



HAL
open science

**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 (3/3)**

A. Large, M. Tomasian

► **To cite this version:**

A. Large, M. Tomasian. 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 (3/3). [Rapport de recherche] irstea. 2014, pp.138. hal-02603653

HAL Id: hal-02603653

<https://hal.inrae.fr/hal-02603653>

Submitted on 16 May 2020

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.

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 (3/3)

IRSTEA, Groupement de Bordeaux
Unité de Recherche ETBX
Equipe GPIE

50, avenue de Verdun, Gazinet
33612 Cestas cedex

Par Aurore **LARGE** & Max **TOMASIAN**

1ere version **Nov 2014**
Révisé le 03/09/2015

Encadrement : Dr. Y. Le Gat, Dr. S.M.
Elachachi, Ing. E. Renaud & Pr. D. Breyse



Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier les trois autorités organisatrices qui financent le projet « optimeau », nous fournissent leurs données et nous apportent un appui technique :

- le service des eaux de la ville de Lausanne (eauservice Lausanne) en Suisse,
- la communauté urbaine de Lyon (Grand Lyon) et
- le syndicat des eaux d'île de France (SEDIF).

Pour le financement indirect du projet « optimeau », merci :

- au fonds de recherche pour l'eau (Forschungsfonds Wasser = FOWA) de la Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (SSIGE),
- à l'agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse,
- et à l'agence de l'eau Seine Normandie.

J'adresse des remerciements tout particuliers aux membres de notre comité d'encadrement : Dr. Yves LE GAT, Dr. Sidi-Mohammed ELACHACHI, Ing. Eddy RENAUD et Pr. Denis Breyse. En effet venant chacun de disciplines différentes la communication a parfois été difficile mais les complémentarités ont été d'une grande richesse.

Un grand merci à tous les participants aux comités de suivi du projet « optimeau » (cf. Tableau 1) pour leurs réponses à nos questions et leurs regards critiques tant sur le point pratique que théorique.

Prénom NOM	Structure	Pays	Statut	Présent com suivi 1	Présent com suivi 2	Présent com suivi 3
M. Yves LE GAT	IRSTEA	France	Encadrement	Oui	Oui	Oui
M. Sidi-Mohammed ELACHACHI	Université Bordeaux (Génie Civil)	France	Encadrement	Oui	Oui	Oui
M. Eddy RENAUD	IRSTEA	France	Encadrement	Oui	Oui	Oui
M. Denys BREYSSE	Université Bordeaux (Génie Civil)	France	Encadrement	Oui	Oui	Non
M. Sébastien APOTHELOZ	Eauservice Lausanne	Suisse	Terrain d'étude	Oui	Non	Non
Mme Linda VIGUET	Eauservice Lausanne	Suisse	Terrain d'étude	Oui	Oui	Non
Mme Christelle SANZ	Eauservice Lausanne	Suisse	Terrain d'étude	Non	Oui	Oui
Mme Lisa SCHOLTEN	EAWAG	Suisse	Experte	Non	Oui	Non
M. Joao LEITAO	EAWAG	Suisse	Expert	Non	Oui	Non
Mme Anne LANG	SED Ile de France	France	Terrain d'étude	Oui	Non	Oui
M. Bruno CHOUX	SED Ile de France (Hydratech)	France	Terrain d'étude	Oui	Non	Non
M. Olivier CHESNEAU	SED Ile de France	France	Terrain d'étude	Oui	Non	Oui
Mme Claire LEFORT	SED Ile de France	France	Terrain d'étude	Non	Oui	Non
M. Sylvain CHARRIERE	SED Ile de France	France	Terrain d'étude	Non	Non	Oui
M. Christophe PERROD	SED Ile de France	France	Terrain d'étude	Non	Non	Oui
M. Sébastien BUTTOUDIN	Véolia Ile de France	France	Expert	Non	Non	Oui
Mme Anne-Claire SANDRAZ	Véolia Ile de France	France	Experte	Oui	Oui	Oui
M. Didier FANGEAT	Grand Lyon	France	Terrain d'étude	Oui	Oui	Oui
Mme Elisabeth SIBEUD	Grand Lyon	France	Terrain d'étude	Non	Oui	Non
M. Pascal LE GAUFFRE	INSA Lyon	France	Expert	Non	Oui	Oui
M. David POINARD	Véolia Gd Lyon	France	Expert	Non	Oui	Oui
M. Frédéric IMMEDIATO	AERMC	France	Expert	Non	Oui	Non
Mme Caty WEREY	IRSTEA-ENGEES	France	Experte	Oui	Oui	Non
Mme Sylvie FERRARI	Université Bordeaux (Economie)	France	Experte	Oui	Non	Non
M. Vincent COUALLIER	Université Bordeaux (Statistiques)	France	Expert	Oui	Oui	Oui

Tableau 1 : Liste des membres du comité de suivi du projet « optimeau »

En plus des membres du comité de suivi, merci aux autres personnes que nous avons interviewées : M. Franck BRAUX (responsable unité gestion patrimoniale du service pilotage eau potable du Grand Lyon) et M. Stéphane RAVANAT (Veolia Grand Lyon, responsable de l'équipe recherche de fuites).

Je remercie toute l'équipe GPIE de l'IRSTEA, et le département GCE de l'université de Bordeaux, pour leur aide, leur soutien et leur disponibilité.

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 optimiser ressources et performances, il est important d'essayer de renouveler les tronçons au meilleur moment possible. Dans ce cadre, ce rapport présente les modèles « court terme » (1 à 3 ans) et « long terme » (> 30 ans) actuellement employés au Grand Lyon. Les processus « court terme » semblent pertinents, mais les méthodes « long terme » restent limitées. Ce rapport propose de mettre en place une nouvelle approche « long terme » pour obtenir une vision globale du patrimoine de canalisations et rationaliser sa gestion. Cette approche est testée à partir des données réelles du Grand Lyon.

Dans un premier temps à partir des données historiques du Grand Lyon, nous calculons ses courbes de survie passées. Une courbe de survie donne la probabilité qu'une canalisation a d'être mise hors service après un certain âge. Puis nous élaborons des scénarios prospectifs et nous en déduisons ses courbes de survie prospectives. Ensuite de ces courbes de survie prospectives nous souhaitons estimer des données clés prévisionnelles telles que :

- des indicateurs de réalisation :
 - le linéaire à renouveler,
 - les taux de renouvellement,
 - l'évolution de l'âge moyen du réseau,
- des indicateurs de performance :
 - la prévision du nombre de défaillances,
 - le niveau de risque lié aux coupures d'eau
 - le niveau de risque lié aux inondations induites par des fuites
 - le niveau de risque lié aux coupures de la route à cause des fuites
- des indicateurs de moyen :
 - les coûts d'investissement,
 - les coûts de la maintenance future, etc.

Ces indicateurs doivent permettre d'éclairer les décideurs dans le choix de la stratégie « long terme » à adopter.

Il ressort du scénario prospectif « statu quo » (*i.e.* rien ne change ni dans les objectifs, ni dans les mécanismes impliqués, ni dans les pratiques de gestion) des taux de renouvellement annuel compris entre 1.2 et 1.6% et des coûts d'investissement s'élevant à 17.5 à 25 millions par an sur l'intervalle de temps de 2013 à 2120. Attention, vu le grand nombre d'inconnues dans les données d'entrées, ces chiffres ne sont pas fiables.

SOMMAIRE

Introduction	16
I Présentation du Grand Lyon.....	18
I.1 Territoire, mode de gestion et histoire	18
I.2 Caractéristiques des canalisations.....	20
I.2.1 Origine des données	20
I.2.2 Caractéristiques des linéaires des tronçons	21
I.2.3 Comparaison du linéaire en service et hors service en fonction des dates de pose	23
I.2.4 Linéaire hors service en fonction des dates de mise hors service	27
I.2.5 Les matériaux des canalisations	27
I.2.6 Les diamètres des canalisations	28
I.3 Caractéristiques des défaillances	30
I.3.1 Caractéristiques des défaillances FR (Fuites Réparées)	30
I.3.2 Les défaillances Qualitatives Réparées	33
I.4 Les données environnementales	33
II Vue globale du modèle long terme que l'on souhaite développer dans « optimeau »..	38
III Présentation de la gestion du patrimoine canalisations du Grand Lyon	40
III.1 Présentation du renouvellement passé du Grand Lyon.....	40
III.2 Méthode décisionnelle de « court terme » (≤ 3 ans) pour renouveler les canalisations au Grand Lyon.....	41
III.2.1 Méthode décisionnelle de « court terme » employée par le Grand Lyon, petit diamètre ($\varnothing < 400$ mm)	41
III.2.2 Méthode décisionnelle de « court terme » employée par le Grand Lyon, gros diamètre ($\varnothing \geq 400$)	44
III.3 Méthode décisionnelle moyen terme (6 ans).....	44
III.4 Méthode décisionnelle long terme (> 30 ans)	45
III.4.1 Méthode « Cador »	45
III.4.2 Taux de renouvellement fixe à atteindre	46
III.4.3 Patrimoine expert	47
IV Méthode pour le calcul de la survie empirique passée.....	50
IV.1 Préliminaires	50
IV.2 Nettoyage des données.....	50
IV.2.1 Nettoyage des données tronçons	50
IV.2.2 Nettoyage des données défaillances FR	57
IV.3 Nos données tronquées à gauche, censurées à droite	58
IV.4 Survie empirique des tronçons hors service et en service.....	59
IV.4.1 Kaplan-Meier simple pour données censurées à droite	59
IV.4.2 Kaplan-Meier élargi (en effectif) pour données censurées et tronquées	60
IV.4.3 Kaplan-Meier élargi (en linéaire) pour données censurées et tronquées	61
IV.5 Obtention d'une fonction continue à partir de la fonction de survie empirique discontinue	62
IV.5.1 Ajustement d'un modèle paramétrique classique à notre courbe de survie empirique	62
IV.5.2 Estimation des points inexistants par interpolation linéaire	64
IV.6 Modèle de Cox	64

IV.7 Modèle de Weibull avec covariables au tronçon	66
V Calcul de la survie passée, application aux données du Grand Lyon.....	68
V.1 Courbes de survie sans partitionnement.....	68
V.1.1 Comparaison des courbes de survie en linéaire selon les méthodes employées	68
V.1.2 Comparaison des courbes de survie en linéaire et en effectif	69
V.1.3 Comparaison des courbes de survie « brute » et « corrigée »	71
V.2 Courbes de survie avec partitionnement	73
V.2.1 Comparaison des courbes de survie pour différents diamètres	73
V.2.2 Comparaison courbes de survie pour différentes longueurs	74
V.2.3 Comparaison courbes de survie pour différents matériaux	76
V.2.4 Comparaison courbes de survie selon le nombre de défaillances	77
V.2.5 Comparaison courbes de survie pour des tronçons situés en zone de balme ou non	78
V.2.6 Comparaison courbes de survie pour des tronçons situés sous chaussée ou ailleurs	79
V.3 Résultats du modèle de Cox	81
V.4 Résultats modèle de Weibull avec covariables au tronçon	84
VI Scénario statu quo, calcul d'indicateurs clés au Grand Lyon	87
VI.1 Avec une seule courbe de survie	87
VI.1.1 Courbe de survie prospective	87
VI.1.2 Linéaires futurs à installer	88
VI.1.3 Taux de renouvellement	91
VI.1.4 Age moyen du réseau	91
VI.1.5 Coûts d'investissement	92
VI.2 Avec plusieurs courbes de survie (partitionnement).....	94
VI.2.1 Courbes de survie prospectives avec partition par diamètre	94
VI.2.2 Linéaires futurs à installer	96
VI.2.3 Taux de renouvellement	97
VI.2.4 Age moyen du réseau	98
VI.2.5 Coûts d'investissement non actualisé	98
Conclusion.....	100
Bibliographie.....	102
Annexe 1: Conseils d'un point de vue statistique pour la gestion des données.....	106
Annexe 2: Fiche intervention pour une défaillance, exemple	108
Annexe 3: Méthode de nettoyage de la variable type de défaillances FR	109
Annexe 4: Evolution des critères utilisés entre 2003 et 2013 avec Care-W_ARP	110
Annexe 5: Extrait de l'outil partagé entre le délégataire Veolia et le Grand Lyon pour les gros Diamètre Feed'eau	111
Annexe 6: Méthode de nettoyage des matériaux en fonction des dates de pose	112
Annexe 7: Méthode de nettoyage de la variable emplacement.....	113
Annexe 8: Graphique avec une fenêtre d'observation des tronçons mis hors service de 4 ans [2008, 2012].....	115
Annexe 9 : Définition de la censure et de la troncature	117
Annexe 10 : Méthode pour calculer la survie des tronçons hors service = « survie brute »... 	118
Annexe 11 : Description de la méthode de Turnbull	119

Annexe 12 : Validation des méthodes de Kaplan-Meier et de Turnbull, démonstration en effectif.....	121
Annexe 13 : Validation des méthodes de Kaplan-Meier et de Turnbull, démonstration en Linéaire.....	125
Annexe 14 : Description de la méthode d'optimisation de Nelder & Mead.....	127
Annexe 15 : Méthode de déconditionnement	130
Annexe 16 : Le modèle de Weibull à covariables est un modèle de Cox particulier	131
Annexe 17: Courbes de survie des tronçons partitionnés par diamètre.....	132
Annexe 18: Corrélation entre longueur et diamètre.....	134
Annexe 19: Courbes de survie des tronçons partitionnés par zone de balme ou non.....	135
Annexe 20: Courbes de survie des tronçons partitionnés selon leur emplacement (sous chaussée ou autre)	136
Annexe 21: Indice <i>TPI0A</i>, canalisation, égouts, assainissement et adduction d'eau avec fourniture de tuyaux.....	137

Table des illustrations

Figures

FIGURE 1 : L'IDEAL DE L'ARTICULATION ENTRE LES DIFFERENTS OUTILS FONCTIONNANT A DIFFERENTES ECHELLES TEMPORELLES	17
FIGURE 2: TERRITOIRE COUVERT PAR LE GRAND LYON AU 10/10/ 2013 ET SES DELEGATAIRES POUR LA GESTION DE L'EAU POTABLE	19
FIGURE 3 : EXTRAIT DU JEU DE DONNEES DES TRONÇONS EN SERVICE EN OCTOBRE 2014	20
FIGURE 4 : EXTRAIT DU JEU DE DONNEES DES TRONÇONS HORS SERVICE EN OCTOBRE 2014	21
FIGURE 5 : FREQUENCE CUMULEE DU NOMBRE DE TRONÇONS (EN SERVICE ET HORS SERVICE) EN FONCTION DE LEURS LONGUEURS (EN METRE) (100% = 58 043 TRONÇONS)	21
FIGURE 6 : ZOOM DU NOMBRE DE TRONÇONS EN FONCTION DE LEURS LONGUEURS.....	22
FIGURE 7 : DIAGRAMME DU LINEAIRE (KM) EN SERVICE DU GRAND LYON TVD AU 31/12/2012 EN FONCTION DES DATES DE POSE (3 060 KM AU TOTAL) (1% AVEC DDP INCONNUE)	23
FIGURE 8 : HISTOGRAMME DU LINEAIRE EN SERVICE (2 127KM AVEC DDP SURES ET 902KM AVEC DDP ESTIMEES) ET HORS SERVICE (123 KM AVEC DDP SURE ET 116KM AVEC DDP ESTIMEES) AU 31/12/2012 AYANT UNE DATE DE POSE CONNUE (EN ROUGE NE SONT REPRESENTES QUE LES TRONÇONS MIS HS ENTRE [2002, 2012]).	23
FIGURE 2 : HISTOGRAMME DU LINEAIRE EN SERVICE ET HORS SERVICE AU 31/12/2012 EN FONCTION DE LEUR AGES (EN ROUGE NE SONT REPRESENTES QUE LES TRONÇONS MIS HS ENTRE [2002 ; 2012])	24
FIGURE 9 : DIAGRAMME DU LINEAIRE (KM) DU GRAND LYON TVD MIS HORS SERVICE SUR LA FENETRE [2002, 2012] EN FONCTION DES DATES DE POSE (TOTAL 334 KM).....	25
FIGURE 10 : HISTOGRAMME DU LINEAIRE HORS SERVICE (HS) (115 KM AVEC DDP SURES ET 113KM AVEC DDP ESTIMEES) AU 31/12/2012 AYANT UNE DATE DE POSE CONNUE (NE SONT REPRESENTES QUE LES TRONÇONS MIS HS ENTRE [2002, 2012])......	26
FIGURE 11 : HISTOGRAMME DU LINEAIRE HORS SERVICE ARCHIVE AU 31/12/2012.....	27
FIGURE 12 : LES MATERIAUX DU RESEAU EN SERVICE AU 31/12/2012 AYANT UNE DDP (3 061 KM)	27
FIGURE 13 : HISTOGRAMME DU LINEAIRE EN SERVICE ET HORS SERVICE EN FONCTION DES DDP ET DE LEURS MATERIAUX AU 31/12/2012 ET LINEAIRE MIS HORS SERVICE SUR LA FENETRE [2002, 2012]......	28
FIGURE 14 : LINEAIRE DE TRONÇONS EN SERVICE EN FONCTION DE LEURS DIAMETRES (3 060 KM).....	29
FIGURE 15 : FREQUENCE CUMULEE DE LA LONGUEUR DES TRONÇONS (EN SERVICE) EN FONCTION DE LEUR DIAMETRE (100% = 3 060 KM).....	29
FIGURE 16 : SCHEMA RECAPITULATIF DU LIEN ENTRE FUITES, CASSES, TROUS ET DEFAILLANCES FR	30
FIGURE 17 : EXTRAIT DU FICHIER DEFAILLANCES FR	31
FIGURE 18 : NOMBRE DE DEFAILLANCES FR ARCHIVEES PAR AN, JUSQU'EN 2014.....	32
FIGURE 19 : TYPE DE DEFAILLANCES « FUITES REPARÉES » SUR TRONÇONS (POINARD 2006)	32
FIGURE 20 : NOMBRE DE DEFAILLANCES ACTIVES DANS LE SIG DU GRAND LYON TVD MI-2013 EN FONCTION DE LEURS LOCALISATIONS GEOGRAPHIQUE (SOURCE : GRAND LYON, 2015).....	33
FIGURE 21 : LOCALISATION DES ZONES DE BARMES DANS LA VILLE DE LYON	35
FIGURE 22 : SCHEMA DE LA DEMARCHE GLOBALE DU MODELE « LONG TERME » OPTIMEAU	38
FIGURE 23 : TAUX MOYEN DE RENOUVELLEMENT SUR 5 ANS DU GRAND LYON TVD.....	40
FIGURE 24 : TAUX DE RENOUVELLEMENT ANNUEL DU GRAND LYON TVD CALCULE A PARTIR DU LINEAIRE HORS SERVICE DANS LE SIG	41
FIGURE 25 : LES PREMIERES ETAPES DE LA DECISION DE LA MISE HORS SERVICE DES TRONÇONS AU GRAND LYON A COURT TERME (EN 2014).....	42
FIGURE 26 : EXEMPLE DE CARTE REALISEES AVEC LES SORTIES DU MODELE DECISIONNEL DE CARE-W-ARP	43
FIGURE 27 : LES DERNIERES ETAPES DE LA DECISION DE LA MISE HORS SERVICE DE TRONÇONS AU GRAND LYON A COURT TERME (EN 2014), LES POURCENTAGES SONT DONNES A TITRE INDICATIF	43
FIGURE 28 : LES DUREES DE MAINTIEN EN SERVICE SELON LES EXPERTS DU GRAND LYON (PILLOT 2011).....	45
FIGURE 29 : FONCTION DE SURVIE DES TRONÇONS EN FONTE GRISE POSES APRES 1960 ET HORS ZONE SENSIBLE SELON LES EXPERTS DU GRAND LYON.	46
FIGURE 30 : PREVISION DES BESOINS EN RENOUVELLEMENT SELON LA METHODE « CADOR » AU GRAND LYON (PILLOT 2011).....	46
FIGURE 31 : EXEMPLE DE SORTIE DU LOGICIEL PATRIMOINE EXPERT.....	48

FIGURE 32 : HISTOGRAMME DU LINEAIRE EN SERVICE [3 029KM AVEC DDP3 =(DDP SURES +DDP ESTIMEES)] ET HORS SERVICE [239 KM AVEC DDP3 (DDP SURES +DDP ESTIMEES)] AU 31/12/2012 AYANT UNE DATE DE POSE CONNUE (EN ROUGE NE SONT REPRESENTES QUE LES TRONÇONS MIS HS ENTRE [2002, 2012]).	52
FIGURE 33 : HISTOGRAMME DU LINEAIRE EN SERVICE [2 127 KM AVEC DDP SURES] ET HORS SERVICE [115 KM AVEC DDP SURES] AU 31/12/2012 AYANT UNE DATE DE POSE CONNUE (EN ROUGE NE SONT REPRESENTES QUE LES TRONÇONS MIS HS ENTRE [2002, 2012]).	53
FIGURE 34 : HISTOGRAMME DU LINEAIRE EN SERVICE [3 029KM AVEC DDP3 =(DDP SURES +DDP ESTIMEES)] ET HORS SERVICE [340 KM AVEC DDP3 (DDP SURES +DDP ESTIMEES)] AU 31/12/2012 AYANT UNE DATE DE POSE CONNUE (EN ROUGE NE SONT REPRESENTES QUE LES TRONÇONS MIS HS ENTRE [2002, 2012]).	54
FIGURE 35 : HISTOGRAMME DU LINEAIRE EN SERVICE [2 018 KM AVEC DDP3 = (DDP SURES +DDP ESTIMEES)] ET HORS SERVICE [239 KM AVEC DDP3 (DDP SURES +DDP ESTIMEES)] AU 31/12/2012 AYANT UNE DATE DE POSE CONNUE (EN ROUGE NE SONT REPRESENTES QUE LES TRONÇONS MIS HS ENTRE [2002, 2012]).	55
FIGURE 36 : HISTOGRAMME DU LINEAIRE EN SERVICE [3 029KM AVEC DDP3 = (DDP SURES +DDP ESTIMEES)] ET HORS SERVICE [175 KM AVEC DDP3 = (DDP SURE +DDP ESTIMEES)] AU 31/12/2012 AYANT UNE DATE DE POSE CONNUE (EN ROUGE NE SONT REPRESENTES QUE LES TRONÇONS MIS HS ENTRE [2008, 2012]).	56
FIGURE 37 : HISTOGRAMME DU LINEAIRE EN SERVICE [2 127 KM AVEC DDP SURES] ET HORS SERVICE [227 KM AVEC DDP3 = (DDP SURES +DDP ESTIMEES)] AU 31/12/2012 AYANT UNE DATE DE POSE CONNUE (EN ROUGE NE SONT REPRESENTES QUE LES TRONÇONS MIS HS ENTRE [2002, 2012]).	57
FIGURE 38 : DIAGRAMME DU NOMBRE DE DEFAILLANCES FR OBSERVE ENTRE [2002, 2012] SUR TRONÇON OU SUR JOINT, SACHANT S'IL A ETE POSSIBLE OU PAS DE LES RATTACHER A UN IDENTIFIANT DE TRONÇON PRIS EN COMPTE DANS LA METHODE 2 (36% ONT UN IDENTIFIANT TRONÇON PRIS EN COMPTE DANS LA METHODE 2)	57
FIGURE 39 : DISPOSITIONS POSSIBLES DES TRONÇONS VIS-A-VIS DE LA FENETRE D'OBSERVATION, ILLUSTRATION DE LA TRONCATURE A GAUCHE ET DE LA CENSURE A DROITE.	58
FIGURE 40 : COURBES DE SURVIE DU GRAND LYON TVD APRES AVOIR APPLIQUE PLUSIEURS METHODES POUR COMPLETER LES DONNEES D'ENTREE ET COURBES DE SURVIE DU SEDIF ET D'EAUSERVICE LAUSANNE	68
FIGURE 41 : COURBES DE SURVIE PASSEE EN LINEAIRE ET EN EFFECTIF, GRAND LYON TVD, TOUS TRONÇONS CONFONDUS ENTRE [2002 2012]	70
FIGURE 42 : COURBE DE SURVIE EN NOMBRE DE TRONÇONS ACCOMPAGNEE DE SON INTERVALLE DE CONFIANCE, TOUS TRONÇONS CONFONDUS.	71
FIGURE 43 : COURBES DE SURVIE EN LINEAIRE, TOUS TRONÇONS CONFONDUS ET INTERVALLE DE CONFIANCE DE KAPLAN-MEIER	72
FIGURE 44 : COURBES DE SURVIE PASSES [2002, 2012] EN LINEAIRE (TRONÇONS PARTITIONNES SELON LE DIAMETRE)	73
FIGURE 45 : DIAGRAMME DE LA STRATIFICATION PAR DIAMETRE (EN LINEAIRE)	74
FIGURE 46 : COURBES DE SURVIE EN EFFECTIF DES TRONÇONS (TRONÇONS PARTITIONNES EN 2 STRATES : MOYENNES ET GRANDES LONGUEURS) ET LEURS INTERVALLES DE CONFIANCE (EN GRIS FONCE).	75
FIGURE 47 : DIAGRAMME DE LA REPARTITION DU NOMBRE DE TRONÇONS SELON LEUR LONGUEUR.	75
FIGURE 48 : COURBES DE SURVIE EN LINEAIRE POUR DIFFERENTS MATERIAUX (* CES COURBES ONT ETE DECONDITIONNEES).	76
FIGURE 49: COURBES DE SURVIE EN EFFECTIF (TRONÇONS PARTITIONNES EN 2 STRATES SELON LA VALEUR DE NDOA) ET LEURS INTERVALLES DE CONFIANCE (EN GRIS FONCE)	77
FIGURE 50: DIAGRAMME DE LA STRATIFICATION AVEC NDOA	78
FIGURE 51: COURBES DE SURVIE EN EFFECTIF (TRONÇONS PARTITIONNES EN 3 STRATES SI LES TRONÇONS SONT POSITIONNES EN ZONE DE BALME OU NON OU INDETERMINEE) ET LEURS INTERVALLES DE CONFIANCE (EN GRIS FONCE)	78
FIGURE 52: DIAGRAMME DE LA STRATIFICATION DES TRONÇONS SELON LEUR POSITIONNEMENT EN ZONE DE BALME OU NON OU INDETERMINEE (NOMBRE DE TRONÇONS)	79
FIGURE 53: COURBES DE SURVIE EN EFFECTIF (TRONÇONS PARTITIONNES EN 2 STRATES SI LES TRONÇONS SONT POSITIONNES SOUS CHAUSSEE OU AUTRE)	79
FIGURE 54: DIAGRAMME DE LA STRATIFICATION DES TRONÇONS SELON LEUR POSITIONNEMENT SOUS CHAUSSEE OU AUTRE (NOMBRE DE TRONÇONS)	80
FIGURE 55 : VISUALISATION DES RESIDUS DE SCHOENFELD ASSOCIES A LA COVARIABLE NDOA EN FONCTION DE L'AGE DES TRONÇONS	83
FIGURE 56 : EQUATION A POUR 4 000 TRONÇONS SELECTIONNES PAR TIRAGE ALEATOIRE SANS REMISE ET EQUATION A MOYENNE SUR TOUS LES TRONÇONS GRAND LYON TVD	85
FIGURE 57 : COURBES DE SURVIE DE KAPLAN-MEIER TOUS TRONÇONS CONFONDUS ET EQUATION A MOYENNE SUR TOUS LES TRONÇONS GRAND LYON TVD	85

Elaboration d'un modèle long terme pour optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable

FIGURE 58 : COURBE DE SURVIE PROSPECTIVE (ROUGE) OBTENUE A PARTIR DE LA COURBE EMPIRIQUE (ISSUE DE KM EN BLEU A PARTIR DE LA METHODE N°2 « DDP SURES »)	87
FIGURE 59 : LINEAIRE EN SERVICE AU GRAND LYON PAR DATE DE POSE (3 060 KM), ENTREE DE NOTRE MODELE	88
FIGURE 60 : RECONSTITUTION DU LINEAIRE PASSE ET PREVISION DES LINEAIRES FUTURS JUSQU'EN 2013, PHOTOGRAPHIE DE LA SITUATION EN 2013, RESEAUX DE TRANSPORT ET DE DISTRIBUTION.	89
FIGURE 61 : RECONSTITUTION DU LINEAIRE PASSE ET PREVISION DES LINEAIRES FUTURS JUSQU'EN 2050, PHOTOGRAPHIE DE LA SITUATION EN 2050, RESEAUX DE TRANSPORT ET DE DISTRIBUTION.	90
FIGURE 62 : RECONSTITUTION DU LINEAIRE PASSE ET PREVISION DES LINEAIRES FUTURS JUSQU'EN 2120, PHOTOGRAPHIE DE LA SITUATION EN 2120, RESEAUX DE TRANSPORT ET DE DISTRIBUTION.	90
FIGURE 63 : PREVISION DES TAUX DE RENOUVELLEMENT FUTURS DE 2013 JUSQU'EN 2120 AU GRAND LYON TVD	91
FIGURE 64 : PREVISION DE L'EVOLUTION DE L'AGE MOYEN DU RESEAU DE 2013 JUSQU'EN 2120 AU GRAND LYON TVD.....	92
FIGURE 65 : PREVISIONS DES BUDGETS NECESSAIRES POUR LE RENOUVELLEMENT ENTRE 2013 ET 2120 SANS ACTUALISATION RESEAUX DE TRANSPORT ET DE DISTRIBUTION.....	93
FIGURE 66 : PREVISIONS DES BUDGETS NECESSAIRES POUR LE RENOUVELLEMENT ENTRE 2013 ET 2120 AVEC 3 TAUX D'ACTUALISATION DIFFERENTS ET DEUX EVOLUTIONS DE L'INDICE TP10A DIFFERENTS, RESEAUX D'EXHAURE, DE TRANSPORT ET DE DISTRIBUTION DU GRAND LYON TVD.....	94
FIGURE 67 : COURBES DE SURVIE PROSPECTIVES EN LINEAIRE (CF. TRAIT FIN) OBTENUE A PARTIR DES COURBES EMPIRIQUE DE KAPLAN-MEIER ET AJUSTE (EQUATION DE WEIBULL), TOUS TRONÇONS CONFONDUS, PARTITIONNES EN 2 STRATES (PETITS ET GROS DIAMETRE).....	95
FIGURE 68 : LINEAIRE EN SERVICE EN 2012 AU GRAND LYON TVD EN FONCTION DES DATES DE POSE, DIFFERENCIE SELON DEUX CLASSES DE DIAMETRE. VERT : DDP CONNUES POUR DIA [MIN, 300[, BLEU : 1% DU LINEAIRE DES DDP CONNUES POUR DIA [MIN, 300[, CYAN : DDP CONNUES POUR DIA [300, MAX], ROSE : 1% DU LINEAIRE DES DDP CONNUES POUR DIA [300, MAX].	96
FIGURE 69 : RECONSTITUTION DU LINEAIRE PASSE ET PREVISION DES BESOINS (EN LINEAIRE) FUTURS JUSQU'EN 2120, PHOTOGRAPHIE DE LA SITUATION EN 2120, PARTITIONNEMENT PAR LE DIAMETRE.....	97
FIGURE 70 : PREVISION DES TAUX DE RENOUVELLEMENT FUTURS DE 2013 JUSQU'EN 2120 POUR LES TRONÇONS DE « GROS DIAMETRES », DE « PETITS DIAMETRES » ET « TOUS DIAMETRES », AU GRAND LYON TVD AVEC LE SCENARIO « SATU QUO : PLUSIEURS COURBES ».....	97
FIGURE 71 : PREVISIONS DE L'EVOLUTION DE L'AGE MOYEN DU RESEAU DE 2013 JUSQU'EN 2120 AU GRAND LYON TVD, SCENARIO « STATU QUO, PLUSIEURS COURBES », TRONÇONS PARTITIONNES PAR DIAMETRE.....	98
FIGURE 72 : PREVISIONS DES BUDGETS NECESSAIRES POUR LE RENOUVELLEMENT ENTRE 2013 ET 2120, SCENARIO « STATU QUO, PLUSIEURS COURBES », TRONÇONS PARTITIONNES PAR DIAMETRE.	99
FIGURE 73 : DIAGRAMME DU LINEAIRE (KM) DU GRAND LYON TVD MIS HORS SERVICE SUR LA FENETRE [2008, 2012] EN FONCTION DES DATES DE POSE (TOTAL 140 KM).....	115
FIGURE 74 : HISTOGRAMME DU LINEAIRE EN SERVICE (2 127KM AVEC DDP SURES ET 902KM AVEC DDP ESTIMEES) ET HORS SERVICE (54 KM AVEC DDP SURE ET 79 KM AVEC DDP ESTIMEES) AU 31/12/2012 AYANT UNE DATE DE POSE CONNUE (EN ROUGE NE SONT REPRESENTES QUE LES TRONÇONS MIS HS ENTRE [2008, 2012]).	115
FIGURE 75 : HISTOGRAMME DU LINEAIRE HORS SERVICE (HS) (54 KM AVEC DDP SURES ET 79 KM AVEC DDP ESTIMEES) AU 31/12/2012 AYANT UNE DATE DE POSE CONNUE (NE SONT REPRESENTES QUE LES TRONÇONS MIS HS ENTRE [2008, 2012])......	116
FIGURE 76 : FONCTION DE SURVIE NON PARAMETRIQUE.....	120
FIGURE 77 : COURBE DE SURVIE REELLE.....	122
FIGURE 78 : DATE DE POSE DES 40 000 TRONÇONS CONSTITUANT L'ECHANTILLON (EN EFFECTIF).....	123
FIGURE 79 : REPARTITION DES DATES A LA MISE HORS SERVICE (EN EFFECTIF) DES 40 000 TRONÇONS.....	123
FIGURE 80 : COURBES DE SURVIE ESTIMEES (EN EFFECTIF) ET INTERVALLE DE CONFIANCE.....	124
FIGURE 81 : DATE DE POSE DES TRONÇONS CONSTITUANT L'ECHANTILLON (EN LINEAIRE)	125
FIGURE 82 : REPARTITION DES DATES A LA MISE HORS SERVICE (EN LINEAIRE)	126
FIGURE 83 : COURBES DE SURVIE ESTIMEES (EN LINEAIRE)	126
FIGURE 84 : EVOLUTION POSSIBLE DU SIMPLEXE DE NELDER & MEAD	128
FIGURE 85 : ORGANIGRAMME DE LA METHODE DE NELDER & MEAD CLASSIQUE	129
FIGURE 86 : METHODE DE DECONDITIONNEMENT.....	130
FIGURE 87 : COURBES DE SURVIE PASSES [2002-2012] EN EFFECTIF (TRONÇONS PARTITIONNES EN 2 SOUS-ENSEMBLES DIAMETRE < 300MM EN ROUGE ET DIAMETRE >= 300MM EN BLEU) ET LEURS INTERVALLES DE CONFIANCES.....	132

FIGURE 88 : DIAGRAMME EN EFFECTIF (TRONÇONS PARTITIONNES EN 2 SOUS-ENSEMBLES DIAMETRE < 300MM EN ROUGE ET DIAMETRE >= 300MM EN BLEU).....	132
FIGURE 89 : COURBES DE SURVIE PASSEES [2002-2012] EN EFFECTIF (TRONÇONS PARTITIONNES EN 2 SOUS-ENSEMBLES DIAMETRE < 400MM EN ROUGE ET DIAMETRE >= 400MM EN BLEU) ET LEURS INTERVALLES DE CONFIANCES.....	133
FIGURE 90 : DIAGRAMME DES EFFECTIFS (TRONÇONS PARTITIONNES EN 2 SOUS-ENSEMBLES DIAMETRE < 400MM EN ROUGE ET DIAMETRE >= 400MM EN BLEU).....	133
FIGURE 91 : CORRELATION ENTRE LONGUEUR ET DIAMETRE EN NOMBRE DE TRONÇON (ECHELLE REDUITE)	134
FIGURE 92 : CORRELATION ENTRE LONGUEUR ET DIAMETRE EN NOMBRE DE TRONÇON	134
FIGURE 93: COURBES DE SURVIE EN EFFECTIF (TRONÇONS PARTITIONNES EN 3 STRATES SI LES TRONÇONS SONT POSITIONNES EN ZONE DE BALME OU NON OU INDETERMINEE) ET LEURS INTERVALLES DE CONFIANCE (EN GRIS FONCE).....	135
FIGURE 94: COURBES DE SURVIE EN EFFECTIF, TRONÇONS PARTITIONNES EN 2 STRATES SI LES TRONÇONS SONT POSITIONNES SOUS CHAUSSEE OU AUTRE, ET LEURS INTERVALLES DE CONFIANCE (EN GRIS FONCE).....	136
FIGURE 95 : EVOLUTION DE L'INDICE TP 10A ENTRE JANVIER 2004 ET SEPTEMBRE 2013	137

Tableaux

TABLEAU 1 : LISTE DES MEMBRES DU COMITE DE SUIVI DU PROJET « OPTIMEAU »	2
TABLEAU 2 : QUANTILES ET MOYENNE DU NOMBRE DE TRONÇONS EN FONCTION DE LEURS LONGUEURS (100% = 58 043 TRONÇONS).....	22
TABLEAU 3 : QUANTILES ET MOYENNE DU NOMBRE DE TRONÇONS EN FONCTION DE LEUR DIAMETRE (100% = 3 060 KM).....	29
TABLEAU 4 : LISTE DES DONNEES ENVIRONNEMENTALES UTILES ET DISPONIBLES AU GRAND LYON POUR SA GESTION PATRIMONIALE.....	36
TABLEAU 5 : CORRESPONDANCE ENTRE L'INDICE DE RENOUVELLEMENT EN POURCENTAGE ET L'INDICE DE RENOUVELLEMENT EN CLASSE (NALDEO 2013).	47
TABLEAU 6 : DUREES DE MAINTIEN EN SERVICE PAR MATERIAU EMPLOYEES PAR NALDEO DANS LA SIMULATION DE 2011 POUR LE GRAND LYON (POYRI 2011).....	48
TABLEAU 7 : EXTRAIT DES CHAMPS CONCERNANT LES DATES DE POSE DES TRONÇONS DANS NOTRE BASE DE DONNEES.....	51
TABLEAU 8 : AGE MEDIAN A LA MISE HORS SERVICE DU RESEAU D'EAU POTABLE (EN KM) SUR LE TERRITOIRE DU GRAND LYON TVD .	72
TABLEAU 9 : LES AGES MINIMAUX ET MAXIMAUX DES TRONÇONS OBSERVES DANS LA FENETRE D'OBSERVATION [2002; 2012] PAR TYPE DE MATERIAUX.....	77
TABLEAU 10 : PRIX MOYEN POUR LE RENOUVELLEMENT D'UN METRE DE TRONÇON PAR CLASSE DE DIAMETRES .	98
TABLEAU 11 : STRUCTURE DE L'INDICE TP 10A	137
TABLEAU 12 : EVOLUTION DE L'INDICE TP 10A ENTRE JANVIER 2004 ET SEPTEMBRE 2013	138

Sigles, acronymes et abréviations

AEP Alimentation en Eau Potable

ARP Annual Rehabilitation Programmes

AERMC Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse

BATO Béton âme tôle de Bonna Sabla

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 des Forêts

cf. confere

CGCT Code Général des Collectivités Territoriales

CVM Chlorure de Vinyle Monomère

Dr. Docteur

EAWAG Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology

ES En Service

ETBX Environnement, Territoires et infrastructures, Bordeaux (ex REBX + ADBX)

FOWA Forschungsfonds Wasser

FR Fuites Réparées

GCE Génie Civil Environnemental

GPIE Gestion Patrimoniale des Infrastructures liées à l'Eau (ex NETWATER)

HS Hors Service

i.i.d. indépendantes et identiquement distribuées

Ing. Ingénieur

IRSTEA Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

KM Kaplan-Meier

Km kilomètre

NA Not Available

NDOA Nombre de Défaillances FR Observées par An sur la fenêtre d'observation

NETWATER NETwork WATER (UK), réseau d'eau (F)

NT Non Trouvées

PEBD Polyéthylène Basse Densité

PEHD Polyéthylène Haute Densité

Pr. Professeur d'Université

PVC Polychlorure de Vinyle

QR Qualitatives Réparées

RPQS Rapport sur le Prix et la Qualité du Service

SEDIF Syndicat des Eaux d'Ile-de-France

SIG Système d'Information Géographique

SSIGE Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux

TVD Territoire dont Veolia est le Délégué du service public de l'eau potable

Notations

θ	Année, ex : 1995
DDP	Année de pose
DHS	Année à la mise hors service
θ_1	Année de démarrage de la fenêtre d'observation
θ_2	Dernière année de la fenêtre d'observation
T ou t	Age à la mise hors service, ex : 60 ans ; $t = DHS - DDP$
a_i	Age au début de la fenêtre d'observation de l'individu i
b_i	Age à la fin de la fenêtre d'observation de l'individu i
c_i	L'individu i est censuré si $c_i=1$, non censuré si $c_i = 0$
Lg	Longueur
ϕ	Diamètre
$NDOA$	Nombre moyen de défaillances FR observées par an sur la fenêtre d'observation
r	Taux d'actualisation
$S(t)$	Fonction de survie (dépendant de t)
$F(t)$	Fonction de répartition (dépendant de t)
$f(t)$	Densité (dépendante de t)
$\lambda(t)$	Fonction de risque instantané (dépendant de t)
$P(A)$	Mesure de probabilité de l'évènement A
$C\theta$	Cohorte (groupe de tronçons) posée l'année θ
TR	Taux de renouvellement
L	Fonction de vraisemblance
W	Temps de censure
θ	Vecteur de paramètres
$I\{\dots\}$	La fonction indicatrice qui prend 1 si la proposition en arguments (les conditions entre accolades) est vraie, 0 sinon

Introduction

Dans les pays développés, l'eau potable est distribuée au domicile des usagers. Ce confort implique un long linéaire de réseau (plus de 900 000 km en France en 2014) avec une valeur des ouvrages élevée (entre 120 et 170 milliards d'euros en France dont 70% correspond aux canalisations) (Bouchet 2013) & (Charrière 2013).

Le renouvellement annuel d'une fraction du linéaire des canalisations est nécessaire à cause du vieillissement « naturel » de ces objets techniques, qui entraîne l'érosion progressive de leur niveau de performance. En parallèle du vieillissement, l'évolution des besoins et des contraintes (coordination avec les travaux de voirie, urbanisation, législation) peut nécessiter le remplacement de tronçons obsolètes en bon état.

Dans une optique d'optimisation des ressources et des performances, il est alors important de renouveler les tronçons en temps opportun (ni trop tôt, ni trop tard).

Dans ce cadre, l'IRSTEA, organisme public de recherche finalisée sur la gestion des eaux et des territoires, a lancé le programme de recherche « Optimeau » dont le but est d'optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable. Ce rapport s'inscrit dans ce programme de recherche. Ce projet est financé directement par le Syndicat des Eaux D'Ile de France (SEDIF), la Communauté Urbaine de Lyon (Grand Lyon) et le Service des Eaux de la ville de Lausanne (eauservice Lausanne). Il est financé indirectement par l'agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse, et le fonds de recherche pour l'eau (Forschungsfonds Wasser = FOWA) de la Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (SSIGE) et l'agence de l'eau Seine Normandie (AESN).

L'approche proposée pour optimiser ressources et performances est de partir d'une vision « long terme » (>30 ans) permettant de prédire le linéaire de canalisations qui doit être renouvelé chaque année, pour respecter des objectifs stratégiques de performance. Puis d'en déduire le besoin annuel en investissement à « moyen terme » (≈ 10 ans, échelle maximale des budgets des services). Il faut ensuite appliquer des méthodes de « court terme » (≤ 3 ans) permettant d'obtenir pour l'année à venir une liste de tronçons hiérarchisés par niveau de besoin et opportunités en renouvellement (cf. Figure 1).

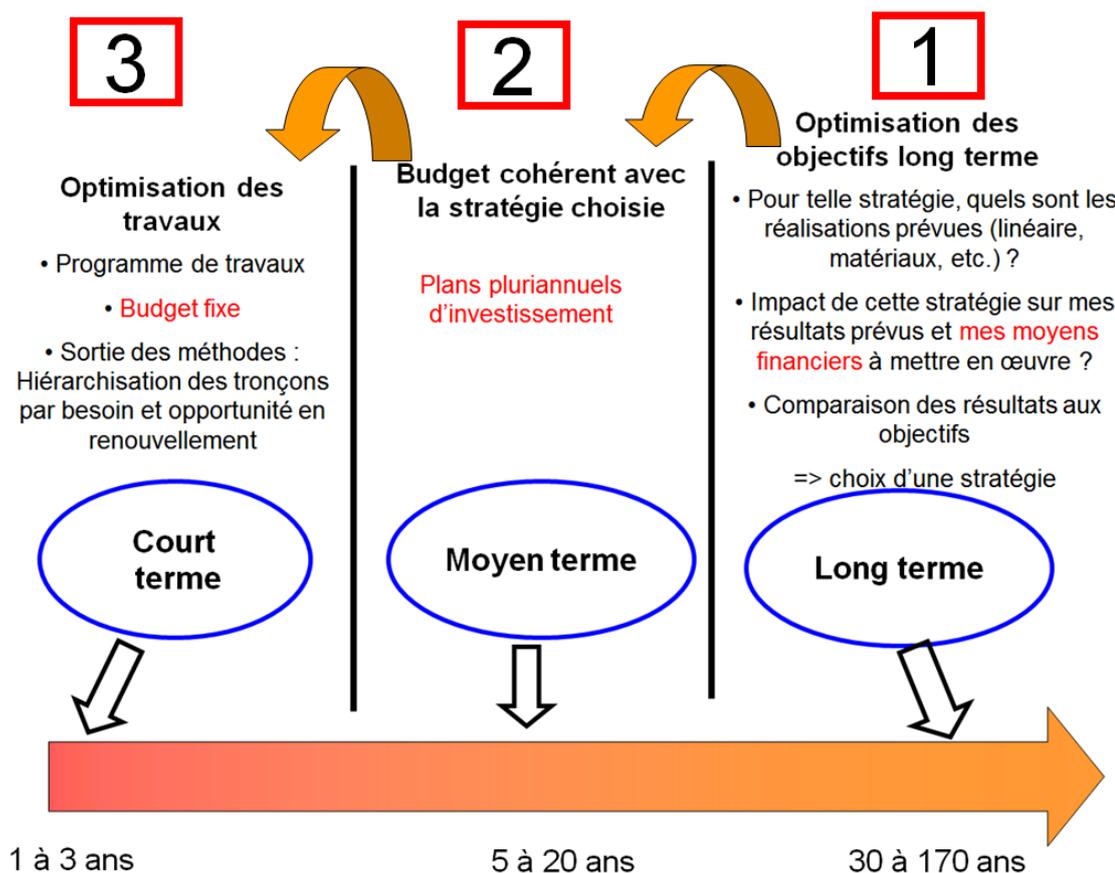


Figure 1 : L'idéal de l'articulation entre les différents outils fonctionnant à différentes échelles temporelles

Le problème est qu'actuellement les méthodes décisionnelles sur le long terme employées par les services des eaux ou dans la bibliographie sont souvent inexistantes ou trop simples et déconnectées des méthodes décisionnelles sur du court terme.

L'objectif final du projet « optimeau » est de construire une méthode à long terme (> 30 ans) permettant d'aider aux choix des réalisations (linéaire, matériaux, etc.) afin d'optimiser le renouvellement des canalisations.

Dans une **première section** nous présenterons le terrain d'étude (Grand Lyon) et le jeu de données sur lequel nous nous sommes appuyés.

Dans la **seconde partie** nous présenterons de manière globale la méthode « long terme » que nous souhaitons développer dans le projet « Optimeau ».

Dans un **troisième temps** nous exposerons les différentes méthodes de gestion patrimoniale actuellement employées au Grand Lyon (méthodes décisionnelles long terme et court terme).

Puis dans la **quatrième partie** nous exposerons différentes méthodes statistiques de construction de courbe de survie passée d'âge à la mise hors service (modèle de Kaplan-Meier, modèle de Cox, modèle de Turnbull...).

Ensuite dans une **cinquième section** nous appliquerons ces méthodes avec les données du Grand Lyon.

Finalement nous construirons des indicateurs clés tels que des taux de renouvellement futurs, des linéaires futurs, l'âge moyen du réseau ou encore les coûts d'investissement, toujours à partir des données du Grand Lyon.

I Présentation du Grand Lyon

I.1 Territoire, mode de gestion et histoire

Le conseil municipal de la ville de Lyon a approuvé le 16 septembre 1853 le premier traité de concession en France pour la distribution d'eau potable. La Compagnie Générale des Eaux, créée par décret impérial le 14 décembre 1853, s'est ainsi vu confier la construction et l'exploitation des moyens de production et de distribution de l'eau potable avec un premier réseau de 78 km de canalisations.

À partir de 1870, les réseaux d'eau potable se construisent peu à peu sur les communes limitrophes de Lyon, avec des contrats spécifiques pour chaque commune. En 1929, est créé le syndicat à vocation unique : Syndicat Intercommunal des Eaux de la Banlieue de Lyon (SIEB), chargé de la gestion de l'eau potable, sur initiative du maire de Villeurbanne de l'époque le syndicat délègue le service à la Compagnie générale des eaux, alors que la commune de Lyon a racheté son contrat de concession en 1899 pour une exploitation du service en régie directe.

À la suite d'une loi de 1966, la communauté urbaine de Lyon est créée le 1er janvier 1969. Elle englobe outre la ville centre, les 28 communes de l'ex-Syndicat Intercommunal des Eaux de la Banlieue de Lyon, ainsi que d'autres communes qui la rejoignent pour former une intercommunalité de 55 communes en 1969. Dans un souci d'harmonisation, plusieurs contrats seront signés dans les années suivantes pour déléguer la gestion du service de l'eau potable.

La communauté urbaine de Lyon (Grand Lyon), et antérieurement « Courly » est une communauté urbaine française, structure intercommunale regroupant en 2013, 58 communes (cf. Figure 2) (Gd Lyon 2013c) et s'étend sur 51 500 hectares. La population du Grand Lyon s'élève en 2013 à plus de 1,3 millions d'habitants, soit 80 % de la population du département du Rhône, pour une superficie qui représente 16 % du territoire du département.

La Communauté urbaine de Lyon exerce actuellement trois grands types de compétences (Gd Lyon 2013c) :

- Le soutien au développement économique : accompagnement du tissu économique territorial et de son évolution, participation aux grands projets de développement, implantation d'entreprises nouvelles, promotion de l'image du territoire métropolitain ;
- L'urbanisme et l'habitat : logement social, renouvellement urbain, élaboration des documents d'urbanisme, politique de la ville, planification et aménagement du territoire ;
- Les services au quotidien : eau potable, assainissement, collecte et traitement des ordures ménagères, nettoyage, déplacements, stationnement, gestion et exploitation de la voirie, des espaces publics, ouvrages d'art et tunnels.

En 2013 : le Grand Lyon délègue la gestion du service eau potable à 3 fermiers (cf. Figure 2) :

- ✓ Veolia Eau : 85% de la population du Grand Lyon
- ✓ Lyonnaise des Eaux : 10% de la population du Grand Lyon
- ✓ Saur : 2% de la population du Grand Lyon.

De plus 4 communes sont desservies par des syndicats extérieurs.

Elaboration d'un modèle long terme pour optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable

Son réseau d'eau potable (exhaure¹, transport² et distribution³) est constitué de 3 900 km (Gd Lyon 2013b). Les 337 000 abonnés (Gd Lyon 2013b) sont alimentés principalement (à 95%) par l'eau issue du champ captant de Crépieux Charmy. Ce champ captant de près de 370 hectares comprend 114 puits ou forages ; le prélèvement se situe dans la nappe alluviale d'accompagnement du Rhône en amont de Lyon. Elle est alimentée par le Rhône et marginalement par la nappe de l'Est lyonnais. Cette zone alimente les usines de production primaire de Croix-Luizet, Crépieux et La Velette. Néanmoins 10 autres sites de captages complètent ce champ captant. Le réseau au sens large comprend aussi 13 stations de pompage primaire, 62 réservoirs, 39 stations relais et 10 surpresseurs (Gd Lyon 2012).

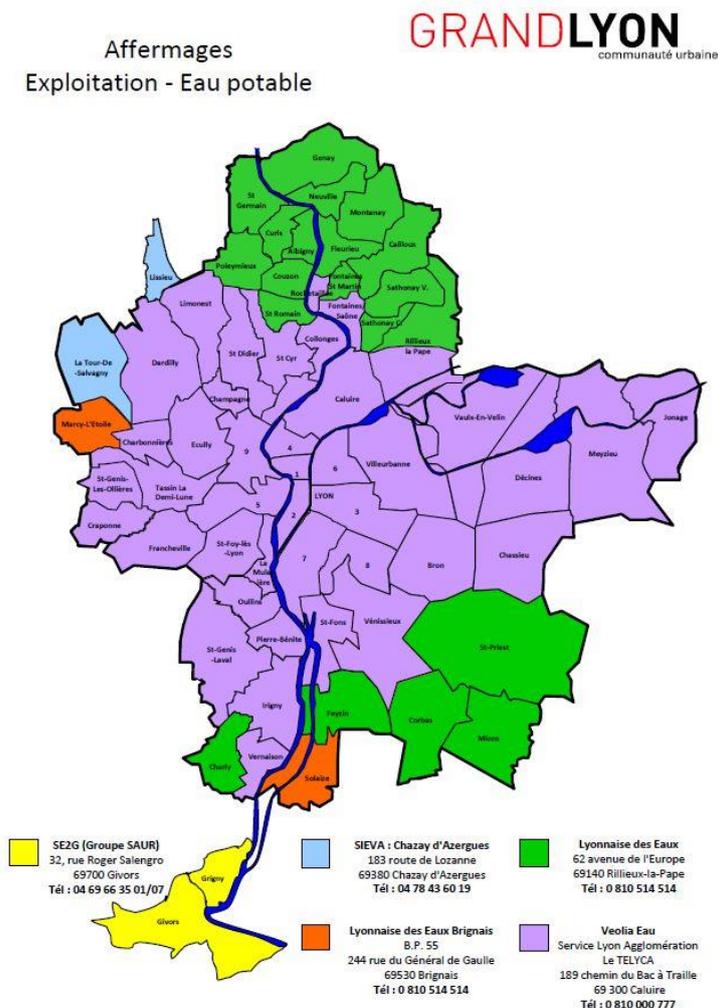


Figure 2: Territoire couvert par le Grand Lyon au 10/10/ 2013 et ses délégataires pour la gestion de l'eau potable

¹ Exhaure : souvent nommé réseau d'adduction dans d'autres services d'eau, réseau du captage à la station primaire ou la station relais. Il est très faible en linéaire au Grand Lyon.

² Transport : réseau entre la station relais ou la station primaire et le réservoir.

³ Distribution : réseau où sont connectés les branchements. Sachant qu'un branchement correspond à peu près au réseau entre le réseau de distribution et le compteur de l'abonné.

Le Grand Lyon est propriétaire de toutes les installations de production, de transport et de distribution (usines, réservoirs, canalisations...).

A partir du 3 février 2015, le groupe Veolia sera le seul délégataire du Grand Lyon en matière d'eau potable. Le contrat, a été conclu pour 8 ans avec une société dédiée (Eau du Grand Lyon). A noter que le précédent contrat courait sur 30 ans (depuis 1987) (Senet 2014).



Par la suite, pour nous faciliter le travail, nous travaillerons uniquement sur les tronçons du territoire du Grand Lyon dont le délégataire était Veolia (TVD) en 2013. Ce territoire concernait en 2013 : 85% de la population du Grand Lyon sur 33 communes.

De plus tous les graphiques suivants sont effectués sur les données « nettoyées » selon la méthode décrite dans le paragraphe IV.2.

I.2 Caractéristiques des canalisations

I.2.1 Origine des données

Ce travail est effectué sur les données des canalisations d'eau potable du réseau de transport et distribution du Grand Lyon TVD. Ce réseau est composé par plus de 59 600 tronçons. Un tronçon est souvent 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). Mais au Grand Lyon la définition n'est pas tout à fait celle-là : un tronçon est la représentation dans le SIG (système d'information géographique) d'une portion élémentaire de conduite qui tient compte des changements d'environnement de la canalisation : par exemple, lors du passage d'une situation « sous chaussée » à « sous trottoir » d'une conduite, un nouveau tronçon est créé.

L'ensemble de l'étude est basé principalement sur deux fichiers tronçons comportant chacun des informations fondamentales :

Fichier des tronçons en service : Ce premier fichier illustré par la Figure 3 comporte des informations pour chaque tronçon. Nous pouvons y distinguer sa date de pose sûre (connue précisément), sa date de pose estimée, son matériau, son identifiant, etc. Toutes ces précieuses descriptions permettent d'obtenir les caractéristiques propres à chaque tronçon. Ce fichier comprend 10 variables. Ces données ont été extraites en octobre 2014 du système d'information géographique (SIG) de Veolia - territoire du Grand Lyon. Il comprend plus de 51 300 tronçons.

FACILITYID	INSTALLDATE	DATE_ESTIME	MATERIAL	DIAMETER	EMPLAC	CHARGE	LONGSYS
61928	2000	2000	FDUC	100	Chaussee paire	100	84.38
28693	1995	1995	FDUC	150	Trottoir impair	100	52.27
7595	NA	1956	FONT	80	Chaussee impaire		98.72
72599	2007	2007	FDUC	100	Chaussee paire		56.41
73731	2008	2008	FDUC	150	Chaussee paire	100	13.00
12388	1984	1984	FDUC	150	Trottoir pair		161.00
12397	2005	2005	FDUC	80	Trottoir pair		100.02
35571	1973	1973	FDUC	80	Chaussee	100	91.85

Figure 3 : Extrait du jeu de données des tronçons en service en octobre 2014

Fichier des tronçons hors service : Ce fichier est assez similaire au premier (cf. Figure 4) mais il ne concerne que les tronçons hors service (c'est-à-dire des tronçons déposés ou abandonnés). En plus des variables décrites ci-dessus, nous avons leurs dates de mise hors service si cette dernière

est connue. Il est à noter qu'à la date de notre étude, les tronçons hors service ne sont plus reliés au SIG. Ce fichier comprend 76 variables. Ces données nous ont été fournies en octobre 2014 par Veolia. Il comprend plus de 8 300 tronçons.

MSLINK	MAPID	COMMUNE	RESEAU	MSRUE	EMPLAC	DIAM	MATERIAU	ANNEE	LONGSYS
32307	255	383	25	11125	Chaussee impaire	80	FT	-1	110.810
31808	10	10	10	10451	Chaussee	500	FT	-1	110.430
31759	128	52	1	17345	Chaussee paire	150	FD	1987	10.180
31760	128	52	1	17345	Chaussee paire	150	FD	1987	7.880
31761	128	52	1	17345	Chaussee paire	150	FD	1987	11.410
31737	10	10	10	10558	Propriete privee	500	FD	1988	5.320
31740	10	10	10	10646	Propriete privee	500	FT	-1	23.740
31275	2	381	25	10184	Trottoir	125	INC	-1	111.530
31197	128	52	1	17334	Chaussee impaire	150	FD	1991	1.990
31178	2	381	25	10008	Chaussee paire	100	INC	-1	107.290

Figure 4 : Extrait du jeu de données des tronçons hors service en octobre 2014

1.2.2 Caractéristiques des linéaires des tronçons

Les graphiques de la Figure 6 illustrent la distribution de la taille des tronçons. Il en ressort que la plupart des tronçons étudiés est de taille moyenne (minimum 1 cm, et 90% des tronçons ont une longueur inférieure à 146 m [Cf. Figure 5 et Tableau 2]). Effectivement, la médiane se situe à 31 mètres alors que le plus long tronçon mesure 1 300 mètres et la moyenne est de 59 m.

Le nombre de très petits tronçons (<6m) apparaît comme étant important (7 465 tronçons) (cf. Annexe 1). Cela est dû à la définition du tronçon au Grand Lyon. Cette définition induit un découpage des canalisations en fonction de leurs caractéristiques et de leur environnement (chaussée/trottoir, aspects hydrauliques, Balme/non Balmes, etc.).

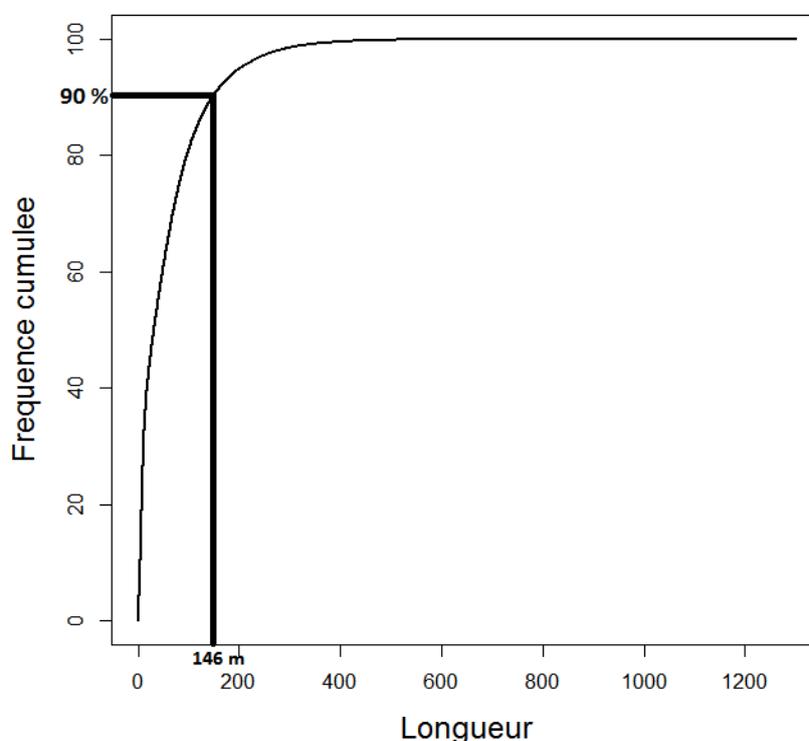


Figure 5 : Fréquence cumulée du nombre de tronçons (en service et hors service) en fonction de leurs longueurs (en mètre) (100% = 58 043 tronçons)

Elaboration d'un modèle long terme pour optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable

Nbre de tronçons (fréquence cumulée)	Le plus petit	1 ^{er} quartile (25%)	Médiane (50%)	Moyenne	3 ^e quartile (75%)	(90%)	Le plus grand (100%)
Valeur	0.01 m	9 m	31 m	59 m	81 m	146 m	1 300 m

Tableau 2 : Quartiles et moyenne du nombre de tronçons en fonction de leurs longueurs (100% = 58 043 tronçons)

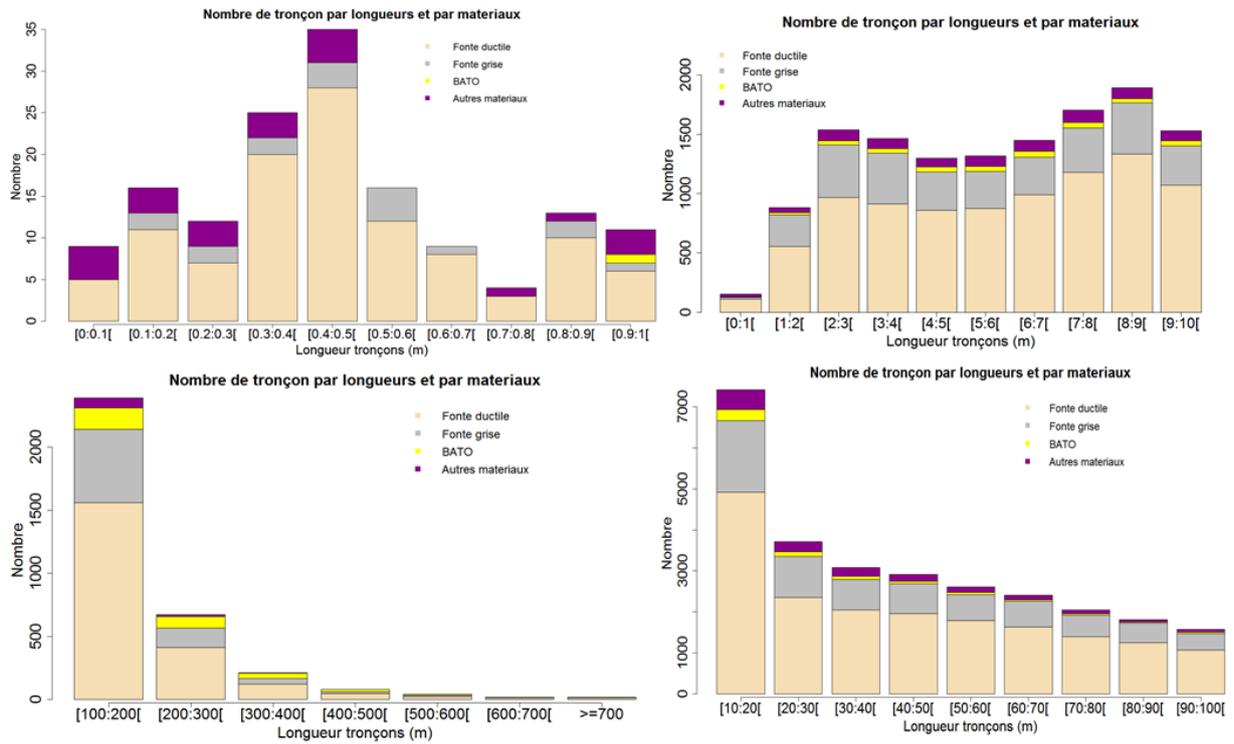


Figure 6 : Zoom du nombre de tronçons en fonction de leurs longueurs

I.2.3 Comparaison du linéaire en service et hors service en fonction des dates de pose

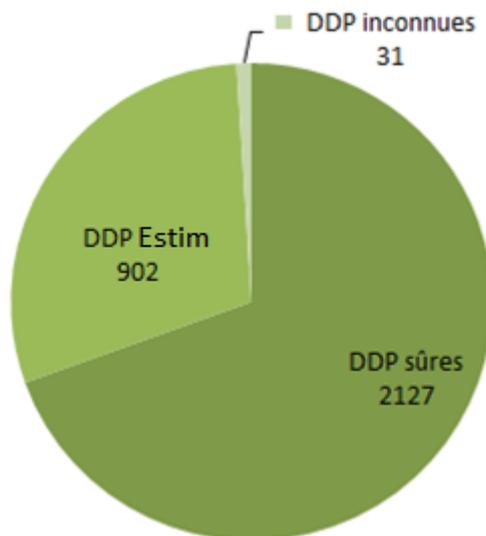


Figure 7 : Diagramme du linéaire (km) en service du Grand Lyon TVD au 31/12/2012 en fonction des dates de pose (3 060 km au total) (1% avec DDP inconnue)

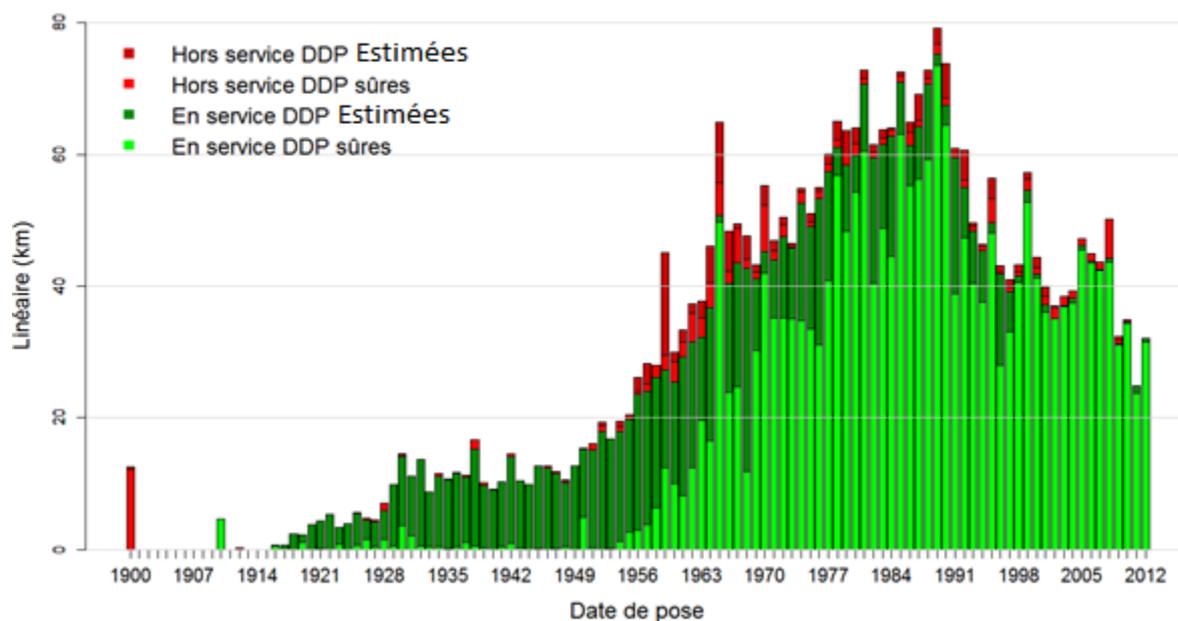


Figure 8 : Histogramme du linéaire en service (2 127km avec DDP sûres et 902km avec DDP estimées) et hors service (123 km avec DDP sûre et 116km avec DDP estimées) au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002, 2012]).

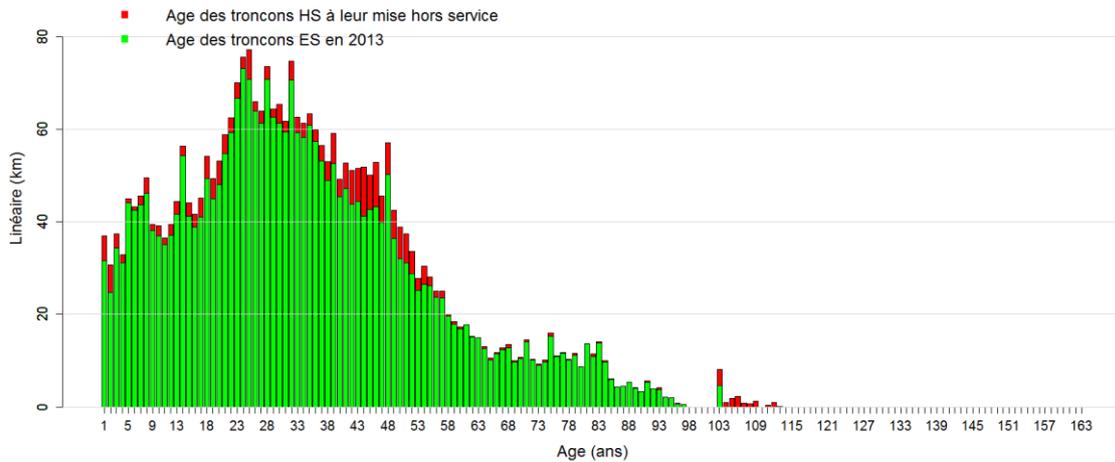


Figure 9 : Histogramme du linéaire En Service et Hors Service au 31/12/2012 en fonction de leur âges (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002 ; 2012])

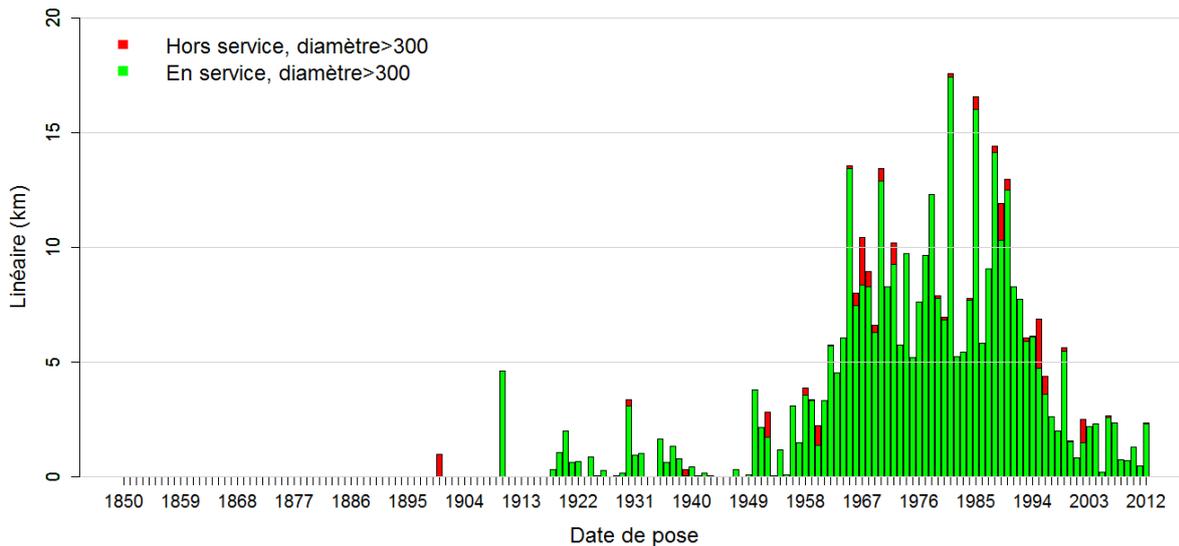


Figure 10 : Histogramme du linéaire en service (DDP sûres et DDP estimées) et hors service (DDP sûre et DDP estimées) au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002, 2012] et ayant un diamètre > 300).

Selon les données présentées au paragraphe I.2.1 le **linéaire en service** au 31/12/2012 au Grand Lyon TVD est de 3 060 km. L'histogramme de la Figure 8 nous donne une photographie des dates de pose (DDP) des canalisations en service en décembre 2012 (cf. barres vertes). La plus vieille canalisation en service fin 2012 date de 1910. Sachant que les premiers réseaux à Lyon ont été posés à partir du milieu du 19^{ème} siècle, on peut supposer que des canalisations plus anciennes existent. Ce graphique fait ressortir un peu la première guerre mondiale (1914-1918) où il y a eu une diminution de la pose de canalisations. L'après-guerre s'accompagne d'une augmentation progressive des travaux.

69.5% des dates de pose des tronçons en service sont bien connues (cf. barre vert claire, DDP sûres). En revanche 29.5% des dates de pose des tronçons en service ont dû être estimées (cf. barre vert foncé, DDP estimées⁴). Cette estimation a dû être faite plus particulièrement sur les tronçons posés avant les années 2000. De plus 31 km du réseau en service ont une DDP inconnue, ce qui correspond à 1% du réseau en linéaire (cf. Figure 7). Ils ne sont donc pas représentés sur la Figure 8.

Dès 1995, les travaux concernent essentiellement des réparations ou des remplacements plutôt que de l'extension de réseau (Ajuste et al. 2004). **L'âge moyen du réseau en service au Grand Lyon est d'environ 34 ans au 31/12/2012.**

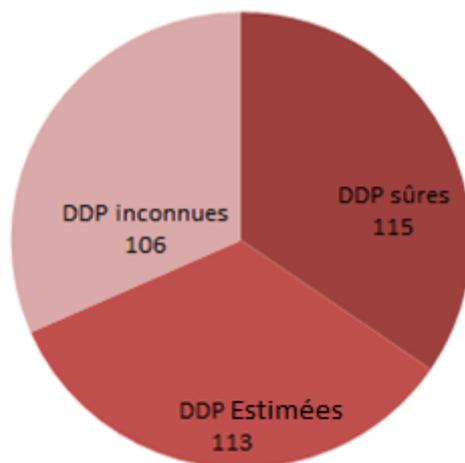


Figure 11 : Diagramme du linéaire (km) du Grand Lyon TVD mis hors service sur la fenêtre [2002, 2012] en fonction des dates de pose (total 334 km)

Selon les données le linéaire qui a été mis **hors service** sur la fenêtre [2002, 2012] au Grand Lyon TVD est de 334 km (cf. Figure 11). 35% ont des dates de pose sûres, 34% ont des dates de pose estimées et 32% ont des dates de pose inconnues. L'histogramme de la Figure 12 présente les dates de pose (si on les a) des tronçons mis hors service entre [2002, 2012].

⁴ La notion de DDP estimées est expliquée dans la partie nettoyage des données au paragraphe IV.2

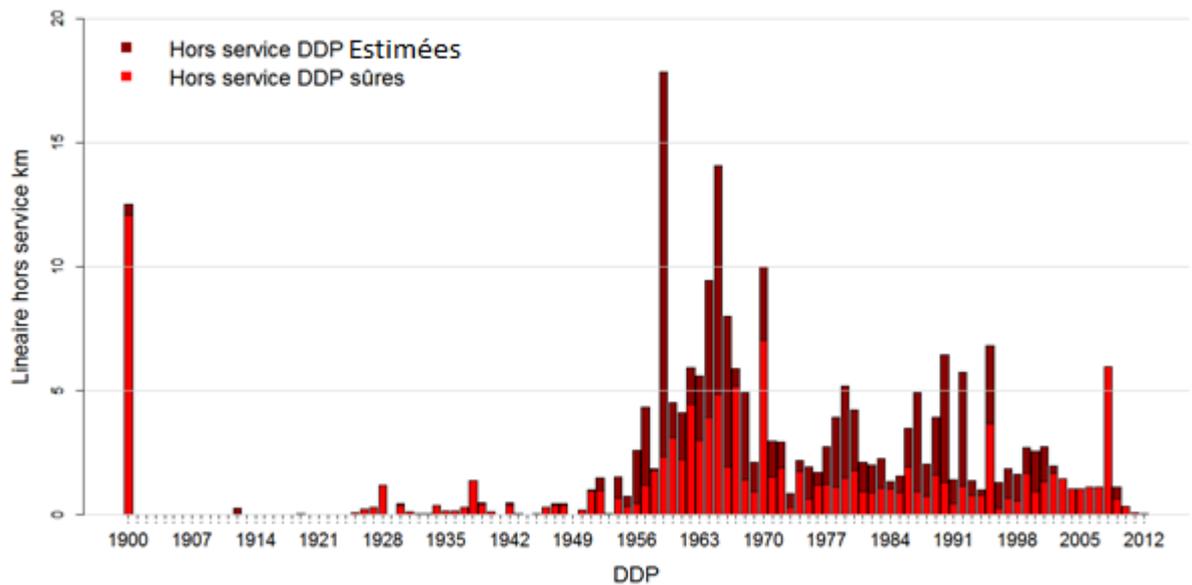


Figure 12 : Histogramme du linéaire hors service (HS) (115 km avec DDP sûres et 113km avec DDP estimées) au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002, 2012])



Attention, la Figure 7 indique que, fin 2012, **1%** du linéaire en service ont une date de pose (DDP) inconnue et **30%** ont une date de pose estimée. De plus, la Figure 11 expose que, **32%** du linéaire, mis hors service sur la fenêtre d'observation [2002, 2012], ont une DDP inconnues et **34%** ont une DDP estimée. Concernant les dates de pose, le niveau **d'inconnus ou d'incertitude est très élevé**, par conséquent tous les résultats issues du scénario « statu quo » seront **très incertains**. Nous allons donc dérouler la démarche globale, mais **les résultats ne seront pas représentatifs des pratiques passées** du Grand Lyon TVD.

I.2.4 Linéaire hors service en fonction des dates de mise hors service

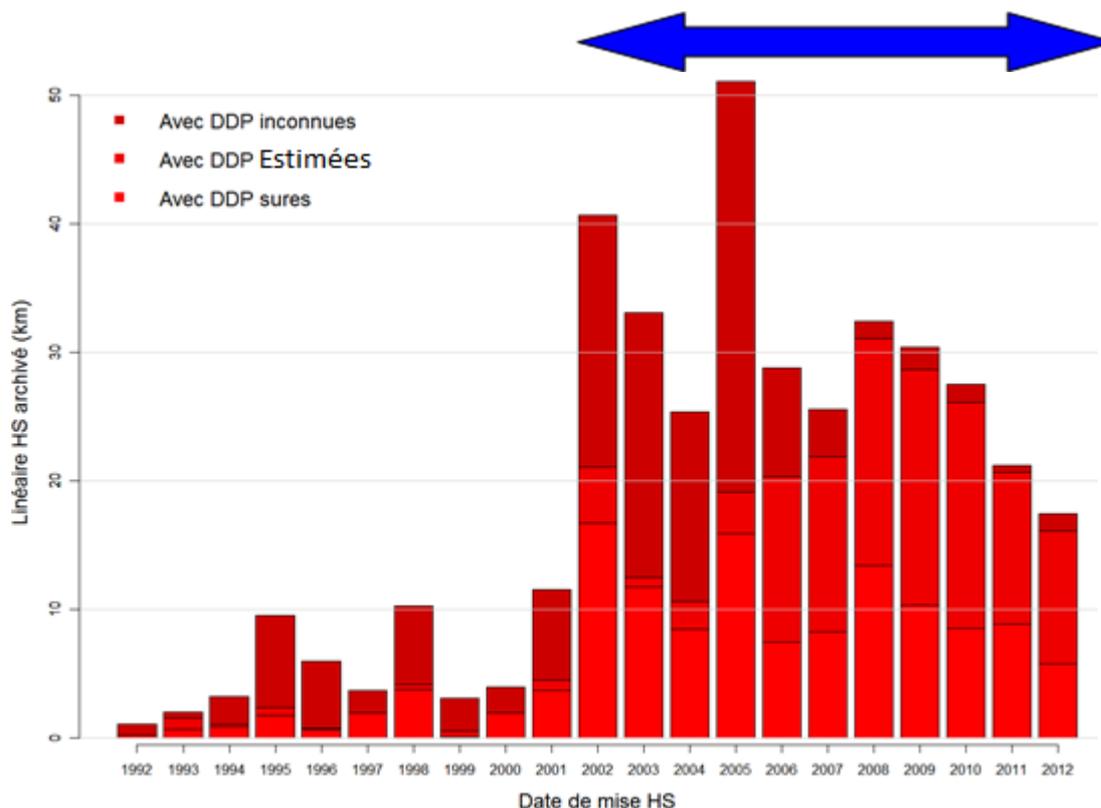


Figure 13 : Histogramme du linéaire hors service archivé au 31/12/2012

La Figure 13 permet d'observer que les dates de mise hors service n'ont commencé à être significativement archivées de manière informatique qu'à partir de 2002. De plus à partir de 2008 la part des tronçons archivés avec DDP inconnues est sensiblement réduite. Par conséquent les courbes de survie estimées dans les paragraphes suivant ne seront calculées qu'avec les tronçons archivés dans l'intervalle [2002 ; 2012] ou [2008 ; 2012]. Ce sera nos « fenêtres d'observation ». Au final entre 2002 et 2012 environ 334 km de réseau ont été mis hors service.

I.2.5 Les matériaux des canalisations

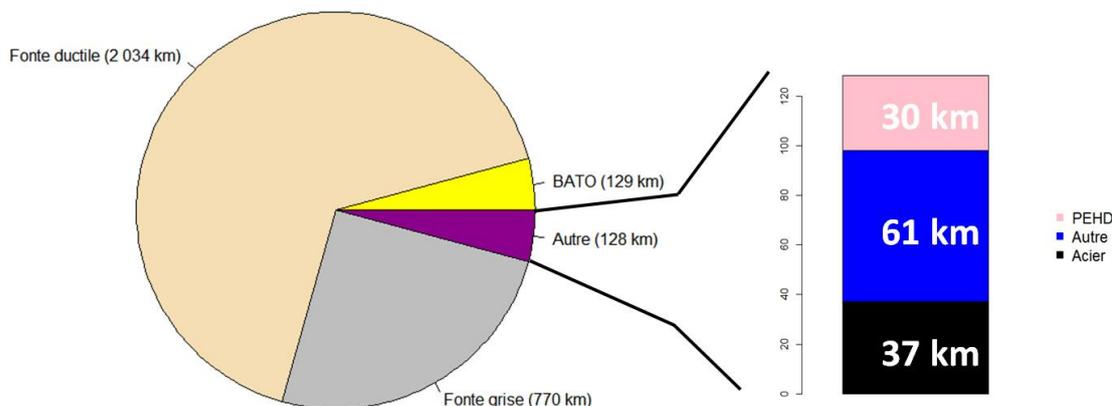


Figure 14 : Les matériaux du réseau en service au 31/12/2012 ayant une DDP (3 061 km)

D'après le graphique de la Figure 14 nous pouvons observer que la majorité du réseau en service fin 2012 est constituée de fonte ductile qui représente à ce jour 66.4% du réseau en service du Grand Lyon TVD. Puis le second matériau est la fonte grise qui n'est plus posée depuis le début des années soixante-dix (*cf.* Figure 15). Ce type de canalisations représente 25.2% du linéaire du réseau actuel. Le troisième matériau majoritaire est le béton âme tôle (BATO) (4.2% du réseau). Ensuite les matériaux minoritaires sont notamment : acier + tôle acier (1.2 %) puis PEHD (Polyéthylène haute densité) (1 %) et enfin autres (2 %).

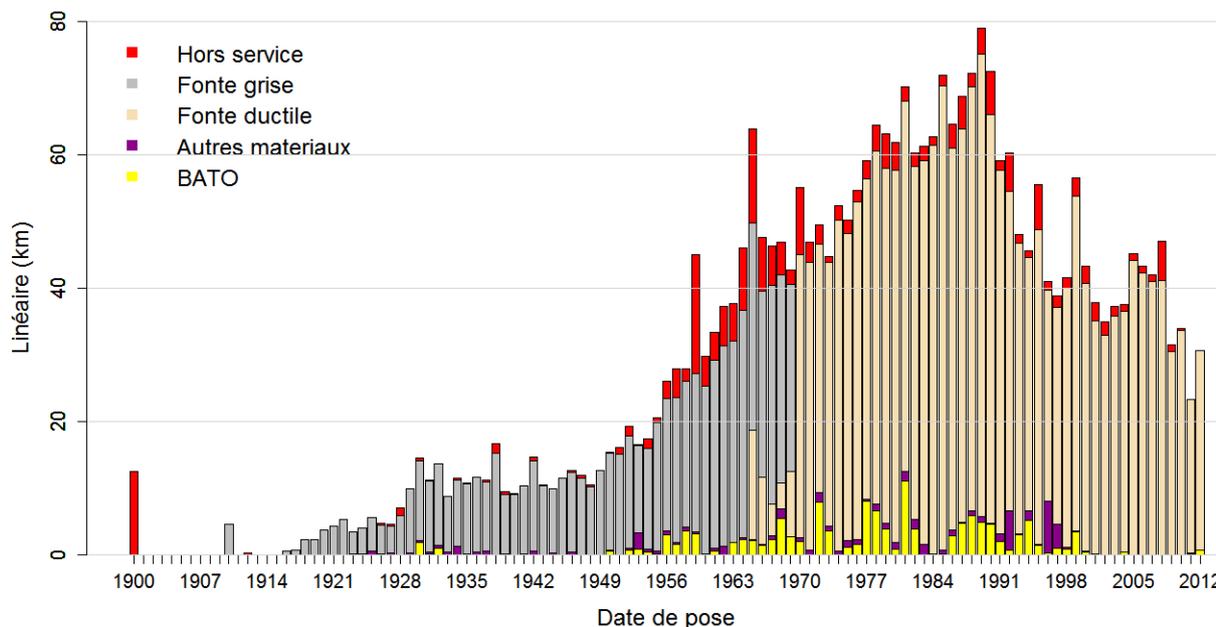


Figure 15 : Histogramme du linéaire en service et hors service en fonction des DDP et de leurs matériaux au 31/12/2012 et linéaire mis hors service sur la fenêtre [2002, 2012].

Le graphique de la Figure 15 permet d'avoir une vue globale sur l'évolution des matériaux utilisés pour les canalisations. Il est important de noter que la fonte ductile remplace définitivement la fonte grise dès le début des années 1970.

1.2.6 Les diamètres des canalisations

Les conduites sont regroupées ici en 2 catégories :

- les conduites dont le diamètre intérieur est inférieur strict à 300 mm ;
- les conduites dont le diamètre intérieur est supérieur ou égal à 300 mm.

Le graphique de la Figure 16 présente le linéaire de conduite par catégories de conduites :

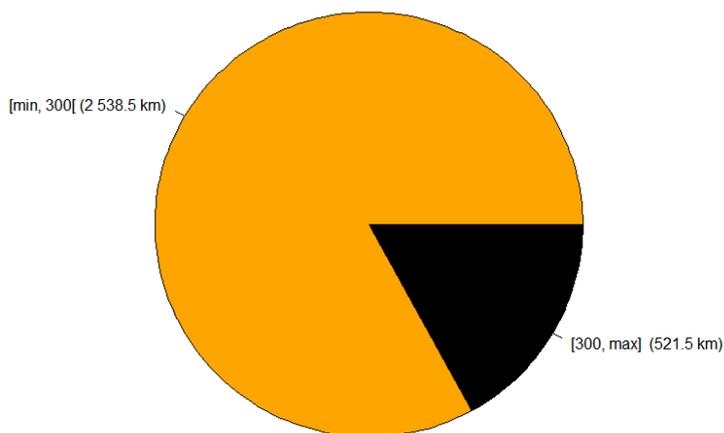


Figure 16 : Linéaire de tronçons en service en fonction de leurs diamètres (3 060 km)

La majorité du réseau (83 % du linéaire total) est constituée par des conduites de $\varnothing < 300$ mm. Le réseau de $\varnothing \geq 300$ mm ne représente que 17 % du réseau total.

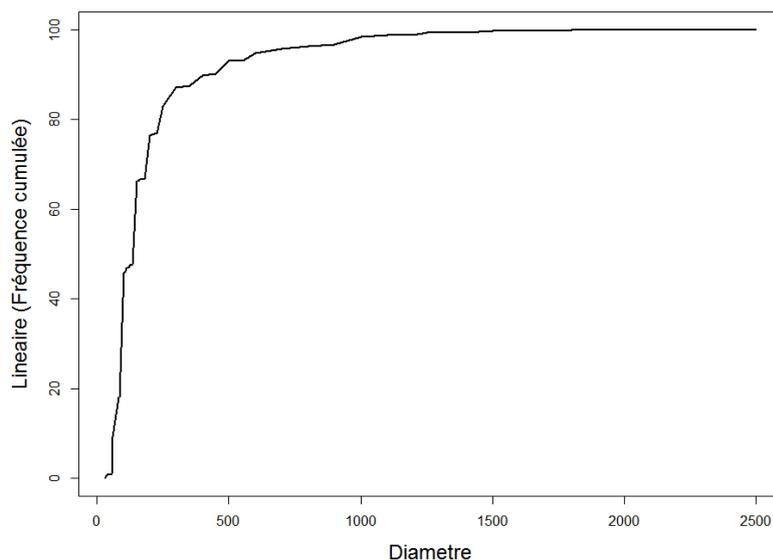


Figure 17 : Fréquence cumulée de la longueur des tronçons (en service) en fonction de leur diamètre (100% = 3 060 km)

Longueur des tronçons (fréquence cumulée)	Le plus petit	1 ^{er} quartile (25%)	Médiane (50%)	3 ^e quartile (75%)	(90%)	Le plus grand (100%)
Valeur du diamètre	30 mm	100 mm	150 mm	200 mm	450 mm	2500 mm

Tableau 3 : Quartiles et moyenne du nombre de tronçons en fonction de leur diamètre (100% = 3 060 km)

I.3 Caractéristiques des défaillances

Une défaillance est la 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.

I.3.1 Caractéristiques des défaillances FR (Fuites Réparées)

I.3.1.1 Définitions, généralités

Le schéma Figure 18 récapitule les liens notamment entre fuites, casses et défaillances FR.

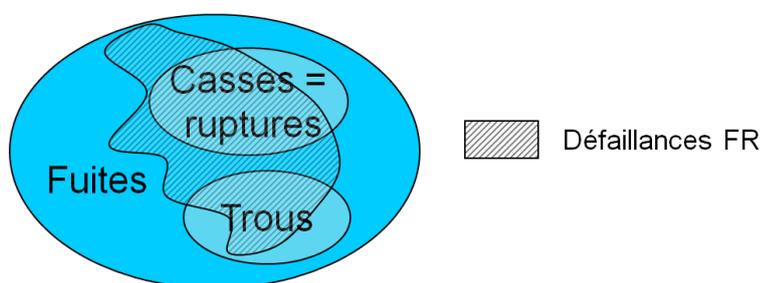


Figure 18 : schéma récapitulatif du lien entre fuites, casses, trous et défaillances FR

Une **Fuite** est un écoulement indésirable d'une canalisation, d'un branchement⁵, d'un équipement ou d'un ouvrage qui nécessite une réparation (Charrière 2013).

Les casses ou les ruptures sont des sous-ensembles des fuites. Une **Casse** est une rupture d'un tronçon de canalisation ou d'un branchement (Charrière 2013) avec écoulement d'eau apparent en surface.

Enfin une **Défaillance FR** est une fuite intervenant sur un tronçon de canalisation et donnant lieu à une réparation (Charrière 2013). Nous travaillons principalement avec un fichier des défaillances FR.

Fichier défaillances FR : C'est une base de données de toutes les fuites réparées archivées avec le numéro d'ordre de service (OS). Celles-ci sont associées à l'identification du tronçon détérioré avec la date de réparation de la fuite et sa description. Ce fichier est capital notamment pour la construction d'un modèle de prédiction des futures défaillances. Les informations sur les défaillances sont collectées par les agents de terrain en remplissant la fiche en Annexe 2. Ce fichier nous a été fourni en juillet 2014.

⁵ Un **branchement** est une conduite et accessoires mis en œuvre pour amener l'eau du réseau de desserte jusqu'au point de livraison de l'eau à l'utilisateur abonné, à l'exception des conduites et accessoires privés des immeubles collectifs (Charrière 2013).

Elaboration d'un modèle long terme pour optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable

Code O.S.	Structure chausée de la rue de l'O.S.	Nom de la commune de l'O.S.	Rue de l'O.S.	Catégorie travaux de l'O.S.	Date création OS	Annee	Mslink tronçon DAO	Matériau conduite	Type d'ouvrage	Diamètre nominal	Type de dégradation
1999630342	2	VENISSIEUX	AVENUE MARC	30	21/12/1999	1999	11346	FONTE GRISE	RESEAU CANA	80	RUPTURE
1999630350	2	VENISSIEUX	AVENUE MARC	30	29/12/1999	1999	11346	FONTE GRISE	RESEAU CANA	80	CORPS RV-PRE
2000130134	3	LYON 3ème	AVENUE LACA	30	19/04/2000	2000	11442	FONTE GRISE	RESEAU CANA	250	CORPS RV-PRE
2000930229	1	CALUIRE	RUE CHARLE	30	17/07/2000	2000	11356	POLYETHYLEN	RESEAU CANA	60	PIQUIRE-CORR
2002130269	2	LYON 3ème	RUE TRARIEUX	30	11/09/2002	2002	11413	FONTE GRISE	RESEAU CANA	100	CORPS RV-PRE
2004130161	1	BRON	RUE DES GUILI	30	08/07/2004	2004	11378	FONTE GRISE	RESEAU CANA	60	CORPS RV-PRE
2004130164	1	LYON 3ème	RUE J.MARC B	30	13/07/2004	2004	11310	FONTE GRISE	RESEAU CANA	100	CORPS RV-PRE
2004630032	2	OULLINS	RUE FRANCIS	30	28/01/2004	2004	11440	FONTE GRISE	RESEAU CANA	250	RUPTURE
2005930301	2	LYON 7ème	RUE PROF. GR	30	15/12/2005	2005	1140	FONTE GRISE	RESEAU CANA	125	CORPS RV-PRE
2006130057	2	BRON	RUE DU PARC	30	21/02/2006	2006	11482	FONTE GRISE	RESEAU CANA	80	CORPS RV-PRE
2006730154	2	VENISSIEUX	AVENUE D'OSC	30	14/11/2006	2006	11367	FONTE GRISE	RESEAU CANA	200	ACCIDENTELLE
2007130130	1	LYON 3ème	RUE CONSTAN	30	19/07/2007	2007	11492	FONTE GRISE	RESEAU CANA	100	CORPS RV-PRE
2007930120	2	LYON 1er	RUE DE LA PLA	30	29/03/2007	2007	11485	FONTE GRISE	RESEAU CANA	80	JOINT
2008130107	3	LYON 3ème	AVENUE LACA	30	16/04/2008	2008	11316	FONTE GRISE	RESEAU CANA	110	CORPS RV-PRE

Figure 19 : Extrait du fichier défaillances FR

En accord avec les responsables techniques chargés de gestion patrimoniale du Grand Lyon TVD, sont considérées comme défaillances FR :

1. Les fuites manifestes en surface réparées,
2. et les fuites non manifestes repérées suites à une campagne de recherche active puis réparées.

Les fuites représentent chaque année en France 1.3 milliard de mètres cubes. 20% du volume traité par les usines n'arrivera jamais au robinet (France_Libertés 2014).

I.3.1.2 Localisation des défaillances FR

La Figure 20 montre le nombre de défaillances FR archivées par le Grand Lyon TVD chaque année en fonction de leur localisation.

La politique d'archivage d'information sur les défaillances FR a été mise en œuvre au Grand Lyon TVD depuis 1995 mais il y a eu une grande évolution en 1998. Le compte rendu technique (CRT) fuite tel qu'il est aujourd'hui (*cf.* Annexe 2) a été créé en 1998. Avant 1998 le CRT fuite était réalisé ailleurs. C'est pour cela que sur la Figure 20 l'année 1997 il y a peu de défaillances FR archivées. De plus vu la date d'envoi du fichier (Juillet 2014), l'année 2014 n'est pas complète.

Nous pouvons constater que sur la fenêtre d'observation 1997-2014 les défaillances FR (hors inconnues) sont survenues majoritairement par ordre décroissant (*cf.* Annexe 3) :

1. sur corps de conduite (66%),
2. sur appareillage (vanne, robinet prise, etc.) (21%).
3. sur joint (8%),
4. de manière accidentelle (provoquées par un tiers) (5%).

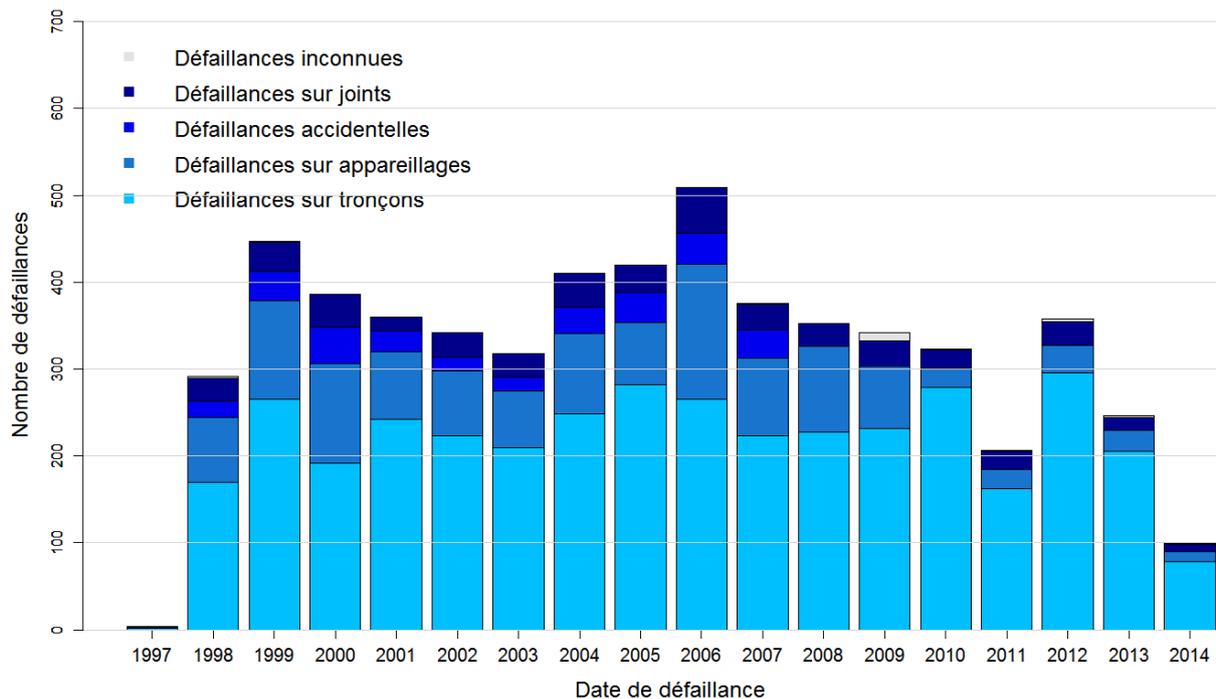


Figure 20 : Nombre de défaillances FR archivées par an, jusqu'en 2014

Il existe plusieurs types de défaillances sur tronçon : les fissures circulaires, les ruptures longitudinales, les piqûres, les ruptures d'éclatement (cf. Figure 21).

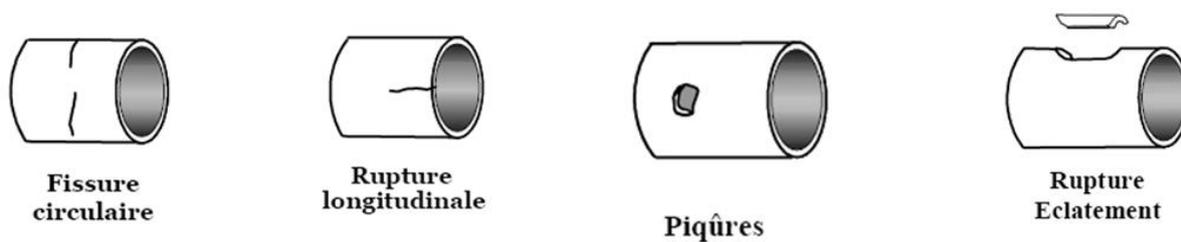


Figure 21 : Type de défaillances « Fuites Réparées » sur tronçons (Poinard 2006)



Par la suite lorsque nous utiliserons les nombres de défaillances FR passées nous ne comptabiliserons uniquement que les défaillances FR sur **corps de conduite** ou sur **joints**.

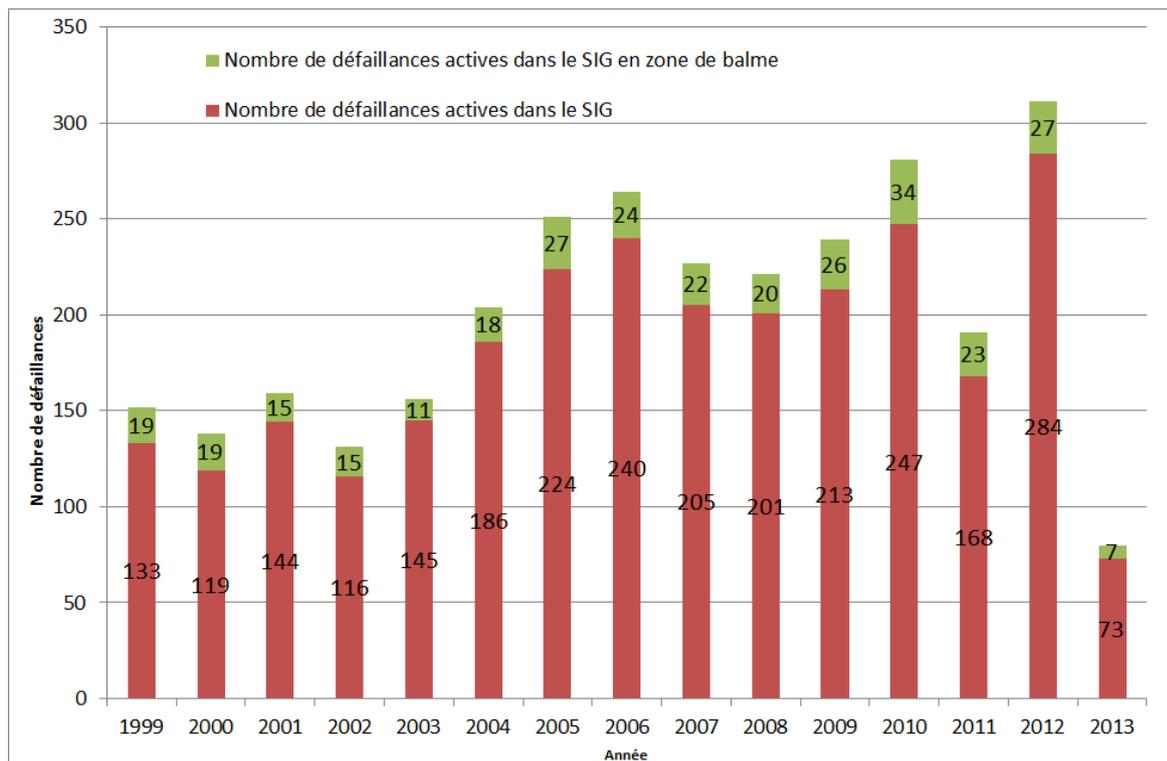


Figure 22 : Nombre de défaillances actives dans le SIG du Grand Lyon TVD mi-2013 en fonction de leurs localisations géographique (source : Grand Lyon, 2015)

Le graphique Figure 22 a été obtenu en croisant les défaillances actives dans le SIG du Grand Lyon avec la localisation des zones de balme (cf. paragraphe I.4). Les zones de balme représentent environ 13% du territoire du Grand Lyon TVD. Nous retrouvons à peu près ce pourcentage dans la part des défaillances situées dans ces zones. Cette information est très importante car le Grand Lyon essaye de diminuer le nombre de défaillances en zone de balme.

I.3.2 Les défaillances Qualitatives Réparées

Les défaillances liées au réseau et pouvant impacter la qualité de l'eau au Grand Lyon (eaux rouges, eaux noires, eaux riches en CVM [Chlorure de Vynil Monomère], eaux « riches » en plomb) sont très minoritaires et elles sont rapidement réparées. C'est pourquoi il n'existe aucune base de données sur celles-ci.

Si un client se plaint par exemple d'eau rouge ou d'eau au goût de terre, l'exploitant envoie un technicien sur place. Dans 90% des cas le problème est chez le particulier et non sur le réseau principal. Les plaintes qualitatives sont traitées au cas par cas. Dans de rares cas, par exemple après des essais incendies du Service Départemental d'Incendie et de Secours (SDIS), il peut y avoir des eaux rouges, dans ce cas alors, l'exploitant effectue des purges et vérifie 15 jours après sur place si la situation s'est améliorée. Dans des cas encore plus rares il faut redimensionner le réseau ou réaliser un maillage (Gd Lyon 2013a).

I.4 Les données environnementales

Nous appelons « données environnementales » les données qui ne sont pas dans les fichiers « tronçons » ou « défaillances » et qui peuvent servir à :

- mieux comprendre les causes des **défaillances** des tronçons (cf. CARE-W-Poisson)
- calculer des indicateurs de niveaux de **risque** (cf. CARE-W-ARP et Feedeau)

- mieux comprendre les **causes** des mises hors service des tronçons (*cf.* le modèle long terme que nous sommes en train de construire).

Plusieurs paramètres de l'environnement extérieur aux conduites peuvent favoriser les défaillances comme l'indiquent (Berland et al. 2005) & (Babykina 2010) :

- le climat (variations de températures, nombre de jours de gel, nombre de jours très chaud, etc.);
- les charges du trafic routier transmises aux conduites ;
- l'agressivité naturelle ou anthropique de certains terrains qui peuvent induire des phénomènes de corrosion externe ;
- les mouvements de terrain ;
- la qualité des remblais et des travaux de compactage des sols ;
- conduite immergée dans des nappes phréatiques ;
- les mouvements de déstabilisation des sols causés par la pose, le remplacement ou les interventions d'entretien d'autres réseaux techniques ou par des travaux de voirie ;
- la présence de courants vagabonds générés par des installations électriques.

De plus les données environnementales concernant les éléments vulnérables (consommateurs, usagers de la route, biens des tiers, etc.) peuvent être très utiles pour calculer des indicateurs de risques :

- Nombre d'abonnés reliés au tronçon ;
- Localisation des transports en commun par rapport aux canalisations ;
- Localisation des cavités souterraines, etc.

Le Grand Lyon possède beaucoup de données environnementales (*cf.* Tableau 4). Par exemple il possède :

- **Les données sur les branchements.** En effet, il a été constaté que plus le nombre de piquages sur un tronçon augmente, plus le nombre de défaillances augmente. De plus le nombre de branchements sur un tronçon est corrélé au nombre de personnes reliées à ce tronçon.
- **Les zone de balmes.** Dans la région lyonnaise, les balmes désignent de manière globale tous coteaux escarpés, pentes ou talus (*cf.* Figure 23).

Plus précisément, sont appelés "balmes" les versants qui comprennent des falaises de 20 à 40 m de hauteur, soutenant des zones de raccordement au plateau moins pentues. L'érosion fluviale est à l'origine de cette morphologie.

L'installation de la ville sur les balmes a créé des zones de risque. Dès l'origine de Lyon, des habitations ont été construites sur les plateaux de la Croix-Rousse et de Fourvière. Au cours de l'histoire, l'aménagement de la ville a conduit à entailler le pied des versants, pouvant compromettre ainsi l'équilibre initial des terrains. Pour assurer l'alimentation en eau des nouveaux habitants des collines, un réseau très dense de galeries était implanté afin de capter les venues d'eau observées en surface.

Les zones à risque de mouvements de terrains (\approx zone de balmes) (dont les symptômes sont fissures sur le bâti, glissement de terrain, écoulement anormal d'eau...) sont principalement situées au niveau des collines de Fourvière et de la Croix-Rousse, des 1er, 4ème, 5ème et 9ème arrondissements de la ville de Lyon (Gd Lyon 2014a) (Lyon 2014) (Mongereau & Vinet 2004).

Les zones de balme sont très importantes dans la gestion patrimoniale du réseau du Grand Lyon. 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.

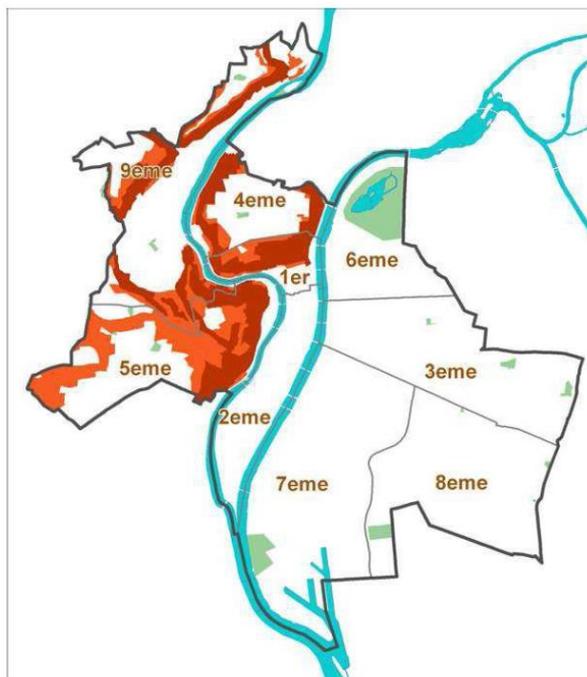


Figure 23 : Localisation des zones de balmes dans la ville de Lyon

- **Données sur la voirie.** Le Grand Lyon possède des cartes sur les voiries, la localisation du métro, du train etc.

Données environnementales	Disponible au Gd Lyon
Branchements	Oui
Périmètres de risque inscrits au PLU (dont risques géologiques)	Oui
Formations géologiques	Oui
Données sur la population INSEE	Oui
Altimétrie : courbes de niveau	Oui
Voiries	Oui
Lignes de transport en commun (métro, tramway, funiculaire)	Oui
Voies ferrées	Oui
Ouvrages d'art (murs, parkings, ponts, trémies, tunnels)	Oui
Réseau d'électricité : Lignes haute-tension aériennes et souterraines	Oui
Galerie de métro	Oui
Hydrants (poteaux incendie et bouches incendie)	Oui
Vannes	Oui
Ventouses	Oui
Stations de pompage	Oui
Réservoirs	Oui
Chambres	Oui
Appareils de mesure	Oui
Clapets	Oui
Régulateurs	Oui
Communes	Oui
Cours d'eau (ruisseaux)	Oui
Plans d'eau (dont Rhône et Saône)	Oui
Arbres d'alignement communautaires	Oui
Cadastre	Oui
Orthophotos 2012	Oui

Tableau 4 : Liste des données environnementales utiles et disponibles au Grand Lyon pour sa gestion patrimoniale

Le Grand Lyon a également déjà travaillé en partenariat avec l'INSA (Institut National des Sciences Appliquées) et Veolia sur les données météorologiques. Ceci pour une analyse rétrospective des défaillances. En effet, tout comme (Babykina 2010) et (Claudio 2011), les agents du Grand Lyon et de Veolia ont constaté que les fuites apparaissent plutôt l'hiver pour les canalisations métallique et plutôt en été pour les canalisations en plastique. *cf.* les travaux d'initiation à la recherche suivants : (Benoit 2011; Trivisonno 2012; Van Den Bliëk 2012).



Nous venons de présenter les différentes caractéristiques de notre terrain d'étude et des données disponibles. Nous pouvons retenir que pour les futures analyses statistiques que nous réaliserons la fenêtre d'observation historique (des dates à la mise hors service) est de **11 ans : de 2002 à 2012** (bornes incluses).

Nous allons maintenant présenter de manière synthétique la démarche globale de notre modèle « long terme » que nous souhaitons créer dans le projet optimeau.

II Vue globale du modèle long terme que l'on souhaite développer dans « optimeau »

La démarche globale de notre modèle « long terme » peut se décomposer en 6 grandes étapes (cf. Figure 24).

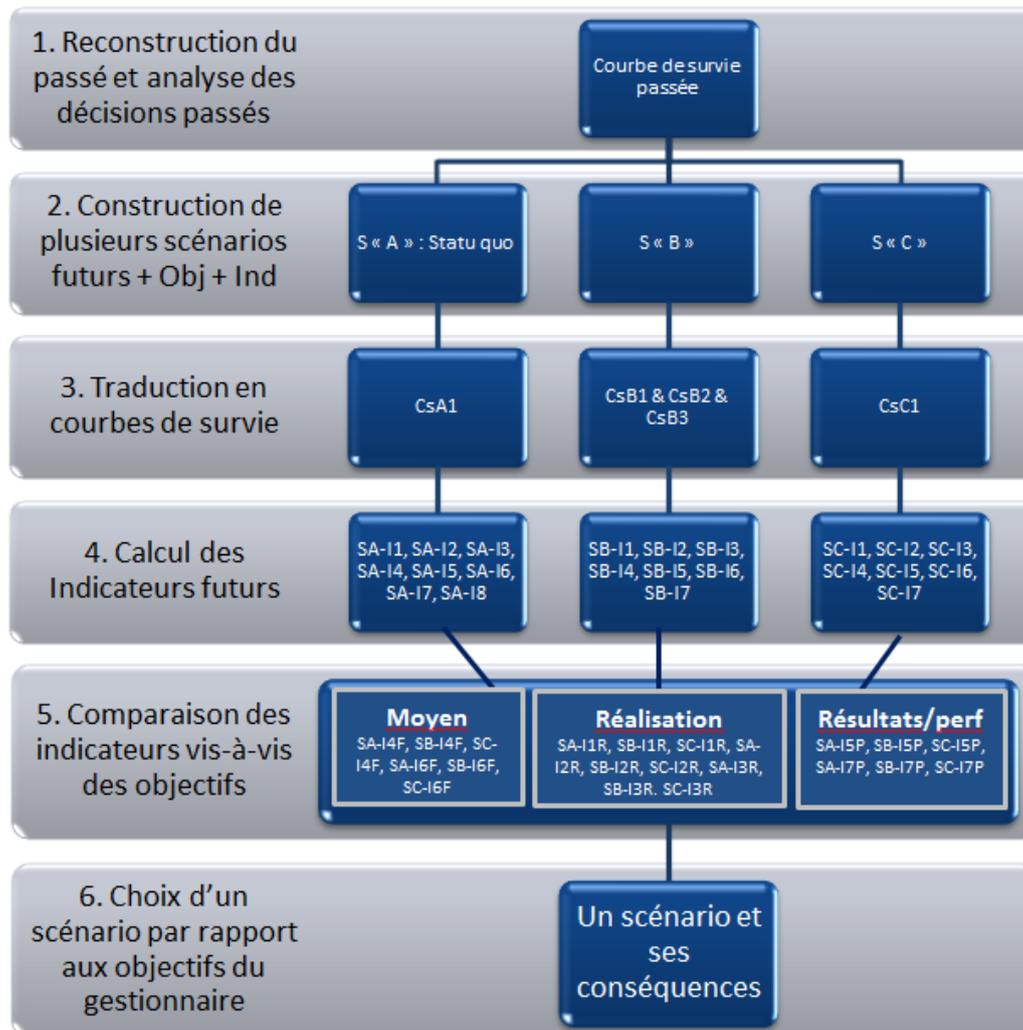


Figure 24 : Schéma de la démarche globale du modèle « long terme » optimeau

La première étape comprend l'analyse de la politique de gestion patrimoniale que le service d'eau a réalisée par le passé. C'est ce que nous allons faire pour le Grand Lyon dans le **chapitre III**.

Au cours de cette étape il est aussi nécessaire de modéliser la courbe de survie empirique passée. Au cours du **chapitre IV** nous allons expliquer les méthodes pour calculer la courbe de survie empirique passée et dans le **chapitre V** nous allons appliquer ces méthodes aux données du Grand Lyon.

L'étape deux consiste à élaborer différents scénarios prospectifs pour les années à venir. Associés à ces scénarios le gestionnaire doit avoir ses objectifs en tête, des indicateurs et des seuils associés à ses objectifs.

Par exemple le scénario prospectif « A » peut être : « A l'avenir la distribution des âges à la mise hors service des canalisations sera strictement identique à celle du Grand Lyon par le passé entre [2002, 2012] ». C'est le scénario que nous avons choisi dans le **chapitre VI**.

Néanmoins les scénarios prospectifs peuvent être plus complexes. Par exemple le scénario prospectif « B » peut être : « *Les canalisations avec une forte probabilité de défaillances seront renouvelées plus tôt en âge que par le passé (décalage de la distribution des âges à la mise hors service vers la gauche) alors que les canalisations avec une faible probabilité de défaillances seront renouvelées plus tard en âge que par le passé (décalage de la distribution des âges à la mise hors service vers la droite). Le gestionnaire souhaite prioritairement que ses taux de défaillances futurs soient assez bas. Il n'y aura pas d'extension de réseau.* »

Les scénarios prospectifs peuvent être encore plus complexes pour refléter au mieux la réalité. Par exemple le scénario prospectif « C » peut être : « *Les canalisations en PVC (Polychlorure de Vinyle) posées avant 1980 et celles en amiante ciment doivent être éliminés avant 2020. Les canalisations ayant une forte probabilité d'induire des dommages considérables suite à leurs défaillances seront renouvelées en priorité. La part des canalisations renouvelées sous la contrainte (coordination) sera plus faible que par le passé. A l'avenir toutes les canalisations seront en fonte ductile. Le gestionnaire souhaite que les dommages potentiels soient faibles. Il souhaite que les taux de CVM (Chlorure de Vinyle Monomère) soient faibles. Il y aura 1% d'extension de réseau par an.* »

A cours **de l'étape trois**, il est nécessaire de traduire chaque scénario prospectifs en une ou plusieurs courbes de survie prospective. Par exemple ici le scénario « statu quo simple » a été traduit en une seule courbe de survie **cf. paragraphe VI.1.1** alors que le scénario « statu quo partitionné par diamètre » a été traduit en 2 courbes de survie **cf. paragraphe VI.2.1**

Lors **de l'étape quatre**, des indicateurs futurs sont déduits pour chaque scénario. Nous avons prévu à minima de calculer les indicateurs suivants.

- I1-R le linéaire à renouveler chaque année, **cf. paragraphe VI.1.2**
- I2-R le taux de renouvellement annuel, **cf. paragraphe VI.1.3**
- I3-R l'âge moyen du réseau chaque année, **cf. paragraphe VI.1.4**
- I1-F le coût d'investissement annuel, **cf. paragraphe VI.1.5**
- I1-P le nombre de défaillances au tronçon annuel,
- I2-F le coût de la maintenance annuelle,
- I2-P le niveau de risque au tronçon annuel.⁶

Ensuite aux cours de **l'étape cinq**, il faut comparer les différents scénarios entre eux par le biais des indicateurs ci-dessus.

Lors de **l'étape 6** le gestionnaire par rapport à ses objectifs et ses contraintes (budgétaires ou autres) va choisir alors le scénario qu'il souhaite appliquer à l'avenir, étant averti de ses conséquences (mise en évidence par les 7 indicateurs associés).



Nous venons de présenter de manière synthétique la démarche globale de notre modèle « long terme » que nous souhaitons créer dans le projet Optimeau.

Nous allons maintenant démarrer l'étape 1 en résumant les méthodes employées par le passé par le Grand Lyon pour la gestion patrimoniale de ses canalisations d'eau potable.

⁶ R : indicateur de réalisation dans le cycle de l'action. F : indicateur financier ou de moyen économique dans le cycle de l'action. P : indicateur de résultats (≈performance) dans le cycle de l'action.

III Présentation de la gestion du patrimoine canalisations du Grand Lyon

III.1 Présentation du renouvellement passé du Grand Lyon

Conformément avec la loi Barnier du 2 février 1995 (codifié dans l'article L2224-5 du CGCT) le Grand Lyon TVD calcule des taux de renouvellement moyennés sur les 5 dernières années (cf. Figure 25). Sur la période [2008, 2012] ce taux est en moyenne de 0.68% par an.

Pour une année ce taux peut être obtenu en divisant le linéaire qui est mis hors service cette année (source SIG) par le linéaire en service de cette même année [source RPQS :(Gd Lyon 2008; Gd Lyon 2009; Gd Lyon 2010; Gd Lyon 2011b; Gd Lyon 2012)]. Nous constatons une différence de résultat entre les taux moyennés calculés grâce au SIG et ceux données par le « Rapport sur le Prix et la Qualité du Service » (RPQS) (cf. Figure 25 et Figure 26). Cela pourrait peut-être être expliqué par :

- le temps que les informations mettent à remonter dans les bases de données. Et donc le RPQS tend à sous-estimer le linéaire de tronçons mis hors service chaque année ;
- dans les RPQS, les extensions de réseau étaient mélangées avec les renouvellements jusqu'en 2010 ;
- le calcul du taux de renouvellement SIG est effectué ici uniquement à partir des linéaires indiqués hors service dans le SIG. Or dans les linéaires mis hors service du SIG il y a des tronçons abandonnés qui ont été renouvelés mais aussi des tronçons abandonnés qui **n'ont pas été renouvelés**. Il y a très souvent des rues avec 2 réseaux d'alimentation en eau potable que le Grand Lyon TVD remplace par un seul.

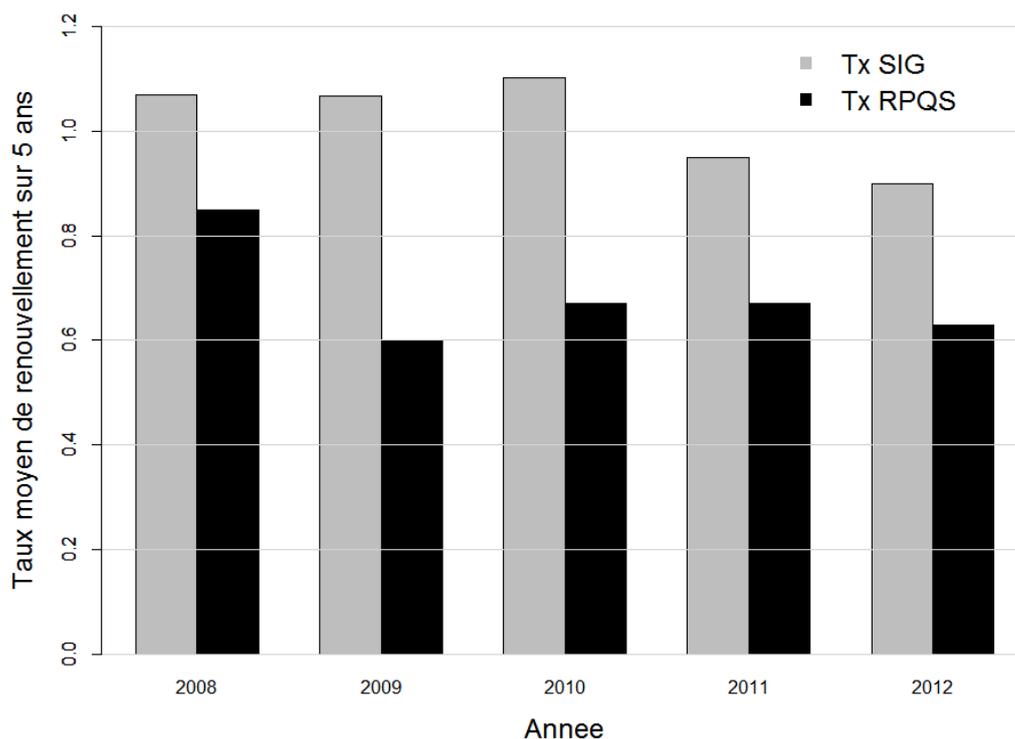


Figure 25 : Taux moyen de renouvellement sur 5 ans du Grand Lyon TVD

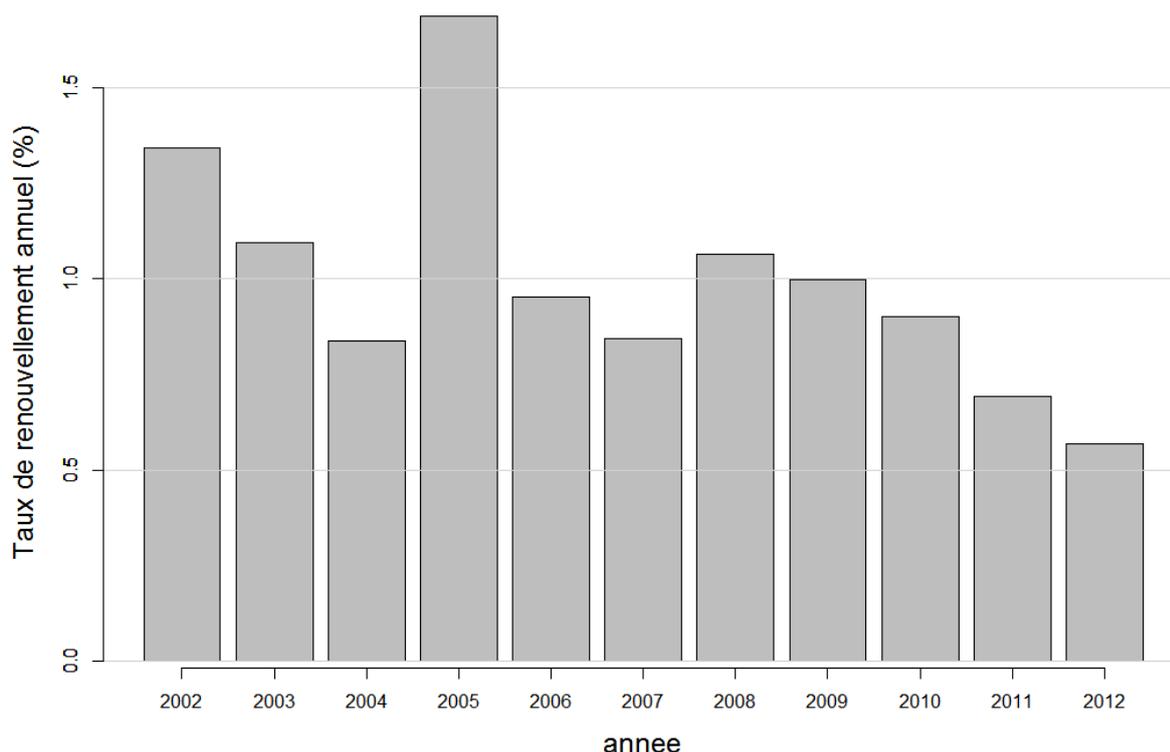


Figure 26 : Taux de renouvellement annuel du Grand Lyon TVD calculé à partir du linéaire hors service dans le SIG

III.2 Méthode décisionnelle de « court terme » (≤ 3 ans) pour renouveler les canalisations au Grand Lyon

Nous appelons méthode « court terme », le processus décisionnel permettant d'obtenir pour l'année à venir (ou la suivante) une liste de tronçons hiérarchisés par niveau de besoin en renouvellement ou opportunité / obligation de renouvellement (Large 2013).

La méthode « court terme » (c'est-à-dire à l'échelle du programme des travaux, 1 à 3 ans max) appliquée au Grand Lyon est assez robuste. Une série d'étapes a été mise au point par les gestionnaires qui utilisent notamment plusieurs logiciels permettant d'établir une liste de tronçons hiérarchisés selon le niveau de besoins/opportunité en renouvellement.

Chaque année leurs méthodes décisionnelles « court terme » peuvent changer sensiblement (cf. Annexe 4). Par conséquent nous ne présenterons qu'une seule année.

III.2.1 Méthode décisionnelle de « court terme » employée par le Grand Lyon, petit diamètre ($\phi < 400$ mm)

Le processus décisionnel du Grand Lyon pour les tronçons de diamètre inférieur à 400 mm peut se diviser en 5 étapes en 2014 (cf. Figure 27 et Figure 29).

1. La probabilité de défaillances (fuites) futures est estimée pour chaque tronçon. Pour les défaillances impactant la quantité d'eau (fuites) l'estimation est effectuée à l'aide du logiciel « CARE-W-Poisson » via un modèle statistico-probabiliste (Malandain 1999). Les données d'entrée de ce modèle sont les données sur les défaillances FR, les caractéristiques des tronçons et de leur environnement.

- Les niveaux des différents risques de dommages associés à la défaillance d'un tronçon sont calculés. C'est le cas par exemple du risque de coupure d'eau chez l'utilisateur (rupture de la continuité du service) ou du risque de perturbation du trafic dans la voie concernée, de glissement de terrain, d'inondation etc. Ces calculs sont effectués à l'aide du logiciel «CARE-W-ARP» à partir du croisement de la probabilité de défaillance obtenue à l'étape 1, du temps de réparation, et des caractéristiques des éléments vulnérables (usagers, véhicules, biens, etc.) : leur quantité, leur vulnérabilité et leur valeur (Le Gauffre et al. 2002).
- Les indicateurs de risque et l'ILP (indice linéaire de pertes) sont pondérés par le gestionnaire et intégrés dans le modèle décisionnel ELECTRE TRI contenu dans « CARE-W-ARP » dans lequel il indique ses préférences (orientant ses futures solutions de compromis) (Poinard 2006). En sortie, le gestionnaire obtient plusieurs groupes de tronçons classés par besoin en renouvellement croissant (cf. Figure 27). A partir de ces résultats il peut réaliser une carte SIG colorée par priorité (cf. Figure 28).

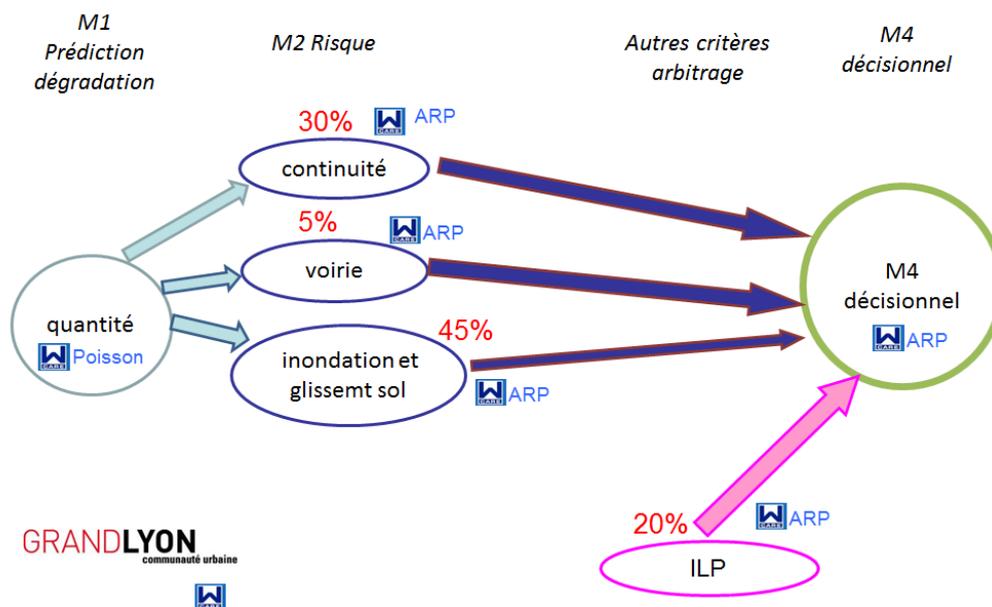


Figure 27 : Les premières étapes de la décision de la mise hors service des tronçons au Grand Lyon à court terme (en 2014)

Elaboration d'un modèle long terme pour optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable

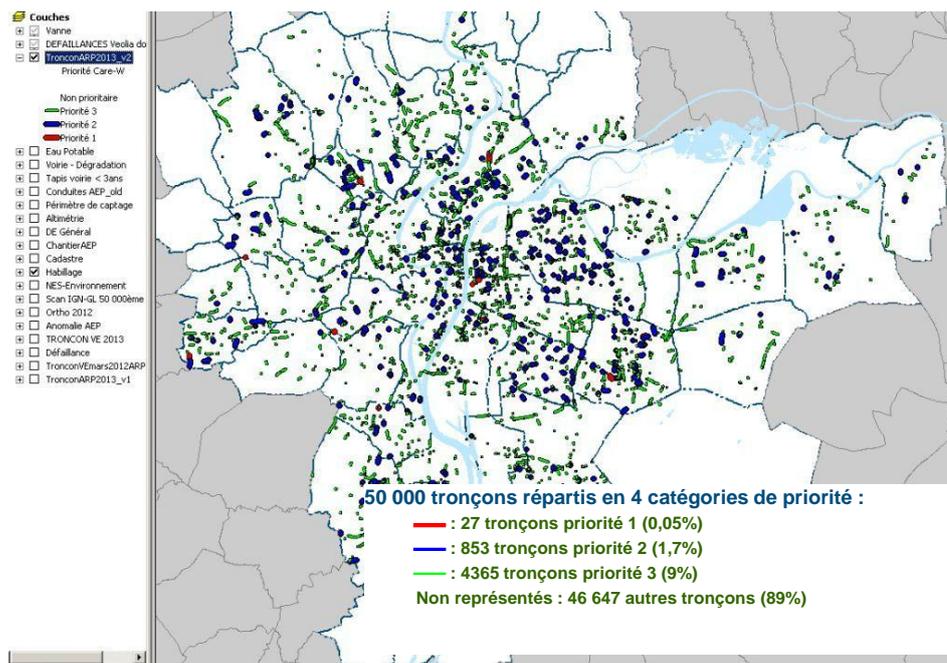


Figure 28 : Exemple de carte réalisés avec les sorties du modèle décisionnel de CARE-W-ARP

4. Le gestionnaire prend enfin en compte les opportunités et les contraintes externes à son service. Elles répondent à des besoins de coordination avec d'autres services (travaux de renouvellement de la voirie, d'urbanisme, législations etc.), ou sont induites par des éléments extérieurs, comme la sécurité incendie (par ex. augmentation de la capacité hydraulique de conduites existantes). Il prend aussi en compte les quelques rares problèmes de qualité d'eau liés au réseau et l'observation de l'état réel du réseau si cela a été possible. En croisant toutes ces informations, le gestionnaire établit la liste définitive des chantiers (groupes de tronçons adjacents) à mettre en œuvre (cf. Figure 29).

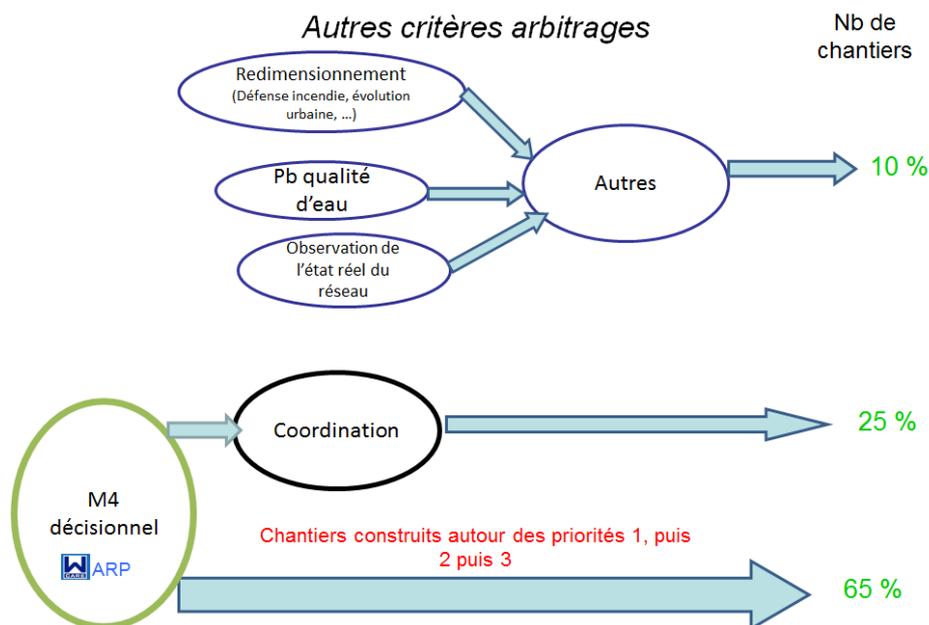


Figure 29 : Les dernières étapes de la décision de la mise hors service de tronçons au Grand Lyon à court terme (en 2014), les pourcentages sont donnés à titre indicatif

Pour en savoir plus, sur le détail des modèles et des indicateurs de risques du Grand Lyon cf. le rapport bibliographique de première année du projet « optimeau » (Large 2013).

III.2.2 Méthode décisionnelle de « court terme » employée par le Grand Lyon, gros diamètre ($\varnothing \geq 400$)

Pour les feeders, c'est-à-dire les canalisations de diamètre supérieur ou égale à 400 mm, le Grand Lyon TVD utilise un outil nommé « FeedEau » (cf. Annexe 5).

Chaque tronçon i de feeder va obtenir une note calculée selon la formule suivante :

$$Note = P_{\varnothing} \times \varnothing_i + P_{risqueA} \times RisqueA_i + P_{risqueB} \times RisqueB_i + \dots$$

Avec

P_{\varnothing} = Poids attribué par le Grand Lyon TVD au diamètre

\varnothing_i = Valeur du diamètre pour le tronçon i

$P_{risqueA}$ = Poids attribué par le Grand Lyon TVD au risque A

$RisqueA_i$ = Valeur du risque A pour le tronçon i

$P_{risqueB}$ = Poids attribué par le Grand Lyon TVD au risque B

$RisqueB_i$ = Valeur du risque B pour le tronçon i

Les tronçons les plus prioritaires pour le renouvellement sont ceux ayant obtenues les notes les plus élevées (Véolia 2011) & (Croiset 2009).



Au final ces dernières années le programme pluriannuel de travaux était composé (Gd Lyon 2013b) :

- de chantiers liés à des tronçons de $\varnothing < 400$ mm (cf. méthode du paragraphe III.2.1)
- et de $\varnothing \geq 400$ mm (cf. méthode du paragraphe III.2.2).

III.3 Méthode décisionnelle moyen terme (6 ans)

Le moyen terme au Grand Lyon est la durée du plan pluriannuel d'investissement (PPI), nommée le « Plan Mandat » car il est calqué sur la durée du mandat des élus de la métropole du Grand Lyon, à savoir, 6 ans. Le PPI actuel au Grand Lyon concerne la période 2015-2020.

Au Grand Lyon, la règle phare est que « l'eau doit payer l'eau ». Par conséquent les recettes liées principalement à la vente d'eau (prix de l'eau) doivent être égales aux dépenses (fonctionnement et investissement). C'est le prix de l'eau qui permet ensuite de fixer les enveloppes dédiées au renouvellement des canalisations.

Au grand Lyon la fixation du prix de l'eau est un acte très politique. En général il change tous les 5 ans. Par exemple en 2015 avec le nouveau contrat le prix de l'eau a baissé de 19% sur la facture type. Néanmoins, vu que la marge de l'exploitant (Véolia) et certaines charges de fonctionnement ont été réduites, l'enveloppe dédiée au renouvellement a augmentée par rapport aux années précédentes. Une enveloppe d'investissement de 33 millions d'euros par an sur les 10 prochaines années doit être consacrée à la stratégie patrimoniale.

En conclusion, le budget renouvellement, sur du moyen terme, n'est actuellement pas estimé à partir des besoins techniques mais en fonction des rentrées d'argent prévues par la fixation du prix de l'eau.

III.4 Méthode décisionnelle long terme (> 30 ans)

Le Grand Lyon a utilisé ces dernières années plusieurs méthodes afin d'avoir une vision sur le long terme (c'est-à-dire au-delà des plans pluriannuels d'investissement).

III.4.1 Méthode « Cador »

À partir des durées de maintien en service fixées « à dire d'expert » pour chaque matériau (cf. Figure 30), les besoins futurs en renouvellement sont estimés année par année. Cette méthode se résume simplement à additionner ces durées de maintien en service « à dire d'expert » à la date de pose de chaque tronçon pour obtenir la date de mise hors service présumée de ce tronçon [cf. (Cador 2002a) et (Cador 2002b)].

Matériau	Période de pose	Hors zone sensible	Zone de balme	Sous chaussée super lourde	Sous chaussée lourde
Acier*	avant 1960	75	37	37	56
Acier*	après 1960	100	50	50	75
amiante-ciment*	-	50	25	25	37
fonte grise*	avant 1960	50	25	25	37
fonte grise*	après 1960	75	37	37	56
fonte ductile**	-	100	75	75	87
PEHD**	-	100	75	75	87
PVC**	avant 1975	50	37	37	43
PVC**	après 1975	75	56	56	65
Béton âme tôle**	avant 1960	75	56	56	65
Béton âme tôle**	après 1960	100	75	75	87

Figure 30 : Les durées de maintien en service selon les experts du Grand Lyon (Pillot 2011)

Cette démarche ne convainc pas les praticiens du Grand Lyon car elle fait l'hypothèse que les canalisations doivent être remplacées à âge fixe, ce qui est non pertinent. Effectivement, en fonction des contraintes que subissent les canalisations, certaines très âgées peuvent persister en bon état tandis que d'autres plus jeunes, sont en mauvais état. De plus, aucun lien n'est fait entre cette valeur « à dire d'expert » et le processus décisionnel opérationnel de « court terme » (coordination avec les travaux de voirie, risques, etc.), dont résulte effectivement l'âge à la mise hors service. Ensuite, pour les matériaux récents (PEHD, fonte ductile) âgés seulement d'une quarantaine d'années, il est très difficile d'estimer leurs durées de maintien en service en raison d'un manque de retour d'expérience. Enfin cette méthode fait l'hypothèse que la survie par matériau est une fonction heaviside (fonction escalier d'une marche) (cf. Figure 31) ce qui n'est pas du tout réaliste (raisonnement on/off). La survie par matériau est une fonction plutôt sigmoïde décroissante (pente de « montagne ») (cf. paragraphes suivants).



Figure 31 : Fonction de survie des tronçons en fonte grise posés après 1960 et hors zone sensible selon les experts du Grand Lyon.

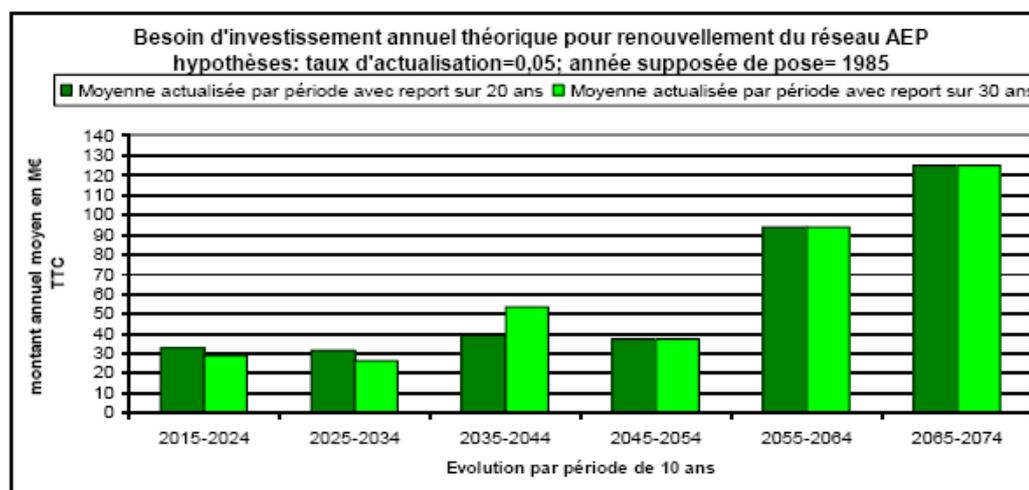


Figure 32 : Prévission des besoins en renouvellement selon la méthode « Cador » au Grand Lyon (Pillot 2011)

Les prévisions issues de la méthode « Cador » induisent des variations trop brusques dans les taux de renouvellement à venir. Cette méthode va induire des pics dans les taux de renouvellement.

Après avoir estimé les besoins en renouvellement (en km), la multiplication par des coûts unitaires permet d'estimer le budget nécessaire (cf. Figure 32).

III.4.2 Taux de renouvellement fixe à atteindre

Les élus du Grand Lyon ont pris en 2012 la décision politique de porter le taux de renouvellement à 0,75% entre 2015 et 2025.

En faisant les hypothèses que :

- les linéaires posés chaque année par le passé ont été identiques (linéaire uniforme) ;

- ce taux de renouvellement de 0.75 % va être le même pour une durée \geq à 133 ans.

Alors dans ce cas le temps de renouvellement des réseaux est évalué à $1/0.075= 133$ ans.

Inconvénients de cette méthode :

- Les linéaires posés chaque année par le passé sont loin d'avoir été identiques. L'extension urbaine sur l'agglomération lyonnaise s'est principalement faite dans les années 60, 70 et 80. De plus pendant les guerres mondiales il y a eu une diminution de la pose de canalisations. En revanche après les guerres il y a eu un pic dans les linéaires posés. Par conséquent la première hypothèse sur laquelle se base cette méthode est fautive. Donc les calculs qui s'en suivent sont aussi inexacts.
- Ensuite faire l'hypothèse que ce taux de renouvellement va être le même durant 133 ans est une hypothèse très difficile à réaliser voire impossible.

III.4.3 Patrimoine expert

La méthode implémentée dans le logiciel « Patrimoine Expert » est assez proche du raisonnement de la méthode « Cador ». Cet outil effectue des simulations du renouvellement des canalisations sur une période longue à budget renouvellement annuel fixe selon l'âge des canalisations (cf. Figure 33). L'outil conseille de renouveler les canalisations qui ont l'indice de remplacement (IR) le plus élevé (cf. Tableau 5).

$$IR1(\%) = \left(\frac{t}{DVT} \right) \times 100 \quad Eq. 1$$

$$IR2(Classe) = IR1(Classe) + C1 + C2 + C3 + C4 \quad Eq. 2$$

Avec :

t : âge du tronçon

DVT : Durée de maintien en service par matériau fixée à dire d'expert (cf. Tableau 6).

C : 4 critères de modulation au tronçon. Pour chaque critère, le gestionnaire doit attribuer à chaque tronçon une valeur numérique parmi : {0, 1, 2, 3, 4}. Par exemple le critère de modulation peut-être : la pression de l'eau ou le niveau de corrosivité du sol ou des caractéristiques de l'environnement (trafic routier), ou l'indice linéaire de perte, etc. Mettre un 1 sur un critère de modulation signifie que l'indice de remplacement sera augmenté d'une classe pour la canalisation concernée (cf. Tableau 5).

IR1(%)	IR1(Classe)
[0,75%]	1
]75,100%]	2
]100%,125%]	3
]125%,150%]	4
>150%	5

Tableau 5 : Correspondance entre l'indice de renouvellement en pourcentage et l'indice de renouvellement en classe (Naldeo 2013).

MATERIAUX	DVT
Fonte grise	70
Acier	60
Plomb	70
Tôle Acier	60
Béton Armé Ame Tôle	120
Septub	60
PVC	60
PeBD	60
Fonte ductile	120
Composite (PRV, Polyester...)	85
PVP	60
PeHD	100

Tableau 6 : Durées de maintien en service par matériau employées par Naldeo dans la simulation de 2011 pour le Grand Lyon (Poyri 2011)

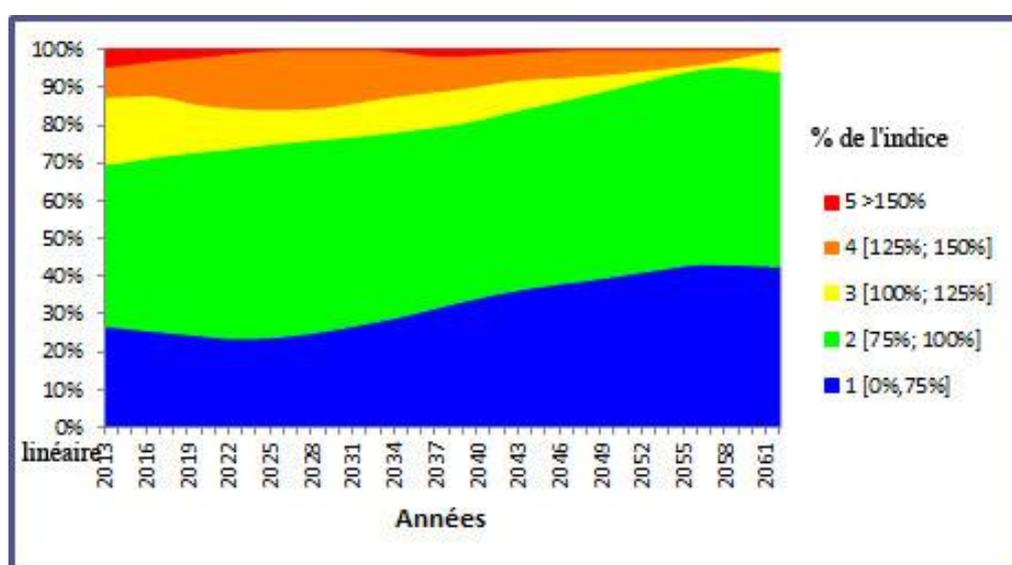


Figure 33 : Exemple de sortie du logiciel Patrimoine expert

Les données d'entrée de ce modèle sont notamment :

- les caractéristiques des canalisations à l'échelle du segment (groupe de tronçons homogènes adjacents) : matériau, diamètre, linéaire et date de pose ;
- les durées de maintien en service des canalisations ;
- les prix unitaires de remplacement des canalisations ;
- le montant annuel d'investissement pour renouveler les canalisations ;
- et le nombre d'années de la simulation.

(Naldeo 2013)

Les inconvénients majeurs de ce modèle sont :

- les durées de maintien en service sont fixées à dire d'expert ;
- le budget est une donnée d'entrée alors que les gestionnaires attendent que cela soit une donnée de sortie sur du long terme ;
- les critères complémentaires (C1, C2, C3 et C4) de modulation ont un poids trop important dans le calcul de l'indice de remplacement.



Nous venons de décrire les méthodes « court terme » employées par le Grand Lyon sur le territoire du Grand Lyon. Puis nous avons exposé les différents modèles « long terme » (Cador, Patrimoine expert et taux fixe) utilisé par le Grand Lyon. En résumé, les méthodes « court terme » (1 à 3 ans max) appliquée au Grand Lyon sont assez robustes. En revanche les méthodes « long terme » (> 30 ans) ont des lacunes importantes.

Nous allons maintenant présenter les méthodes employés pour calculer la survie empirique passée, faisant partie de la première étape nécessaire de notre nouveau modèle « long terme ».

IV Méthode pour le calcul de la survie empirique passée

IV.1 Préliminaires

Pour tous les travaux effectués nous avons utilisé le logiciel « R », version 3.1.0. Nous avons écrit nous-même la majorité des codes (Turnbull, Kaplan-Meier, Nelder-Mead, etc.). 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.

IV.2 Nettoyage des données

IV.2.1 Nettoyage des données tronçons

IV.2.1.1 Nettoyage des données tronçons partie A (commune)

Avant de commencer toute étude statistique, un nettoyage des données est nécessaire pour optimiser la qualité de l'ensemble des données. En effet, les données remises par le Grand Lyon comportent quelques incohérences qu'il faut prendre le temps de corriger.

1. Nous avons regroupé dans une seule base de données les tronçons en service et les tronçons hors service.
2. Les tronçons de longueur nulle ou sans longueur ont été supprimés de notre base de donnée.
3. Concernant les dates de pose (DDP), nous avons dans les fichiers fournis deux colonnes : « DDP sûre » et « DDP estimée » (*cf.* Tableau 7). Nous avons alors créé la colonne « DDP3 » qui vaut « DDP sûre » si elle existe sinon elle prendra la valeur de « DDP estimée ». Puis nous avons créé « DDP estimée 2 » qui est la colonne complémentaire à « DDP sûre » pour atteindre « DDP3 » (*cf.* Tableau 7).

IDT	DDPsure	DDPestim	DDP3	DDPestim2
T1	1973	1973	1973	
T2		1981	1981	1981
T3	1989	1989	1989	
T4	2010		2010	
T5		1969	1969	1969
T6		1962	1962	1962
T7	2011		2011	
T8				
T9		1981	1981	1981
T10		1972	1972	1972
T11	1960	1960	1960	

Tableau 7 : Extrait des champs concernant les dates de pose des tronçons dans notre base de données

4. Pour faciliter l'analyse des données, une variable « statuts » a été créée. Elle est composée de deux modalités : la modalité « Hors service » si la canalisation a été mis hors service avant le 31/12/2012 et la modalité « En service » si elle était en en service au 31/12/2012. Afin d'avoir une photographie de la situation au 31/12/2012. Les tronçons posés après 2013 sont supprimés et les tronçons mis hors service après 2013 retrouvent le statut « En service ».
5. Concernant le champs « matériaux », d'après (Gd Lyon 2014b) les fontes indéterminés et les fontes ductiles d'avant 1970 se comportent comme des fontes grises. Dans les types de matériaux lorsque nous trouvions des fontes ductiles (FD) ou des fontes indéterminées posées avant 1970, nous avons décidé de remplacer par de la fonte grise (FG), très présente au début du 20ème siècle. Nous avons fait d'autres modifications analogues pour d'autres matériaux (cf. Annexe 6). Les dates sur lesquelles nous nous sommes appuyées pour effectuer ces changements proviennent principalement de (Gd Lyon 2014b), un peu de (Charrière 2013) et (Poinard 2006).
6. Après un certain nombre de tests, il a été observé 125 tronçons « Hors service » avec une date de mise hors service égale à 1900. Or d'après (Gd Lyon 2014b) il est impossible que ces tronçons soient mis hors service à cette date-là, car le grand Lyon s'est mis à archiver au format informatique les dates de mise hors service bien plus tard. Il a aussi été trouvé un tronçon avec une date de mise hors service égale à 2900 ce qui est sans aucun doute une erreur humaine. Pour corriger ces problèmes, toutes les dates de mise hors service de ces individus ont été remplacées par « Not Available » (NA). La variable de date de mise hors service est notée « DateHS ».
7. Concernant le champ « emplacement », nous avons regroupé les différents types d'emplacement en deux groupes : « tronçons sous chaussée » et « tronçons sous quelque chose d'autre qu'une chaussée » (cf. Annexe 7).
8. Vu que la fenêtre fiable des dates de mise hors service des tronçons est au maximum [2002; 2012]. Les tronçons mis hors service avant 2002 ont été supprimés de notre base de données.

IV.2.1.2 Nettoyage des données tronçons partie B (dépendant de la courbe de survie qu'on calcule)

Pour estimer les courbes de survie empiriques passées nous avons besoin de toutes les DDP des tronçons en service et de toutes les DDP des tronçons mis hors service sur une fenêtre d'observation. Or on a constaté qu'au Grand Lyon TVD :

Elaboration d'un modèle long terme pour optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable

- 32% des tronçons mis HS sur la fenêtre d'observation de 11 ans [2002,2012] n'ont pas de date de pose (cf. Figure 11) ;
- 5% des tronçons mis HS sur la fenêtre d'observation de 5 ans [2008, 2012] n'ont pas de date de pose (cf. Annexe 8) ;
- et 1% des tronçons en service au 31/12/2012 ont une date de pose inconnue.

Ce constat est un problème pour l'estimation correcte des courbes de survie passées. Pour pallier à ce manque de données nous avons essayé de « corriger » les données de plusieurs façons en parallèle.

a) Méthode 1 : fenêtre [2002, 2012] « DDP3 »

Pour la méthode 1 nous éliminons de la base de données « tronçons pour méthode 1 » :

- les tronçons mis HS sur la fenêtre d'observation de 11 ans [2002,2012] qui n'ont pas de date de pose soit 32% des tronçons HS (cf. Figure 11).
- les tronçons en service au 31/12/2012 sans date de pose : soit 1% des tronçons en service (ES) (cf. Figure 7).

La courbe de survie de la méthode 1 est donc estimée à partir de (cf. Figure 8 et Figure 34) :

- 68% des tronçons HS
- et 99% des tronçons ES.

Par conséquent la courbe de survie issue de la méthode 1 sera beaucoup plus décalée vers l'axe des ordonnées que la « vraie » courbe de survie car il manque beaucoup de tronçons mis hors service sur cette fenêtre. La proportion globale des tronçons ES par rapport aux HS n'est pas respectée.

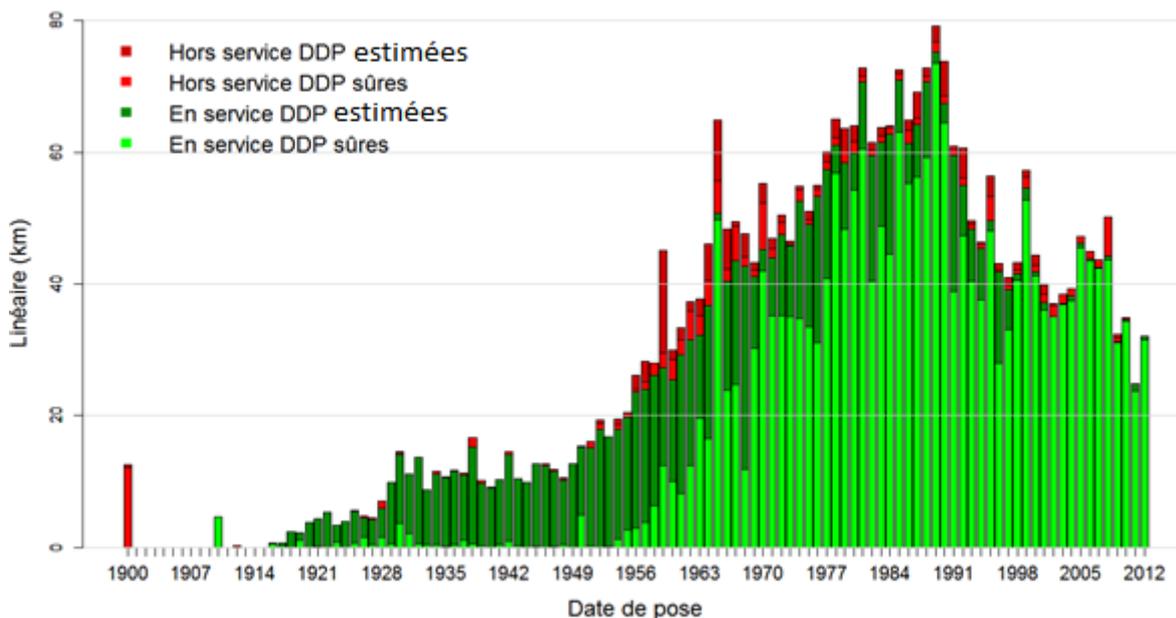


Figure 34 : Histogramme du linéaire en service [3 029km avec DDP3 =(DDP sûres +DDP estimées)] et hors service [239 km avec DDP3 (DDP sûres +DDP estimées)] au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002, 2012]).

b) Méthode 2 : fenêtre [2002, 2012] « DDP sûres »

Pour la méthode 2 nous éliminons de la base de données « tronçons pour méthode 2 » :

Elaboration d'un modèle long terme pour optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable

- les tronçons mis HS sur la fenêtre d'observation de 11 ans [2002,2012] qui n'ont pas de date de pose soit 31% des tronçons HS (cf. Figure 11) et ceux qui ont une « DDP estimées » soit 34% des tronçons HS.
- les tronçons en service au 31/12/2012 sans date de pose : soit 1% des tronçons en service (ES) et ceux avec « DDP estimées » soit : 29% des tronçons ES (cf. Figure 7)

La courbe de survie de la méthode 2 est donc estimée à partir de (cf. Figure 35):

- 35% des tronçons HS
- et 70% des tronçons ES.

Dans ce cas la proportion globale des tronçons ES par rapport aux HS n'est pas du tout respectée. Néanmoins la fiabilité des données est très élevée. (cf. Figure 35).

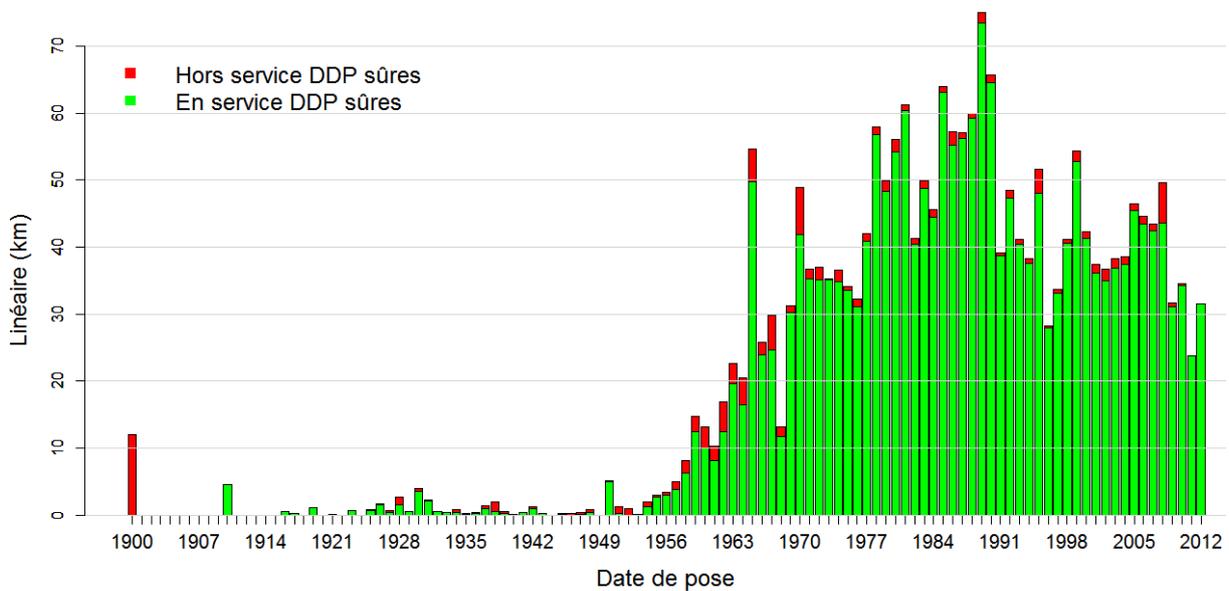


Figure 35 : Histogramme du linéaire en service [2 127 km avec DDP sûres] et hors service [115 km avec DDP sûres] au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002, 2012]).

c) Méthode 3 : fenêtre [2002, 2012] « tronetdemi »

Pour la méthode 3 nous éliminons de la base de données « tronçons pour méthode 3 » :

- les tronçons mis HS sur la fenêtre d'observation de 11 ans [2002,2012] qui n'ont pas de date de pose soit 32% des tronçons HS (cf. Figure 11).
- les tronçons en service au 31/12/2012 sans date de pose : soit 1% des tronçons en service (ES) (cf. Figure 7).

Puis nous effectuons un tirage aléatoire de 50% des individus des tronçons mis hors service sur la fenêtre d'observation [2002,2012] qui ont une date de pose. Soit : environ $68\% / 2 = 34\%$. Et nous rajoutons ces individus dans la base de données « tronçons pour méthode 3 ».

La courbe de survie de la méthode 3 est donc estimée à partir de (cf. Figure 36):

- 99% des tronçons ES.
- $68\% + 34\% = 102\%$ des tronçons HS

Dans ce cas la proportion globale des tronçons ES par rapport aux HS est à peu près respectée. Néanmoins, plus les dates de pose sont anciennes moins cette proportion est respectée (cf. Figure 36). Par conséquent plus les âges seront grands moins la courbe de survie sera fiable.

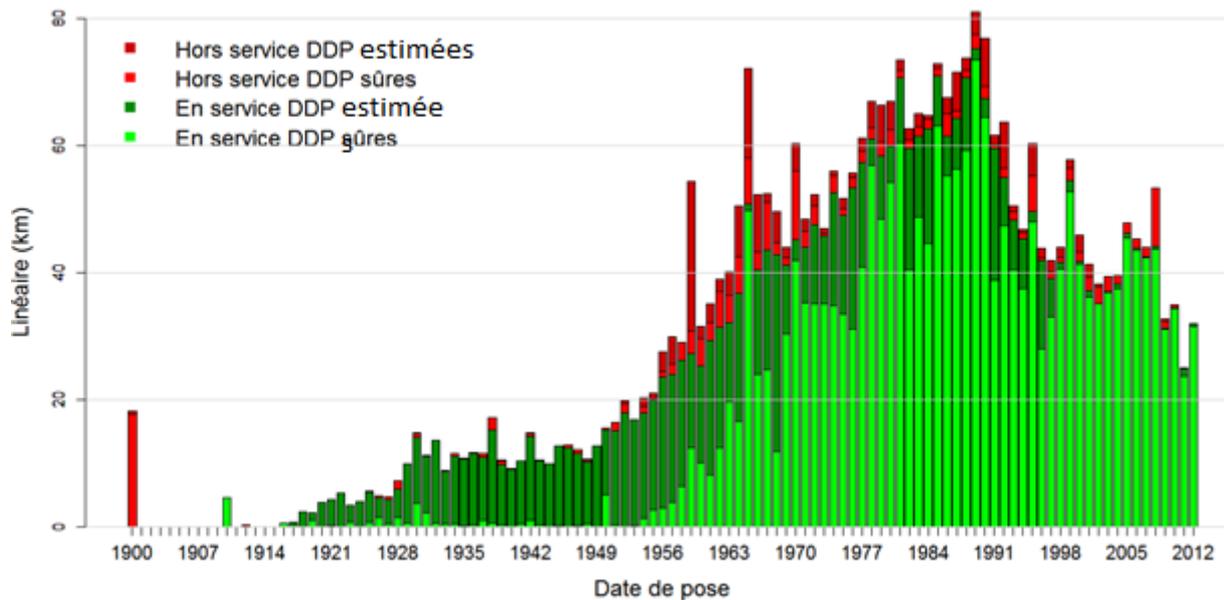


Figure 36 : Histogramme du linéaire en service [3 029km avec DDP3 =(DDP sûres +DDP estimées)] et hors service [340 km avec DDP3 (DDP sûres +DDP estimées)] au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002, 2012]).

d) Méthode 4 : fenêtre [2002, 2012] « tron2tiers »

Pour la méthode 4 nous éliminons de la base de données « tronçons pour méthode 4 » :

- les tronçons mis HS sur la fenêtre d'observation de 11 ans [2002,2012] qui n'ont pas de date de pose soit 32% des tronçons HS (cf. Figure 11).
- les tronçons en service au 31/12/2012 sans date de pose : soit 1% des tronçons en service (ES) (cf. Figure 7).

Puis nous effectuons un tirage aléatoire de 33% des individus des tronçons en service qui ont une date de pose. Et ces individus là on les supprime de notre base de données « tronçons pour méthode 4 ».

La courbe de survie de la méthode 4 est donc estimée à partir de (cf. Figure 37):

- 67% des tronçons ES
- et 68% des tronçons HS.

Dans ce cas la proportion globale des tronçons ES par rapport aux HS est à peu près respectée. Néanmoins, plus les dates de pose sont anciennes moins cette proportion est respectée (cf. Figure 37). Par conséquent plus les âges seront grands moins la courbe de survie sera fiable.

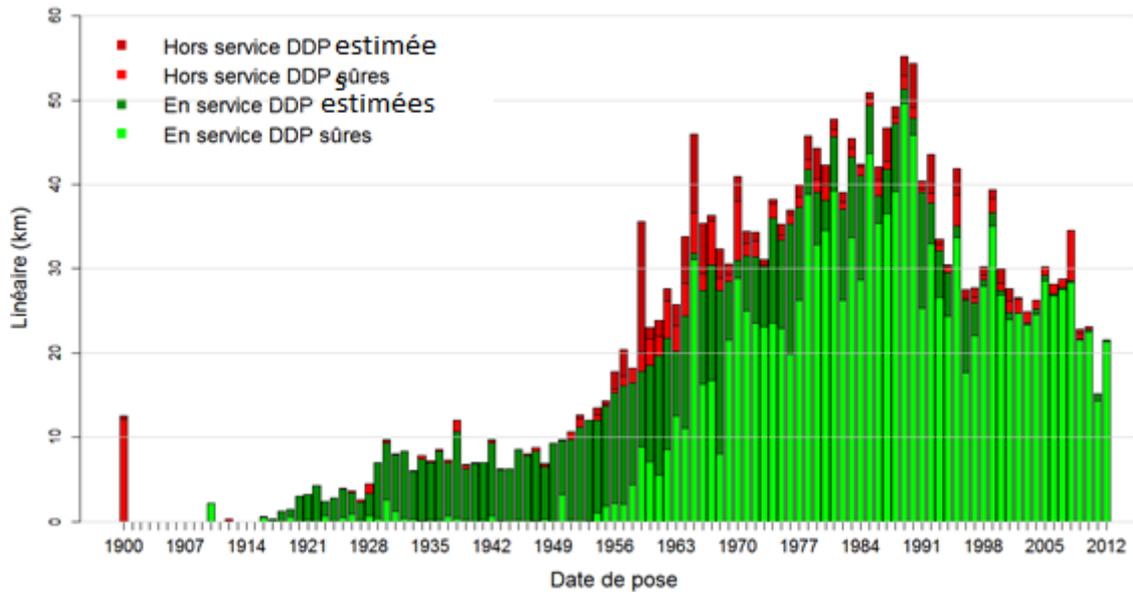


Figure 37 : Histogramme du linéaire en service [2 018 km avec DDP3 = (DDP sûres + DDP estimées)] et hors service [239 km avec DDP3 (DDP sûres + DDP estimées)] au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002, 2012]).

e) Méthode 5 : fenêtre [2008, 2012] « shortwindow »

Pour la méthode 5 nous éliminons de la base de données « tronçons pour méthode 5 » :

- les tronçons mis HS sur la fenêtre d'observation de 5 ans [2008, 2012] qui n'ont pas de date de pose soit 5% des tronçons HS (cf. Figure 11).
- les tronçons en service au 31/12/2012 sans date de pose : soit 1% des tronçons en service (ES) (cf. Figure 7).

La courbe de survie de la méthode 5 est donc estimée à partir de :

- 95% des tronçons HS
- et 99% des tronçons ES.

La proportion globale des tronçons ES par rapport aux HS est respectée. Néanmoins cette fenêtre d'observation est un peu trop petite.

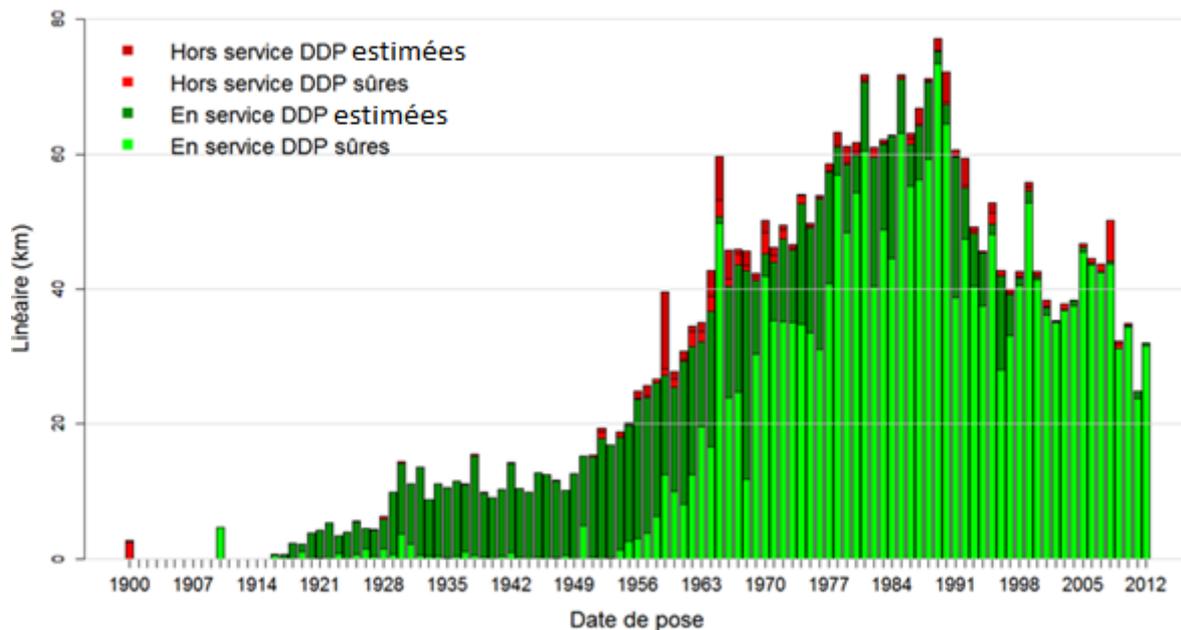


Figure 38 : Histogramme du linéaire en service [3 029km avec DDP3 = (DDP sûres +DDP estimées)] et hors service [175 km avec DDP3 = (DDP sûre +DDP estimées)] au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2008, 2012]).

f) Méthode 6 : fenêtre [2002, 2012] DDPEssures

Pour la méthode 6 nous éliminons de la base de données « tronçons pour méthode 6 » :

- les tronçons mis HS sur la fenêtre d'observation de 11 ans [2002,2012] qui n'ont pas de date de pose soit 32% des tronçons HS (cf. Figure 11).
- les tronçons en service au 31/12/2012 sans date de pose : soit 1% des tronçons en service (ES) et les tronçons ES avec « DDP estim » soit : 29% des tronçons ES (cf. Figure 7).

La courbe de survie de la méthode 6 est donc estimée à partir de (cf. Figure 39):

- 68% des tronçons HS
- et 70% des tronçons ES.

Dans ce cas la proportion globale des tronçons ES par rapport aux HS est à peu près respectée. Néanmoins, plus les dates de pose sont anciennes moins cette proportion est respectée (cf. Figure 39). Par conséquent plus les âges seront grands moins la courbe de survie sera fiable.

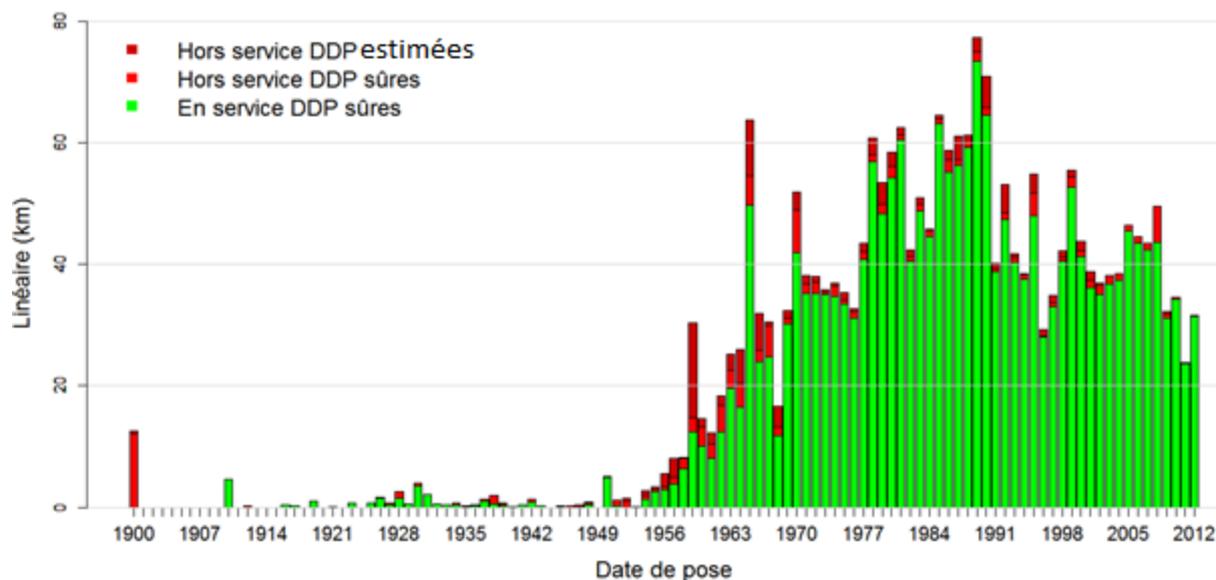


Figure 39 : Histogramme du linéaire en service [2 127 km avec DDP sûres] et hors service [227 km avec DDP3 = (DDP sûres +DDP estimées)] au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2002, 2012]).

IV.2.2 Nettoyage des données défaillances FR

Nous avons « nettoyé » les défaillances FR de la façon suivante :

- la **localisation** des défaillances a été « nettoyée » selon la méthode décrite dans l'Annexe 3 afin de ne conserver uniquement que les 5 catégories suivantes : sur tronçon, sur joint, sur appareillage, accidentelle et inconnue.
- nous n'avons conservé ensuite que les défaillances FR sur **corps de conduite** ou sur **joint** entre conduites ou **inconnues**
- nous avons conservé uniquement les défaillances FR observables sur notre fenêtre d'observation [2002, 2012]

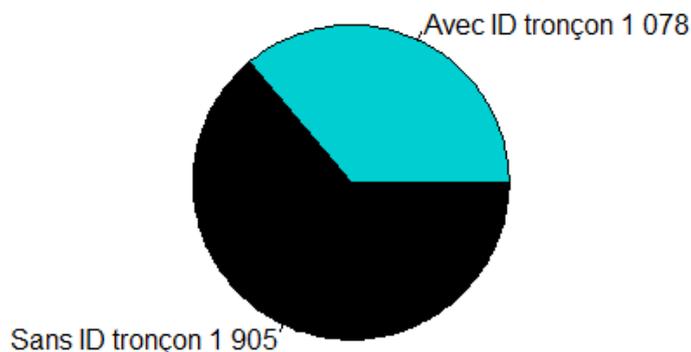


Figure 40 : Diagramme du nombre de défaillances FR observé entre [2002, 2012] sur tronçon ou sur joint, sachant s'il a été possible ou pas de les rattacher à un identifiant de tronçon pris en compte dans la méthode 2 (36% ont un identifiant tronçon pris en compte dans la méthode 2)

- Enfin les tronçons auxquels nous avons pu rattacher leurs défaillances (cf. Figure 40) nous leur avons créé l'indicateur **NDOA** qui est le nombre de défaillances moyen observé par an

sur la fenêtre d'observation [2002, 2012]. Les tronçons sans défaillance ont une valeur de NDOA égale à zéro.

IV.3 Nos données tronquées à gauche, censurées à droite

Comme nous l'avons vu partie I.2.4, Figure 13, la période d'observation du linéaire hors service s'étend sur 11 ans, de 2002 à 2012 (bornes incluses). Avant 2002 les dates de mise hors service n'étaient pas enregistrées ou commençaient seulement à l'être sur le SIG. Nous ne connaissons donc pas les durées de maintien en service des tronçons mis hors service avant cette date, ils sont donc retirés de la base de données. Nos données ne sont alors complètement observables que sur la fenêtre [2002, 2012]. Ainsi l'estimation de courbe de survie sera faite sur des données tronquées à gauche (cf. Annexe 9 pour lire la définition de la troncature).

Les données sont censurées à droite du fait que tous les tronçons ne sont pas encore hors service à l'arrêt des observations fin 2012. La fenêtre d'observation étant limitée nous observons la réelle mise hors service d'une faible proportion du réseau. Pour la plupart des tronçons observés, la valeur réelle de la durée de maintien en service est inconnue car elle est supérieure à l'âge atteint à la fin de la fenêtre d'observation (cf. Annexe 9 pour lire la définition de la censure).

Notons θ_1 l'année de début d'observation (2002), θ_2 l'année de fin d'observation (2012). Pour chaque tronçon i , posons : a_i l'âge du tronçon en θ_1 ($a_i = 0$ an si le tronçon a été posé après θ_1), b_i l'âge du tronçon à sa date de mise hors service ou son âge en θ_2 , et T la variable aléatoire représentant la durée de maintien en service. La Figure 41 illustre les concepts de troncature à gauche et de censure à droite.

- Toute date de mise hors service inférieure à θ_1 est inobservable (troncature à gauche).
- Les dates de mise hors service entre $[\theta_1 ; \theta_2]$ sont exactement observées.
- Les dates de mise hors service postérieures à θ_2 ne sont pas observées et les âges à la mise hors service correspondants sont censurés à droite.

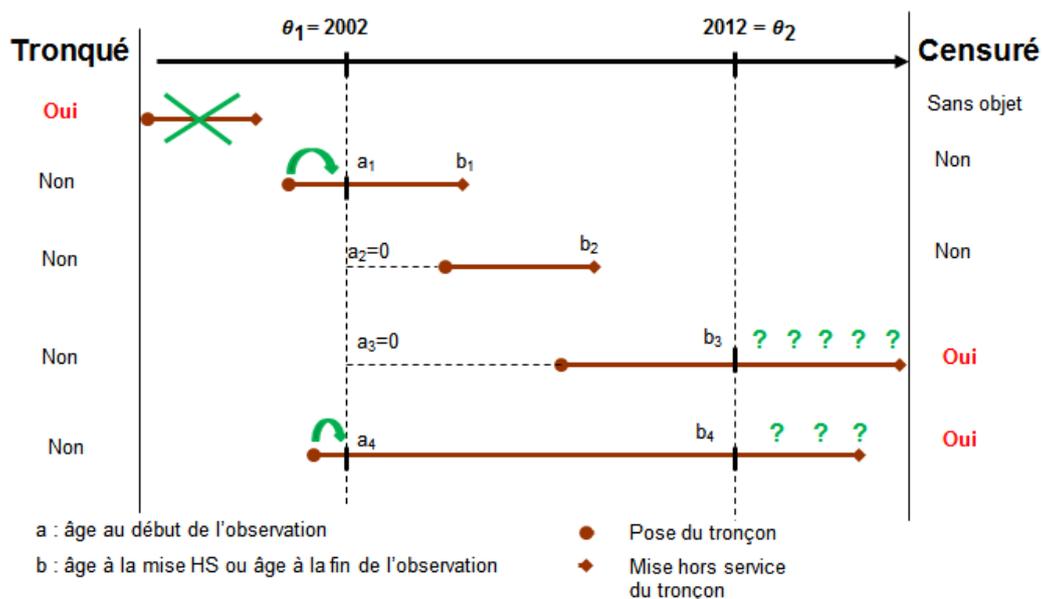


Figure 41 : Dispositions possibles des tronçons vis-à-vis de la fenêtre d'observation, illustration de la troncature à gauche et de la censure à droite

Les courbes de survie sont estimées tantôt à partir du linéaire de tronçons et tantôt à partir de leur nombre. Les terrains d'étude sont plus partisans des courbes de survie basées sur le linéaire. En effet, vu que tous les tronçons ont des longueurs différentes il est plus réaliste d'exposer des résultats en termes de linéaire hors service chaque année plutôt qu'en nombre de tronçons.

IV.4 Survie empirique des tronçons hors service et en service

IV.4.1 Kaplan-Meier simple pour données censurées à droite

L'estimateur de Kaplan-Meier (Kaplan & Meier 1958) permet de calculer une fonction de survie d'après des données de durées de maintien en service. Il repose sur **l'idée** qu'être en service après un temps t , c'est être en service juste avant t ($= t-1 = t$ moins une année) et ne pas passer hors service au temps t . L'évènement d'intérêt ici est la mise hors service d'un tronçon.

Considérons les notations suivantes :

- t_j avec ($j = 1, \dots, m$) les âges à l'évènement, des évènements (décès ou censure) rangés par ordre croissant, avec $t_{(0)} = 0$
- Y_j le nombre d'individus à risque de subir l'évènement d'intérêt juste avant le temps t_j ,
- d_j le nombre de mise hors service en t_j .

Selon la définition de la fonction de survie on a :

$$\hat{S}(t_j) = P(T > t_j) \quad \text{Eq. 3}$$

D'après **l'idée** de Kaplan-Meier, il en découle que :

$$\hat{S}(t_j) = P(T > t_j \text{ et } T > t_{j-1}) \quad \text{Eq. 4}$$

Or, en théorie des probabilités, la probabilité conditionnelle d'un évènement A, sachant qu'un autre évènement B de probabilité non nulle s'est réalisé (ou probabilité de A, sachant B) est le nombre noté $P(A|B)$, il est défini par :

$$P(A|B) = \frac{P(A \text{ et } B)}{P(B)} \quad \text{Eq. 5}$$

D'où

$$\hat{S}(t_j) = P(T > t_j \text{ et } T > t_{j-1}) = P(T > t_j | T > t_{j-1}) \times P(T > t_{j-1}) \quad \text{Eq. 6}$$

Ainsi de suite de proche en proche on obtient :

$$\hat{S}(t_j) = P(T > t_j | T > t_{j-1}) \times P(T > t_{j-1} | T > t_{j-2}) \times \dots \times P(T > t_2 | T > t_1) \times P(T > t_1 | T > 0) \quad \text{Eq. 7}$$

Or

$$P(T > t_j | T > t_{j-1}) + P(T \leq t_j | T > t_{j-1}) = 1 \quad \text{Eq. 8}$$

D'où

$$\hat{S}(t_j) = [1 - P(T \leq t_j | T > t_{j-1})] \times [1 - P(T \leq t_{j-1} | T > t_{j-2})] \times \dots \times [1 - P(T \leq t_2 | T > t_1)] \times [1 - P(T \leq t_1 | T > 0)] \quad \text{Eq. 9}$$

Alors la probabilité p_j de mise hors service dans l'intervalle $[t_{(j-1)}, t_{(j)}]$ sachant que le tronçon était en service en $t_{(j-1)}$, *i.e.* $p_j = P(X \leq t_{(j)} | X > t_{(j-1)})$, peut être estimée par

$$\hat{p}_j = \frac{d_j}{Y_j} \quad \text{Eq. 10}$$

D'où

$$\hat{S}(t_j) = \left[1 - \frac{d_j}{Y_j}\right] \times \left[1 - \frac{d_{j-1}}{Y_{j-1}}\right] \times \dots \times \left[1 - \frac{d_2}{Y_2}\right] \times \left[1 - \frac{d_1}{Y_1}\right] \quad \text{Eq. 11}$$

L'estimateur de Kaplan-Meier de la survie est alors un produit de la forme (Saint Pierre 2013):

$$\hat{S}(t) = \prod_{\substack{j=1, \dots, m \\ t_j \leq t}} \left(1 - \frac{d_j}{Y_j}\right) \quad \text{Eq. 12}$$

Et sa variance est estimée par la formule de Greenwood (Aalen et al. 2008):

$$\tilde{\tau}^2(t) = \hat{S}(t)^2 \sum_{t_j \leq t} \frac{d_j}{Y(T_j)\{Y(T_j) - d_j\}} \quad \text{Eq. 13}$$

L'intervalle de confiance peut être estimé alors de la façon suivante :

$$IC_{95\%} = \hat{S}(t)^2 \pm 1.96 \times \tilde{\tau}(t) \quad \text{Eq. 14}$$

Ou selon la formule de Rothman

$$IC_{95\%} = \frac{M}{M + (1.96)^2} \left[\hat{S}(t) + \frac{(1.96)^2}{2M} \pm 1.96 \sqrt{\tilde{\tau}(t)^2 + \frac{(1.96)^2}{4M^2}} \right] \quad \text{Eq. 15}$$

Où

$$M = \frac{\hat{S}(t)[1 - \hat{S}(t)]}{\tilde{\tau}(t)^2} \quad \text{Eq. 16}$$

L'estimateur de Kaplan-Meier présenté ci-dessus permet de corriger la censure à droite.

IV.4.2 Kaplan-Meier élargi (en effectif) pour données censurées et tronquées

Nos données étant tronquées à gauche et censurées à droite nous avons dû ajuster l'estimateur de Kaplan-Meier comme l'indique (Claude & Lyon 1997). Pour cela il suffit de faire très attention dans le comptage de nos individus à risque de subir l'événement d'intérêt.

i est le tronçon $n^{\circ}i$

a_i est l'âge du tronçon en 2002 (âge en début d'observation)

b_i est l'âge du tronçon à sa mise hors service ou s'il est censuré, $b_i = \hat{a}_i$ en 2012

$c_i = \begin{cases} 0 & \text{si l'âge de mise hors service est connu (= individu non censuré)} \\ 1 & \text{si l'âge de mise hors service est inconnu (= individu censuré)} \end{cases}$

t_j avec ($j = 1, \dots, m$) l'âge aux évènements (décès et censure) rangés par ordre croissant, avec $t_j = 0$

Nous obtenons alors l'estimateur de Kaplan-Meier élargi :

$$\hat{S}(t) = \prod_{t_j \leq t} \left(1 - \frac{\text{Card}\{i, b_i = t_j \ \& \ c_i = 0\}}{\text{Card}\{i, a_i \leq t_j \leq b_i\}} \right) \quad \text{Eq. 17}$$

À chaque âge t , nous calculons : le chiffre 1 moins la somme des tronçons (mis hors service) morts au temps t divisée par la somme de tous les tronçons qui ont un âge en début d'observation inférieur à t et un âge en fin d'observation supérieur à t (donc tous les individus vivants au temps t).

L'estimateur de Kaplan-Meier élargie présenté ci-dessus permet de corriger la censure à droite et prendre en compte la troncature à gauche.

IV.4.3 Kaplan-Meier élargi (en linéaire) pour données censurées et tronquées

Les longueurs des tronçons étant trop disparates, il a été décidé de considérer aussi comme étant un individu, un mètre de tronçon. Ainsi au lieu de compter le nombre de tronçons qui passent hors service à chaque âge, il est compté le nombre de mètres passant hors service à chaque âge. Notons alors :

i le mètre $n^{\circ}i$

a_i l'âge du tronçon en 2002 (âge en début d'observation)

b_i l'âge du tronçon à sa mise hors service ou s'il est censuré, $b_i =$ âge en 2012

$c_i = \begin{cases} 0 & \text{si l'âge de mise hors service est connu (= individu non censuré)} \\ 1 & \text{si l'âge de mise hors service est inconnu (= individu censuré)} \end{cases}$

t_j avec ($j = 1, \dots, m$) les temps d'évènements (décès et censure) rangés par ordre croissant, avec $t_j = 0$

Nous obtenons alors l'estimateur de Kaplan-Meier élargi en linéaire :

$$\hat{S}(t) = \prod_{t_j \leq t} \left(1 - \frac{\text{Card}\{i, b_i = t_j \ \& \ c_i = 0\}}{\text{Card}\{i, a_i \leq t_j \leq b_i\}} \right) \quad \text{Eq. 18}$$

À chaque âge t , nous calculons le complémentaire au chiffre 1 de la somme des linéaires mis hors service au temps t divisée par la somme de tous les linéaires qui ont un âge en début d'observation inférieur à t et un âge en fin d'observation supérieur à t (donc tous les mètres de tronçons en service au temps t).



Il est à noter que la courbe de survie brute (cf. Annexe 10) sous-estime en général très largement la survie des tronçons puisqu'elle ne prend en compte que les tronçons hors service. Il faut donc utiliser la courbe de survie empirique (calculé par exemple par la méthode de Kaplan-Meier ou de Turnbull (cf. Annexe 11) qui prend en compte les tronçons hors service mais aussi les tronçons en service (= tronçons censurés). La démonstration de l'utilité de ces méthodes est réalisée en Annexe 12 et Annexe 13.

Il est important de retenir que la méthode de Turnbull et de Kaplan-Meier élargie donne systématiquement strictement les mêmes résultats. Vu que la méthode de Turnbull est bien plus longue en temps de calcul nous n'utiliserons par la suite que la méthode de Kaplan-Meier.

La courbe de survie estimée par la méthode de Kaplan-Meier est discontinue, c'est-à-dire qu'elle ne possède pas de valeurs à tous les âges. En effet cela arrive lorsqu'un âge n'est pas observé dans la fenêtre d'observation. Or pour les calculs d'indicateur à l'étape 4 de notre modèle nous avons besoin de fonction de survie continue. Nous allons donc présenter dans la partie IV.5 des méthodes pour obtenir une fonction continue la plus proche de notre survie empirique discontinue.

IV.5 Obtention d'une fonction continue à partir de la fonction de survie empirique discontinue

IV.5.1 Ajustement d'un modèle paramétrique classique à notre courbe de survie empirique

Plusieurs modèles paramétriques de survie sont classiques en statistique : la survie de Weibull, de Poisson, Lognormale, de Herz, normale, etc. Toutes ont des équations mathématiques associées dont les paramètres peuvent varier.

L'ajustement consiste à trouver les paramètres de ces fonctions de survie classique afin de les faire correspondre au mieux à notre courbe de survie empirique (Kaplan-Meier). La méthode d'ajustement utilisée est la méthode des moindres carrés, elle consiste à minimiser [par la méthode de (Nelder & Mead 1965), cf. Annexe 14] la somme des écarts (élevés au carré pour s'affranchir des signes) entre les courbes empirique et théorique.

IV.5.1.1 Ajustement d'un modèle paramétrique de Weibull

Le modèle de Weibull est très utilisé dans le cadre de l'analyse des données de survie. La fonction de survie de Weibull dépend de deux paramètres, un paramètre d'échelle $\lambda \geq 0$ et un paramètre de forme $\delta \geq 1$, tous deux rassemblés dans le vecteur de paramètres $\theta = (\lambda, \delta)$

$$S_{\theta}(t) = e^{-t^{\delta} \times e^{-\lambda}} \quad \text{Eq. 19}$$

Les paramètres θ optimaux sont ceux qui minimisent la quantité :

$$S(t) = \sum_t \left(\widehat{S}_{KM}(t) - \frac{S_{\theta}(t)}{S_{\theta}(t_{\min_{KM}})} \right)^2 \quad \text{Eq. 20}$$

Avec t les réalisations de la variable T âge à la mise hors service, $\widehat{S}_{KM}(t)$ l'estimateur empirique de Kaplan-Meier et $t_{\min_{KM}}$ l'âge minimum à partir duquel Kaplan-Meier a été estimé,

c'est-à-dire 0 pour la majorité des matériaux sauf pour la fonte grise. En effet, nos âges de mise hors service sont observés sur une fenêtre restreinte de 2002 à 2012 et le plus jeune tronçon en fonte grise mis hors service est âgé de 34 ans. La courbe de Kaplan-Meier commence alors avec $\widehat{S}_{KM}(34) = 1$, il faut donc le prendre en compte dans l'estimation de la courbe d'ajustement de Weibull. En effet nous ne pouvons estimer que la survie conditionnelle : $P\{T \geq t | T \geq t_{min}\}$ (cf. méthode de déconditionnement en annexe 15).

Nous faisons deux tests de rapport de vraisemblance pour valider les paramètres $\theta = (\lambda, \delta)$ du modèle.

- Premier test :

Posons l'hypothèse nulle $H_0 : \theta = \theta_0$ avec $\theta_0 = (\lambda_{NM}, \delta_0 = 1)$

δ_0 est le paramètre de référence, si $\hat{\delta} \leq 1$ alors il n'y a pas de vieillissement et λ_{NM} est la valeur issue de l'optimisation par la méthode de Nelder Mead.

Contre l'hypothèse alternative $H_1 : \theta \neq \theta_0$

On définit alors $\widehat{\theta}$ l'estimateur du maximum de vraisemblance et $\widehat{\theta}_0$ l'estimateur du maximum de vraisemblance sous H_0 . On définit enfin la statistique du test du rapport de vraisemblance :

$$T = 2 \times |\ln L(\widehat{\theta}) - \ln L(\widehat{\theta}_0)| \quad \text{Eq. 21}$$

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 , T suit une loi du χ^2 à 1 degré de liberté ($T \sim \chi^2(1)$).

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.

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 .

- Deuxième test :

Posons l'hypothèse nulle $H_0 : \theta = \theta_0$ avec $\theta_0 = (\lambda_0 = 0, \delta_{NM})$. Ensuite le test se déroule de la même façon que précédemment.

IV.5.1.2 Ajustement d'un modèle paramétrique de Herz

Le modèle de Herz est un modèle qui a été développé spécialement pour la survie de tronçons (Herz 1996). La fonction de survie de Herz a pour paramètres $\theta = (\eta, \gamma, \tau)$ et est défini par :

$$S_{\theta}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t \leq \tau \\ \frac{(\eta + 1)}{\eta + e^{\gamma(t-\tau)}} & \text{si } t > \tau \end{cases} \quad \text{Eq. 22}$$

Le paramètre τ représente un paramètre de temps de la résistance au-dessous du quelle aucun renouvellement de tuyau n'est supposé se produire. Cependant, des tronçons renouvelés dès l'année où ceux-ci sont posés sont observés dans nos données, le paramètre est alors fixé à 0.

Les paramètres θ optimaux sont ceux qui minimisent la quantité :

$$S(t) = \sum_t \left(\widehat{S}_{KM}(t) - \frac{S_{\Theta}(t)}{S_{\Theta}(t_{\min_{KM}})} \right)^2 \quad \text{Eq. 23}$$

Pour le calcul de la probabilité d'erreur sur chaque paramètre voir la partie précédente.

IV.5.2 Estimation des points inexistantes par interpolation linéaire

Une autre méthode pour obtenir une fonction continue à partir de notre fonction de survie discontinue empirique est d'estimer uniquement la valeur les points inexistant de proche en proche, c'est-à-dire par interpolation linéaire. 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 inexistantes au milieu.



Les intérêts d'ajuster une équation mathématique aux courbes de survie sont d'une part d'avoir une équation en tous points pour calculer des indicateurs clefs de l'étape 4 de notre modèle.

Les méthodes suivantes permettent aussi d'avoir une fonction de survie continue mais elles nous seront aussi très utiles pour passer de l'étape 2 à l'étapes 3 de notre modèle long terme.

IV.6 Modèle de Cox

Dans cette partie, l'âge à la mise hors service est fonction de variables explicatives telles que la longueur ou le diamètre des tronçons.

Nous utilisons le modèle des risques proportionnels proposé par D. R. Cox (Cox 1972). Il permet d'établir une relation paramétrique entre les facteurs de « risque » de survenue de l'événement et la distribution des âges à la mise hors service sans postuler pour celle-ci une forme paramétrique particulière. L'analyse qui en découle présente donc un caractère semi-paramétrique.

Le modèle de Cox exprime une relation entre la fonction de risque instantanée associée à la survenue d'un événement et le vecteur z des p variables explicatives : $z = (z_1, z_2, \dots, z_p)$

$$\lambda(t, z) = \lambda_0(t)r(\beta, z) \quad \text{Eq. 24}$$

où $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_p)$ est le vecteur des coefficients de régression et $\lambda_0(t)$ est la fonction de risque de base.

Par définition on a :
$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{S(t)} \quad \text{Eq. 25}$$

Plus précisément $\lambda_0(t)$ est la fonction de risque des sujets pour lesquels toutes les variables explicatives z_j ($j = 1, \dots, p$) sont nulles. La fonction $r(\beta, z)$ dépend des caractéristiques z du sujet, la dépendance étant mesurée par les coefficients β . En général, on prend $r(\beta, z) = \exp(\beta_1 z_1 + \dots + \beta_p z_p)$ de façon à obtenir une fonction de risque positive sans contrainte sur les coefficients β quelles que soient les valeurs de z .

Nous avons alors :

$$\lambda(t, z) = \lambda_0(t) \times \exp(\beta_1 z_1 + \dots + \beta_p z_p) \quad \text{Eq. 26}$$

La fonction de risque instantanée du modèle de Cox est alors le produit d'une fonction (non-paramétrique) $\lambda_0(t)$ qui ne dépend que du temps et d'une fonction (paramétrique) $\exp(\beta_1 z_1 + \dots + \beta_p z_p)$ qui n'en dépend pas.

Soient $t_1 < t_2 < \dots < t_k$ les différents temps d'évènements observés et (1)... (k) les indices des sujets ayant subi l'évènement respectivement en $t_1 \dots t_k$. La probabilité conditionnelle que le sujet i subisse l'évènement en t_i sachant qu'il est à risque au temps t_i et qu'il n'y ait qu'un seul évènement en t_i parmi les sujets à risque au temps t_i est égale à :

$$p_i = \frac{\lambda_0(t_i) \times \exp(\beta z'_{(i)})}{\sum_{l: y_l \geq t_i} \lambda_0(t_i) \times \exp(\beta z'_{(l)})} \quad \text{Eq. 27}$$

Une solution proposée par Cox est l'élimination de $\lambda_0(t)$ en scindant la vraisemblance en deux parties et en ne conservant que la partie de la vraisemblance qui concerne uniquement les coefficients $\beta_j (j = 1, \dots, p)$ que l'on cherche à estimer. La probabilité conditionnelle devient :

$$p_i = \frac{\exp(\beta z'_{(i)})}{\sum_{l: y_l \geq t_i} \exp(\beta z'_{(l)})} \quad \text{Eq. 28}$$

Cette quantité ne dépend pas de la fonction de risque de base $\lambda_0(t)$ qui est considérée ici comme un paramètre de nuisance. La vraisemblance partielle est le produit des probabilités conditionnelles calculées à chaque temps d'évènements.

$$V(\beta) = \prod_{i=1}^k \frac{\exp(\beta z'_{(i)})}{\sum_{l: y_l \geq t_i} \exp(\beta z'_{(l)})} \quad \text{Eq. 29}$$

Cette vraisemblance partielle n'est pas une vraisemblance au sens statistique, mais il a été établi qu'elle peut être utilisée comme telle pour estimer les coefficients de régression β et tester l'influence de variables explicatives sur la fonction de risque (Cox 1972)(Alioum & Leffondre 2014).

Pour que les β puissent être pris en compte il faut tester l'hypothèse de la proportionnalité des risques. Une méthode possible est celle des résidus de Schoenfeld (D. Schoenfeld 1982). Pour chaque covariable, nous testons si son effet est indépendant du temps. Nous pouvons vérifier que l'hypothèse des risques proportionnels est satisfaite par lecture graphique ou par analyse de la P-value.

Les résidus de Schoenfeld se calculent de la manière suivante : pour chaque date de mis hors service t_i , nous calculons la différence entre les caractéristiques de l'individu décédé et une moyenne pondérée des caractéristiques des individus à risque d'être mis hors service au temps t_i . Ceci donne :

$$R_{ij} = z_{ij} - \bar{z}_{ij}(t_i) \quad \text{Eq. 30}$$

Avec :

- R_{ij} résidu au temps t_i
- z_{ij} valeur de la covariable j pour l'individu décédé au temps t_i
- $\bar{z}_{ij}(t_i)$ moyenne pondérée de la covariable j chez les individus à risque au temps t_i

Si l'hypothèse des risques proportionnels est vérifiée, alors les résidus doivent être distribués de la même manière au cours du temps.

IV.7 Modèle de Weibull avec covariables au tronçon

Le modèle de Cox ne permettant pas de tracer une courbe de survie, dans cette partie nous avons choisi une équation le permettant. Il est possible de calculer une fonction de survie de Weibull en fonction de différentes covariables. Ce modèle de Weibull a les propriétés du modèle de Cox (Cf. Annexe 16).

Le modèle de « Weibull au tronçon » est une fonction dépendante :

- du vecteur \mathbf{z}^T , le vecteur transposé du vecteur \mathbf{z} des p covariables explicatives :
 $\mathbf{z} = (\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_p)$
- de $\boldsymbol{\beta} = (\boldsymbol{\beta}_1, \dots, \boldsymbol{\beta}_p)$ le vecteur des paramètres
- t : covariable âge du tronçon
- δ et β_0 , des paramètres.

La fonction de survie de « Weibull au tronçon » s'écrit alors comme suit :

$$S_{\Theta}(t) = e^{-t^{\delta} \times e^{\beta_0} \times e^{\mathbf{z}^T \boldsymbol{\beta}}} \quad \text{Eq. 31}$$

Avec $\mathbf{Z}^T \boldsymbol{\beta} = \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_3 z_3 + \beta_4 z_4 + \dots + \beta_p z_p$

Avec Θ le vecteur de paramètre $(\delta, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p)$ à estimer. Notons $\hat{\Theta}$ l'estimateur de Θ , il se calcule en maximisant la vraisemblance.

Pour la construction d'une fonction de vraisemblance il est important de prendre en compte la censure et la troncature 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.

Fonction de densité : $f_{\Theta}(b_i | a_i)$

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 d'un tronçon soit supérieur à un certain âge qui se lit donc par sa fonction de survie :

$$S_{\Theta}(b_i | a_i)$$

Enfin comme l'échantillon est tronqué à gauche il est nécessaire de prendre en compte sa probabilité conditionnelle: (Klein & Moeschberger 2003)

$$\frac{f_{\Theta}(b_i | a_i)}{S_{\Theta}(a_i)}$$

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

$$L(\Theta) = \prod_{i=1}^n \frac{f_{\Theta}(b_i | a_i)^{1-c_i} \times S_{\Theta}(b_i | a_i)^{c_i}}{S_{\Theta}(a_i)} \quad \text{Eq. 32}$$

Par la méthode de Nelder et Mead nous minimisons la fonction objectif correspondant à $-\ln(L(\Theta))$, ce qui revient finalement à maximiser la vraisemblance.

$$\begin{aligned}
 -\ln(L(\Theta)) = & -\left[\sum_{i=1}^n (1 - c_i) [\ln(f_{\Theta}(b_i|a_i)) - \ln(S_{\Theta}(a_i))] \right. \\
 & \left. + \sum_{i=1}^n c_i [\ln(S_{\Theta}(b_i|a_i)) - \ln(S_{\Theta}(a_i))] \right]
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 33}$$

Avec :

$$\ln(S_{\Theta}(t)) = -t^{\delta} \times e^{\beta_0} \times e^{Z^T \beta}
 \tag{Eq. 34}$$

Et comme :

$$F_{\Theta}(t) = 1 - S_{\Theta}(t)
 \tag{Eq. 35}$$

$$f_{\Theta}(t) = \frac{-dS_{\Theta}(t)}{dt}
 \tag{Eq. 36}$$

$$= - \left[-\delta t^{\delta-1} \times e^{\beta_0} \times e^{Z^T \beta} \times e^{-t^{\delta} \times e^{\beta_0} \times e^{Z^T \beta}} \right]
 \tag{Eq. 37}$$

$$= \delta t^{\delta-1} \times e^{\beta_0} \times e^{Z^T \beta} \times e^{-t^{\delta} \times e^{\beta_0} \times e^{Z^T \beta}}
 \tag{Eq. 38}$$

Finalement,

$$\ln(f(t)) = (\delta - 1) + \ln(t) + \beta_0 + Z^T \beta - t^{\delta} \times e^{\beta_0} \times e^{Z^T \beta}
 \tag{Eq. 39}$$

Nous effectuons plusieurs tests de rapport de vraisemblance (cf. méthode décrite dans le paragraphe IV.5.1.1) pour valider chacun des paramètres du modèle.



Après avoir présenté des méthodes pour calculer notamment la survie empirique, nous allons les appliquer aux données du Grand Lyon. En effet la fonction de survie empirique passée fait partie de la première étape nécessaire à la création de notre nouveau modèle « long terme ».

V Calcul de la survie passée, application aux données du Grand Lyon

V.1 Courbes de survie sans partitionnement

V.1.1 Comparaison des courbes de survie en linéaire selon les méthodes employées

La figure 32 présente les courbes de survie du Grand Lyon TVD après avoir appliqué les 6 méthodes différentes pour compléter les données (cf. paragraphe IV.2.1.2). De plus pour avoir des références et des points de comparaison nous avons rajouté les courbes de survie des deux autres partenaires du projet « optimeau » à savoir eauservice Lausanne et le SEDIF.

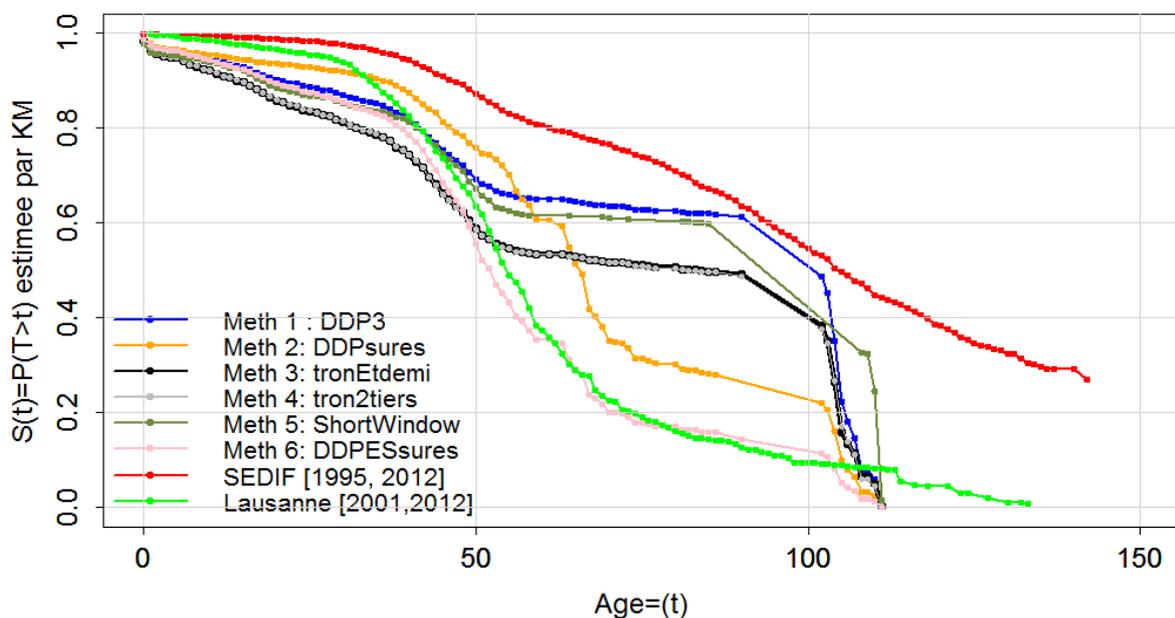


Figure 42 : Courbes de survie du Grand Lyon TVD après avoir appliqué plusieurs méthodes pour compléter les données d'entrée et courbes de survie du SEDIF et d'eauservice Lausanne

Nous constatons qu'aucune des méthodes que nous avons appliquées pour compléter les données n'est totalement satisfaisante.

Les courbes de survie issues des méthodes 1 : « DDP3 », 3 « tronEtdemi », 4 « tron2tiers » et 5 « shortwindows » ont une forme « ventrue » autour de 80 ans. Or avoir une courbe de survie « réelle passée » ventrue à partir des pratiques passées en gestion patrimoniale du Grand Lyon TVD nous semble complètement incohérent. Ce ventre est à notre avis lié aux tronçons ayant une valeur à « DDP estimées ». Or « DDP estimées » est directement liée à « DDP estimée » par Grand Lyon TVD. Or comme toutes les estimations, ces estimations doivent avoir une certaine marge d'incertitude.

Il est à noter que la méthode 3 et la méthode 4 donne quasiment le même résultat. Ceci est cohérent en effet car pour ces deux méthodes à chaque âge la proportion entre le linéaire en service et linéaire hors service est le même.

La méthode 2 : « DDP sûres » (cf. paragraphe IV.2.1.2b) donne une courbe de survie qui a une forme générale au cours de l'âge du tronçon assez cohérente avec ce qu'on peut rencontrer dans d'autres terrains d'étude. Néanmoins vu que les pratiques passées en gestion patrimoniale du Grand Lyon TVD se rapprochent plus de celles du SEDIF que de celles de Lausanne (vis-à-vis des taux de

renouvellement employés), intuitivement on s'attendrait à ce que la « vrai » courbe de survie du Grand Lyon soit plus proche de la courbe de survie du SEDIF que celle issue de la méthode n°2. De plus nous savons que pour cette méthode, à chaque âge la proportion entre tronçons en service et hors service n'est pas respectée par rapport à la réalité. On a en moyenne à chaque âge 70% des tronçons en service contre 35% des tronçons hors service. Donc en proportion par rapport aux tronçons ES il manque la moitié des tronçons HS. Par conséquent la « vraie » courbe de survie du Grand Lyon TVD devrait être plus décalée vers le haut par rapport à celle issue de la méthode n°2. De plus le début de la courbe de survie semble baisser un peu trop rapidement. Vu les pratiques passées du Grand Lyon : 8% des linéaires des tronçons ne peuvent pas avoir été renouvelé avant l'âge de 25 ans. Or c'est ce qu'on lit sur la courbe de survie issue de la méthode n°2. A priori ce pourcentage doit être moindre et plus se rapprocher des valeurs du SEDIF et de Lausanne. Vu que les données d'entrée sont incomplètes, les courbes de survie en sortie ne sont pas très fiables.

La courbe de survie issue de la méthode 6 : « DDPEssures » à une forme générale similaire à celle issue de la méthode 2 : « DDP sûres ». Néanmoins elle se rapproche encore plus rapidement de l'axe des abscisses ce qui n'est pas cohérent avec les pratiques de pose du Grand-Lyon TVD.



Par conséquent, par la suite nous travaillerons uniquement avec les données d'entrée manipulées selon la méthode 2 : « DDP sûres », qui pour nous est la plus fiable. En effet c'est pour nous la méthode qui aboutit à une courbe survie ayant la forme la plus cohérente même si sa hauteur par rapport à l'axe des ordonnées semble trop basse d'une manière générale.

Donc dans les paragraphes suivants :

- notre événement d'intérêt est la mise hors service d'un tronçon ou d'un mètre de tronçon.
- notre fenêtre d'observation est [2002,2012].

V.1.2 Comparaison des courbes de survie en linéaire et en effectif

La Figure 43 représente les courbes de survie de Kaplan-Meier. La courbe « linéaire » est réalisée en linéaire de tronçons (nous comptons le nombre de mètres de tronçons qui meurt [=est mis hors service] à chaque âge), alors que la courbe « effectif » est calculée en comptant le nombre de tronçons qui deviennent hors service à chaque âge. Nous constatons que la courbe de survie en effectif est en dessous de celle en linéaire. Cela doit s'expliquer par le fait que les tronçons de petites longueurs sont en moyenne mis hors service plus tôt que les tronçons de grandes longueurs (cf. Figure 43).

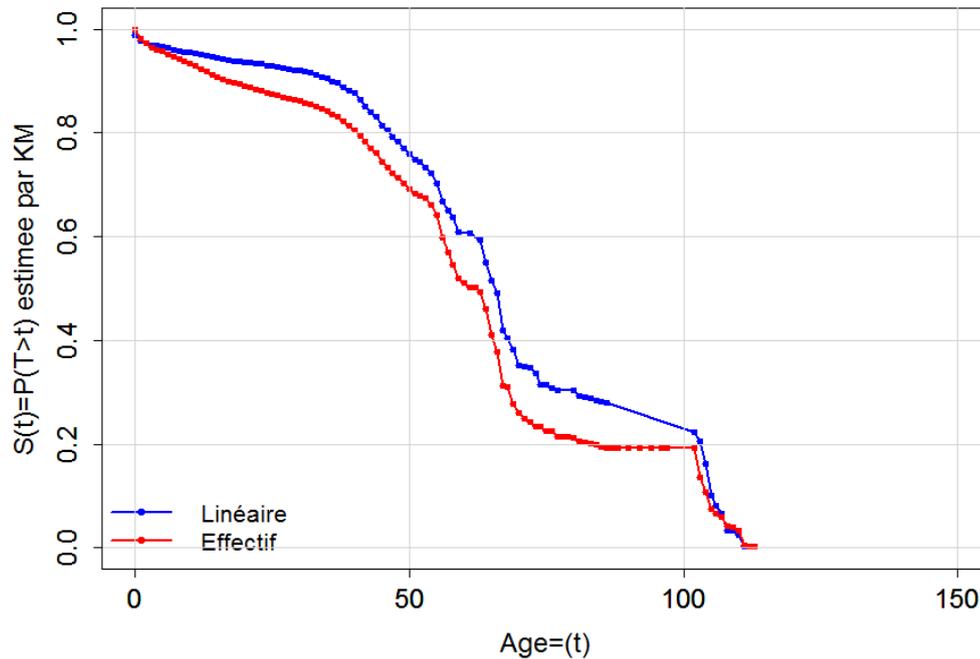


Figure 43 : Courbes de survie passée en linéaire et en effectif, Grand Lyon TVD, tous tronçons confondus entre [2002 2012]

La Figure 44 représente la survie de Kaplan-Meier en effectif ainsi que son intervalle de confiance calculé grâce à la formule de Greenwood et de Rothman (Cf. IV.4.1). Nous constatons que l'intervalle de confiance n'est pas très bon entre 70 et 100 ans. Ceci peut s'expliquer par le fait que nous utilisons ici les données manipulées selon la méthode n°2. Or l'intervalle de confiance dépend du nombre de tronçons qui ont cet âge en 2012. Et nous voyons sur la figure 32 qu'il y a peu de tronçons entre 1910 et 1948. Or $2012 - 1910 = 102$ ans. Et $2012 - 1948 = 64$ ans. Donc entre 64 ans et 102 ans, il est logique que l'intervalle de confiance ne soit pas très bon.

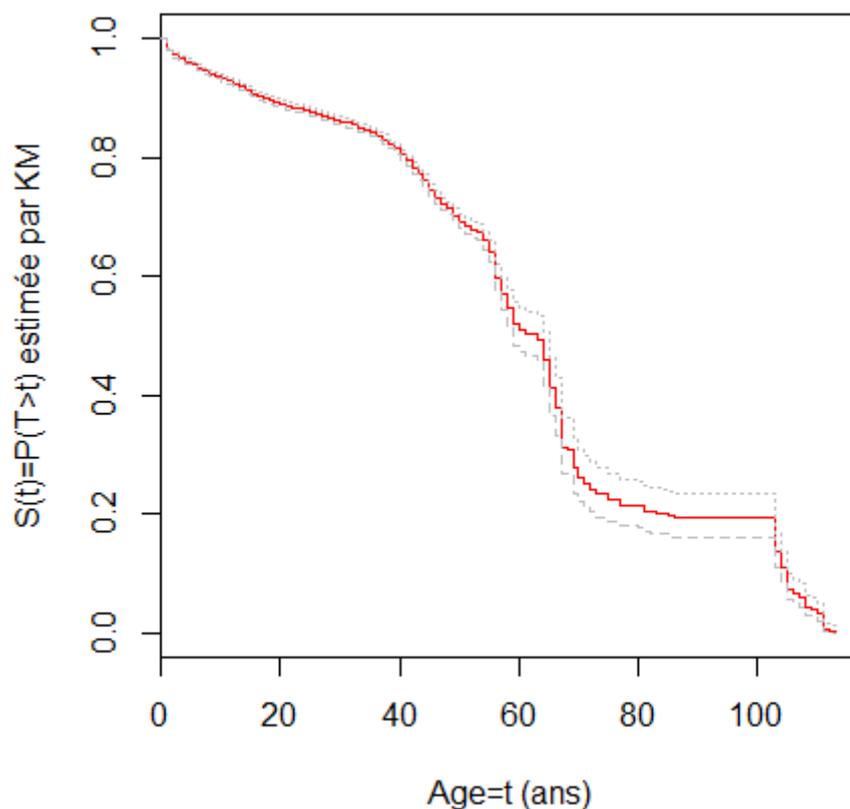


Figure 44 : Courbe de survie en nombre de tronçons accompagnée de son intervalle de confiance, tous tronçons confondus.

V.1.3 Comparaison des courbes de survie « brute » et « corrigée »

Sur la Figure 45 sont représentées deux courbes :

- « Survie Brute » représente la survie des tronçons (en linéaire) hors service. Cette courbe n'est pas représentative de la durée de maintien en service des tronçons car elle ne tient pas compte des tronçons encore en service après 2012.
- « KM » décrit la survie empirique des tronçons en service et hors service estimée par la méthode de Kaplan Meier

Toutes ces courbes sont estimées sur tous les tronçons, sans être différenciées par le diamètre ou par le matériau ou tout autre critère. La médiane de survie (courbe de Kaplan-Meier) d'un linéaire de canalisation est d'environ 66 ans sur la fenêtre d'observation 2002-2012 (cf. Figure 45 et Tableau 8). La survie ici $S(t)$ est la probabilité pour plusieurs mètres de tronçon de ne pas avoir été mis hors service au-delà d'un âge t . On remarque, de façon très cohérente, que sur la Figure 45 la survie brute a tendance à sous-estimer les âges à la mise hors service (cf. Tableau 8).

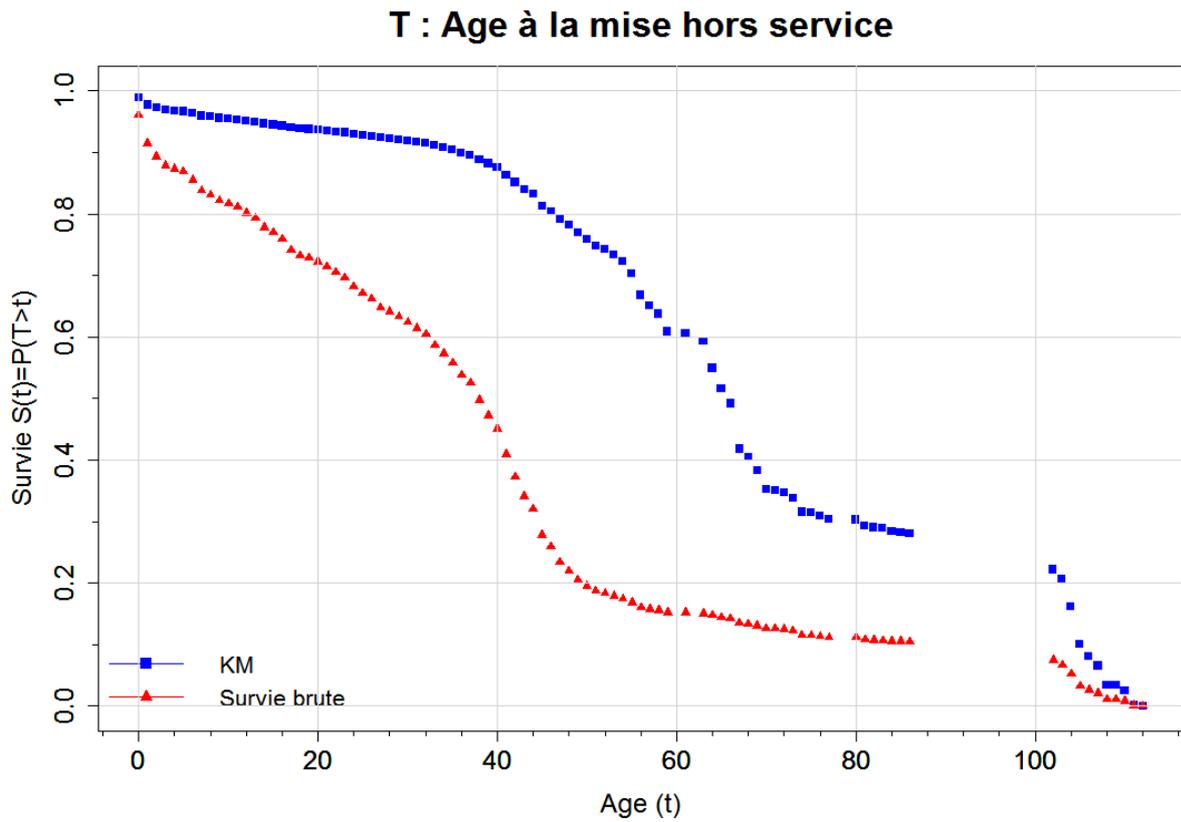


Figure 45 : Courbes de survie en linéaire, tous tronçons confondus et intervalle de confiance de Kaplan-Meier

	Survie brute	Survie Kaplan-Meier
Tronçons pris en compte	Tronçons hors service	Tronçons hors service et en service
S(t)	0.5	0.5
t	36 ans	66 ans

Tableau 8 : Age médian à la mise hors service du réseau d'eau potable (en km) sur le territoire du Grand Lyon TVD



La courbe brute est très biaisée. Elle ne prend pas en compte les tronçons encore en service. En aucun cas il ne faut utiliser cette courbe pour effectuer des calculs prospectifs.

V.2 Courbes de survie avec partitionnement

Définition du « partitionnement » :

Soit Ω un ensemble de tronçons. Ω est **partitionné** si et seulement si :

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

NB : il est à noter que le partitionnement est souvent aussi appelé « stratification ». Donc chaque partition est aussi souvent nommée « strate ».

V.2.1 Comparaison des courbes de survie pour différents diamètres

Dans cette section nous avons partitionné l'ensemble des tronçons en 2 strates selon le diamètre ([inférieurs ou égale à 300 mm] ou [supérieurs à 300 mm]) (Cf. Figure 16).

Nous constatons que les tronçons de gros diamètres sont mis hors service un peu plus tard que les tronçons de petits diamètres sur une période d'environ 0 à 60 ans. Puis la survie des gros tronçons de transport plonge brusquement, alors que celle des tronçons de petits diamètres diminue plus doucement. Le Grand Lyon ne peut pas se permettre d'observer trop de défaillances sur ses tronçons de gros diamètres, qui pourraient induire des dommages trop importants (Cf. Figure 46).

Les intervalles de confiance de ces deux courbes ne se chevauchent que très peu, nous pouvons donc dire qu'elles sont significativement différentes. (cf. Annexe 17). De plus une autre stratification par diamètre dont le seuil est 400 mm est disponible en Annexe 17.



Figure 46 : Courbes de survie passés [2002, 2012] en linéaire (tronçons partitionnés selon le diamètre)

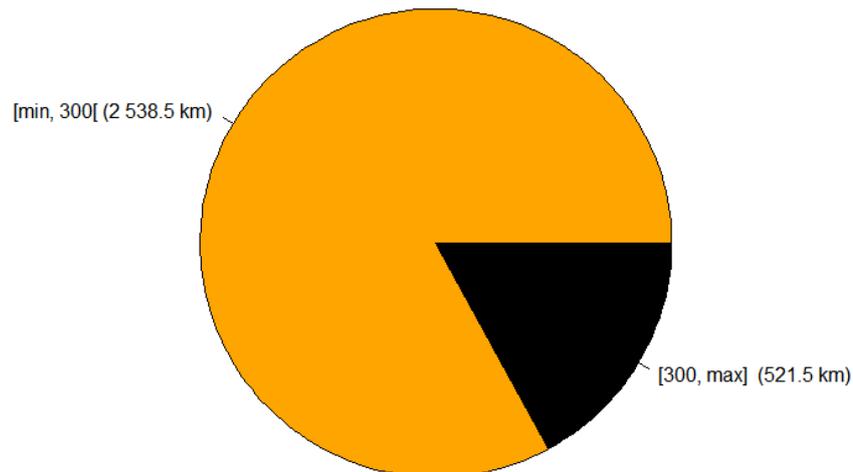


Figure 47 : Diagramme de la stratification par diamètre (en linéaire)

V.2.2 Comparaison courbes de survie pour différentes longueurs

Nous avons partitionné, ici, l'ensemble des tronçons en 2 strates selon leurs longueurs (cf. figure 45 et Figure 50).

L'étude des courbes de survie, en différenciant par la longueur, présente un résultat intéressant. En effet, il est possible de constater que les tronçons de grande longueur (supérieure ou égal à 100m) sont renouvelés en moyenne à un âge plus élevé que les tronçons de moyenne ou petite longueur (inférieure à 100m). La longueur est donc une variable qui peut avoir un intérêt pour la construction d'un modèle de prévision à long terme.

Il est important de garder en mémoire que :

- Les tronçons les plus petits sont situés en zone urbaine dense, donc ils sont plus sollicités ;
- Les tronçons les plus petits sont souvent de plus petits diamètres (cf. Annexe 18) et sont ceux qui cassent le plus.

Les intervalles de confiance de deux courbes ne se chevauchent quasiment pas, nous pouvons en déduire qu'elles sont significativement différentes.

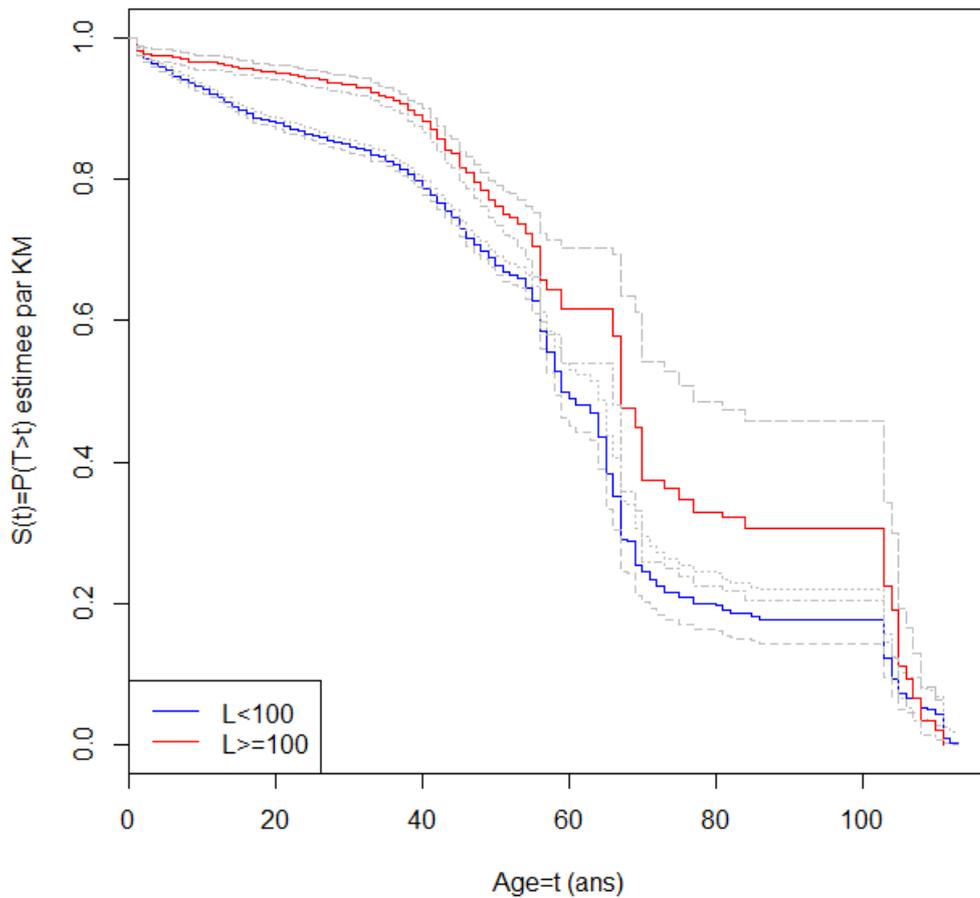


Figure 48 : Courbes de survie en effectif des tronçons (tronçons partitionnés en 2 strates : moyennes et grandes longueurs) et leurs intervalles de confiance (en gris foncé)

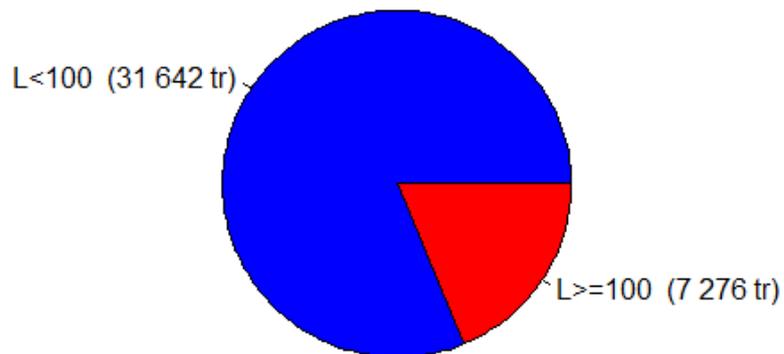


Figure 49 : Diagramme de la répartition du nombre de tronçons selon leur longueur.

V.2.3 Comparaison courbes de survie pour différents matériaux

Dans ce paragraphe nous avons partitionné l'ensemble des tronçons en 4 strates selon leur matériau : fonte ductile, fonte grise, béton âme tôle (BATO) et autres matériaux (Cf. Figure 14, Figure 50 et Tableau 9).

Sur la Figure 50 sont représentées les courbes de survie selon ces différents matériaux. Il est impossible d'estimer la survie passée après 42 ans des tronçons en fonte ductile. Effectivement, c'est un matériau jeune et nous n'avons pas suffisamment d'information dans le temps pour calculer leur survie passée après cet âge. Le plus vieux tronçon de fonte ductile actuellement en vie au Grand Lyon n'a que 42 ans.

Concernant les tronçons en fonte grise, nous ne connaissons pas le début de la courbe de survie entre 0 et 34 ans. Ceci s'explique par le fait que dans notre fenêtre d'observation, le plus jeune tronçon de fonte grise observé en 2002 a 34 ans. En effet, les derniers tronçons en fonte grise ont été posés aux alentours de 1970 tandis que la fenêtre d'observation des âges à la mise hors service commence en 2002. Idem pour les tronçons en BATO, le plus jeune tronçon observé sur la fenêtre d'observation a 17 ans. Par conséquent nous avons déconditionné ces courbes selon la méthode décrite dans l'Annexe 15.

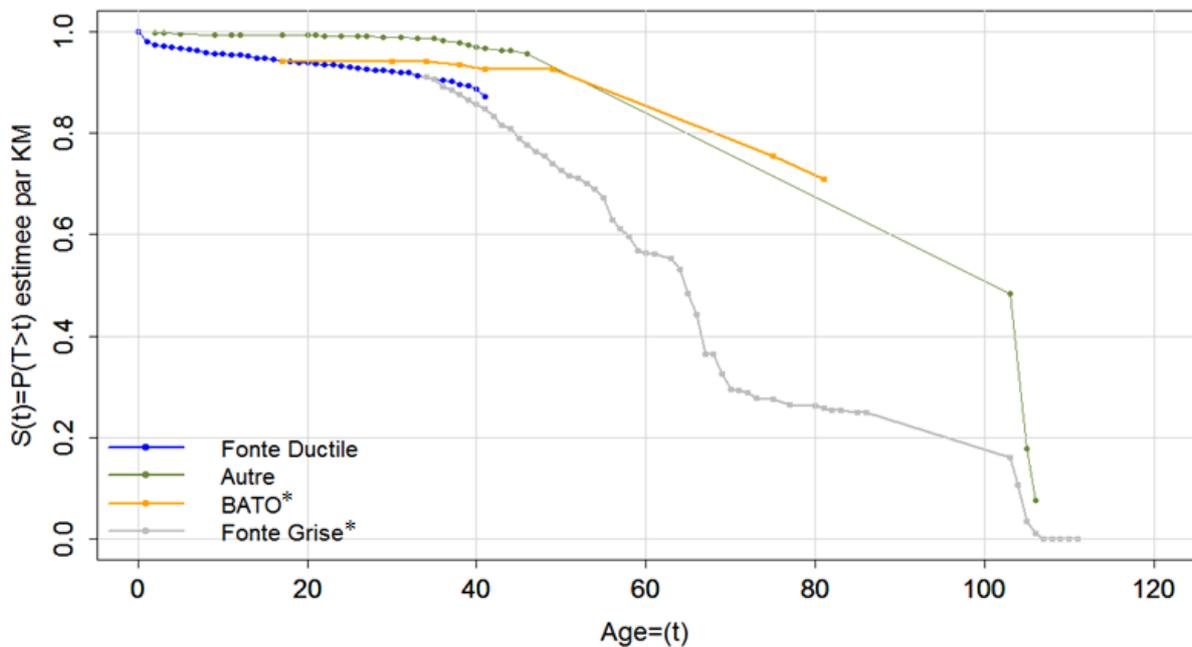


Figure 50 : Courbes de survie en linéaire pour différents matériaux (* ces courbes ont été déconditionnées)

Matériaux	Age min observé	Age max observé
Fonte ductile	1 an	42 ans
Fonte grise	34 ans	111 ans
Béton âme tôle (BATO)	17 ans	81 ans
Autre	2 ans	106 ans

Tableau 9 : Les âges minimaux et maximaux des tronçons observés dans la fenêtre d'observation [2002; 2012] par type de matériaux

V.2.4 Comparaison courbes de survie selon le nombre de défaillances

Nous avons partitionné, ici, l'ensemble des tronçons en 2 strates selon leurs nombres de défaillances FR. Un ensemble de tronçons avec peu de défaillances FR (NDOA $\in [0, 0.1]$) et un autre ensemble de tronçons avec plus de défaillances FR (NDOA $\in] 0.1, \max]$) (cf. Figure 51 et Figure 52).

De manière cohérente nous constatons que les tronçons ayant subi plus de 0.1 défaillances FR par an sur la fenêtre d'observation ont une survie plus faibles que les autres. En effet il est logique que des tronçons ayant plus de défaillances FR soient renouvelés plus tôt en âge que des tronçons avec moins de défaillances FR.

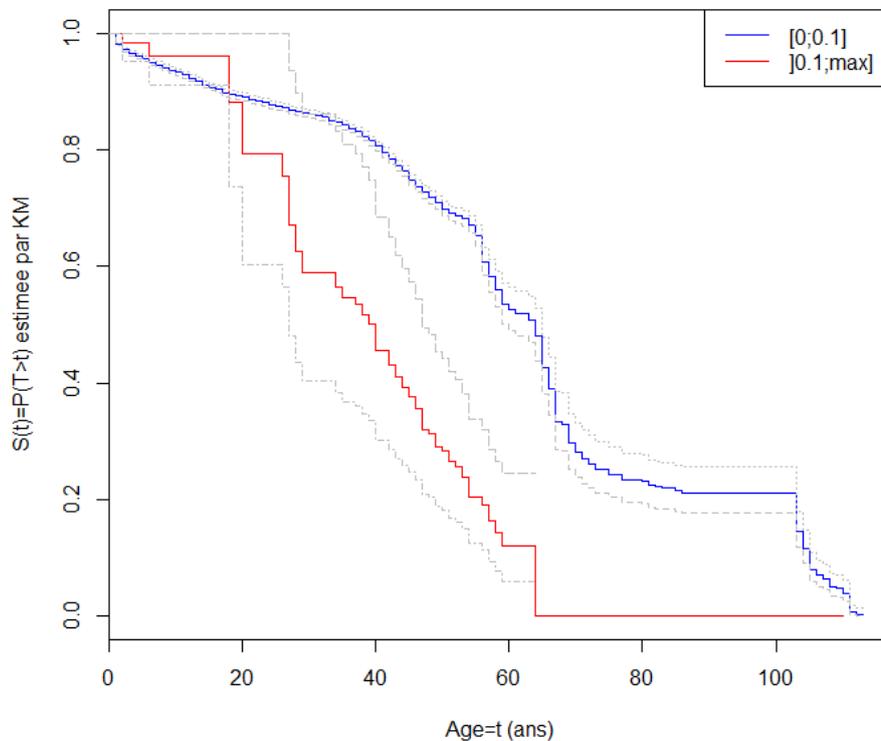


Figure 51: Courbes de survie en effectif (tronçons partitionnés en 2 strates selon la valeur de NDOA) et leurs intervalles de confiance (en gris foncé)

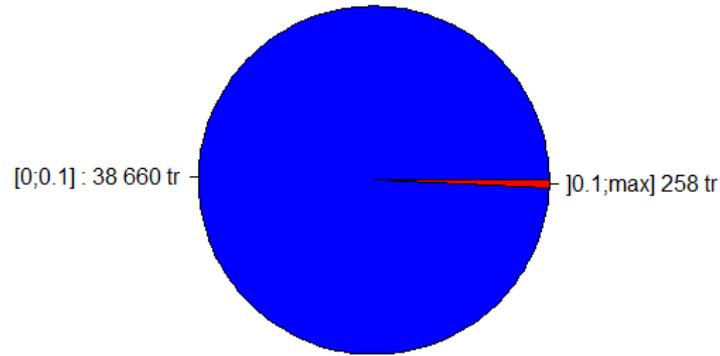


Figure 52: Diagramme de la stratification avec NDOA

V.2.5 Comparaison courbes de survie pour des tronçons situés en zone de balme ou non

Nous avons ici partitionné l'ensemble des tronçons en trois strates en fonction de leur localisation (cf. Figure 53 et Figure 54) :

- Tronçons situés en zone de Balme
- Tronçons non situés en zone de Balme
- Tronçons dont on ne sait pas où ils sont par rapport aux balmes.

Nous pouvons constater que cette variable ne semble pas impacter l'âge à la mise hors service des canalisations. En effet les courbes se chevauchent (cf. Annexe 19 pour voir les intervalles de confiance).

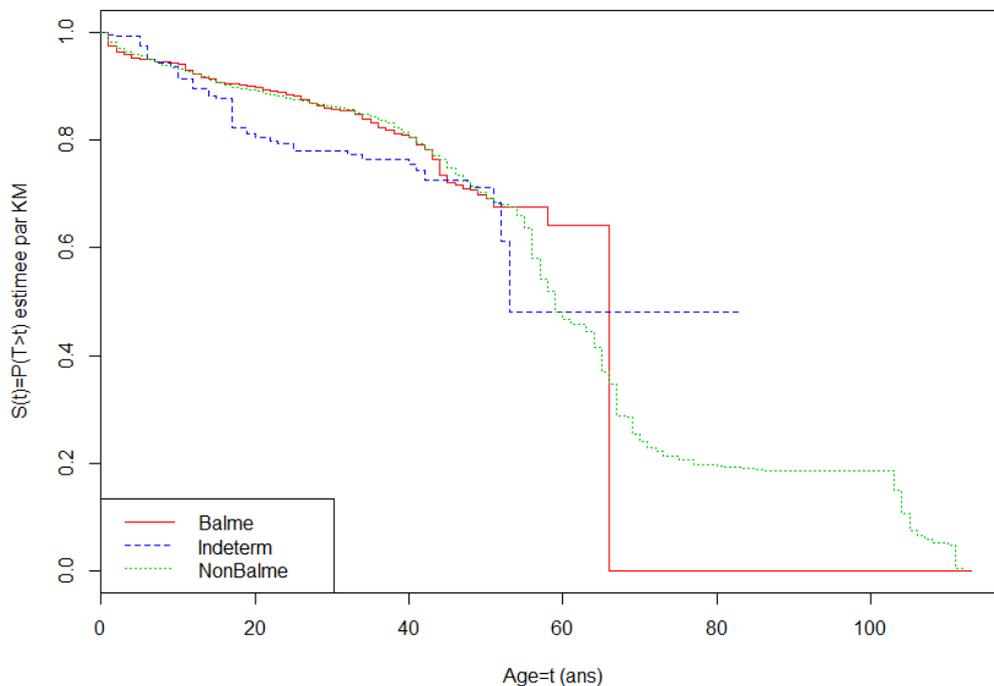


Figure 53: Courbes de survie en effectif (tronçons partitionnés en 3 strates si les tronçons sont positionnés en zone de balme ou non ou indéterminée) et leurs intervalles de confiance (en gris foncé)



Figure 54: Diagramme de la stratification des tronçons selon leur positionnement en zone de balme ou non ou indéterminée (nombre de tronçons)

V.2.6 Comparaison courbes de survie pour des tronçons situés sous chaussée ou ailleurs

Nous avons ici partitionné l'ensemble des tronçons en deux strates en fonction de leur localisation (cf. Figure 55 et Figure 56) :

- Tronçons sous chaussée
- Tronçons ailleurs que sous chaussée (trottoir, etc.) (cf. Annexe 7)

Nous constatons qu'au-delà de 40 ans les tronçons sous chaussée sont renouvelés plus tôt que les tronçons positionnés ailleurs (cf. Annexe 20 pour voir les intervalles de confiance).

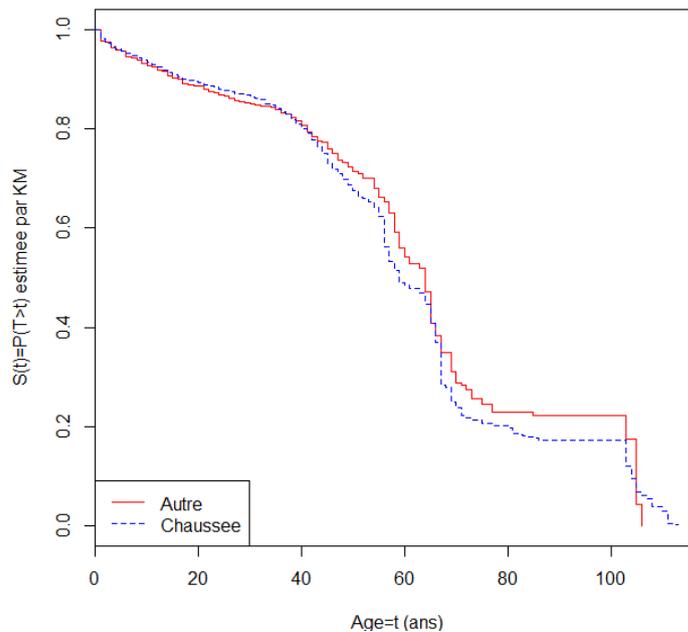


Figure 55: Courbes de survie en effectif (tronçons partitionnés en 2 strates si les tronçons sont positionnés sous chaussée ou autre)

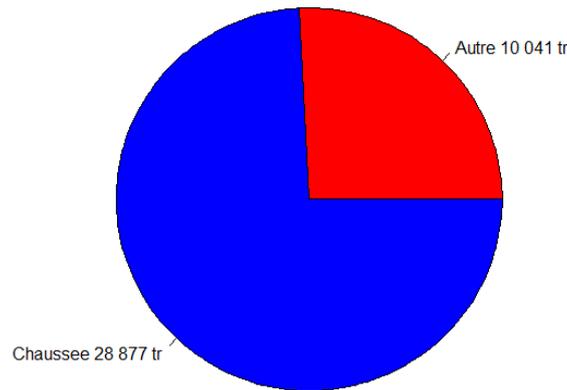


Figure 56: Diagramme de la stratification des tronçons selon leur positionnement sous chaussée ou autre (nombre de tronçons)



Les courbes de survie avec partitionnement nous ont montré que sur la fenêtre d'observation [2002 ,2012] :

- La probabilité de mise hors service pour des tronçons de gros ou petits diamètres est sensiblement la même de 0 à 40 ans, puis les tronçons de gros diamètres ont été mis hors service plus tard que les tronçons de petit diamètre jusqu'à 60 ans, enfin après 60 ans ce phénomène s'inverse ;
- Les tronçons de petite longueur ont été mis hors service plus tôt que les tronçons de plus grande taille ;
- Les courbes de survie par matériaux sont sensiblement différentes les unes des autres ;
- Les tronçons avec peu de défaillances ont été mis hors service plus tard que ceux avec beaucoup de défaillances.
- Le fait d'être situé en zone de balme ou non n'a pas impacté l'âge à la mise hors service d'une canalisation ;
- Les tronçons sous chaussées ont été renouvelés sensiblement plus tôt que les tronçons sous autre type de surface.

Cependant ces variables sont corrélées entre elles. Or il serait intéressant d'observer comment toutes ces variables ont agi conjointement sur les mises hors service. C'est ce que permet le modèle de Cox et le modèle de Weibull avec covariables.

Nous allons maintenant présenter les résultats du modèle de Cox avec les données du Grand Lyon

V.3 Résultats du modèle de Cox

Nous avons utilisé le modèle de Cox en choisissant d'étudier l'influence de plusieurs covariables explicatives tels que : le diamètre, la longueur, le matériau et le nombre de défaillance par an (« NDOA ») sur la fenêtre [2002, 2012], l'âge au début de la fenêtre et l'emplacement.

Pour cela nous avons créé des indicatrices pour les variables qualitatives : « matériau » et « emplacement ».

Le modèle s'écrit alors :

$$\lambda(t, z) = \lambda_0(t) \times \exp(\beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_3 z_3 + \beta_4 z_4 + \beta_5 z_5 + \beta_6 z_6 + \beta_7 z_7) \quad \text{Eq. 40}$$

Avec z le vecteur des 7 covariables suivantes : Longueur, \emptyset , Matériau(FD), Matériau(FG), âge en 2002, Emplacement(Chaussée) et NDOA.

En maximisant la vraisemblance $V(\beta)$ (cf. IV.8) nous obtenons les résultats suivant :

Covariable	$\hat{\beta}$	$\exp(\hat{\beta})$	P-value
Longueur	-0.004	0.996	$< 2 \times 10^{-16}$
Diamètre	-0.001	0.999	1×10^{-15}
Matériau(Autre)	0	1	Référence
Matériau(FD)	-0.37	0.69	8×10^{-5}
Matériau(FG)	-0.31	0.73	3×10^{-3}
Age en 2002	0.18	1.2	$< 2 \times 10^{-16}$
Emplacement(Autre)	0	1	Référence
Emplacement(Chaussée)	0.15	1.16	1×10^{-3}
$NDOA = NDO_i / (b_i - a_i)$	2.9	18	3×10^{-15}

Les P-value sont toutes inférieures à 5%, donc les coefficients $\hat{\beta}$ sont significatifs. Nous pouvons donc déduire que :

- pour la covariable **longueur**, pour un mètre de longueur en plus, le risque relatif d'être mis hors service est multiplié par 0.996, donc il diminue plus la longueur du tronçon est grande. Ce résultat semble cohérent avec les survies obtenues par la méthode de Kaplan-Meier partitionné par Longueur.
- concernant la variable **diamètre** : pour 1 mm de diamètre en plus, le risque relatif d'être mis hors service est multiplié par 0.999, donc il diminue plus le diamètre du tronçon est grand. Ce résultat est aussi cohérent avec les survies obtenues par la méthode de Kaplan-Meier partitionné par le diamètre.
- concernant la variable : « **NDOA** ». Pour une défaillance par an en plus, le risque relatif d'être mis hors service est multiplié par 18, donc il augmente, ce qui est aussi très cohérent.
- Les risques relatifs pour les **matériaux** sont à comparer avec le matériau de référence, ici les « autres matériaux que ceux en fonte ». Par exemple, pour la fonte ductile, le risque relatif

d'être mis hors service par rapport à « Autre » est multiplié par 0.69 donc il est plus faible. Ce qui est là aussi en accord avec le résultat obtenu grâce aux courbes de survies de Kaplan-Meier en stratifiant par matériaux. Nous pouvons noter ici une sorte de classement des matériaux de celui qui a eu le plus de probabilité d'être renouvelé à celui qui risque le moins d'être renouvelé. Néanmoins l'âge moyen des tronçons par famille de matériau au début de la fenêtre d'observation (en 2002) joue fortement sur ce classement.

- Nous avons ajouté la variable « **âge du tronçon au début de la fenêtre d'observation** » car cela permet de prendre en compte notamment le fait que pour la fonte grise nous n'observons que des vieux tronçons. Nous constatons dans ce modèle que si l'âge observé du tronçon au début de la fenêtre augmente d'une année alors le risque relatif d'être mis hors service est multiplié par 1.2, donc il augmente, ce qui est aussi très cohérent.
- Les risques relatifs pour les **emplacements** sont à comparer avec l'emplacement de référence, ici « les tronçons ailleurs que sous chaussée ». Pour les tronçons sous chaussée, le risque relatif d'être mis hors service par rapport à « Autre » est multiplié par 0.15 donc il est plus faible.

Pour valider le modèle de Cox il nous faut regarder si l'hypothèse de proportionnalité des risques est vérifiée tout au long de la vie des tronçons (âge). Les résultats obtenus par la méthode des résidus de Schoenfeld sont :

Covariable	χ^2	P-value
Diamètre	0.34	0.56
Longueur	64.5	9.9×10⁻¹⁶
Matériau(FG)	0.21	0.64
Matériau(FD)	0.32	0.57
Age en 2002	5.58	0.018
Emplacement(Chaussée)	3.35	0.067
<i>NDOA</i>	4.99	0.026

Ici pour que l'hypothèse de proportionnalité des risques soit acceptée tout au long de la vie des tronçons, il faut que la P-value soit supérieure à 5%. Or ce n'est pas le cas pour toutes les covariables (cf. p-values surlignées en jaune). L'hypothèse de proportionnalité des risques est vérifiée pour les variables « Matériau », « Emplacement » et « Diamètre ». Néanmoins elle n'est pas vérifiée pour les variables « Longueur », « Age en 2002 » et « NDOA ».

Les coefficients $\hat{\beta}$ ne peuvent donc pas être interprétés strictement comme nous l'avons effectué ci-dessus tout au long de la vie des tronçons. En effet en fonction de l'âge, une covariable peut agir différemment.

Si l'hypothèse des risques proportionnels est vérifiée, alors les résidus doivent être distribués de la même manière au cours du temps. En plus de la statistique de test ci-dessus, il est courant d'effectuer une représentation graphique des résidus en fonction du temps pour chaque covariable. Ainsi la Figure 57 représente les résidus pour la covariable NDOA en fonction de l'âge des tronçons. Nous constatons que pour cette covariable les résidus ne sont pas distribués de la même façon au cours du temps. Donc l'hypothèse de proportionnalité des risques au cours de l'âge n'est pas vérifiée pour la NDOA. La covariable semble avoir plus d'impact après 40 ans qu'avant 40 ans.

Une solution future pourrait être de stratifier les covariables qui ne vérifient pas l'hypothèse des risques proportionnels.

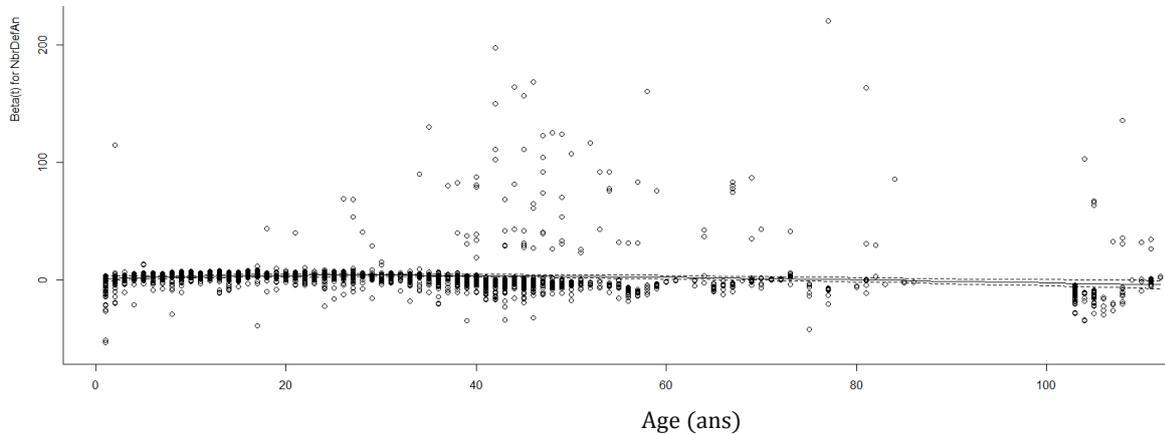


Figure 57 : Visualisation des résidus de Schoenfeld associés à la covariable NDOA en fonction de l'âge des tronçons



Le modèle de Cox précédent utilise la fonction de risque instantanée de la variable aléatoire « âge à la mise hors service » comme le produit d'un risque de base inconnue et d'une autre partie connue. Or pour obtenir une fonction de survie nous avons besoin d'une fonction entièrement connue. C'est ce que permet le modèle de « Weibull avec covariables au tronçon » dont nous allons exposer des résultats à l'aide des données du Grand Lyon dans la partie suivante.

V.4 Résultats modèle de Weibull avec covariables au tronçon

Le modèle de Weibull avec covariables au tronçon n'est qu'un cas particulier du modèle de Cox (cf. Annexe 16).

En utilisant le modèle de Weibull avec covariables au tronçon que nous écrivons de la façon suivante, la fonction de survie pour chaque tronçon i :

$$S_{\theta_i}(t) = e^{-t^{\delta} \times e^{\beta_0} \times e^{z^T \beta}} \quad (\text{Cf. IV.7})$$

(que nous appellerons équation A par la suite) on obtient les résultats suivant :

Avec z le vecteur des covariables suivantes : NDOA, diamètre, Longueur, Matériau(FG), Matériau(FD) et Emplacement(Chaussée).

Variable	Coefficient	Estimation	$\exp(\hat{\beta})$	Initialisation de Nelder & Mead	P-value
Age	$\hat{\delta}$	2.7	Sans objet	2.8	$< 2 \times 10^{-16}$
Sans objet	$\hat{\beta}_0$	-10.8	Sans objet	-4	$< 2 \times 10^{-16}$
NDOA	$\hat{\beta}_1$	3.9	49.3	1	$< 2 \times 10^{-16}$
Diamètre	$\hat{\beta}_2$	-0.0018	0.99	-1	$< 2 \times 10^{-16}$
Longueur	$\hat{\beta}_3$	-0.0049	0.99	1	$< 2 \times 10^{-16}$
Matériau(Autre)	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet
FG	$\hat{\beta}_4$	-0.37	0.69	1	$< 2 \times 10^{-16}$
FD	$\hat{\beta}_5$	-0.35	0.70	-1	$< 2 \times 10^{-16}$
Non chaussée	Référence	0	1	Sans objet	Sans objet
Chaussée	$\hat{\beta}_6$	0.33	1.39	-1	$< 2 \times 10^{-16}$

Toutes les P-value sont inférieures à 5%, nous avons donc un modèle de survie avec des coefficients significatifs.

Nous calculons la survie de chaque tronçons à chaque âge issue de l'équation A. Puis nous effectuons la moyenne à chaque âge (cf. Eq. 41 & Figure 58) afin de comparer nos résultats à la courbe de survie empirique tous tronçons confondus calculée avec la méthode de Kaplan-Meier (Cf. Equation A, Figure 59).

A chaque âge (t) on effectue le calcul suivant :

$$\frac{\sum_{i=1}^n S_{\theta_i}(t)}{n} \quad \text{Eq. 41}$$

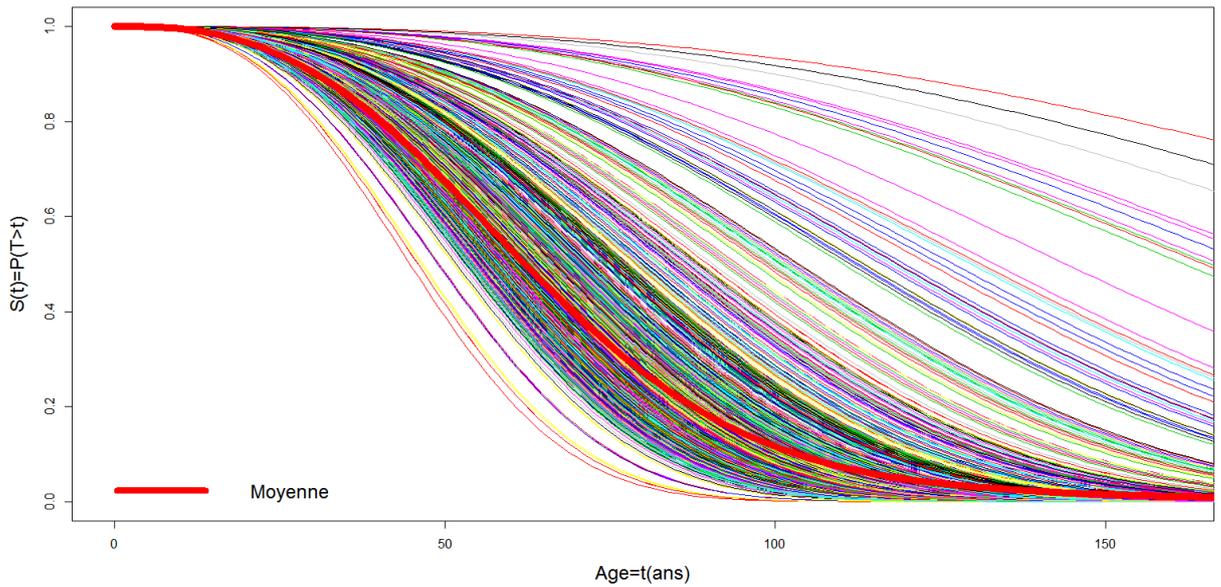


Figure 58 : Equation A pour 4 000 tronçons sélectionnés par tirage aléatoire sans remise et équation A moyenne sur tous les tronçons Grand Lyon TVD

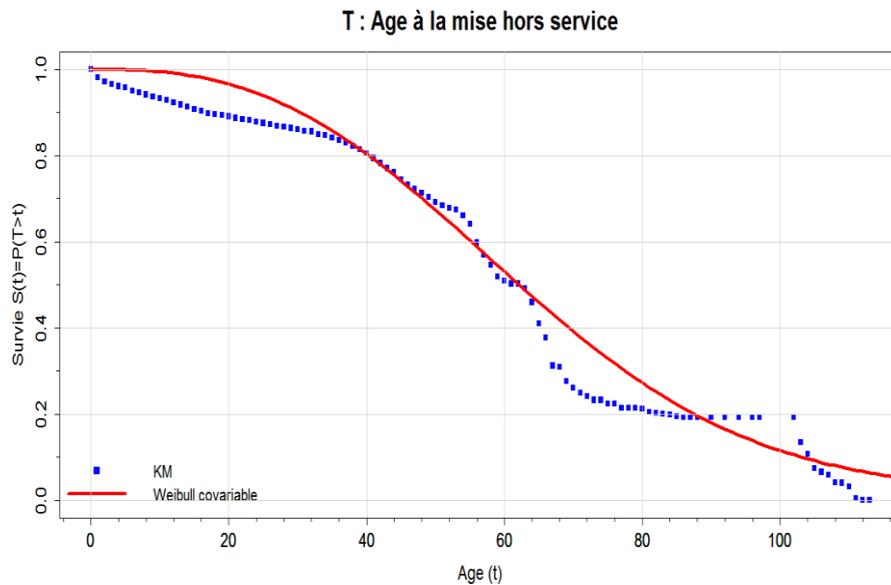


Figure 59 : Courbes de survie de Kaplan-Meier tous tronçons confondus et équation A moyenne sur tous les tronçons Grand Lyon TVD

L'équation A s'ajuste assez bien sur la courbe de Kaplan-Meier, nous obtenons donc un premier résultat très satisfaisant qui explique les mises hors service en fonction de covariables. De plus la survie peut s'écrire sous forme analytique et est donc représentable graphiquement.



A partir des données modifiées selon la méthode n°2, dans cette cinquième partie nous avons estimé les courbes de survie passée du Grand Lyon TVD soit pour l'ensemble des tronçons (cf. méthodes Kaplan-Meier et Weibull) soit pour des strates de tronçons.

Maintenant, nous allons choisir un scénario prospectif, **deuxième** étape de notre nouveau modèle long terme (cf. Figure 24).

Puis de ce scénario prospectif nous en déduisons une à plusieurs courbes de survie, **troisième** étape de notre modèle long terme (cf. Figure 24).

Enfin à partir des fonctions de survie prospectives et des données du Grand Lyon TVD, nous allons calculer 4 indicateurs clés prévisionnels (linéaire à renouveler, taux de renouvellement, âge moyen du réseau et coûts d'investissement), **quatrième** étape du modèle long terme optimeau (cf. Figure 24).

VI Scénario statu quo, calcul d'indicateurs clés au Grand Lyon

Les courbes de survie empirique passée (de l'âge à la mise hors service) sont représentatives :

- non seulement de l'évolution physique passée du patrimoine (augmentation du mauvais état *i.e.* des défaillances).
- mais aussi des décisions passées (coordination avec la voirie ou non, aversion plus ou moins grande aux conséquences des défaillances...). Décisions passées qui ont forcément beaucoup changés au cours du temps. Pour un patrimoine à la durée de vie moyenne supérieure à 50 ans, l'évolution des méthodes de travail, des outils et des personnes a eu un impact sur les décisions passées.

Si le Grand Lyon applique à l'avenir le **scénario « statu quo »** (*i.e.* rien ne change ni dans les objectifs, ni dans les mécanismes impliqués, ni dans les pratiques de gestion), les **courbes de survie prospectives** sont, dans ce cas très particulier, égales aux courbes de survie passée.

Il est alors possible d'utiliser les courbes de survie présentées précédemment pour calculer des indicateurs clés futurs.

VI.1 Avec une seule courbe de survie

VI.1.1 Courbe de survie prospective

La courbe de survie prospective (cf. Figure 60) du **scénario « statu quo : 1 courbe »** est obtenue à partir de la courbe de survie empirique issue de la méthode n°2 du paragraphe V.1.3 et de la méthode d'ajustement de Weibull décrite dans le paragraphe IV.5.1.1. L'évènement d'intérêt de cette fonction de survie est l'âge à la mise hors service.

La fonction de Weibull, $S_w(t)$, ajustée sur cette fonction de survie empirique par la méthode des moindres carrés (Cf. IV.5), pour tous les tronçons (Cf. V.1.3) est la suivante :

$$S_w(t) = e^{-t^\delta \times e^{-\lambda}} = e^{-t^{2.33} \times e^{-12.4}} \quad \text{Eq. 42}$$

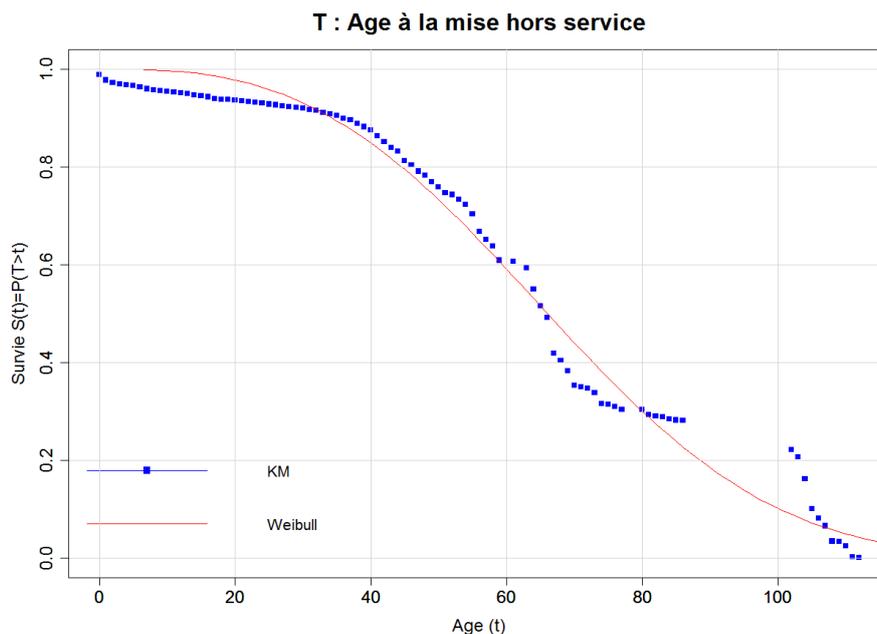


Figure 60 : Courbe de survie prospective (rouge) obtenue à partir de la courbe empirique (issue de KM en bleu à partir de la méthode n°2 « DDP sûres »)

La fonction de survie de Weibull ajusté à celle de Kaplan-Meier par la méthode de Nelder and Mead (avec pour fonction objectif : les moindres carrés) est avec 5% d'erreur significative. (Cf. Imprime écran⁷ ci-dessous).

Label	Estimate	Ref	Chi2	df	Pval
delta	2.8804260e+00	1	3.9589592e+01	1	0.0000000
lambda	1.2436515e+03	600	8.3032713e+01	1	0.0000000

VI.1.2 Linéaires futurs à installer

Pour calculer le premier indicateur IIR nous avons besoin de la courbe de survie prospective du paragraphe précédent mais aussi du linéaire en service en 2012 par date de pose. Au Grand Lyon TVD il y a environ 1% du linéaire en service dont les dates de pose sont inconnues (cf. Figure 7). Nous avons alors ajouté de manière simpliste 1% en longueur à toutes les cohortes en service en 2012 afin de retrouver le linéaire total du Grand Lyon TVD (cf. Figure 61).

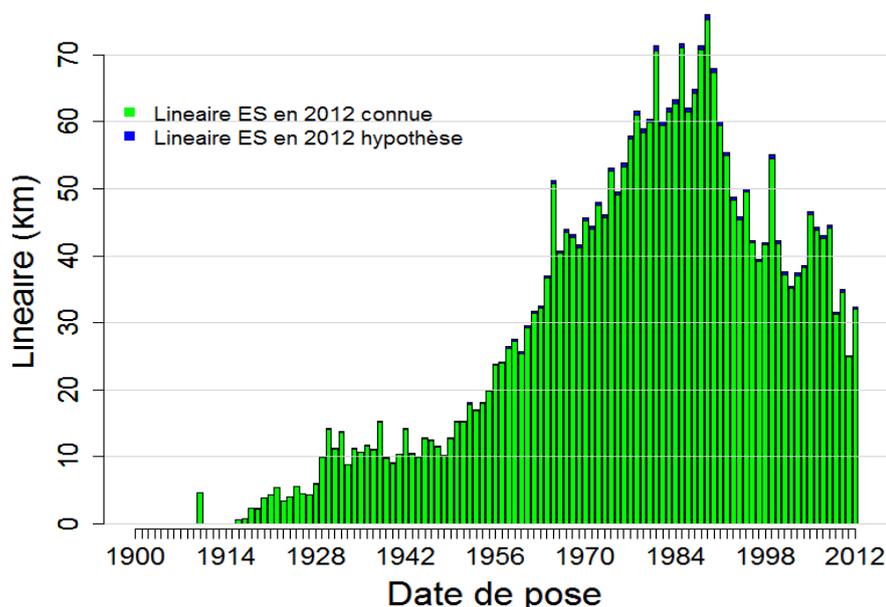


Figure 61 : Linéaire en service au Grand Lyon par date de pose (3 060 km), entrée de notre modèle

Il est possible alors de reconstituer le linéaire passé et de prévoir les besoins (en linéaire) futurs. La démarche suit une procédure itérative pour reconstituer les linéaires posés dans le passé à partir des linéaires observés en 2012. Posons C_θ , l'ensemble des tronçons (cohorte) posés la même année (θ). Au début du processus itératif, l'année de pose (θ) varie de 1910 à 2012 (cf. Figure 61). Pour chaque année N , chaque cohorte est caractérisée par une longueur en service : $LES_{c_\theta}(N)$ et un âge: $t_{c_\theta}(N)$. La survie de la cohorte C_θ , dépend de son âge à l'année N : $S[t_{c_\theta}(N)]$. L'objectif est de prédire la longueur de la nouvelle cohorte en 2013.

⁷ Label (Nom des paramètres), Estimate (valeur du paramètre), Ref (valeur initial pour l'optimisation de Nelder & Mead), Chi2 (valeur du Chi2), df (degré de liberté du test de chi2) et Pval (P-value associée au test du rapport de vraisemblance)

Nous pouvons dans un premier temps calculer la longueur qu'avait à l'origine $L_{inic\theta}(2012)$ à partir de la longueur encore en service en 2012 ($LES_{C\theta}(2012)$) et de la survie attendue pour les tronçons de cet âge à la date d'observation ($S[t_{C\theta}(2012)]$). Cette étape est optionnelle.

$$L_{inic\theta}(2012) = \frac{LES_{C\theta}(2012)}{S[t_{C\theta}(2012)]} \quad Eq. 43$$

On souhaite par la suite prédire la longueur de la nouvelle cohorte en 2013. On calcule alors pour chaque cohorte leurs longueurs en service en 2013 ($Large\ 2013$).

$$LES_{C\theta}(2013) = L_{inic\theta}(2012) \times S[t_{C\theta}(2013)] \quad Eq. 44$$

Nous souhaitons conserver un linéaire en service constant. A partir de cette hypothèse nous calculons la longueur des canalisations à poser en 2013.

$$LES_{C2013}(2013) = \sum_{\theta=1910}^{2012} [LES_{C\theta}(2012) - LES_{C\theta}(2013)] \quad Eq. 45$$

θ varie maintenant de 1910 à 2013. Pour établir des prévisions jusqu'à l'échéance souhaitée, il est nécessaire d'itérer cette méthode année par année (Large et al. 2014).

La Figure 62 présente les résultats si on itère cette méthode jusqu'en 2013, la Figure 63 si on itère cette méthode jusqu'en 2050 et la Figure 64 expose les résultats si on itère cette méthode jusqu'en 2120.

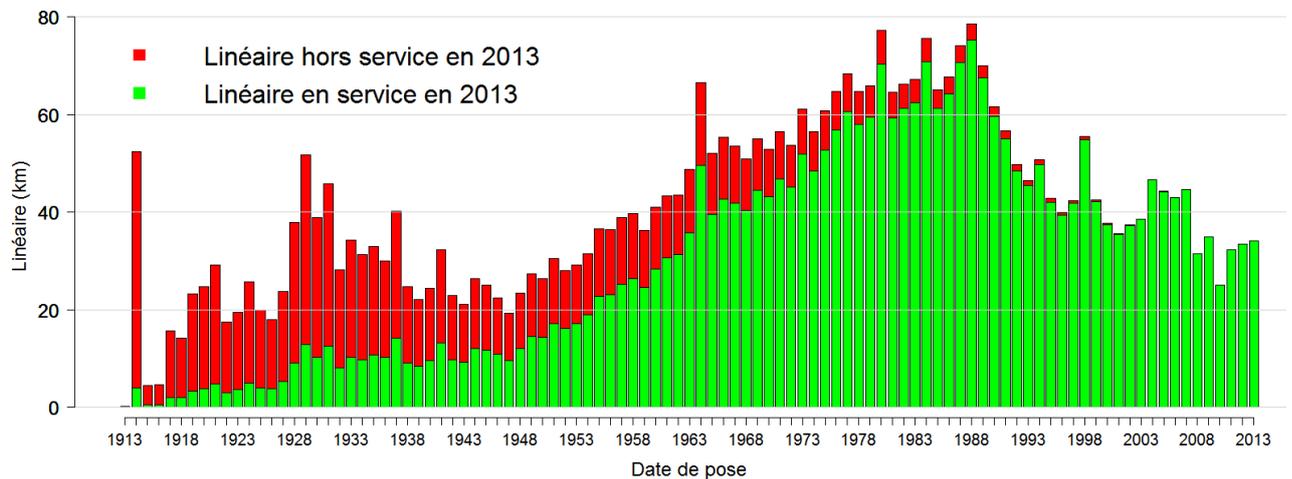


Figure 62 : Reconstitution du linéaire passé et prévision des linéaires futurs jusqu'en 2013, photographie de la situation en 2013, réseaux de transport et de distribution.

Elaboration d'un modèle long terme pour optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable

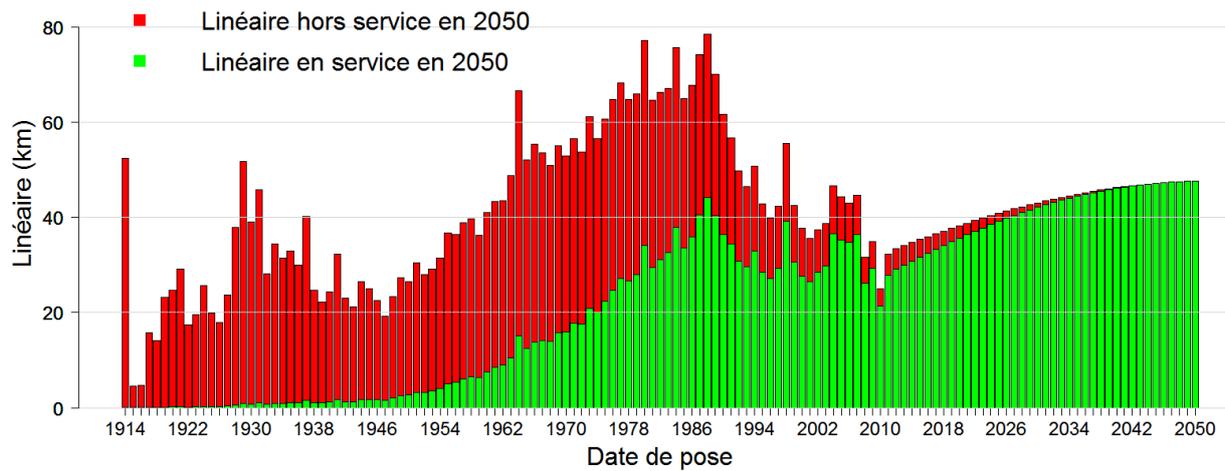


Figure 63 : Reconstitution du linéaire passé et prévision des linéaires futurs jusqu'en 2050, photographie de la situation en 2050, réseaux de transport et de distribution.

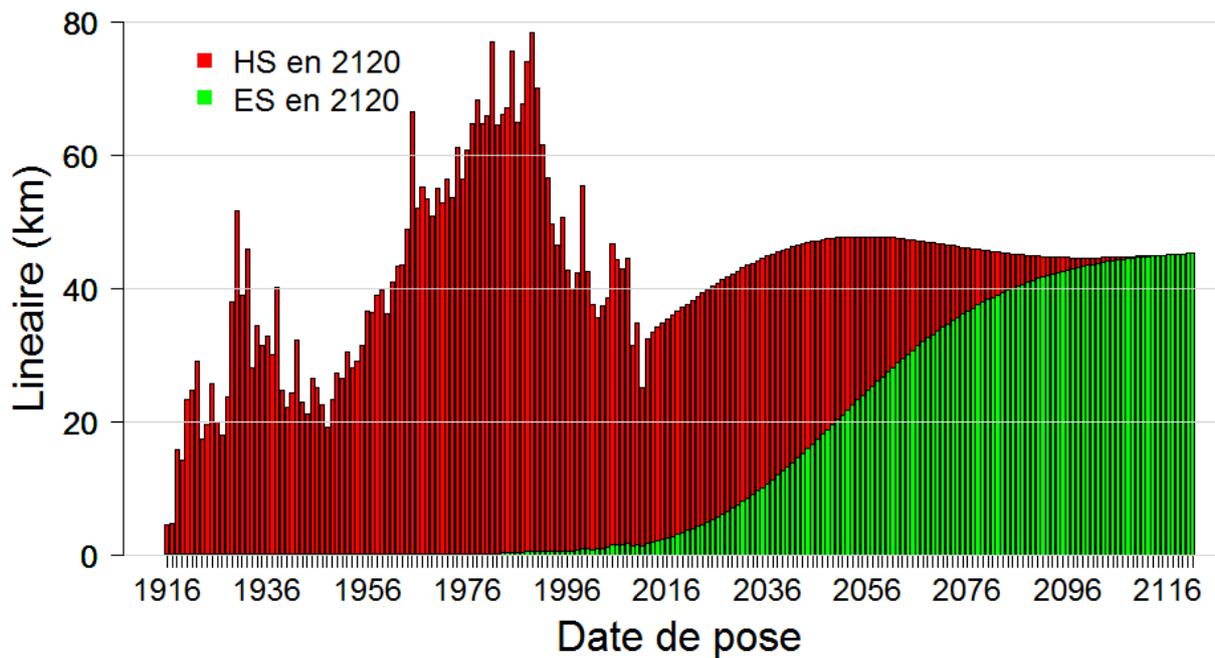


Figure 64 : Reconstitution du linéaire passé et prévision des linéaires futurs jusqu'en 2120, photographie de la situation en 2120, réseaux de transport et de distribution.

VI.1.3 Taux de renouvellement

Le second indicateur, I2R, est le taux de renouvellement annuel futur.

Le taux de renouvellement pour l'année 2013 (TR) est donné par :

$$TR(2013) = \frac{LES_{C2013}(2013)}{\sum_{\theta=1910}^{2012} LES_{C\theta}(2012)} \quad Eq. 46$$

En réalisant ce calcul chaque année nous obtenons I2R.

Avec le scénario « statu quo : 1 courbe » le taux de renouvellement annuel futur du Grand Lyon reste dans une fourchette relativement étroite et stable, entre 1.2% et 1.6% (cf. Figure 65). Les résultats sont supérieurs aux taux de renouvellement appliqués par le Grand Lyon dans le passé proche, qui étaient en moyenne entre 2008 et 2012 de 0.68% (cf. paragraphe III.1).

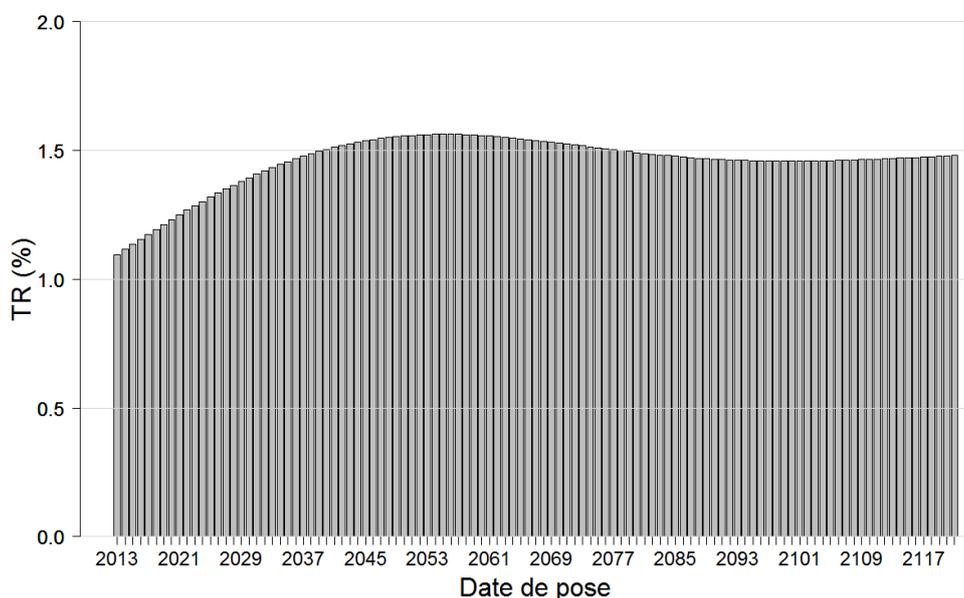


Figure 65 : Prédiction des taux de renouvellement futurs de 2013 jusqu'en 2120 au Grand Lyon TVD

Ces résultats sont intéressants mais il faudrait les comparer aux résultats d'un autre scénario prospectif pour juger de leur pertinence. En effet avec cette courbe de survie le taux de renouvellement semble être globalement trop élevé par rapport aux pratiques passées (taux de renouvellement moyen de 0.6% par an).

VI.1.4 Age moyen du réseau

Le troisième indicateur, I3R, est l'âge moyen du réseau futur. L'âge moyen du réseau pour l'année 2013 (AGE) est donnée par :

$$AGE(2013) = \frac{\sum_{\theta=1910}^{2013} (LES_{C\theta}(2013) \times t_{C\theta}(2013))}{\sum_{\theta=1910}^{2013} LES_{C\theta}(2013)} \quad Eq. 47$$

Avec le scénario « statu quo : 1 courbe » les âges moyens chaque année future au Grand Lyon sont compris entre environ 32 et 38 ans (cf. Figure 66). Le réseau dans son ensemble vieillit jusqu'à l'année 2044 puis rajeunit jusqu'à l'année 2090, puis finalement re-vieillit jusqu'en 2120.

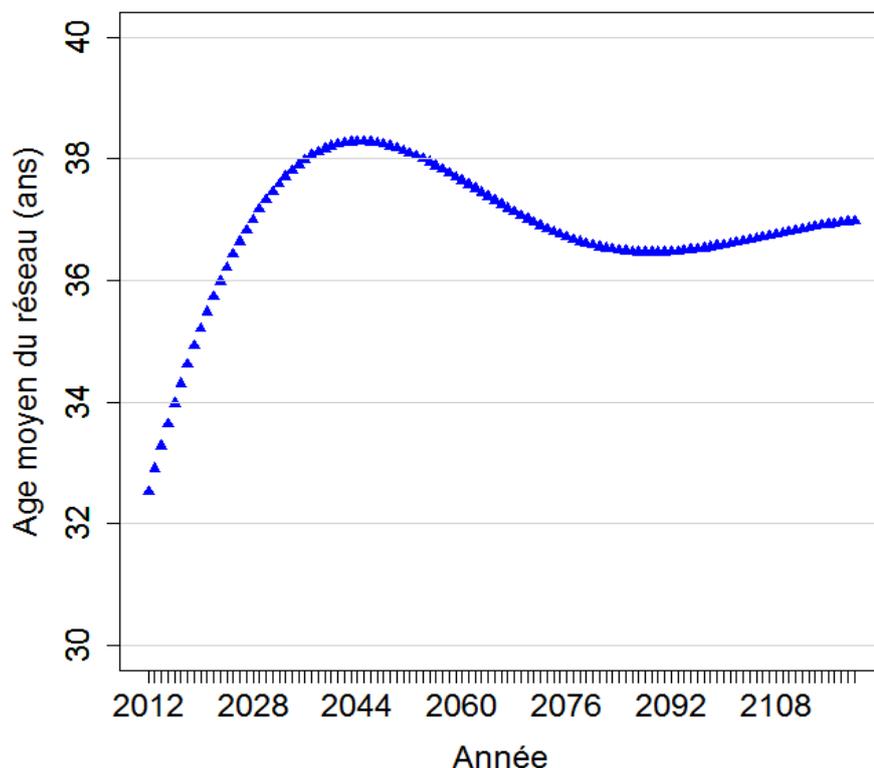


Figure 66 : Prévision de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2013 jusqu'en 2120 au Grand Lyon TVD

VI.1.5 Coûts d'investissement

Le quatrième indicateur, IIF, est le coût d'investissement annuel futur. Ce coût peut être actualisé ou non actualisé.

L'actualisation est une méthode économique permettant en théorie de rendre commensurable les sommes perçues et dépensées à des époques différentes, tout en intégrant une estimation quantifiée des risques de toutes natures (économiques, financiers, industriels, technologiques, sociaux...) susceptibles de peser sur la « rentabilité » des investissements publics.

VI.1.5.1 Coûts d'investissement non actualisée

La médiane des diamètres des tronçons est à 150 mm et le matériau dominant est la fonte ductile. Afin de calculer des coûts d'investissement futur, nous allons considérer comme hypothèses simplificatrices que : le coût de renouvellement d'un mètre de tronçon quels que soient son diamètre, son matériau et ses conditions de pose est de 530€ (500€ comprenant la maîtrise d'œuvre et les études connexes pour un diamètre de 150 mm en fonte + 6% [prise en compte de la diversité des diamètres au Grand Lyon]) (Pillot 2011).

Soit $L_{inic\theta}(\theta)$ en mètre et θ l'année de pose, le coût d'investissement (Coût) l'année θ en euros peut s'écrire :

$$\text{Coût}(\theta) = L_{inic\theta}(\theta) \times 530 \quad \text{Eq. 48}$$

La Figure 67 présente les coûts d'investissement prévisionnels du Grand Lyon si $L_{inic\theta}(\theta)$ sont ceux de la Figure 61 issue du scénario « statu quo : 1 courbe ».

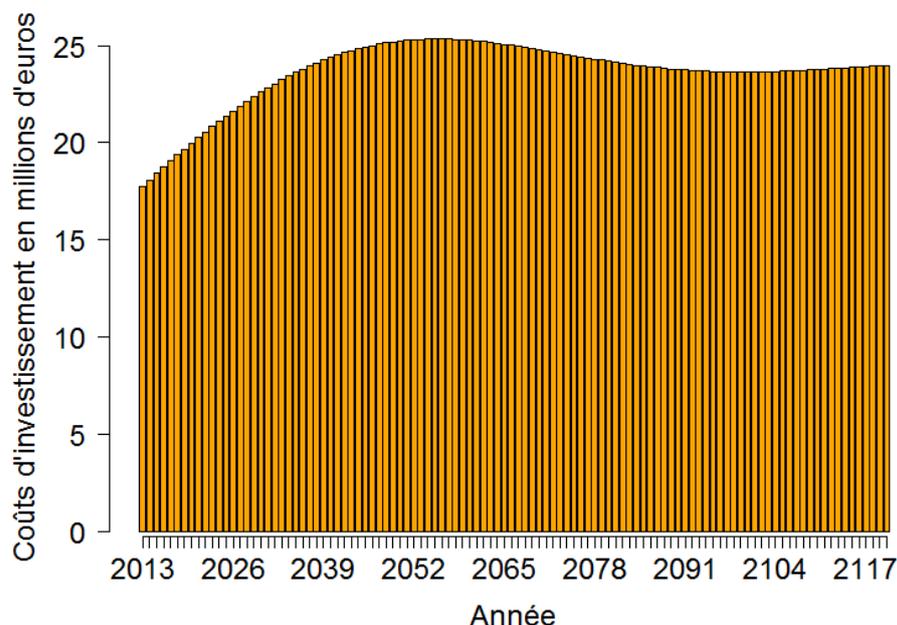


Figure 67 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2013 et 2120 sans actualisation réseaux de transport et de distribution

VI.1.5.2 Coûts d'investissement actualisée

Suite à l'analyse de (Hardelin & Marical 2011) sur les valeurs du taux d'actualisation (r), nous avons choisi d'effectuer trois simulations budgétaires :

- une avec un taux d'actualisation nul, et une évolution annuelle de l'indice TP10a nul
- 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)].
- une dernière avec un taux d'actualisation à 4%, et une évolution annuelle de l'indice TP10a de 3.7%.

La formule d'actualisation des coûts est donnée par :

$$Coût_{actualise}(2013 + k) = \frac{Coût(2013 + k) \times (1 + e)^k}{(1 + r)^k} \quad Eq. 49$$

Avec :

- k : année(s) supplémentaire(s) vers lesquelles nous souhaitons faire tendre la prévision, dans notre exemple k varie de 0 à 107 ans
- r : le taux d'actualisation
- e : évolution annuelle de l'indice TP10a, il représente l'indice des prix sur les canalisations, égouts, assainissement et adduction d'eau avec fournitures de tuyaux.

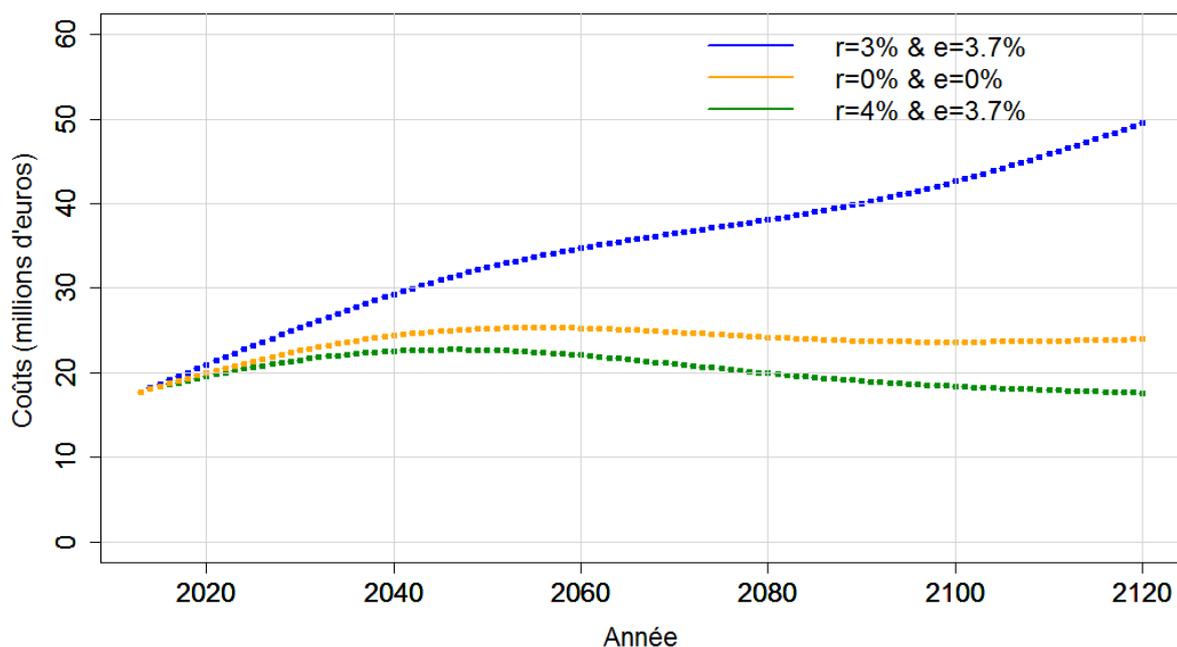


Figure 68 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2013 et 2120 avec 3 taux d'actualisation différents et deux évolutions de l'indice TP10a différents, réseaux d'exhaure, de transport et de distribution du Grand Lyon TVD

Concernant les conséquences budgétaires, introduire un taux d'actualisation même faible (et/ou une évolution de l'indice des prix) a un très fort impact financier sur du « long terme ». Par conséquent, le scénario avec le taux d'actualisation nul et l'évolution de l'indice TP10a nul, nous semble ici le plus adapté. Ce scénario indique un pic budgétaire en 2056 à 25.3 millions d'euros en investissement pour renouveler les canalisations du réseau principal (hors branchement) (cf. Figure 68, courbe orange).

VI.2 Avec plusieurs courbes de survie (partitionnement)

VI.2.1 Courbes de survie prospectives avec partition par diamètre

Les courbes de survie prospectives (cf. Figure 69) du scénario « **statu quo : plusieurs courbes** » sont obtenues à partir :

- des courbes de survie empirique, obtenues en partitionnant le réseau en 2 strates selon le diamètre des tronçons:
 - [min, 300 mm [: 16.5 % du linéaire en service en 2012
 -] 300 mm, max] : 83.5 % du linéaire en service en 2012
- et de la méthode d'ajustement de Weibull décrite dans le paragraphe IV.5.1.1 .

Nous avons décidé ici de partitionner notre échantillon initial selon le diamètre (Cf. Figure 69) car le prix des canalisations est très variable selon le diamètre de celles-ci. L'indicateur des coûts d'investissement prévisionnel sera alors plus précis.

T : Age à la mise hors service

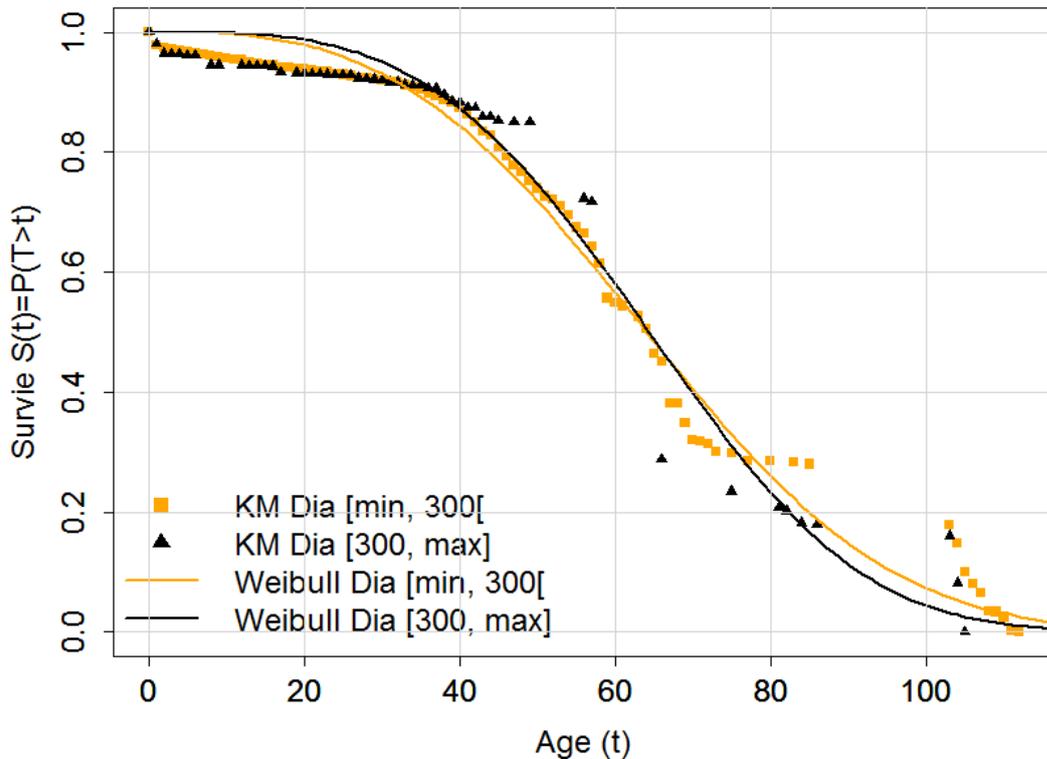


Figure 69 : Courbes de survie prospectives en linéaire (cf. trait fin) obtenue à partir des courbes empirique de Kaplan-Meier et ajusté (équation de Weibull), tous tronçons confondus, partitionnés en 2 strates (petits et gros diamètre)

Les deux fonctions de survie prospectives de Weibull utilisées sont les suivantes et elles sont significatives à 5% près (cf. imprime écran ci-dessous):

$$S_{\emptyset \geq 300}(t) = e^{-t^{\delta} \times e^{-\lambda}} = e^{-t^{3.4} \times e^{-14.6}} \quad \text{Eq. 50}$$

Label	Estimate	Ref	Chi2	df	Pval
delta	3.4248591e+00	1	1.3192923e+01	1	0.0002810
lambda	1.4630674e+03	600	6.5016266e+01	1	0.0000000

$$S_{300 > \emptyset}(t) = e^{-t^3 \times e^{-12.8}} \quad \text{Eq. 51}$$

Label	Estimate	Ref	Chi2	df	Pval
delta	2.9850025e+00	1	3.4671118e+01	1	0.0000000
lambda	1.2782104e+03	600	8.1966461e+01	1	0.0000000

Les « P-values » (Pval) indiquent qu'elles sont bien ajustées aux courbes de survie empiriques.

VI.2.2 Linéaires futurs à installer

Pour calculer le premier indicateur IIR nous avons besoin des courbes de survie prospective de la Figure 69 mais aussi du linéaire en service en 2012 par date de pose.

Dans le scénario « statu quo : plusieurs courbes », chaque cohorte est scindée en deux selon leur diamètre :

- diamètre [min, 300[
- diamètre [300, max].

Au Grand Lyon TVD il y a environ 1% du linéaire du réseau dont les dates de pose sont inconnues (cf. Figure 7). Nous avons alors ajouté de manière simpliste 1% en longueur à toutes les cohortes (stratifiées en deux) en service en 2012 afin de retrouver le linéaire total du Grand Lyon TVD (cf. Figure 70).

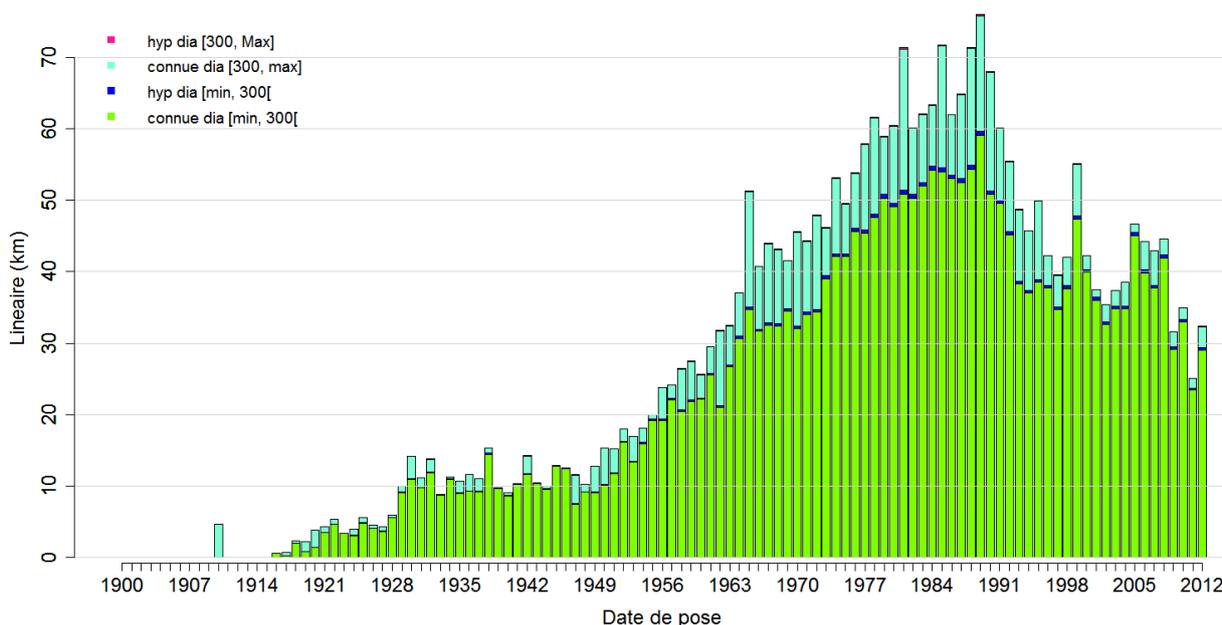


Figure 70 : Linéaire en service en 2012 au Grand Lyon TVD en fonction des dates de pose, différencié selon deux classes de diamètre. Vert : DDP connues pour Dia [min, 300[, bleu : 1% du linéaire des DDP connues pour Dia [min, 300[, Cyan : DDP connues pour Dia [300, Max], Rose : 1% du linéaire des DDP connues pour Dia [300, Max].

Ainsi, le linéaire en service de la cohorte 2013 l'année N est alors la somme des linéaires en service de chacune des partitions de cette cohorte soit :

$$LES_{C2013}(N) = LES_{\substack{C2013 \\ \emptyset \geq 300}}(N) + LES_{\substack{C2013 \\ 300 > \emptyset}}(N) \quad \text{Eq. 52}$$

En utilisant la même méthode que celle décrite dans le paragraphe VI.1.2 nous obtenons la Figure 71. Elle illustre la prévision des linéaire à poser jusqu'en 2120.

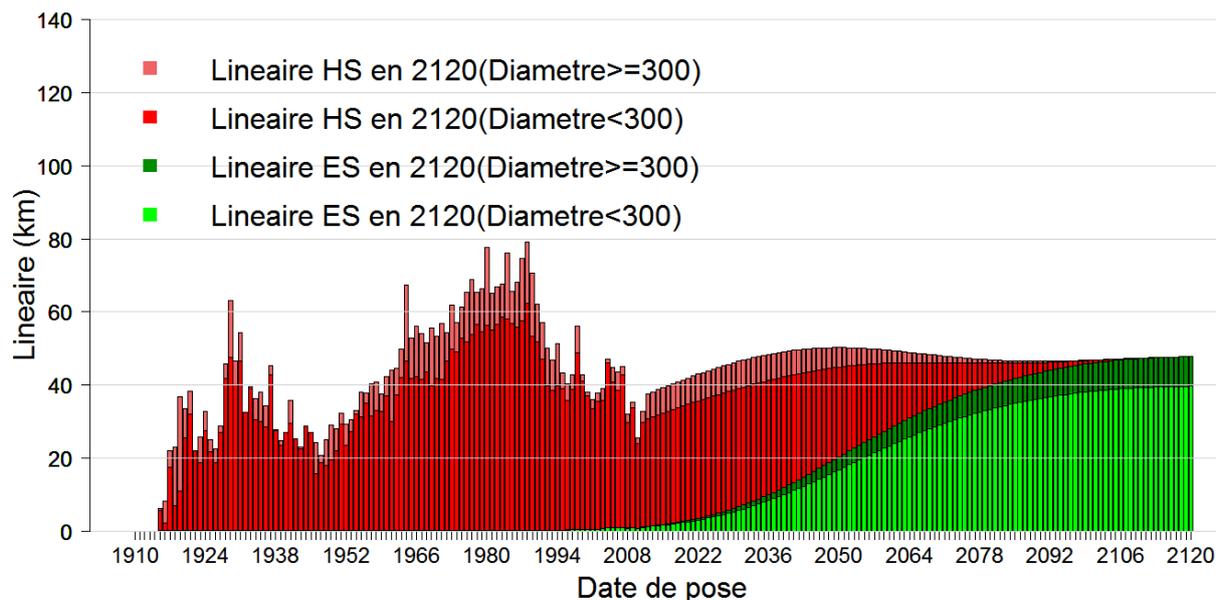


Figure 71 : Reconstitution du linéaire passé et prévision des besoins (en linéaire) futurs jusqu'en 2120, photographie de la situation en 2120, partitionnement par le diamètre.

Les courbes de survie stratifiées ici par diamètre étant très proches, pour cet indicateur la stratification n'a pas un grand intérêt.

VI.2.3 Taux de renouvellement

En utilisant le scénario « statu quo, plusieurs courbes » et la méthode décrite dans le paragraphe VI.1.3 pour calculer les taux de renouvellement (I2R) nous obtenons les résultats de la Figure 72.

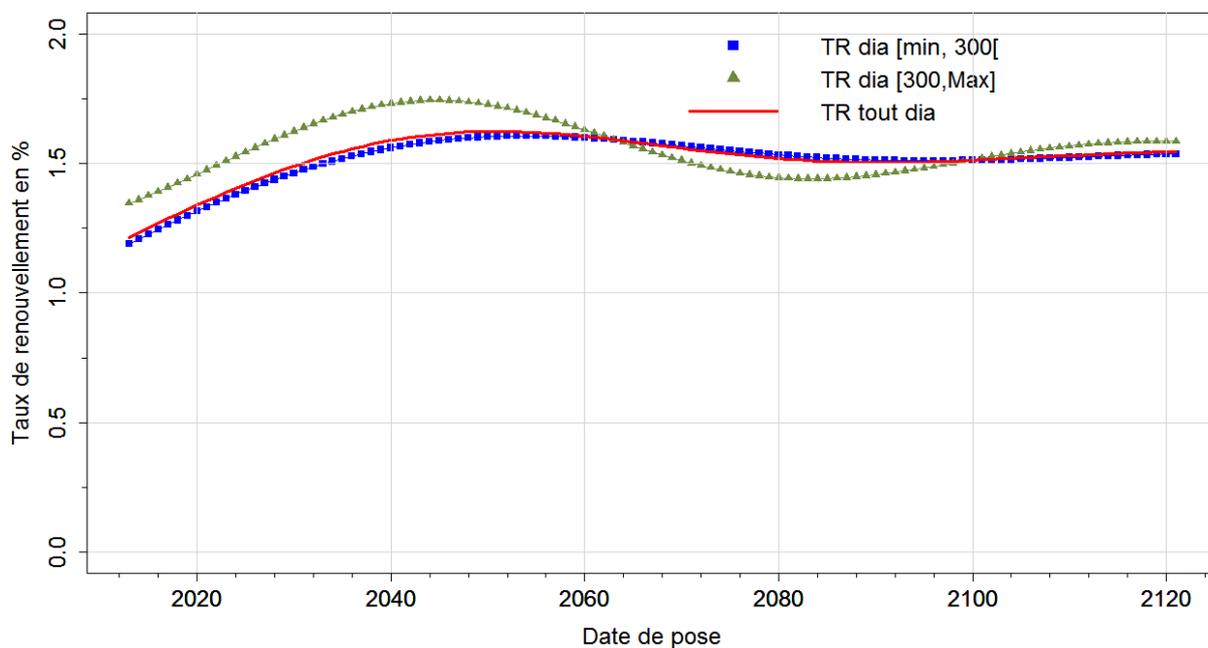


Figure 72 : Prévision des taux de renouvellement futurs de 2013 jusqu'en 2120 pour les tronçons de « gros diamètres », de « petits diamètres » et « tous diamètres », au Grand Lyon TVD avec le scénario « statu quo : plusieurs courbes »

Les taux de renouvellement des « gros diamètre » sont en général supérieurs au taux de renouvellement des « petit diamètre »

Ce scénario « statu quo, plusieurs courbes » semble peu réaliste. En effet les taux de renouvellement semblent trop élevés par rapport aux taux de renouvellement passé (0.6% par an). Il faudrait donc tester un autre scénario plus réaliste.

VI.2.4 Age moyen du réseau

En utilisant le scénario « statu quo, plusieurs courbes » et la méthode décrite dans le paragraphe VI.1.4 pour calculer l'évolution de l'âge moyen du réseau (I3) nous obtenons les résultats de la Figure 73.

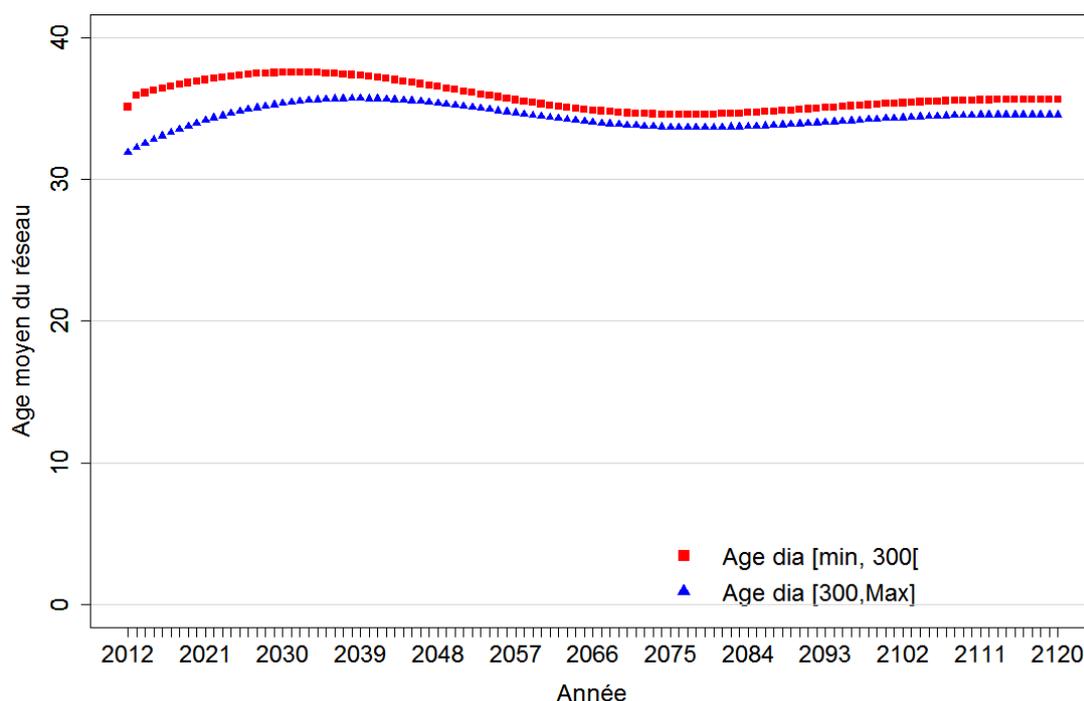


Figure 73 : Prévisions de l'évolution de l'âge moyen du réseau de 2013 jusqu'en 2120 au Grand Lyon TVD, scénario « statu quo, plusieurs courbes », tronçons partitionnés par diamètre.

L'âge moyen du réseau à long terme pour les tronçons de petits diamètres est plus grand que pour les tronçons de gros diamètres, bien que cette différence soit minime.

VI.2.5 Coûts d'investissement non actualisé

Pour les simulations budgétaires, nous prenons comme valeur pour le renouvellement d'un mètre de canalisation, les valeurs du Tableau 10, issue de (Pillot 2011).

Diamètre	$\varnothing < 300$ mm	300 mm $\geq \varnothing$
Prix moyen pour le renouvellement d'un mètre de canalisation	594 €	840 €

Tableau 10 : Prix moyen pour le renouvellement d'un mètre de tronçon par classe de diamètres

Pour cette simulation budgétaire nous avons fait le choix de ne pas actualiser les coûts.

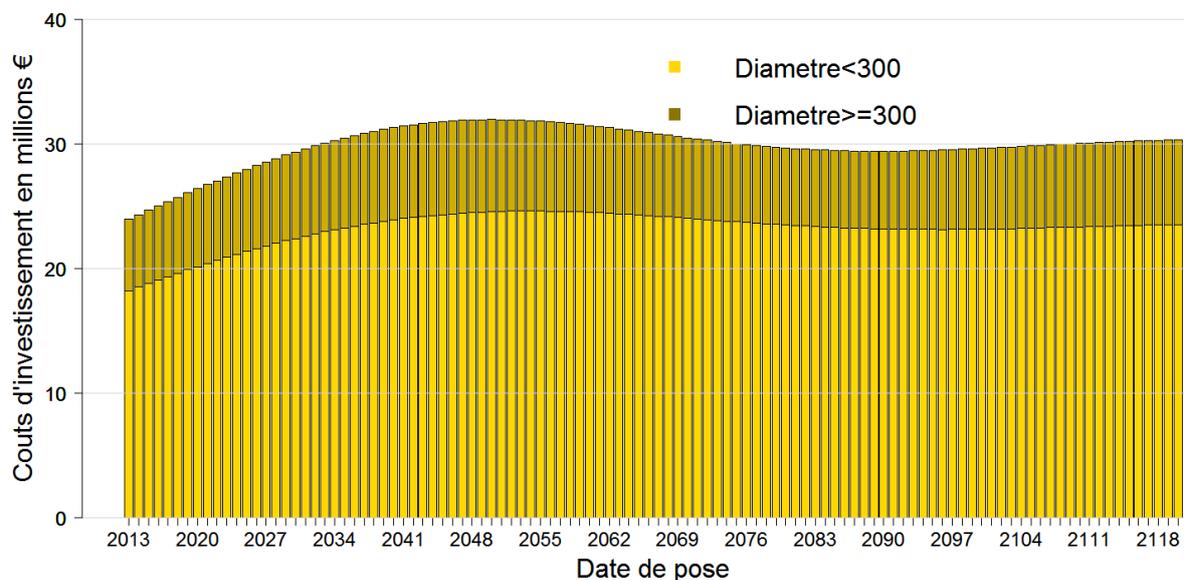


Figure 74 : Prévisions des budgets nécessaires pour le renouvellement entre 2013 et 2120, scénario « statu quo, plusieurs courbes », tronçons partitionnés par diamètre.

Globalement, le coût d'investissement à long terme pour les tronçons de petits diamètres est plus important que pour les tronçons de gros diamètres, même si les coûts unitaires des gros diamètres sont plus élevés.



Dans cette sixième partie nous venons de calculer, à partir de deux scénarios prospectifs, 4 indicateurs clés très utile dans un modèle long terme (le linéaire à renouveler, le taux de renouvellement, l'âge moyen du réseau et les coûts d'investissement à venir). Cette ébauche de modèle long terme semble bien plus précise que ceux présentés au chapitre trois, qui utilisent des courbes de survie en escalier complètement déconnectés des pratiques « court terme » réelle au Grand Lyon.

Néanmoins ces scénarios trop « simplistes » aboutissent à des coûts d'investissement qui semblent excessifs. De plus il aurait été intéressant de calculer l'impact de ces scénarios sur l'évolution probable future des nombres de défaillances.

Conclusion

Le travail réalisé s'est fixé pour **objectif** de créer un modèle afin d'avoir une vision long terme pour optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable du Grand Lyon.

Dans un premier temps nous avons effectué un **portrait du Grand Lyon** ainsi qu'une description détaillée du jeu de données brutes fournies. Dans cette partie il a été identifié une fenêtre d'observation des dates à la mise hors service de 11 ans de 2002 à 2012.

Ensuite nous avons **présenté** d'une manière globale le **modèle « long terme »** que l'on souhaite développer. Il en ressort 6 grandes étapes clés.

Puis, un bref état de l'art des **méthodes** de renouvellement « court terme » et « long terme » **employées** au Grand Lyon a montré que les méthodes « court terme » sont pertinentes. En effet elles prennent notamment en compte la probabilité de défaillance future, les risques de dommages, et les contraintes/opportunités extérieures au service (coordination, etc.). En revanche celles de « long terme » sont grossières, notamment car elles ne prennent pas en compte les dates de pose passées et les pratiques de gestion « court terme ».

Nous avons ensuite présenté des **méthodes** pour estimer les **courbes de survie passés** du Grand Lyon TVD.

Ceci nous a conduits à construire avec les données du Grand Lyon plusieurs **courbes de survie passés**, avec (ou pas) différentes stratifications ou en utilisant différentes covariables. Nous avons pu notamment calculer des courbes de survie propres au Grand Lyon en fonction du diamètre, de la longueur, du nombre de défaillances et du matériau des tronçons.

Pour finir nous avons choisi **deux scénarios prospectifs** pour le Grand Lyon TVD: « statu quo : 1 courbe » et « statu quo : plusieurs courbes ». De ces scénarios nous en avons déduit **des courbes de survie prospectives**, que nous avons ensuite utilisées pour calculer **4 indicateurs clés** (le linéaire à renouveler, les taux de renouvellement, l'âge moyen du réseau ou encore des coûts d'investissement). Il ressort du scénario « statu quo : 1 courbe » des taux de renouvellement compris entre 1.2 et 1.6% et des coûts d'investissement s'élevant d'environ 17.5 à 25 millions sur l'intervalle de temps de 2013 à 2120. Néanmoins vu le niveau d'incertitude sur les dates de pose, ces résultats ne sont pas fiables. Le scénario « statu quo » ne représente pas du tout les pratiques passées du Grand Lyon.

Il en ressort d'une part que ces scénarios sont encore trop « simplistes » et ils aboutissent à des coûts excessifs. D'autre part pour ces scénarios et tous les autres à venir, il serait très utile d'en déduire les 4 autres indicateurs prévus dans le modèle long terme « optimeau » à savoir notamment l'évolution du nombre de défaillances au cours du temps. Pour information actuellement le code informatique pour calculer cet indicateur est quasiment prêt. Donc ça ne serait tarder ... patience... En effet, simuler les effets d'un scénario sur l'évolution future d'autres indicateurs de performance, permettrait aux gestionnaires de juger si ce scénario est cohérent avec ses objectifs.

Il est à mettre en avant que cette démarche est très reproductible, nous pouvons l'appliquer sans problème sur des réseaux plus modeste. Dans le cadre du projet « optimeau » cette méthode a été appliquée sur les réseaux d'eauservice Lausanne en suisse (900 km) et du SEDIF (8 300km).

Un autre axe de recherche crucial sera de nous écarter de ce scénario « **statu quo** » en recherchant des stratégies optimales. Ce travail devra se faire en deux étapes. Dans un premier temps, à partir d'une analyse fine des processus opérationnels de décision « court terme », nous étudierons comment les diverses causes de mise hors service des tronçons contribuent à la construction des courbes de survie observées. Les courbes de survie brutes seront donc doublement corrigées, d'abord pour tenir compte des censures et troncatures, ensuite pour en extraire les effets des décisions prises lors de la programmation des travaux. Nous pourrons alors, dans un second temps reconstruire de nouvelles courbes de survie opérationnelles, qui intégreront de manière explicite les éléments essentiels qui président au processus de décision (par exemple le pourcentage des travaux pilotés par le

mauvais état vs le pourcentage piloté par le renouvellement de la voirie). Nous pourrions alors estimer comment des stratégies différentes (par exemple profiter plus largement des opportunités de travaux) modifient les performances de « long terme ».

Bibliographie

- Aalen, O., Borgan, O. & Gjessing, H., 2008. *Survival and Event History Analysis*,
- Ajuste, C., Berland, J.-M. & Celerier, J.-L., 2004. *Réhabilitation/remplacement des réseaux d'eau potable en zone rurale*,
- Alioum, A. & Leffondre, K., 2014. *Analyse des données de survie*,
- 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*. Ecole doctorale de Mathématiques et Informatique, Université de Bordeaux II.
- Benoit, C., 2011. Gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable : influence des facteurs météorologiques sur les défaillances des conduites. Projet d'Initiation à la Recherche & Développement Sous la direction de Pascal LE GAUFFRE. , p.40.
- Berland, J.-M., Faby, J.-A. & Juery, C., 2005. *La gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable : enjeux et recommandations.*,
- Van Den Blik, K., 2012. Seasonal effects of weather on water main failures: Case of the Greater Lyon water network, Initiation Project to Research and Development, Under the direction of Pascal LE GAUFFRE and Jean-Baptiste AUBIN. , p.71.
- Bouchet, C., 2013. Réseaux d'eau potable : optimiser la gestion et améliorer les rendements. *L'eau, l'industrie, les nuisances*, 360, pp.29–43.
- Breysse, D., 2009. *Maîtrise des risques en génie civil I, multiples dimensions des risques en génie civil*. J. Mazars, ed., Lavoisier.
- Cador, J.M., 2002a. *Le patrimoine en canalisations d'AEP en France. Bilan des huit enquêtes départementales et estimation nationale.*,
- Cador, J.M., 2002b. *Le renouvellement du patrimoine en canalisations d'eau potable en France.*,
- Charrière, S., 2013. *Gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable. Elaboration du descriptif détaillé des ouvrages de transport et de distribution d'eau ..*
- Claude, U. & Lyon, B., 1997. Generalisation de l'estimateur Kaplan-Meier d'une loi de durée de maintien en présence d'observations tronquées à gauche. , 1, pp.97–114.
- Claudio, K., 2011. *Prise en compte de facteurs dépendants du temps dans les modèles de vieillissement des canalisations*. Université Bordeaux 2.
- Cox, D.R., 1972. Regression Models and Life-Tables. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 34(2), pp.187–220.
- Croiset, N., 2009. Programmation du renouvellement des canalisations de diamètre supérieur à 400 mm au Grand Lyon. , p.93.

- D. Schoenfeld, 1982. Partial Residuals for The Proportionnal Hazards Regression Model. , pp.239–241.
- France_Libertés, 2014. Les fuites d'eau (vous) coûtent 20% de votre facture. *La tribune*, (78703), p.2.
- 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.* Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech).
- Le Gat, Y., Kropp, I. & Poulton, M., 2013. Is the service life of water distribution pipelines linked to their failure rate? *Water Science & Technology: Water Supply*, 13.2, pp.386–393.
- Le Gauffre, P., Laffréchine, K. & Rolf, B., 2002. *D6, CARE-W : WP3 Decision Support for Annual Rehabilitation Programmes, Report 3.1 Criteria for the prioritisation of rehabilitation projects.*,
- Gd Lyon, 2014a. Balmes et collines. Available at: <http://www.lyon.fr/page/projets-urbains/balmes-et-collines.html>.
- Gd Lyon, 2014b. Compte rendu des entretiens menés au Grand Lyon avec M. Fangeat et M. Poinard le 14 juillet 2014. , p.2.
- Gd Lyon, 2013a. Compte-rendu des entretiens menés au Gd 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. , p.25.
- Gd Lyon, 2011a. Description du modèle de données eau potable du Grand Lyon, version 1.5. , p.114.
- Gd Lyon, 2013b. Présentation powerpoint de la gestion patrimoniale du Grand Lyon par Didier Fangeat au comité de suivi n°1 du projet Optimeau à Cestas le 14 Juin 2013, 21 dia.
- Gd Lyon, 2008. Rapport annuel 2008 sur le prix et la qualité des services publics de l'eau potable et de l'assainissement du Grand Lyon. , p.108.
- Gd Lyon, 2009. Rapport annuel 2009 sur le prix et la qualité des services publics de l'eau potable et de l'assainissement du Grand Lyon. , p.132.
- Gd Lyon, 2010. Rapport annuel 2010 sur le prix et la qualité des services publics de l'eau potable et de l'assainissement du Grand Lyon. , p.148.
- Gd Lyon, 2011b. Rapport annuel 2011 sur le prix et la qualité des services publics de l'eau potable et de l'assainissement. , p.148.
- Gd Lyon, 2012. Rapport annuel 2012 sur le prix et la qualité des services publics de l'eau potable et de l'assainissement du Grand Lyon. , p.146.
- Gd Lyon, 2013c. Rapport d'activité 2013 du Grand Lyon. , p.78.
- Hardelin, J. & Marical, F., 2011. Taux d'actualisation et politiques environnementales : un point sur le débat. Commissariat général au développement durable (CGDD). , p.18.
- Herz, R., 1996. Ageing processes and rehabilitation needs of drinking water distribution networks. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, pp.221–231.

- Kaplan, E.L. & Meier, P., 1958. Nonparametric Estimation from Incomplete Observations. , pp.457–481.
- Klein, J. & Moeschberger, M., 2003. *Survival Analysis, Techniques for Censored and Truncated Data, Second Edition*,
- Large, A. et al., 2014. 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*.
- Large, A., 2013. *Optimisation du renouvellement des canalisations. Rapport de première année de thèse : revue bibliographique et cadre méthodologique.*,
- Lebègue, D., 2005. Révision du taux d'actualisation des investissements publics. Rapport du groupe d'experts présidé par Daniel Lebègue. Commissariat général au Plan. , p.112.
- Luersen, M.A. & Le Riche, R., 2001. Globalisation de l' Algorithme de Nelder-Mead : Application aux Composites Globalisation de l' Algorithme de Nelder-Mead : Application aux Composites. , p.44.
- Lyon, 2014. Secteurs de Lyon exposés aux mouvement de terrains. Available at: <http://www.lyon.fr/page/projets-urbains/balmes-et-collines/les-secteurs-exposes.html>.
- Malandain, J., 1999. *Modelisation 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*. Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon.
- Ministère_de_L'écologie, 2010. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Available at: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Structure-des-index-TP.html>.
- Mongereau, N. & Vinet, L., 2004. *Balmes, note géotechnique*,
- Naldeo, 2013. Patrimoine expert, Outil de simulation du vieillissement du patrimoine canalisations AEP, Manuel de l'utilisateur, Version 3.4. , p.25.
- Nelder, J.A. & Mead, R., 1965. The downhill simplex method. *Computer Journal*, 7, pp.308–3013.
- Saint Pierre, P., 2013. Introduction à l'analyse des durées de survie. , p.47.
- Pillot, J., 2011. Élaboration d' une stratégie de gestion du patrimoine de l' Eau Potable du Grand Lyon. , p.55.
- Poinard, D., 2006. *Modèles pour la conception de stratégies et de programmes de réhabilitation des réseaux urbains d'eau potable*. Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon.
- 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*,
- Senet, S., 2014. L'eau de Lyon passe aux mains de Veolia pour 8 ans. *Journal de l'environnement*, p.2.

Tribot Laspière, V., 2013. Glissement de terrain à Lyon, 80 personnes évacuées du conservatoire. *France musique*, p.2. Available at: <http://www.francemusique.fr/actu-musicale/glisement-de-terrain-lyon-80-personnes-evacuees-du-conservatoire-13108>.

Trivisonno, F., 2012. Seasonal effects of weather on water main failures: case of the Greater Lyon water network, Initiation Project to Research and Development, Under the direction of Pascal Le Gauffre, With the collaboration of David Poinard, Jean-Baptiste Aubin and Samuela Le. , p.25.

Turnbull, B.W., 1976. The empirical distribution function with arbitrarily grouped, censored and truncated data. *Journal of the Royal Statistical Society*, 3, pp.290–295.

Véolia, 2011. Données accessibles pour FeedEau, tronçons de gros Diamètres. , p.3.

Annexe 1: Conseils d'un point de vue statistique pour la gestion des données

Parmi les 3 terrains d'étude étudiés, le Grand Lyon est celui qui est le plus riche en informations environnementales. C'est une très bonne chose :

- pour mieux comprendre les causes des défaillances des tronçons (cf. CARE-W-Poisson)
- pour calculer des indicateurs de niveaux de risque (cf. CARE-W-ARP et Feedeau)
- et pour mieux comprendre les causes des mises hors service des tronçons (cf. le modèle long terme que nous sommes en train de construire).

Actuellement les informations environnementales sont soit dans le fichier « tronçon » (cf. « chaussée/trottoir », « charge », « nom du réseau d'appartenance », etc.), soit dans d'autres fichiers SIG (« Balmes/non Balmes », « Branchement », « Niveau de trafic routier », etc.).

Conseil n°1 d'un point de vue statistique

Nous conseillons au Grand Lyon, d'un point de vue statistique de modifier sa définition du mot « tronçon ». La nouvelle définition pourrait être : « Un tronçon est un morceau de tuyau continu, dont on connaît les coordonnées (x ;y), posé à la même date par la même entreprise, avec la même technique de pose, de même matériau, de même diamètre, avec les mêmes types de joints et de longueur supérieure à 6m et inférieure à 80 m ».

En effet la définition actuelle aboutira sur du long terme à la création de tronçons de plus en plus petits. Actuellement 14% des tronçons sont de très petites tailles (<6m). 6 m correspond à la taille minimale d'un tuyau réel. Si toutes les données environnementales (balmes, branchement, etc.) sont rentrées dans le fichier tronçon, on aboutira comme au SEDIF à énormément de tronçons de ... 1 cm ! Or réaliser des calculs statistiques sur des individus tronçons de moins de 6 m n'a pas de sens technique, que ce soit pour calculer des taux de défaillances au tronçon ou des courbes de survie au tronçon. Si trop de tronçons deviennent inférieurs à 6m, on sera obligé de regrouper les tronçons SIG avec leurs voisins pour dépasser au moins 6m. Ce regroupement pourra s'appeler « segments » ou « tronçons chantiers » ou « biefs »... Néanmoins ce sera un regroupement artificiel. Est-ce que les tronçons qu'on aura regroupé avaient été posés par la même entreprise ? ça on ne le saura plus... on aura perdu l'information...

Nous vous conseillons donc d'avoir :

- une couche SIG « tronçons stricts » basée sur leurs historiques de pose ;
- et d'avoir à côté des couches SIG « données environnementales » : où sont localisés les chaussées et les trottoirs, où sont localisés les réseaux, où sont localisées les balmes, etc.

Ensuite avant toute simulation statistique, au dernier moment croiser la couche « tronçons stricts » avec la couche « environnementale » désirée. Et si par exemple un tronçon est 80% sous chaussée et 20% sous trottoir vous lui attribuez la valeur « chaussée ». Néanmoins pour nous les couches « tronçons stricts » et données « environnementales » doivent évoluer indépendamment. En effet par exemple lors d'une décision d'urbanisme une chaussée peut se transformer à une certaine date en une voie piétonne alors que le tronçon en dessous pour lui rien n'a changé il garde son historique.

Conseil n°2 d'un point de vue statistique

Nous conseillons au Grand Lyon, d'un point de vue statistique de garder dans la couche SIG « tronçons stricts » les tronçons mis hors service. Pour cela il faut rajouter dans la couche « tronçons stricts » 3 colonnes : « statuts » (en service ou hors service), « date de mise hors service » et « cause de mise hors service ». C'est ce qui est fait au SEDIF et à eauservice Lausanne. Le fait de garder les tronçons hors service dans la couche SIG permet de garder leurs coordonnées (x,y). Or avoir leurs coordonnées (x,y) nous permet lors des analyses rétrospectives, de rattacher ces tronçons à toutes les données environnementales disponibles au Grand Lyon. On pourra alors beaucoup mieux comprendre :

- les causes des défaillances ou
- les causes des mises hors services.

Conseil n°3 d'un point de vue statistique

Nous conseillons au Grand Lyon d'embaucher ou de faire travailler une personne à temps complet pendant plusieurs mois afin qu'elle recherche dans les archives (papiers, données comptables, anciens logiciels, anciennes entrées des logiciels, etc.) les **dates de pose exactes** des tronçons :

- en service actuellement et
- ceux mis hors service ces 5 dernières années.

Cela permettrait au Grand Lyon d'avoir un historique des dates de pose plus fiable qu'il n'est actuellement et donc de pouvoir effectuer des analyses prévisionnelles plus fiables qu'actuellement.

Annexe 2: Fiche intervention pour une défaillance, exemple

OS - CRT - CRT Fuite

Agence 6 Catégorie de travaux 30 N°D.S. 2013 6 30 33 Etat Verrouillé Emetteur MASSET Frédéric

Commune IRIGNY Code postal 69540 Entreprise SADE IRIGNY B

Titre des travaux RUPTURE DE CONDUITE DN 100

PR AP TU NC Prévu du 15/03/2013 au 23/03/2013 Réalisé du 17/05/2013 au 17/05/2013 Modifié le 28/05/2013

CRT Fuite CRT Branchement CRT App. Pub. CRT Compt./Clap.

Compte rendu technique Fuite

Pas de CRT Fuite

Type d'ouvrage RESEAU CANALISATION Cléf Tronçon D.A.O.

Diamètre nominal

Matériau conduite FONTE GRISE

Matériel concerné TUYAU

Diagnostic Rupture

Nature fuite Fuite apparente

Fuite après repasse de l'OS

Détection DED fuite Oui Non

N° Fuite 201305008

Date repasse

Le technicien a une application internet en 3G avec notamment un compte rendu technique fuite (CRT fuite) à remplir cf. fiche ci-dessus :

- Diagnostic : Rupture, accidentel (tiers), piqure/corrosion, Néant.
- Nature fuite : Fuite apparente = fuite visible sur la chaussée, Fuite non apparente : méthode de recherche de fuite ou plaintes.
- Détection DED fuite : Détection par le Département Etude et Développement de Veolia. Si la détection vient de ce service.
- Cause
- ID tronçon
- Date réparation
- Localisation

Annexe 3: Méthode de nettoyage de la variable type de défaillances FR

Si nous trouvons	Nous remplaçons par
"TUYAU"	Troncon
"PIQURE-CORROSION"	Troncon
"RUPTURE"	Troncon
"MAUVAIS ETAT"	Troncon
"MANCHON REPARATION LEGERE"	Troncon
"RACCORD VISSE"	Joint
"JONCTION SOUDURE"	Joint
"JOINT PLOMB"	Joint
"JOINT"	Joint
"ROBINET DE PRISE"	Appareillage
"VENTOUSE"	Appareillage
"PURGE"	Appareillage
"SOUPAPE"	Appareillage
"REDUCTEUR"	Appareillage
"CORPS RV-PRES.ETOUPE"	Appareillage
"COLLIER"	Appareillage
"CLAPET ANTI-RETOUR"	Appareillage
"BRIDES"	Appareillage
" NEANT"	NA
"SUPPRIMEE"	NA

Elaboration d'un modèle long terme pour optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable

Annexe 4: Evolution des critères utilisés entre 2003 et 2013 avec Care-W ARP

Source (Gd Lyon 2013b)

Point of view ARP	Traduction	POIDS DES GRANDS OBJECTIFS						POIDS DETAILLES DES CRITERES						
		Weights (t)						Pourcentage du critère						
		2003	2005	2005	2011	2012	2013	Criteria ARP	2003	2005	2005	2011	2012	2013
Damages and disruptions	Diminuer les dommages en cas de casse	50%	35%	45%	40%	40%	45%	Damage due to flooding in housing areas (DFH)					4%	5%
								Damage due to flooding in industrial areas (DFI)					12%	14%
								Damage due to soil movement (DSM)	50%	21%	25%	25%	20%	23%
								Traffic disruptions (DT)		14%	20%	15%	4%	5%
								Damage and/or disruption on other infrastructure (DDI)						
Water interruptions	Assurer la continuité de service	50%	35%	30%	30%	30%	25%	Predicted water interruption (PWI)		11%	10%	10%	9%	8%
								Predicted critical water interruption (PCWI)		14%	20%	20%	15%	15%
								Predicted frequency of water interruption (PFWI)	50%	11%			6%	3%
Water losses	Améliorer le rendement du réseau		10%	20%	20%	20%	25%	Water losses index (WLI)		10%	20%	20%	20%	25%
Water quality	Résoudre les problèmes de qualité d'eau		10%	5%	10%			Water quality deficiencies index (WQDI)		10%	5%	10%		
Repair costs	Optimiser les coûts de réparation et de renouvellement		5%					Annual repair costs (ARC)		5%				
Rehabilitation costs	Optimiser les coûts de réparation et de renouvellement							Unit cost of rehabilitation (UCR)						
Co-ordination	Se coordonner avec d'autres travaux sur la voirie							Co-ordination score (COS)						
Hydraulic reliability	Importance hydraulique							Hydraulic criticality index (HCI)						
	?		5%					?		5%				
	Age du réseau					10%	5%	Age du réseau					10%	5%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%		100%	100%	100%	100%	100%	100%

Objectifs recherchés	2003	2005	2011	2012	2013	2014
Diminuer les dommages en cas de casse (glissement de terrain, inondation parking-voie ferrée-voirie-habitations)	50%	45%	40%	40%	45%	50%
Améliorer la continuité de service (limiter les arrêts d'eau : nombre abonnés, durée, clients prioritaires)	50%	30%	30%	30%	25%	30%
Améliorer le rendement du réseau (ou plutôt l'indice linéaire de perte du réseau)		20%	20%	20%	25%	20%
Résoudre les problèmes de qualité d'eau (dus au réseau de distribution)		5%	10%			
Age moyen du réseau				10%	5%	

Elaboration d'un modèle long terme pour optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable

Annexe 5: Extrait de l'outil partagé entre le délégataire Veolia et le Grand Lyon pour les gros Diamètre Feed'eau

Poids	Descriptif	Libellé
3	Année de pose observée	Année de pose observée
2	Classe de diamètre	Classe de diam
-	Commentaires/observations	Commentaires1
-	Nom de la commune	Commune
-	Date de pose estimée statistiquement ou par enquête	Date de pose estimée
-	Desservant ou non-desservant	Desservant
-	Diamètre	Diamètre
2	Emplacement de la canalisation	Emplacement
2	Emplacement spécifique de la canalisation	Emplacement spécifique
-	Champ utilisateur pour croiser différentes données	Etude
-	Nom du leader	Nom Feeder
4	Type de joint observé ou supposé	Type de joint
-	Longueur du tronçon cartographique	Longueur
4	Type de matériau	Matériau
-	Numéro du tronçon cartographique (clé primaire)	Clé tronçon
3	Nombre de défaillances observées depuis 1993	Défaillances
-	Observations / commentaires	Commentaires2
3	Pression calculé (par modèle hydraulique)	Pression
1	Type de réhabilitation	Réhabilitation
-	Nom du réseau	Reseau
4	Risques majeurs identifiés par tous	Majeurs
4	Risque spécifique de glissement de terrain (zone de balme)	Geotechnique
3	A proximité d'une voie ferré	Ferrés
3	A proximité d'un parking souterrain ou d'une trémie	Parking
-	Nom de la rue	Rue
2	Identifié et inscrit dans l'étude de sécurité	Etude Sécu.
5	Tronçon identifié comme structurant au sein du réseau	Structurant
2	Type de voirie	Voirie

CLASSIF	Prio.	Structurant	Prio.	MATERIAU	Prio.	ANNEE	Prio.	DATE_EST	Prio.	EMPLAC	Prio.	EMPLAC_S	Prio.	DESSERT	Prio.	JOINT	Prio.	Risque_Maj	Prio.
1000.1800	1	Non		0A	0.8	1900		1919		1	Lourde Grande p	0	fourreau	1	Desservant	0	Express	0	Importants
400.1000	0.5	Oui		1B	0.5	1910		1919		1	Accotement	0	Galerie	1	Non Desserv.	0.7	Fonte joint stand	0.3	z
				FD	0.5	1919		1920		1	Autoroute	1	z	0	z		Joint Bonna	1	Inconnu
				FD Ce	0.2	1920		1920		1	Berge	0					Joint plomb	0.7	
				FT	1	1930		1930		1	Caveau	0					Joint soude	0.5	
				FT	1	1950		0.8	1950		1	Chemp captant	0.5				pièce acier	0	
				INC	1	1952		0.8	1958		1	Chaussee	0.5				Précis express	0	
				INOX	0.5	1958		0.8	1959		1	Chaussee central	0.5				Soudure	0.5	
				PE	0.8	1959		0.8	1960		1	Chaussee cote fe	0.5				Standard	0.3	
					1	1960		0.8	1961		1	Chaussee impair	0.5						

RISQUE_Balme	Prio.	RISQUE_Ferre	Prio.	RISQUE_Parking	Prio.	REHABILIT/Prio.	ANNEE_Rehab	Prio.	Nb_defaill	Prio.	Pression (m)	Prio.	Voirie	Prio.	SECUR/Prio.	
Balme	1	Metro	1	Parking Souterrain	1	Chemisege	0		0	1	0.5	[1;8]	0	Légère	0.2	210
z	0	Tramway	0.8	z	0	Reprise des J	0		0	2	1	[10;11]	1	Lourde	0.5	212
		Voies SNCF	1			z	1		0.2		0	[8;10]	0.8	Non déterminé	0.4	213
			0											Super lourde	1	214
																216
																218
																219

Annexe 6: Méthode de nettoyage des matériaux en fonction des dates de pose

Si nous trouvons	Nous remplaçons par
"FDUC"	Fonte ductile
" FD "	Fonte ductile
"BLUT"	Fonte ductile
" FOTT "	Fonte ductile
"FOTT"	Fonte ductile
" FT " & DDP3 < 1970	Fonte grise
"FONT" & DDP3 < 1970	Fonte grise
"FGRI"	Fonte grise
" FG "	Fonte grise
" FD " & DDP3 < 1970	Fonte grise
"FG" & DDP3 ≥ 1970	Fonte ductile
" FT " & DDP3 ≥ 1970	Fonte ductile
"FONT" & DDP3 ≥ 1970	Fonte ductile
" FT " sans DDP3	Fonte grise
"FONT" sans DDP3	Fonte grise
" B "	BATO
"ACIE"	Acier
" PE "	PEHD
"PEHD"	PEHD
"AUTR"	Autre
"FIBR"	Autre
" A "	Autre
""	Autre
" "	Autre
"INC"	Autre
" INC "	Autre
"FV"	Autre
" FV "	Autre
"INOX"	Autre
"PVCL"	Autre
" PVC "	Autre
" BRS "	Autre
NA	Autre

+ source p 92 (Gd Lyon 2011a)

Attention : c'est un code informatique l'ordre des lignes a un sens !

Annexe 7: Méthode de nettoyage de la variable emplacement

Si nous trouvons	Nous remplaçons par
"Chaussee centrale"	Chaussee
"Chaussee cote fleuve"	Chaussee
" Chaussee cote fleuve "	Chaussee
"Chaussee impaire"	Chaussee
" Chaussee impaire "	Chaussee
" Chaussee centrale "	Chaussee
" Chaussee paire "	Chaussee
"Chaussee paire"	Chaussee
"Transversal"	Chaussee
" Transversal "	Chaussee
"Rond point"	Chaussee
"Chaussée"	Chaussee
" Chaussee "	Chaussee
"Inconnu"	Chaussee
" Inconnu "	Chaussee
""	Chaussee
" "	Chaussee
"Accotement"	Autre
" Accotement "	Autre
"Berge"	Autre
" Berge "	Autre
"Caniveau"	Autre
" Caniveau "	Autre
"Cote Place"	Autre
"Espace vert"	Autre
"Galerie"	Autre
" Galerie "	Autre
"Hors-sol"	Autre
" Hors-sol "	Autre
"piste cyclabe"	Autre
"Place"	Autre
" Place "	Autre
" Cote Place "	Autre
"Propriete privée"	Autre
" Propriete privée "	Autre
"Sous Fluvial"	Autre
"Trottoir"	Autre
" Trottoir "	Autre
"Trottoir cote fleuve"	Autre

" Trottoir cote fleuve "	Autre
"Trottoir impair"	Autre
" Trottoir impair "	Autre
"Trottoir pair"	Autre
" Trottoir pair "	Autre
"Voie Pietonne"	Autre
" Voie Pietonne "	Autre
"Pont"	Autre
" Pont "	Autre

Annexe 8: Graphique avec une fenêtre d'observation des tronçons mis hors service de 4 ans [2008, 2012]

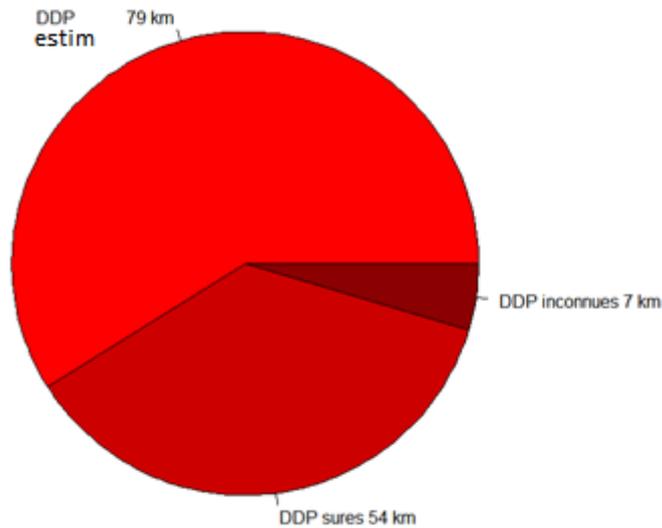


Figure 75 : Diagramme du linéaire (km) du Grand Lyon TVD mis hors service sur la fenêtre [2008, 2012] en fonction des dates de pose (total 140 km)

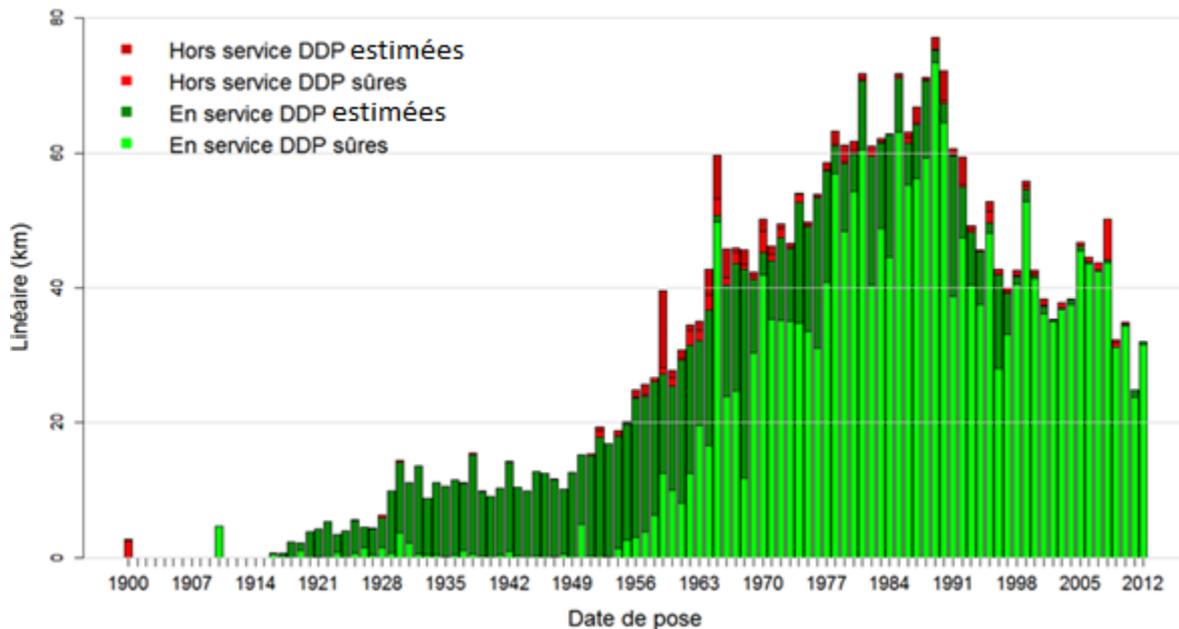


Figure 76 : Histogramme du linéaire en service (2 127km avec DDP sûres et 2 073km avec DDP estimées) et hors service (140 km avec DDP sûres et 86 km avec DDP estimées) au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (en rouge ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2008, 2012]).

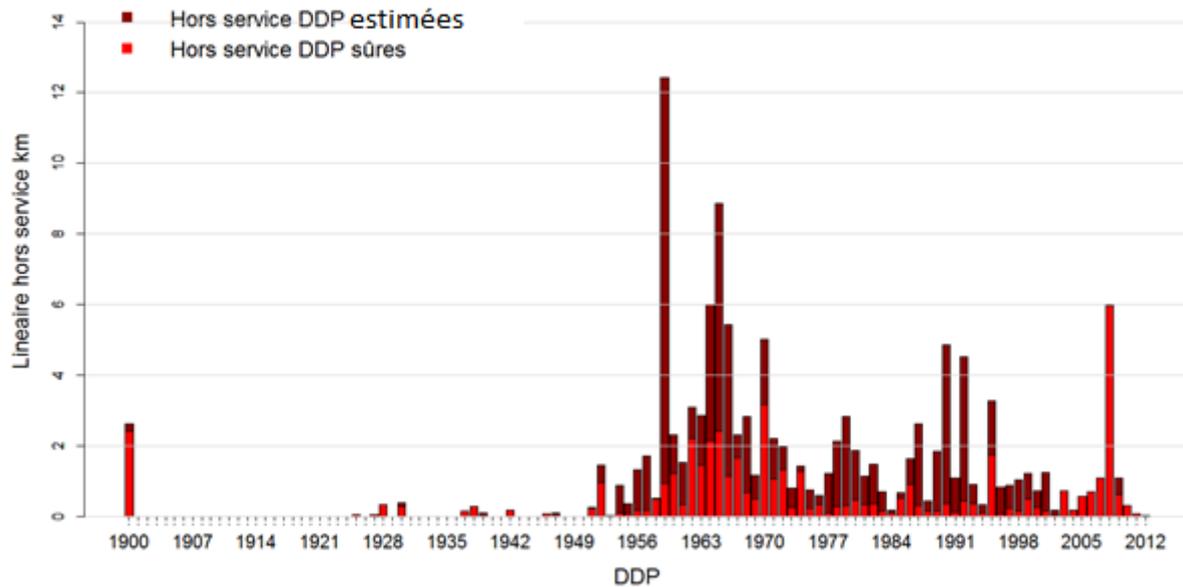


Figure 77 : Histogramme du linéaire hors service (HS) (54 km avec DDP sûres et 79 km avec DDP estimées) au 31/12/2012 ayant une date de pose connue (ne sont représentés que les tronçons mis HS entre [2008, 2012])

Annexe 9 : Définition de la censure et de la troncature

Définition de la Censure

La censure est le phénomène le plus couramment rencontré. Soit une population observée de n individus. Pour l'individu numéro i , $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ considérons :

- Son temps de survie X_i ,
- Son temps de censure W_i ,
- La durée réellement observée T_i .

L'événement aléatoire étudié est la mise hors service. La censure peut être « à droite » ou « à gauche », à droite si l'individu n'a pas subi l'événement à sa dernière observation, dans ce cas les durées de maintien en service ne sont pas toutes observées. Pour certaines d'entre elles, nous savons seulement qu'elles sont supérieures à une certaine valeur connue. Ou à gauche dans le cas où l'individu a déjà subi l'événement avant qu'il soit observé. Nous savons alors uniquement que la date de l'événement est inférieure à une certaine date connue.

- Censure à droite : Soit W une valeur fixée ; au lieu d'observer les variables X_1, \dots, X_n qui nous intéressent, X_i est uniquement observé lorsque $X_i \leq W$. Sinon nous savons seulement que $X_i > W$.
 T_i se note $T_i = \min(X_i, W)$, $i = 1, \dots, n$
- Censure à gauche : Soit W une valeur fixée ; au lieu d'observer les variables X_1, \dots, X_n qui nous intéressent, X_i est uniquement observé lorsque $X_i \geq W$. Sinon nous savons seulement que $X_i < W$.
 T_i se note $T_i = \max(X_i, W)$, $i = 1, \dots, n$

Définition de la Troncature

Les troncatures diffèrent des censures dans le sens où elles concernent l'échantillonnage lui-même. Ainsi, une variable X est tronquée par un sous-ensemble éventuellement aléatoire A de \mathbb{R}^+ si au lieu de X , X est uniquement observé si $X \in A$, et suivant donc la loi de T conditionnée par l'appartenance à A . S'il y a troncature, une partie des individus n'est pas observable et l'étude porte seulement sur un sous-échantillon (Saint Pierre 2013).

Annexe 10 : Méthode pour calculer la survie des tronçons hors service = « survie brute »

Nous estimons dans ce paragraphe, la distribution des âges à la mise hors service uniquement des tronçons mis hors service dans la fenêtre d'observation.

En linéaire, l'individu est 1m de tronçon, alors qu'en effectif, l'individu est un tronçon.

- En linéaire :

Nous calculons dans un premier temps les courbes de survie « brutes » $Sb(t)$ des tronçons hors service (en linéaire). Parmi les données archivées par le Grand Lyon nous travaillons sur la population des tronçons hors service entre [2002 ; 2012]. Chaque tronçon i a une longueur L_i , $i = 1, \dots, n$ et un âge de mise hors service b_i . Les tronçons ici sont tous non-censurés ($c_i = 0$) c'est-à-dire que leur mise HS est observable dans la fenêtre [2001 ; 2012]. Notons t les réalisations de la variable âge à la mise hors service. Posons $I\{\dots\}$ la fonction indicatrice qui prend 1 si les conditions entre accolades sont respectées et 0 sinon. Nous estimons d'abord la fréquence brute (en linéaire) $D_L(t)$ puis la fonction de répartition brute (en linéaire) $F_L(t)$ et enfin la survie brute (en linéaire) $Sb_L(t)$.

$$D_L(t) = \frac{\sum_i (L_i \times I\{c_i = 0 \& b_i = t\})}{\sum_i (L_i \times I\{c_i = 0\})} \quad \text{Eq. 53}$$

$$Sb_L(t) = 1 - F_L(t) = 1 - \sum_{k \leq t} D_L(k) \quad \text{Eq. 54}$$

- En effectif :

En effectif nous ne comptons plus le linéaire mais le nombre de tronçon qui tombe hors service à un temps t . Nous estimons d'abord la fréquence brute $D(t)$ puis la fonction de répartition brute $F(t)$ et enfin la survie brute $Sb(t)$. Nous retrouvons alors :

$$D(t) = \frac{\sum_i I\{c_i = 0 \& b_i = t\}}{\sum_i I\{c_i = 0\}} \quad \text{Eq. 55}$$

$$Sb(t) = 1 - F(t) = 1 - \sum_{k \leq t} D(k) \quad \text{Eq. 56}$$

Annexe 11 : Description de la méthode de Turnbull

L'estimateur non paramétrique de Turnbull sert à estimer une fonction de survie d'après des données de durées de maintien en service. Une fonction de survie donne la probabilité de survivre au-delà d'un certain âge, notée :

$$S(t) = P(T > t)$$

La courbe de survie a pour valeur de départ $S(0) = 1$, est décroissante et tend vers 0 quand t tend vers l'infini.

L'estimation non paramétrique de courbe de survie est une fonction en escalier décroissante qui saute vers le bas à chaque valeur de durée de maintien en service observée (quand un ou plusieurs individus « meurent » [ou sont mis hors service]), tout en restant constante (horizontale) entre deux valeurs successives de durée de maintien en service (Cf. Figure 78). En bref, la méthode non paramétrique de Turnbull consiste à estimer la hauteur des sauts. Une présentation plus formelle de la procédure de ce calcul nécessite d'établir des conventions de notation spécifiques.

Notons alors T la variable aléatoire durée de maintien en service, observée sur un ensemble de N tronçons du réseau, divisé en n groupes. Chaque groupe est constitué d'un nombre de tronçons e_i (avec $N = \sum_{i \in \{1, \dots, n\}} e_i$) observés dans l'intervalle d'âge $[a_i, b_i]$; la variable aléatoire c prend la valeur $c_i = 0$ si les segments du groupe i ont été mis hors service à l'âge b_i , sinon la valeur $c_i = 1$ si les segments du groupe i n'ont pas encore été mis hors service lorsque leur observation s'est arrêtée à l'âge b_i . Le premier cas $c_i = 0$ signifie l'observation exacte $T = b_i$, alors que le second cas $c_i = 1$ signifie censurés à droite et nous observons $T > b_i$. Sur l'ensemble des valeurs observées b_i , on note m le nombre de valeur distincte de b_i non censurées. Ces valeurs sont triées dans l'ordre croissant pour construire l'ensemble $\{t_j, j = 1, \dots, m\}$. Posons, $a = \min_{i \in \{1, \dots, n\}} a_i$ et $b = \max_{i \in \{1, \dots, n\}} b_i$.

La fonction de survie non paramétrique $S_N(t|a)$ est une estimation empirique de la probabilité conditionnelle $S(t|a) = P\{T > t | T \geq a\}$ comme aucune information n'est disponible sur la durée de maintien en service des tronçons en service avant a . Aucune information n'est disponible au-delà de l'âge b non plus. Comme illustré par la Figure 78, $S(t)$ est alors définie sur l'intervalle d'âge $[a, b]$ par le vecteur de sauts $s = (s_1, s_2, \dots, s_{m+1})$ avec

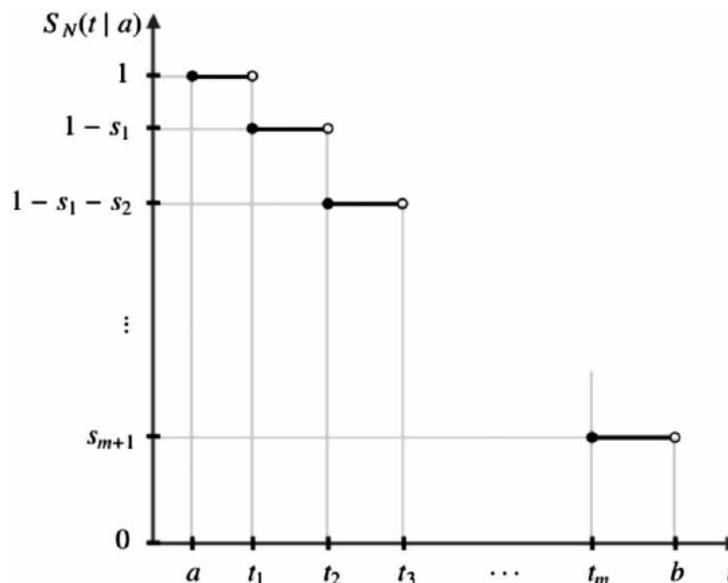


Figure 78 : Fonction de survie non paramétrique

$$\begin{aligned} \sum_{j \in \{1, \dots, m+1\}} s_j &= 1 : \\ S_N(t|a) &= 1, \text{ quand } t \in [a, t_1] \\ S_N(t|a) &= 1 - s_1, \text{ quand } t \in [t_1, t_2] \\ S_N(t|a) &= 1 - \sum_{k \in \{1, \dots, j\}} s_k, \text{ quand } t \in [t_j, t_{j+1}] \\ S_N(t|a) &= s_{m+1}, \text{ quand } t \in [t_m, b] \end{aligned}$$

L'estimation du vecteur s repose sur les travaux de pivotement de (Turnbull 1976). Cette méthode consiste au calcul de deux matrices de $n \times (m + 1)$ termes:

$$\alpha_{ij} = c_i I(t_j > b_i) + (1 - c_i) I(t_j = b_i) \quad \text{Eq. 57}$$

$$\beta_{ij} = I(t_j \geq a_i) \quad \text{Eq. 58}$$

Puis de deux matrices de $n \times (m + 1)$ termes:

$$\mu_{ij}(\mathbf{s}) = \frac{\alpha_{ij} s_j}{\sum_{k \in \{1, \dots, m+1\}} \alpha_{ik} s_k} \quad \text{Eq. 59}$$

$$v_{ij}(\mathbf{s}) = \frac{(1 - \beta_{ij}) s_j}{\sum_{k \in \{1, \dots, m+1\}} \beta_{ik} s_k} \quad \text{Eq. 60}$$

Et finalement d'un vecteur de taille $m + 1$:

$$\pi_j(\mathbf{s}) = \frac{\sum_{i \in \{1, \dots, n\}} e_i (\mu_{ij}(\mathbf{s}) + v_{ij}(\mathbf{s}))}{\left(\sum_{k \in \{1, \dots, m+1\}} \sum_{i \in \{1, \dots, n\}} e_i (\mu_{ik}(\mathbf{s}) + v_{ik}(\mathbf{s})) \right)} \quad \text{Eq. 61}$$

Initialisons $\mathbf{s}^{(0)}$, tel que $s_j^{(0)} = 1/(m + 1)$ pour tout j . Calculons alors $s_j^{(1)} = \pi_j(\mathbf{s}^{(0)})$ pour tout j , et réitérons r fois jusqu'à ce que $\mathbf{s}^{(r)} \approx \mathbf{s}^{(r-1)}$. Il est prouvé par (Turnbull 1976) qu'une estimation auto-cohérente de s est obtenue (Le Gat et al. 2013).

Annexe 12 : Validation des méthodes de Kaplan-Meier et de Turnbull, démonstration en effectif

Dans cette partie nous allons démontrer l'efficacité des modèles utilisés (Kaplan-Meier et Turnbull). Pour cela nous supposons que la courbe de survie réelle d'un échantillon est connue. Ensuite, un échantillon de tronçons est créé avec des âges à la mise hors service simulés selon cette survie réelle. Puis nous tronquons à gauche et censurons à droite l'échantillon dans le but de se retrouver dans la même situation que pour nos données du SEDIF. Enfin nous évaluons l'estimateur de Kaplan-Meier et de Turnbull. Ceux-ci doivent alors s'ajuster à la courbe de survie réelle initiale.

Dans un premier temps, nous créons 40 000 âges aléatoires à la mise hors service, dérivant d'une loi uniforme entre 0 et 1. Notons U_i , avec $i = \{1, \dots, 40\ 000\}$ ces aléas uniformes.

Nous construisons ensuite $S_{Réelle}(t)$ une survie de Weibull à deux paramètres (Cf. IV.5.1.1), en fixant arbitrairement les paramètres de forme et d'échelle de cette loi, avec $\delta = 1.5$ et $\lambda = 6.2$.

$$S_{Réelle}(t) = e^{-t^{1.5} \times e^{-6.2}} \quad \text{Eq. 62}$$

Pour générer des âges à la mise hors service distribués selon la survie théorique (Weibull) il est nécessaire d'isoler t en calculant la réciproque de $S_{Réelle}^{-1}(t)$

$$U = S_{Réelle}(t) \quad \text{Eq. 63}$$

$$U = e^{-t^{1.5} \times e^{-6.2}} \quad \text{Eq. 64}$$

$$\ln(U) = -t^{1.5} \times e^{-6.2} \quad \text{Eq. 65}$$

$$\frac{\ln(U)}{e^{-6.2}} = -t^{1.5} \quad \text{Eq. 66}$$

$$\left(-\frac{\ln(U)}{e^{-6.2}}\right)^{\frac{1}{1.5}} = t = S_{Réelle}^{-1}(U) \quad \text{Eq. 67}$$

Calculons alors $S_{Réelle}^{-1}(U)$ pour obtenir 40 000 âges à la mise hors service de tronçons qui suivent la survie réelle initiale.

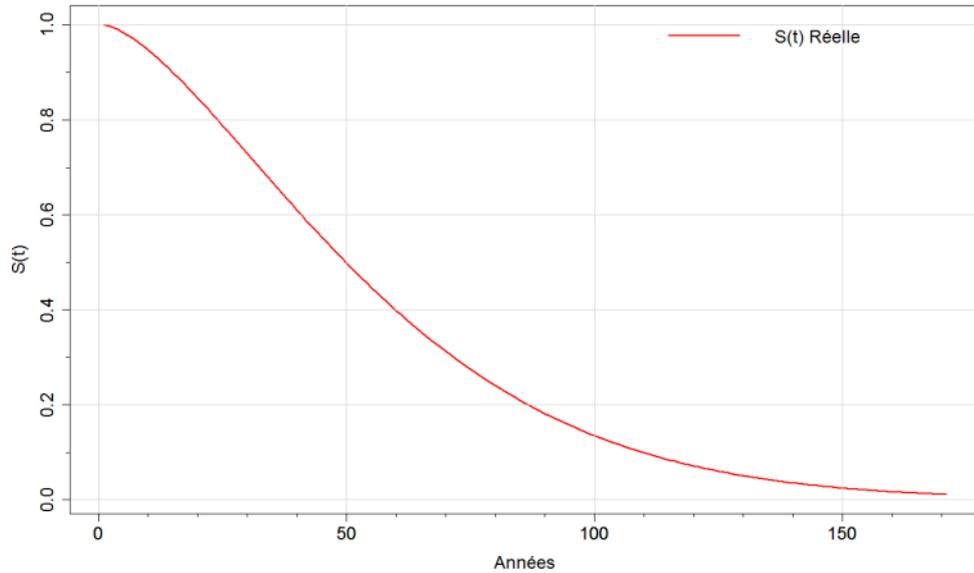


Figure 79 : Courbe de survie réelle

Dans un second temps, afin de reconstituer un échantillon type, nous tirons au sort par tirage aléatoire simple 40 000 dates de pose dans notre base de données « Caractéristiques des tronçons » (Cf. Figure 80). Il est alors possible de construire les dates à la mise hors service de chacun de ces tronçons, en ajoutant aux dates de pose, les âges à la mise hors service calculés précédemment (Cf. Figure 80, la répartition des dates à la mise hors service). Pour se retrouver dans les conditions d'expérience, nous décidons d'observer ces dates à la mise hors service sur une fenêtre qui s'étend de 1995 à 2015. Ainsi, il est possible de reproduire une troncature à gauche et une censure à droite. Nous pouvons alors construire une variable censure, avec c_i qui prend les valeurs 0 si la date de mise hors service est comprise dans la fenêtre d'observation, 1 si la date de mise hors service est supérieure à 2015. Il en résulte que 9 613 tronçons sont totalement tronqués, 22 895 tronçons sont censurés à droite et nous observons l'évènement d'intérêt (=mis hors service) pour 7 492 tronçons.

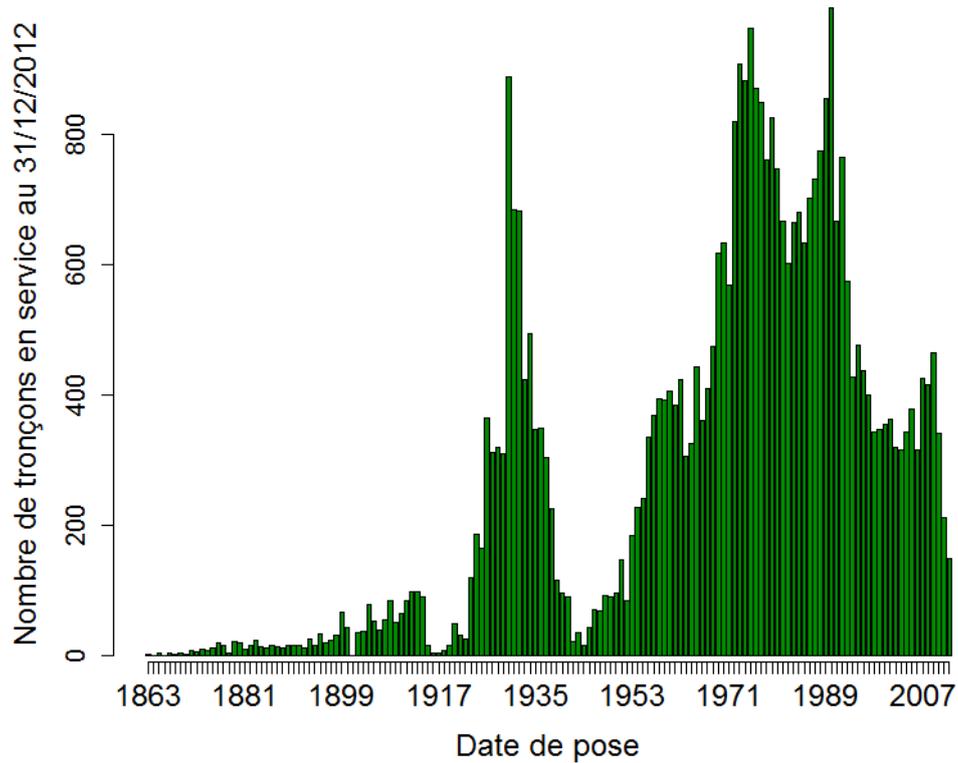


Figure 80 : Date de pose des 40 000 tronçons constituant l'échantillon (en effectif)

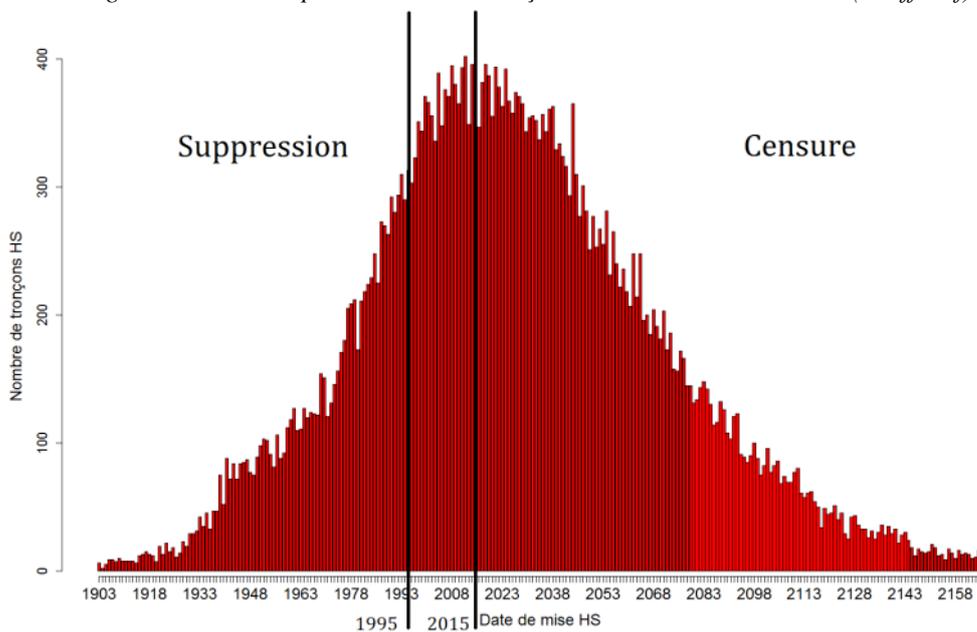


Figure 81 : Répartition des dates à la mise hors service (en effectif) des 40 000 tronçons

Il est maintenant possible d'appliquer les méthodes de Turnbull et de Kaplan-Meier élargi (en effectif) à cet échantillon tronqué, censuré et simulé.

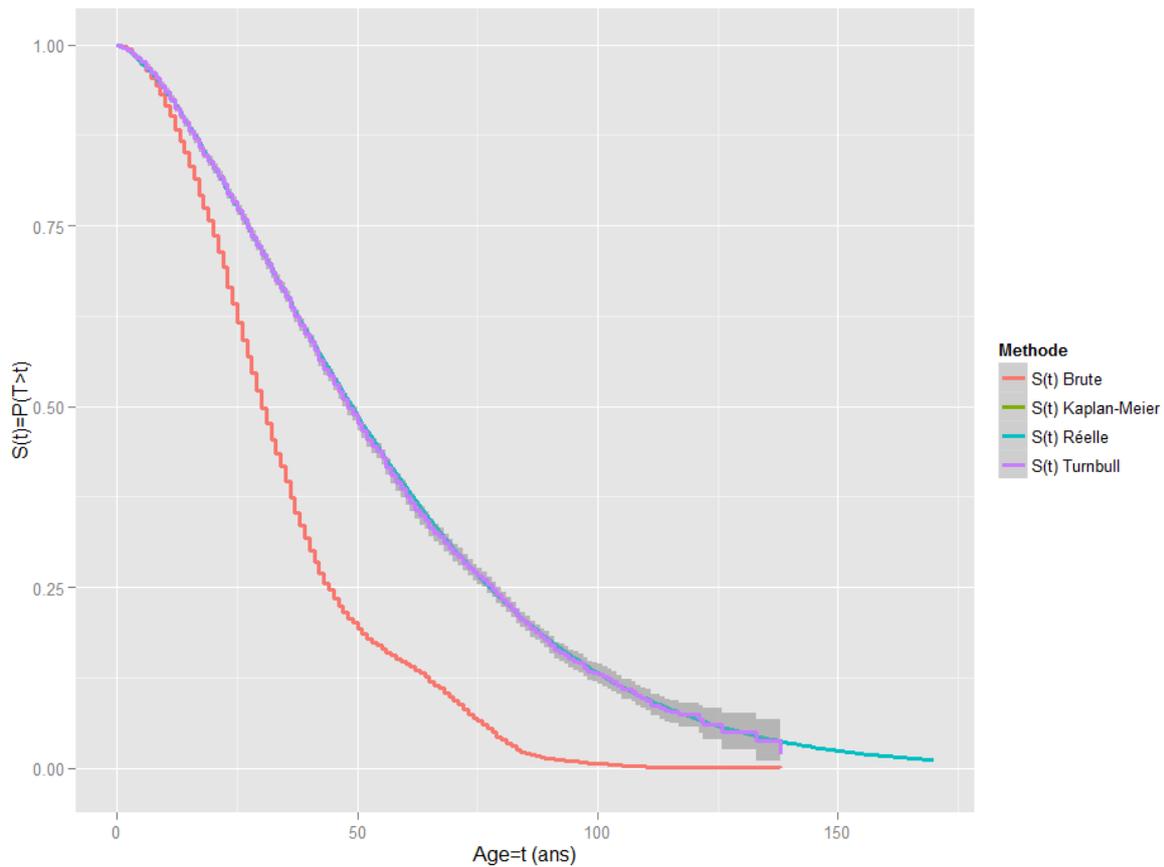


Figure 82 : Courbes de survie estimées (en effectif) et intervalle de confiance

En observant la Figure 82 : Courbes de survie estimées (en effectif) et intervalle de confiance, il est possible d'affirmer que les méthodes de Kaplan-Meier et de Turnbull sont efficaces. En effet, elles se superposent presque à l'identique avec la survie réelle initiale. Il a donc été démontré que ces deux méthodes pouvaient être utilisées quant à l'estimation de courbes de survie pour des données tronquées et censurées. Notons aussi que la survie brute n'est pas fiable car elle ne prend pas en compte la censure, elle n'est donc pas interprétable. De plus, la relation de Turnbull est satisfaite par Kaplan-Meier élargi. En effet, les méthodes de Turnbull et de Kaplan-Meier sont identiques. Pour des questions de temps de calcul il sera préférable d'utiliser la méthode de Kaplan-Meier, en effet l'algorithme de Turnbull tourne pendant environ 30 min alors que la méthode de Kaplan-Meier nous donne des résultats quasi immédiats (< 5 sec). Pour voir la démonstration en linéaire cf. Annexe 5.

Dans la suite du rapport certains graphiques de courbe de survie de Kaplan-Meier ou de survie brute ne sont pas en escalier, même si nous savons que la représentation correcte est une courbe en escalier nous avons fait le choix dans certains cas de lisser les courbes.

Annexe 13 : Validation des méthodes de Kaplan-Meier et de Turnbull, démonstration en Linéaire

Dans un premier temps on simule 100 000 probabilités à la mise hors service, selon une loi uniforme entre 0 et 1. Notons U_i , avec $i = \{1, \dots, 100\ 000\}$ les probabilités de la mise hors service du tronçon i .

Construisons ensuite $S_{Réelle}(t)$ une survie de Weibull à deux paramètres, en fixant arbitrairement les paramètres de forme et d'échelle de cette loi, avec $\delta = 1.5$ et $\lambda = 6.2$.

Pour générer des âges à la mise hors service qui suivent la survie réelle initiale il est nécessaire d'isoler t en calculant l'inverse de $S_{Réelle}(t)$.

Calculons alors $S^{-1}(U)$ pour obtenir 100 000 âges à la mise hors service de mètres qui suivent la survie réelle initiale.

Dans un second temps, afin de reconstituer un échantillon type, nous tirons au sort par tirage aléatoire simple 100 000 dates de pose dans notre base de données « Caractéristiques des tronçons ». Attention, cette fois-ci une date de pose est associée à un mètre, et non à un tronçon, la répartition des mètres en fonction des dates de pose). Il est alors possible de construire les dates à la mise hors service de chacun de ces mètres, en ajoutant aux dates de pose, les âges à la mise hors service calculés précédemment. Pour retrouver les conditions réelles, nous décidons d'observer ces dates à la mise hors service sur une fenêtre qui s'étend de 1995 à 2015. Ainsi, il est possible de reproduire une troncature à gauche et une censure à droite. Nous pouvons alors construire une variable censure, avec c_i qui prend les valeurs 0 si la date de mise hors service est comprise dans la fenêtre d'observation, 1 si la date de mise hors service est supérieure à 2015.

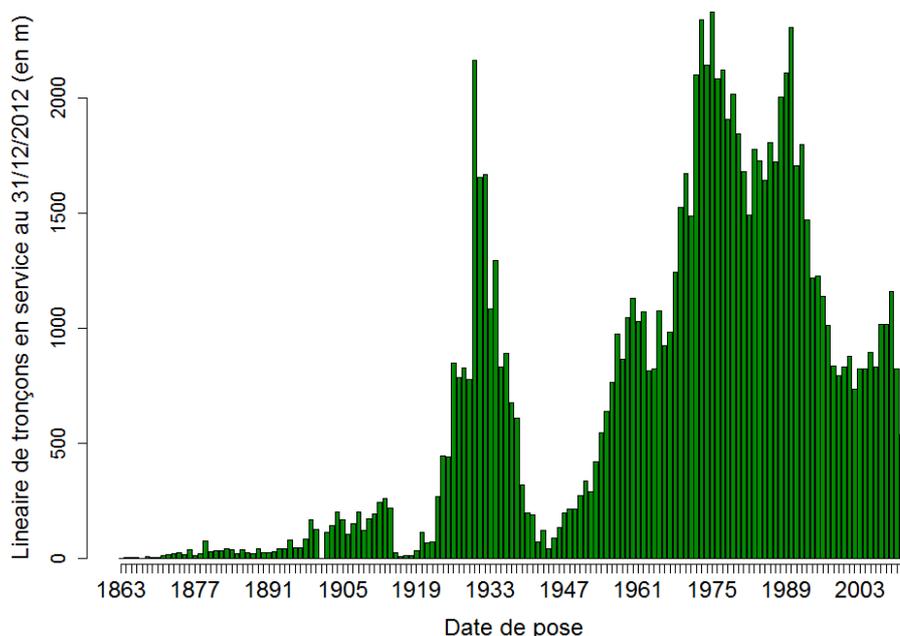


Figure 83 : Date de pose des tronçons constituant l'échantillon (en linéaire)

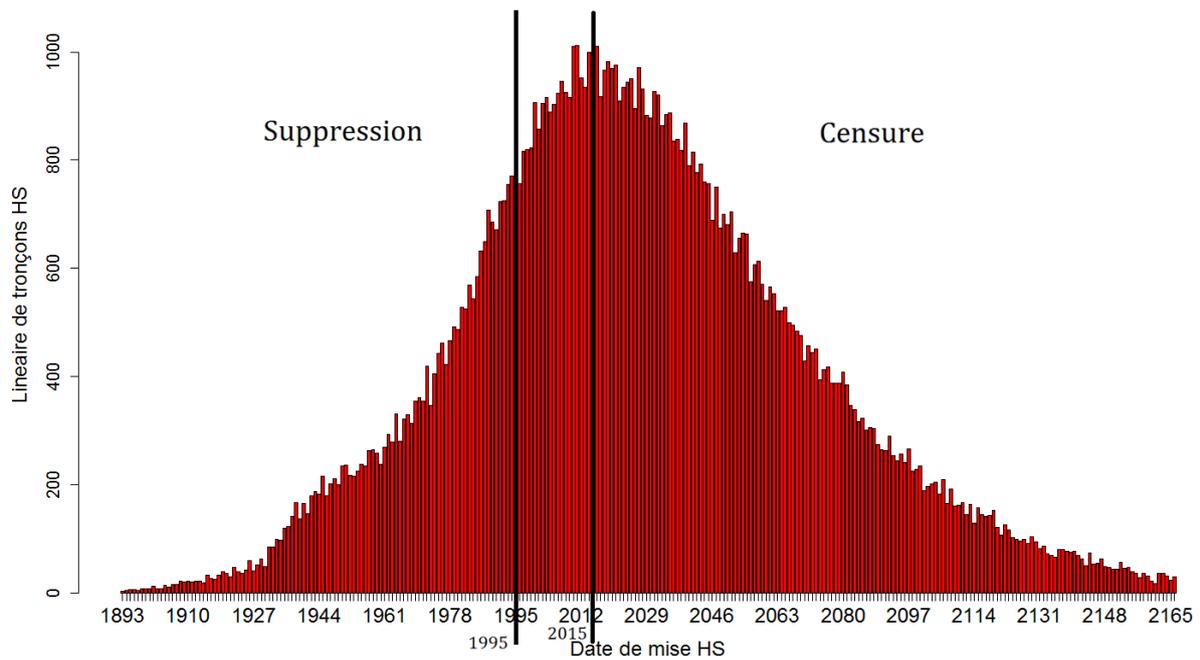


Figure 84 : Répartition des dates à la mise hors service (en linéaire)

Il est maintenant possible d'appliquer les méthodes de Turnbull et de Kaplan-Meier élargi (en linéaire) à cet échantillon tronqué, censuré simulé.

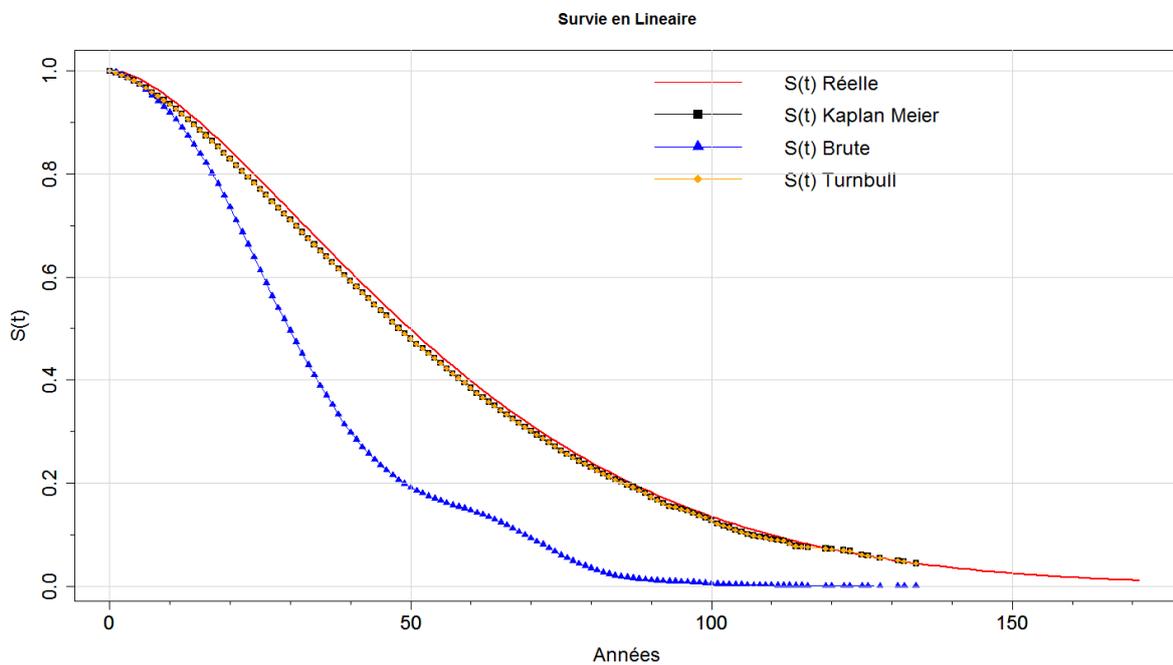


Figure 85 : Courbes de survie estimées (en linéaire)

Annexe 14 : Description de la méthode d'optimisation de Nelder & Mead

La méthode de Nelder-Mead est un algorithme d'optimisation non-linéaire qui a été publié par Nelder et Mead en 1965. C'est une méthode numérique heuristique qui cherche à minimiser une fonction continue dans un espace à plusieurs dimensions. L'algorithme exploite le concept de simplexe qui est un polytope de $K+1$ sommets dans un espace à K dimensions. Partant initialement d'un tel simplexe, celui-ci subit des transformations simples au cours des itérations : il se déforme, se déplace et se réduit progressivement jusqu'à ce que ses sommets convergent sur un point où la fonction est localement minimale. C'est une méthode efficace qui n'utilise pas le gradient de la fonction mais seulement les valeurs de celle-ci.

Nous construisons dans un premier temps un simplexe à $k+1$ sommets dans un espace à k dimensions, par exemple en 2 dimensions, le simplexe est un triangle, en 3 dimensions, le simplexe est un tétraèdre, etc. Il y a donc $k+1$ vecteurs X_1, \dots, X_{k+1} de $\mathbb{R}^n, k = n$, affinement indépendants, définissant chacun des $k+1$ sommets.

Le simplexe se modifie ensuite à travers les opérations de réflexion, d'expansion et de contraction, en changeant le sommet avec la plus grande valeur de la fonction objectif par un autre point de valeur plus petite (Nelder & Mead 1965) (Cf. Figure 86). L'algorithme s'arrête quand la longueur des arêtes du simplexe est inférieure à un seuil fixé.

La Figure 87 montre l'organigramme de la méthode classique.

Le premier sommet du simplexe initial (point initial) peut être fourni par l'utilisateur. Les autres sommets peuvent être définis à partir du premier sommet, en sommant une longueur en chaque direction des n coordonnées :

$$X_i = X_0 + \lambda E_i \quad i = 1, \dots, n$$

Où X_0 est le point initial, E_i le vecteur de la base canonique dans la i ème direction et λ le pas initial d'exploration de l'espace des paramètres (Luersen & Le Riche 2001).

L'avantage déterminant de la méthode de Nelder & Mead est qu'il peut être modifié facilement pour prendre en compte des contraintes dites « base constraints », i.e. quand un paramètre n'est pas recherché sur \mathbb{R} mais sur un intervalle de \mathbb{R} .

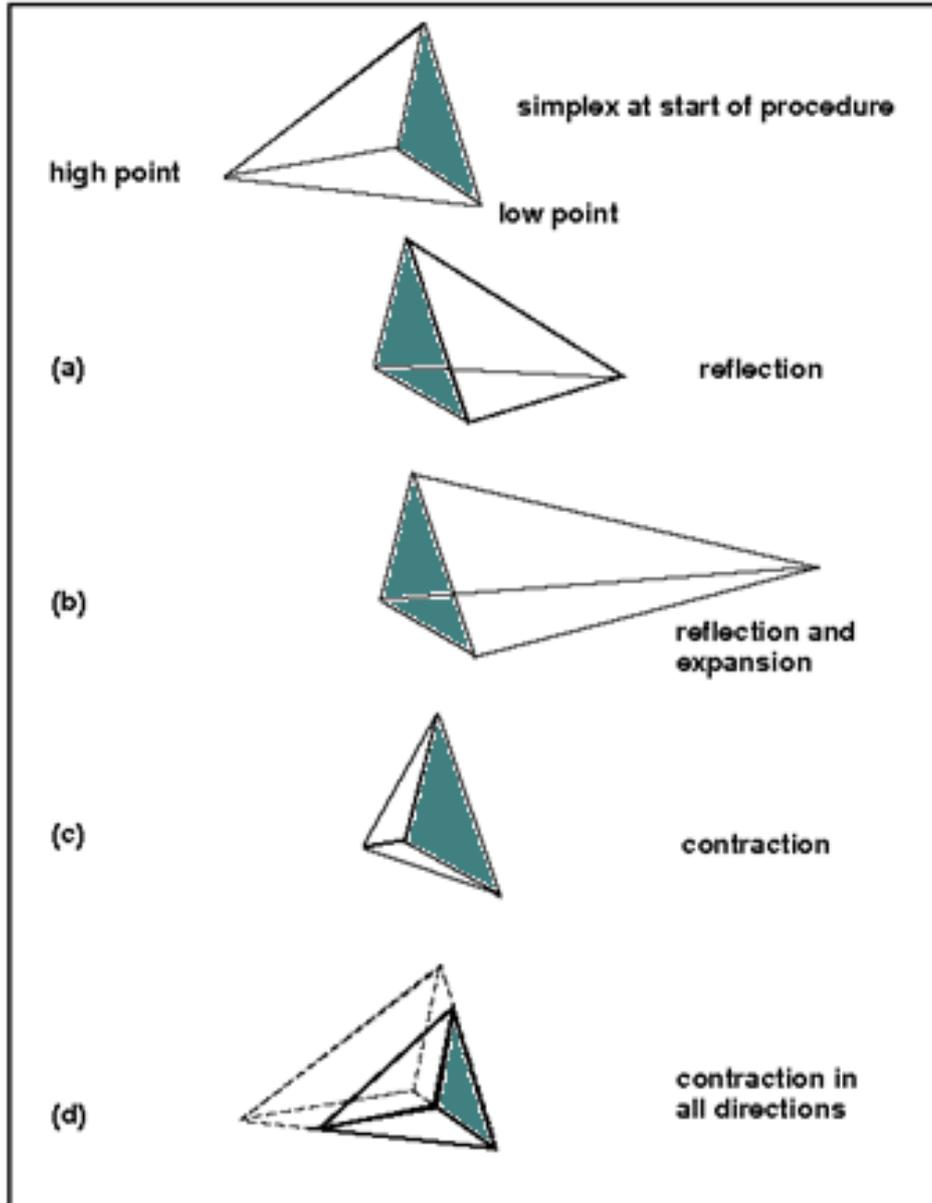


Figure 86 : Evolution possible du simplexe de Nelder & Mead

Elaboration d'un modèle long terme pour optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable

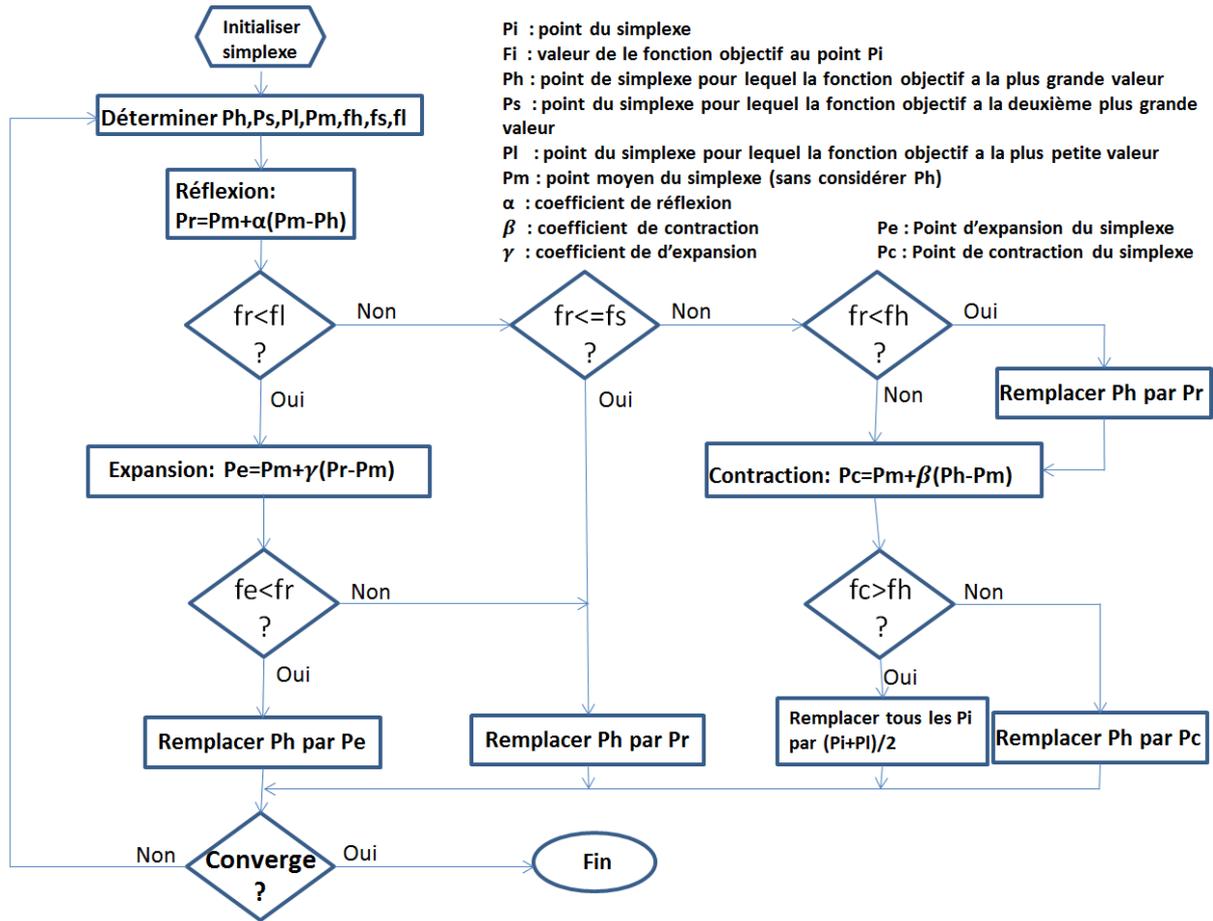


Figure 87 : Organigramme de la méthode de Nelder & Mead classique

Annexe 15 : Méthode de déconditionnement

Exemple de déconditionnement avec la courbe de survie du matériau fonte grise de la Lausanne.

La fonte grise non déconditionnée commence en $S(32) = 1$. Pour déconditionner cette survie on fait l'hypothèse que la survie de la fonte grise à le même comportement que la survie de la fonte ductile pour ses 32 premières années. Ainsi on translate vers le bas la survie de la fonte grise non déconditionnée d'un écart égale à la différence entre la fonte grise non déconditionnée et la fonte ductile à $S(32)$ (cf. Figure 88).

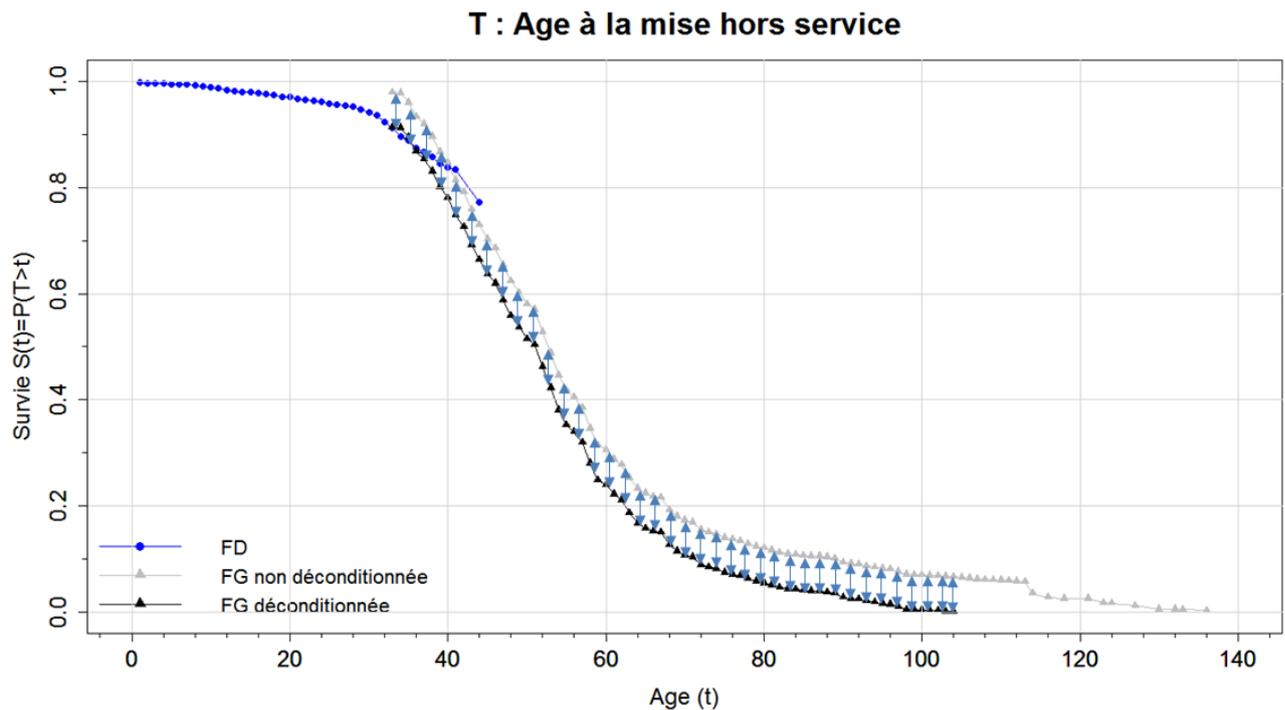


Figure 88 : Méthode de déconditionnement

Annexe 16 : Le modèle de Weibull à covariables est un modèle de Cox particulier

On a :

$$S_{\Theta}(t) = e^{-t^{\delta_1} \times e^{\beta_0} \times e^{Z^T \beta}} \quad \text{Eq. 68}$$

Or :

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} \quad \text{Eq. 69}$$

et :

$$f_{\Theta}(t) = \frac{-dS_{\Theta}(t)}{dt} \quad \text{Eq. 70}$$

Car :

$$F_{\Theta}(t) = 1 - S_{\Theta}(t) \quad \text{Eq. 71}$$

Donc nous obtenons :

$$h(t) = \frac{\delta_1 t^{\delta_1 - 1} \times e^{Z^T \beta} \times e^{-t^{\delta_1} \times e^{\beta_0} \times e^{Z^T \beta}}}{e^{-t^{\delta_1} \times e^{\beta_0} \times e^{Z^T \beta}}} \quad \text{Eq. 72}$$

$$h(t) = \delta_1 t^{\delta_1 - 1} \times e^{\beta_0} \times e^{Z^T \beta} \quad \text{Eq. 73}$$

Avec par exemple

$$Z^T \beta = \beta_0 + \beta_1 \emptyset + \beta_2 Lg + \beta_3 FG + \beta_4 FD + \beta_5 PEHD + \beta_6 Bonna + \beta_7 Autre + \beta_8 NDOA \quad \text{Eq. 74}$$

Et nous retrouvons la même propriété que celle du modèle de Cox:

$$\lambda(t, z) = \lambda_0(t) \times \exp(Z^T \beta) \quad \text{Eq. 75}$$

Annexe 17: Courbes de survie des tronçons partitionnés par diamètre

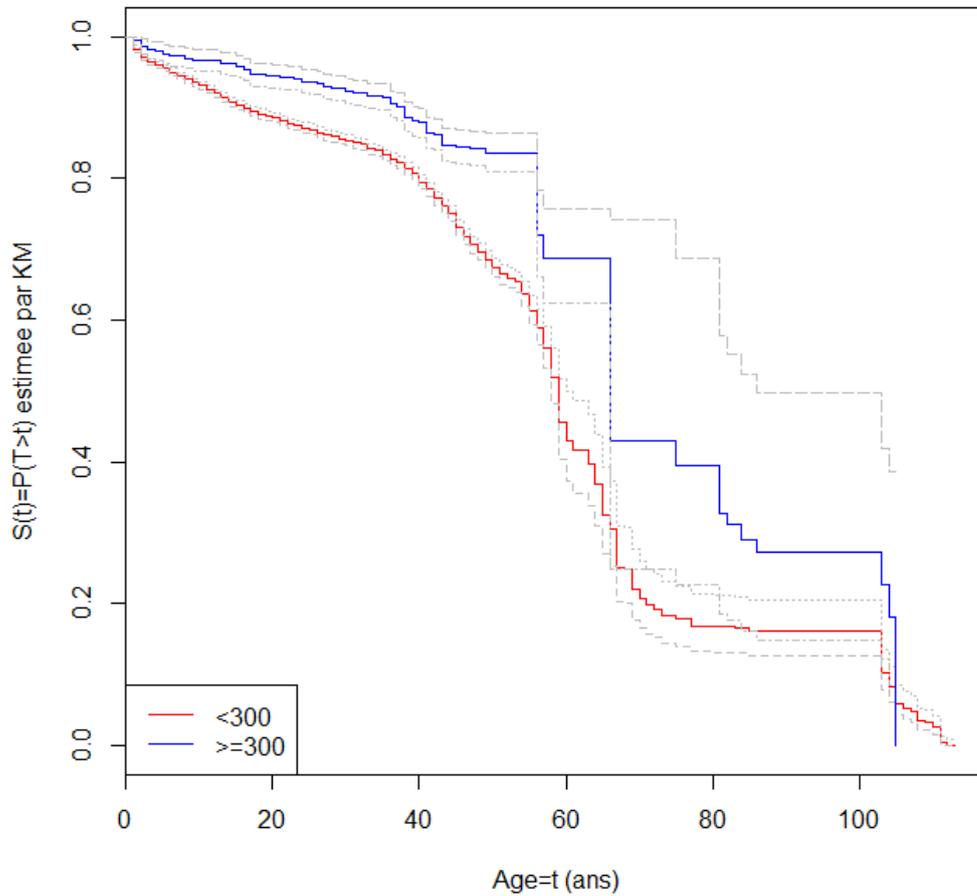


Figure 89 : Courbes de survie passées [2002-2012] en effectif (tronçons partitionnés en 2 sous-ensembles diamètre < 300 mm en rouge et diamètre ≥ 300 mm en bleu) et leurs intervalles de confiances

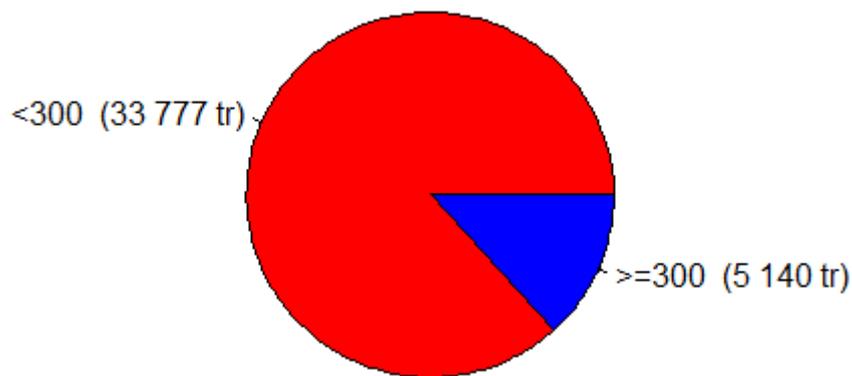


Figure 90 : Diagramme en effectif (tronçons partitionnés en 2 sous-ensembles diamètre < 300 mm en rouge et diamètre ≥ 300 mm en bleu)

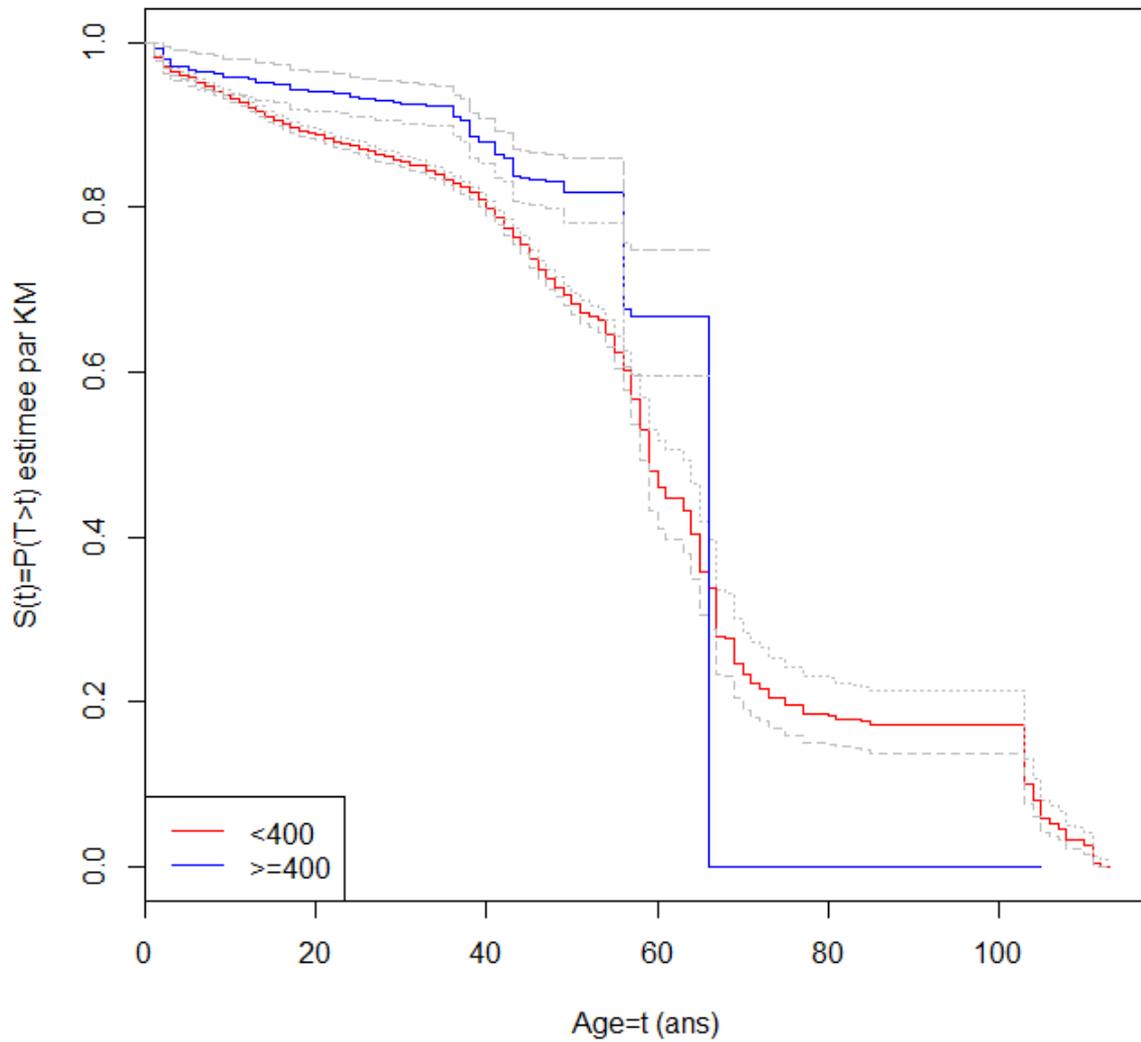


Figure 91 : Courbes de survie passées [2002-2012] en effectif (tronçons partitionnés en 2 sous-ensembles diamètre < 400 mm en rouge et diamètre ≥ 400 mm en bleu) et leurs intervalles de confiances

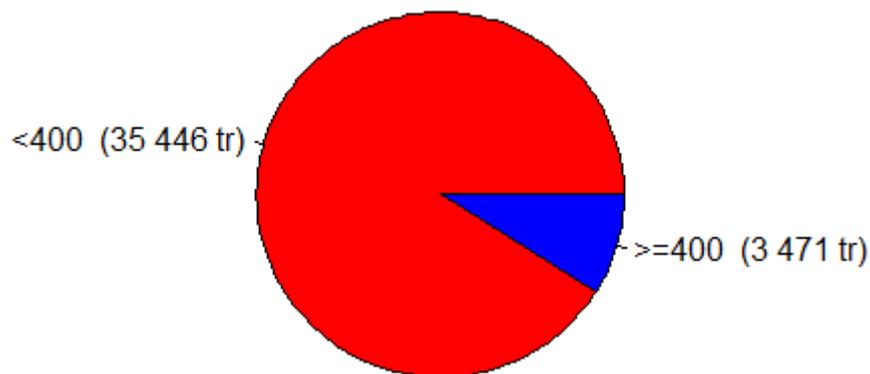


Figure 92 : Diagramme des effectifs (tronçons partitionnés en 2 sous-ensembles diamètre < 400 mm en rouge et diamètre ≥ 400 mm en bleu)

Annexe 18: Corrélation entre longueur et diamètre

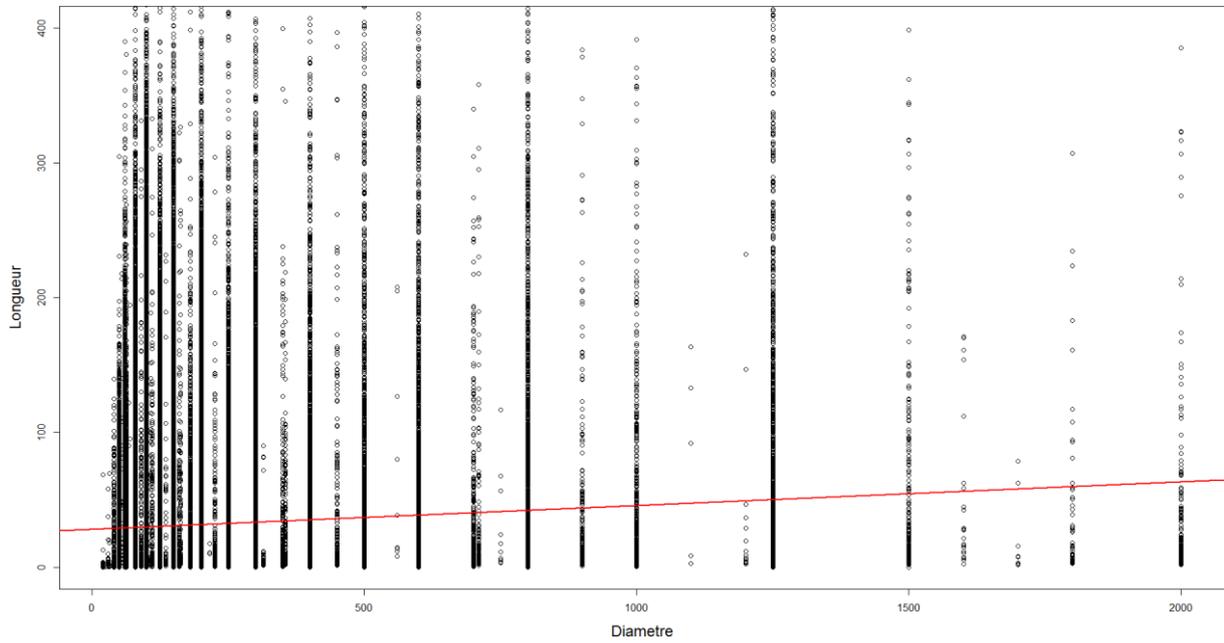


Figure 93 : Corrélation entre longueur et diamètre en nombre de tronçon (échelle réduite)

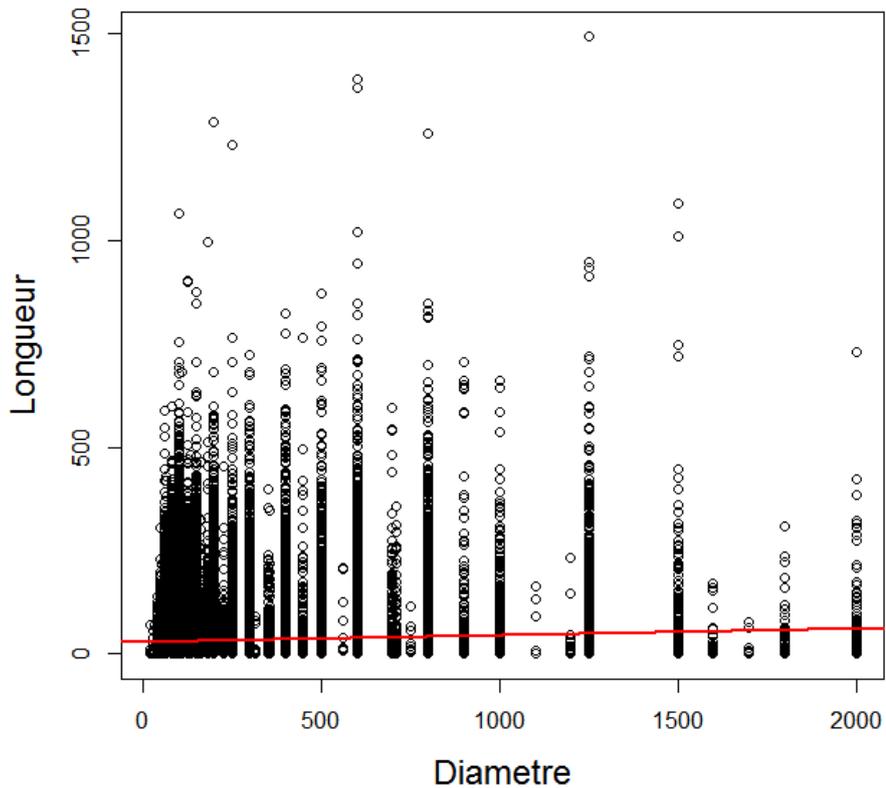


Figure 94 : Corrélation entre longueur et diamètre en nombre de tronçon

Annexe 19: Courbes de survie des tronçons partitionnés par zone de balme ou non

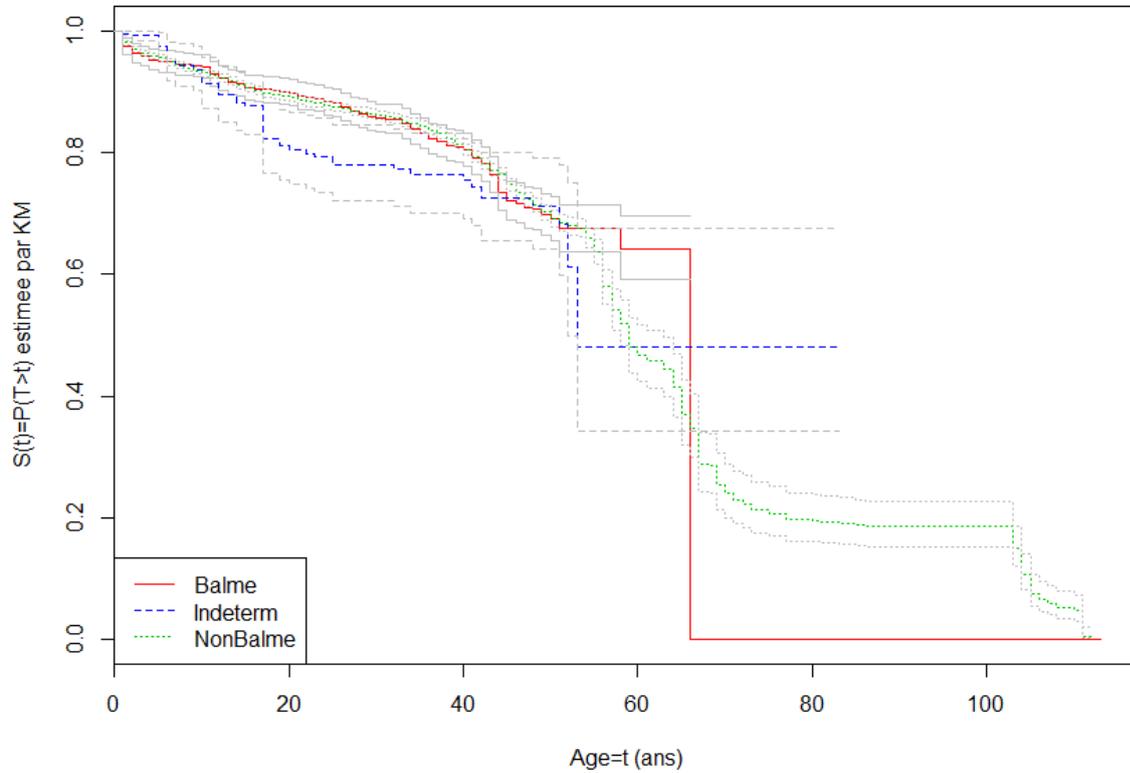


Figure 95: Courbes de survie en effectif (tronçons partitionnés en 3 strates si les tronçons sont positionnés en zone de balme ou non ou indéterminée) et leurs intervalles de confiance (en gris foncé)

Annexe 20: Courbes de survie des tronçons partitionnés selon leur emplacement (sous chaussée ou autre)

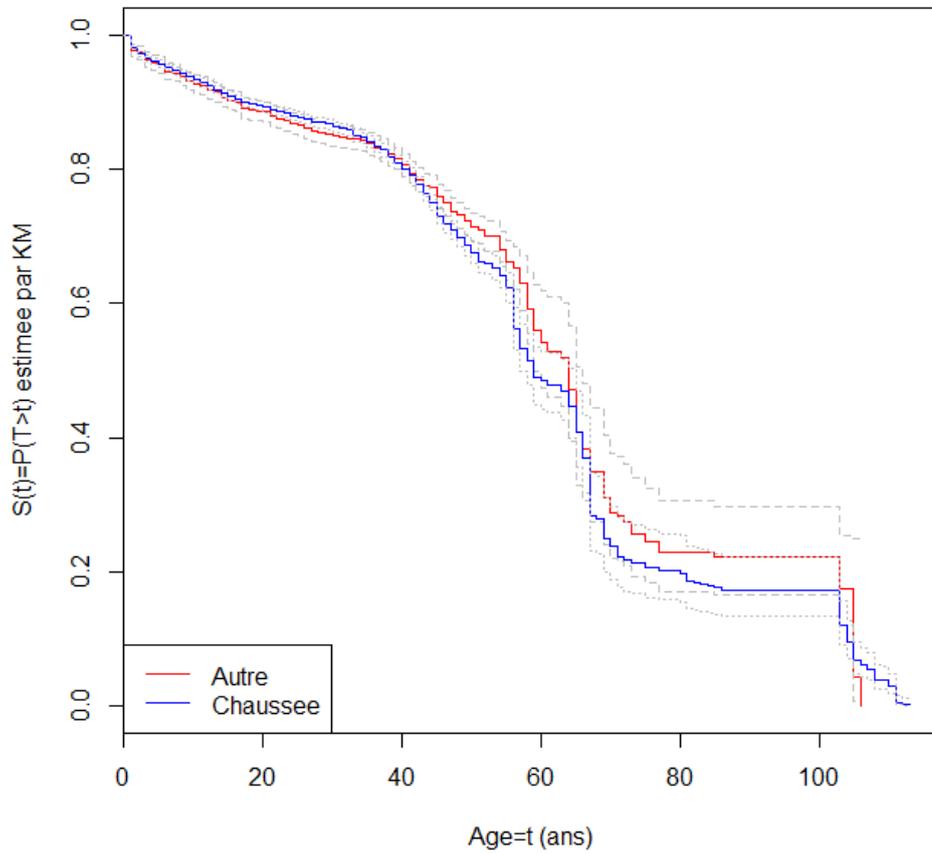


Figure 96: Courbes de survie en effectif, tronçons partitionnés en 2 strates si les tronçons sont positionnés sous chaussée ou autre, et leurs intervalles de confiance (en gris foncé)

Annexe 21: Indice TP10A, canalisation, égouts, assainissement et adduction d'eau avec fourniture de tuyaux

Structure de l'indice TP10a :

Canalisations

Code-Définition	Salaires et charges	Matériaux	Matériel	Transport	Energie	Frais Divers
TP10a-Canalisations, égouts, assainissement et adduction d'eau avec fournitures de tuyaux (2)	41%	34%	15%	4%	3%	3%
TP10bis-Canalisations sans fournitures	51%	18%	18%	4%	4%	5%
TP11-Canalisations grande distance et irrigation avec fourniture de tuyaux (2)	22%	61%	8%	2%	2%	5%

Tableau 11 : Structure de l'indice TP 10a

(Ministère_de_L'écologie 2010)

Pour construire cet indice, le ministère de l'écologie recueille chaque mois des coûts sur le terrain tel que le coût des salaires, des matériaux, des matériels, etc. Ainsi il peut alors construire des taux d'augmentation ou de diminution d'un mois sur l'autre. Nous observons ci-dessous que le l'indice TP10a a une tendance à l'augmentation.

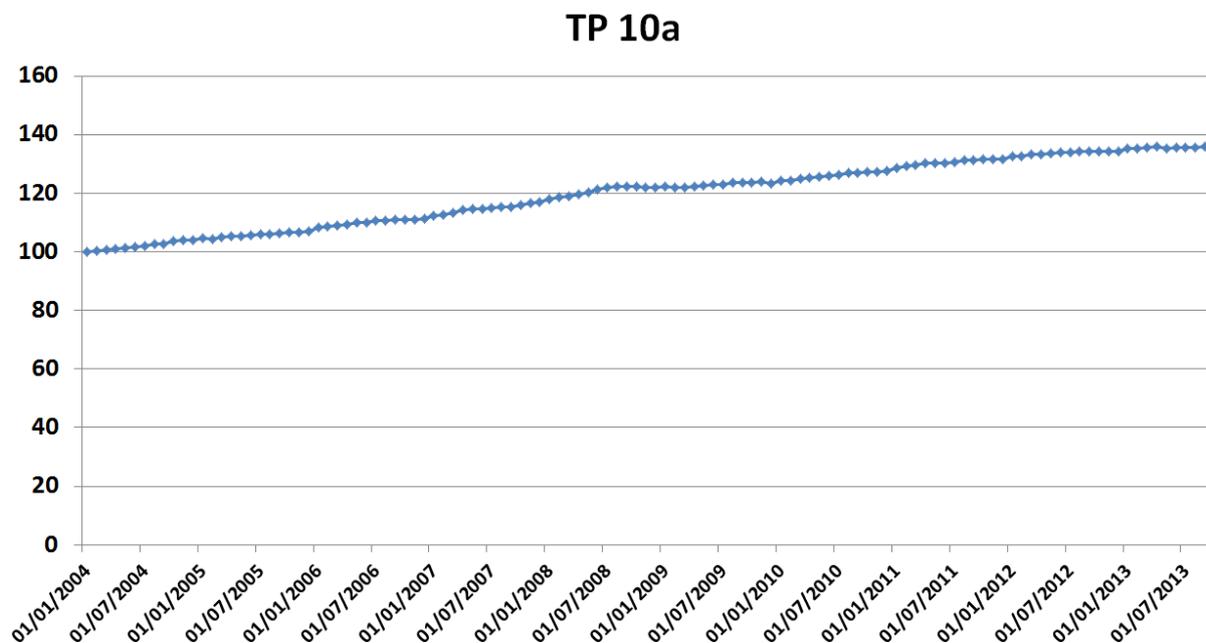


Figure 97 : Evolution de l'indice TP 10a entre janvier 2004 et septembre 2013

L'indice moyen correspond au coefficient de la pente soit : 3.7% entre janvier 2004 et septembre 2013

Elaboration d'un modèle long terme pour optimiser le renouvellement des canalisations d'eau potable

Date de cotation	Date de mise en ligne	Valeur	Date de cotation	Date de mise en ligne	Valeur	Date de cotation	Date de mise en ligne	Valeur
01/01/2004	29/04/2004	100	01/04/2007	29/07/2007	114,2	01/07/2010	29/10/2010	126,3
01/02/2004	28/05/2004	100,2	01/05/2007	05/09/2007	114,6	01/08/2010	28/11/2010	126,8
01/03/2004	26/06/2004	100,6	01/06/2007	29/09/2007	114,7	01/09/2010	30/12/2010	126,9
01/04/2004	30/07/2004	101	01/07/2007	28/10/2007	114,9	01/10/2010	27/01/2011	127,3
01/05/2004	03/09/2004	101,4	01/08/2007	30/11/2007	115,2	01/11/2010	25/02/2011	127,1
01/06/2004	02/10/2004	101,8	01/09/2007	29/12/2007	115,3	01/12/2010	30/03/2011	127,5
01/07/2004	30/10/2004	102	01/10/2007	31/01/2008	115,8	01/01/2011	29/04/2011	128,6
01/08/2004	27/11/2004	102,6	01/11/2007	29/02/2008	116,6	01/02/2011	29/05/2011	129,2
01/09/2004	26/12/2004	102,8	01/12/2007	30/03/2008	116,8	01/03/2011	30/06/2011	129,7
01/10/2004	30/01/2005	103,6	01/01/2008	02/05/2008	118,1	01/04/2011	30/07/2011	130,1
01/11/2004	03/03/2005	103,9	01/02/2008	30/05/2008	118,7	01/05/2011	31/08/2011	130,3
01/12/2004	27/03/2005	104	01/03/2008	04/07/2008	119,1	01/06/2011	30/09/2011	130,2
01/01/2005	29/04/2005	104,6	01/04/2008	03/08/2008	119,7	01/07/2011	30/10/2011	130,7
01/02/2005	31/05/2005	104,4	01/05/2008	03/09/2008	120,4	01/08/2011	30/11/2011	131,3
01/03/2005	30/06/2005	105	01/06/2008	30/09/2008	121,3	01/09/2011	30/12/2011	131,2
01/04/2005	28/07/2005	105,2	01/07/2008	31/10/2008	122,1	01/10/2011	31/01/2012	131,5
01/05/2005	01/09/2005	105,4	01/08/2008	30/11/2008	122,2	01/11/2011	28/02/2012	131,6
01/06/2005	01/10/2005	105,6	01/09/2008	20/12/2008	122,4	01/12/2011	31/03/2012	131,5
01/07/2005	03/11/2005	105,9	01/10/2008	05/02/2009	122,4	01/01/2012	03/05/2012	132,7
01/08/2005	30/11/2005	105,9	01/11/2008	28/02/2009	122	01/02/2012	31/05/2012	132,7
01/09/2005	27/12/2005	106,2	01/12/2008	29/03/2009	121,9	01/03/2012	29/06/2012	133,3
01/10/2005	01/02/2006	106,7	01/01/2009	30/04/2009	122,3	01/04/2012	31/07/2012	133,4
01/11/2005	01/03/2006	106,8	01/02/2009	31/05/2009	122,1	01/05/2012	01/09/2012	133,6
01/12/2005	30/03/2006	106,9	01/03/2009	28/06/2009	122	01/06/2012	02/10/2012	134
01/01/2006	28/04/2006	108,3	01/04/2009	30/07/2009	122,2	01/07/2012	31/10/2012	133,9
01/02/2006	28/05/2006	108,6	01/05/2009	28/08/2009	122,6	01/08/2012	30/11/2012	134,3
01/03/2006	01/07/2006	109	01/06/2009	01/10/2009	123	01/09/2012	28/12/2012	134,3
01/04/2006	29/07/2006	109,4	01/07/2009	30/10/2009	122,9	01/10/2012	30/01/2013	134,3
01/05/2006	31/08/2006	110	01/08/2009	29/11/2009	123,6	01/11/2012	27/02/2013	134,4
01/06/2006	04/10/2006	110	01/09/2009	27/12/2009	123,5	01/12/2012	28/03/2013	134,4
01/07/2006	28/10/2006	110,5	01/10/2009	29/01/2010	123,7	01/01/2013	08/05/2013	135,4
01/08/2006	30/11/2006	110,8	01/11/2009	26/02/2010	123,9	01/02/2013	31/05/2013	135,1
01/09/2006	28/12/2006	111	01/12/2009	28/03/2010	123,4	01/03/2013	29/06/2013	135,7
01/10/2006	31/01/2007	111	01/01/2010	30/04/2010	124,3	01/04/2013	30/07/2013	136
01/11/2006	28/02/2007	111,1	01/02/2010	28/05/2010	124,4	01/05/2013	31/08/2013	135,1
01/12/2006	31/03/2007	111,2	01/03/2010	27/06/2010	125	01/06/2013	29/09/2013	135,5
01/01/2007	29/04/2007	112,4	01/04/2010	29/07/2010	125,3	01/07/2013	31/10/2013	135,6
01/02/2007	01/06/2007	112,7	01/05/2010	31/08/2010	125,7	01/08/2013	30/11/2013	135,6
01/03/2007	30/06/2007	113,2	01/06/2010	29/09/2010	125,9	01/09/2013	31/12/2013	135,9

Tableau 12 : Evolution de l'indice TP 10a entre janvier 2004 et septembre 2013