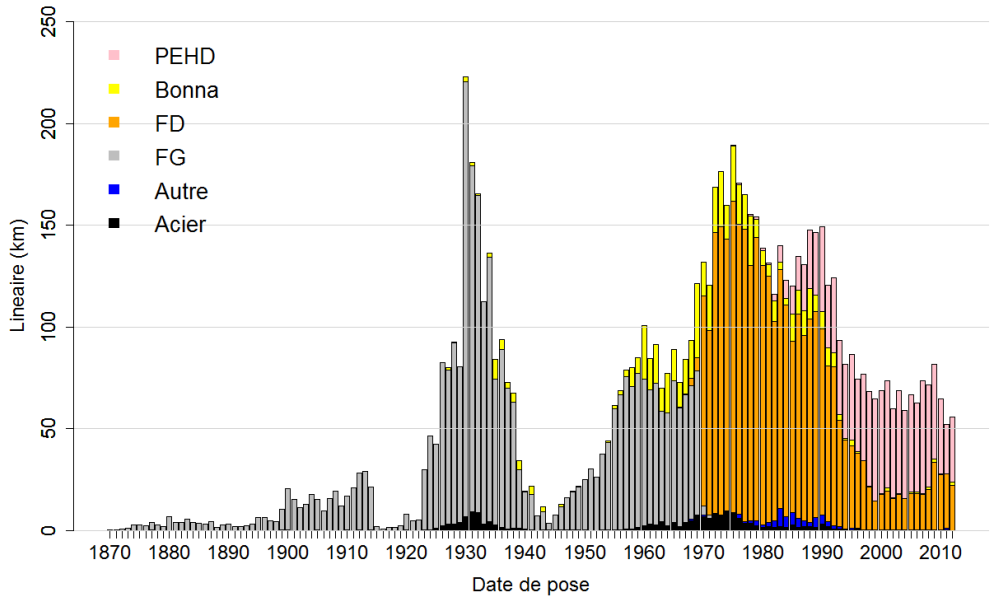


Figure 14 : Linéaire en service en 31/12/2012 au SEDIF en fonction des dates de pose, différencié selon 6 strates de matériaux.

IV.2 Sortie

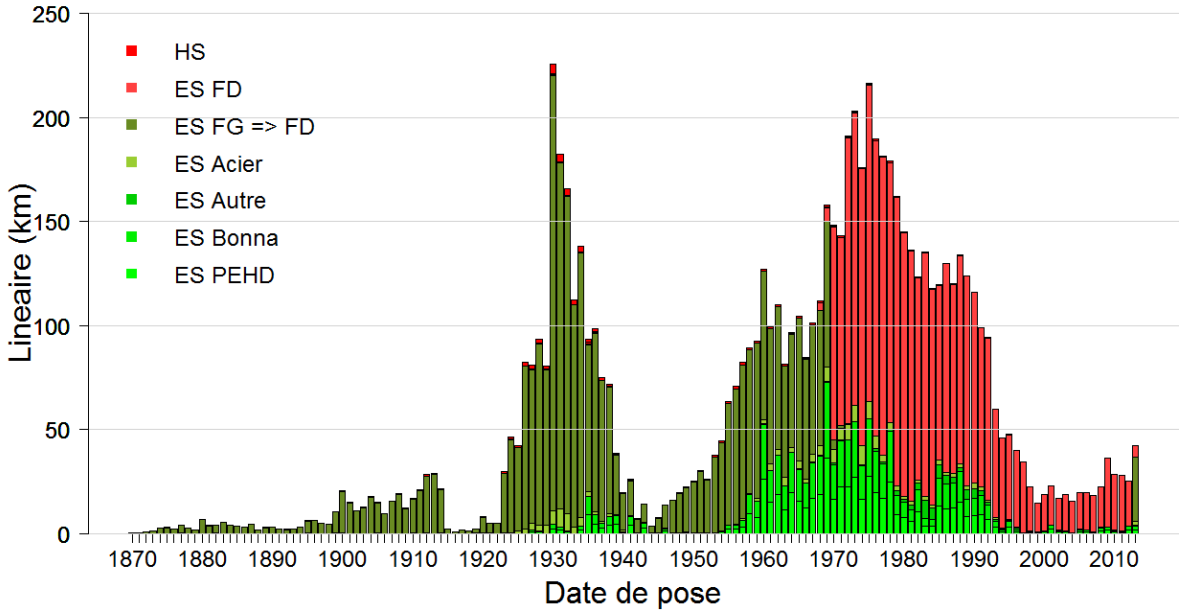


Figure 15 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2013, photographie de la situation en 2013, tronçons partitionnés en 6 strates de matériaux.

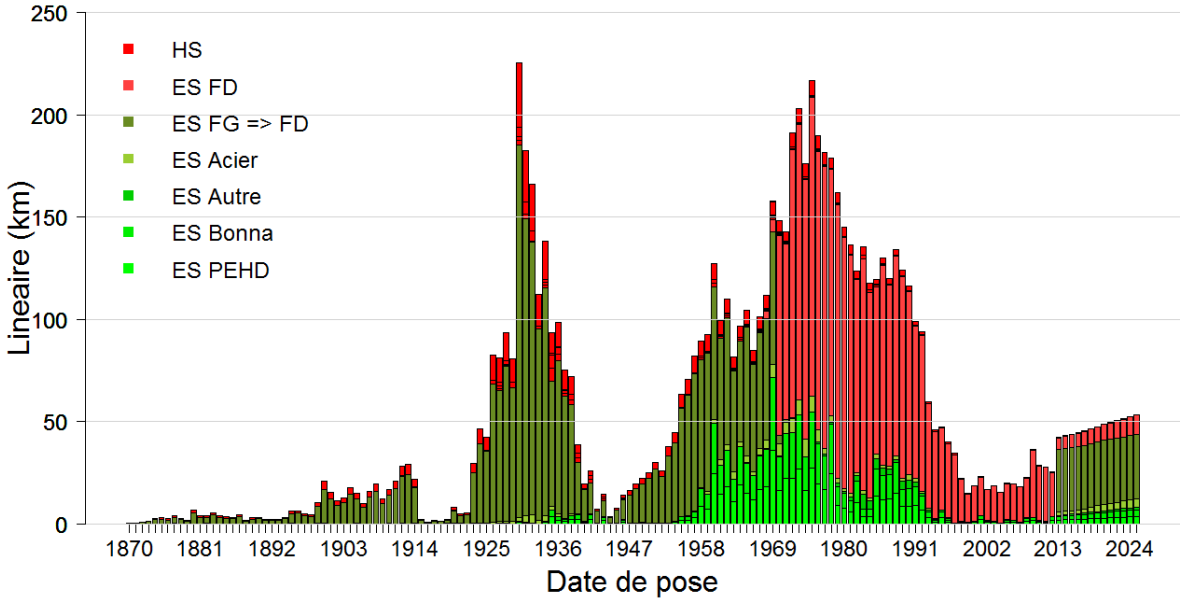


Figure 16 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2025, photographie de la situation en 2025, tronçons partitionnés en 6 strates de matériaux.

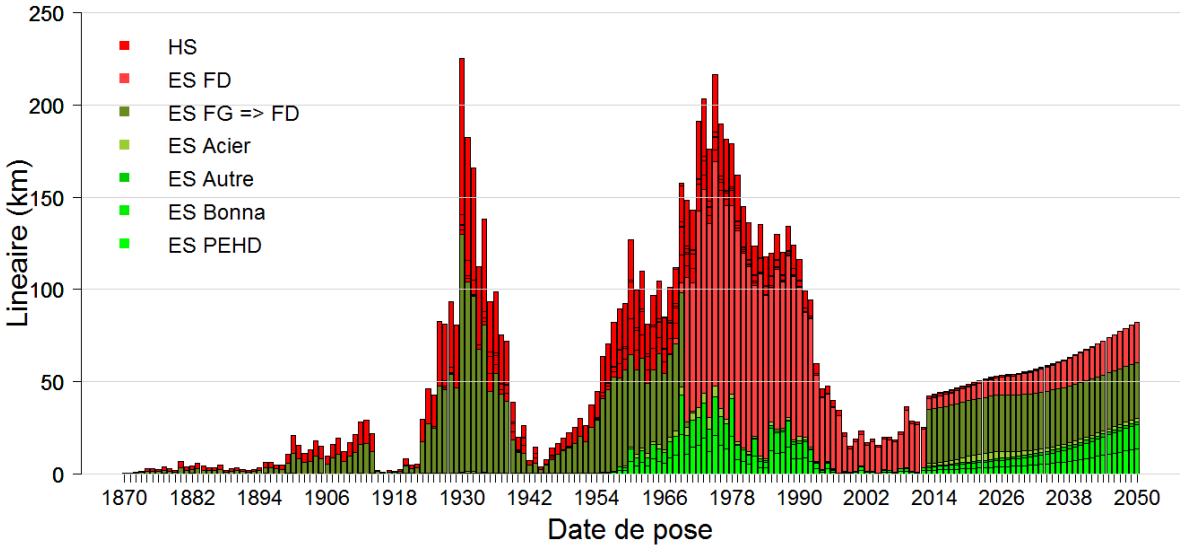


Figure 17 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2050, photographie de la situation en 2050, tronçons partitionnés en 6 strates de matériaux.

IV.1 Sortie I2R

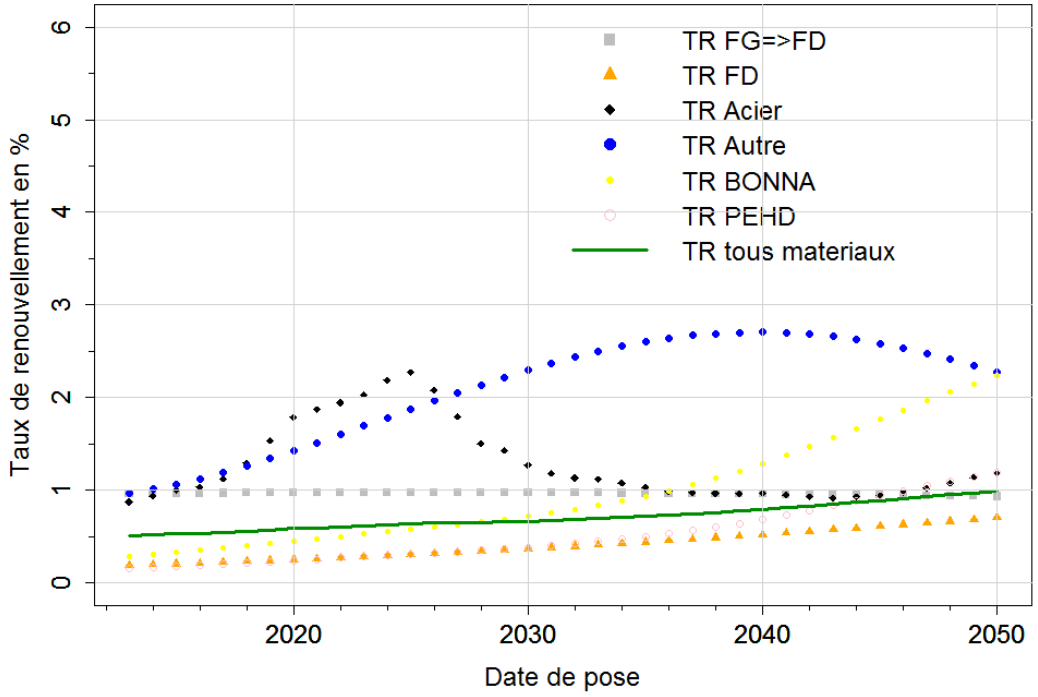


Figure 18 : Prévision des taux de renouvellement futurs de 2013 jusqu'en 2050 pour les tronçons en acier, FG, FD, PEHD, Bonna, Autre et tous matériaux confondus.

IV.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

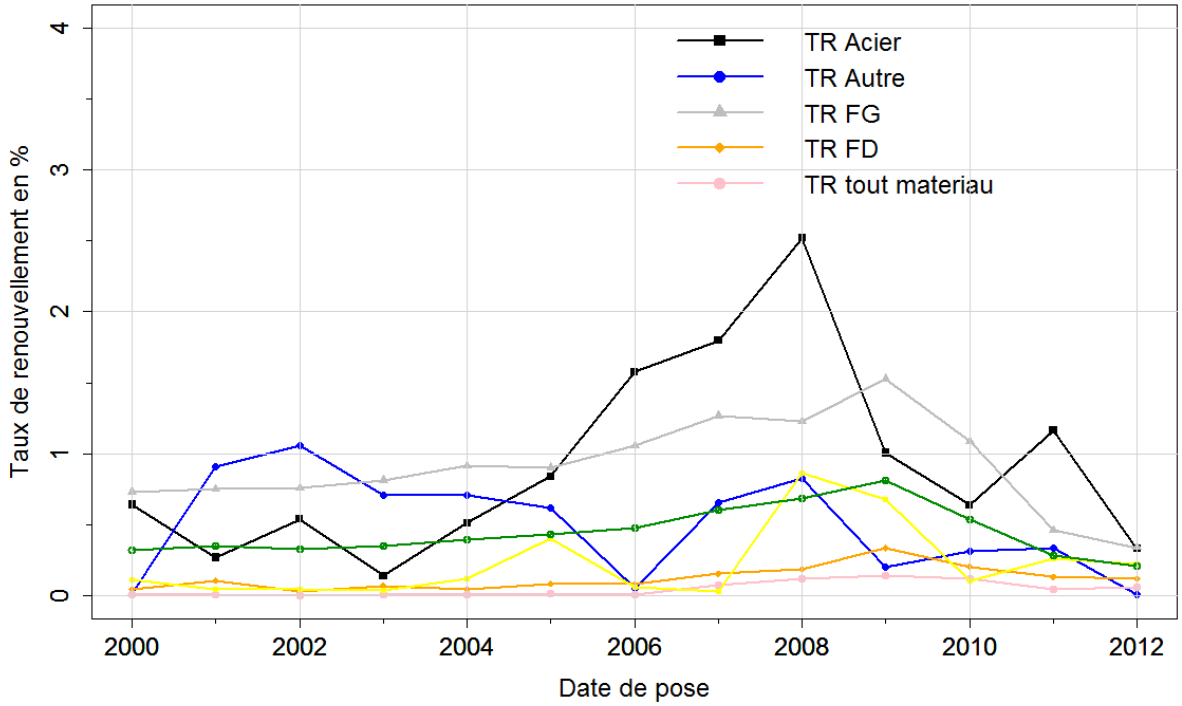


Figure 19 : Taux de renouvellement passé de 2000 à 2012 pour les tronçons en acier, FG, FD, PEHD, Bonna, Autre et tous matériaux confondus.

IV.1 Sortie I3R

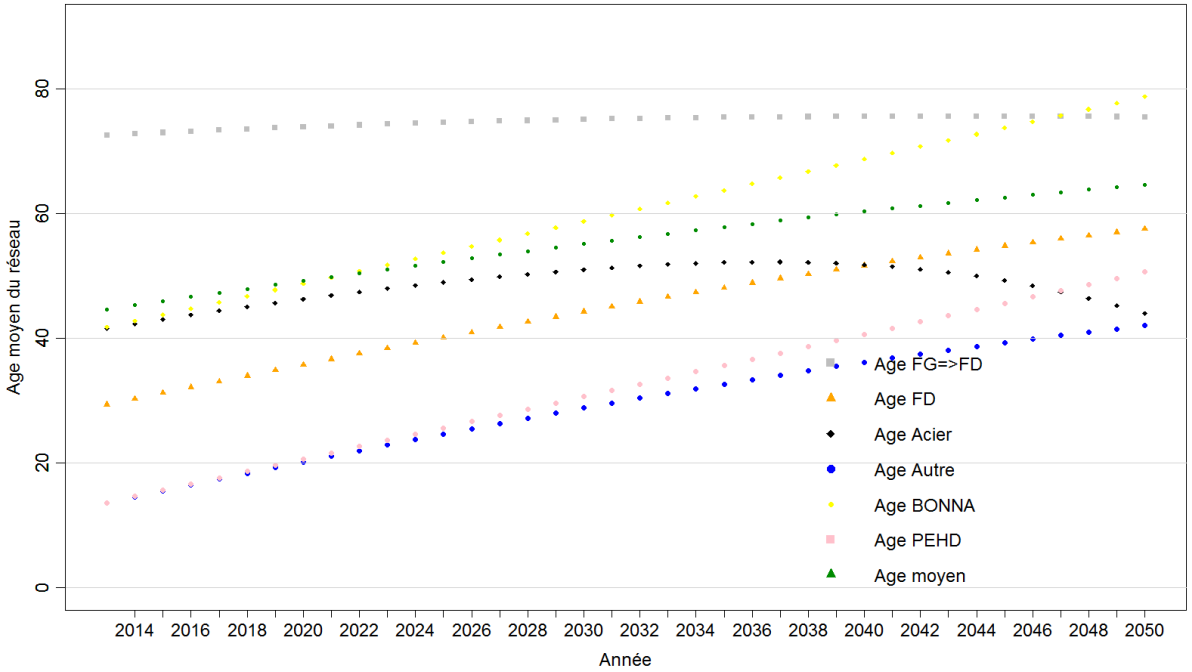


Figure 20 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2013 jusqu'en 2050 au SEDIF, scénario « statu quo, plusieurs courbes Matériaux», tronçons partitionnés par matériaux.

V Calcul de l'indicateur I1F

V.1 Entrée

Nom de la strate	Diamètre médian de la strate (en linéaire)	Coûts des travaux à la strate (€/m)
Acier	300 mm	1032
Autre	180 mm	459
FD	200 mm	459
FG=>FD	180 mm	459
PEHD	200 mm	459
Bonna	180 mm	459

V.2 Sortie

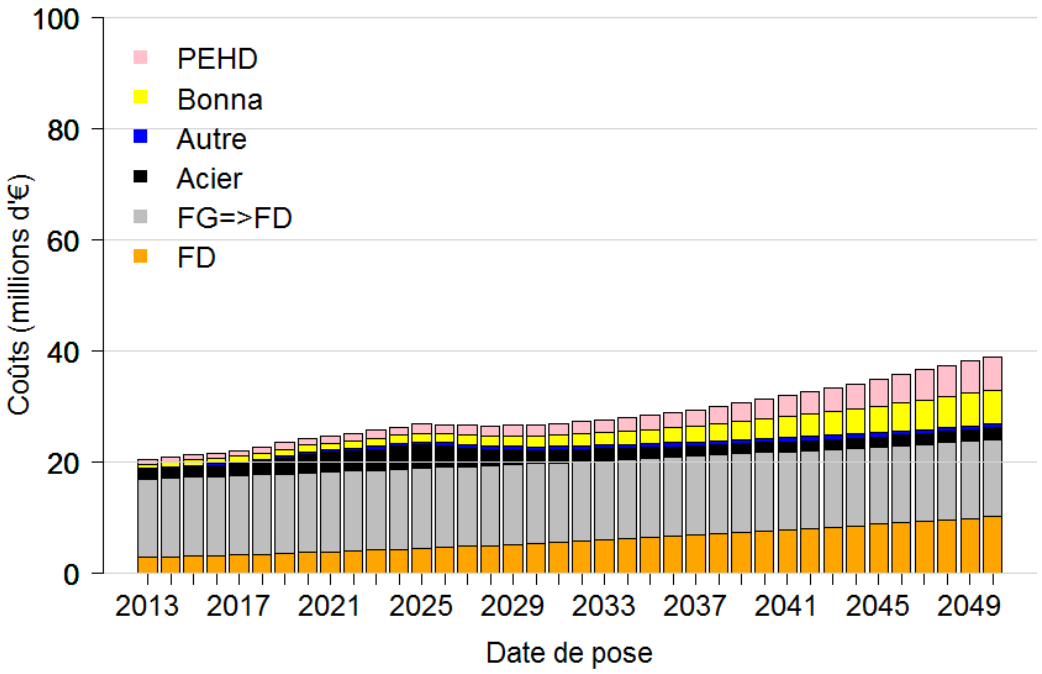


Figure 21 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2013 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes matériau », tronçons partitionnés par matériau.

VI Calcul de l'indicateur I1P

VI.1 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 12

VI.1 Entrée en tronçon

- Cf. Figure 13

VI.1 Modèle

Utilisation de l'intensité du LEYP : nombre de défaillances instantanées.

VI.2 Sorties en tronçons

- Effectif :

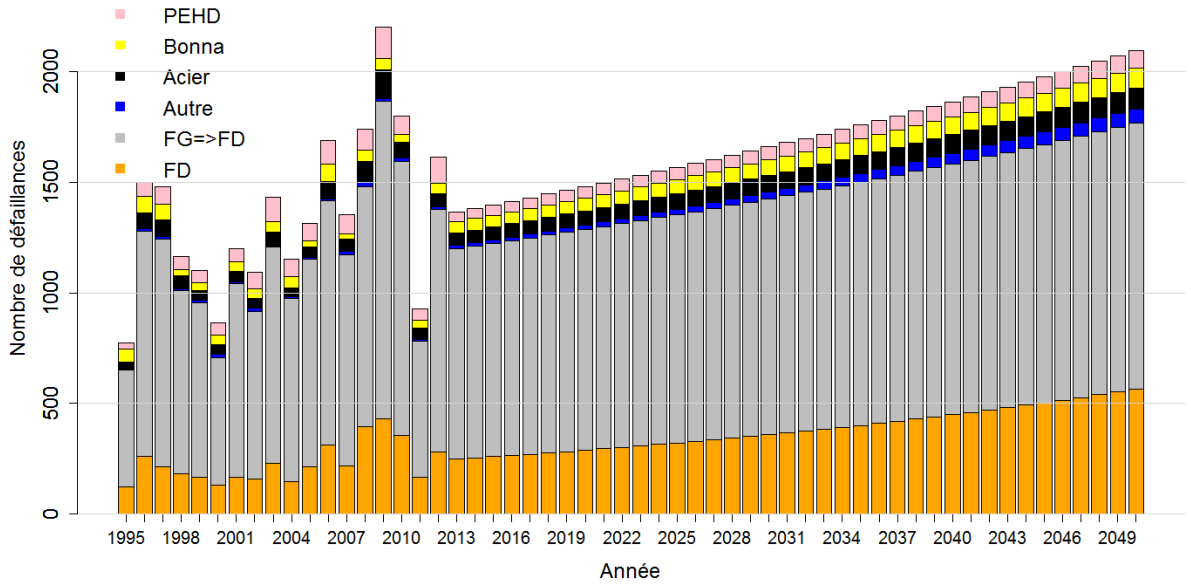
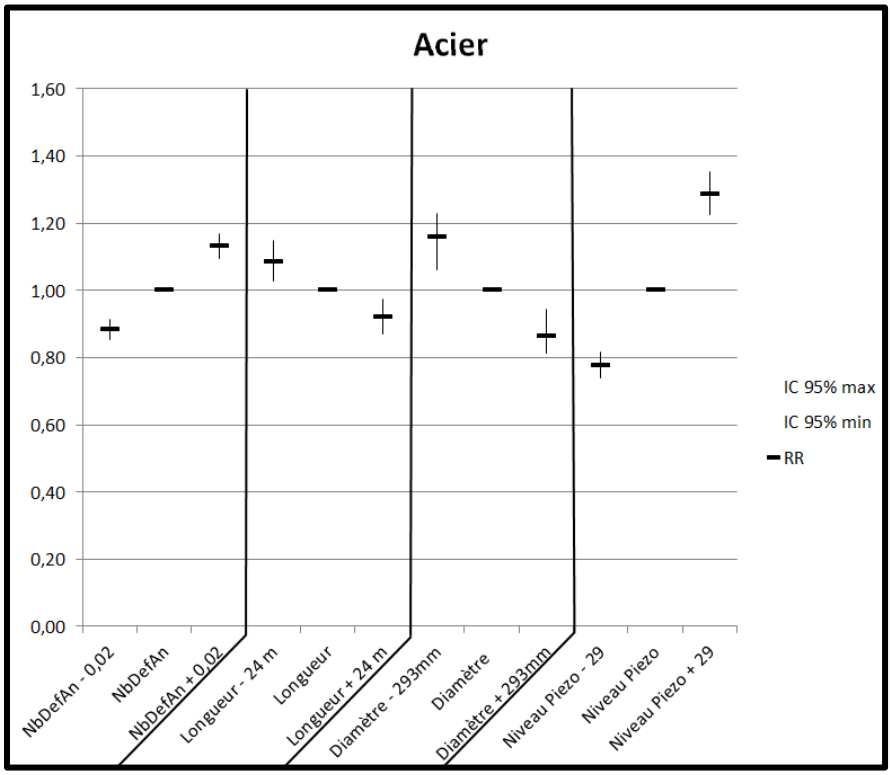


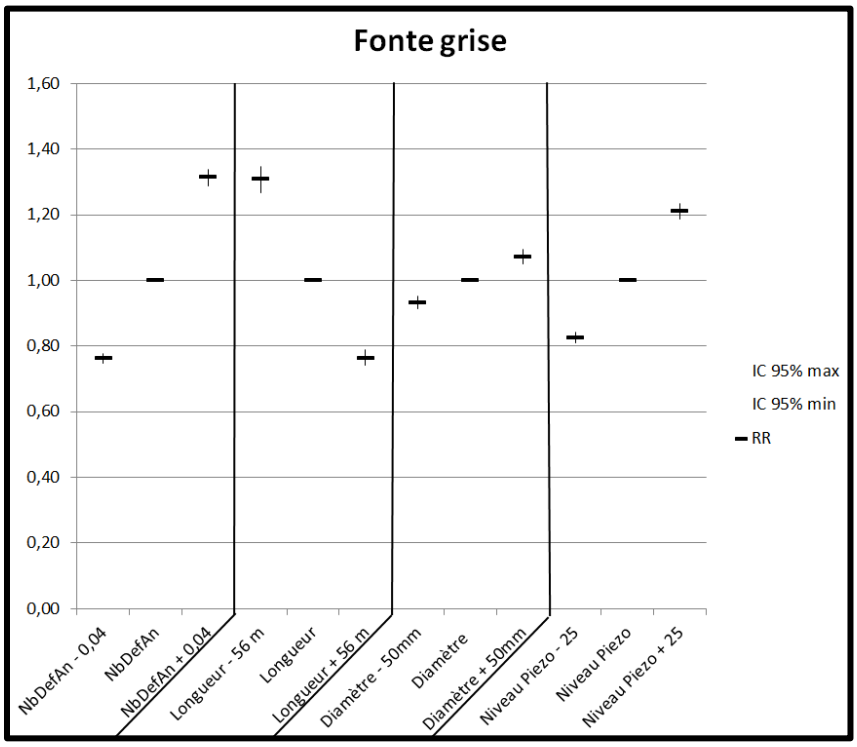
Figure 22 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 1995 et 2050, scénario « statu quo, plusieurs courbes matériaux », tronçons partitionnés par matériau. Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif

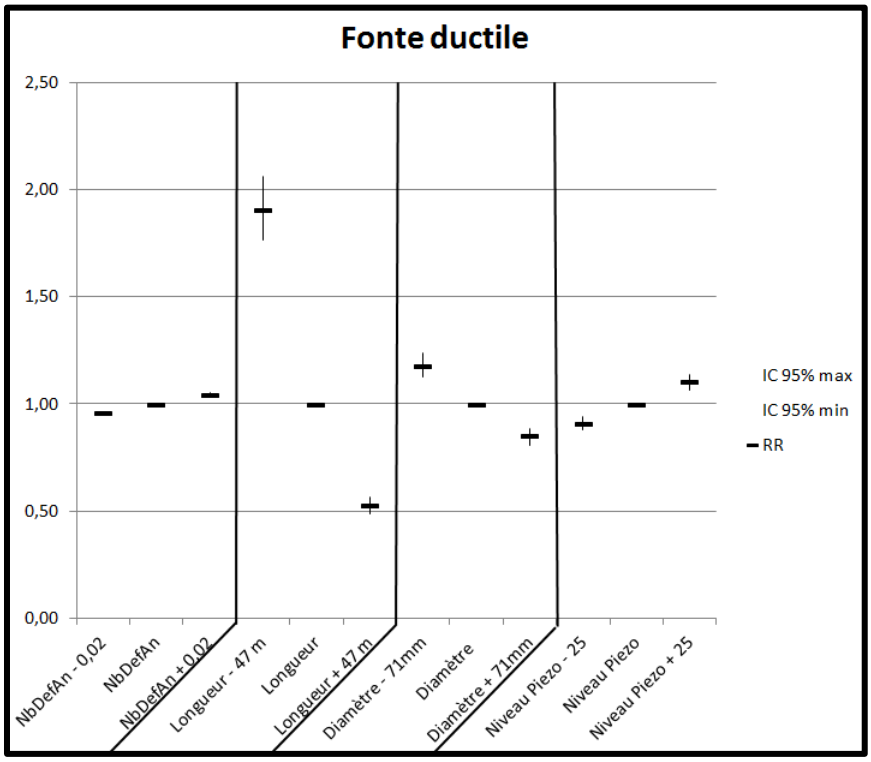
Nb Def / Methode	*FD*	*FG*	*Acier*	*Autre*	*PEHD*	*Bonna*	*Total*
Validation M	362	1529	97	31	103	88	2210
Validation Casses	367	1500	95	22	101	84	2168
Observé	388	1588	106	14	126	72	2294

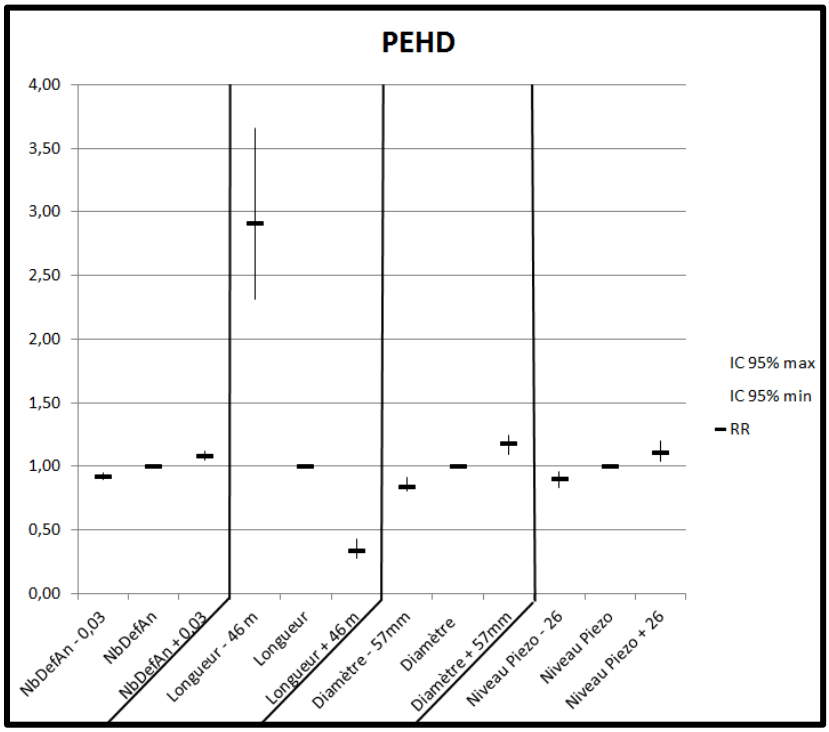
Tableau 1 : Comparaison validation M, et validation Casses avec le nombre de de défaillance réelle observé

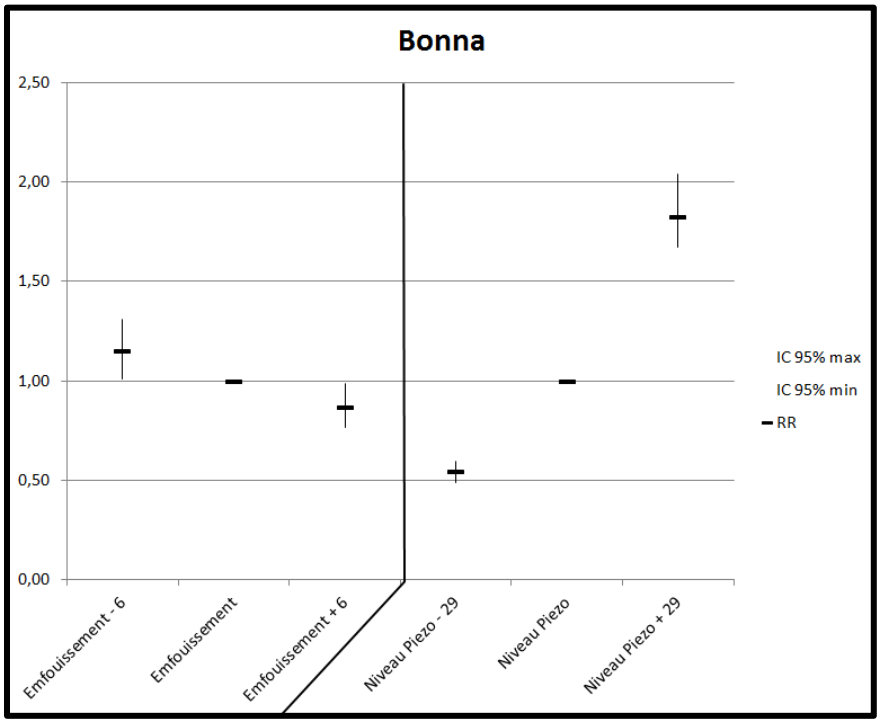
VII WeiCo

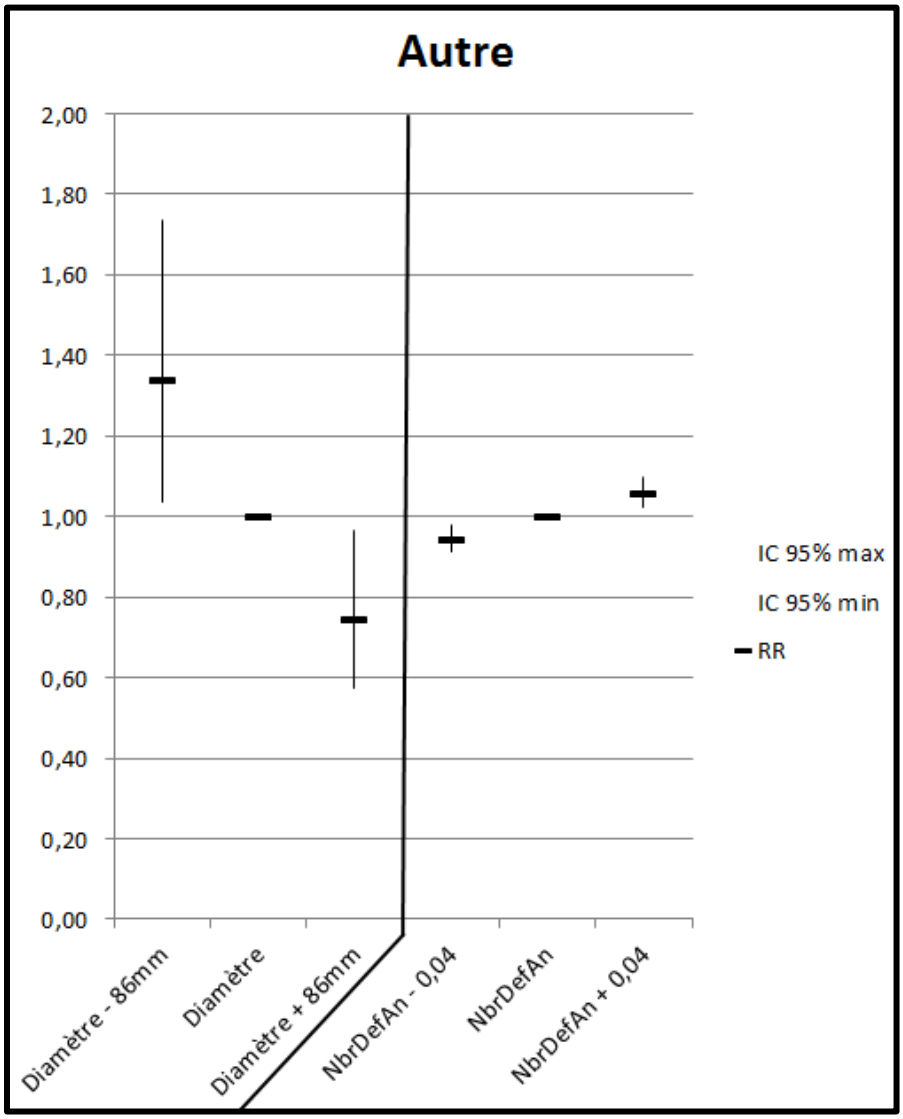

Acier
1,60
1,40
1,20
1,00
0,80
0,60
0,40
0,20
0,00
NbDefAn - 0,02
NbDefAn
NbDefAn + 0,02
Longueur - 24 m
Longueur
Longueur + 24 m
Diamètre - 293mm
Diamètre
Diamètre + 293mm
Niveau Piezo - 29
Niveau Piezo
Niveau Piezo + 29
IC 95% max
IC 95% min
RR


Fonte grise
1,60
1,40
1,20
1,00
0,80
0,60
0,40
0,20
0,00
NbDefAn - 0,04
NbDefAn
NbDefAn + 0,04
Longueur - 56 m
Longueur
Longueur + 56 m
Diamètre - 50mm
Diamètre
Diamètre + 50mm
Niveau Piezo - 25
Niveau Piezo
Niveau Piezo + 25
IC 95% max
IC 95% min
RR


Fonte ductile
2,50
2,00
1,50
1,00
0,50
0,00
NbDefAn - 0,02
NbDefAn
NbDefAn + 0,02
Longueur - 47 m
Longueur
Longueur + 47 m
Diamètre - 71mm
Diamètre
Diamètre + 71mm
Niveau Piezo - 25
Niveau Piezo
Niveau Piezo + 25
IC 95% max
IC 95% min
RR


PEHD
4,00
3,50
3,00
2,50
2,00
1,50
1,00
0,50
0,00
NbDefAn - 0,03
NbDefAn
NbDefAn + 0,03
Longueur - 46 m
Longueur
Longueur + 46 m
Diamètre - 57mm
Diamètre
Diamètre + 57mm
Niveau Piezo - 26
Niveau Piezo
Niveau Piezo + 26
IC 95% max
IC 95% min
RR


Bonna
2,50
2,00
1,50
1,00
0,50
0,00
Emfouissement - 6
Emfouissement
Emfouissement + 6
Niveau Piezo - 29
Niveau Piezo
Niveau Piezo + 29
IC 95% max
IC 95% min
RR


Autre
2,00
1,80
1,60
1,40
1,20
1,00
0,80
0,60
0,40
0,20
0,00
Diamètre - 86mm
Diamètre
Diamètre + 86mm
NbrDefAn - 0,04
NbrDefAn
NbrDefAn + 0,04
IC 95% max
IC 95% min
RR

Scénario 7 (code F)

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7
Stratifié ?	Non			Diamètres	NDOA	Matériaux	
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[1995; 2004]	[1995; 2012]					
Statu quo ?	Oui		On arrête de renouveler	Oui			On arrête de renouveler

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

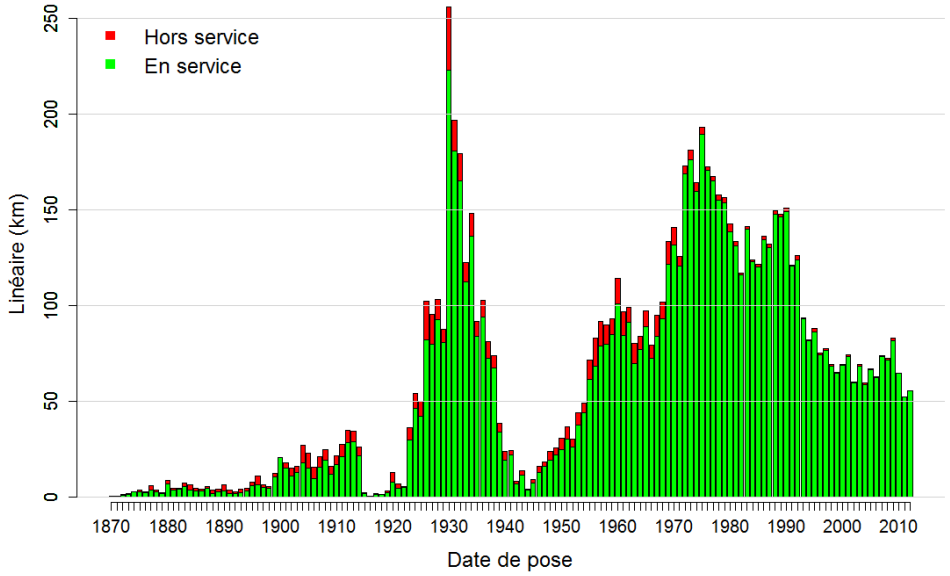


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [1995 ; 2012])

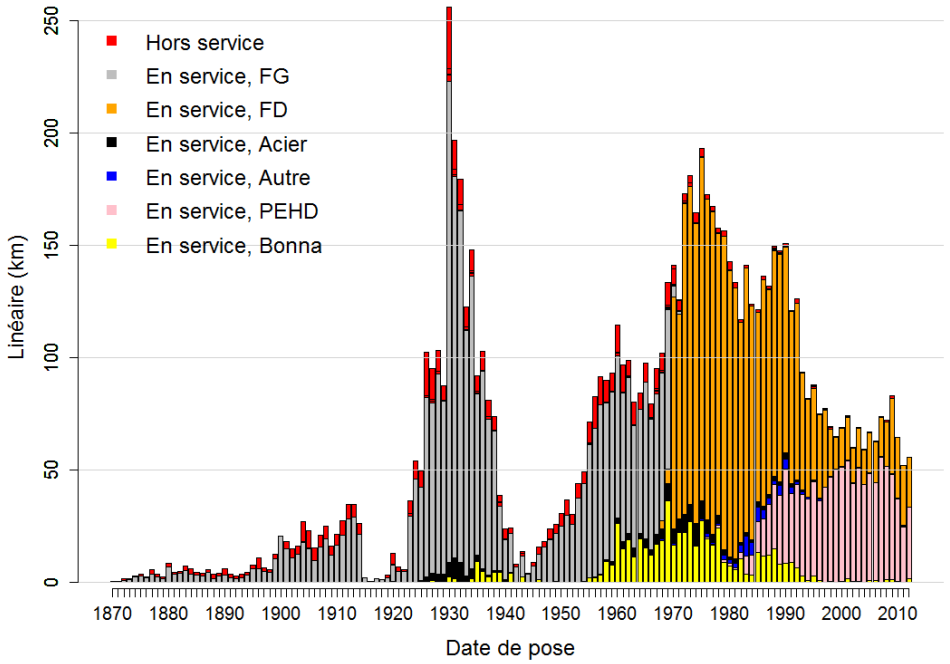


Figure 2 : Linéaire en service en 31/12/2013 à eauservice Lausanne en fonction des dates de pose, différencié selon 6 strates de matériau et selon le statut.

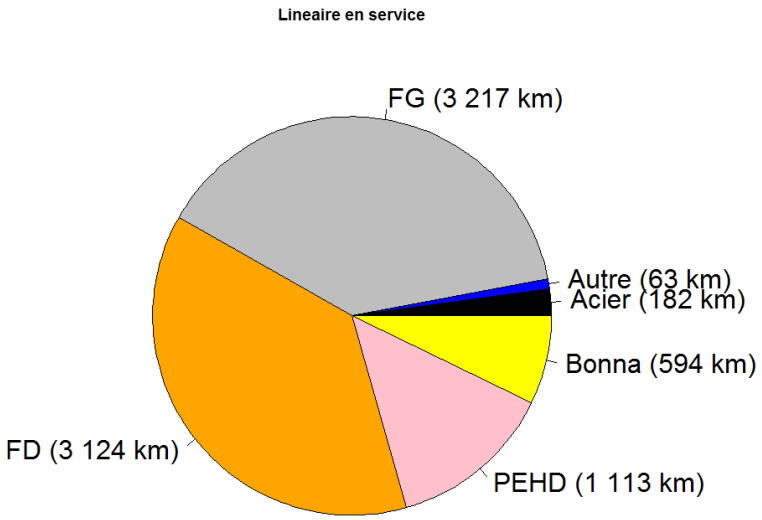


Figure 3 : Proportion du linéaire ES au 31/12/2012 en fonction des quatre strates de matériau

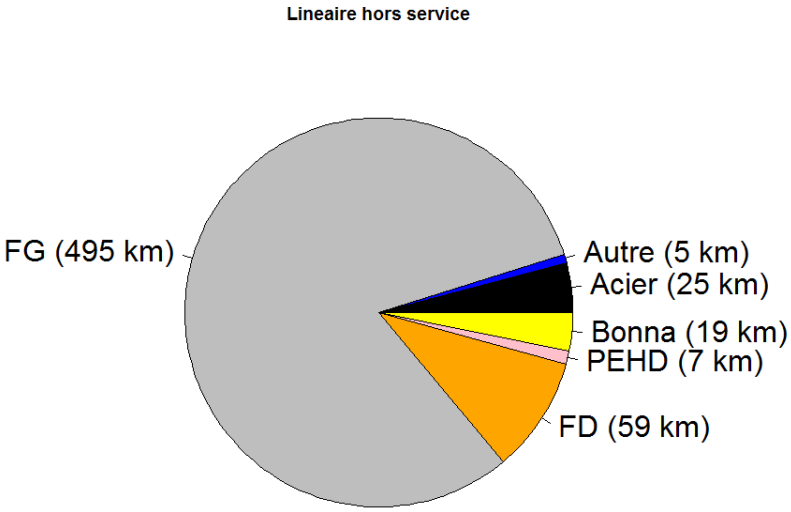


Figure 4 : Proportion du linéaire mis HS entre [1995, 2012] en fonction des quatre strates de matériau

I.2 Sortie en linéaire

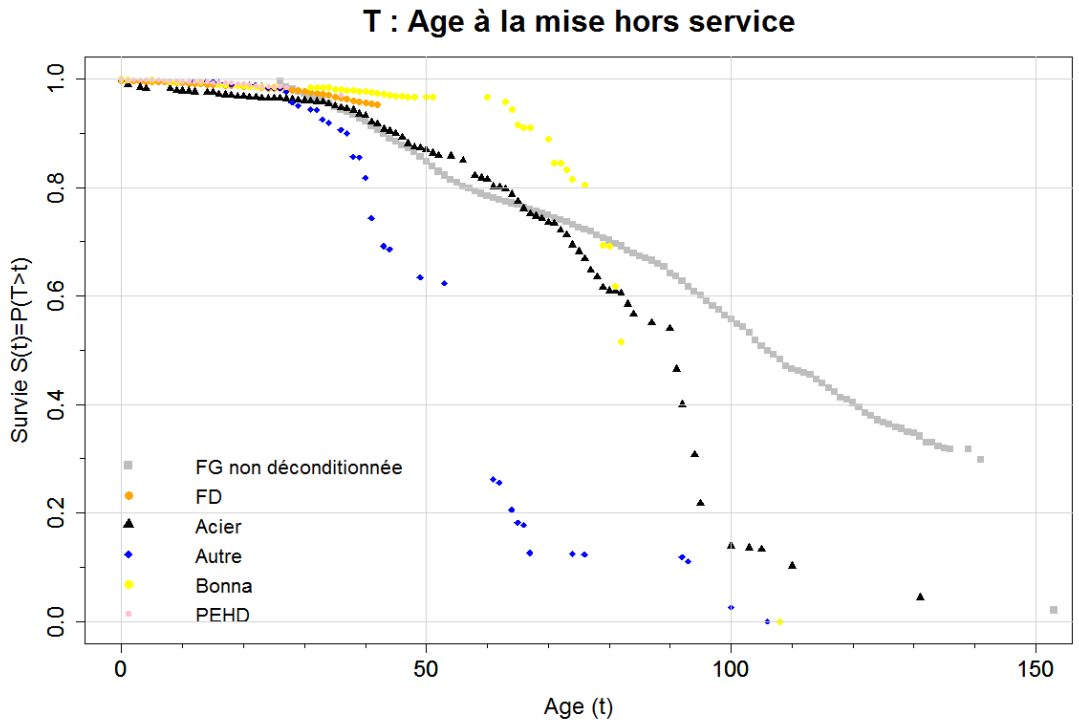


Figure 5 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tronçons par strate de matériau

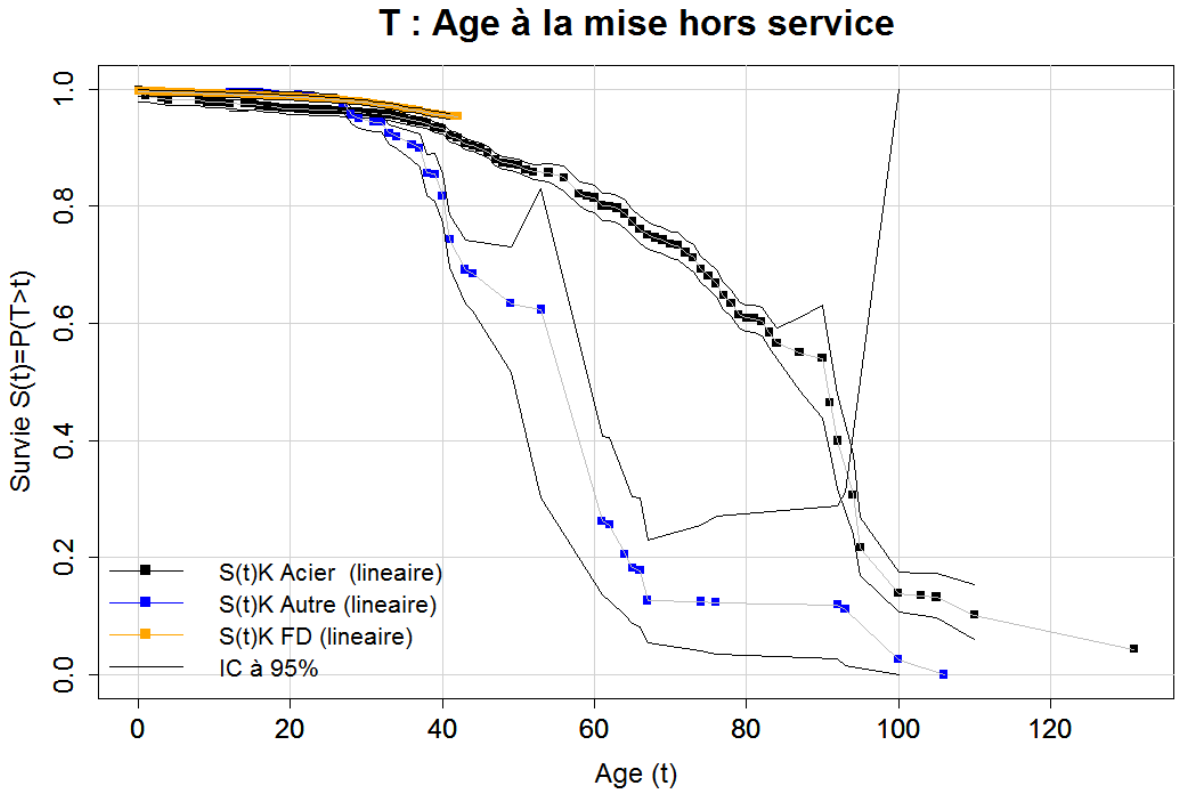


Figure 6 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tronçons par strate de matériau+IC

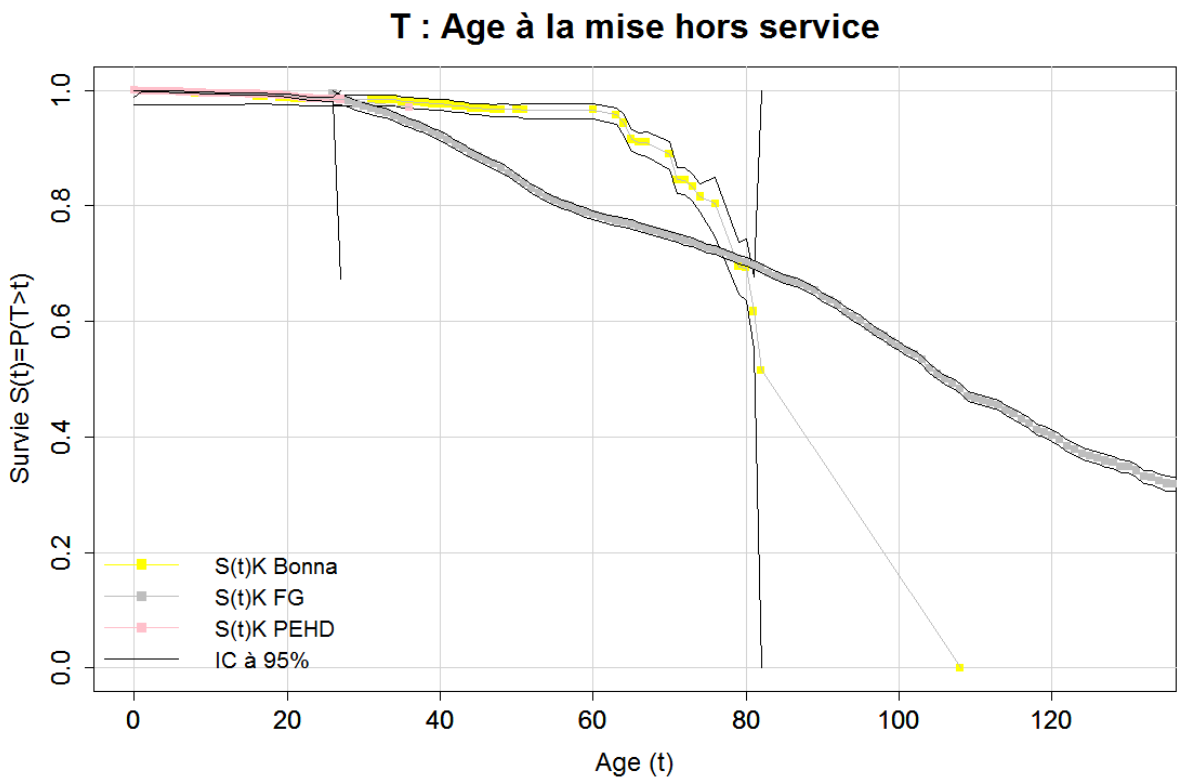


Figure 7 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tronçons par strate de matériau+IC

II Scénario F

- Photographie au 31 /12 /2012
- stratification par matériaux :
  - fonte grise
  - fonte ductile
  - Acier
  - Autre
  - Bonna
  - PEHD
- On renouvelle la fonte grise par de la fonte ductile
- On laisse vieillir le réseau

III Construction scénario prospectif F

III.1 Entrée en linéaire

Cf. : Figure 5

III.2 Sortie en linéaire

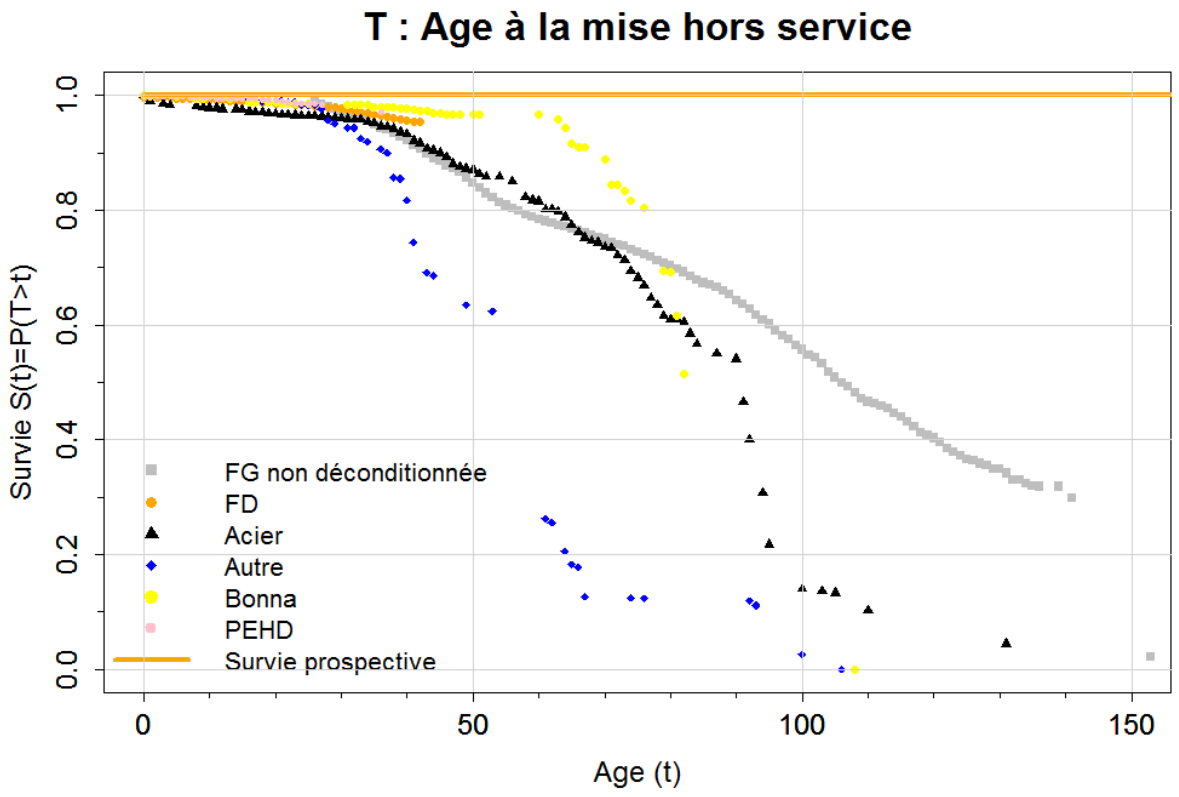


Figure 8 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait) par strate de matériau

IV Calcul de l'indicateur I3R

Pas de renouvellement, donc pas d'indicateur I1R, I2R et I1F

IV.1 Sortie I3R

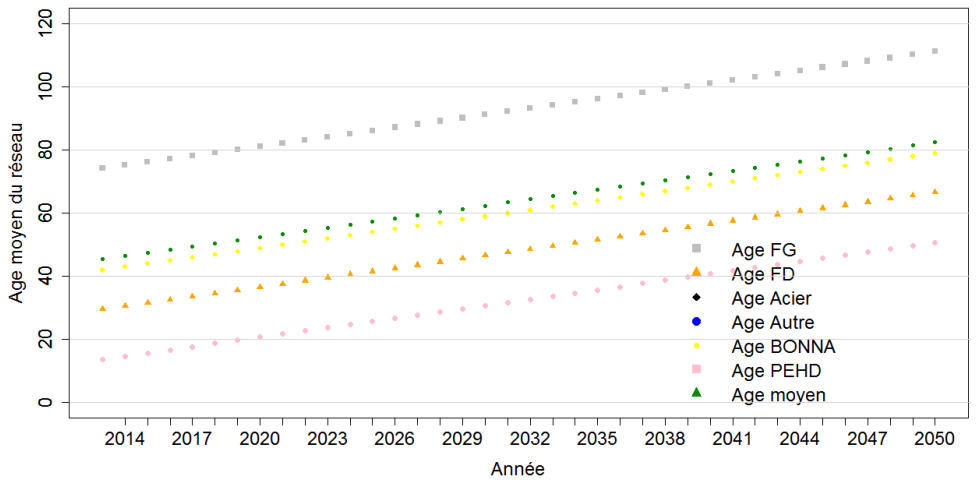


Figure 9 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2013 jusqu'en 2050 au SEDIF, scénario « on ne renouvelle plus, plusieurs courbes Matériaux», tronçons partitionnés par matériaux.

V Calcul de l'indicateur I1P

V.1 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 8

Covariable	Age (t)	Longueur (Z_1)	Diamètre (Z_2)	Reha2(Z_3)	Pression(Z_4)
Unité	Siècle	m	mm	oui	m

Tableau 1 : Covariables (et leurs unités) employés dans le modèle LEYP

Paramètres / Nom strate	$\propto$	δ	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
Acier	3.17	1.31	-1.53	0.44	-0.0027	0.7	_
Autre	3.68	1.35	-0.82	_	_	_	_
FD	2.93	2.36	-0.45	0.39	-0.0044	1.01	0.03
FG	1.38	1	-1.26	0.31	-0.0022	0.51	0.05

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle LEYP par strate

V.1 Entrée en tronçon

- Cf. Tableau 1 & Tableau 2

V.2 Sorties en tronçons

- Effectif :

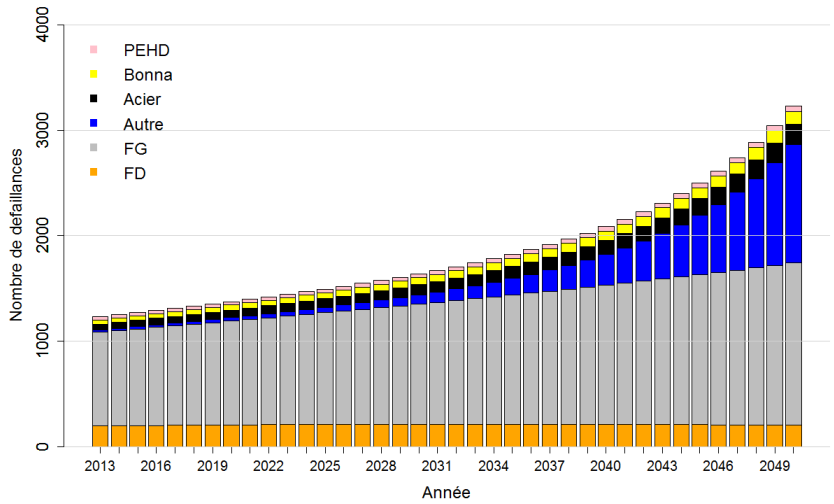


Figure 10 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2013 et 2050, scénario « on ne renouvelle plus, plusieurs courbes matériaux », tronçons partitionnés par matériau.

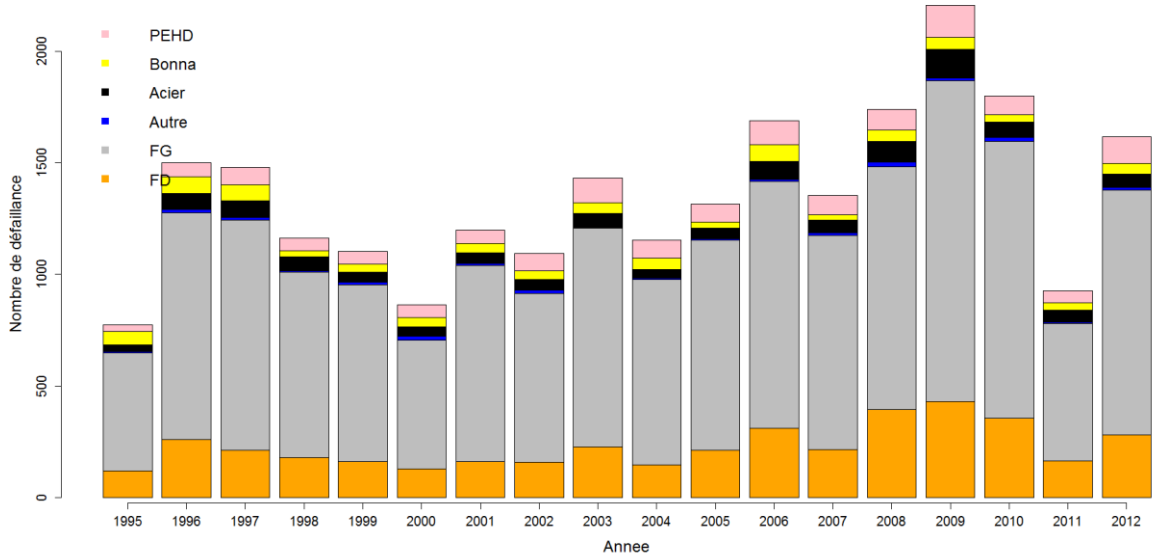


Figure 11 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2012 et mis hors service entre [1995, 2012], partitionné par le matériau

Annexe L : Scénarios à partir des données du Grand Lyon

	Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8
	Stratifié ?	Non						Diamètre	Matériaux
	Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2002; 2005]	[2002; 2012]	On n'utilise pas la survie du Grand Lyon				[2002; 2012]	
	Statu quo ?	Oui		Survie SEDIF	Survie Lausanne	Survie entre SEDIF et Lausanne	On arrête de renouveler	Oui	
	Numéro scénario / Indicateurs	Rapport	Rapport	3	4	5	6	Rapport	Rapport
	Survie passée	X	X	X	X	X	X	X	X
I1R	Linéaire		X	X	X	X	X	X	
I2R	Tx renouvellement		X	X	X	X	X	X	
I3R	Âge moyen		X	X	X	X	X	X	
I1F	Coût renouvellement		X	X	X	X	X	X	
I1P	Nb Def Eq3			X	X	X	X		
I2F	Coût réparation								
I2P	Continuité					X	X		
I3P	Voirie					X	X		
I4P	Inondation					X	X		
I5P	Glissement					X	X		
I6P	Volume fuite								

Scénario 3 (code A)

Survie du SEDIF

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8
Stratifié ?	Non						Diamètre	Matériaux
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2002; 2005]	[2002; 2012]	On n'utilise pas la survie du Grand Lyon				[2002; 2012]	
Statu quo ?	Oui		Survie SEDIF	Survie Lausanne	Survie entre SEDIF et Lausanne	On arrête de renouveler	Oui	

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

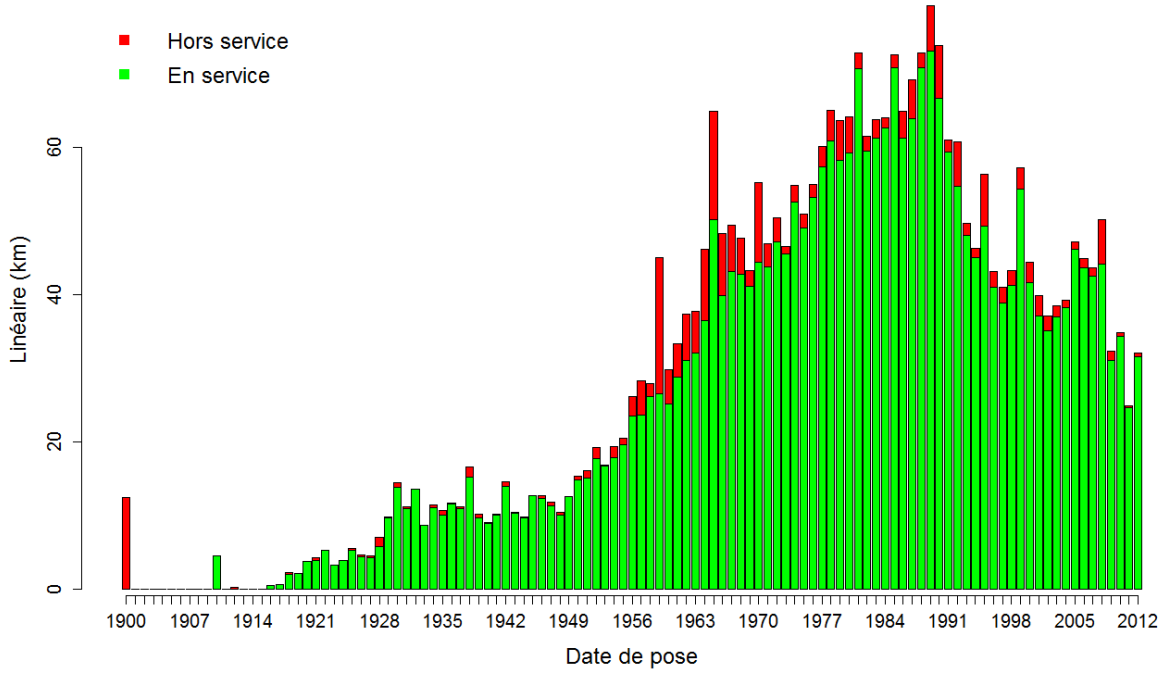


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002 ; 2012])

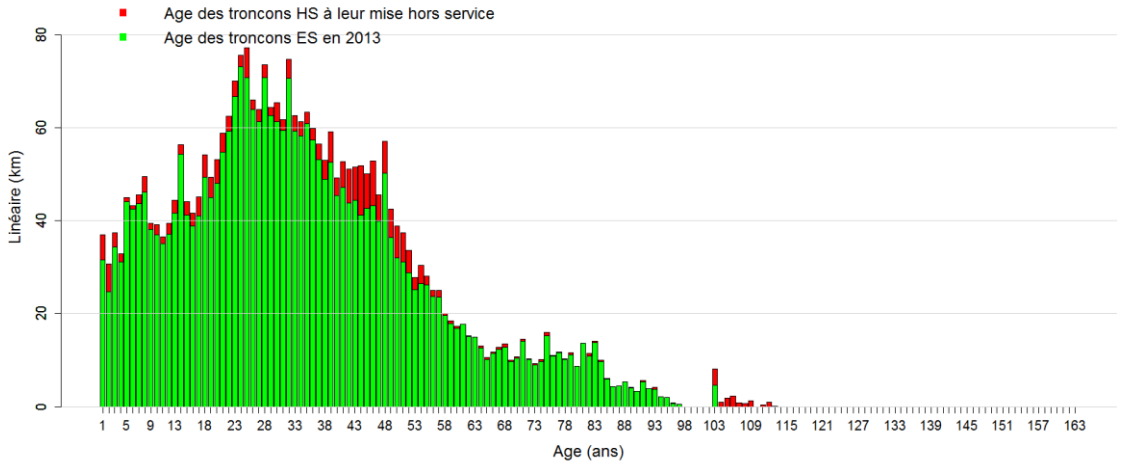


Figure 2 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2012 en fonction de leur âges (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002 ; 2012])

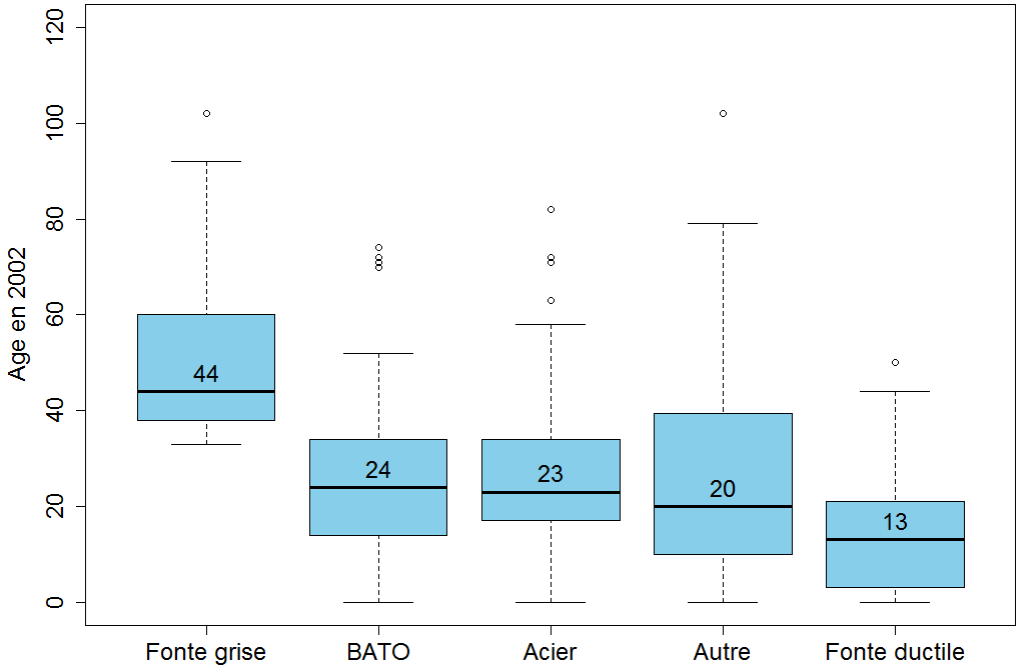


Figure 3 : Boite à moustache de l'âge par matériaux

I.2 Sortie en linéaire

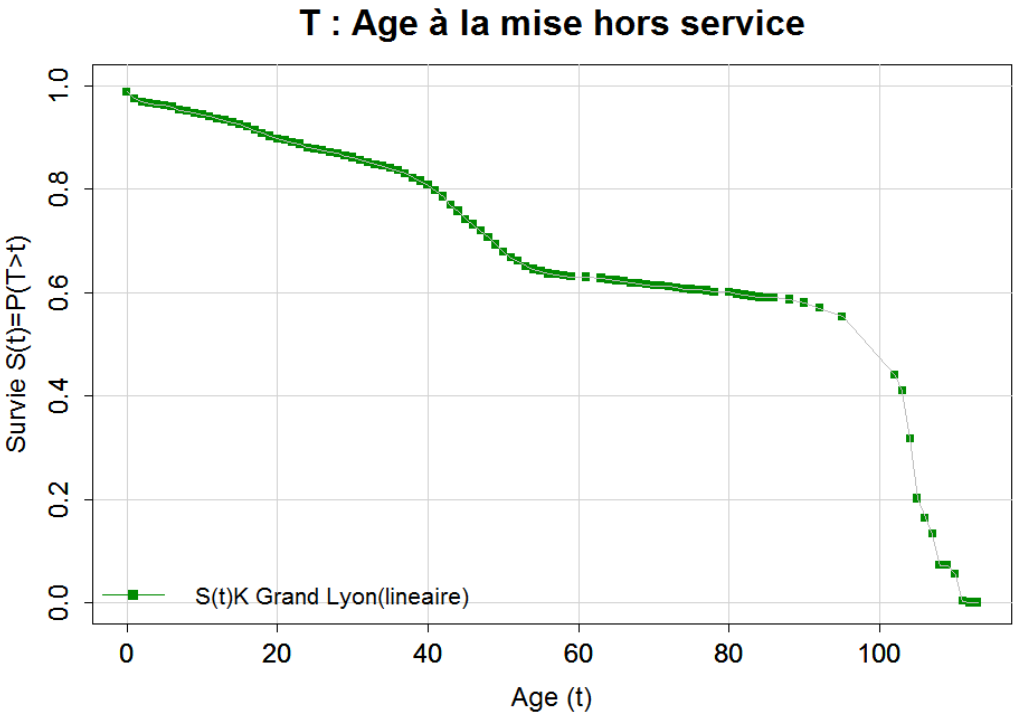


Figure 4 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons sans IC

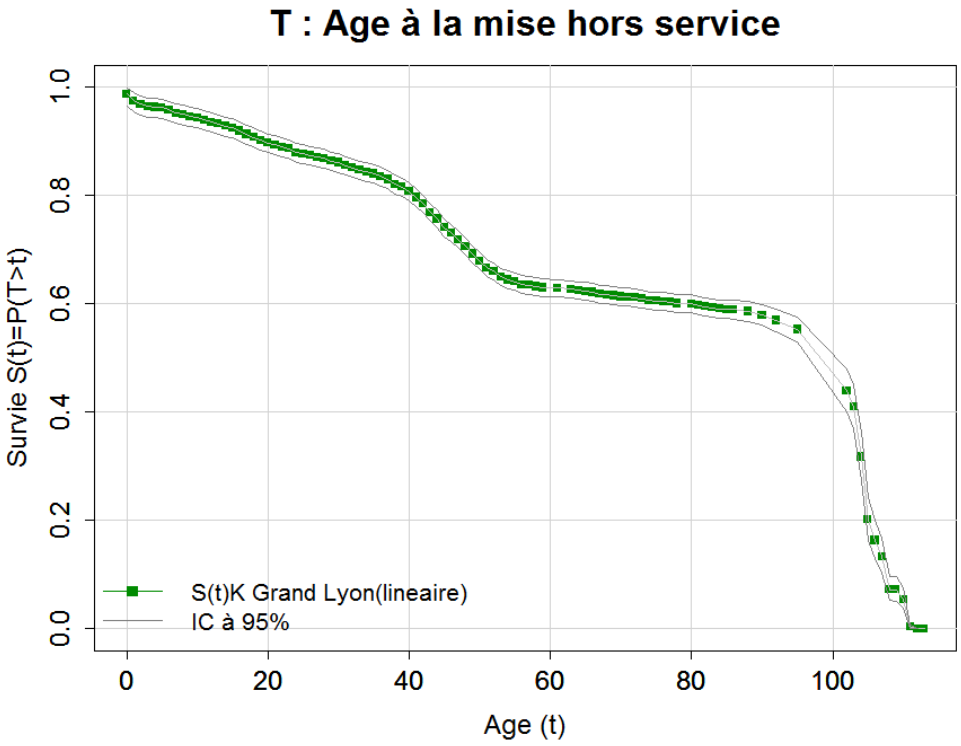


Figure 5 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons avec IC beta NB

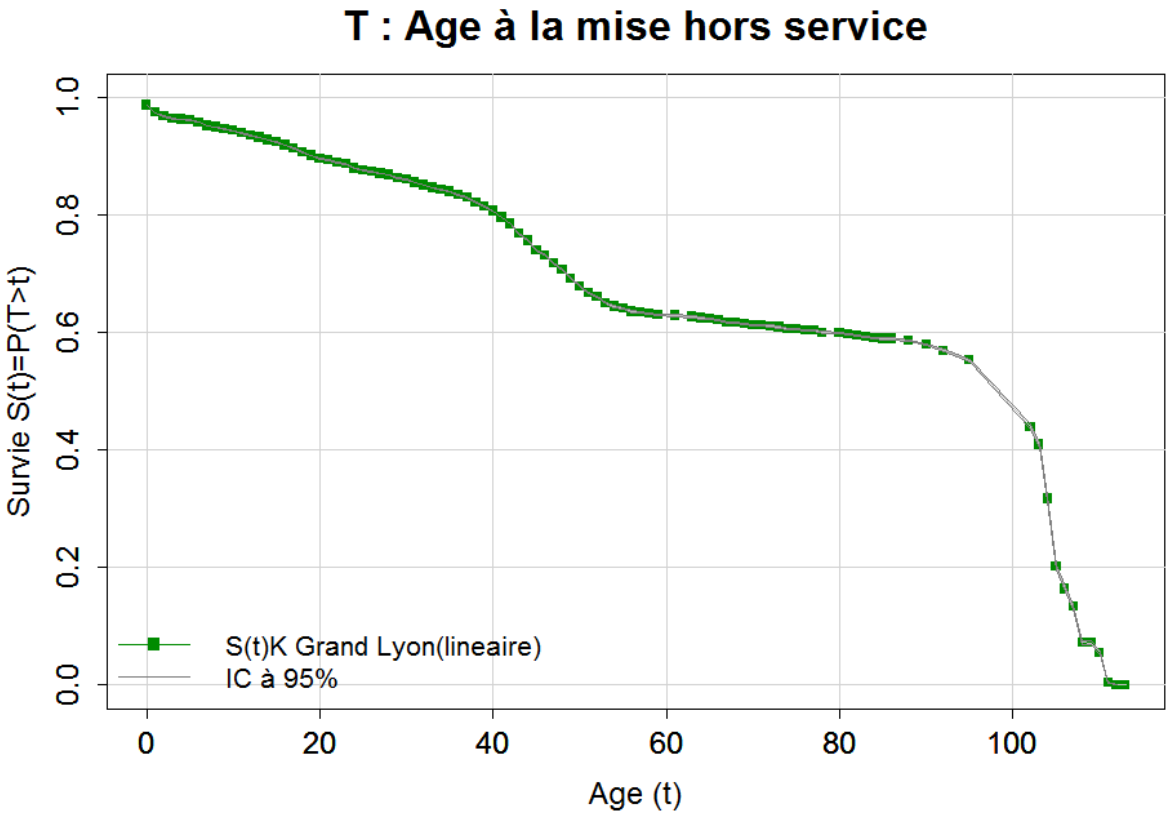


Figure 6 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons avec IC beta lin

I.1 Entrée en effectif

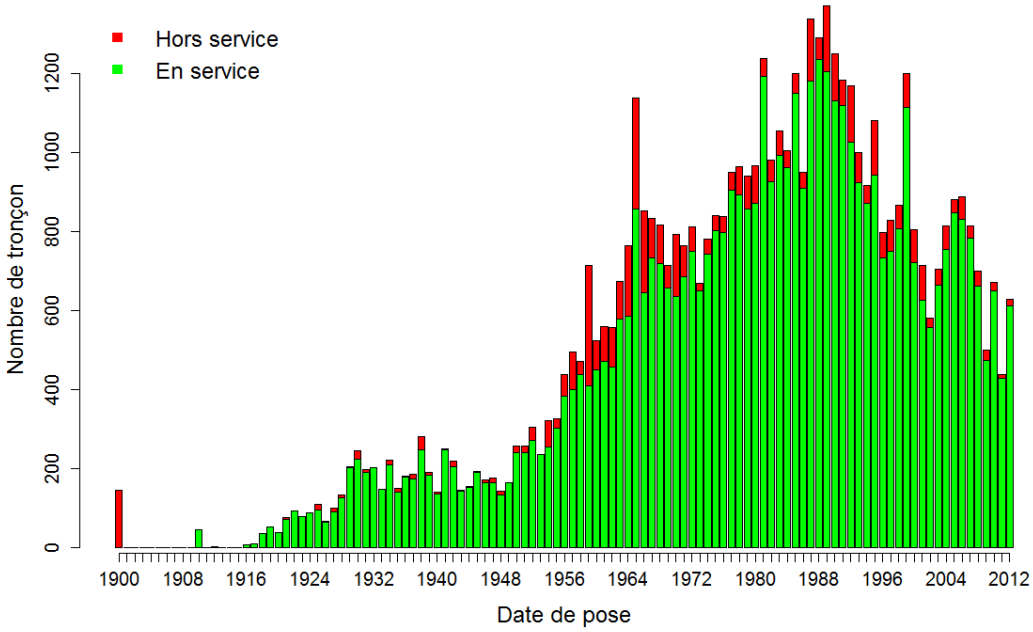


Figure 7 : Histogramme du nombre de tronçons En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002 ; 2012])

I.2 Sortie en effectif

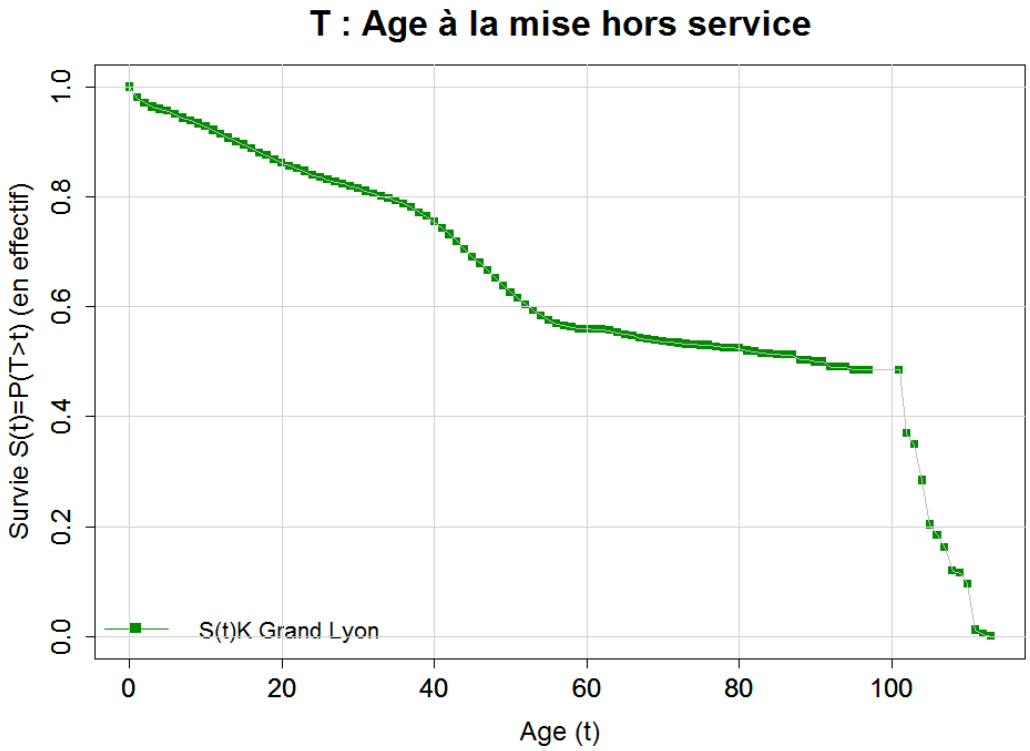


Figure 8 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en nombre de tronçons

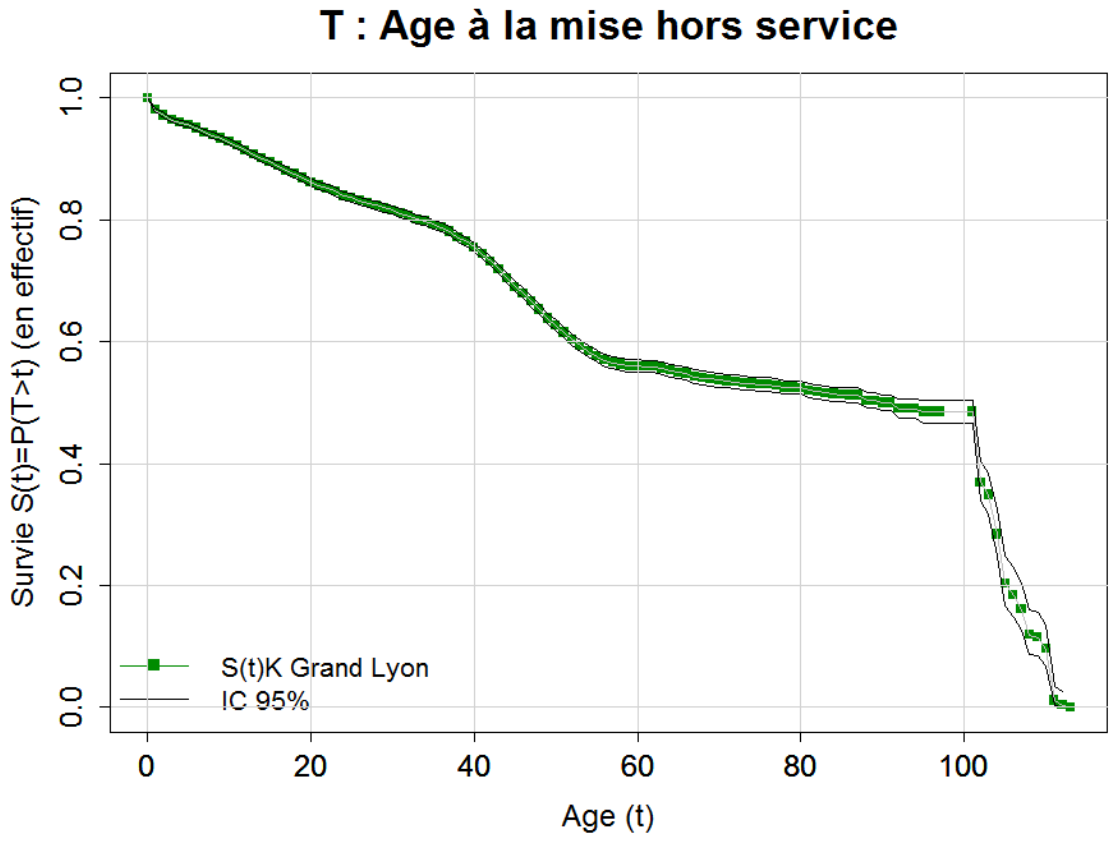


Figure 9 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en nombre de tronçons avec IC

II Scénario 3 (code A)

- Groupe de tronçons : tout le réseau
- Photographie au 31 /12 /2012
- Pas de stratification
- Courbes de survie prospectives = courbe de survie du SEDIF

III Construction scénario prospectif

III.1 Entrée en linéaire

Cf. : Figure 4

III.2 Sortie en linéaire

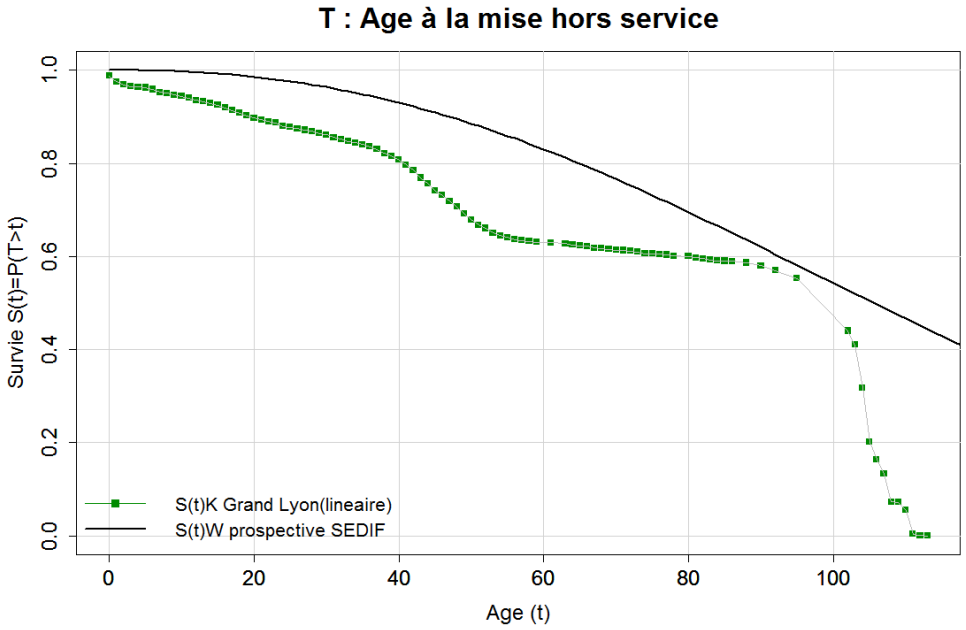


Figure 10 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait)

III.1 Entrée en effectif

Cf. : Figure 8

III.2 Sortie en effectif

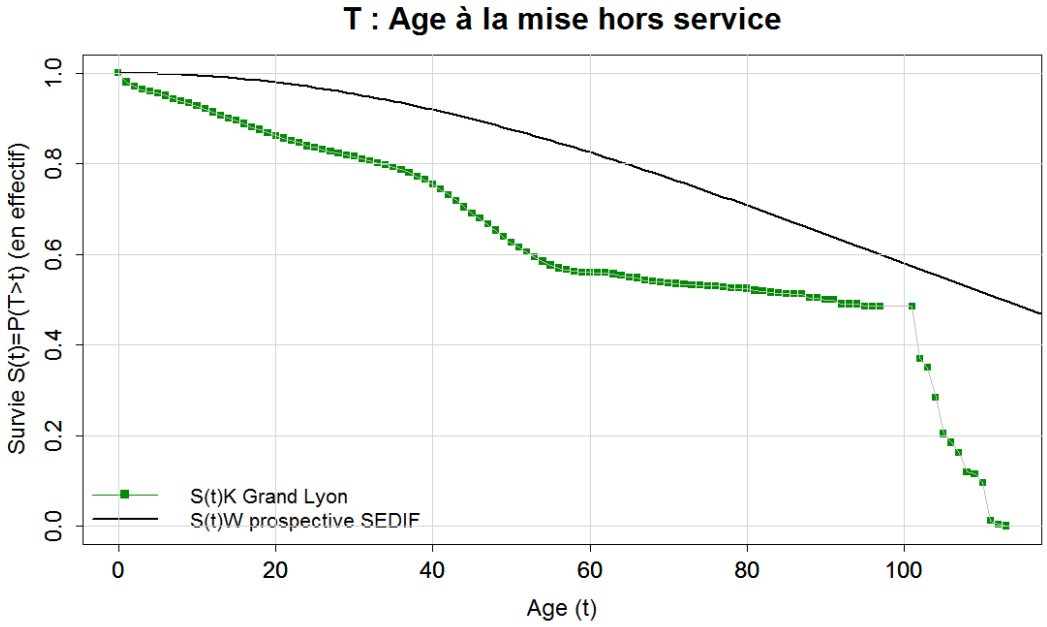


Figure 11 : Courbes de survie prospective en effectif (trait)

III.3 Comparaison des sorties en linéaire et en effectif

Figure 12 : Comparaison des courbes de survie prospectives en effectif et en linéaire

IV Calcul des indicateurs I1R, I2R et I3R

IV.1 Entrée

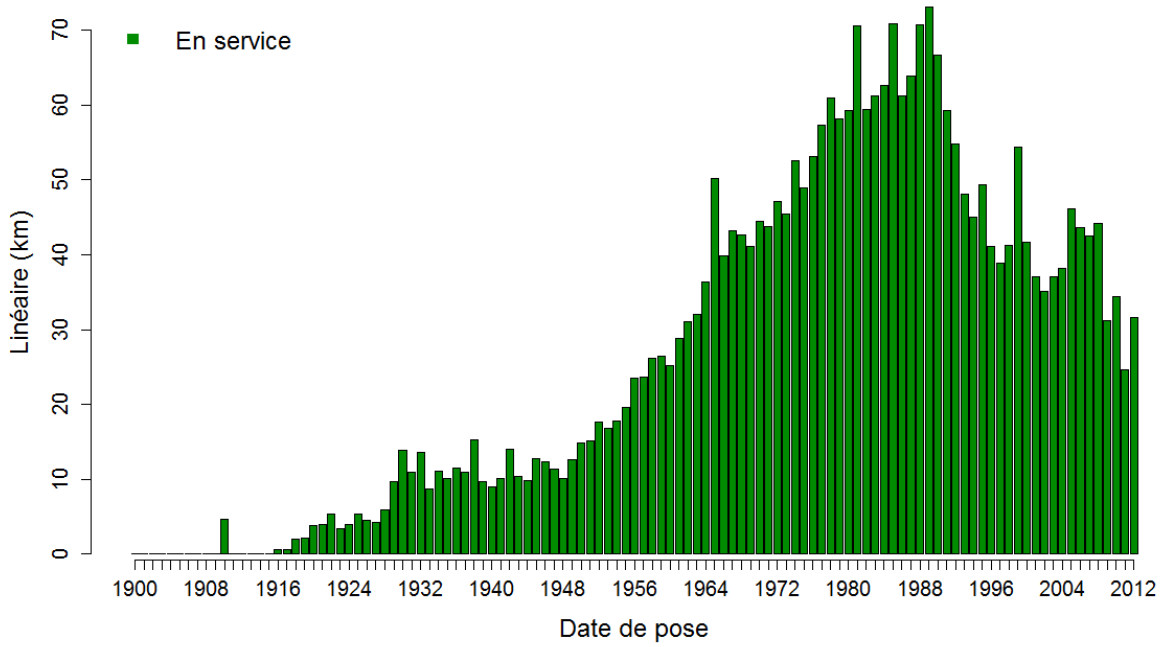


Figure 13 : Linéaire en service (ES) au 31/12/2012

IV.2 Sortie

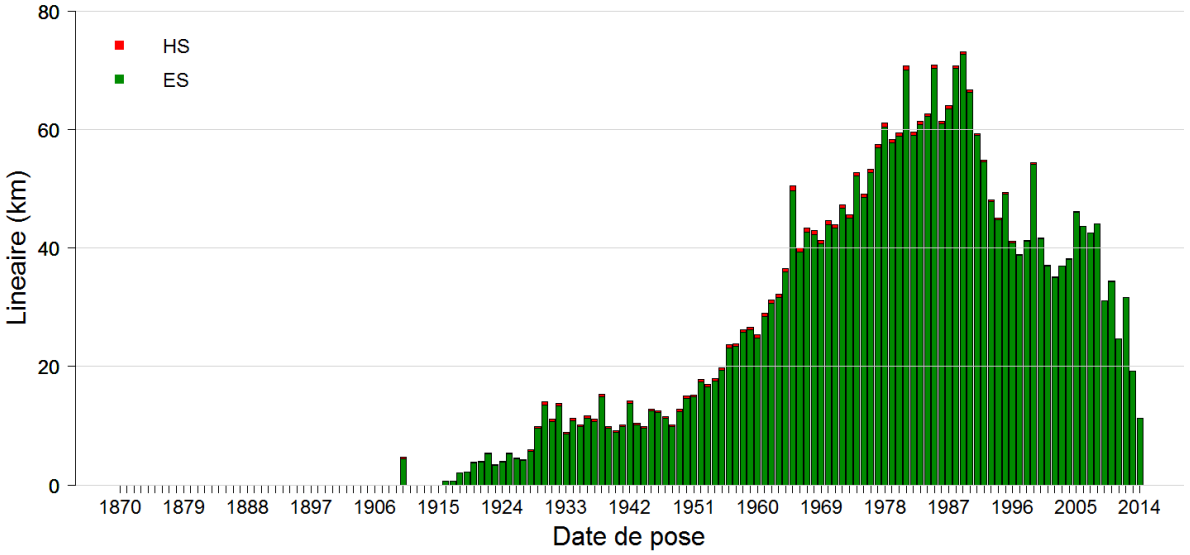


Figure 14 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2013, photographie de la situation en 2013.

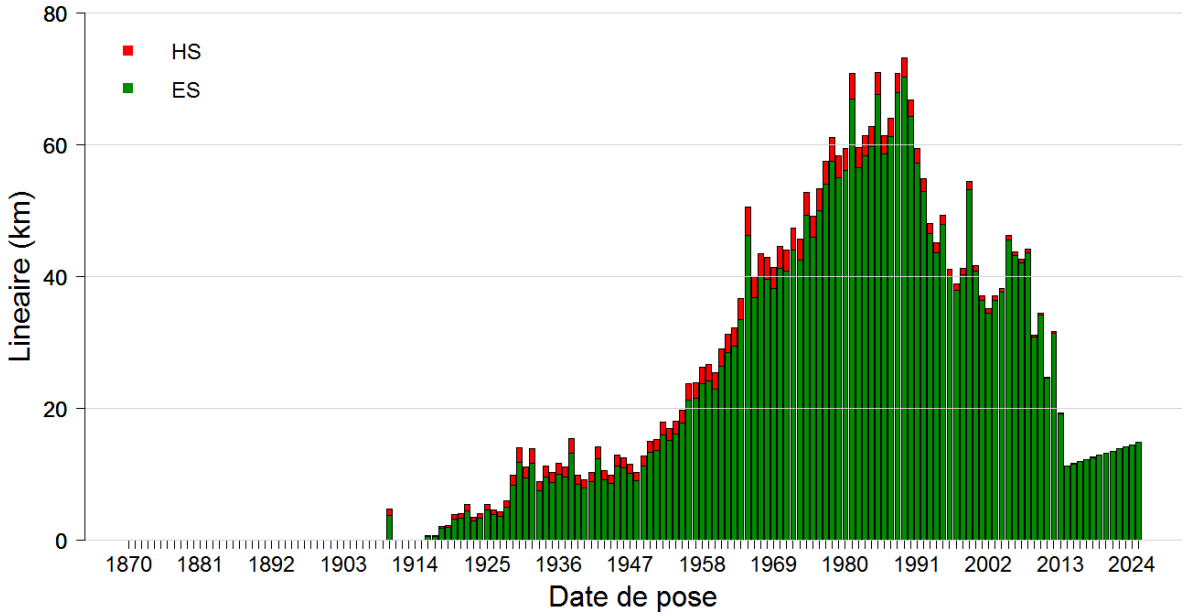


Figure 15 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2025, photographie de la situation en 2025

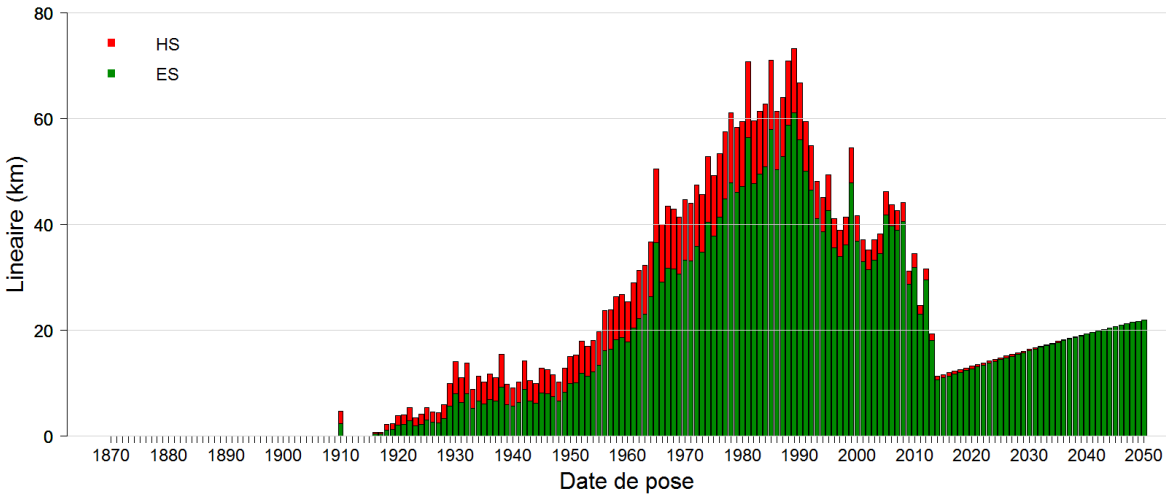


Figure 16 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2050, photographie de la situation en 2050.

IV.1 Sortie I2R

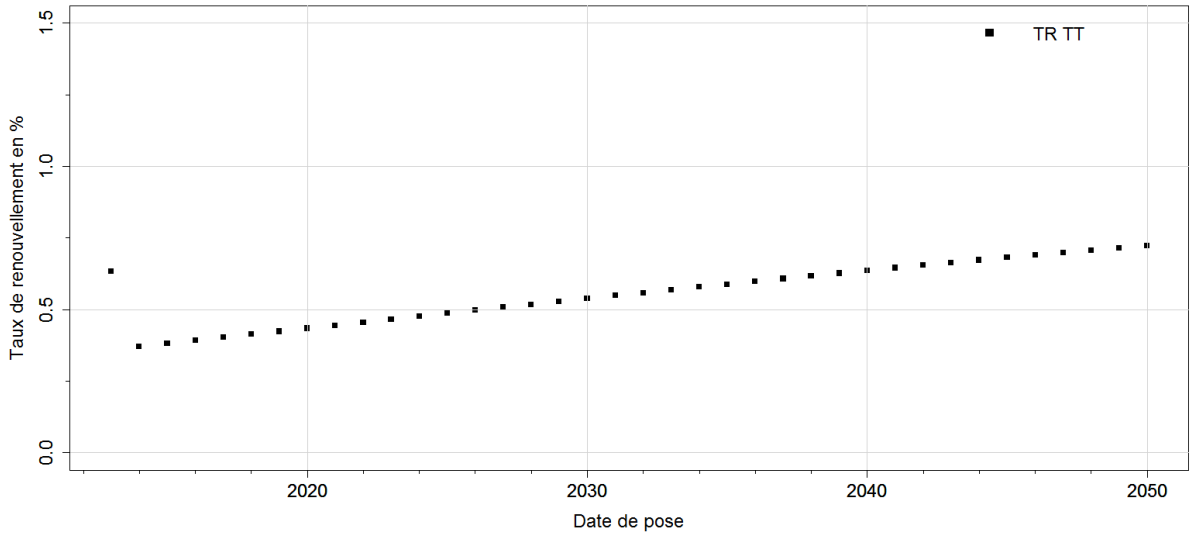


Figure 17 : Prévision des taux de renouvellement futurs de 2013 jusqu'en 2050 pour les tronçons.

IV.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

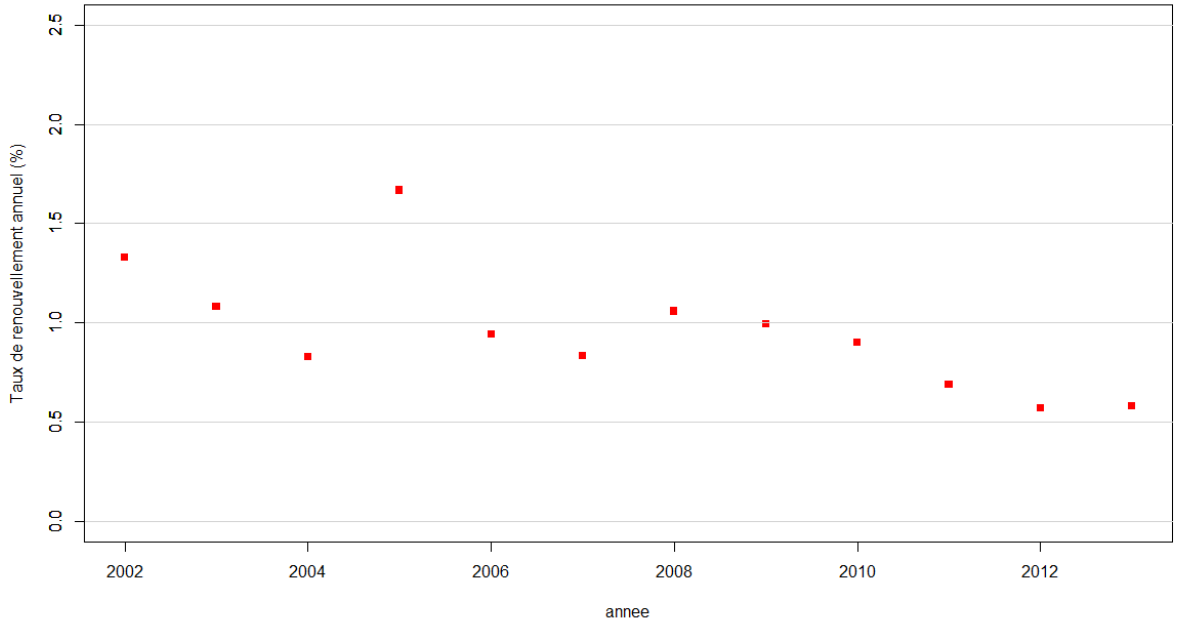


Figure 18 : Taux de renouvellement passé de 2001 à 2013 pour les tronçons.

IV.1 Sortie I3R

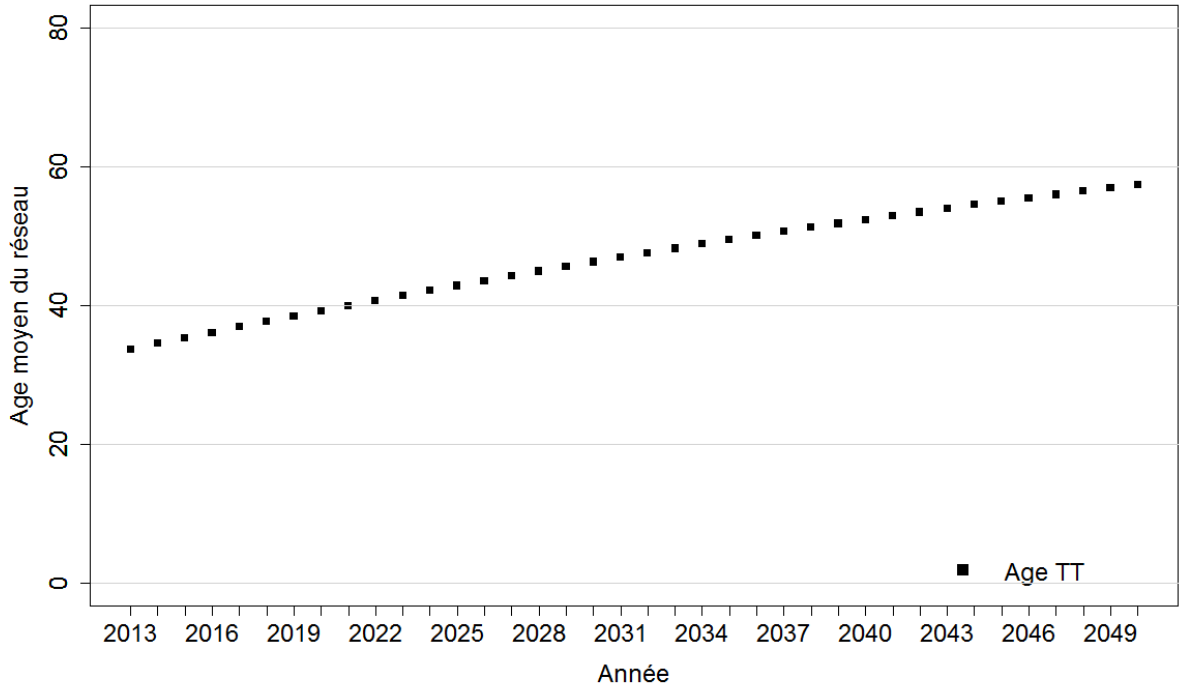


Figure 19 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2013 jusqu'en 2050 au Grand Lyon

V Calcul de l'indicateur I1F

V.1 Entrée

Nom de la strate	Coût moyen
Toute strate	530 €/m

V.2 Sortie

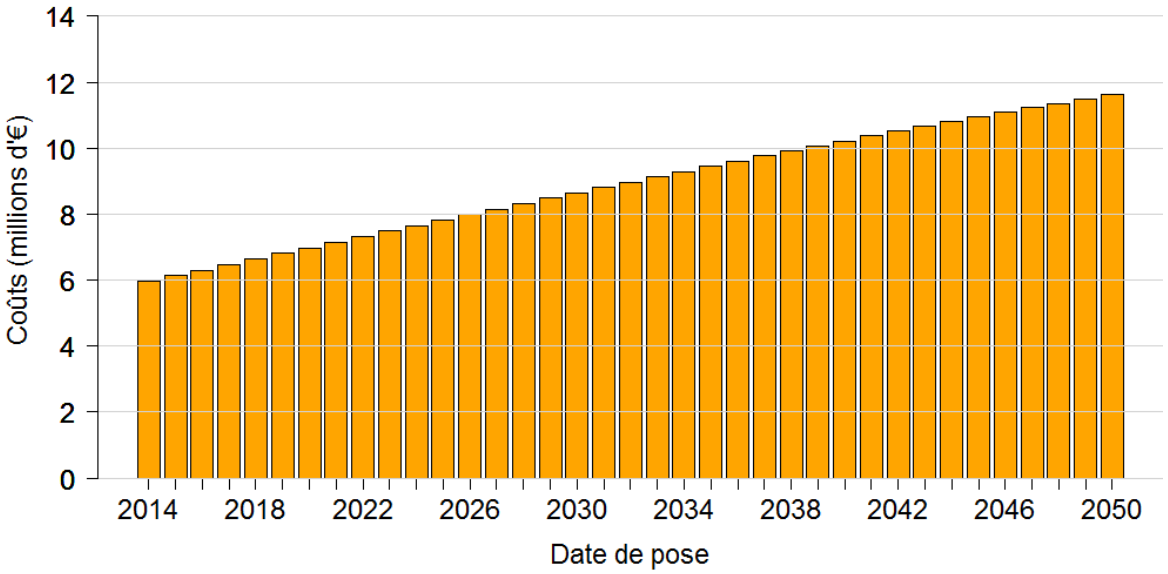


Figure 20 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2013 et 2050, Calcul de l'indicateur I1F

V.3 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 10

Covariable	Age (t)	Longueur (Z_1)	Diamètre (Z_2)
Unité	Siècle	m	mm

Tableau 1 : Covariables (et leurs unités) employés dans le modèle LEYP

Paramètres / Nom strate	$\propto$	δ	β_0	β_1	β_2
Toute strate	4.8	1.2	-2.6	0.5	-0.0029

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle LEYP

V.1 Entrée en tronçon

- Cf. Figure 11
- Cf. Tableau 1 & Tableau 2

V.2 Sorties en tronçons

- Effectif :

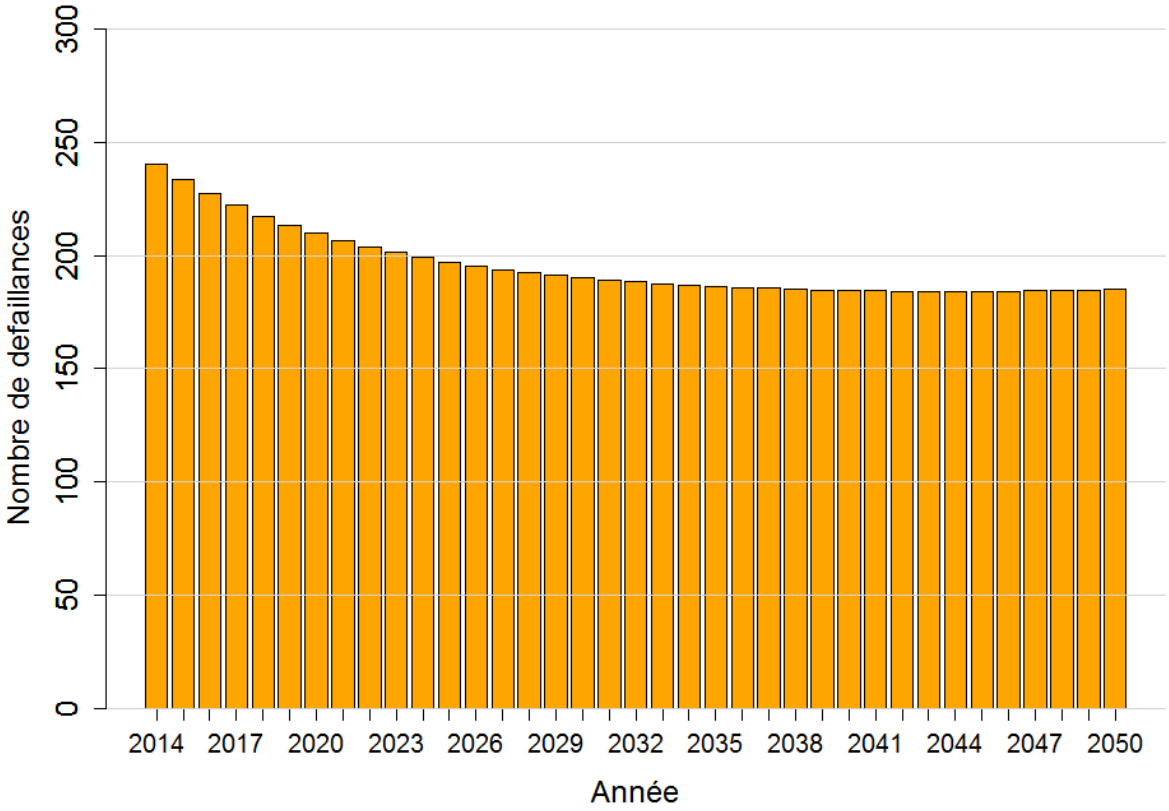


Figure 21 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2014 et 2050, scénario « statu quo » . Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif

V.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

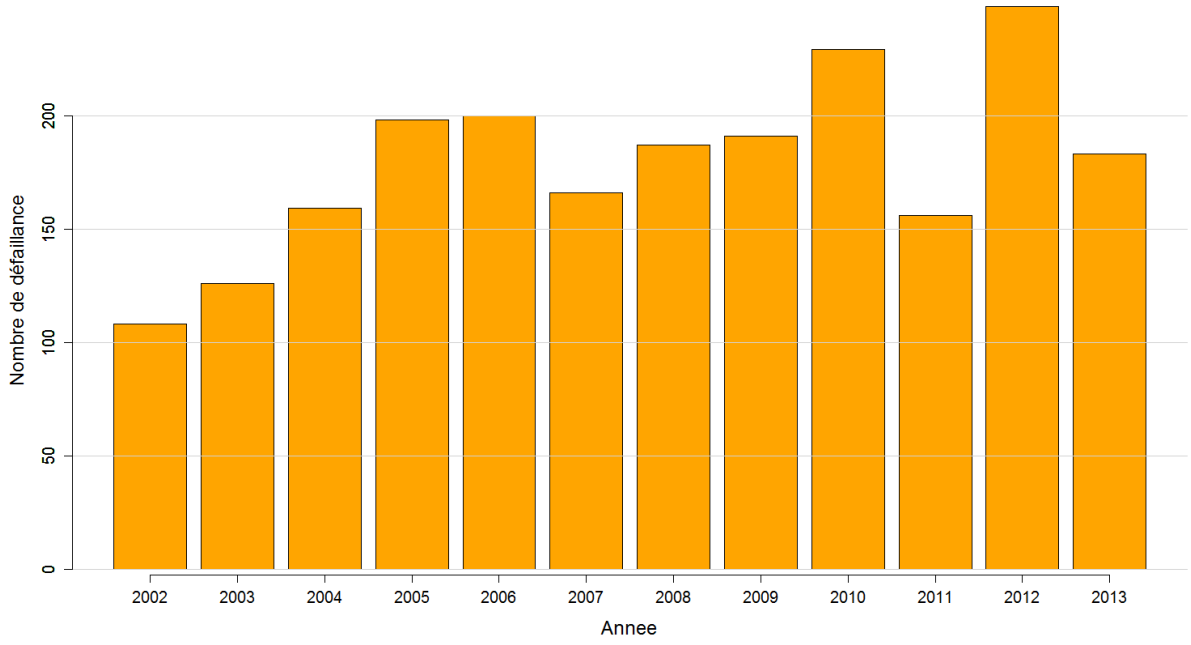


Figure 22 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2013

Scénario 4 (code B)

Survie Lausanne

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8
Stratifié ?	Non						Diamètre	Matériaux
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2002; 2005]	[2002; 2012]	On n'utilise pas la survie du Grand Lyon				[2002; 2012]	
Statu quo ?	Oui		Survie SEDIF	Survie Lausanne	Survie entre SEDIF et Lausanne	On arrête de renouveler	Oui	

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

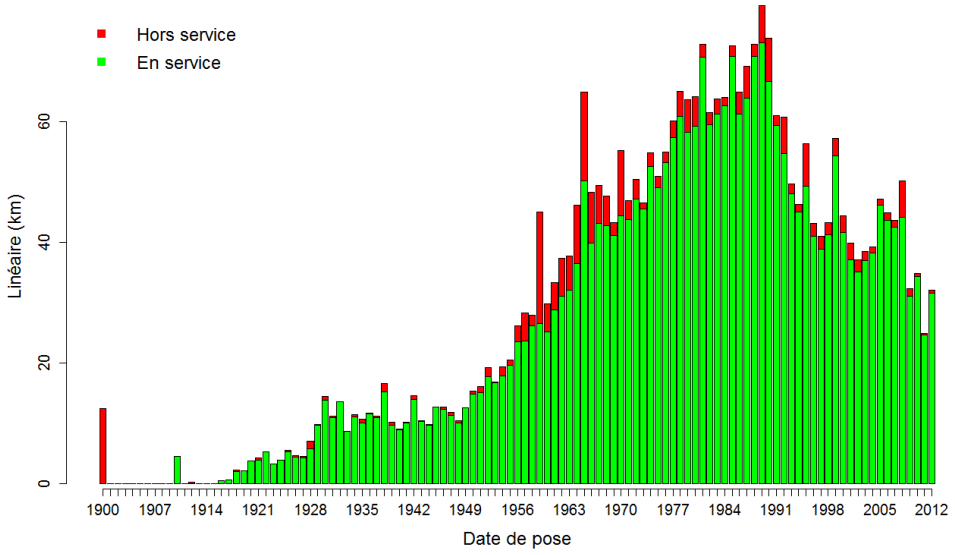


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002 ; 2012])

I.2 Sortie en linéaire

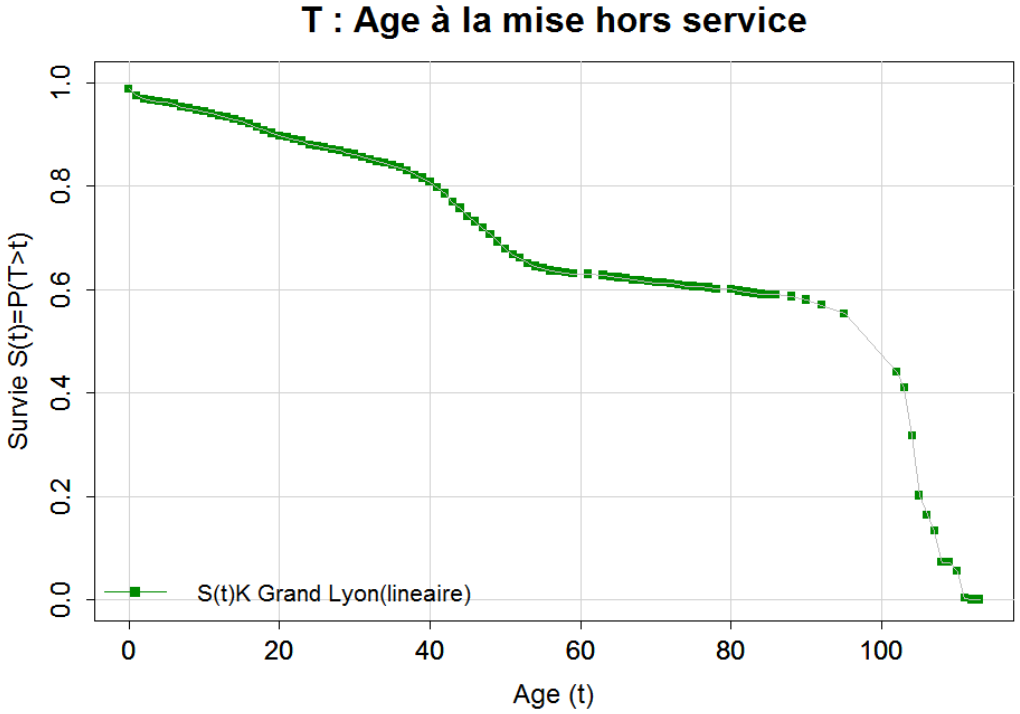


Figure 2 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons sans IC

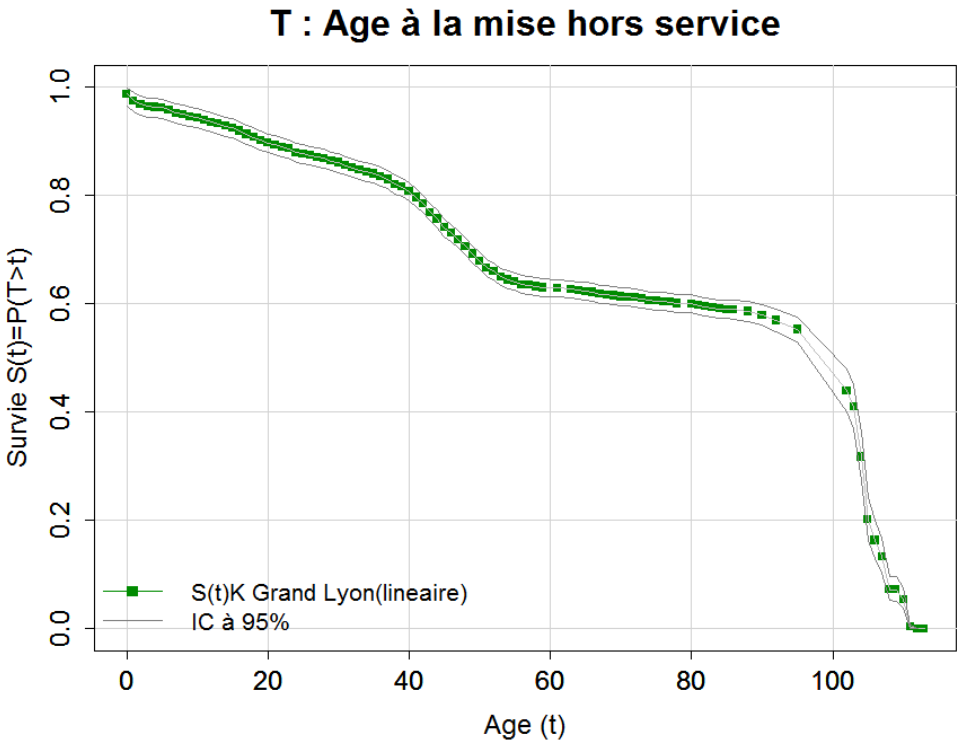


Figure 3 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons avec IC beta NB

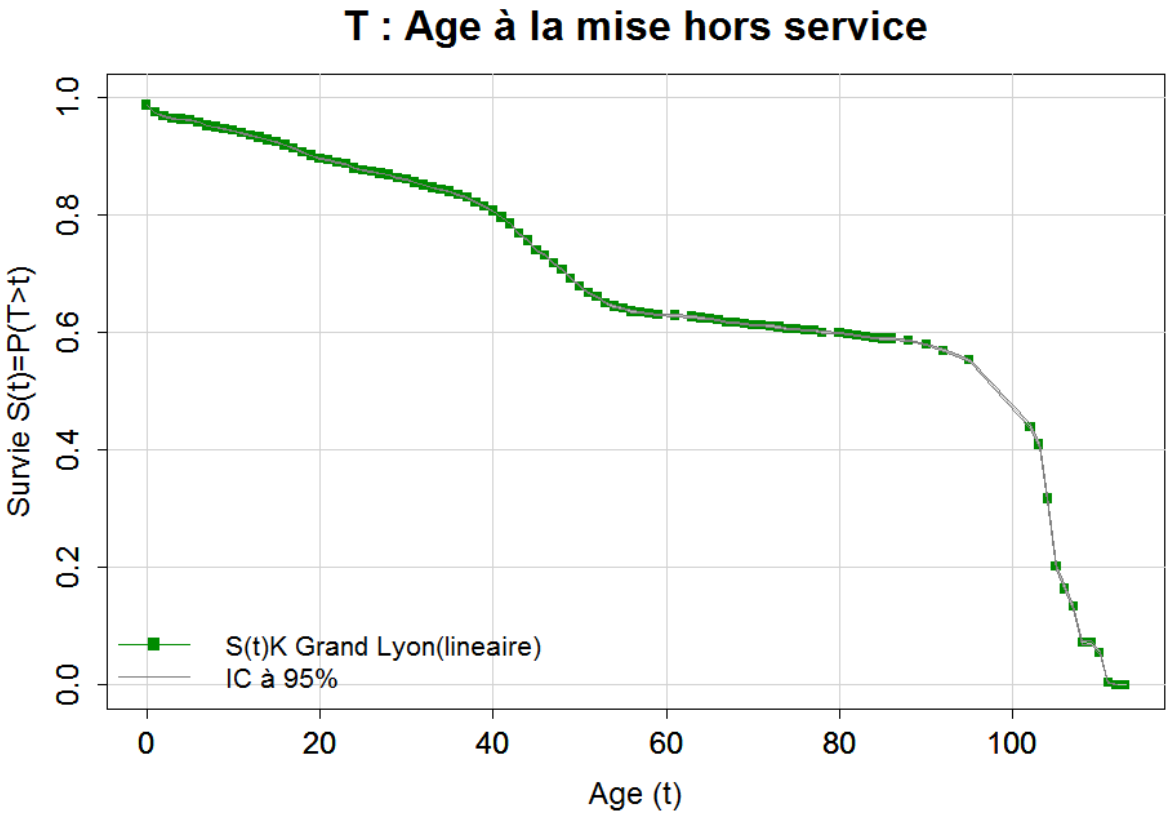


Figure 4 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons avec IC beta lin

I.1 Entrée en effectif

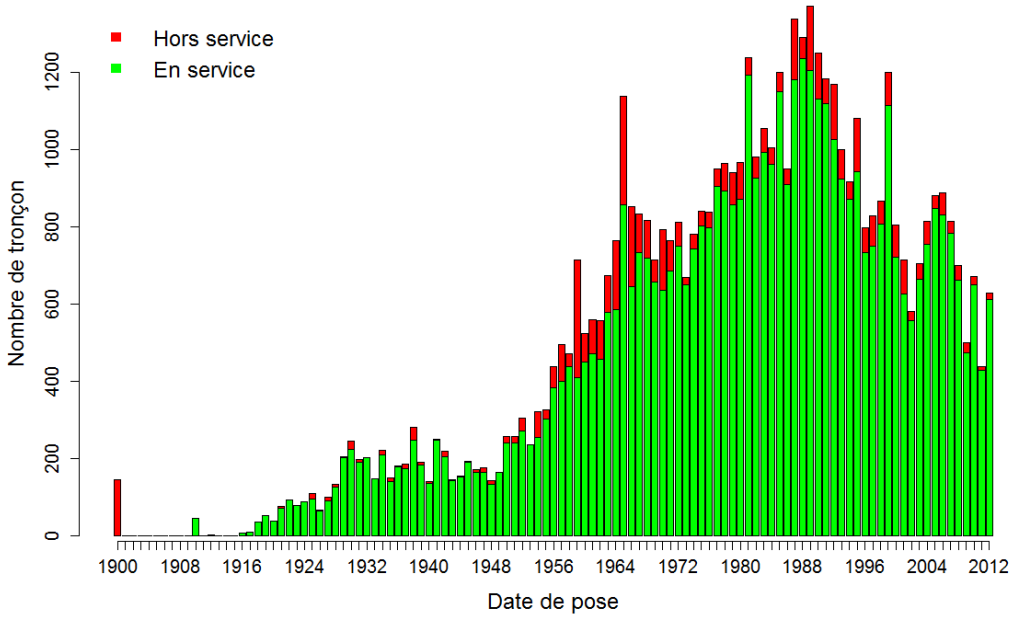


Figure 5 : Histogramme du nombre de tronçons En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002 ; 2012])

I.2 Sortie en effectif

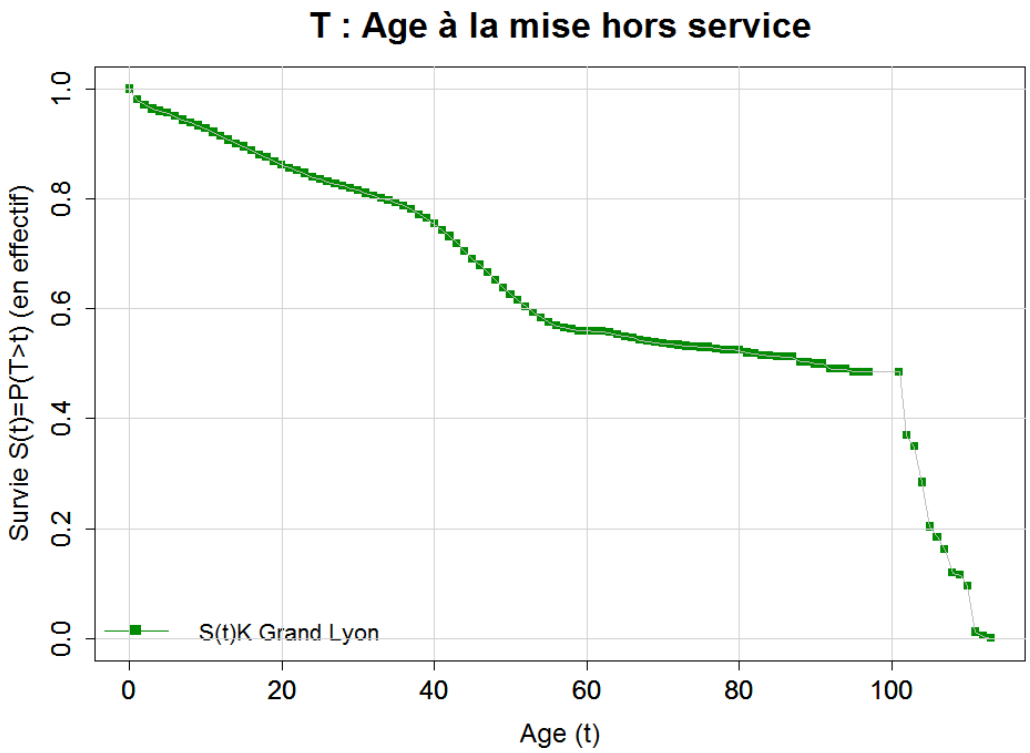


Figure 6 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en nombre de tronçons

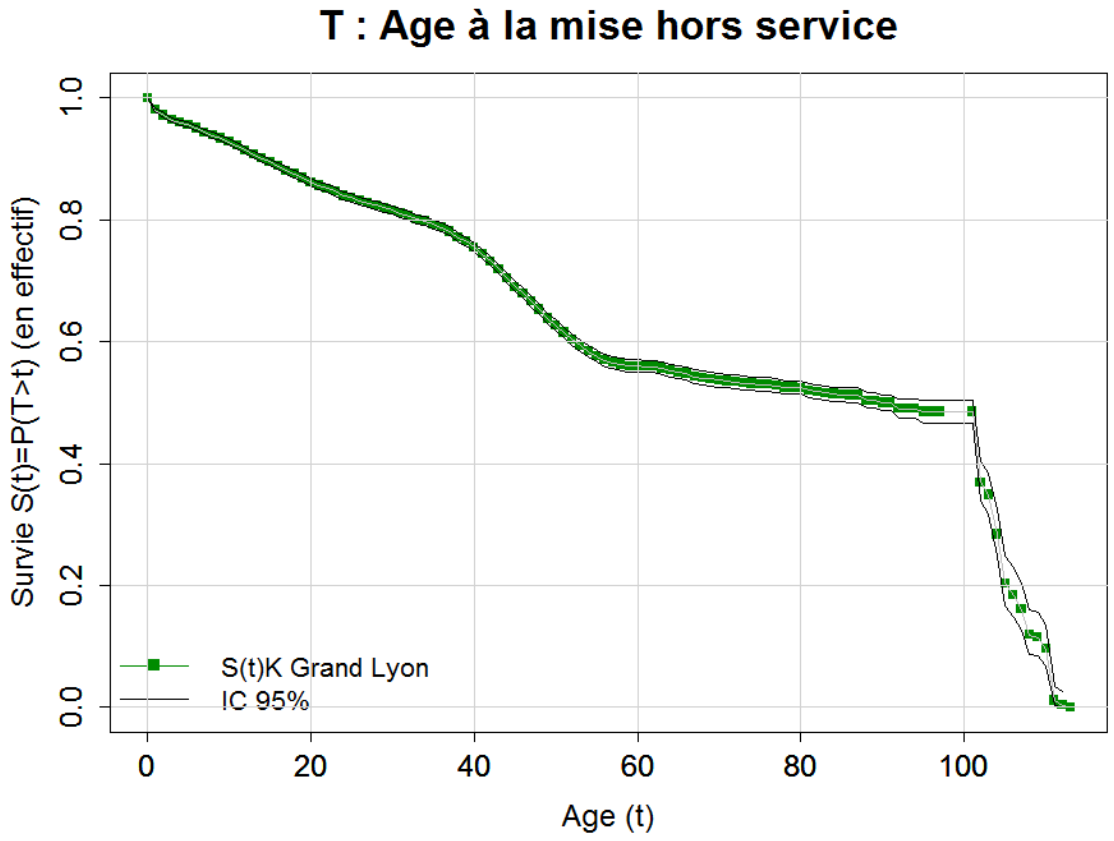


Figure 7 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en nombre de tronçons avec IC

II Scénario B

- Groupe de tronçons : tout le réseau
- Photographie au 31 /12 /2012
- Pas de stratification
- Courbes de survie prospectives = courbe de survie d'eauservice Lausanne

III Construction scénario prospectif B

III.1 Entrée en linéaire

Cf. : Figure 2

III.2 Sortie en linéaire

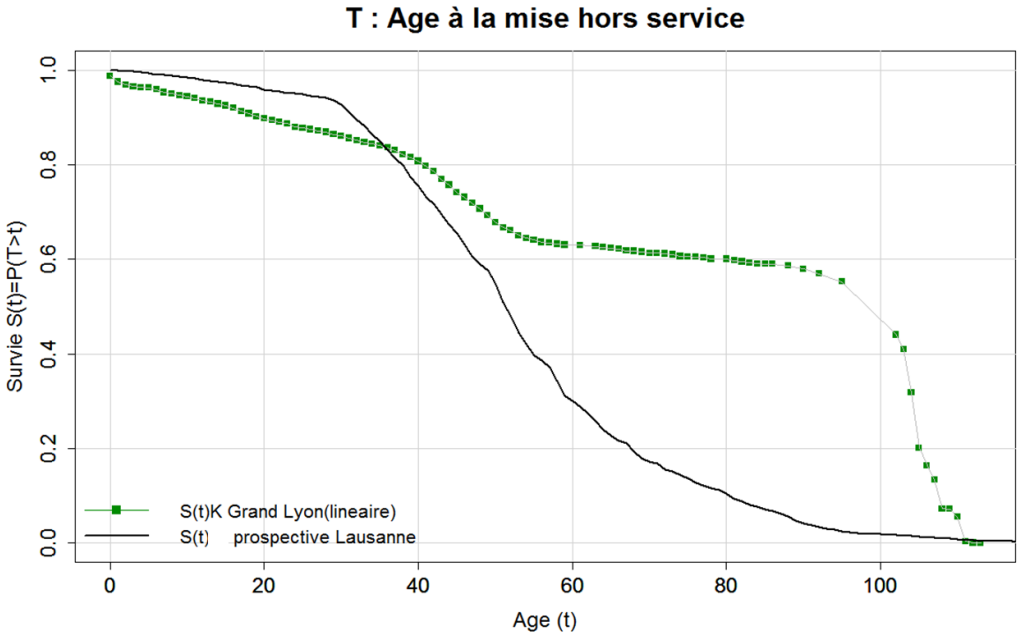


Figure 8 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait)

III.1 Entrée en effectif

Cf. : Figure 6

III.2 Sortie en effectif

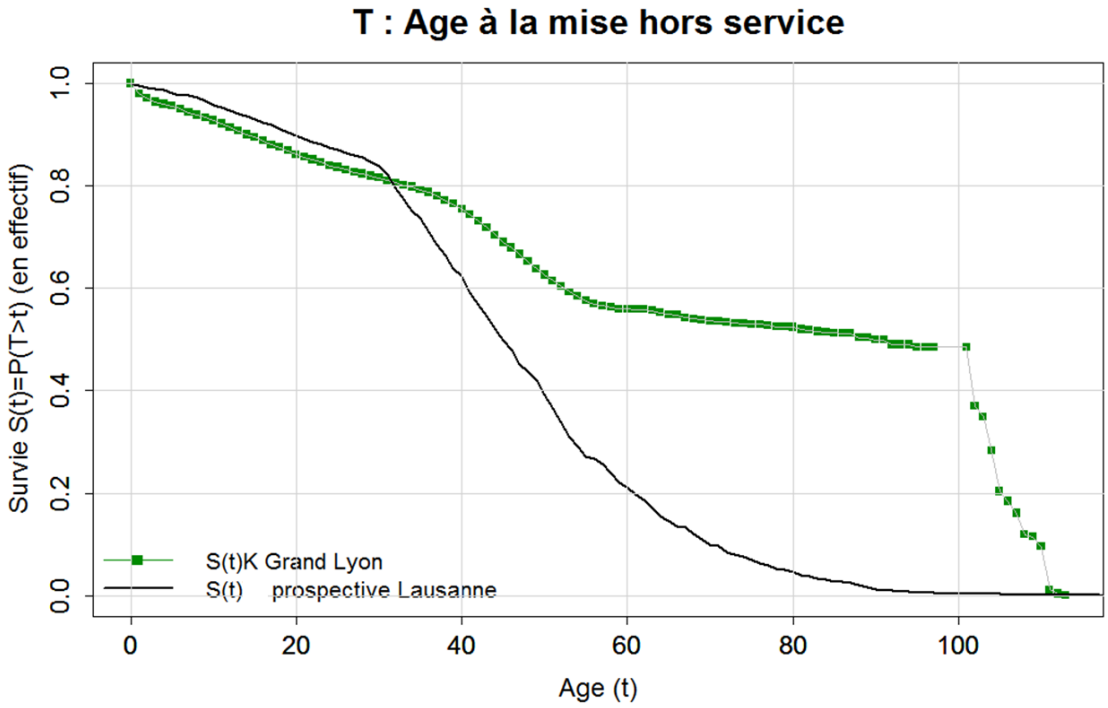


Figure 9 : Courbes de survie prospective en effectif (trait)

III.3 Comparaison des sorties en linéaire et en effectif

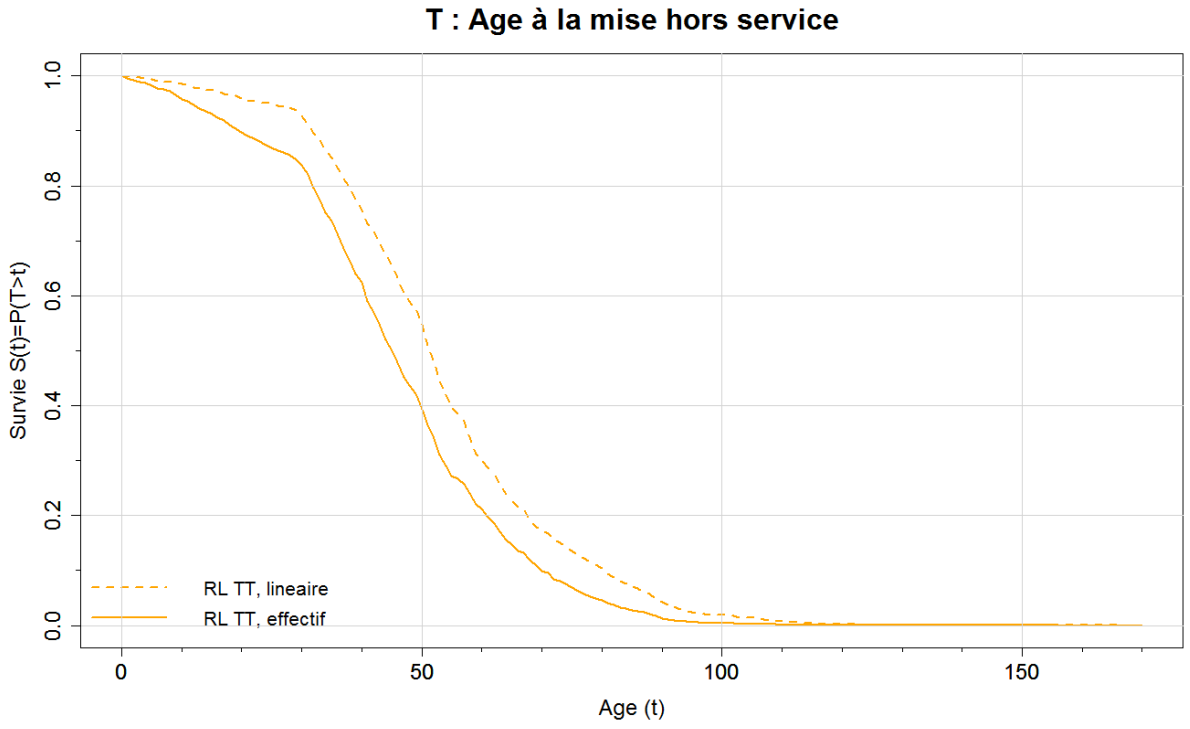


Figure 10 : Comparaison des courbes de survie prospectives en effectif et en linéaire

IV Calcul des indicateurs I1R, I2R et I3R

IV.1 Entrée

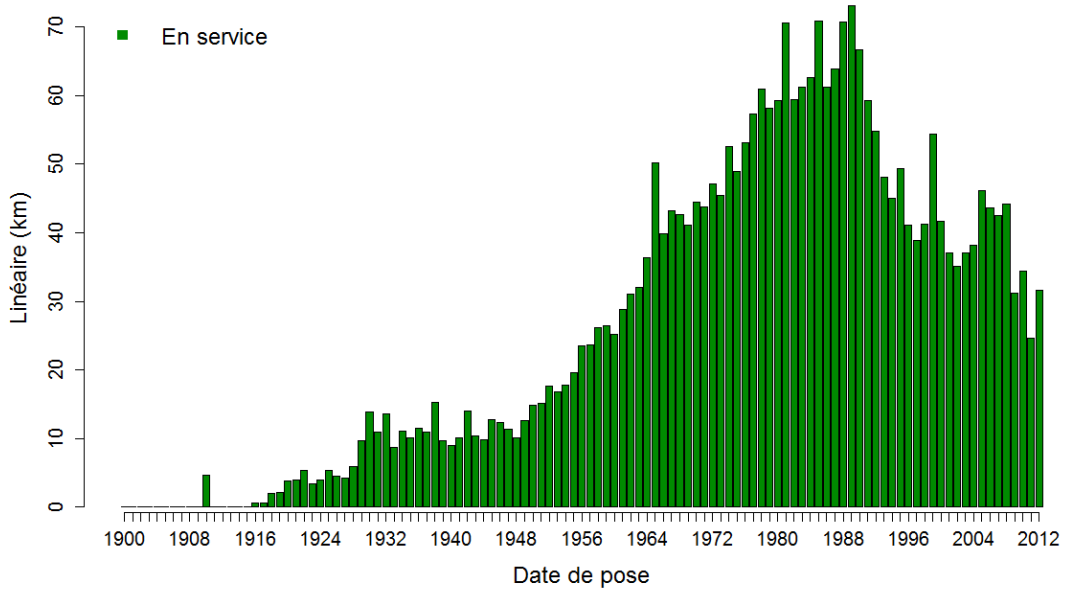


Figure 11 : Linéaire en service (ES) au 31/12/2012

IV.2 Sortie

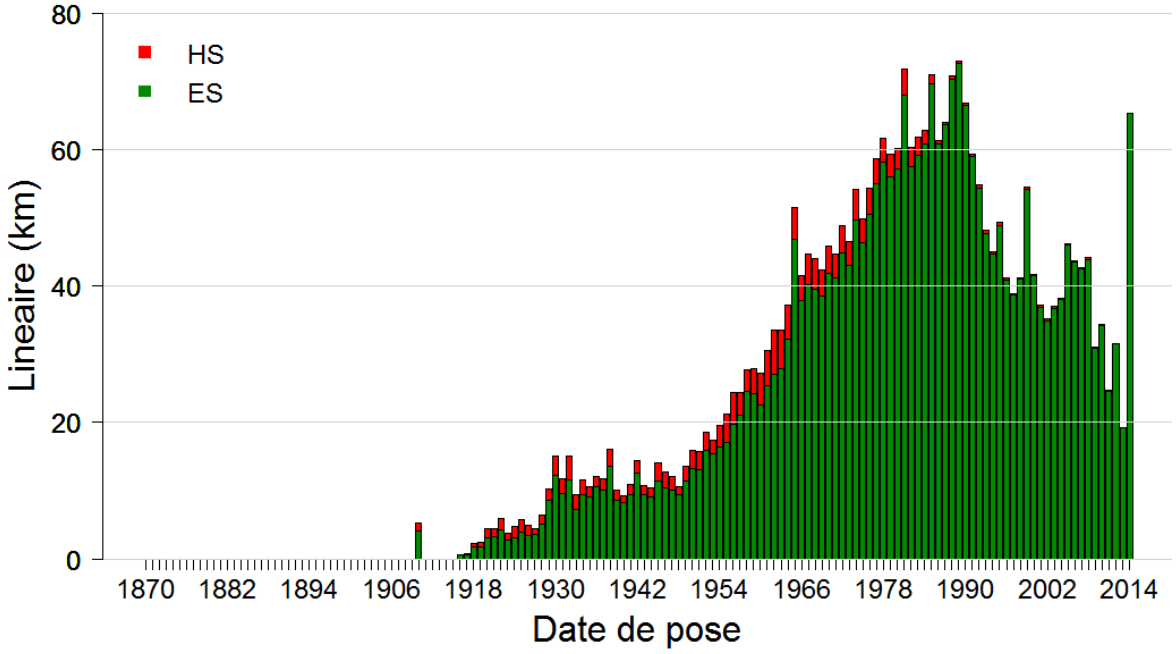


Figure 12 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2013, photographie de la situation en 2013.

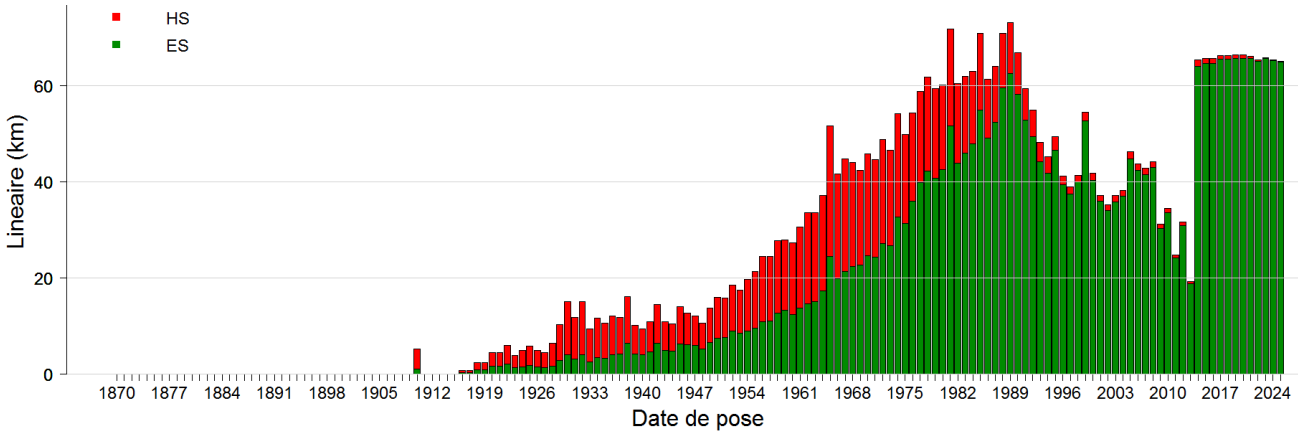


Figure 13 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2025, photographie de la situation en 2025

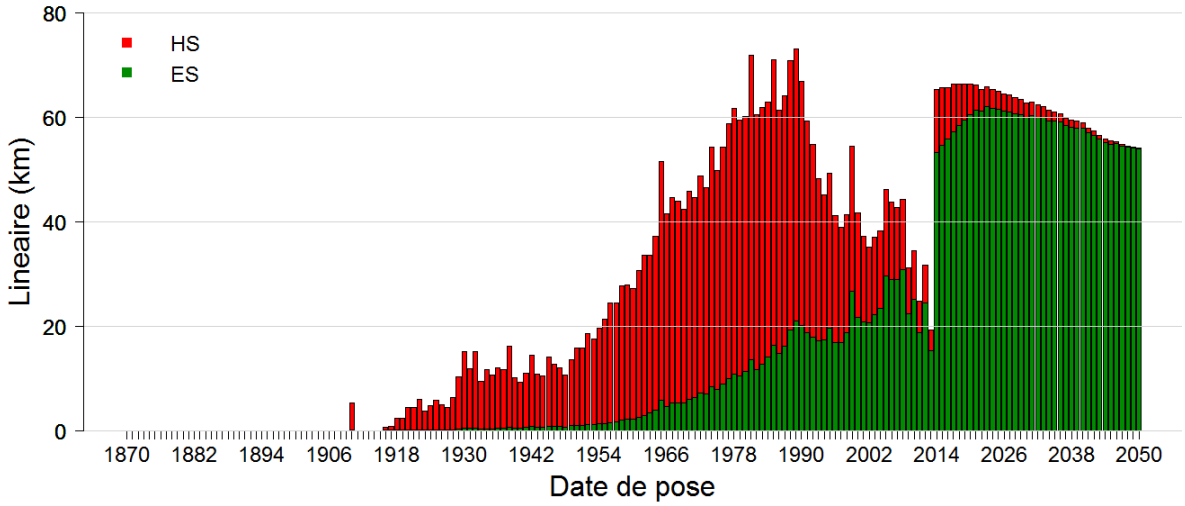


Figure 14 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2050, photographie de la situation en 2050.

IV.1 Sortie I2R

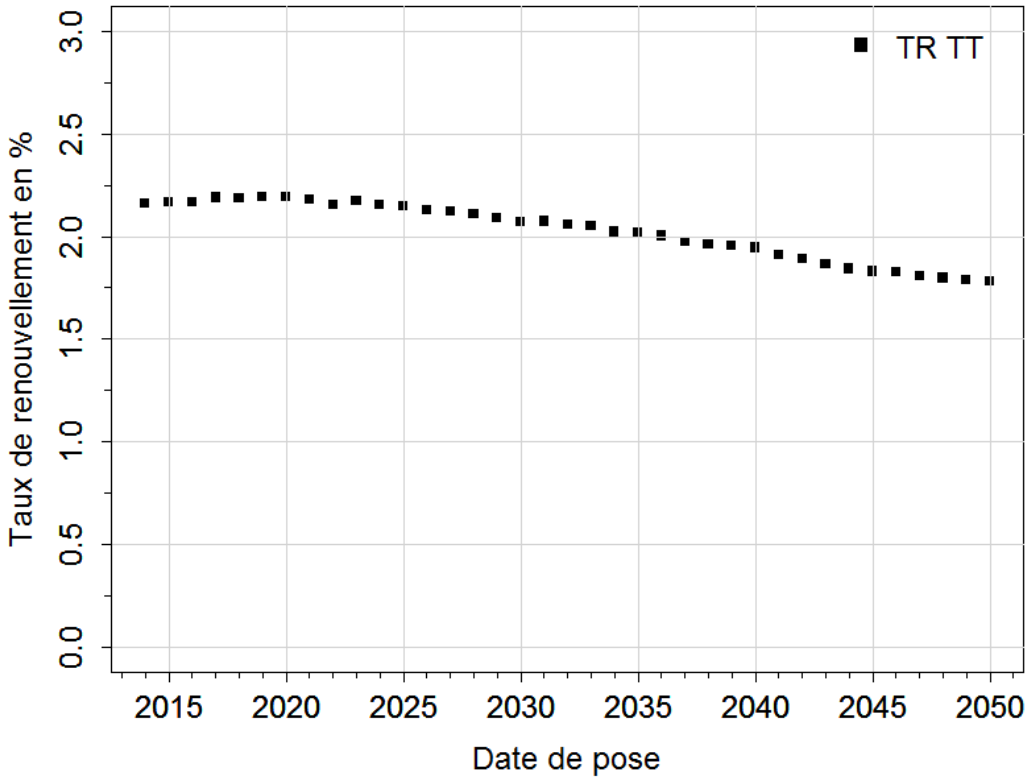


Figure 15 : Prévision des taux de renouvellement futurs de 2013 jusqu'en 2050 pour les tronçons.

IV.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

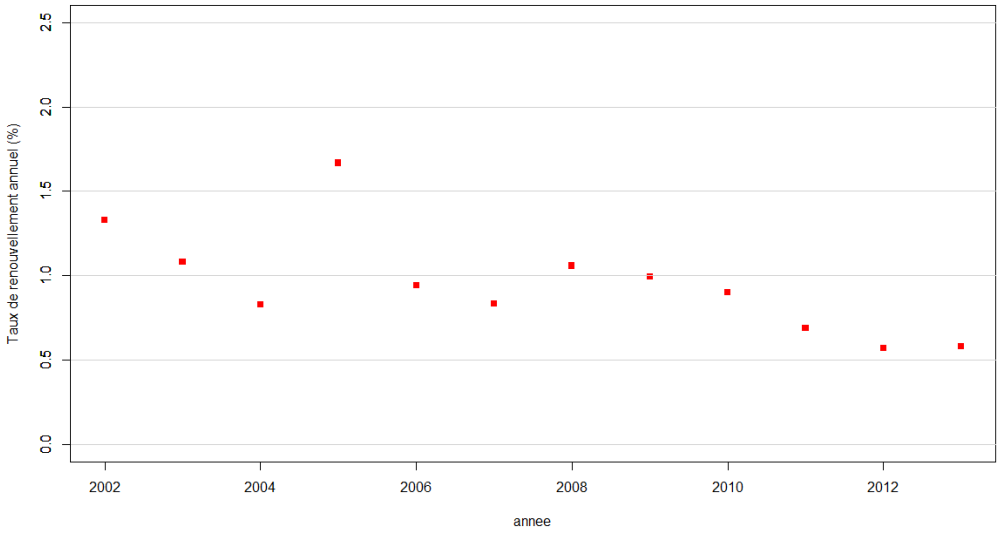


Figure 16 : Taux de renouvellement passé de 2002 à 2013 pour les tronçons.

IV.1 Sortie I3R

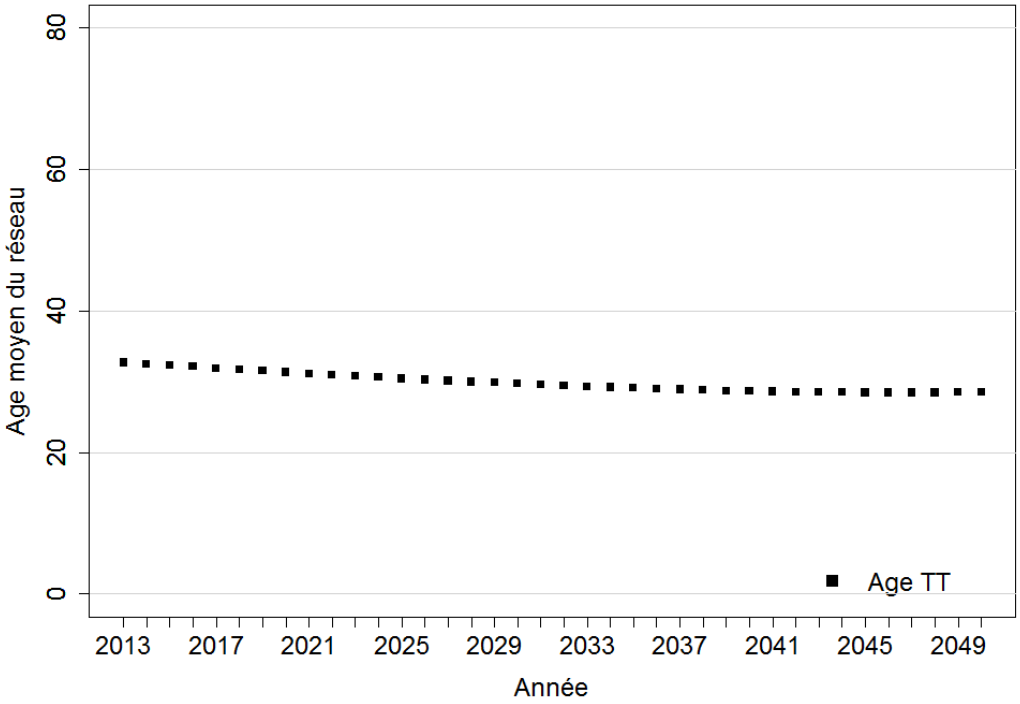


Figure 17 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2013 jusqu'en 2050 au Grand Lyon, scénario « statu quo».

V Calcul de l'indicateur I1F

V.1 Entrée

Coûts unitaire : 530 €/m

V.2 Sortie

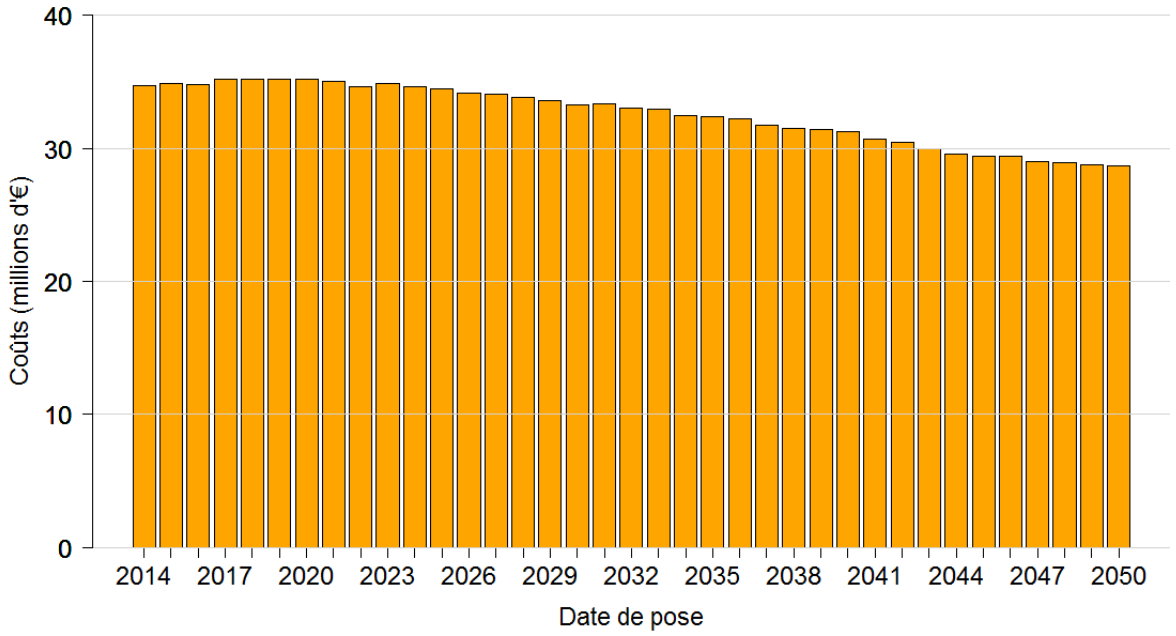


Figure 18 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2013 et 2050, scénario « statu quo».

VI Calcul de l'indicateur I1P

VI.1 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 8

Covariable	Age (t)	Longueur (Z_1)	Diamètre (Z_2)
Unité	Siècle	m	mm

Tableau 1 : Covariables (et leurs unités) employés dans le modèle LEYP

Paramètres / Nom strate	$\propto$	δ	β_0	β_1	β_2
Toute strate	4.8	1.2	-2.6	0.5	-0.0029

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle LEYP

VI.1 Entrée en tronçon

- Cf. Figure 9
- Cf. Tableau 1 & Tableau 2

VI.2 Sorties en tronçons

- Effectif :

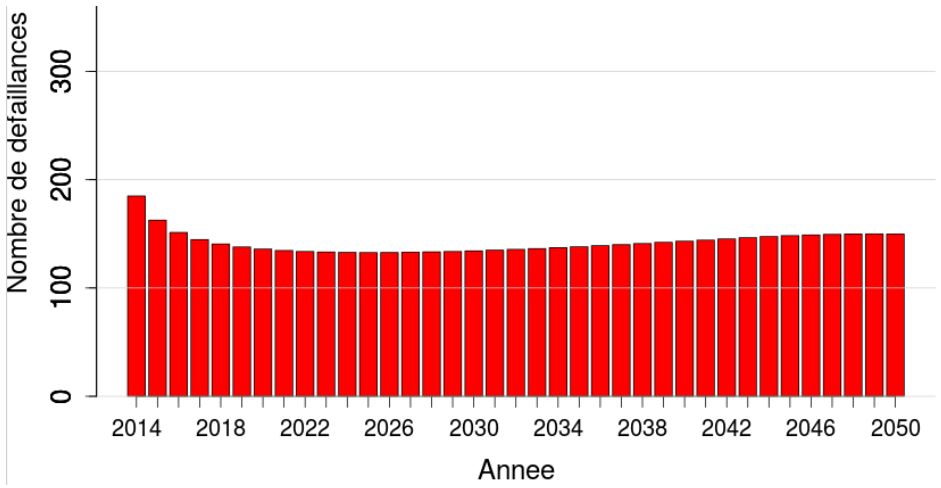


Figure 19 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2013 et 2050, scénario « statu quo » . Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif

VI.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

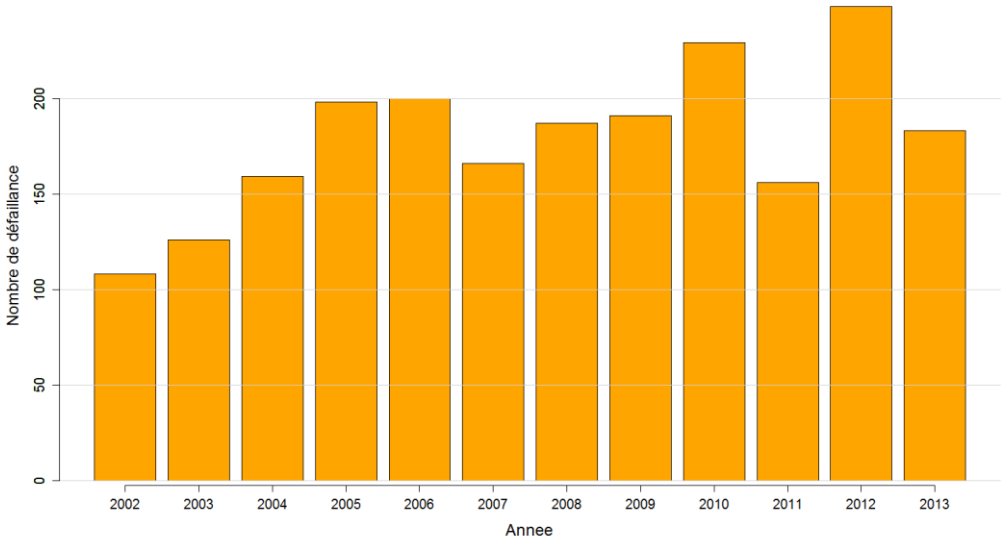


Figure 20 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2013

Scénario 5 (code C)

Survie entre SEDIF et Lausanne

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8
Stratifié ?	Non						Diamètre	Matériaux
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2002; 2005]	[2002; 2012]	On n'utilise pas la survie du Grand Lyon				[2002; 2012]	
Statu quo ?	Oui		Survie SEDIF	Survie Lausanne	Survie entre SEDIF et Lausanne	On arrête de renouveler	Oui	

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

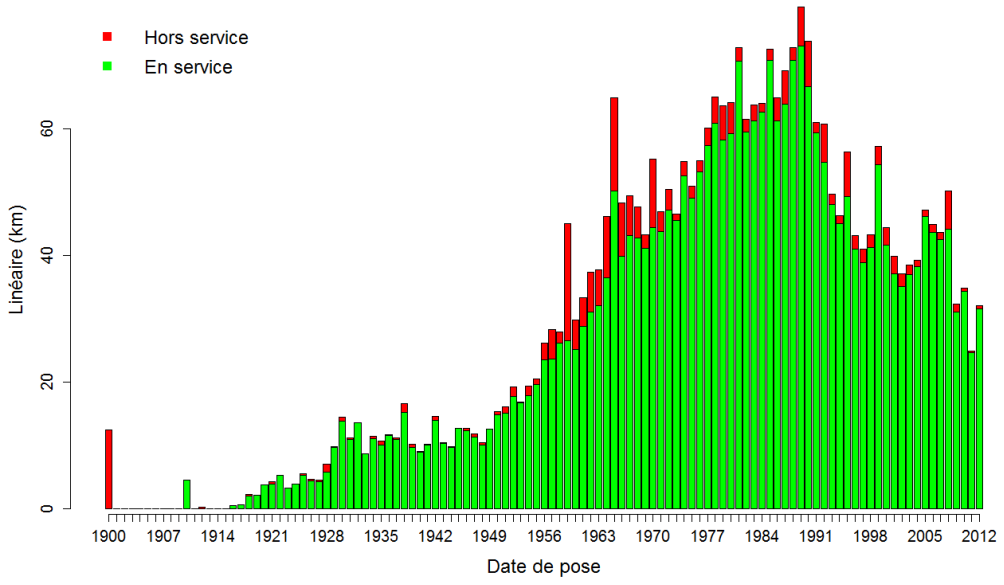


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002 ; 2012])

I.2 Sortie en linéaire

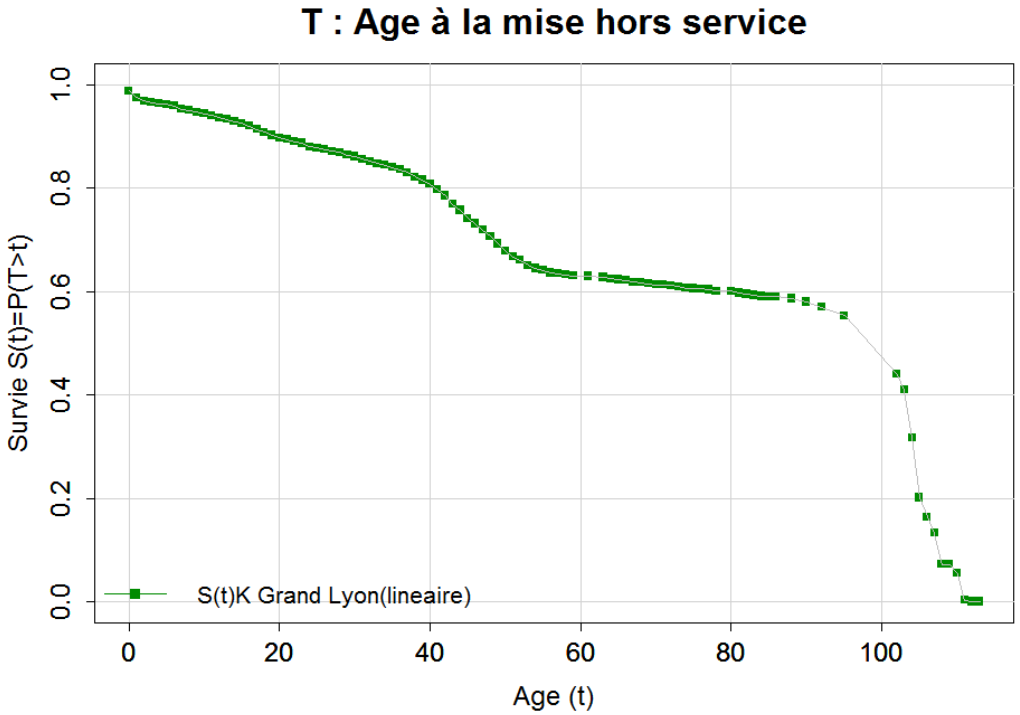


Figure 2 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons sans IC

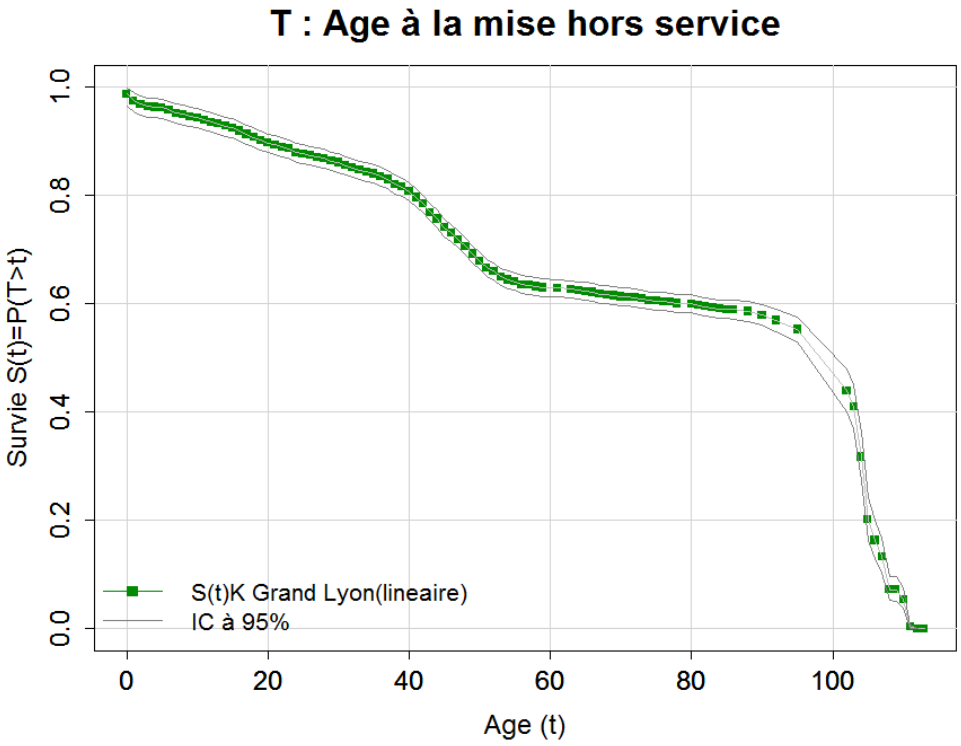


Figure 3 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons avec IC beta NB

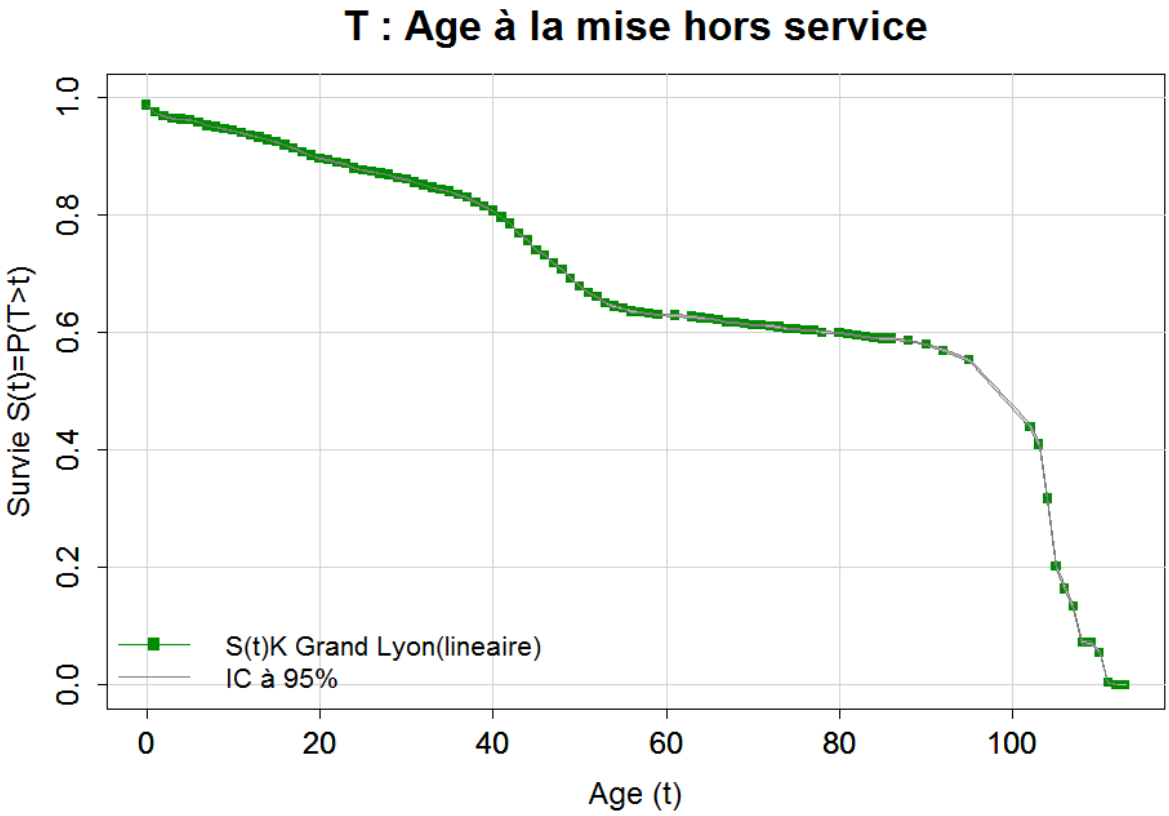


Figure 4 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons avec IC beta lin

I.1 Entrée en effectif

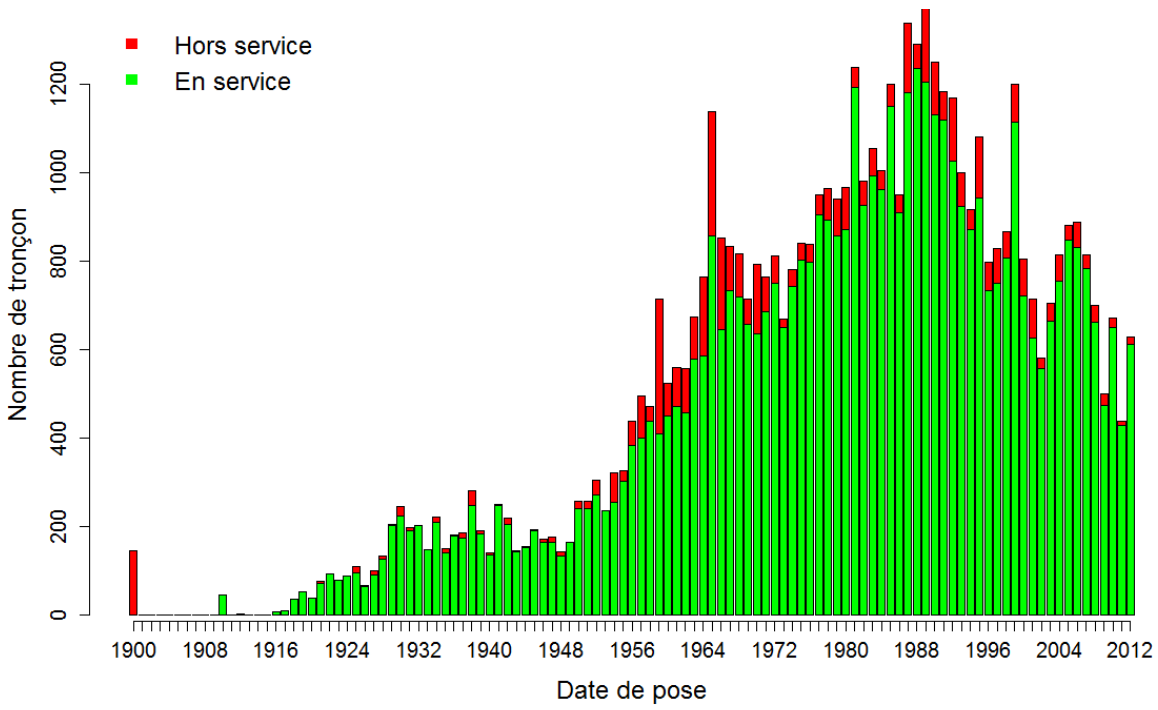


Figure 5 : Histogramme du nombre de tronçons En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002 ; 2012])

I.2 Sortie en effectif

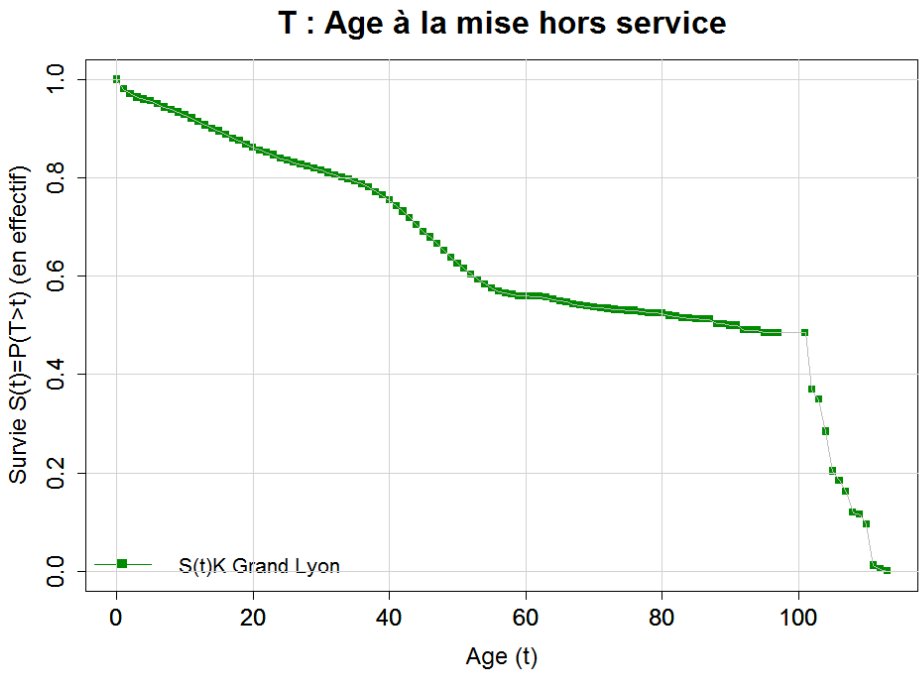


Figure 6 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en nombre de tronçons

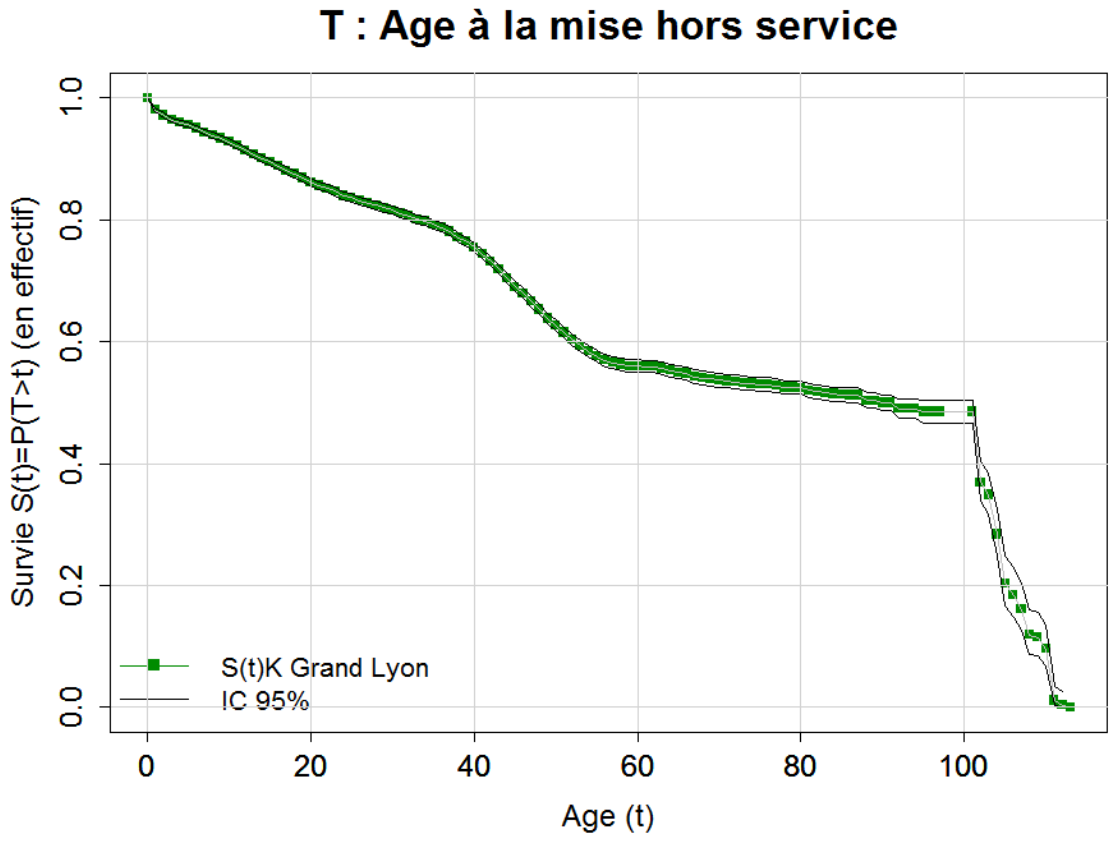


Figure 7 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en nombre de tronçons avec IC

II Scénario B

- Groupe de tronçons : tout le réseau
- Photographie au 31 /12 /2012
- Pas de stratification
- Courbes de survie prospectives = courbe de survie de eauservice Lausanne

III Construction scénario prospectif B

III.1 Entrée en linéaire

Cf. : Figure 2

III.2 Sortie en linéaire

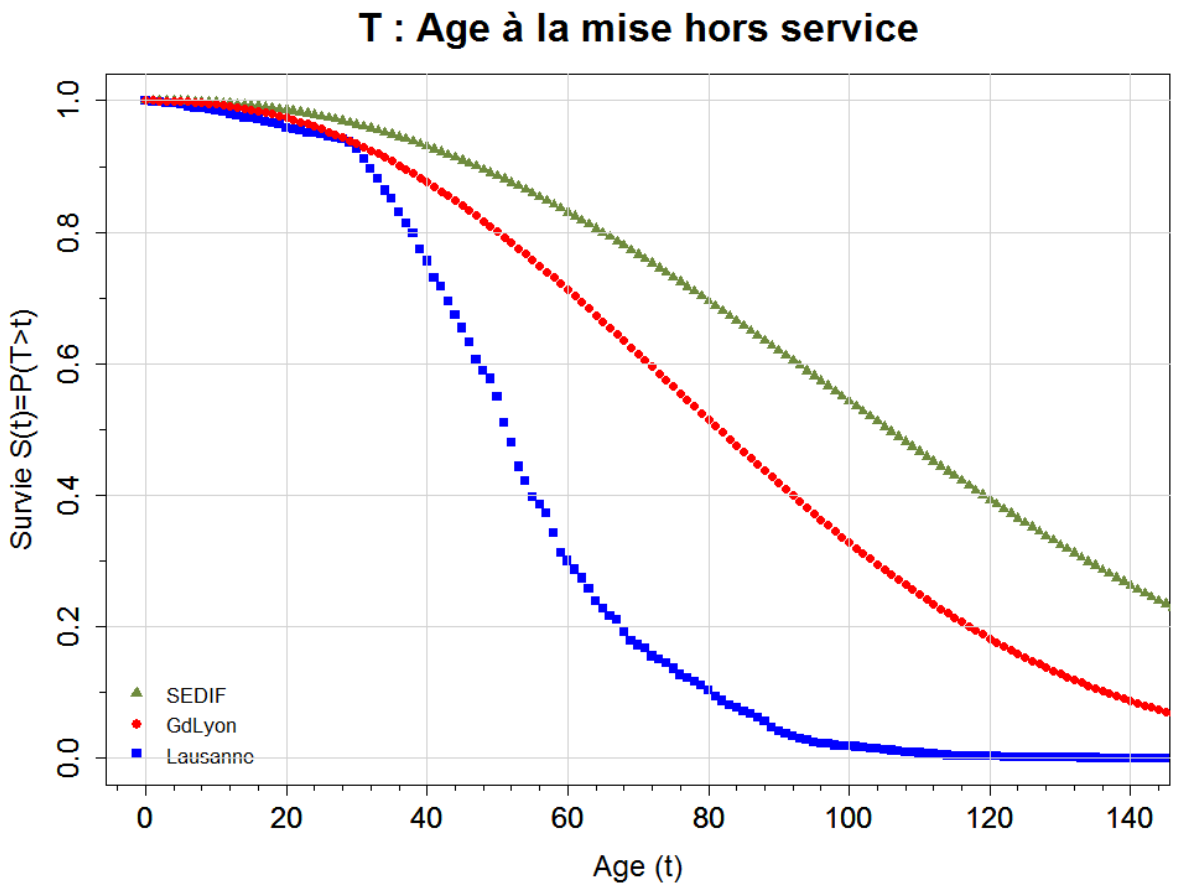


Figure 8 : Courbes de survie prospective en linéaire (trait rouge)

III.1 Entrée en effectif

Cf. : Figure 6

IV Calcul des indicateurs I1R, I2R et I3R

IV.1 Entrée

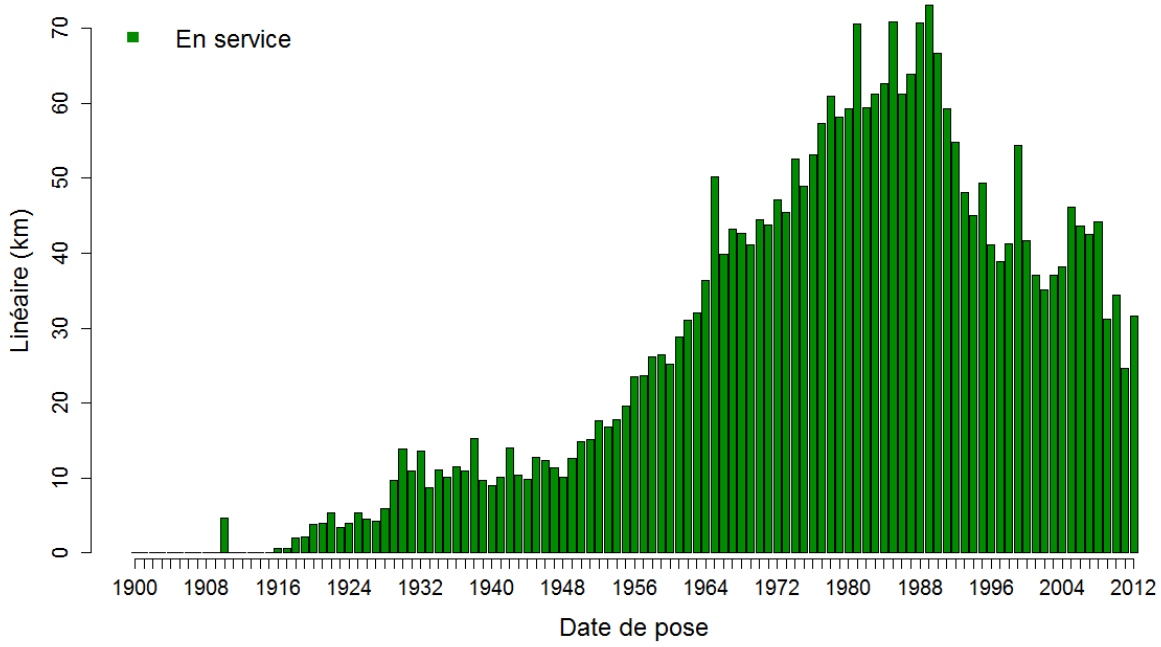


Figure 9 : Linéaire en service (ES) au 31/12/2012

IV.2 Sortie

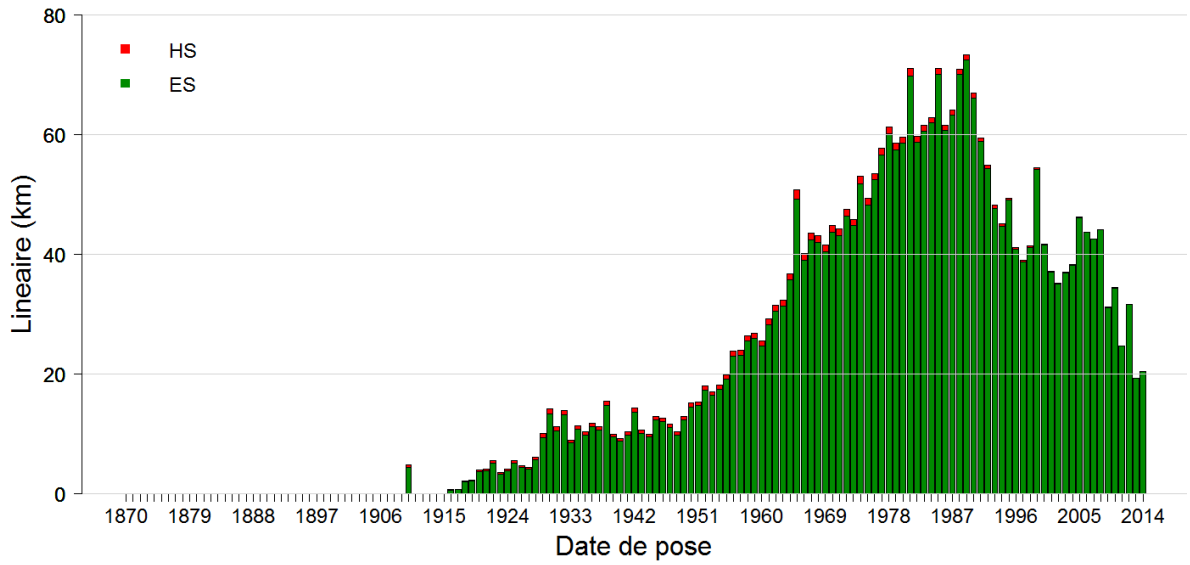


Figure 10 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2013, photographie de la situation en 2013.

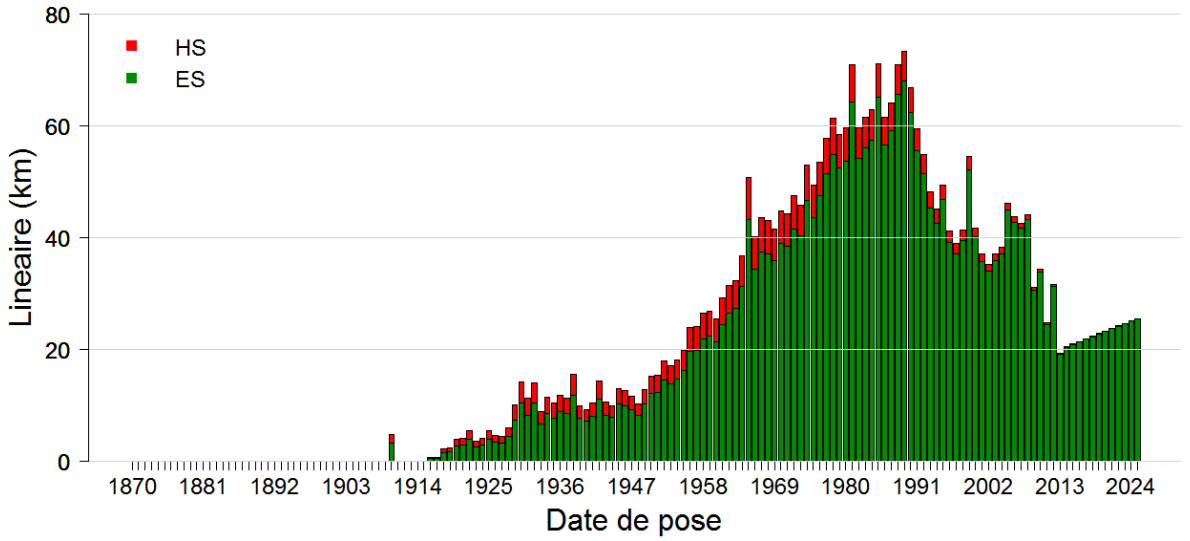


Figure 11 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2025, photographie de la situation en 2025

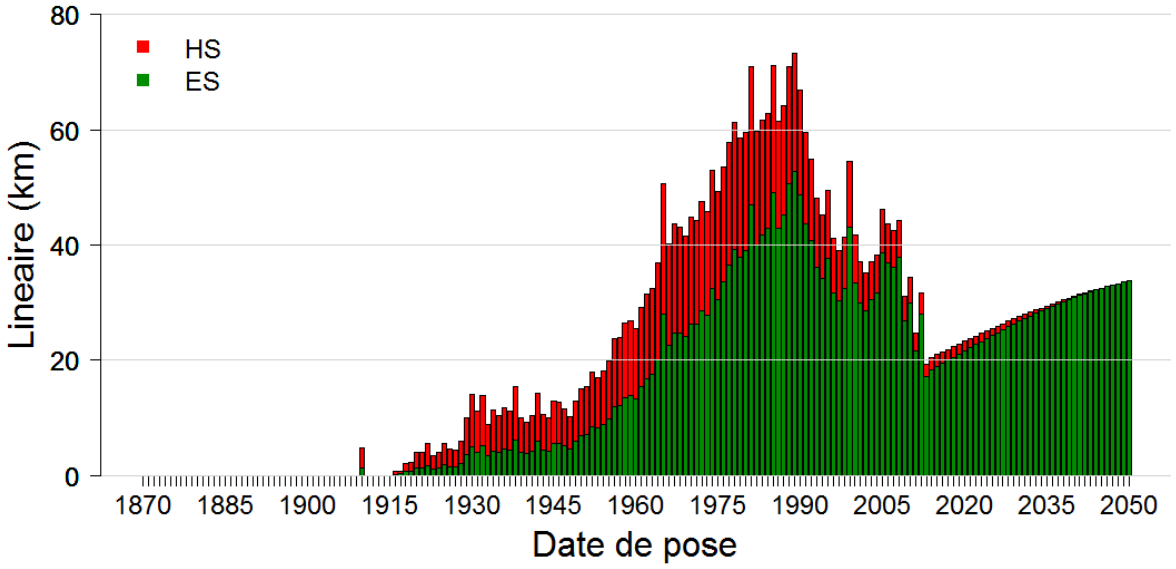


Figure 12 : Linéaire en service (ES) et hors service (HS), prévision du futur jusqu'en 2050, photographie de la situation en 2050.

IV.1 Sortie I2R

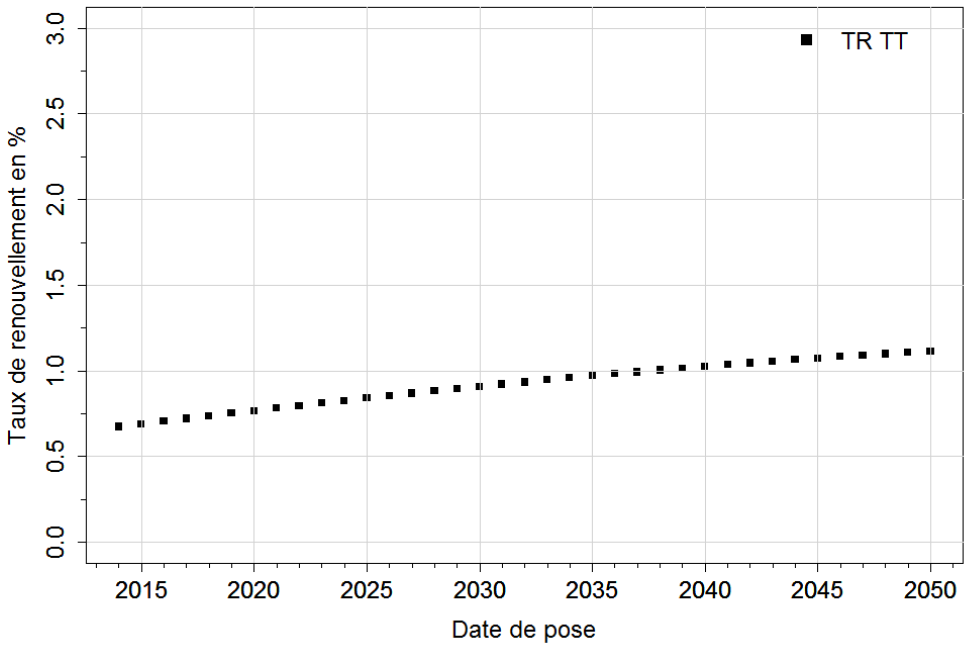


Figure 13 : Prévision des taux de renouvellement futurs de 2013 jusqu'en 2050 pour les tronçons.

IV.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

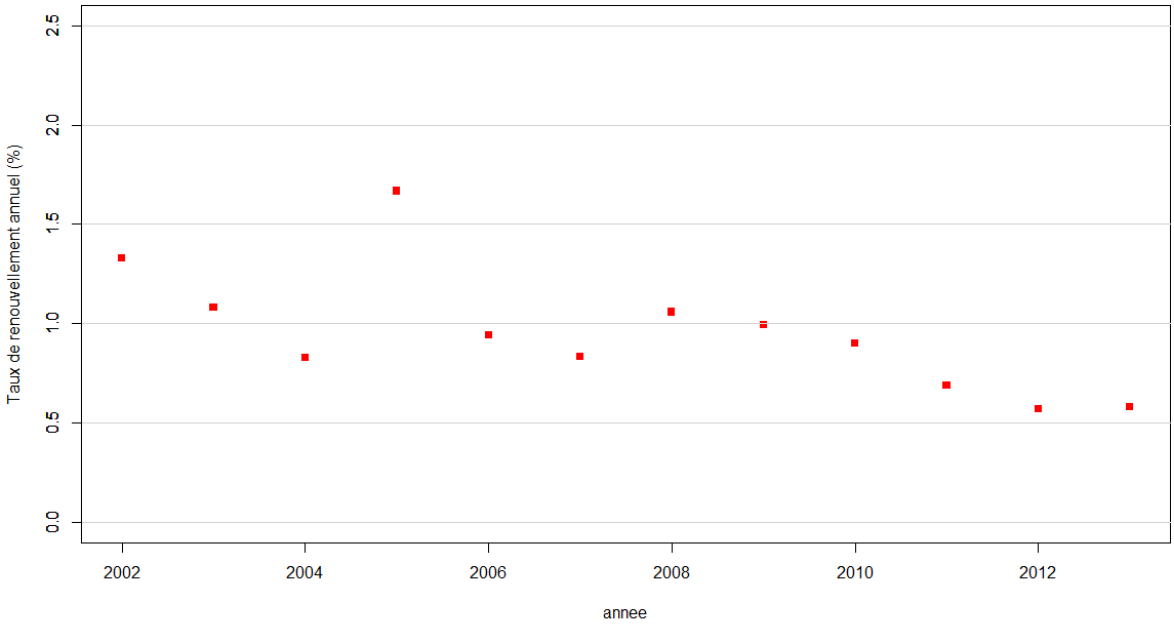


Figure 14 : Taux de renouvellement passé de 2002 à 2013 pour les tronçons.

IV.1 Sortie I3R

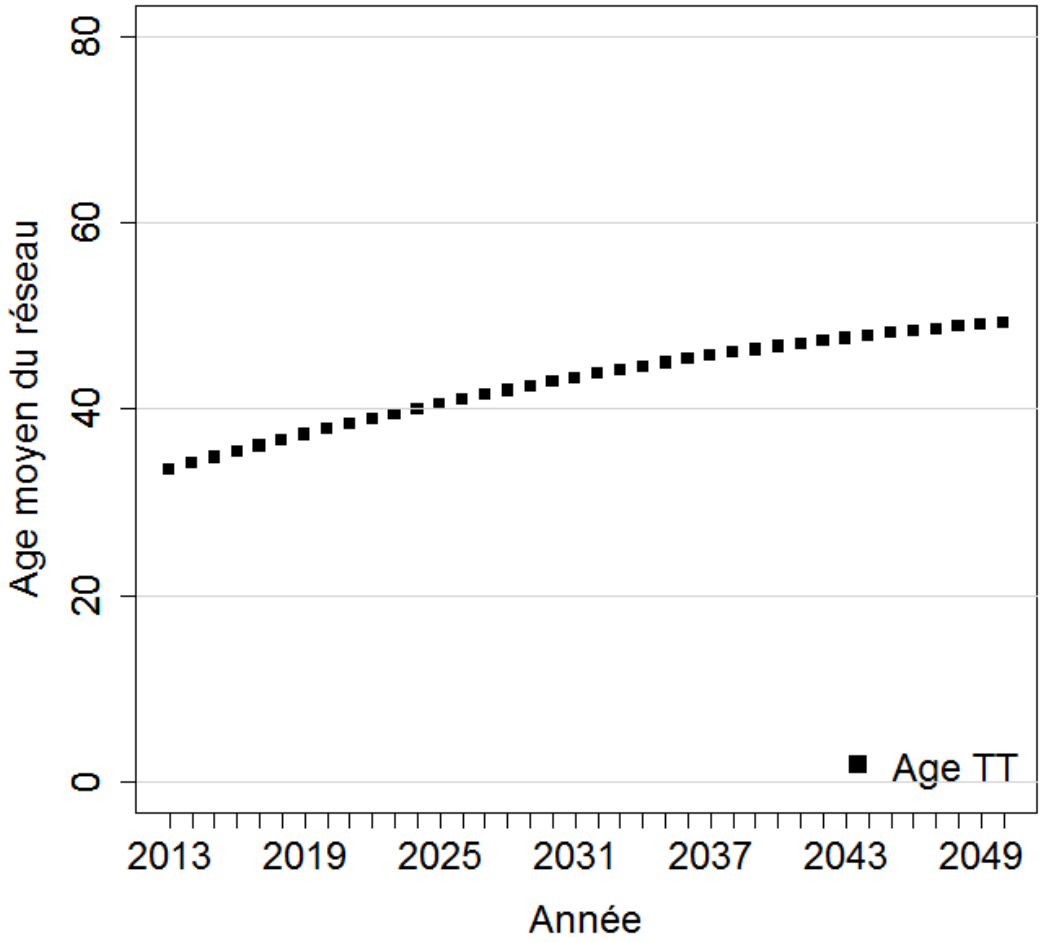


Figure 15 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2013 jusqu'en 2050 au Grand Lyon, scénario « statu quo».

V Calcul de l'indicateur I1F

V.1 Entrée

530 € par mètre

V.2 Sortie

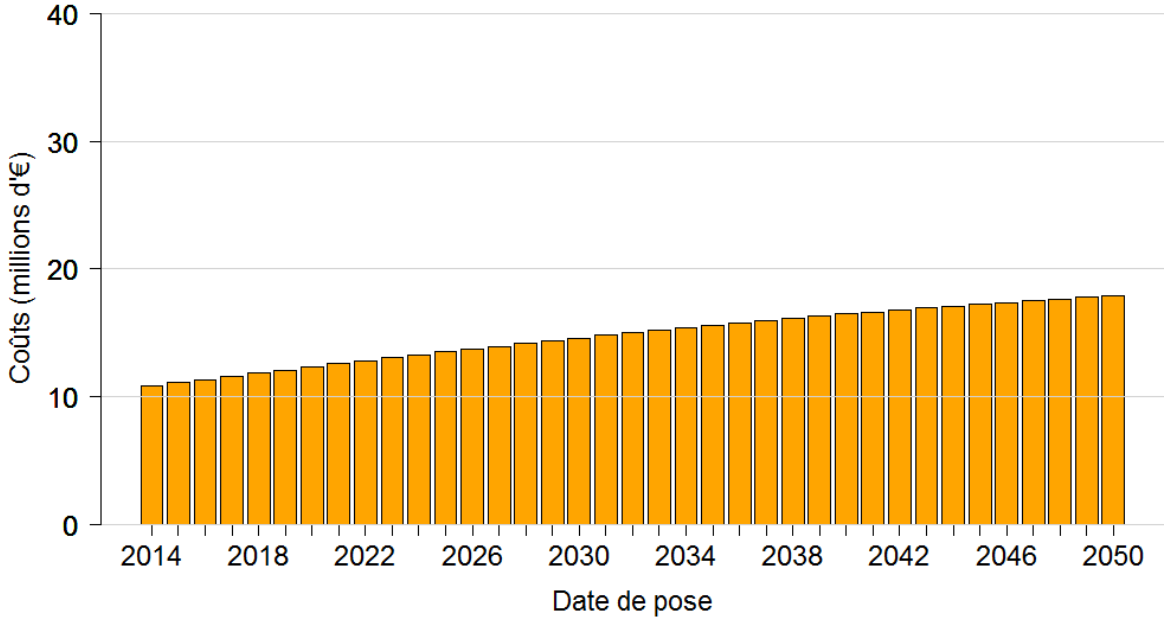


Figure 16 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2013 et 2050, scénario « statu quo».

VI Calcul de l'indicateur I1P

VI.1 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 8

Covariable	Age (t)	Longueur (Z_1)	Diamètre (Z_2)
Unité	Siècle	m	mm

Tableau 1 : Covariables (et leurs unités) employés dans le modèle LEYP

Paramètres / Nom strate	$\propto$	δ	β_0	β_1	β_2
Toute strate	4.8	1.19	-2.64	0.47	-0.0029

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle LEYP

VI.1 Entrée en tronçon

- Cf. Tableau 1 & Tableau 2

VI.2 Sorties en tronçons

- Effectif :

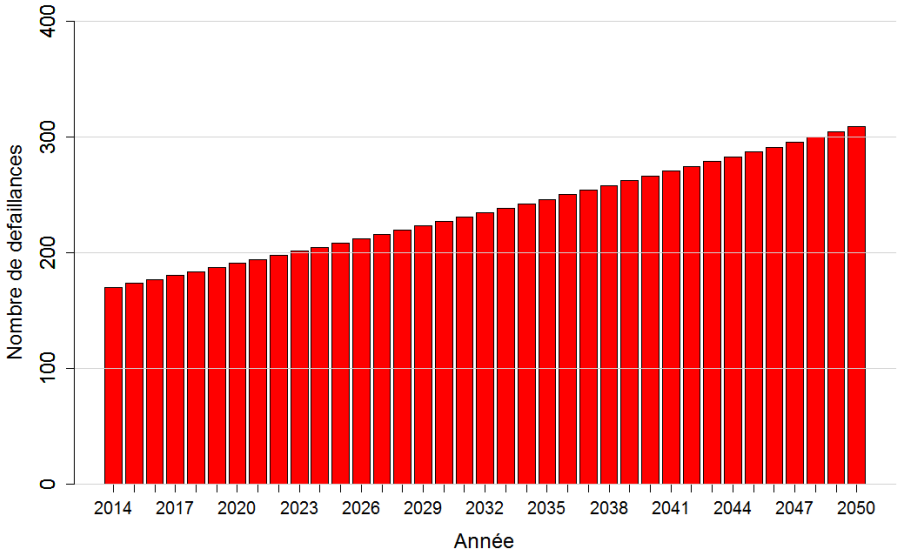


Figure 17 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2013 et 2050, scénario « statu quo ». Attention ici l'entrée est la courbe de survie en effectif

VI.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

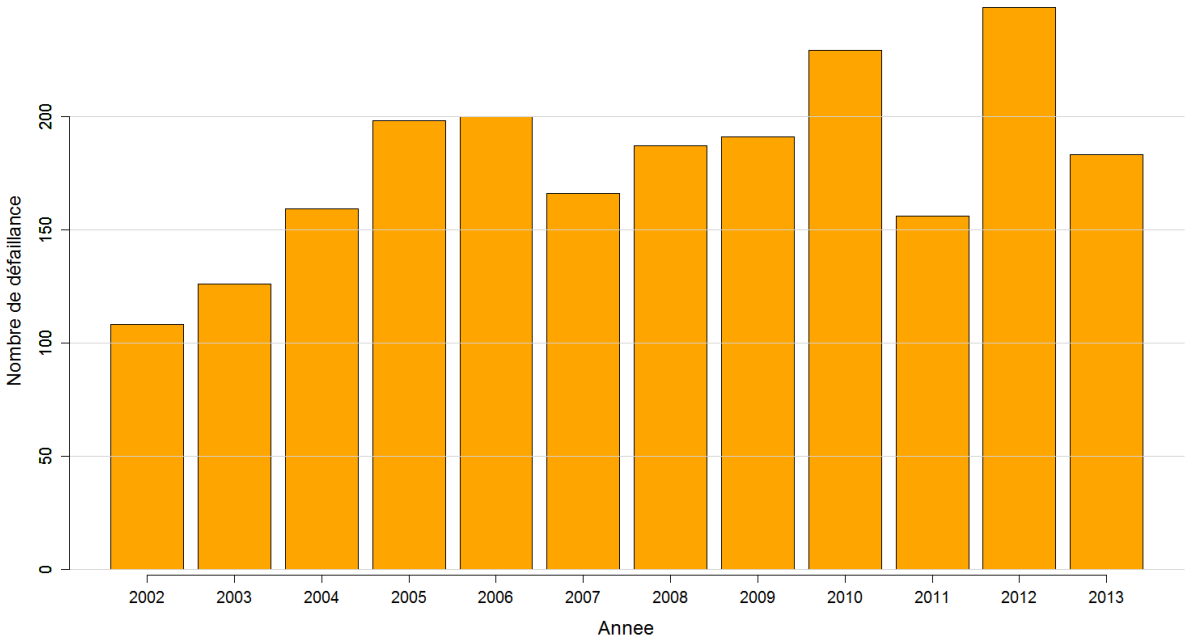


Figure 18 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2013

VII Calcul de l'indicateur I2P continuité

VII.1 Entrée

Cf. Figure 17 (moins les tronçons mis HS en 2014)

Et

KB7 - EDI - Expected Duration of Interruption

Code of category	Hours	
1	4	> 400 mm
2	3	200 - 400 mm
3	2	< 200 mm
4	0	....

Valeur de SC	Description
0	aucun client sensible
0.3	1 client P1
0.7	1 client P2 ou plusieurs P1
1	1 client P3

Avec : P3 : hôpitaux, maisons de retraite, prisons, dialysés
P2 : économique : coiffeurs, restaurants, hôtels, Ecoles, crèches
P1 : prioritaire mais pas trop : Grand Lyon, notables, activités industrielles, etc.

NPS = NBC x NBH
NBC = nombre de branchement par conduite
NBH = nombre d'habitant par branchement = 0.8

VII.2 Modèle

I2P-continuite = NbDef x EDI x NPS x SC

VII.3 Sortie

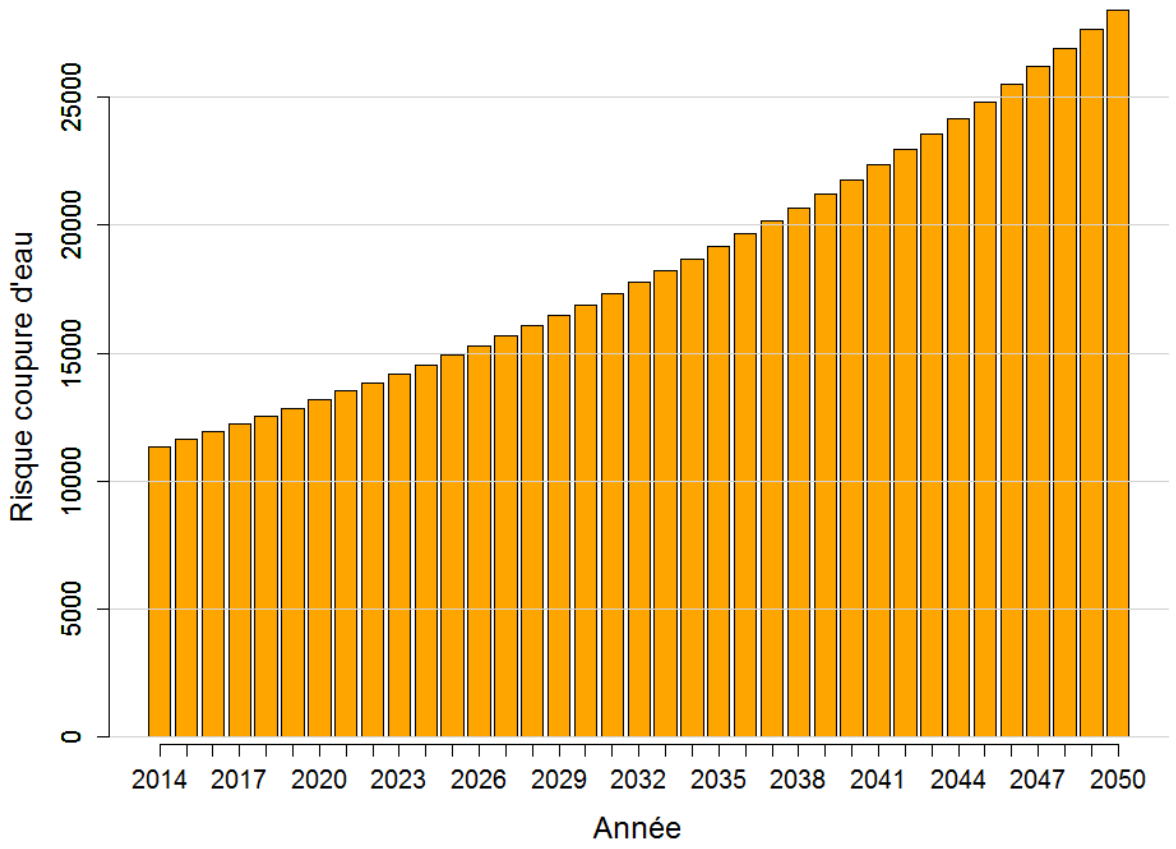


Figure 19 : Prévision pour l'indicateur 27-P_continuité entre 2014 et 2050, scénario « statu quo».

VIII Calcul de l'indicateur I3P voirie

VIII.1 Entrée

Cf. Figure 17 (moins les tronçons mis HS en 2014)

cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

KB11 - SR - Sensitivity of the Road

Code of category	index [0,1]	
1	.4	autre
2	1	Chaussée
3	.7	Non déterminé
4	0	0

Tableau 3 : Coefficient lié à la quantité et à la vulnérabilité du trafic routier associé à ce tronçon

VIII.1.1 I8-P voirie

I3P-voirie = NbDef x EDI x SR

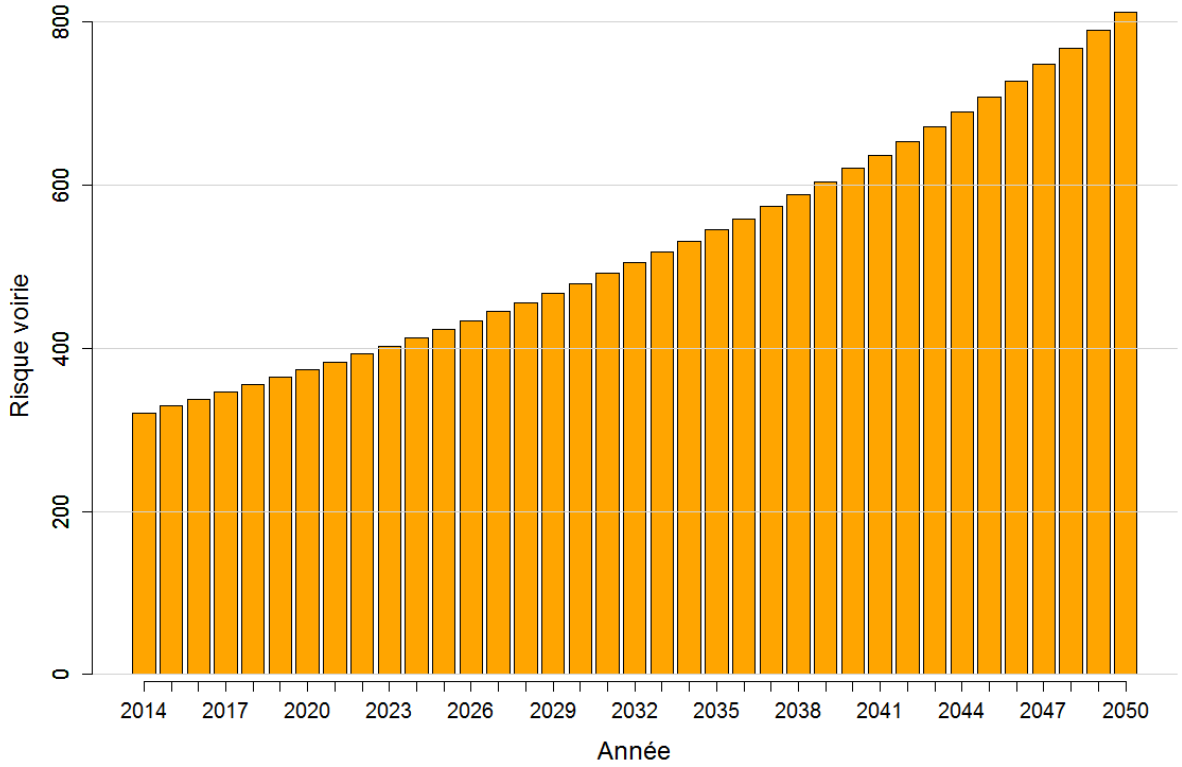


Figure 20 : Prévision pour l'indicateur I3P_voirie entre 2014 et 2050, scénario « statu quo »

IX Calcul de l'indicateur I4P inondation

IX.1 Entrée

Cf. Figure 17 (moins les tronçons mis HS en 2014)
+ diamètre du tronçon (mm)
+ pression de l'eau dans le tronçon (m de colonne d'eau)

KB9 - SFI - Sensitivity of Industrial and commercial areas

Code of category	index [0,1]	
1	.5	risk ferré
2	.3	risk parking
3	.8	risk parking et risk ferré
4	.9	Balmes et risk ferré
5	.9	Balmes et risk parking
6	0	Aucun risk
7	1	Tous les risks
8	0	0

KB8 - SFH - Sensitivity of Housing areas to Flooding

Code of category	index [0,1]	
1	0	Periph' sans risk
2	.3	Périph' avec Balmes
3	.4	Lyon sans Balmes
4	.8	Lyon avec Balmes
5	0	0

IX.2 Modèle

I4P-innondation = NbDef x dia x dia x H x SFH x SFI

IX.3 Sortie

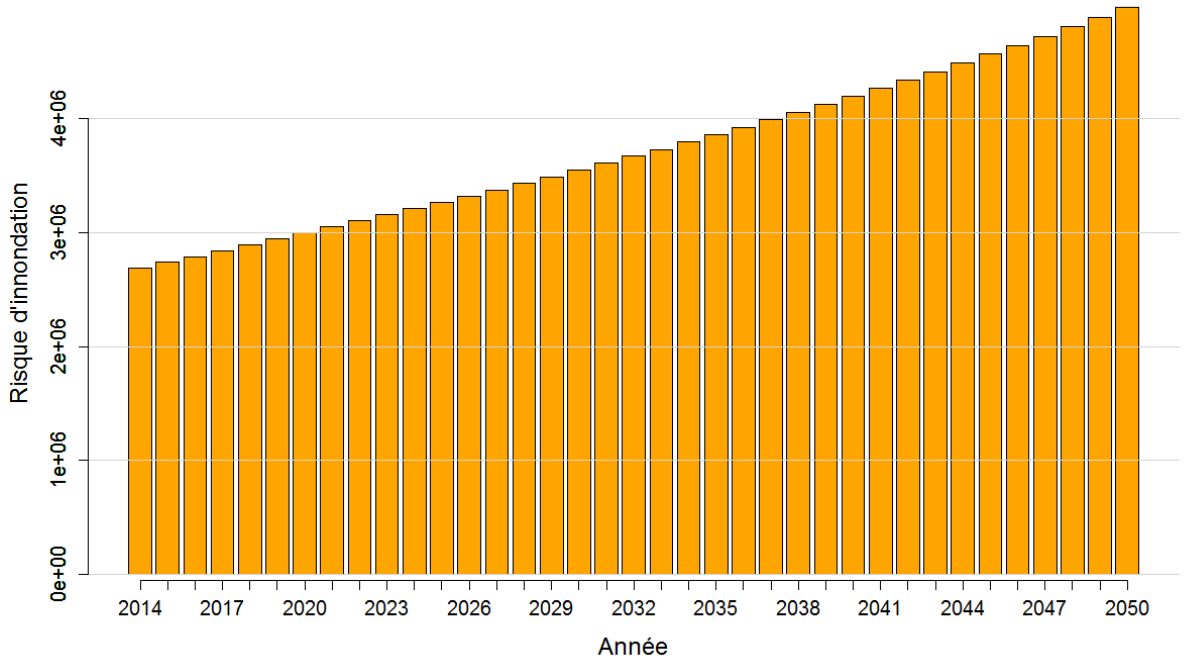
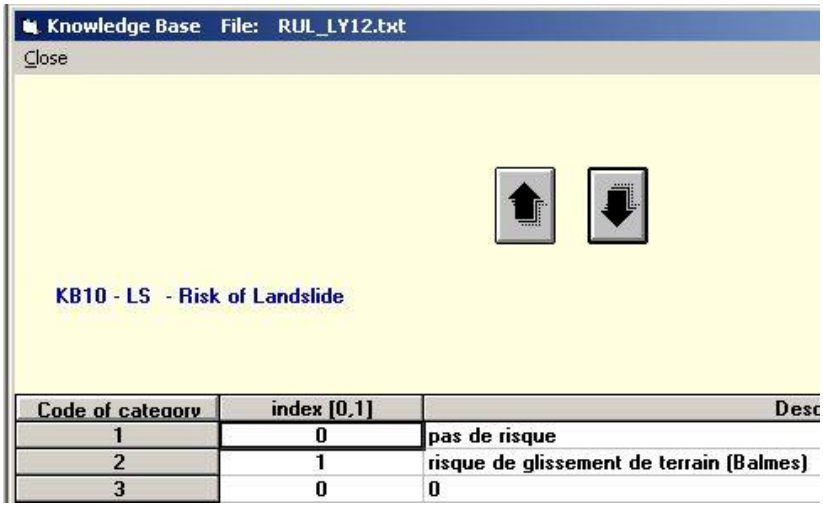


Figure 21 : Prévision pour l'indicateur I4P_inondation entre 2014 et 2050, scénario « statu quo ».

X Calcul de l'indicateur glissement de terrain

X.1 Entrée

Cf. Figure 17 (moins les tronçons mis HS en 2014)
+ diamètre du tronçon (mm)
+ pression de l'eau dans le tronçon (m de colonne d'eau)



Code of category	index [0,1]	Desc
1	0	pas de risque
2	1	risque de glissement de terrain (Balmes)
3	0	0

X.2 Modèle

I5P = NbDef x dia x dia x H x LS

X.3 Sortie

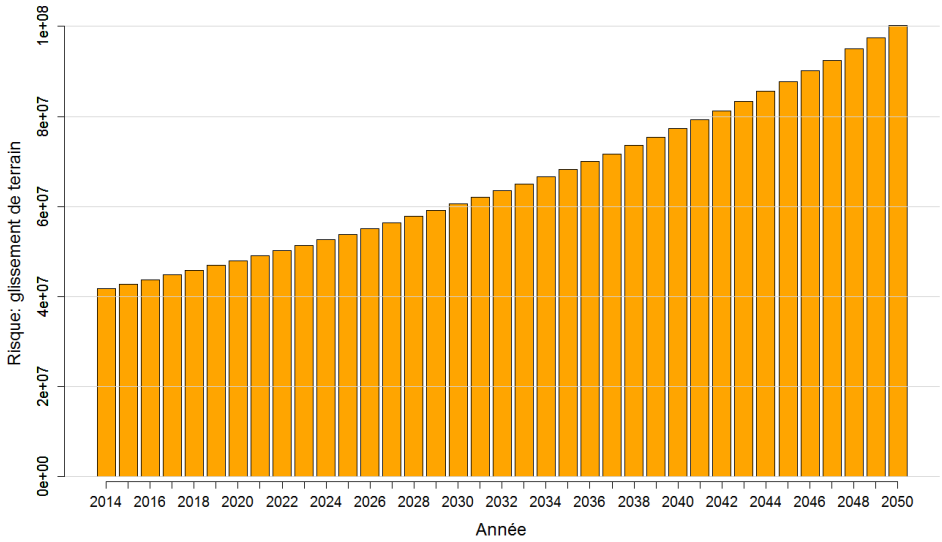


Figure 22 : Prévision pour l'indicateur glissement de terrain entre 2014 et 2050, scénario « statu quo ».

Simulation 6 (code D)

On arrête de renouveler

Numéro du scénario	1	2	3	4	5	6	7	8
Stratifié ?	Non						Diamètre	Matériaux
Fenêtre d'apprentissage du modèle	[2002; 2005]	[2002; 2012]	On n'utilise pas la survie du Grand Lyon				[2002; 2012]	
Statu quo ?	Oui		Survie SEDIF	Survie Lausanne	Survie entre SEDIF et Lausanne	On arrête de renouveler	Oui	

I Reconstitution du passé

I.1 Entrée en linéaire

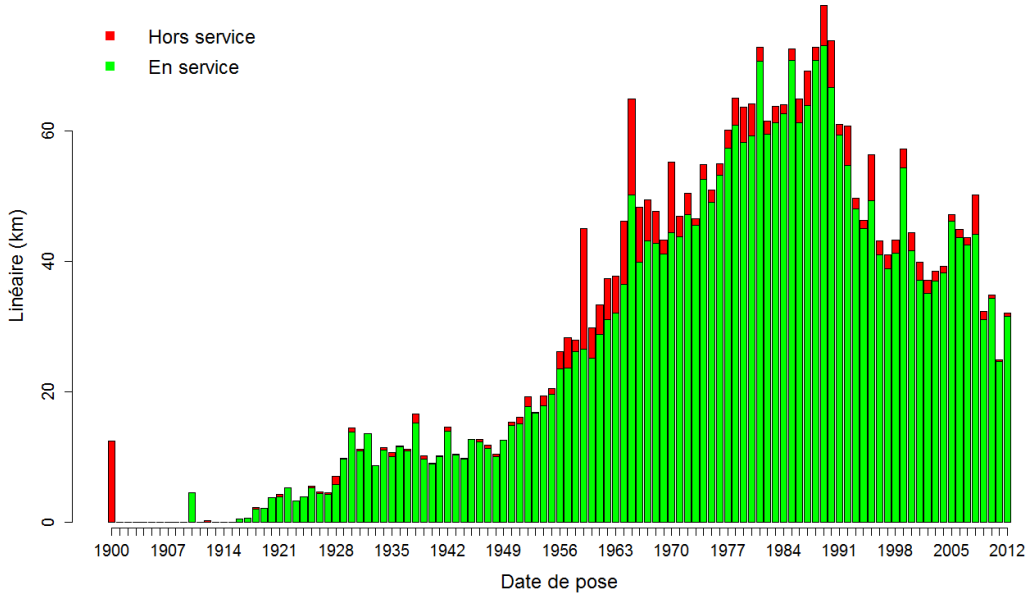


Figure 1 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002 ; 2012])

I.2 Sortie en linéaire

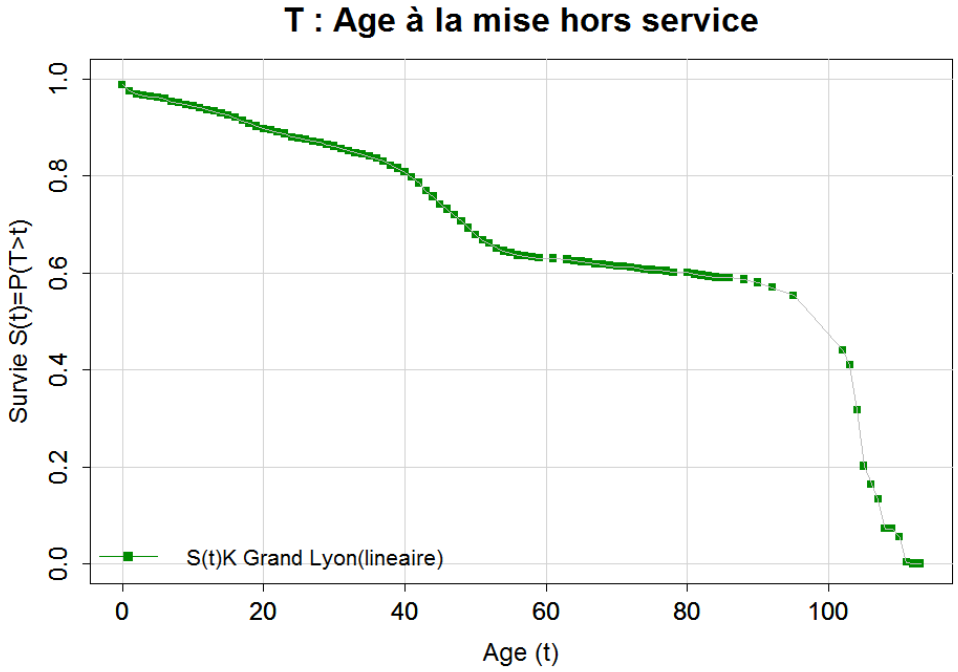


Figure 2 : Courbes de survie passée (Kaplan Meier) en linéaire tout tronçons sans IC

II Scénario 6 (code D)

- Groupe de tronçons : tout le réseau
- Photographie au 31 /12 /2012
- Pas de stratification
- On laisse vieillir le réseau

III Construction scénario prospectif

III.1 Survie prospective en linéaire et en effectif

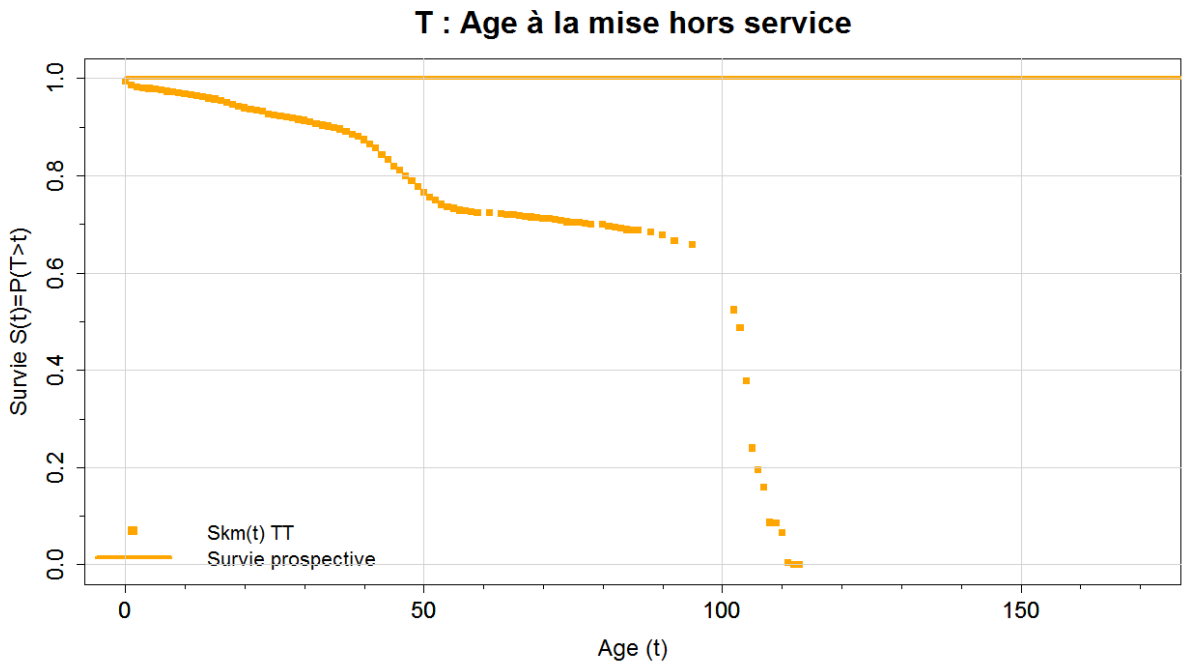


Figure 3 : Courbes de survie prospective (trait)

IV Calcul de l'indicateur I3R

Pas de renouvellement, donc pas d'indicateur I1R, I2R et I1F

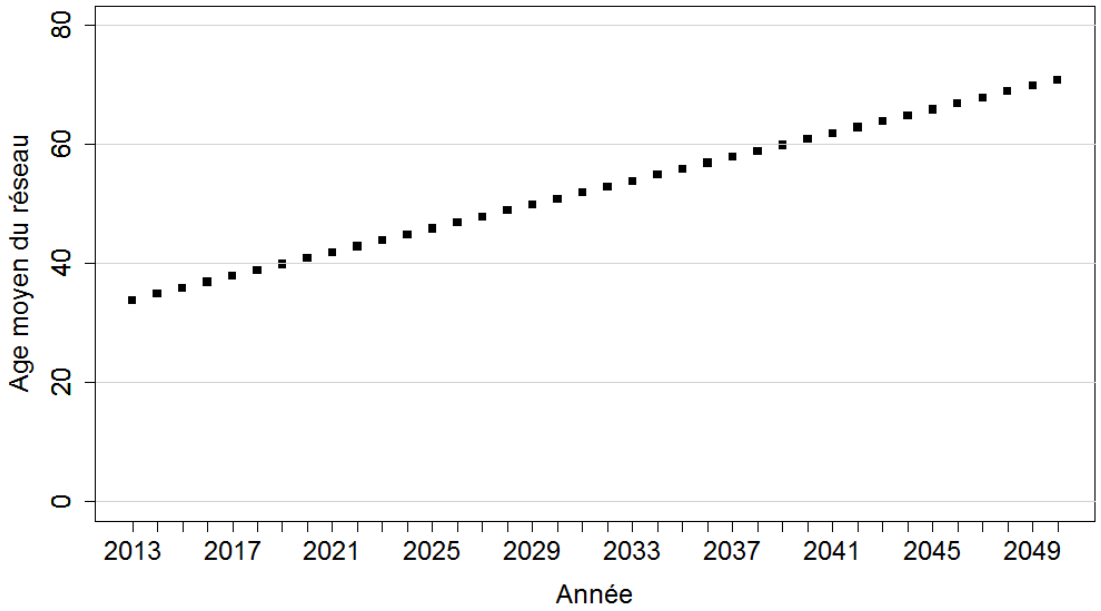


Figure 4 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2013 jusqu'en 2050 au Grand Lyon, scénario « on ne renouvelle plus ».

V Calcul de l'indicateur I1P

V.1 Entrée en linéaire et en tronçon

- Cf. Figure 3

Covariable	Age (t)	Longueur (Z_1)	Diamètre (Z_2)
Unité	Siècle	m	mm

Tableau 1 : Covariables (et leurs unités) employés dans le modèle LEYP

•

Paramètres / Nom strate	$\propto$	δ	β_0	β_1	β_2
Toute strate	4.8	1.19	-2.64	0.47	-0.0029

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle LEYP

V.1 Entrée en tronçon

- Cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**
- Cf. Tableau 1 & Tableau 2

V.2 Sorties en tronçons

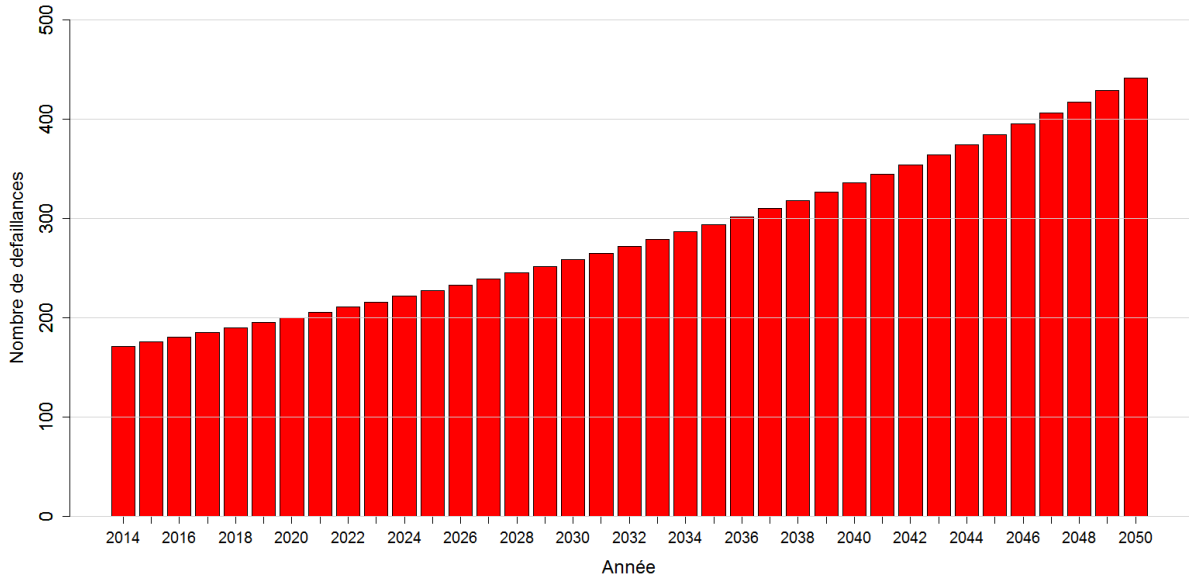


Figure 5 : Prévision du nombre de défaillances futures entre 2014 et 2050, scénario « on ne renouvelle plus ».

V.1 Pour mémoire rappel de pratiques passées

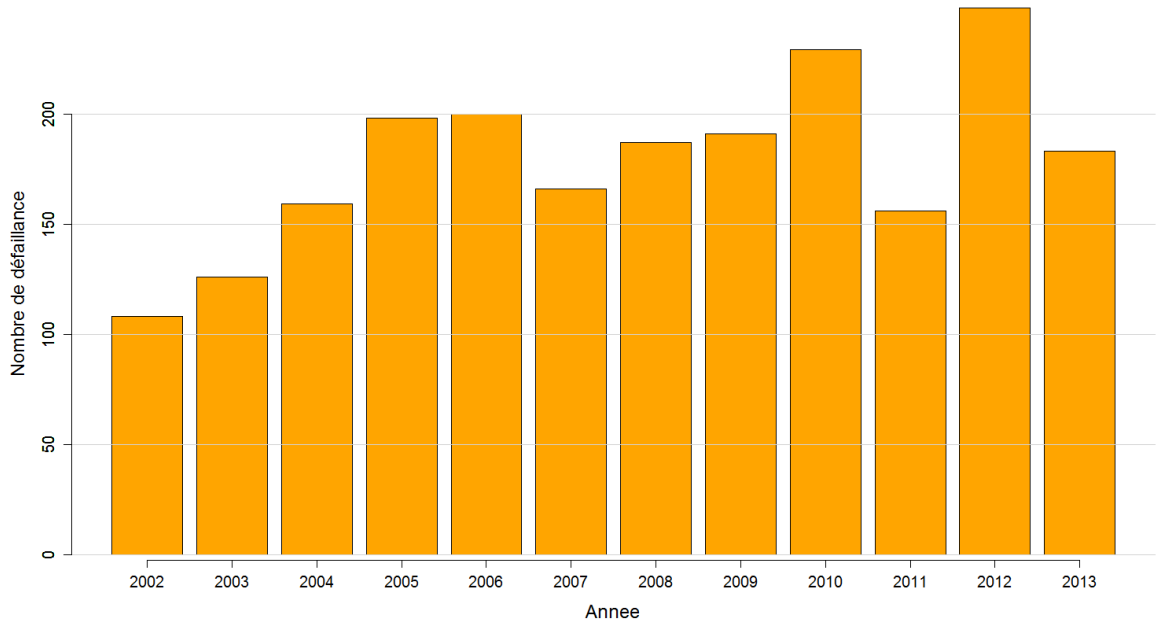


Figure 6 : Nombre de défaillances passées sur le réseau en service au 31/12/2013

VI Calcul de l'indicateur I2P continuité

VI.1 Entrée

Cf. Figure 5 (moins les tronçons mis HS en 2014)

Et

KB7 - EDI - Expected Duration of Interruption

Code of category	Hours	
1	4	> 400 mm
2	3	200 - 400 mm
3	2	< 200 mm
4	0	....

Valeur de SC	Description
0	aucun client sensible
0.3	1 client P1
0.7	1 client P2 ou plusieurs P1
1	1 client P3

Avec : P3 : hôpitaux, maison de retraites, prison, dialysés
P2 : économique : coiffeur, restaurant, hôtel, Ecole, crèche
P1 : prioritaire mais pas trop : Grand Lyon, notables, activités industrielles, etc.

NPS = NBC x NBH
NBC = nombre de branchement par conduite
NBH = nombre d'habitant par branchement = 0.8

VI.2 Modèle

I2P-continuite = NbDef x EDI x NPS x SC

VI.1 Sortie

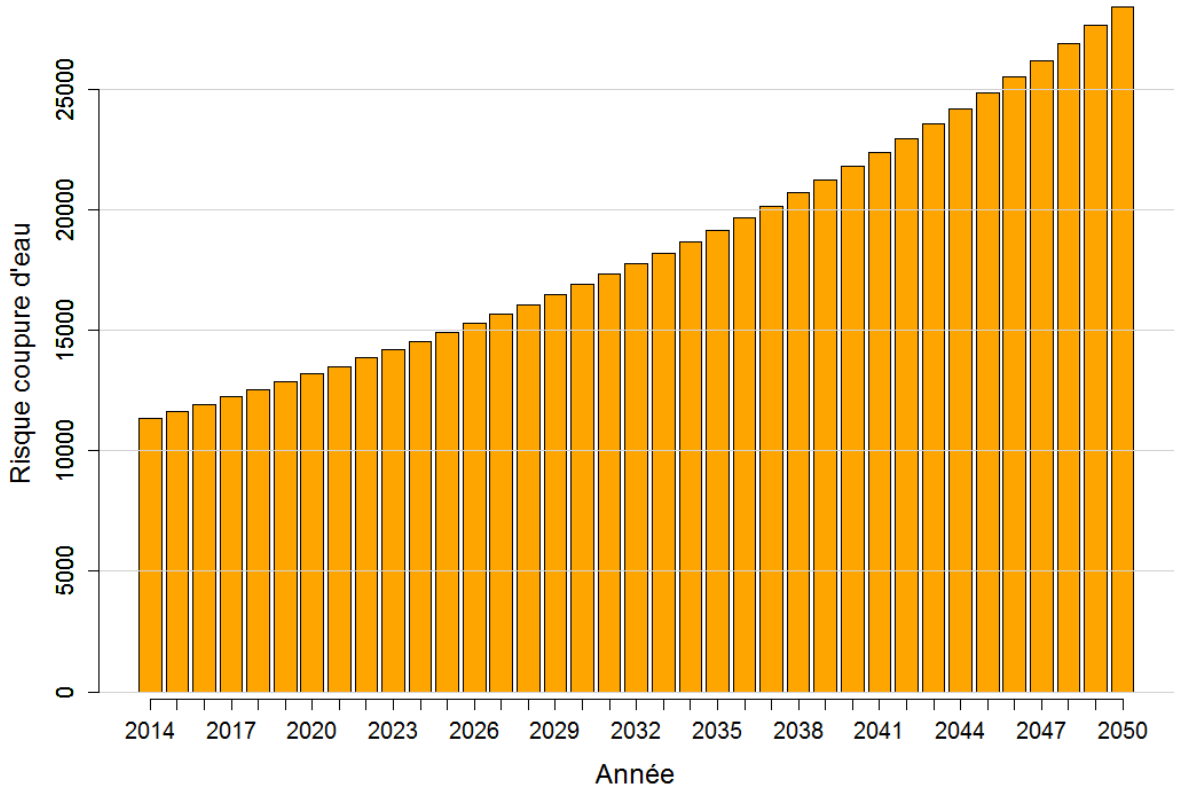


Figure 7 : Prévision pour l'indicateur I2P_continuité entre 2014 et 2050, scénario « statu quo».

VII Calcul de l'indicateur I3P voirie

VII.1 Entrée

Cf. Figure 5 (moins les tronçons mis HS en 2014)

cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

KB11 - SR - Sensitivity of the Road

Code of category	index [0,1]	
1	.4	autre
2	1	Chaussée
3	.7	Non déterminé
4	0	0

Tableau 3 : Coefficient lié à la quantité et à la vulnérabilité du trafic routier associé à ce tronçon

VII.2 I3P voirie

I3P-voirie = NbDef x EDI x SR

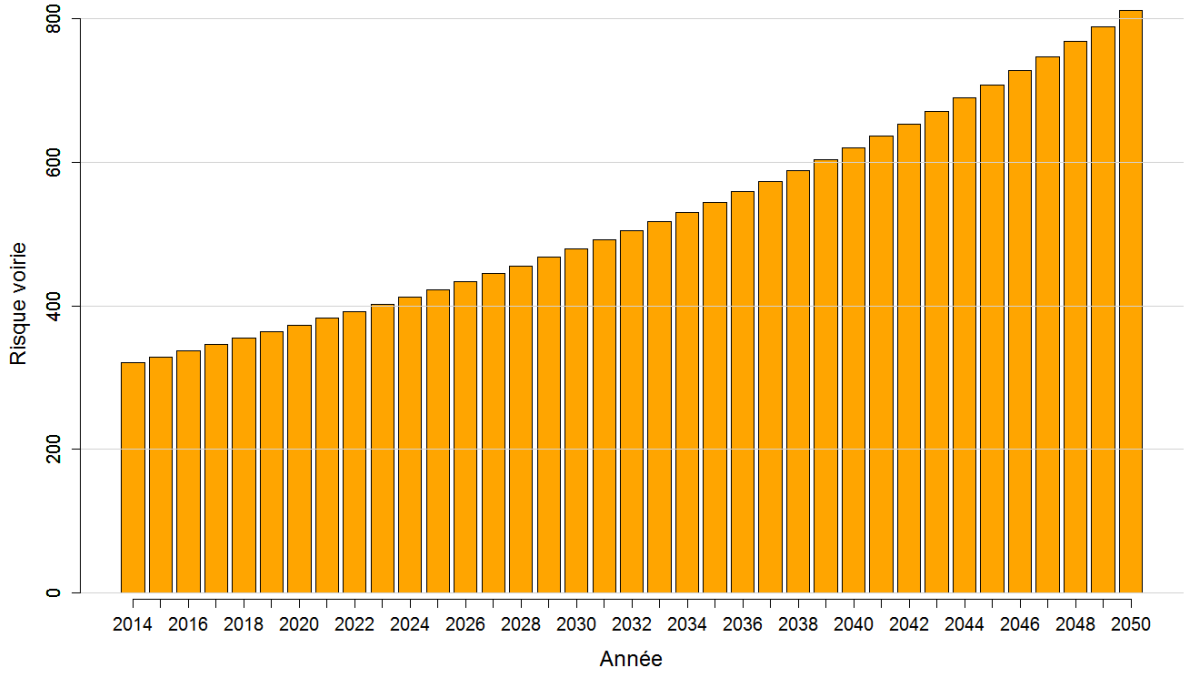


Figure 8 : Prévision pour l'indicateur I3P_voirie entre 2014 et 2050, scénario « statu quo »

VIII Calcul de l'indicateur I4P inondation

VIII.1 Entrée

Cf. Figure 5 (moins les tronçons mis HS en 2014)
+ diamètre du tronçon (mm)
+ pression de l'eau dans le tronçon (m de colonne d'eau)

KB9 - SFI - Sensitivity of Industrial and commercial areas

Code of category	index [0,1]	
1	.5	risk ferré
2	.3	risk parking
3	.8	risk parking et risk ferré
4	.9	Balmes et risk ferré
5	.9	Balmes et risk parking
6	0	Aucun risk
7	1	Tous les risks
8	0	0

KB8 - SFH - Sensitivity of Housing areas to Flooding

Code of category	index [0,1]	
1	0	Periph' sans risk
2	.3	Périph' avec Balmes
3	.4	Lyon sans Balmes
4	.8	Lyon avec Balmes
5	0	0

VIII.2 Modèle

I4P-innondation = NbDef x dia x dia x H x SFH x SFI

VIII.3 Sortie

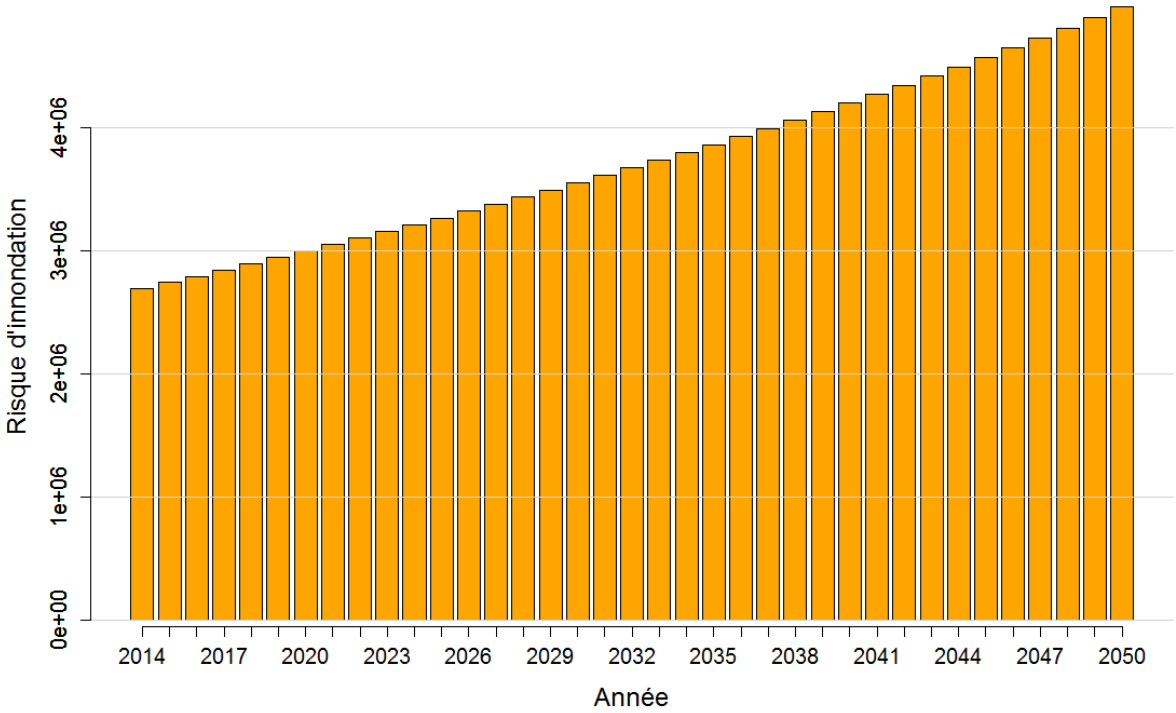
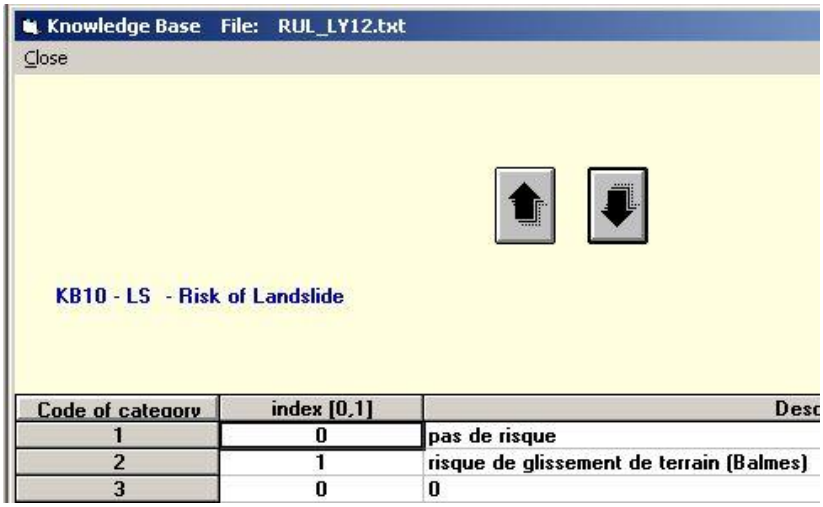


Figure 9 : Prévision pour l'indicateur I4P_inondation entre 2014 et 2050, scénario « statu quo ».

IX Calcul de l'indicateur glissement de terrain

IX.1 Entrée

Cf. Figure 5 (moins les tronçons mis HS en 2014)
+ diamètre du tronçon (mm)
+ pression de l'eau dans le tronçon (m de colonne d'eau)



IX.2 Modèle

I5P = NbDef x dia x dia x H x LS

IX.3 Sortie

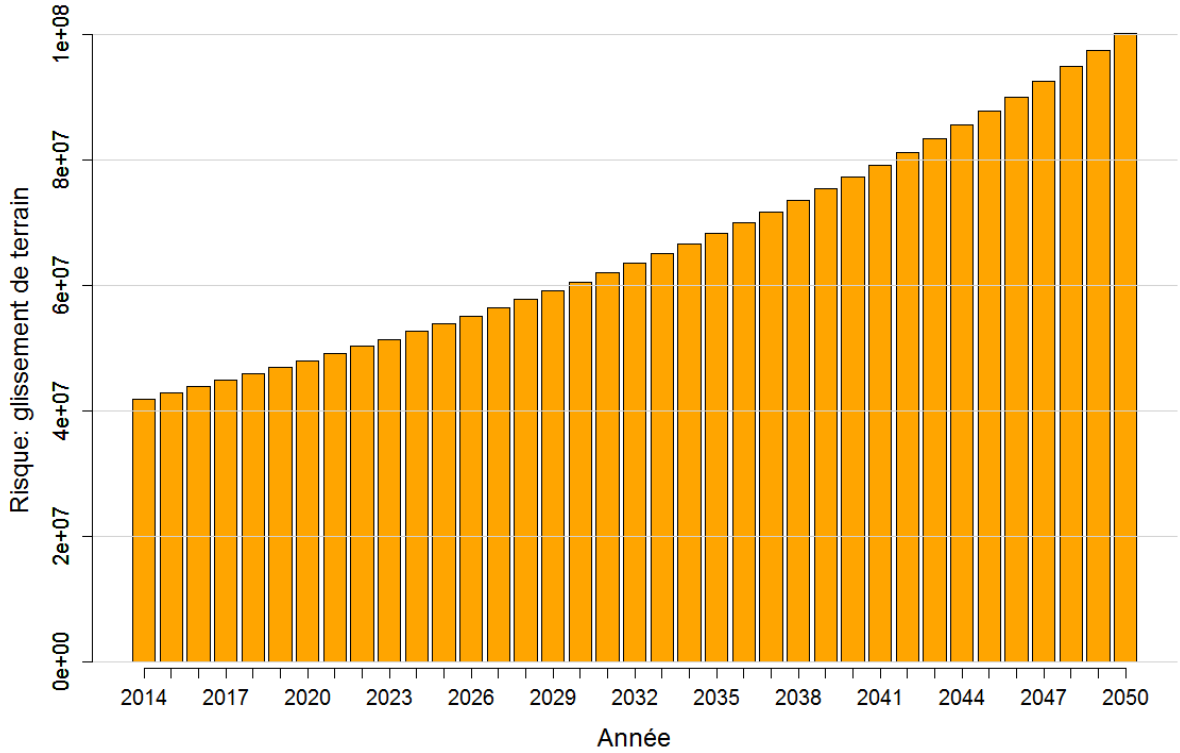


Figure 10 : Prévision pour l'indicateur glissement de terrain entre 2014 et 2050, scénario « statu quo ».