



HAL
open science

Revue bibliographique des modèles pour gérer le patrimoine canalisations d'eau potable : rapport de première année de thèse

A. Large

► **To cite this version:**

A. Large. Revue bibliographique des modèles pour gérer le patrimoine canalisations d'eau potable : rapport de première année de thèse. [Rapport de recherche] irstea. 2013, pp.147. hal-02603655

HAL Id: hal-02603655

<https://hal.inrae.fr/hal-02603655>

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.

Revue bibliographique des modèles pour gérer le patrimoine canalisations d'eau potable

Auteur :

Aurore LARGE

Encadrement :

Dr. Yves LE GAT
Dr. S. M. ELACHACHI
Ing. Eddy RENAUD
Dr. Denys BREYSSE

Première version le 15/11/2013 révisée le 14 novembre 2015



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

Archiduc Otto de Habsbourg-Lorraine

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier les trois autorités organisatrices qui financent le projet « optimeau », nous fournissent leur 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 mon comité d'encadrement : Dr. Yves LE GAT, Dr. Sidi-Mohammed ELACHACHI, Ing. Eddy RENAUD et Pr. Denis Breysse. 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 » pour leurs regards critiques tant sur le point pratique que théorique.

Merci aux personnes que j'ai interviewé. . .

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.

Table des matières

Remerciements	ii
Table des matières	iii
Liste des Figures	ix
Liste des Tables	xii
Abbréviations	xiv
Symboles	xvi
Introduction	1
1 Etat de l'art des modèles pour la gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable	3
1.1 Les centres les plus actifs dans le développement de modèles en gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable	3
1.2 Chronologie de naissance de la première version des logiciels de gestion du patrimoine eau potable	4
1.3 Modèles et leurs échelles	5
1.3.1 Des modèles de différentes échelles de temps et d'espace	5
1.3.2 Échelles spacio-temporelles des modèles dans les logiciels	6
1.4 Logiciels VS modèles	7
1.4.1 Les 4 grandes familles de modèles	7
1.4.2 Focus sur le risque, une notion polysémique	7
1.4.2.1 Définition historique du risque*	7
1.4.2.2 Définition moderne du risque	8
1.4.2.3 Calcul du risque	9
1.4.3 Classification des logiciels par famille de modèles	10
1.4.4 Liens entre les modèles et classification des modèles par sous-familles	12
I Modèles de la famille M1 : Prédiction de la dégradation	15
2 Modèles de la famille M1 : modèles déterministes, estimation de la probabilité de défaillance future de tronçons	16
2.1 Préliminaire, définition d'un modèle « déterministe »	16
2.2 Modèle déterministe, linéaire	17
2.2.1 Modèle [Kettler and Goulter, 1985], notamment dans Kanew linéaire	17
2.2.2 Modèle [Jacobs and Kerney, 1994]	17
2.2.3 Modèle [McMullen, 1982]	18

2.3	Modèle déterministe, fonction puissance	18
2.3.1	Kanew puissance	18
2.4	Modèle déterministe, de type exponentiel	18
2.4.1	Modèle [Shamir and Howard, 1979]	18
2.4.2	Modèle [Walski and Pelliccia, 1982]	19
2.4.3	Modèle dans le logiciel T	19
2.4.4	Modèle [Clark et al., 1982]	20
2.5	Synthèse	21
2.5.0.1	Bilan des variables explicatives prises en compte	21
2.5.0.2	Echelle de temps et d'espace	21
2.5.0.3	Conclusion	21
3	Modèles de la famille M1 : modèle probabiliste, estimation de la probabilité de défaillance future de chaque tronçon	22
3.1	Préliminaire, définition d'un modèle « Probabiliste »	22
3.2	Modèle de Poisson, dans CARE-W-Poisson	23
3.2.1	Description du modèle	23
3.2.2	Synthèse	24
3.3	Modèle de Weibull, notamment dans CARE-W-PHM	24
3.3.1	Description du modèle	24
3.3.2	Synthèse	26
3.4	Modèle [Mailhot et al., 2000]	26
3.5	Processus de Poisson non homogène, dans notamment CARE-W-NHPP	26
3.5.1	Description du modèle	26
3.5.2	Synthèse	28
3.6	Processus de Yule Linéairement Etendu, notamment dans Casses	28
3.6.1	Description du modèle	28
3.6.2	Synthèse	29
3.7	Synthèse	30
II	Modèles de la famille M0 : linéaire à renouveler	31
4	Modèle de la famille M0 : modèle déterministe d'estimation du besoin en renouvellement futur des canalisations	32
4.1	Méthode « taux de renouvellement fixe »	32
4.2	Modèle [Cador, 2002a]	33
4.3	Modèle [Randall-Smith et al., 1992]	34
4.4	Patrimoine expert	34
4.5	Synthèse	36
5	Modèle de la famille M0 : modèle probabiliste d'estimation du besoin en renouvellement futur des canalisations	37
5.1	NESSIE	37
5.1.0.1	Estimation de la densité de l'âge à la mise hors service des tronçons	37
5.1.0.2	Estimation des besoins en renouvellement	38
5.1.0.3	Estimation des coûts du renouvellement futurs	38
5.2	Kanew	39
5.2.1	Calcul des conséquences de la stratégie de réhabilitation	42
5.2.2	Synthèse de Kanew	42
5.3	PARMS-Planning	42

5.4	Modèle [Malm et al., 2012]	43
5.5	Modèle [Le Gat et al., 2013]	43
5.6	Synthèse	44
III	Modèles de la famille M2 : Risque	45
6	Modèles de la famille M2 : Impact d'une coupure d'eau vis-à-vis des consommateurs	46
6.1	Préliminaire	46
6.2	CARE-W-ARP	47
6.2.1	Vulnérabilité des consommateurs	47
6.2.2	Nombre de consommateurs affectés par les interruptions de service	48
6.2.3	Fréquence des interruptions de service	49
6.3	CARE-W-RelNet	49
6.4	CARE-W-Relnet à Lausanne	50
6.5	Criticité	51
6.6	SIROCO	52
6.7	Logiciel T	52
6.8	PARMS	53
6.9	Aware-P	53
6.10	Modèle [Scholten, 2013]	54
6.11	Indicateurs d'évaluation de l'IWA	54
6.11.1	par personne	54
6.11.2	par branchement	55
6.12	Indicateurs d'évaluation du RPQS	55
6.13	Synthèse	56
6.13.1	Echelle de temps	56
6.13.2	Echelle d'espace	57
7	Modèles de la famille M2 : Impact des travaux sur les usagers des voiries	58
7.1	Préliminaire	58
7.2	CARE-W-ARP	59
7.3	SIROCO	60
7.4	Logiciel T	60
7.5	PARMS	61
7.6	Synthèse	61
7.6.0.1	Échelle de temps	61
7.6.0.2	Échelle d'espace	62
8	Modèles de la famille M2 : Impact d'une inondation provoquée par une fuite sur la zone urbaine	63
8.1	Préliminaire	63
8.2	CARE-W-ARP	64
8.3	Logiciel T	65
8.4	Synthèse	66
8.4.0.3	Échelle de temps	66
8.4.0.4	Échelle d'espace	66
9	Modèles de la famille M2 : Impact d'un glissement de terrain provoqué par une fuite	67
9.1	Préliminaire	67
9.2	CARE-W-ARP	68

10 Les modèles sur la qualité de l'eau liée au réseau	69
10.1 Modèles de la famille M1 : Détérioration de la qualité de l'eau lié au réseau, Q-WARP	69
10.2 Modèles de la famille M2 : Impact d'une eau de mauvaise qualité vis-à-vis des consommateurs	70
10.2.1 Préliminaire	70
10.2.2 CARE-W-ARP	70
10.2.3 RPQS	71
10.2.3.1 microbiologie	71
10.2.3.2 physico-chimie	71
10.2.4 Synthèse	72
10.2.4.1 Échelle de temps	72
10.2.4.2 Échelle d'espace	72
IV Modèles de la famille M3 : Économique	73
11 Modèles de la famille M3 : Économiques	74
11.1 Préliminaire	74
11.1.1 Quels sont les effets qui peuvent être monétarisés ?	74
11.1.2 Classification des principales méthodes pour estimer les coûts (et les bénéfices)	76
11.2 CARE-W-ARP	77
11.3 Logiciel T	78
11.4 Aware-P	78
11.5 SIROCO	79
11.6 Modèle [Shamir and Howard, 1979]	80
11.7 Modèle [Walski, 1987]	81
11.8 Modèle [Park, 2000]	82
11.9 Modèle [Cousin et Taugourdeau, 2015]	82
11.10 Vision	82
11.10.0.1 Coût	82
11.10.0.2 Bénéfice	82
11.10.0.3 Solde	83
11.11 Kanew	83
11.11.1 Bénéfice 1 = coûts annuels évités sur $[0; \Theta]$ par la réduction des réparations d'urgence grâce aux défaillances évitées suite à la stratégie du gestionnaire	83
11.11.2 Bénéfice 2 = coûts annuels évités par la réduction des fuites sur Θ	83
11.11.3 Coût 1 = Coût annuel d'investissement sur Θ	84
11.11.4 Coût 2 = Coût annuel d'entretien, d'inspection et de réparation sur Θ	84
11.11.5 Solde = Solde annuel entre les bénéfices et les coûts sur Θ	84
11.12 WiLCO	84
11.13 PARMS	85
11.14 Modèle [Davis et al., 2008]	85
11.14.1 Préliminaire	85
11.14.2 Estimation des coûts	86
11.14.3 Estimation des bénéfices	87
11.15 Synthèse	87
11.15.1 Les données prises en compte dans les modèles économiques	87
11.15.2 Échelle de temps	88
11.15.3 Appartenance à quelles familles de modèles économiques ?	88
11.15.4 Échelle d'espace	89

V	Autres critères d'arbitrage	90
12	Autres critères d'arbitrage	91
12.1	Préliminaire	91
12.2	Coordination entre contraintes et opportunités	92
12.2.1	CARE-W-ARP	92
12.2.2	SIROCO	92
12.2.3	Synthèse	92
12.2.3.1	Échelle de temps	92
12.2.3.2	Échelle d'espace	92
12.3	Volume de fuites	93
12.3.1	SIROCO	93
12.3.2	CARE-W-ARP	93
12.3.3	Kanew	94
12.3.4	TCO-LCA-PAM	94
12.3.5	Vision	94
12.3.6	Indicateurs d'évaluation du RPQS	95
12.3.7	Synthèse	95
12.3.7.1	Échelle de temps	95
12.3.7.2	Échelle d'espace	96
12.4	Urbanisation entre contraintes et opportunités	96
12.4.1	SIROCO	96
12.4.2	CARE-W-ARP Lausanne	96
12.5	Synthèse	97
VI	Modèles de la famille M4 : décisionnel	98
13	Modèles de la famille M4 : prise en compte des décisions	99
13.1	Préliminaire	99
13.2	Analyse multi-critères simple	100
13.3	Analyse multi-critères avec agrégation complète	101
13.3.1	SIROCO	101
13.3.1.1	Normalisation des critères	101
13.3.1.2	Calcul du score d'impact	101
13.3.1.3	Calcul du score d'opportunité	101
13.3.1.4	Calcul du score global	102
13.3.2	MOSARE	102
13.4	Analyse multi-critères avec agrégation partielle	103
13.4.1	CARE-W-ARP	103
13.4.2	Kanew	103
13.5	Synthèse	104
14	Définition du cadre méthodologique	105
14.1	Contexte méthodologique	105
14.2	Résumé du cadre méthodologique	106
14.2.1	Le modèle de prédiction de la dégradation	106
14.2.2	L'estimation des besoins en renouvellement	107
14.2.3	Modèle décisionnel et économique	107
14.3	Illustration du cadre méthodologique : modèle de prédiction de la dégradation	107
14.3.1	Etape 1 : Courbes brutes de mise hors service des tronçons archivés	107

14.3.2	Etape 2 : Courbes corrigées de mise hors service des tronçons archivés	108
14.3.3	Etape 3 : les méthodes décisionnelles	110
14.4	Conclusion	112
A	Les structures ayant développés des outils d'aide à la décision en gestion patrimoniale des réseau d'eau potable	113
B	Les modèles dans les logiciels	115
C	Validation des modèles probabiliste de défaillance (M1)	116
D	Densité, fonction de répartition et fonction de survie de Loi statistiques	118
D.1	Cas général	118
D.2	Loi normale	119
D.3	Loi de Herz	119
D.3.1	Densité de probabilité $f(t)$	119
D.3.2	Fonction de survie $S(t)$	119
D.3.3	Espérance et variance	119
D.3.4	Graphiques	120
D.4	Loi de Weibull	120
D.5	Loi de Poisson	120
	Bibliographie	121

Table des figures

1	Quelques caractéristiques des 3 terrains d'études	2
1.1	Les structures qui ont développés des outils d'aide à la décision en gestion patrimoniale	4
1.2	Chronologie de naissance de la première version des logiciels de gestion du patrimoine eau potable (le drapeau indique le pays d'origine)	5
1.3	Les différentes échelles de temps et d'espace	5
1.4	Les différentes échelles de temps et d'espace des modèles dans les logiciels	6
1.5	Les 4 familles de modèles et leurs liaisons possibles	7
1.6	Schéma représentant le sens historique du mot risque*	8
1.7	Schéma des 3 éléments du risque	8
1.8	Méthode pour estimer le niveau d'un risque de dommage	9
1.9	Méthode pour calculer le niveau d'un risque de dommage	10
1.10	Les modèles dans les logiciels	11
1.11	Liens entre les modèles court terme	12
1.12	Les sous familles de modèles et liens entre eux sur du court termes ainsi que les chapitres associés à ce rapport	13
1.13	Liens entre les modèles long terme ainsi que les chapitres associés à ce rapport	14
2.1	Les modèles de la famille M1, dont M1 quantitatif (en rouge)	16
2.2	Représentation d'une variable déterministe avec m sa moyenne	17
2.3	Variables explicatives prises en compte par les modèles déterministes présentés (X : variable dans l'équation / + : variable prise en compte si une stratification est réalisée)	21
3.1	Représentation de la densité, de la fonction de répartition et de la fonction de survie d'une variable aléatoire dans un modèle « Probabiliste » de médiane μ et d'écart type σ	22
3.2	Distribution de probabilité et fonction de survie d'une variable aléatoire suivant une loi statistique de Poisson de paramètre $\lambda = 5$	23
3.3	Temps séparant 2 défaillances successives X, sur le même tronçon	25
3.4	Densité de probabilité et fonction de survie d'une variable aléatoire suivant une loi statistique de Weibull de paramètre (4;3)	25
3.5	Processus de comptage $N(t)$	27
3.6	Densité de probabilité et fonction de survie d'une variable aléatoire suivant une loi statistique de Bernoulli de paramètre 0,7	28
4.1	Fonction de survie d'une cohorte lorsqu'on ne considère que l'âge moyen à la mise hors service	34
4.2	Exemple de sortie du logiciel Patrimoine Expert	35
4.3	Variables explicatives prises en compte par les modèles déterministes présentés précédemment permettant d'estimer les besoins en renouvellement (X : variable dans l'équation / + : variable prise en compte si une stratification est réalisée)	36
5.1	Densité de probabilité et fonction de survie d'une loi normale de paramètres (50;10)	37
5.2	Âges à la mise hors service médians des canalisations pour différentes strates [AWWA, 2010, p. 8]	38

5.3	Coûts prévionnels du remplacement des canalisations par région	39
5.4	Densité de probabilité et fonction de survie d'une variable aléatoire suivant une loi de Herz de paramètres $a = 12$, $b = 0.03$ et $c = 10$	39
5.5	Méthode pour construire $S(t)$ et son intervalle de confiance min/max	40
5.6	Courbe de survie de Herz $S(t)$ [Herz and Kropp, 2002, p. 48]	40
5.7	Vert : Courbe de survie de Herz paramétrée avec les données sur les canalisations du SEDIF (1995-2007). Bleu : Courbe de survie empirique (répartition de Turnbull) des canalisations du SEDIF (1995-2007)	41
5.8	Densité de probabilité $f(t)$ de Herz	41
5.9	Les choix stratégiques possibles dans PARMs	43
6.1	Liens des modèles de risque « continuité » (en rouge) avec les autres modèles	46
6.2	Schéma du risque de dérangement des consommateurs lié à une coupure d'eau (ou une baisse de volume) induite par une fuite sur le réseau	47
6.3	Détail des étapes de CARE-W-RelNet	50
7.1	Lien des modèles de risque « voirie » avec les autres modèles, court terme	58
7.2	Schéma du risque dérangement des usagers de la voirie suite à une fuite d'eau	59
8.1	Liens entre les modèles risque « inondation » et les autres modèles, court terme	63
8.2	Schéma du risque de dégradation de biens par une inondation liée à une fuite	64
9.1	Liens entre les modèles risque « glissement de terrain » et les autres modèles, court terme	67
9.2	Schéma du risque de dégradation de biens et de personnes par un effondrement de terrain liée à une fuite	68
10.1	Schéma du risque de rendre les consommateurs d'eau du robinet en mauvaise santé suite à un problème du réseau	70
11.1	Liens entre les modèles économiques et les autres sur du court terme	74
11.2	Effets négatifs d'une réparation/renouvellement d'une canalisation (anthropocentrée) qui peuvent être monétarisés	75
11.3	Effets positifs du renouvellement d'une canalisation au « bon » moment (anthropocentrée) qui peuvent être monétarisés	76
11.4	Synthèse des différentes méthodes d'estimation des coûts (et des bénéfiques)	77
11.5	Avantages et inconvénients des différentes méthodes d'estimation des coûts (et des bénéfiques)	77
11.6	Exemple de calcul de la date optimale de renouvellement [Shamir and Howard, 1979]	81
11.7	Méthode d'évaluation des bénéfiques	87
11.8	Synthèse des aspects économiques pris en compte dans les modèles économiques présentés précédemment	87
11.9	Synthèse des familles de modèles économiques auxquelles appartiennent ces modèles	88
12.1	Schéma des autres critères permettant d'arbitrer les décisions (en rouge)	91
13.1	Liens des modèles décisionnels avec les autres modèles, court terme	99
13.2	Schéma de fonctionnement du modèle décisionnel WRaP	103
14.1	Les logiciels employés dans les terrains d'étude	105
14.2	Proportion de tronçons en fonte grise archivés à Eauservice Lausanne	107
14.3	Courbe « brute » de mise hors service des tronçons en fonte grise à Eauservice Lausanne, fonction de survie des âges à la mise hors service	108
14.4	La notion de troncature à gauche et de censure. Date de mise hors service (DHS) des tronçons en fonte grise à Lausanne en fonction du nombre de tronçons	109

14.5	Courbe de mise hors service des tronçons en fonte grise (Lausanne). En bleu : courbe brute, en rouge : courbe corrigée par la méthode de Turnbull	110
14.6	Schéma de la prise de décision au Grand Lyon pour le renouvellement des canalisations, première partie	111
14.7	Schéma de la prise de décision au Grand Lyon pour le renouvellement des canalisations, deuxième partie	112
C.1	Schéma de la période de validation [Renaud, 2011, dia 29]	116
C.2	Evaluation de la performance prédictive des modèles [Le Gat, 2014]	117
D.1	Densité de probabilité et fonction de survie d'une variable aléatoire suivant une loi de Herz de paramètres $a = 12$, $b = 0.03$ et $c = 10$	120

Liste des tableaux

1.1	Les différentes échelles de temps des modèles et des logiciels de prévision (ex-ante)	6
2.1	Valeurs d'AgeHS par strate	20
3.1	Synthèse, modèle implémenté selon le logiciel	30
3.2	Avantages et inconvénients des différents modèles	30
4.1	Exemple d'âge à la mise hors service à dire de [Bruyeron and Re, 2012b].	33
4.2	Correspondance entre l'indice de renouvellement en pourcentage et l'indice de renouvellement en classe [Naldeo, 2013].	35
5.1	Valeurs de a, b et c	43
5.2	Critère principal pris en compte pour estimer les besoins en renouvellement pour les simulations moyen ou long terme	44
6.1	Valeurs de tr à Reggio Emilia (Italie)[Haidar, 2006, p. 64] (AC = amiante-ciment)	47
6.2	Valeurs de tr à Lausanne [Apotheloz, 2009, p. 4] (PE = polyéthylène)	48
6.3	Valeurs de tr au Grand Lyon [Gd Lyon, 2013]	48
6.4	Valeurs de SC à Reggio Emilia (Italie)[Haidar, 2006, p. 64]	48
6.5	Valeurs de SC Lausanne [Apotheloz, 2009, p. 5]	48
6.6	Valeurs de NBH à Lausanne	49
6.7	Exemple de valeurs de ω	51
6.8	Valeurs de IH	52
6.9	Valeurs de tr et ISC	52
6.10	Valeurs de C_{SCI} (dollars/client/heure)	53
6.11	Indicateurs de niveau de risque (ex-ante)	56
6.12	Indicateurs de niveau de dommages (ex-post)	56
6.13	Echelle d'espace des indicateurs	57
7.1	Valeurs de SR à Reggio Emilia (Italie) [Haidar, 2006, p. 70]	59
7.2	Valeurs de SR au Grand Lyon [Grand Lyon, 2013]	59
7.3	Valeurs de NTR	60
7.4	Valeurs de tr (heures/défaillance)	60
7.5	Valeurs de CSV	60
7.6	Valeurs de C_{TD} (dollars/véhicule/heure)	61
7.7	Indicateurs du niveau de risque (ex-ante)	61
8.1	Exemple de valeurs de VFH [Grand Lyon, 2013]	64
8.2	Exemple de valeurs de VFI [Grand Lyon, 2013]	65
8.3	Valeurs de SI à eauservice Lausanne [Apotheloz, 2009, p.7]	65
8.4	Valeurs de Za	66
8.5	Indicateurs du niveau de risque (ex-ante)	66

9.1	Exemple de valeurs de LS [Grand Lyon, 2013]	68
10.1	Valeurs de WQD_i [Haidar, 2006, p. 74].	70
10.2	Valeurs de WQD_i [Grand Lyon, 2013]	71
10.3	Echelle d'espace des indicateurs	72
11.1	Valeurs de CUR_p en théorie (Euro)	78
11.2	Valeurs de CUR_p (CHF) à Lausanne	78
11.3	Valeurs de SFr (Francs Suisse)	78
11.4	Valeurs de $CLRN$ (€)	79
11.5	Valeurs de $CUHM$ (€)	80
11.6	Echelle d'espace des indicateurs	89
12.1	Valeurs de COS à Reggio Emilia (Italie)	92
12.2	Valeurs théoriques de CC	92
12.3	Valeurs de WLI [Haidar, 2006, p. 74] à Reggio Emilia (Italie)	93
12.4	Valeurs de WLI [Grand Lyon, 2013]	93
12.5	Echelle de temps des indicateurs	95
12.6	Echelle d'espace des indicateurs	96
12.7	Valeurs de BR	96
12.8	Valeurs de DIM_i	97

Abbréviations

LAH	List Abbreviations Here
ACB	Analyse Coûts Bénéfices
ARP	Annual Rehabilitation Programmes
AWWA-RF	American Water Works Association- Research Foundation (GB) - association américaine des travaux liés à l'eau – fondation pour la recherche (F)
CARE-W	Computer Aided REhabilitation of Water networks (GB) = réhabilitation des réseaux d'eau potable assistée par ordinateur (F)
CEMAGREF	CEntre du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et Forêts
CNRC	Conseil National de la Recherche du Canada
CSIRO	the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (GB) = l'organisation pour la recherche scientifique et industrielle du Commonwealth (F)
Dia	Diapositive
D-WARP	Distribution mains Water Mains Renewal Planner (GB) = Planificateur du renouvellement des canalisations d'eau potable (F)
ELECTRE	ELimination Et Choix Traduisant la REalité
ERSAR	Entidade Reguladora dos Serviços de Aguas e Resíduos de Portugal (P) = autorité de régulation des services d'eau et des déchets du Portugal (F)
F	France
FAIL	FAILure prédiction
GB	Grande Bretagne
I-WARP	Individual distribution mains Quality Water Mains Renewal Planner
ILP	Indice Linéaire de Perte
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
IRSTEA	Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
IST	Instituto Superior Técnico (P) = Institut supérieur technique (F)
IWA	International Water Association
LCC	Life Cycle Cost

LEYP	Linearly Extended Yule Process (GB) = processus de Yule linéairement étendu (F)
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil (P) = laboratoire national de génie civil (F)
LTP	Long Term Planning
MOSARE	MOdule Statistique d'Analyse des Réseaux d'Eau
NES	Note Etat de Santé
NETWATER	Network Water (GB) = réseau d'eau (F)
NHPP	Non Homogeneous Poisson Process
P	Portugal
PARMS	Pipeline Asset and Risk Management System (GB) = système de gestion des risques et des canalisations (F)
PHM	Proportionnal Hazard Model
PI	Performance Indicators
PiReM	Pipe Rehabilitation Management (PiReM)
PREVOIR	Plan de Renouvellement Et de Valorisation OptImisée des Réseaux
PRMS	Pipeline Risk Management System (GB) = système de gestion des risques liés aux canalisations (F)
Q-WARP	Quality Water Mains Renewal Planner
REL	RELIability Analysis
RET	Remaining Time to Failure (GB) = l'époque probable restant avant la casse (F)
RPQS	Rapport sur le Prix et la Qaulité des Services
SEDIF	Syndicat des Eaux d'Ile de France
SIG	Système d'Information Géographique
SIROCO	Système Intégré d'aide au Renouvellement Optimisé des COnduites adapté aux petites et moyennes collectivités
T-WARP	Transmission mains Water Mains Renewal Planner
VAN	Valeur Actuelle Nette
WARP	Water Mains Renewal Planner
WLC	Whole Life Cost

Symboles

Notations	Signification	Détails
a, b, c	Paramètres à déterminer	minuscule
B	Bénéfices (en euros, dollars ou francs)	majuscule
C	Coûts (en euros, dollars ou francs)	majuscule
$dN(t)$	Différentielle de $N(t)$	
$E(X), E(T)$	Espérance de la variable aléatoire	majuscule
$E(X A)$	Espérance conditionnelle de la variable aléatoire X sachant A	majuscule
$f(x), f(t)$	Densité de probabilité de la variable aléatoire [e.g. $f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$]	minuscule
$F(x), F(t)$	Fonction de répartition de la variable aléatoire [e.g. $F(t) = \mathbb{P}\{T \leq t\}$]	
$h(x), h(t)$	Fonction de risque instantané de la variable aléatoire [e.g. $h(x) = \frac{f(x)}{S(x)}$]	minuscule
H	Pression	majuscule
i	Numéro (index) du tronçon	minuscule
L	Longueur	majuscule
\ln	logarithme népérien	minuscule
N	Variable aléatoire : nombre de défaillances de l'objet technique durant un intervalle de temps fixe Δt	majuscule
n_1, \dots, n_k	Réalisation de la variables aléatoire N	minuscule
$N(t)$	Fonction en escalier (à valeurs entières) de comptage des défaillances	
n	Nœud numéro n	minuscule
$P(\cdot)$	Loi de Poisson de paramètres \cdot	
\mathbb{P}	Probabilité	majuscule
Q	Débit, demande	majuscule
r	Taux d'actualisation constant sur Θ	minuscule
r_t	Taux d'actualisation l'année t	minuscule
Notations	Signification	Détails

$S(x), S(t)$	Fonction de survie de la variable aléatoire [e.g. $S(t) = \mathbb{P}\{T > t\}$]	
T	Variable aléatoire : âge, de l'objet technique, à la mise hors service	majuscule
t, t_1, \dots, t_k	Réalisations de la variables aléatoire T	minuscule
$t-$	Instant juste avant t	minuscule
tr	Temps de réparation	minuscule
V	Volume	majuscule
X	Variable aléatoire : temps séparant deux défaillances successives sur l'objet technique (tronçon, bief, mégabief,...)	majuscule
x, x_1, \dots, x_k	Réalisations de la variable aléatoire X	minuscule
$X \sim \cdot$	La variable aléatoire X suit une loi de \cdot	
Z_k	Facteur de « risque » de défaillances numéro k propre à l'objet technique (aussi nommé variable explicative ou covariable)	
α	Coefficient de régression	minuscule
$\beta, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$	Coefficients de régression	minuscule
γ	Coefficient de régression	minuscule
Δt	Pas de temps	delta t
δ	Paramètre à déterminer	delta
$\delta\delta$	Nombre annuel de défaillances estimé	dellta x2
Θ	Horizon temporel	majuscule
θ	Vecteur contenant les paramètres à déterminer	minuscule
λ	Paramètre d'une loi statistique	minuscule
μ	Moyenne	mu minuscule
Σ	Somme	majuscule
σ	Écart-type	minuscule
τ	Temps en année	tau minuscule
ϕ	Diamètre (en mm)	phi minuscule

Introduction

Ce rapport s'inscrit dans le cadre de la première année de thèse dont le titre est actuellement « Distribution optimale de la durée de maintien en service des canalisations d'eau potable ».

Les enjeux sur la gestion patrimoniale sont forts. Le linéaire de réseau d'eau potable est important (870 000 km en France), et la valeur des ouvrages est élevée (entre 120 et 170 milliards d'euros en France dont 70 % correspond au réseau lui-même) [Bouleau and Guérin-Schneider, 2011]. Malheureusement le réseau est souvent mal connu car le plus souvent enterré donc non visible. De plus le gestionnaire a des contraintes ou des opportunités externes à son service d'eau potable (coordination, urbanisation, réglementation et santé...) qui peut amener à renouveler des canalisations pas forcément en mauvais état.

La problématique de la thèse est qu'actuellement les modèles utilisés en gestion patrimoniale sont limités. Le raisonnement actuel sur le long terme considère comme causes de renouvellement :

- soit le seul dépassement d'un taux de défaillances maximum admissible
- soit/et l'atteinte d'une « durée de vie » fixée à dire d'expert.

De plus les modèles de dégradation actuels ne sont pas conçus pour produire des prédictions statistiques fiables à long terme à l'échelle du tronçon.

L'objectif de la thèse est de participer à la conception d'un modèle à long terme, qui s'articule correctement avec les modèles court terme, contenant un modèle de dégradation adapté à cette échelle. En premier lieu, ce travail de thèse vise à contribuer, en ce qui concerne l'IAM (Infrastructure Asset Management) des réseaux d'eau, à définir la distribution de la durée de maintien en service comme fonction de l'état des conduites et de leur criticité. La formulation probabiliste de cette question devra tenir compte :

- de la multi-dimensionnalité de la criticité des conduites (conséquences des interruptions de service, coûts socio-économiques directs et indirects de la défaillance et de la réparation, difficultés d'intervention, coordination des travaux entre réseaux tiers, etc.) et de leur performance,
- du fait que la mise hors service d'un tronçon de réseau résulte de causes concurrentes, à savoir la restructuration de la voirie, les défaillances répétées, la criticité ou l'obsolescence (principalement, nécessité d'un changement de diamètre ou de matériau),
- et de la nécessité de regrouper les travaux de réhabilitation du réseau en chantiers de tailles suffisantes (éviter « l'émiettement » des travaux dans le temps et dans l'espace).

Dans ce cadre le syndicat des eaux d'Ile de France (SEDIF), le service des eaux de Lausanne (Eauservice Lausanne) et la communauté urbaine de Lyon (Grand Lyon) financent le projet « optimeau » et fournissent leurs données afin d'avancer sur cette problématique. La figure 1 présente quelques caractéristiques de ces trois terrains d'études.

	Nb usagers (hab)	Superficie (km ²)	Densité (hab/km ²)	Linéaire de réseau (km)	Nb habitants pour 1 km de réseau	Nb de communes
SEDIF	> 4 000 000	> 800	5 690	8 300	482	149
Gd Lyon	1 300 000	525	2 490	3 900	333	58
Eauservice Lausanne	330 000	230	1 430	900	367	17 + 19

FIGURE 1: Quelques caractéristiques des 3 terrains d'études

Le projet « optimeau » est aussi soutenu financièrement par l'agence de l'eau Seine-Normandie, 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).

Ce rapport se présente en deux parties :

- Tout d'abord les chapitres 2 à 12 font une synthèse bibliographique des modèles les plus utilisés ou les plus cités en gestion patrimoniale.
- ensuite le chapitre 13 définit le cadre méthodologique dans lequel le travail de thèse va se poursuivre les 2 prochaines années.

Chapitre 1

Etat de l'art des modèles pour la gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable

1.1 Les centres les plus actifs dans le développement de modèles en gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable

Plusieurs pays ont développé des outils dans la gestion patrimoniale des canalisations d'eau potable (cf. figure 1.1). [Marlow et al., 2014] a réalisé une très bonne revue bibliographique de ces modèles et logiciels. Le Conseil National de la Recherche du Canada (CNRC) est très actif avec le développement notamment de tous les outils de la famille WARP (Water Mains Renewal Planner) : D pour distribution mains, T pour Transmission mains, I pour Individual distribution mains et Q pour quality, ainsi que l'outil M-PRAWDS. L'Allemagne est aussi très énergique dans ce domaine avec notamment des associations entre centres de recherche et bureaux d'étude (cf. Kanew). En Europe le programme de recherche CARE-W (Computer Aided REhabilitation of Water networks) a révolutionné les outils existant et permis des collaborations multi-centres sur des outils. L'Australie est aussi dynamique dans ce domaine grâce à un outil qu'elle met à jour régulièrement au CSIRO (the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) : PARMS (Pipeline Asset and Risk Management System)(cf. figure 1.1 et annexe A).

Nom du logiciel	Créateur	Pays
W-PIPER	US Army	USA
KANEW	Université de Dresde + Baur&Kropp / 3S Consult	Allemagne
NESSE - NESSIE curve	South Australian Water Company	Australie
D-WARP	CNRC	Canada
Q-WARP	CNRC	Canada
I-WARP	CNRC	Canada
T-WARP	CNRC	Canada
WILCO	University of Exeter	Grande Bretagne
M-PRAWDS	CNRC	Canada
CDSS (TSM + CM)	AwwaRF	USA
SynerGEE reliability module	Germanischer Lloyd (GL)	Allemagne
PARMS	CSIRO	Australie
GAnetXIs	University of Exeter	Grande Bretagne
CARE-W-PHM	CEMAGREF-IRSTEA	France
CARE-W-Poisson	INSA Lyon	France
CARE-W-NHPP	SINTEF-NTNU	Norvège
CARE-W-ARP	INSA Lyon	France
CARE-W-RelNet	Brno Univ of technology	République Tchèque
CARE-W-FailNetReliab	CEMAGREF-IRSTEA	France
SIROCO	G2C Environnement + CEMAGREF-IRSTEA	France
PiReM Drinking Water	GUEP Software GmbH	Autriche
Casses	CEMAGREF-IRSTEA	France
MOSARE	Véolia	France
PREVOIR Canalisation	Lyonnaise des Eaux	France
Criticité	CEMAGREF-IRSTEA	France
Aware-P	LNEC + SINTEF-NTNU	Portugal + Norvège
PRMS	Vinci	France
FAST	Berlin	Allemagne
PHARE AEP	IRH	France
MRP	Germanischer Lloyd (GL)	Allemagne
WaterCAD Darwing Design Module	Bentley	USA
Vision	Véolia	France
Patrimoine expert	Naldeo	France
LCC	Ammar	Canada

FIGURE 1.1: Les structures qui ont développés des outils d'aide à la décision en gestion patrimoniale

1.2 Chronologie de naissance de la première version des logiciels de gestion du patrimoine eau potable

Les logiciels et les modèles en gestion patrimoniale existent depuis longtemps (par exemple dans les chapitres suivants nous présenterons le modèle de Shamir et Howard,1979). Les logiciels sont apparus plus tard avec l'avènement de l'informatique, par exemple WPIPER, logiciel militaire américain dans les années 1996 (cf. figure 1.2). Ce qu'il faut noter c'est que les modèles et les logiciels se sont souvent influencés les uns les autres. Par exemple le logiciel Kanew dont la première version date de 1999 a participé au programme de recherche CARE-W de 2004 ce qui a permis son amélioration.

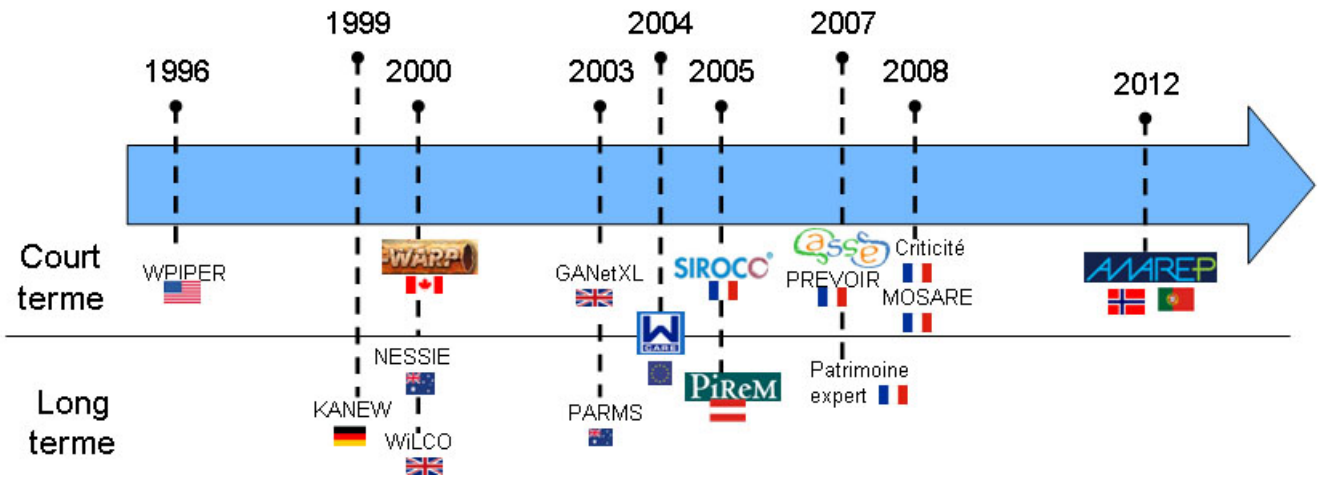


FIGURE 1.2: Chronologie de naissance de la première version des logiciels de gestion du patrimoine eau potable (le drapeau indique le pays d'origine)

1.3 Modèles et leurs échelles

1.3.1 Des modèles de différentes échelles de temps et d'espace

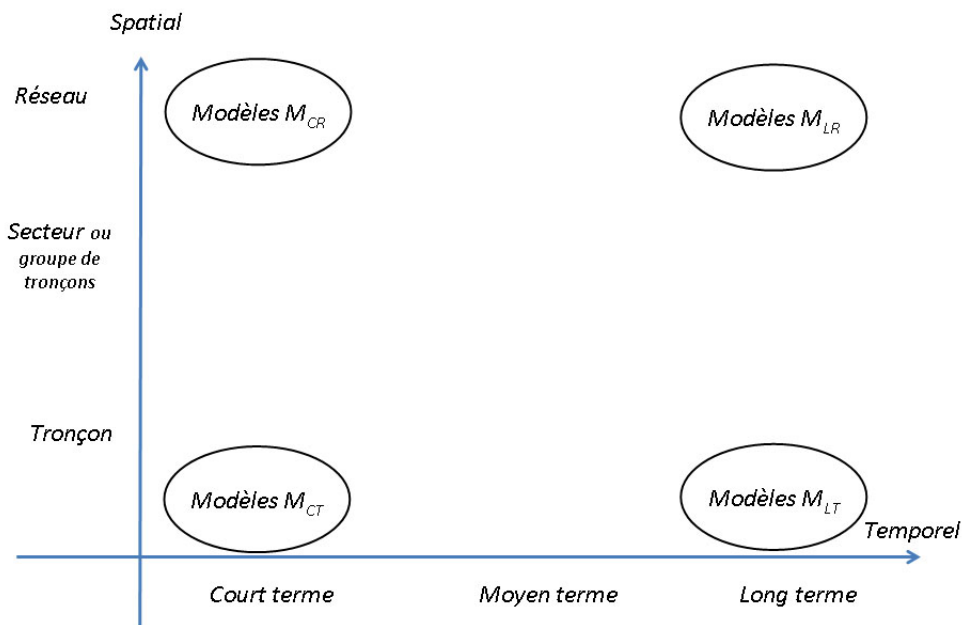


FIGURE 1.3: Les différentes échelles de temps et d'espace

Les logiciels d'aide à la décision sont capables de faire des prévisions à plus ou moins long terme (cf. tableau 1.1). Nous séparerons les modèles en court terme (c'est à dire à l'échelle du programme de travaux), moyen terme (à l'échelle du contrat de délégation ou du plan d'investissement du service) et long terme (à l'échelle de la durée de maintien en service des canalisations).

Type	Lien	Exemple
Court terme	Programme de travaux	3 ans
Moyen terme	Durée contrat de délégation ou budget investissement	15 ans
Long terme	Durée maintien en service des canalisations	70 ans

TABLE 1.1: Les différentes échelles de temps des modèles et des logiciels de prévision (ex-ante)

Selon les logiciels, les échelles spatiales sont très différentes (à l'échelle du tronçon ou d'un secteur ou du réseau dans son ensemble). Il est important de noter que les données d'entrée peuvent être à une échelle spatiale (ex : groupe de tronçons) différente des résultats sorties du modèle (ex : le réseau). Sur la figure 1.3 nous représentons l'échelle spatiale des sorties du modèle.

1.3.2 Échelles spacio-temporelles des modèles dans les logiciels

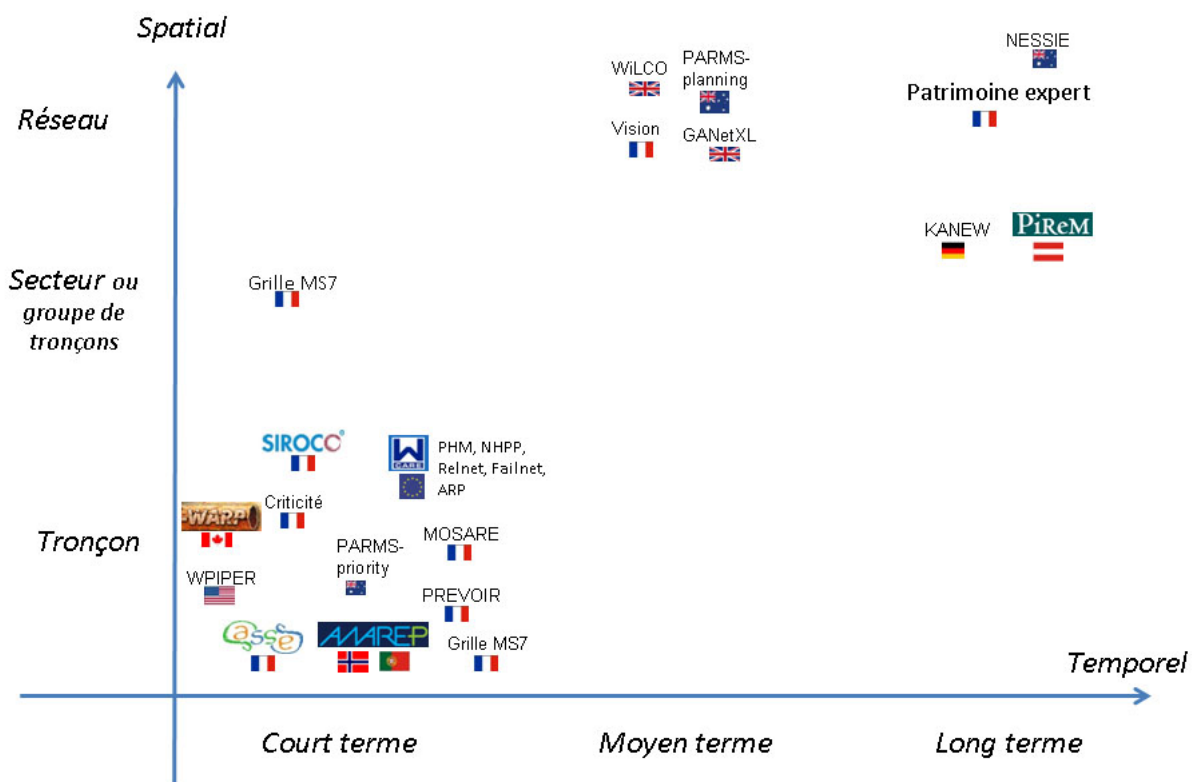


FIGURE 1.4: Les différentes échelles de temps et d'espace des modèles dans les logiciels

La majorité des logiciels et des modèles actuels donnent des résultats sur du court terme (cf. figure 1.4) à l'échelle du tronçon. Une poignée de modèles peuvent s'appliquer sur le long terme (Patrimoine expert, NESSIE, Kanew et PiReM).

1.4 Logiciels VS modèles

1.4.1 Les 4 grandes familles de modèles

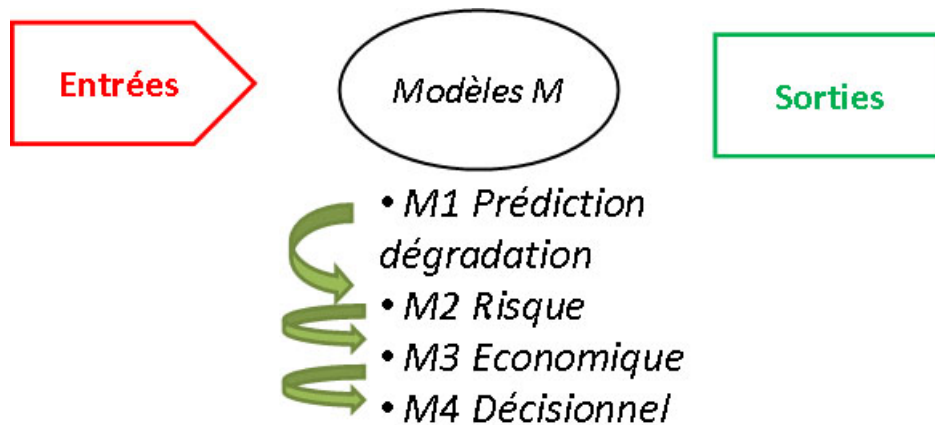


FIGURE 1.5: Les 4 familles de modèles et leurs liaisons possibles

Les logiciels d'aide à la décision pour la gestion des canalisations d'eau potable sont actuellement souvent composés de plusieurs modèles emboîtés les uns dans les autres.

- M1 sont des modèles permettant de prévoir la dégradation des fonctions de base des canalisations. Par exemple en estimant le taux de défaillances futures, ou encore en prévoyant quelle canalisation va colorer l'eau en rouge.
- M2 sont des modèles de risque, c'est à dire qu'ils prévoient les dommages potentiels lorsqu'un danger (casses, fuite, eau rouge...) rencontre des éléments vulnérables (consommateurs d'eau, véhicules, biens, etc.).
- M3 sont des modèles financiers et économiques, ils peuvent monétariser les coûts des dommages, les coûts des réparations, les coûts du renouvellement, mais aussi les bénéfices (qui sont le plus souvent des dommages évités ou de la satisfaction des usagers). Ces coûts et bénéfices peuvent être calculés du point de vue du gestionnaire mais aussi du point de vue de la société dans son ensemble.
- M4 sont des modèles décisionnels. Ils permettent de prendre en compte les priorités et les décisions prises.

Il est important de noter qu'en règle générale sur du court terme les sorties de M1 font partie des entrées de M2. De même, les sorties de M2 font partie des entrées de M3. Et enfin les sorties de M3 font partie des entrées de M4. (cf. figure 1.5).

1.4.2 Focus sur le risque, une notion polysémique

Le risque est une notion polysémique cf. [Taillandier, 2009]. Dans le langage actuel deux sens différents sont très largement utilisés. Pour les différencier nous noterons le sens 1 avec une étoile (*) et le sens 2 sans étoile. La première définition du mot risque* est assez large et est issue de sa très vieille histoire. Le deuxième sens du mot risque est une définition bien plus moderne, plus récente et plus circonscrite que la précédente.

1.4.2.1 Définition historique du risque*

Etymologiquement, le mot risque* serait issue du mot latin *resecum*, apparu pour la première fois dans des textes du moyen âge, vers 1156. Ce mot était très largement employé à cette époque dans le commerce maritime. A cette époque *resecum* signifiait « rocher escarpé, qui coupe ». Dans les textes de l'époque ce mot

était toujours utilisé avec deux autres mots *periculum* (péril) et *fortuna* (fortune) (cf. figure 1.6) [Pradier, 2006] .

Au cours du temps, l'évolution de la langue a donné le sens suivant au mot risque* : fait de s'engager dans une action qui pourrait apporter un avantage mais qui comporte l'éventualité d'un péril.

C'est une définition très large du mot risque* qui est encore employé dans divers domaines, notamment dans le domaine du management du risque* en entreprise. Ainsi de manière équivalente la norme [ISO-73, 2009] définit le risque* comme l'effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs. Ici l'évènement risqué* peut influencer positivement ou négativement les objectifs du projet.

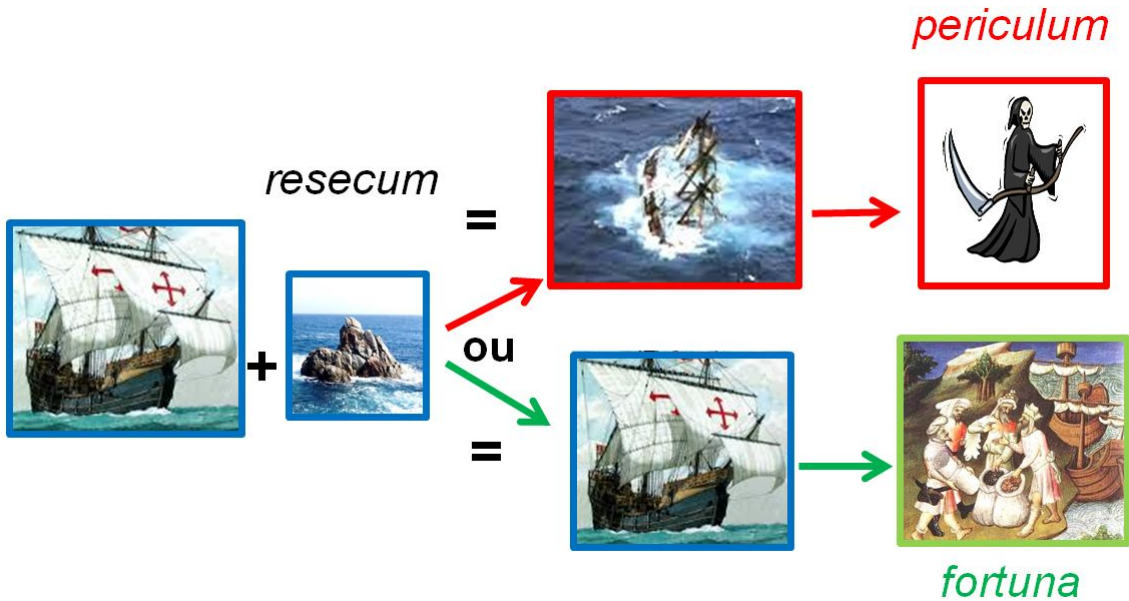


FIGURE 1.6: Schéma représentant le sens historique du mot risque*

1.4.2.2 Définition moderne du risque

La définition plus récente du risque est la suivante : le risque est l'éventualité d'un évènement ne dépendant pas exclusivement de la volonté des parties et pouvant causer la perte d'un objet ou tout autre dommage [Le Robert]. C'est ce sens que nous utilisons dans les modèles M2 de risque.

Le risque dans ce cas est issu de la rencontre possible d'un danger et d'éléments vulnérables aboutissant à des dommages (cf. figure 1.7). Le découpage en ces 3 éléments sera notre grille de lecture pour comparer les modèles de risque entre eux dans les chapitres suivant. Cette définition est plus circonscrite que la précédente car seul l'aspect « péril » est pris en compte.

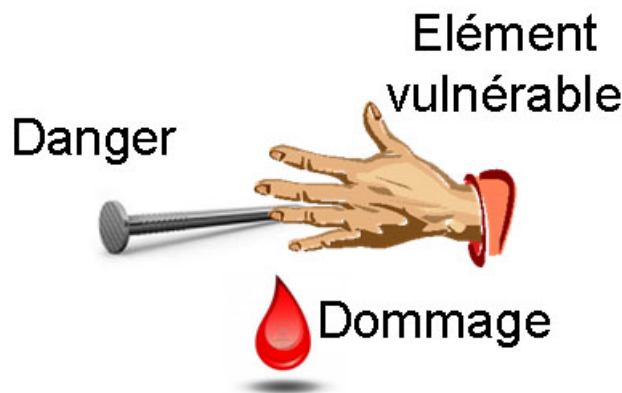


FIGURE 1.7: Schéma des 3 éléments du risque

1-Le danger est la propriété intrinsèque à une substance (butane, chlore . . .) ou à un système technique (mise sous pression d'un gaz, . . .) ou à une disposition (élévation de charge, . . .) ou à un organisme (microbes, . . .) etc. de nature à provoquer un dommages sur un élément vulnérable [Circulaire IC, 7 Octobre 2005].

2-Les éléments vulnérables sont des éléments tels que les personnes, les biens ou les différentes composantes de l'environnement susceptibles, du fait de l'exposition au danger, de subir, en certaines circonstances, des dommages [Circulaire IC, 7 Octobre 2005].

3- Le dommage est un dégât matériel ou physique, à une chose ou une personne.

1.4.2.3 Calcul du risque

Les indicateurs utilisés pour calculer le niveau des risques de dommage afférents aux réseaux d'eau potable sont, en général, toujours construit de la même façon :

- soit le calcul consiste en la multiplication de la probabilité d'occurrence de défaillance par l'intensité de la défaillance par au moins une caractéristique des éléments vulnérables : leur quantité, leur vulnérabilité ou leur valeur.
- soit l'estimation résulte de la multiplication de la probabilité d'occurrence du dommage par la gravité de ce dernier (cf. figure 1.8) .

Ces deux manières d'écrire les équations sont strictement équivalentes.

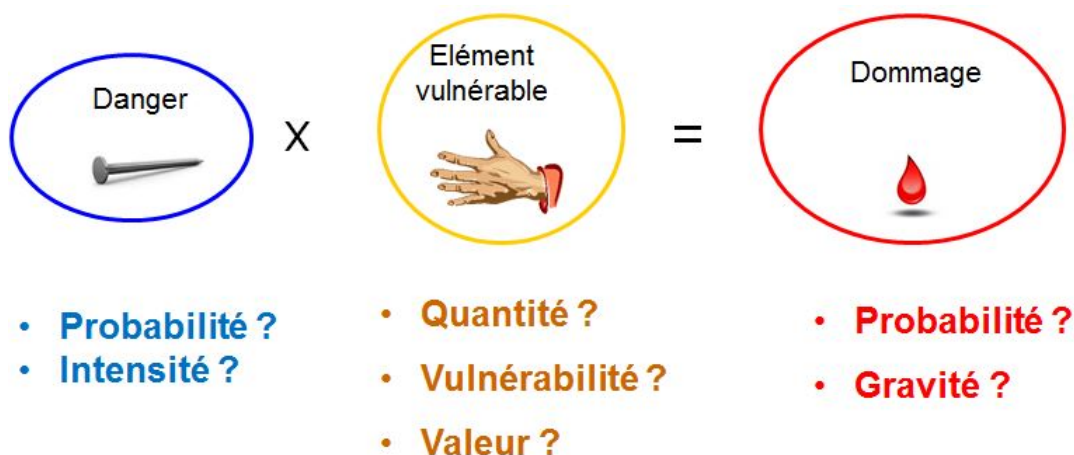


FIGURE 1.8: Méthode pour estimer le niveau d'un risque de dommage

On entend alors par

- probabilité « la mesure de la possibilité d'occurrence exprimée par un chiffre entre 0 et 1, 0 indiquant une impossibilité et 1 une certitude absolue » [ISO-73, 2009] ;
- l'intensité « traduit l'importance d'un phénomène » [Dauphiné, 2001] ;
- quantité : « poids, volume, nombre qui déterminent une portion de matière, une collection de choses » [Larousse] ;
- vulnérabilité : « Facteur de proportionnalité entre les effets auxquels est exposé un élément vulnérable et les dommages qu'il subit » [Circulaire IC, 7 Octobre 2005] ;
- valeur : « Importance, prix attaché subjectivement à quelque chose ». [Larousse]

Néanmoins, il faut noter que l'estimation du niveau de risque n'est pas forcément un calcul, certains écoles de pensées [ChevassusAuLouis, 2007] recherche à évaluer le niveau de risque par le croisement de plusieurs caractéristiques telles que les précédentes mais aussi : la détectabilité du dommage, la résilience des éléments vulnérables, l'acceptabilité sociale de ce risque, les incertitudes sur les calculs (cf. figure 1.9).

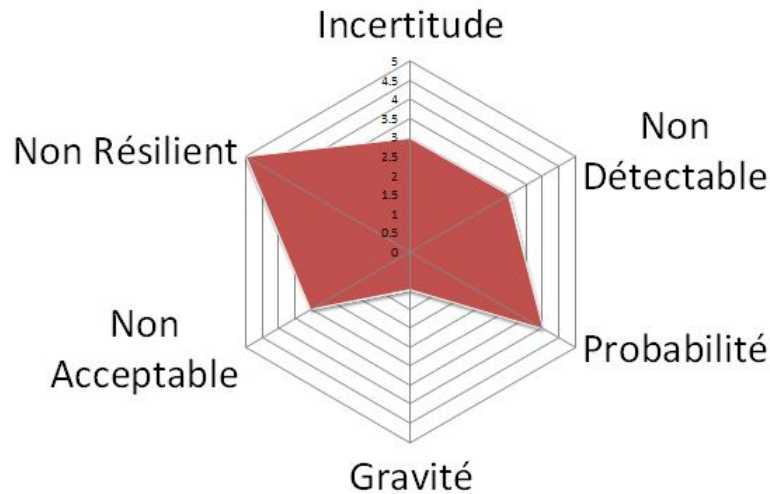


FIGURE 1.9: Méthode pour calculer le niveau d'un risque de dommage

1.4.3 Classification des logiciels par famille de modèles

Les logiciels peuvent contenir un ou plusieurs modèles classés selon les familles décrites précédemment. Par exemple *Casses* est un logiciel qui fait des prédictions à l'aide des défaillances passées sur les taux de défaillances probables dans les quelques années à venir (1-2 ans). C'est donc un logiciel contenant un modèle de la famille M1 (cf. figure 1.10 et annexe B). En revanche le logiciel *CARE-W-ARP* si on lui fournit des probabilités de défaillance par tronçon et des caractéristiques des éléments vulnérables, est capable de calculer des indicateurs de risques, un indicateur financier puis d'intégrer ces indicateurs dans un modèle décisionnel nommé *ELECTRE-TRI*. C'est donc un logiciel contenant des modèles de la famille M2, M3 et M4.































Nom du logiciel (pays)	Modèles	Modèles			
		M1 dégradation	M2 risque	M3 financier	M4 décision
W-PIPER 		X			
D-WARP 		X			
Q-WARP 		X			
I-WARP 		X			
T-WARP 		X			
PARMS priority 		X			
CARE-W-PHM 		X			
CARE-W-Poisson 		X			
CARE-W-NHPP 		X			
Casses 		X			
PRMS 		X			
CARE-W-RelNet 			X		
CARE-W-FailNet 			X		
Criticité 			X		
SynerGEE Rel. A. 			X		
Grille MS7 					X
NESSIE curve 				X	X
Patrimoine expert 				X	X
GAnetXls 				X	X
CARE-W-ARP 			X	X	X
SIROCO 			X	X	X
WILCO 			X	X	X
PARMS planning 			X	X	X
MOSARE 		X	X		X
Vision 		X		X	X
KANEW 		X		X	X
PiReM Drinking Water 		X		X	X
PREVOIR Canalisation 		X	X	X	X
Aware-P  		X	X	X	X

FIGURE 1.10: Les modèles dans les logiciels

1.4.4 Liens entre les modèles et classification des modèles par sous-familles

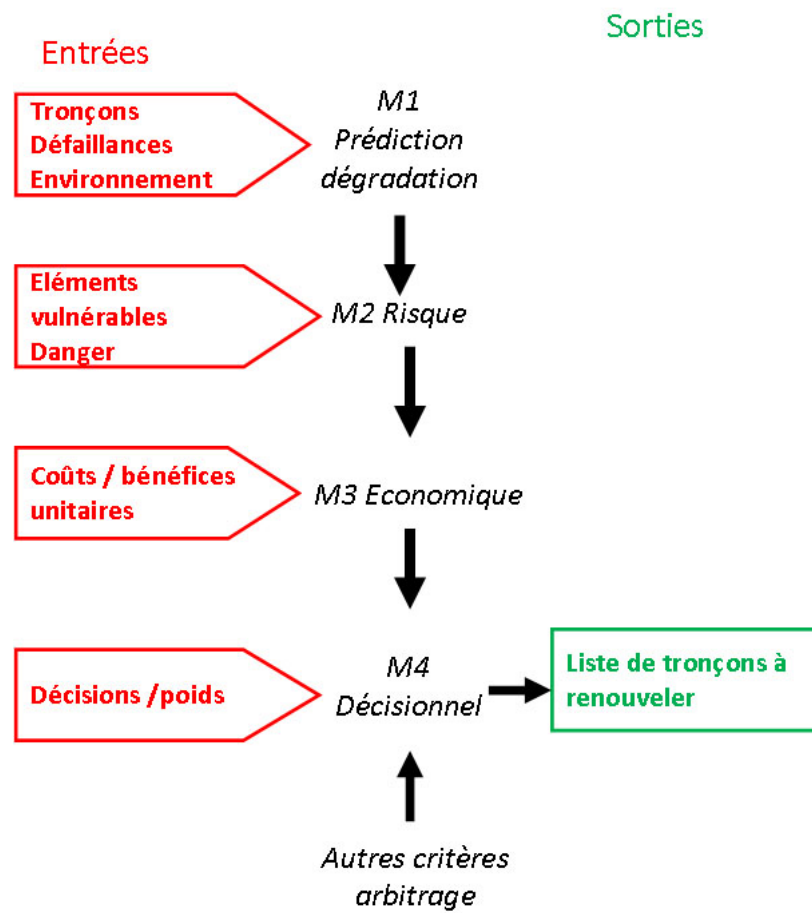


FIGURE 1.11: Liens entre les modèles court terme

Le but final des modèles court terme est de sortir une liste de tronçons hiérarchisée qu'il faut renouveler. Sur du court terme, les modèles s'enchainent alors en général tel qu'il est présenté dans la figure 1.11).

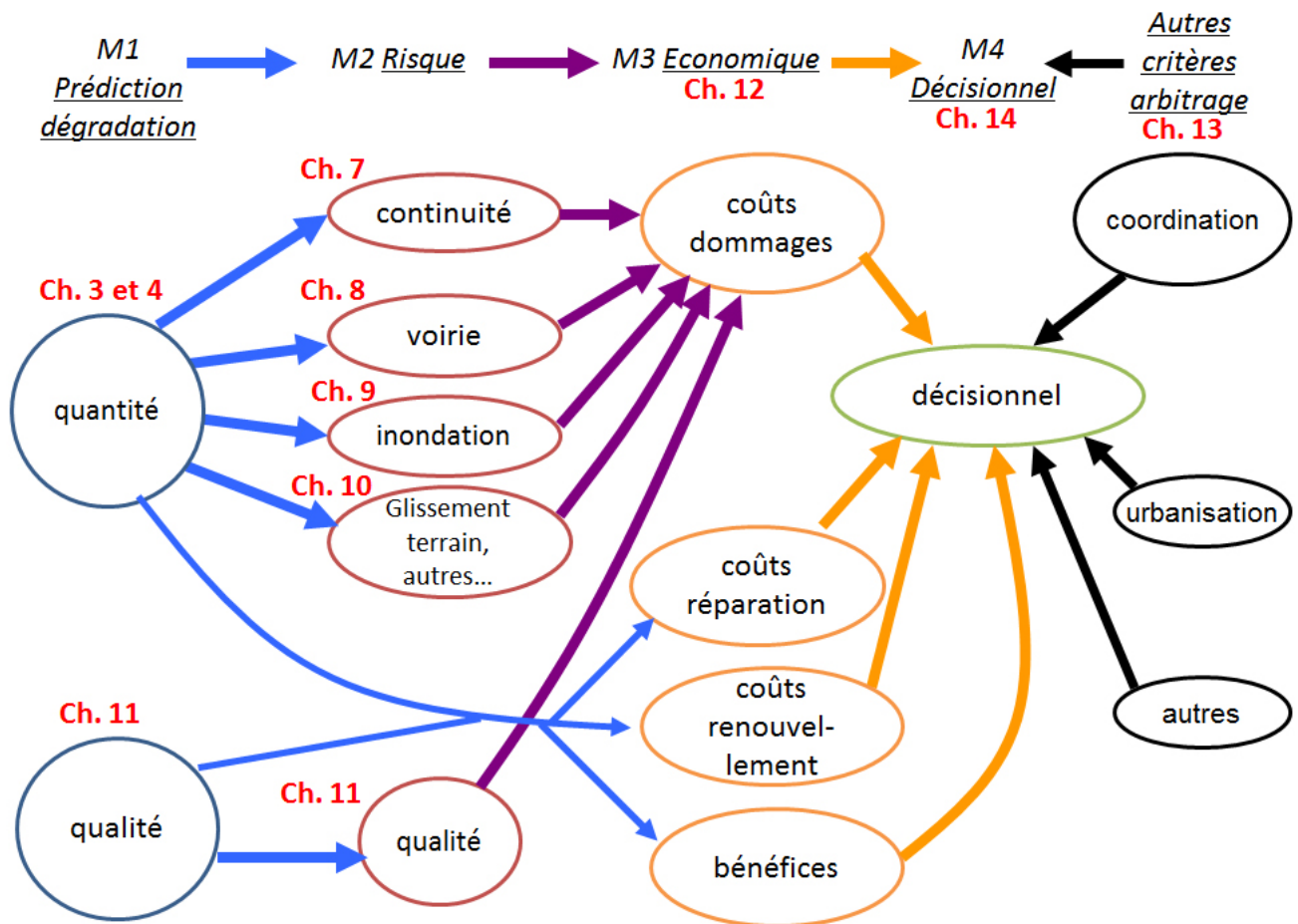


FIGURE 1.12: Les sous familles de modèles et liens entre eux sur du court termes ainsi que les chapitres associés à ce rapport

Les modèles peuvent être classés en sous-familles. La figure 1.12 présente les liens possibles entre ces différents modèles, sous familles et critères sur du court terme.

Les modèles de prédiction de la dégradation des canalisations (M1) peuvent être divisés en deux sous-familles selon l'effet de la dégradation :

- soit la dégradation induit une fuite c'est à dire un écoulement indésirable. Nous avons appelé ces modèles de prédiction des fuites, M1 « quantité ». Ils sont présentés dans les chapitres 2 et 3. Le chapitre 2 se focalisera sur les modèles « déterministes » de cette sous-famille alors que le 3 se focalisera sur les modèles « probabilistes ».
- soit la dégradation induit des eaux rouges ou noires. Nous avons nommé ces modèles M1 « qualité ». Ils sont exposés dans le chapitre 10.

Les modèles de risque (M2) peuvent être séparés selon les éléments vulnérables impactés :

- soit la présence de fuite ou de travaux sur le réseau impacte **les consommateurs** qui ont moins, ou pas, d'eau au robinet. Nous avons appelé ces modèles M2 « continuité ». Ils sont présentés dans le chapitre 6.
- soit la présence de fuite ou de travaux sur le réseau impacte **les usagers de la voirie** (voiture, bus, tram etc.). Cf. le chapitre 7 avec M2 « voirie ».
- les fuites importantes peuvent inonder **les biens des tiers**. Nous décrivons ces modèles M2 « inondation » au chapitre 8.
- lorsqu'il y a des glissements de terrain induit par les fuites et que **les maisons** s'effondrent, ou **les riverains** sont gênés par le bruit, la poussière lors des travaux, etc. Ces risques se situent dans la catégorie « Glissement terrain, autre ». Ils seront présentés dans le chapitre 9.

- si les eaux rouges ou noires arrivent jusqu'au robinet **du consommateur**. Cf. M2 « qualité » dans le chapitre 10.

Les modèles économiques sont présentés dans le chapitre 11. Certains autres critères d'arbitrage sont présentés au chapitre 12 et enfin les modèles décisionnels sont rapidement expliqués dans le chapitre 13.

Sur du long terme (cf. figure 1.13), le but des modèles est d'obtenir un linéaire à renouveler et/ou un budget renouvellement. Ainsi les liens entre les modèles ne sont pas le même (cf. figure 1.13) que sur du court terme. Une étape supplémentaire est nécessaire c'est l'estimation des besoins en renouvellement, qui est présentée dans les chapitres 4 et 5. Le chapitre 4 se focalisera sur les modèles « déterministes » de cette sous-famille alors que le 5 se focalisera sur les modèles « probabilistes ».

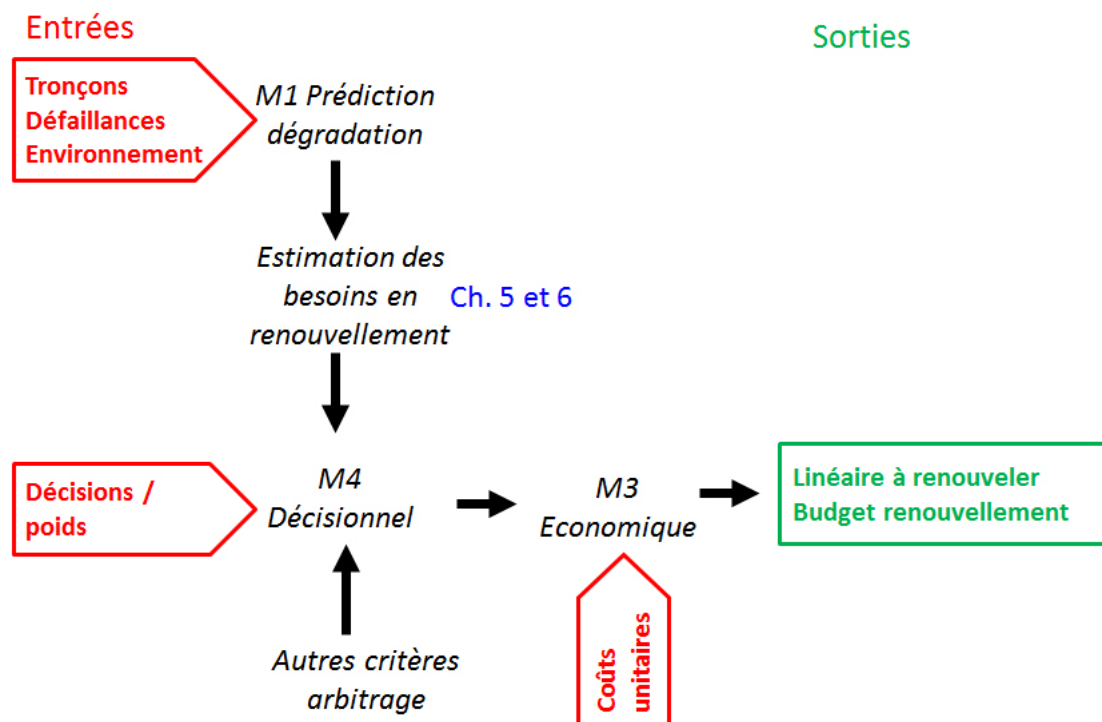


FIGURE 1.13: Liens entre les modèles long terme ainsi que les chapitres associés à ce rapport

Première partie

Modèles de la famille M1 : Prédiction de
la dégradation

Chapitre 2

Modèles de la famille M1 : modèles déterministes, estimation de la probabilité de défaillance future de tronçons

2.1 Préliminaire, définition d'un modèle « déterministe »

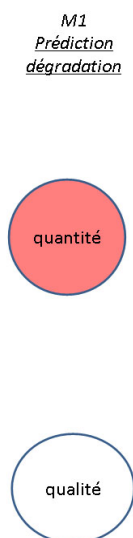


FIGURE 2.1: Les modèles de la famille M1, dont M1 quantitatif (en rouge)

Beaucoup de revues bibliographiques sur les modèles permettant d'estimer la probabilité de défaillance future des tronçons ont été réalisés [Rajani and Kleiner, 2001],[Kleiner and Rajani, 2001], [Marlow et al., 2009], [Ugarelli and Bruaset, 2010] et [Marlow et al., 2014].

Dans ce chapitre nous présenterons, exclusivement une partie des modèles « Déterministes ».
« Déterminisme » pris ici par opposition à « Probabiliste » (cf. chapitre suivant). Le déterminisme est un courant de pensée selon lequel la succession des événements et des phénomènes est due au principe de causalité, ce lien pouvant souvent être décrit par une équation physico-mathématique qui fonde alors le caractère prédictif de ces derniers. Les coefficients de cette équation peuvent être déterminés à partir de données réelles ou à dire d'expert. La grande différence des modèles « Déterministes » par rapport aux

modèles « Probabilistes » est qu'ils prennent en compte en sortie du modèle uniquement la **moyenne** de la variable étudiée (cf. figure 2.2).

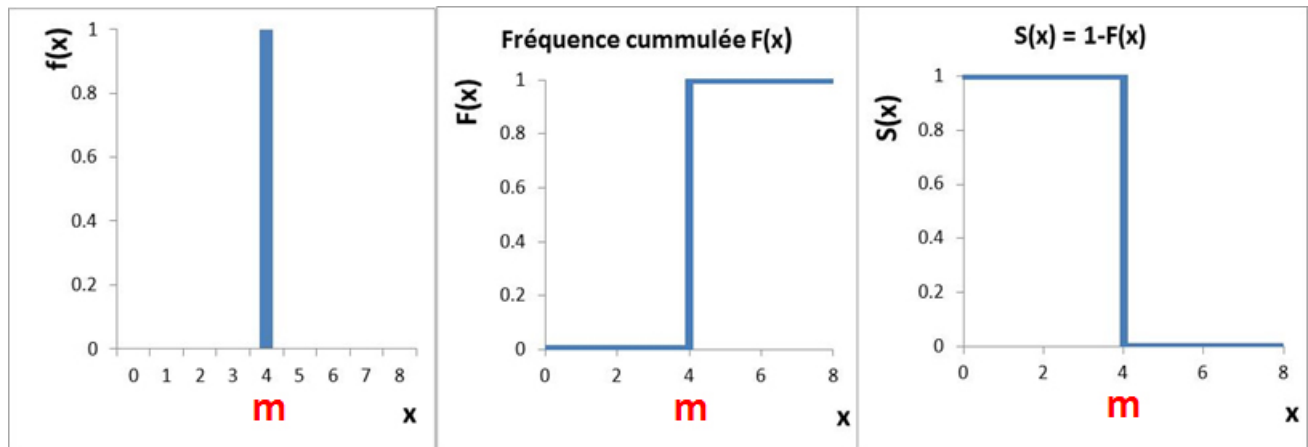


FIGURE 2.2: Représentation d'une variable déterministe avec m sa moyenne

2.2 Modèle déterministe, linéaire

2.2.1 Modèle [Kettler and Goulter, 1985], notamment dans Kanew linéaire

$$f(t) = a \times t \quad (2.1)$$

- $f(t)$ = Nombre de défaillances annuelles fonction de l'âge des tronçons
- t = Age des tronçons
- a = Taux annuel d'augmentation du nombre de défaillances

source [Kettler and Goulter, 1985], [Ugarelli and Bruaset, 2010, p. 14] et [Kropp, 2013, p. 27]

Dans le logiciel Kanew, deux modèles au choix sont proposés. Kanew peut fonctionner à l'échelle d'un groupe de tronçons regroupés par matériau et/ou par diamètre (strates). Il est présenté ici le modèle Kanew linéaire.

2.2.2 Modèle [Jacobs and Kerney, 1994]

$$P = a_0 + a_1 \times L + a_2 \times t \quad (2.2)$$

- P = réciproque de la probabilité d'un jour sans défaillance
- L = Longueur des tronçons
- t = Age des tronçons
- a_0, a_1, a_2 = Taux annuel d'augmentation du nombre de défaillances

source [Jacobs and Kerney, 1994], [Ugarelli and Bruaset, 2010, p. 14]

2.2.3 Modèle [McMullen, 1982]

$$t = 0.028 \times SR - 6.33 \times pH - 0.049 \times r_d \quad (2.3)$$

- t = Age du tronçon à la première casses (an)
- SR = résistivité du sol saturé (Ω cm)
- r_d = potentiel redox du sol (millivolts)
- pH = potentiel Hydrogène

source [McMullen, 1982] et [Ugarelli and Bruaset, 2010, p. 13]

2.3 Modèle déterministe, fonction puissance

2.3.1 Kanew puissance

$$f(t) = \delta t^{\delta-1} \times \frac{1}{\beta^\delta} \quad (2.4)$$

- $f(t)$ = Nombre de défaillances annuelles fonction de l'âge des tronçons
- t = Age des tronçons
- β et δ = Paramètres à déterminer de manière empirique.

source [Kropp, 2013, p. 27]

Avantages :

- Modèle très simple
- Ce modèle simplifie le modèle stochastique NHPP (Non Homogeneous Poisson Process), $\frac{1}{\beta^\delta}$ correspond au facteur d'échelle

Inconvénients :

- Pas de prise en compte des effets des variables explicatives variant d'un tronçon à l'autre (diamètre, longueur, méthode de pose...), sauf si l'ensemble des tronçons sont stratifiés.
- Aucune prise en compte de la distribution des défaillances.

2.4 Modèle déterministe, de type exponentiel

2.4.1 Modèle [Shamir and Howard, 1979]

$$f(\tau) = f(\tau_0) \times e^{a(\tau-\tau_0)} \quad (2.5)$$

- $f(\tau)$ = Nombre moyen de défaillances annuelles par unité de longueur l'année τ

- τ = temps en année
- τ_0 = Année de base pour l'analyse (année d'installation ou première année pour laquelle les données sont disponibles). NB : si τ_0 = année de pose alors $(\tau - \tau_0) = t$ = âge de la canalisation
- a = Coefficient annuel de croissance du taux de défaillances. Ce coefficient varie entre 0.01 et 0.15 d'après [Shamir and Howard, 1979].

Source [Shamir and Howard, 1979] et [Dridi, 2005, p. 23]

2.4.2 Modèle [Walski and Pelliccia, 1982]

$$f(\tau) = C_1 \times C_2 \times f(\tau_0) \times e^{a(\tau-\tau_0)} \quad (2.6)$$

- $f(\tau)$ = Nombre moyen de défaillances annuelles par unité de longueur l'année τ
- C_1 = ratio entre (nombre de défaillances de la fonte ductile par rapport aux défaillances passées) et (tous les défaillances pour la fonte ductile)
- C_2 = ratio entre (nombre de défaillances de la fonte grise [diametre 500 mm] par rapport aux défaillances passées) et (tous les défaillances pour la fonte grise)
- τ = temps en année
- τ_0 = Année de base pour l'analyse (année d'installation ou première année pour laquelle les données sont disponibles). NB : si τ_0 = année de pose alors $(\tau - \tau_0) = t$ = âge de la canalisation
- a = Coefficient annuel de croissance du taux de défaillances. Ce coefficient varie entre 0.01 et 0.15 d'après .

Source [Walski and Pelliccia, 1982] et [Ugarelli and Bruaset, 2010, p. 12]

2.4.3 Modèle dans le logiciel T

Ce modèle est un outil « maison » réalisé par le service des eaux T.

$$IDV = 0,01 \times e^{0,05 \cdot \frac{100}{AgeHS} \cdot t} \quad (2.7)$$

- IDV = indice de dégradation présumée ou Indice de durée de vie
- $AgeHS$ = Age à la mise hors service à dire d'expert
- t = âge du mégabief

Source [Rapport confidentiel A terrain T]

<i>AgeHS</i> (ans)	Description
40	Fonte ductile sans revêtement
60	Fonte ductile revêtue 1955 à 1984
70	Amiante-ciment et éternit
90	Fonte ductile revêtue \geq 1985

TABLE 2.1: Valeurs d'AgeHS par strate

Source [\[Rapport confidentiel B terrain T\]](#)

Avantages :

- Modèle très simple
- Modèle déjà calé et uniquement valable sur le terrain T

Inconvénients :

- Durée de vie des matériaux, à dire d'expert
- Aucune prise en compte des variables explicatives variant d'un tronçon à l'autre (diamètre, longueur, méthode de pose...) autre que le matériau

2.4.4 Modèle [\[Clark et al., 1982\]](#)

$$f(\tau) = 0,386(SL)^{0,014}(SH)^{0,069} \times e^{0,7197 \cdot MAT + 0,0044 \cdot PRD + 0,0121 \cdot DEV} \times e^{0,0865 \cdot (\tau - \tau_0)} \quad (2.8)$$

- $f(\tau)$ = Nombre moyen de défaillances annuelles par unité de longueur l'année τ
- τ = temps en année
- τ_0 = Date de la première défaillance
- SL = surface de la conduite en contact avec un sol faiblement corrosif
- SH = surface de la conduite en sol hautement corrosif
- MAT = matériau de la conduite (1 = métallique, 0 = béton)
- PRD = pression différentielle (livres/pouce²)
- DEV = pourcentage de linéaire, en sol faiblement et modérément corrosif

source [\[Clark et al., 1982\]](#) et [\[Eisenbeis, 1994, p. 42\]](#) et [\[Dridi, 2005, p. 24\]](#)

2.5 Synthèse

2.5.0.1 Bilan des variables explicatives prises en compte

	Kettler et al. 1995	Kanew Linéaire	Jacobs et al. 1994	McMullen, 1982	Kanew-puissance	Vision	Shamir et al. 1979	Walski et al. 1982	T	Clark et al. 1982
Temps (âge)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Matériau	+	+			+			X	+	X
Diamètre		+			+					X
Longueur			X			X				X
Période de pose		+			+				+	
Nb défaillances passées						X	X	X		
Type de sol				X						X
Pression eau						X				X
Nb de branchements						X				
Age à la mise HS									X	

FIGURE 2.3: Variables explicatives prises en compte par les modèles déterministes présentés (X : variable dans l'équation / + : variable prise en compte si une stratification est réalisée)

Ces modèles prennent en compte des variables explicatives différentes mais tous intègrent au moins l'âge du tronçon (cf. figure 2.3).

2.5.0.2 Echelle de temps et d'espace

Tous ces modèles peuvent être utilisés sur du long terme et en général soit à l'échelle du réseau, soit à l'échelle d'un groupe de tronçons (secteur physique ou strates).

2.5.0.3 Conclusion

Les modèles déterministes sont assez simples mais ont une qualité d'ajustement médiocre. Par exemple le modèle [Clark et al., 1982] qui semble l'un des plus complexes ne reflète la réalité qu'avec un $R^2=0,47$ (pour un grand service d'eau sur du court terme)¹ [Clark et al., 1982]. En revanche leur simplicité permet de les introduire facilement dans des modèles long terme qui contiendront d'autres options très utiles pour le gestionnaire (calcul du besoin en renouvellement, calcul des budgets nécessaires, etc.) (cf. le logiciel Kanew). Nous allons donc maintenant présenter les modèles probabilistes qui ont permis de faire un très grand bond dans l'amélioration des prédictions (notamment des taux de défaillances) par rapport aux modèles déterministes.

1. Le R^2 ou coefficient de détermination mesure la qualité de l'ajustement des estimations de l'équation de régression. Il varie entre 0 (aucun ajustement) et 1 (100% d'ajustement).

Chapitre 3

Modèles de la famille M1 : modèle probabiliste, estimation de la probabilité de défaillance future de chaque tronçon

3.1 Préliminaire, définition d'un modèle « Probabiliste »

Dans ce chapitre nous présenterons, exclusivement des modèles « Probabilistes ». Ces modèles relèvent d'une part de la théorie des probabilités, c'est à dire l'étude mathématique des phénomènes caractérisés par le hasard. Il comporte ici un calcul stochastique c'est à dire l'étude d'un phénomène aléatoire (évolution du nombre de défaillances d'un tronçon / ou suivi de l'âge à la mise hors service d'un groupe de tronçons). La grande différence entre les modèles « Probabilistes » et les modèles « Déterministes » est qu'ils prennent en compte en général la **moyenne**, la **médiane** mais aussi l'**écart type** de la variable aléatoire étudiée en sortie du modèle (cf. figure 3.1). Les coefficients des équations peuvent être déterminés à partir de données réelles ou à dire d'expert.

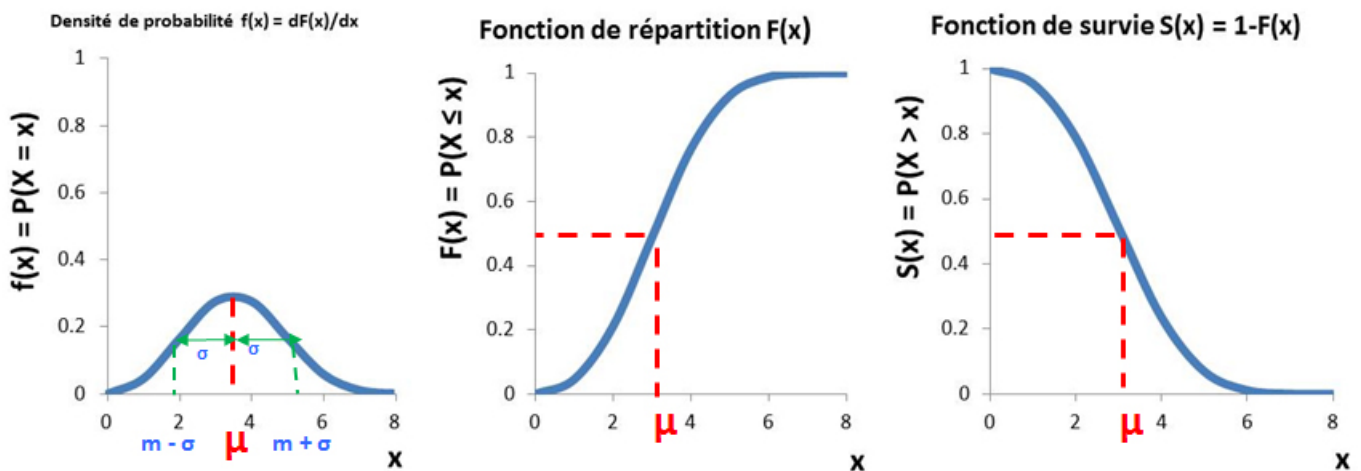


FIGURE 3.1: Représentation de la densité, de la fonction de répartition et de la fonction de survie d'une variable aléatoire dans un modèle « Probabiliste » de médiane μ et d'écart type σ

Afin d'estimer les paramètres de ces modèles, on fait d'abord des statistiques sur les données réelles passées. La méthode du maximum de vraisemblance (ou le logarithme de la vraisemblance) est la méthode la plus couramment utilisée pour estimer les paramètres de ces modèles.

Les données d'entrée de ces modèles sont : les caractéristiques des tronçons (en service ou pas, date de pose, diamètre etc.), les données sur les défaillances (date défaillance, description, ID tronçon, etc.) et les données environnementales (trafic routier, climat, sol etc.).

Les modèles suivants sont classés par ordre de quantité de données nécessaire en entrée (du moins vers le plus).

3.2 Modèle de Poisson, dans CARE-W-Poisson

3.2.1 Description du modèle

La méthode probabiliste employée dans CARE-W-Poisson est la régression de Poisson [Poinard and Le Gauffre, 2005]. Elle a été développée par l'INSA Lyon à partir de [Malandain, 1999].

Soit n_i le nombre de défaillances observées par an sur le tronçon i . Ce modèle fait l'hypothèse que l'ensemble des n_i du réseau d'eau suivent une loi statistique de Poisson (cf. figure 3.2) de paramètre λ .

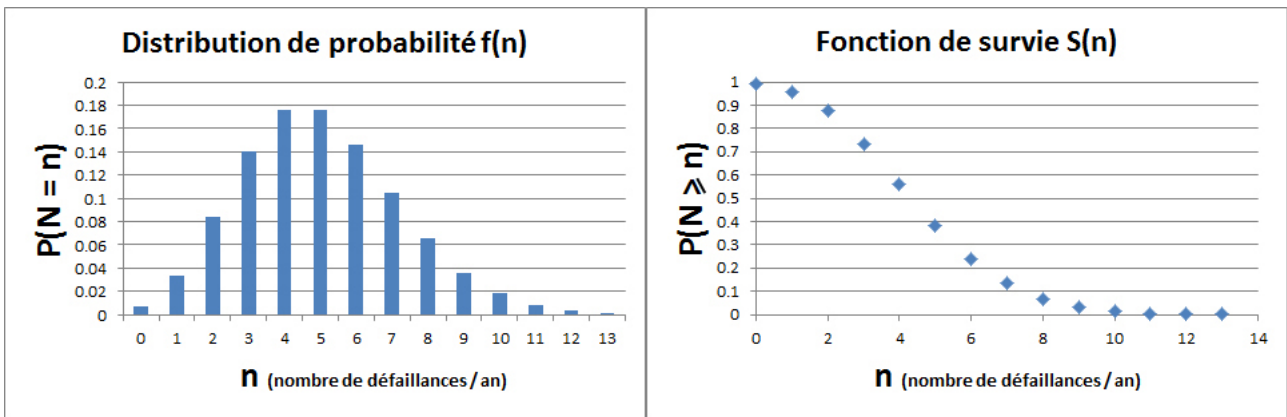


FIGURE 3.2: Distribution de probabilité et fonction de survie d'une variable aléatoire suivant une loi statistique de Poisson de paramètre $\lambda = 5$

Puis, à partir de l'historique (données du passé), ce modèle cale les paramètres à estimer (β_0, \dots, β_k) dont dépend λ grâce à la méthode statistique du maximum de vraisemblance, de sorte que l'espérance mathématique de cette loi statistique de Poisson soit égale à λ tel qu'il est décrit dans l'équation 3.1. Ce processus se réalise de manière itérative grâce à une succession de tests statistiques de χ^2 . Ce qui permet d'éliminer toutes les variables pouvant potentiellement expliquer les défaillances (covariables statistiques) qui ne sont pas au final statistiquement significatives.

$$\lambda = e^{\sum_k \beta_k Z_k} = E(N) \tag{3.1}$$

- N = variable aléatoire discrète qui dénombre le nombre de défaillances sur un tronçon durant un intervalle de temps fixe de longueur $\Delta t = 1$ an.
- $N \sim P(\lambda)$
- $E(N)$ = Espérance mathématique de N
- n = réalisation de la variable aléatoire N
- Z_k = covariable n^o k , et $Z_0=1$
- β_0, \dots, β_k = paramètres de régression à estimer

Enfin une fois λ calé sur le passé, en faisant l'hypothèse que les variables significatives seront les mêmes dans le futur, alors des prévisions du nombre de casses par tronçon peuvent être effectuées.

Source [Malandain, 1999, p. 139] et [Haidar, 2006, p. 50] .

3.2.2 Synthèse

Avantages :

- Nécessite un peu de données d'entrée (historique) mais moins que les modèles suivant
- Modèle simple, facile à caler
- Âge du tronçon (t) pris en compte, si on pose $Z_1 = \ln(t)$
- Taux de défaillance futur bien estimé en moyenne par rapport à la réalité (cf. paragraphe C)
- Taux de défaillances facile à déterminer = $\lambda/(L \times \Delta t)$

Inconvénients :

- Pas de mémoire des défaillances passées
- Mauvaise hiérarchisation des tronçons par taux probable de défaillances par rapport à la réalité

De plus, il semble que le logiciel I-WARP utilise aussi la méthode statistico-probabiliste : Poisson. Source [Liu et al., 2012, p. 111]

3.3 Modèle de Weibull, notamment dans CARE-W-PHM

3.3.1 Description du modèle

La méthode probabiliste est dite de « Weibul ». Elle a été développée par le CEMAGREF Bordeaux à partir de [Eisenbeis, 1994].

Pour un tronçon donné, soit x_2 le temps séparant la première défaillance et la deuxième défaillance et soit x_d le temps séparant la d^{ieme} et la $d^{+1 ieme}$ défaillance (cf. figure 3.3). L'ordre des défaillance est important. Sur la fenêtre d'observation $[a, b]$, $x_1 = t_1 - a$ et $x_{n+1} = b - t_n$. En général nous n'avons pas toutes les données depuis la date de pose (DDP) jusqu'au début de l'observation, elles sont tronquées à gauche $[DDP ; a]$ et censurées à droite $[b, +\infty[$.

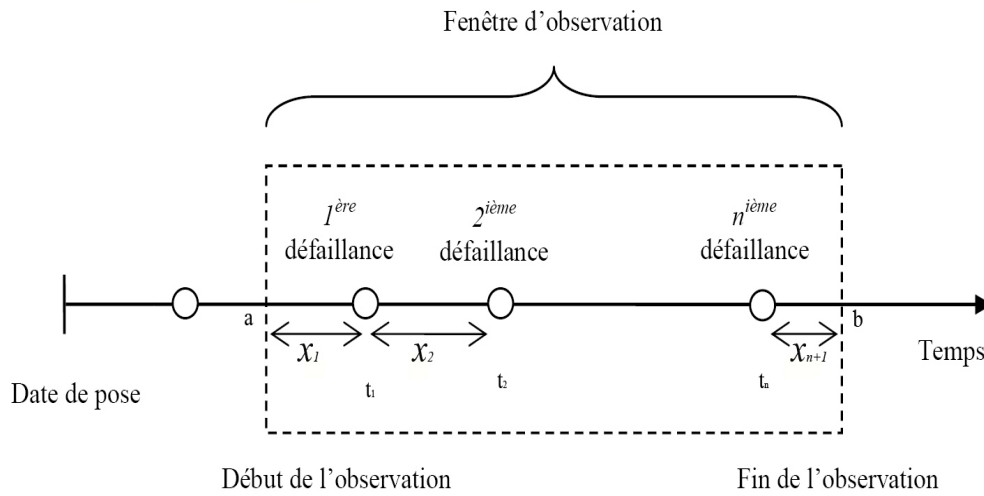


FIGURE 3.3: Temps séparant 2 défaillances successives X , sur le même tronçon

- X = variable aléatoire continue : temps séparant 2 défaillances successives
- x_1, x_2, \dots, x_d = réalisations de X
- t_k = âge à la défaillance d'ordre k
- $X \sim Weibull$

Ce modèle fait l'hypothèse que l'ensemble des x_d du réseau d'eau suivent une loi statistique de Weibull (cf. figure 3.4) de paramètre d_k, β_k qui dépendent de l'ordre des défaillances.

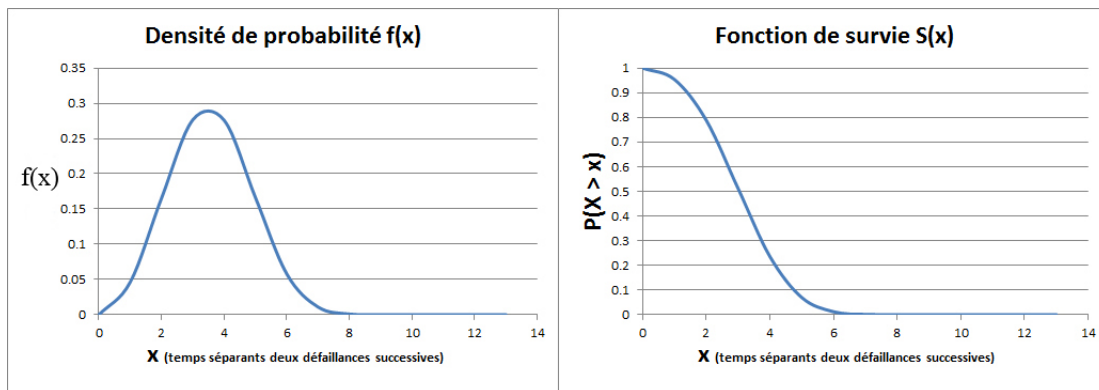


FIGURE 3.4: Densité de probabilité et fonction de survie d'une variable aléatoire suivant une loi statistique de Weibull de paramètre (4;3)

$$h(x) = \frac{f(x)}{S(x)} = \frac{f(x)}{1 - F(x)} \tag{3.2}$$

- $h(x)$ = fonction de risque instantané de défaillance
- $f(x)$ = densité de probabilité de X
- $S(x)$ = fonction de survie de X
- $F(x)$ = fonction de répartition de X

$$h(x) = \delta x^{\delta-1} \times e^{-\sum_k \beta_k Z_k} \tag{3.3}$$

- Z_k = covariable n^o k, et $Z_0 = 1$
- β_0, \dots, β_k et δ = paramètres à estimer

Source [[Haidar, 2006, p. 53](#)].

3.3.2 Synthèse

Avantages :

- Bonne hiérarchisation des tronçons par taux de défaillances prédits par rapport à la réalité
- Facilité de prise en compte des covariables (régression)
- Mémoire des événements passés

Inconvénients :

- Prédiction du taux de défaillances surestimée le plus souvent par rapport à la réalité (cf. paragraphe [C](#))
- Difficile de prendre en compte l'âge du tronçon (pas de vieillissement explicite)
- Lourdeur des calculs de prédiction du taux de défaillances (Monte Carlo)
- L'ordre des défaillances à un rôle clé dans ce modèle, par conséquent il faudrait observer le tronçon depuis la pose

Actuellement le modèle de Weibull est dans le logiciel CARE-W-PHM et dans le logiciel MOSARE. Néanmoins, il est prévu que dans le futur MOSARE contienne le modèle de LEYP amélioré à la place de Weibull.

3.4 Modèle [[Mailhot et al., 2000](#)]

3.5 Processus de Poisson non homogène, dans notamment CARE-W-NHPP

3.5.1 Description du modèle

La méthode probabiliste est le Non Homogeneous Poisson Process (NHPP). Elle a été appliquée aux défaillances de réseau d'eau par le NTNU, Trondheim, Norvège, à partir de [[Røstum, 2000](#)].

Soit $N(t)_i$ le nombre de défaillances cumulées observées sur le tronçon i à l'âge t (cf. figure [3.5](#)).

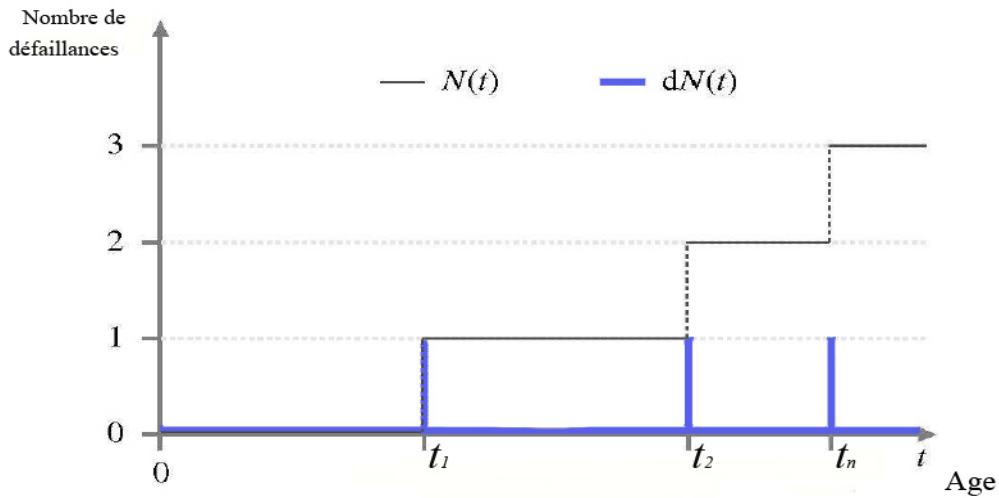


FIGURE 3.5: Processus de comptage $N(t)$

Ce modèle fait l’hypothèse que l’ensemble des $N(t)$ du réseau d’eau suivent une loi statistique de Poisson (cf. figure 3.2) de paramètre $\Lambda(t)$.

$$E[dN(t)|N(t-)] = E[dN(t)] = \lambda(t)dt \tag{3.4}$$

$$\lambda(t) = \delta t^{\delta-1} e^{\sum_k \beta_k Z_k} \tag{3.5}$$

- t = âge de la canalisation : t_1, t_2, \dots, t_k
- $N(t)$ = processus de comptage des défaillances (cf. figure 3.5)
- $N(t) \sim P[\Lambda(t)]$
- $dN(t)$ = différentielle de $N(t)$, prend la valeur 0 (si pas de défaillance) ou 1 (si défaillance) à âge t (cf. figure 3.5)
- $dN(t) \sim Bernoulli[\lambda(t)dt]$ (cf. figure 3.6)
- $t-$ = instant juste avant t
- Z_k = covariable n^o k , et $Z_0=1$
- β_0, \dots, β_k et δ = paramètres à estimer

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(u)du \tag{3.6}$$

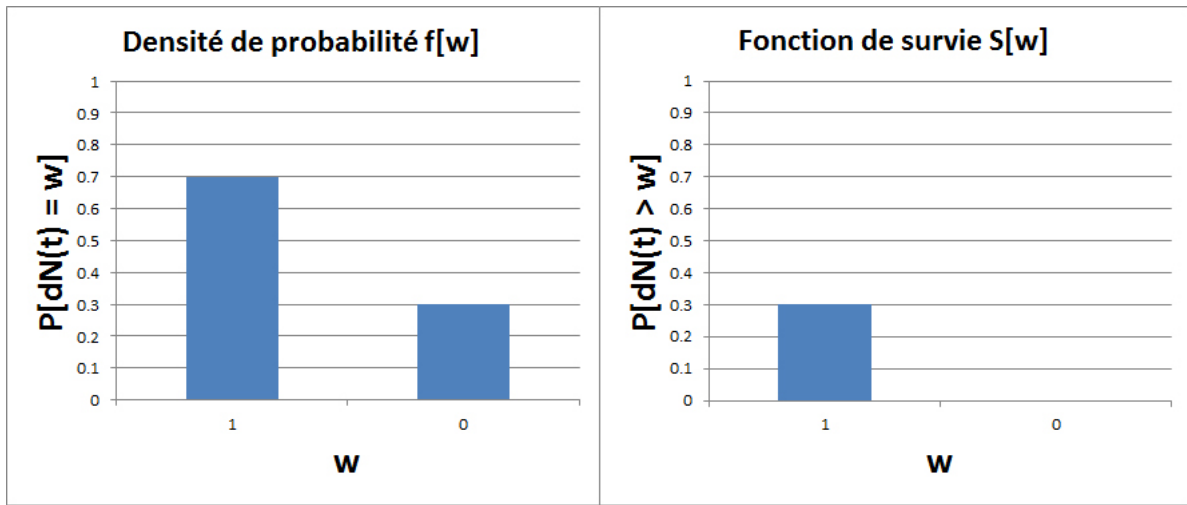


FIGURE 3.6: Densité de probabilité et fonction de survie d’une variable aléatoire suivant une loi statistique de Bernoulli de paramètre 0,7

3.5.2 Synthèse

Avantages :

- Modèle simple, facile à caler
- Âge du tronçon naturellement pris en compte
- Taux de défaillance futur bien estimé en moyenne par rapport à la réalité (cf. paragraphe C)
- Plus souple que la régression de poisson (pas de discrétisation du temps Δt)
- Taux de défaillances facile à déterminer = $\lambda(t)/L$

Inconvénients :

- Pas de mémoire des défaillances passées
- Mauvaise hiérarchisation des tronçons par taux probable de défaillances par rapport à la réalité

3.6 Processus de Yule Linéairement Étendu, notamment dans Casses

3.6.1 Description du modèle

Méthode probabiliste : Linear Extended Yule Process (LEYP), développée par le CEMAGREF de Bordeaux à partir de [Le Gat, 2009].

$$E[dN(t)|N(t-) = j] = \lambda(t)dt \tag{3.7}$$

$$\lambda(t) = (1 + \alpha_j)\delta t^{\delta-1} e^{\sum_k \beta_k Z_k} \tag{3.8}$$

- t = âge de la canalisation : t_1, t_2, \dots, t_k
- $N(t)$ = processus de comptage des défaillances, nombre cumulé des défaillances fonction de l’âge de la canalisation

- $N(t) \sim$ Binomiale Négative
- j = nombre de défaillances subies sur $[0, t[$.
- α = paramètre à estimer lié aux défaillances passées (si $\alpha = 0 \Rightarrow$ NHPP)
- δ = paramètre à estimer lié à l'effet de l'âge (si $\delta = 1$ pas de vieillissement).
- Z_k = covariable n^o k, et $Z_0=1$
- β_0, \dots, β_k = paramètres à estimer

3.6.2 Synthèse

Avantages :

- Âge du tronçon naturellement pris en compte
- Taux de défaillances futur bien estimé en moyenne par rapport à la réalité (cf. paragraphe C)
- Plus souple que la régression de poisson (pas de discrétisation de temps)
- Taux de défaillances facile à déterminer = $\lambda(t)/L$
- Mémoire des défaillances passées
- Bonne hiérarchisation des tronçons par taux de défaillances prédit par rapport à la réalité
- Prise en compte de la troncature à gauche ; il n'est donc pas nécessaire d'observer le tronçon depuis sa pose

Inconvénients :

- Gourmand en données
- Le calage exige un certain niveau d'expertise

Source [Labeau, 2008] ; [Lomet, 2009] et [Renaud et al., 2011b]

Le modèle LEYP est dans le logiciel Casses mais il est aussi dans les logiciels suivant : Aware-P, PARMS-priority, PREVOIR. De plus vu que SIROCO utilise Casses, les résultats dans SIROCO sont aussi issus du LEYP (cf. [Brémond et al., 2005]).

Dans Aware-P la méthode probabiliste est au choix soit le Linear Extended Yule Process (LEYP) soit le Non Homogeneous Poisson Process (NHPP), c'est à dire $\alpha = 0$ fixé dans le modèle LEYP [Vitorino et al., 2012].

La méthode probabiliste utilisée par le module priority du logiciel PARMS fut pendant très longtemps uniquement la régression de Poisson mais récemment il est aussi possible d'utiliser les résultats des équations issus du LEYP car le CSIRO a intégré cette possibilité [Marlow, 2009b].

Notons que le modèle de LEYP a subi de améliorations pour devenir le LEYP-TC (LEYP with Time dependant Corariates) grâce à [Babykina, 2010], ce qui a permis d'introduire dans le LEYP des variables qui changent au fil du temps (tel que le climat, la pression de l'eau). Le LEYP a aussi été modifié par [Drouillard et al., 2015] pour devenir le LEYP-BNHM (based non-homogeneous Markov chain model) afin de pouvoir l'appliquer aux branchements dont les bases de connaissance sont moins complètes que les réseaux de distribution ou de transport. Ainsi la démarche PREVOIR, développé par Suez-environnement/Lyonnaise des Eaux utilise en fonction de leurs besoins et de leurs outils, est soit le LEYP, soit le LEYP-CT soit le LEYP-BNHM ([Lyre, 2015]).

3.7 Synthèse

Les logiciels de prédiction des défaillances probabilistes contiennent en général un seul modèle. Par exemple CARE-W-PHM contient le modèle de Weibull (cf. table 3.1). Néanmoins certains logiciels contiennent plusieurs modèles que l'utilisateur peut utiliser notamment selon la quantité de données d'entrée disponible. Ainsi, dans le logiciel MOSARE si le service d'eau n'a pas beaucoup de données, la méthode implémentée sera une analyse multi-critère, si le service d'eau a plus de données ce sera le modèle de Poisson et s'il a beaucoup de données ce sera le modèle de Weibull.

Logiciels / Modèles	Weibull	Poisson	NHPP	LEYP	LEYP-CT	LEYP-BNHM
CARE-W-PHM	X					
CARE-W-Poisson		X				
CARE-W-NHPP			X			
Casses			X	X		
Aware-P			X	X		
SIROCO			X	X		
PARMS		X		X		
MOSARE	X	X				
PREVOIR				X	X	X
I-WARP		X				

TABLE 3.1: Synthèse, modèle implémenté selon le logiciel

Modèles	Prévision du taux de casses	Hierarchisation des tronçons par taux probable de défaillances
Weibull	-	+
Poisson	+	-
NHPP	+	-
LEYP	+	+

TABLE 3.2: Avantages et inconvénients des différents modèles

Le modèle de Weibull produit une bonne hiérarchisation des tronçons par taux probable de défaillances par rapport à la réalité. Les modèles de Poisson et NHPP ont une bonne prévision des taux de défaillances par rapport à la réalité. Le modèle de LEYP est un modèle faisant la synthèse des ces deux avantages (cf. table 3.2).

Source [Eisenbeis et al., 2002a]; [Eisenbeis et al., 2002b]; [Horaud, 2002, p. 48]; [Eisenbeis et al., 2003, p. 30-38]; [Eisenbeis et al., 2004, p. 33]; [Le Gat, 2009, p. 90-94] et [Martins, 2011, p. 53].

Nous allons maintenant présenter une étape nécessaire dans les logiciels moyen et long terme, l'estimation du besoin en renouvellement.

Deuxième partie

Modèles de la famille M0 : linéaire à renouveler

Chapitre 4

Modèle de la famille M0 : modèle déterministe d'estimation du besoin en renouvellement futur des canalisations

4.1 Méthode « taux de renouvellement fixe »

Nous trouvons souvent dans la bibliographie effectuée, le raisonnement suivant (entre les 3 étoiles).

Le taux de renouvellement moyen de 30% des autorités organisatrices françaises gérant l'eau potable sur la période [2005;2009] est de 0,6% (cf. [Salveti and Wittner, 2012, p. 41]).

En faisant les hypothèses que :

1. les linéaires posés chaque année par le passé ont été identique (linéaire, taux de renouvellement passé uniforme) ;
2. qu'il n'y aura aucune extension de réseau ;
3. ce taux de renouvellement de 0,6 % va être le même sur la période [2010 ; 2170] pour toutes les autorités organisatrices françaises.

$$TR = \frac{\text{Lineaire a renouveler l'annee N}}{\text{Lineaire total du reseau}} \Leftrightarrow \frac{\text{Duree de l'annee N}}{\text{Duree pour renouveler 100\% du reseau}} \quad (4.1)$$

Alors dans ce cas, la durée pour renouveler 100 % du réseau français est évaluée à $\frac{1}{0.006} = 166$ ans (cf. équation 4.1) (cf. [Nedey, 2014, p. 34] ou [Salveti and Wittner, 2012, p. 41]).

Ce temps de renouvellement est « bien plus long que leur durée de vie nominale qui est en moyenne de 50 à 75 ans » (dixit M. Guespereau de l'AERMC dans [Nedey, 2014, p. 34]). Donc les pratiques actuelles sont « très insuffisante » (selon [Nedey, 2014, p. 33]).

Défauts et inconvénients de ce raisonnement :

- Les linéaires posés chaque année par le passé sont loin d’avoir été identique. Ainsi pendant les deux guerres mondiales il y a eu un arrêt quasiment complet de la pose de canalisations. En revanche après chaque guerre il y a eu un pic important dans les linéaires posés. Par conséquent la première hypothèse sur laquelle se base cette méthode est très fautive. Donc les calculs qui s’en suivent sont aussi faux. Nous pouvons donc largement mettre en doute les conclusions très hâtives de ce genre d’analyse.
- Ensuite faire l’hypothèse que ce taux de renouvellement va être le même sur [2010 ; 2170] est une hypothèse très forte.
- Le taux de 0,6% est une moyenne à la fois temporelle (sur 5 ans) et spatiale (30 % des autorités organisatrices) qui ne tient pas compte de la disparité spatio-temporelle des taux de renouvellement. Certaines autorités organisatrices ont pu renouveler sur ces 5 ans tantôt à 0,4 % par an tantôt à 1,2 % par an. Dans la même optique pour une même année certaines autorités organisatrices ont pu renouveler 0,2% par an et d’autres 1,6 % par an.
- La « durée de vie nominale », représente, en général, la médiane de l’âge à la mise hors service des canalisations du réseau. C’est à dire, la durée pour laquelle 50 % du réseau a été mis hors service et non 100 % ! Ici il y a donc une grande erreur de raisonnement : des choux (100%) sont comparés à des carottes (50%).

4.2 Modèle [Cador, 2002a]

$$DDR = DDP + AgeHS \quad (4.2)$$

- DDR = date de remplacement
- DDP = date de pose. (NB : $t = \text{Date actuelle} - DDP$)
- $AgeHS$ = Age à la mise hors service à dire « d’expert ». $AgeHS$ peut être fonction du matériau et de la période de pose du tronçon (cf. table 4.1 ou [Cador, 2002a, p. 178]).

Matériau	$AgeHS$
Acier	60
Béton	120
Fonte grise	70
Fonte ductile	120
PEHD	100

TABLE 4.1: Exemple d’âge à la mise hors service à dire de [Bruyeron and Re, 2012b].

Inconvénients de cette méthode :

- L’âge à la mise hors service des canalisations est ici donné à dire d’expert.
- De plus seule sa moyenne est prise en compte, ce qui aboutit à une fonction de survie avec une marche d’escalier (cf. figure 4.1). Or cette forme de fonction de survie est très loin de la pratique réelle.

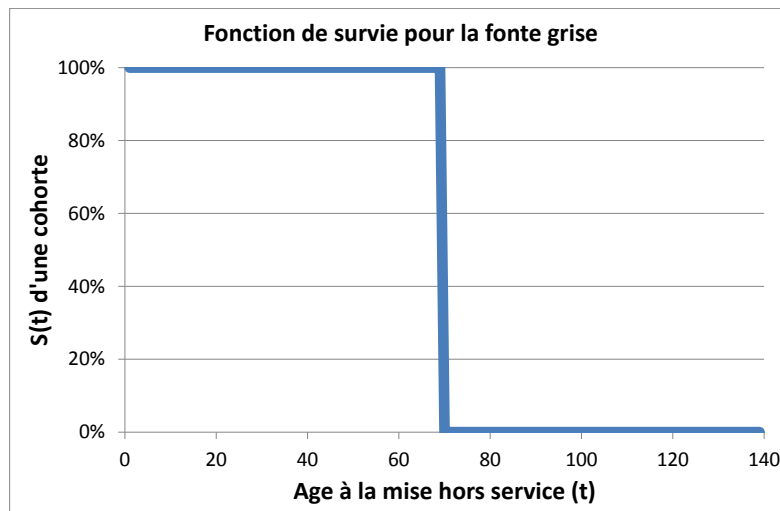


FIGURE 4.1: Fonction de survie d'une cohorte lorsqu'on ne considère que l'âge moyen à la mise hors service

4.3 Modèle [Randall-Smith et al., 1992]

$$\rho = \left(\frac{t \times E}{U_e + U_i} \right) - t \quad (4.3)$$

- ρ = durée de vie restante
- t = âge du tronçon
- U_e = profondeur des piqûres extérieures
- U_i = profondeur des piqûres intérieures
- E = épaisseur initiale de la conduite

source [Randall-Smith et al., 1992] et [Marlow et al., 2009, p. 7-5]

4.4 Patrimoine expert

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 4.2). L'outil fait renouveler les canalisations qui ont l'indice de remplacement (IR_{2C}) le plus élevé (Cf. Tableau 4.2).

$$IR_{1P} = t / AgeHS \times 100 \quad (4.4)$$

- IR_{1P} = indice de remplacement 1 (en pourcentage)
- t = âge du tronçon
- $AgeHS$ = Age à la mise hors service à dire « d'expert ». AgeHS peut être fonction du matériau et du diamètre du tronçon.

Transformation d' IR_{1P} en pourcentage à IR_{1C} en classe.

IR_{1P}	IR_{1C}
[0,75%]	1
]75%,100%]	2
]100%,125%]	3
]125%,150%]	4
>150%	5

TABLE 4.2: Correspondance entre l'indice de renouvellement en pourcentage et l'indice de renouvellement en classe [Naldeo, 2013].

$$IR_{2C} = IR_{1C} + C1 + C2 + C3 + C4 \tag{4.5}$$

- IR_{2C} = indice de remplacement 2 (en classe)
- IR_{1C} = indice de remplacement 1 (en classe)
- C_i = critère de modulation au tronçon, valeur entière entre [0,4]. Par exemple pression de l'eau ou niveau de corrosivité du sol ou caractéristiques de l'environnement (trafic routier), ou 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.

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 vie de ces canalisations,
- les prix unitaires de remplacement des canalisations,
- le montant annuel d'investissement pour renouveler les canalisations
- le nombre d'années de la simulation

Source [Naldeo, 2013, p. 7]

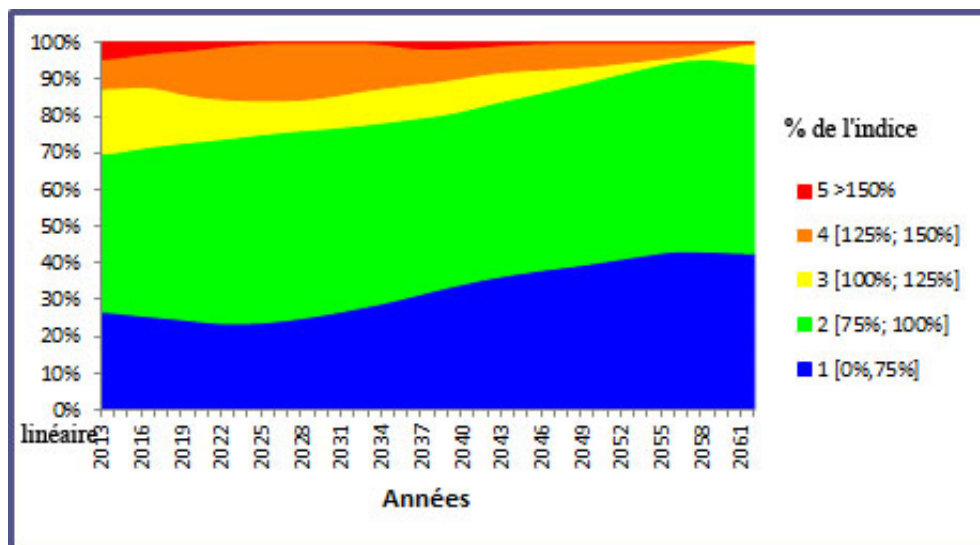


FIGURE 4.2: Exemple de sortie du logiciel Patrimoine Expert

Avantages :

- Possibilité d'analyser les données d'entrée

Inconvénients :

- durée de vie fixée 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) ne sont pas bien gérés par l'outil.

4.5 Synthèse

	TR fixe	Cador, 2002	Randall-Smith et al. 1992	Patrimoine expert
Taux de renouvellement	X			
Age ou Date de pose		X	X	X
Age à la mise HS		X		X
Matériau		+	+	+
Diamètre		+	+	+
Période de pose		+	+	+
Longueur		X		X
Profondeur des piqûres			X	
Epaisseur de la conduite			X	
Autres critères				X

FIGURE 4.3: Variables explicatives prises en compte par les modèles déterministes présentés précédemment permettant d'estimer les besoins en renouvellement (X : variable dans l'équation / + : variable prise en compte si une stratification est réalisée)

Chapitre 5

Modèle de la famille M0 : modèle probabiliste d'estimation du besoin en renouvellement futur des canalisations

5.1 NESSIE

5.1.0.1 Estimation de la densité de l'âge à la mise hors service des tronçons

Le modèle contenu dans NESSIE considère la variable aléatoire « âge à la mise hors service des canalisations ». La densité de probabilité de cette variable est estimée par une loi normale de paramètres (médiane et écart type) (cf. figure 5.1). La médiane de l'âge à la mise hors service est fixée à dire d'expert. Elle est souvent stratifiée par type de matériau et/ou diamètre et/ou type de sol et/ou des techniques de pose du service des eaux (cf. figure 5.2).

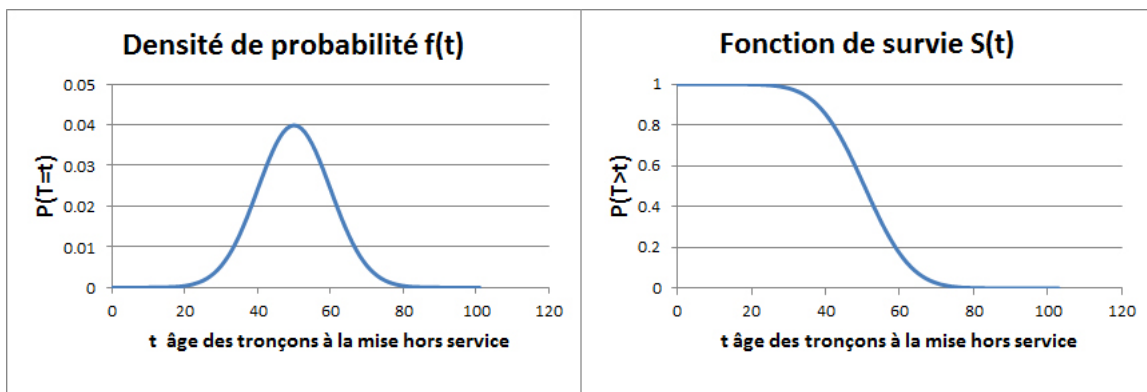


FIGURE 5.1: Densité de probabilité et fonction de survie d'une loi normale de paramètres (50;10)

Source [Kuhr et al., 2007, p. 46] et [AWWA, 2010, p. 8]

Derived Current Service Lives (Years)	CI	CICL (LSL)	CICL (SSL)	DI (LSL)	DI (SSL)	AC (LSL)	AC (SSL)	PVC	Steel	Conc & PCCP
Northeast Large	130	120	100	110	50	80	80	100	100	100
Midwest Large	125	120	85	110	50	100	85	55	80	105
South Large	110	100	100	105	55	100	80	55	70	105
West Large	115	100	75	110	60	105	75	70	95	75
Northeast Medium & Small	115	120	100	110	55	100	85	100	100	100
Midwest Medium & Small	125	120	85	110	50	70	70	55	80	105
South Medium & Small	105	100	100	105	55	100	80	55	70	105
West Medium & Small	105	100	75	110	60	105	75	70	95	75
Northeast Very Small	115	120	100	120	60	100	85	100	100	100
Midwest Very Small	135	120	85	110	60	80	75	55	80	105
South Very Small	130	110	100	105	55	100	80	55	70	105
West Very Small	130	100	75	110	60	105	65	70	95	75

LSL indicates a relatively long service life for the material resulting from some combination of benign ground conditions and evolved laying practices etc.
SSL indicates a relatively short service life for the material resulting from some combination of harsh ground conditions and early laying practices, etc.

FIGURE 5.2: Ages à la mise hors service médians des canalisations pour différentes strates [AWWA, 2010, p. 8]

CI : Cast Iron, CICL : Cast Iron Cement Lined, DI : Ductile Iron, AC : Asbestos Cement, PVC : PolyVinyl Chloride, Conc : Concrete, PCCP : Prestressed Concrete Cylinder Pipe.

5.1.0.2 Estimation des besoins en renouvellement

L'estimation du besoin en renouvellement va ensuite être obtenue, par simple translation des dates de pose plus cet âge fixée (cf. figure 5.2), matériau par matériau.

5.1.0.3 Estimation des coûts du renouvellement futurs

Ensuite, ce besoin en renouvellement est multiplié par le coût de remplacement moyen d'une canalisation et ainsi on obtient une courbe NESSIE (cf. figure 5.3).

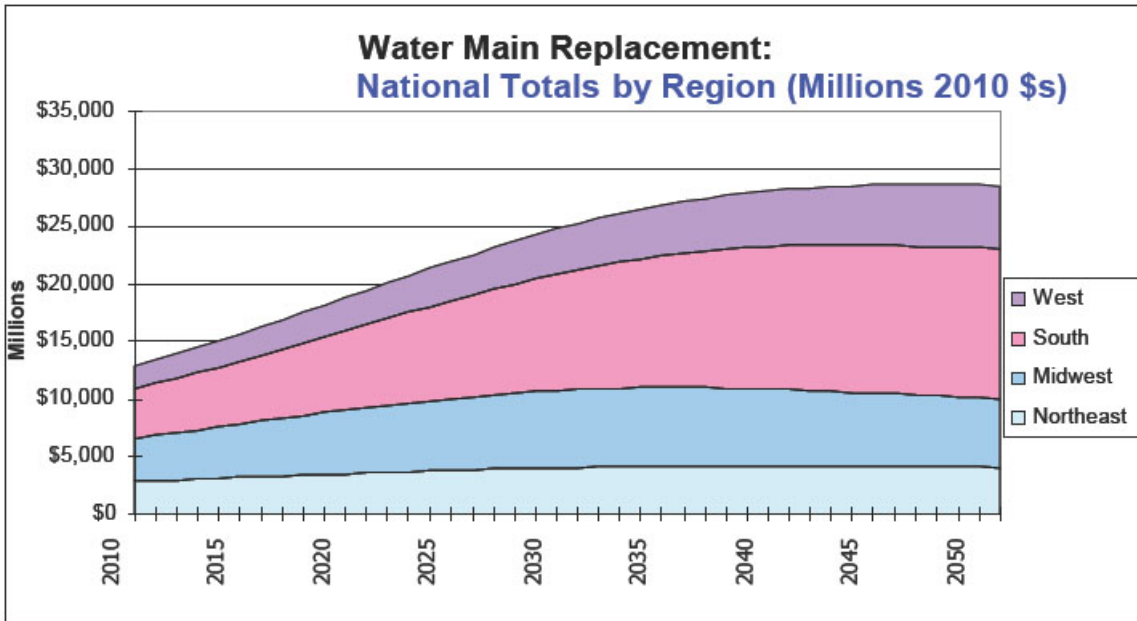


FIGURE 5.3: Coûts prévisionnels du remplacement des canalisations par région

Source [AWWA, 2010, p. 11]

5.2 Kanew

Le modèle dans Kanew est centré sur l'âge à la mise hors service des canalisations pour une cohorte¹/un groupe de tronçon (même matériau au moins). Cet âge n'est pas fixe mais distribué selon une « loi de Herz » cf. figure D.1.

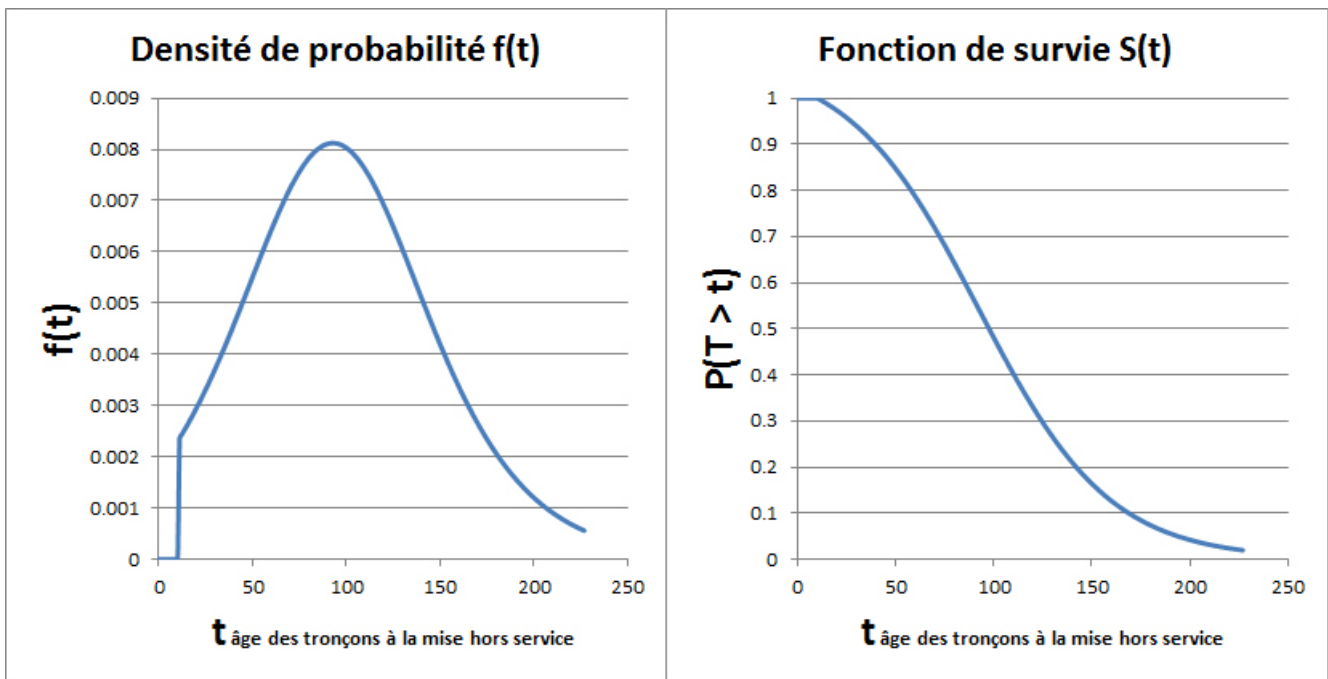


FIGURE 5.4: Densité de probabilité et fonction de survie d'une variable aléatoire suivant une loi de Herz de paramètres $a = 12$, $b = 0.03$ et $c = 10$

1. Une cohorte est un ensemble d'individus « nés » (posés) pendant le même intervalle de temps.

Le bureau d'étude 3Sconsult en Allemagne conseille d'utiliser la courbe des taux de défaillances observés selon la méthode graphique présentée dans la figure 5.5 afin de déterminer les paramètres a , b et c de cette courbe de survie (cf. figure de droite D.1), et d'encadrer cette courbe par un intervalle de confiance : une valeur haute et basse.

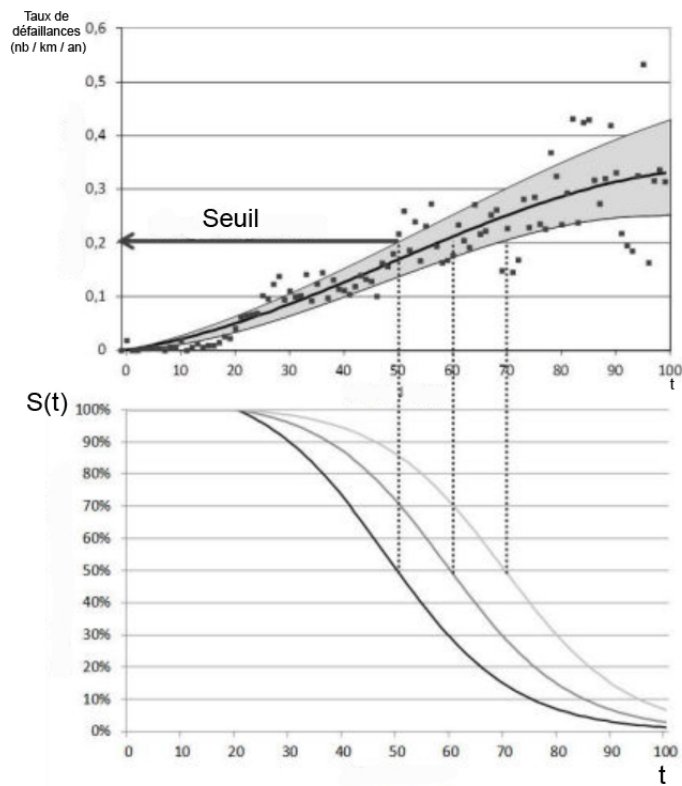


FIGURE 5.5: Méthode pour construire $S(t)$ et son intervalle de confiance min/max

Source [consulté le 14 mars 2013, http://www.3sconsult.de/kanew_ustand.html]

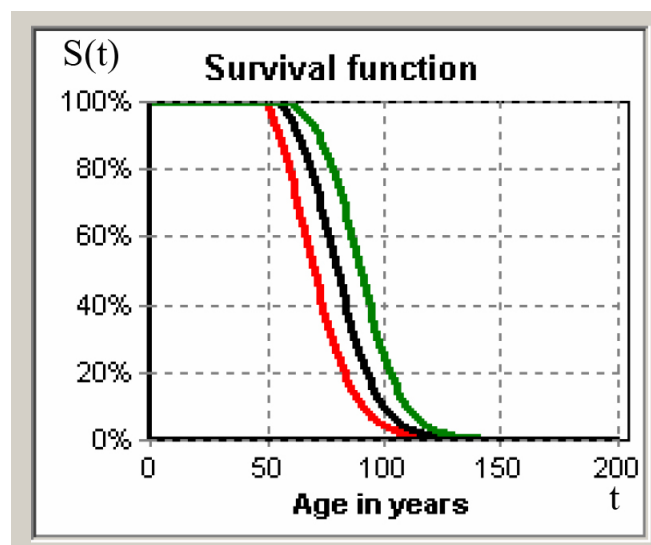


FIGURE 5.6: Courbe de survie de Herz $S(t)$ [Herz and Kropp, 2002, p. 48]

Ainsi le logiciel Kanew propose trois fonctions de survie pour : 1- une de durée de vie courte (cf. courbe rouge), 2- une autre de durée de vie moyenne (cf. courbe noire) et 3- une dernière de durée de vie longue

(cf. courbe verte sur la figure 5.6).

Le besoin en réhabilitation pour la cohorte C_k sur $[t_1; t_2]$, est égal $[S(t_1) - S(t_2)] \times$ linéaire de la cohorte [Kropp, 2003, p. 14].

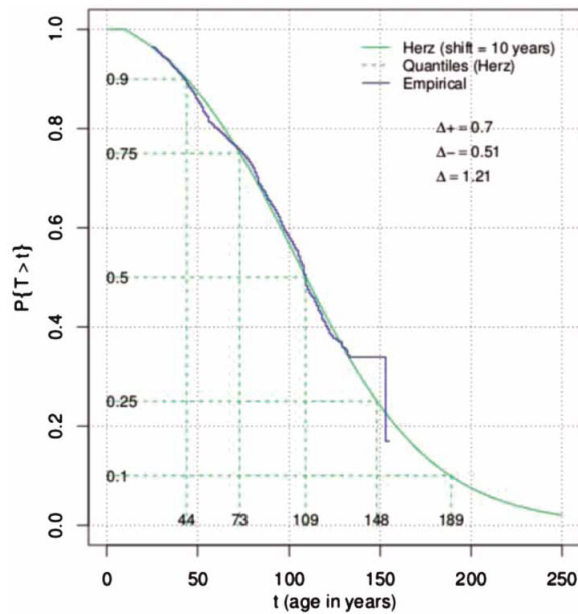


FIGURE 5.7: Vert : Courbe de survie de Herz paramétrée avec les données sur les canalisations du SEDIF (1995-2007). Bleu : Courbe de survie empirique (répartition de Turnbull) des canalisations du SEDIF (1995-2007)

Source [Herz, 2002] et [Renaud, 2011, ch. 3 dia. 96]

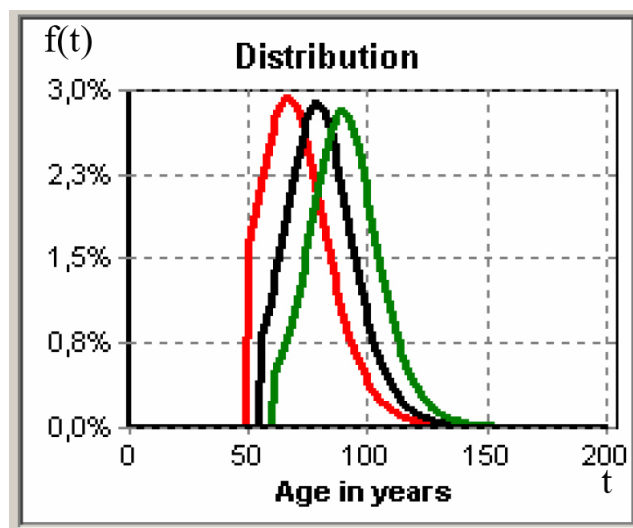


FIGURE 5.8: Densité de probabilité $f(t)$ de Herz

Source [Herz, 2002, p. 5] et [Kropp, 2003, p. 9].

5.2.1 Calcul des conséquences de la stratégie de réhabilitation

L'opérateur n'est pas obligé de remplacer tous les tronçons qui sont comptés dans le besoin en réhabilitation. Il peut fixer :

- le linéaire de canalisations qu'il souhaite remplacer par catégorie de tronçon,
- date de début de la stratégie
- date de fin de la stratégie
- et par quel type de canalisation il remplace les anciennes.

A partir de ces choix Kanew calcule les conséquences de cette stratégie qui va soit augmenter soit diminuer les besoins en réhabilitation.

Source [[Kropp, 2003, p. 14](#)].

5.2.2 Synthèse de Kanew

Avantages :

- Méthode conceptuellement simple pour calculer le besoin en réhabilitation annuel
- Facilité d'articulation avec une ACB (Analyse Coûts Bénéfices)

Inconvénient :

- Le calage des paramètres (a, b et c) est souvent arbitraire (à dire d'expert), même si la méthode décrite par la figure 5.5 permet de mieux caler a et b.

A noter :

- Nécessite d'avoir en plus, un modèle de défaillance, à l'échelle du tronçon, car Kanew possède un modèle de défaillance mais à l'échelle du réseau.

5.3 PARMS-Planning

Après avoir utilisé PARMS-Priority qui calcule des probabilités de défaillances futures pour chaque tronçon sur du court terme, PARMS-Planning va créer des courbes de défaillances agrégées à l'échelle du réseau au cours du temps (en général 30 ans).

Pour créer ces courbes, le logiciel prend en compte les décisions politiques du gestionnaire :

- et/ou son seuil de défaillances (ou interruptions) maximal admissible, qui, s'il est dépassé déclenchera le remplacement du tronçon ;
- et/ou son budget maximal admissible par an ;
- et/ou son seuil maximal admissible sur la pression, qui s'il est dépassé entraînera automatiquement l'insertion de vannes réduisant la pression et donc augmentera la durée de maintien en service des canalisations.

The screenshot shows the PARMS software interface with the following settings:

- Replacements:**
 - Action:**
 - Insert a valve (subject to shutoff-block limit), replace otherwise
 - Replace the asset (if trigger level reached)
 - Use Net Present Value Replacement strategy
 - Shutoff block:** Minimum length: 250 m
 - Replacement trigger:**
 - Failure
 - Interruption
 - Annual replacement budget:** UNLIMITED
- Pressure reduction:**
 - Active
 - Pressure:** 90 m
 - Discount rate:** 4 %

FIGURE 5.9: Les choix stratégiques possibles dans PARMS

Source [Burn et al., 2002, onglet policies] et [Marlow, 2009a, p. 2]

5.4 Modèle [Malm et al., 2012]

Le modèle utilisé dans [Malm et al., 2012], pour estimer le linéaire à renouveler futur, utilise une fonction de survie (des âges à la mise hors service) uniquement construite à partir des tronçons mis hors service sur une très grande fenêtre d'observation.

5.5 Modèle [Le Gat et al., 2013]

Une courbe de Herz peut être recalculée à partir de données réelles cf. table 5.1 et cf. figure 5.7 [Le Gat et al., 2013, p. 391] :

Coefficients	SEDIF	Ville S
a	12.41	10.26
b	0.027	0.036
c	10	10

TABLE 5.1: Valeurs de a, b et c

5.6 Synthèse

Modèles / Critères	Age HS à dire d'expert	Age HS basée sur l'historique des HS	Age HS basée sur l'historique des HS et des ES	Taux de défaillance maximum seuil
NESSIE	X			
Kanew	X			
PiRem	X			
PARMS				X
[Malm et al., 2012]		X		
[Le Gat et al., 2013]			X	

TABLE 5.2: Critère principal pris en compte pour estimer les besoins en renouvellement pour les simulations moyen ou long terme

Dans les modèles actuels, le raisonnement sur le moyen/long terme pour estimer les besoins en renouvellement considère comme causes de renouvellement :

- soit le dépassement d'un taux de défaillances maximum admissible (cf. PARMS)
- soit/et l'atteinte d'une « durée de vie » fixée à dire d'expert (cf. table 5.2)

Les modèles considérant une durée de vie fixe simplifient trop la réalité.

Nous allons maintenant présenter les modèles de risque (M2).

Troisième partie

Modèles de la famille M2 : Risque

Chapitre 6

Modèles de la famille M2 : Impact d'une coupure d'eau vis-à-vis des consommateurs

6.1 Préliminaire

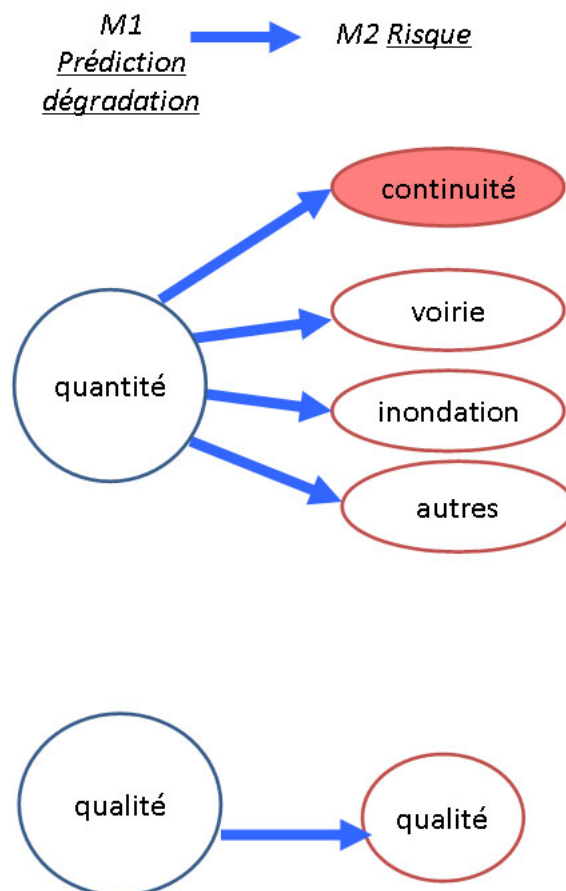


FIGURE 6.1: Liens des modèles de risque « continuité » (en rouge) avec les autres modèles

Aussi nommés M2 « continuité », les premiers modèles de risque que nous allons aborder ici concernent les risques de dérangement des consommateurs liés à une baisse de volume d'eau ou d'une coupure d'eau chez eux suite à une fuite ou à des travaux sur le réseau d'eau potable. (cf.figure 6.1).

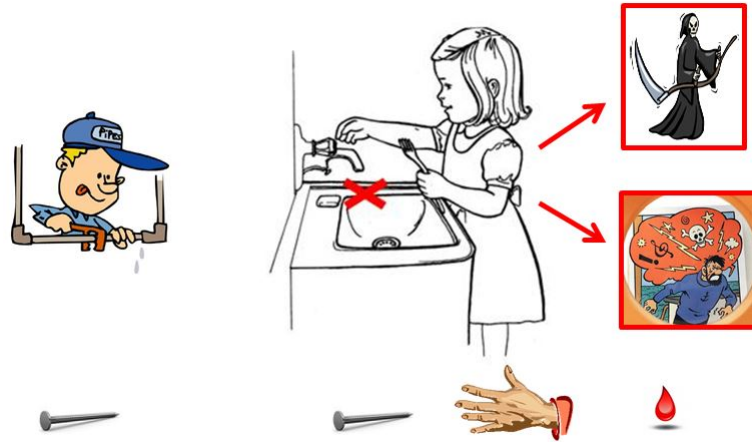


FIGURE 6.2: Schéma du risque de dérangement des consommateurs lié à une coupure d’eau (ou une baisse de volume) induite par une fuite sur le réseau

Dans ce cas, le danger primaire est la défaillance d’une canalisation et/ou sa réparation et/ou son renouvellement. Le danger secondaire est une baisse de volume d’eau ou robinet ou une coupure d’eau. Les éléments vulnérables sont les consommateurs d’eau (hôpitaux, dialysés, dentiste, usine de bière, coiffeur, crèche, maison, etc.). Les dommages peuvent aller du simple dérangement, énervement des consommateurs, en passant par la baisse du chiffre d’affaire de certaines entreprises, jusqu’à la déshydratation de personnes (cf. figure 6.2).

6.2 CARE-W-ARP

6.2.1 Vulnérabilité des consommateurs

$$PCWI = \delta\delta \times tr \times SC \tag{6.1}$$

- PCWI = predicted critical water interruption (h.personnes vulnérables/an)
- $\delta\delta$ = probable break rate = Nombre annuel de défaillances estimé (nb/an)
- tr = expected duration of interruption = durée de la coupure d’eau, dépend du diamètre (ϕ) et du matériau [amiante-ciment (AC) ou pas, etc.] (cf. table 6.1 ou 6.2 ou 6.3)
- SC = sensitivity of customer (cf. table 6.4) = vulnérabilité des consommateurs

Le service d’eau doit ensuite adapter les paramètres des indicateurs de risque à ses propres données. Les valeurs portées aux tableaux ci-dessous et dans les chapitres suivants ne sont données qu’à titre d’exemple.

tr (Heures)	Description
4	$\phi \leq 110$ et AC
7	$110 < \phi \leq 200$ et AC
10	$\phi > 200$ et AC
3	$\phi \leq 110$ et \neq AC
6	$110 < \phi \leq 200$ et \neq AC
8	$\phi > 200$ et \neq AC

TABLE 6.1: Valeurs de tr à Reggio Emilia (Italie)[Haidar, 2006, p. 64] (AC = amiante-ciment)

tr (Heures)	Matériau	Diamètre (mm)
3	Acier, fonte ductile, PE	$\phi < 250$
4	Acier, fonte ductile, PE	$\phi \geq 250$
6	Fonte grise, Eternit	$\phi < 250$
8	Fonte grise, Eternit	$\phi \geq 250$

TABLE 6.2: Valeurs de tr à Lausanne [Apotheloz, 2009, p. 4] (PE = polyéthylène)

tr (Heures)	Diamètre (mm)
2	$\phi < 200$
3	$200 \leq \phi \leq 400$
4	$\phi > 400$

TABLE 6.3: Valeurs de tr au Grand Lyon [Gd Lyon, 2013]

Valeurs SC	Description
1	Conduites près des hôpitaux, maison de retraite, etc.
0,5	Conduites près des dentistes, hôtels, crèches, centres de beauté
0	Autre

TABLE 6.4: Valeurs de SC à Reggio Emilia (Italie)[Haidar, 2006, p. 64]

Valeurs SC	Description
1	Clients sensibles
0.6	Z.I. sensible
0.5	Z.I. normale
0.3	Haute densité
0.2	Vieille ville
0.2	Centre village
0.2	Moyenne densité
0.1	Faible densité
0	Transport bouclage
0	Zone verte

TABLE 6.5: Valeurs de SC Lausanne [Apotheloz, 2009, p. 5]

6.2.2 Nombre de consommateurs affectés par les interruptions de service

$$PWI = \delta\delta \times tr \times NPS \quad (6.2)$$

- PWI = Predicted Water Interruptions
- NPS = nombre de personnes alimentées par la conduite
 - estimé par consommation journalière divisé par 242 L par personne, cf. [Haidar, 2006, p. 69] .
 - ou $NPS = NBC \times NBH$, cf. [Apotheloz, 2009, p. 4]
 - NBC = Nombre de branchements sur la conduite
 - NBH = Nombre d'habitants par branchement (cf. table 6.6).
 - ou NPS = nombre d'abonnés entre 2 vannes sur le bief cf. [Grand Lyon, 2013] .

Description	Valeurs de NBH
Haute densité	40
Moyenne densité	25
Centre village	20
Vieille ville	15
Z.I. sensible	5
Z.I. normale	5
Faible densité	5
Transport bouclage	0
Zone verte	0

TABLE 6.6: Valeurs de NBH à Lausanne

6.2.3 Fréquence des interruptions de service

$$PFWI = \delta\delta \times tr \times L/100 \quad (6.3)$$

- $PFWI$ = Predicted Frequency of Water Interruption
- L = Length of pipe i (m)
- $\delta\delta$ = Predicted Burst Rate for pipe i (No./100m/year)
- tr = the Expected Duration of Interruption, depending of the diameter, the type of failure... (hours)

6.3 CARE-W-RelNet

CARE-W-RElnet a été développé par l'Université Brno en République Tchèque, à partir de [Višćor, 1997].

Source [Eisenbeis et al., 2002a, p. 107 à 116] .

Source [Eisenbeis et al., 2003, p14 à 15] .

A partir des calculs du modèle hydraulique EPANET (cf. figure 6.3), l'indicateur suivant est calculé pour chaque noeud du graphe du réseau.

$$Q_n^{new} = \begin{cases} 0 & si : H_{new} < H_{min} \\ Q_{act} \times \frac{\sqrt{H_{new}}}{\sqrt{H_{act}}} & si : H_{min} < H_{new} < H_{req} \\ Q_{act} & si : H_{new} > H_{req} \end{cases} \quad (6.4)$$

- Q_n^{new} = demande obtenue au noeud n après qu'un tronçon soit supprimé du graphe du réseau
- Q_{act} = demande réelle, demande dans chaque noeud du réseau à l'état initial, le graphe est intègre
- H_{new} = pression après qu'un tronçon soit écarté de l'ensemble des liaisons de tronçons dans le réseau
- H_{min} = pression minimale, souvent = 15 m, si $H < H_{min}$ la demande n'est pas satisfaite
- H_{req} = pression requise, souvent = 25 m, if $H > H_{req}$ la demande est complètement satisfaite
- H_{act} = pression réelle lorsque le graphe est intègre

$$HCI = \frac{Q_{total} - \sum_n Q_n^{new}}{Q_{total}} \quad (6.5)$$

- HCI = hydraulic critical index pour chaque tronçon
- Q_{total} = demande dans l'ensemble du réseau
- n = noeud

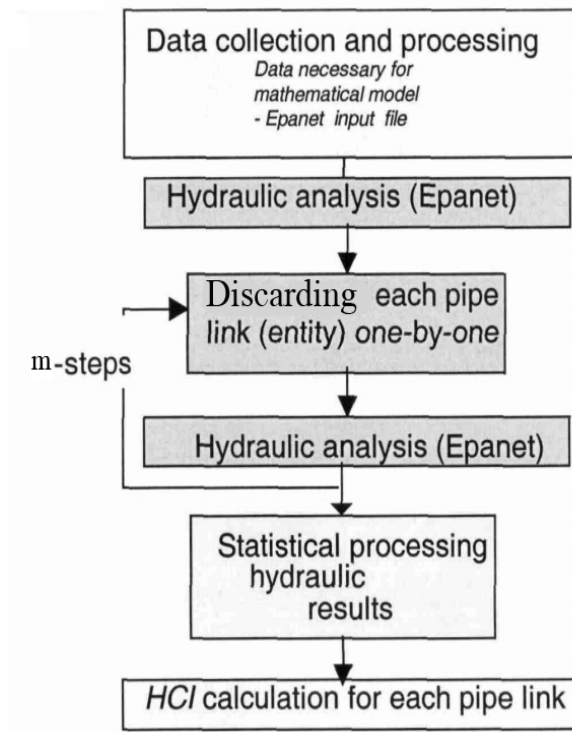


FIGURE 6.3: Détail des étapes de CARE-W-RelNet

6.4 CARE-W-Relnet à Lausanne

Eauservice Lausanne a adapté HCI à son service.

$$HCI_{laus} = \delta\delta \times HCI \times Q_{total} = \delta\delta \times (Q_{total} - \sum_n Q_{new}) \quad (6.6)$$

- $\delta\delta$ = Nombre annuel de défaillance du tronçon estimé par le logiciel « Casses » (nombre/an)
- Q_{total} = demande dans la zone de pression à laquelle appartient le tronçon (Eauservice a 22 zones de pression)
- HCI_{laus} = indicateur de dommage du tronçon d'Eauservice Lausanne, risque qu'un certain volume d'eau ne soit pas distribué jusqu'au consommateur suite à une coupure d'eau.

Source [Eauservice, 2013]

6.5 Criticité

$$C_i = D_i \times CP_i \times K_\Omega \quad (6.7)$$

- i = tronçon i
- C_i = criticité hydraulique du tronçon i (m^3/an)
- D_i = durée annuelle de défaillances du tronçon i (h/an)
- CP = criticité potentielle (m^3/h)
- K_Ω = facteur d'échelle normalisant l'importance des nœuds (cf. eq. 6.10)

$$D_i = tr_i \times TD_i \times L_i \quad (6.8)$$

- tr = temps de réparation ($h/défaillance$)
- TD = taux de défaillances ($défaillances/an/km$)
- L = longueur du tronçon (km)

$$CP_i = \sum_{n=1}^N (Q_{moy_n} - Q_{disp_{n,i}}) \times \omega_n \quad (6.9)$$

- n = nœud de consommation n^o n
- N = nombre total de nœuds
- Q_{moy} = demande moyenne annuelle (m^3/h)
- $Q_{disp_{n,i}}$ = demande disponible au nœud n quand le tronçon i est défaillant (m^3/h)
- ω_n = coefficient de pondération lié à l'importance du nœud n (cf. table 6.7)

Source [Renaud, 2011, ch. 3 dia. 35] et [Renaud et al., 2011a].

Valeur d' ω	Description
20	Consommateurs à enjeu santé
10	Consommateurs à enjeu économique
1	Consommateur domestique
0	Pas de consommateur

TABLE 6.7: Exemple de valeurs d' ω

Source [Brémond et al., 2005, p. 31 de l'annexe 2]

$$K_\Omega = \frac{\sum_{n=1}^N Q_{moy_n}}{\sum_{n=1}^N (\omega_n \times Q_{moy_n})} \quad (6.10)$$

6.6 SIROCO

$$I1_i = \frac{C_i}{L_i} \quad (6.11)$$

- i = tronçon n^o i
- $I1$ = indice linéaire de criticité hydraulique
- C_i = criticité hydraulique du tronçon i (m^3/an) issue de Criticité
- L_i = longueur du tronçon i (km)

Source [Brémond et al., 2005, p. 10] et [Renaud, 2011, ch. 3 dia. 47].

6.7 Logiciel T

$$PH = IDV \times IH \quad (6.12)$$

- PH = priorité hydraulique
- IDV = indice de durée de vie (cf. paragraphe 2.4.3)
- IH = Indice hydraulique

IH	Importance de conduite
1	0 peu important
1	3 peu important
1,5	2 moyennement important
2	1 très important

TABLE 6.8: Valeurs de IH

Source [Confidentiel]

$$IE = IDV \times tr \times ISC \quad (6.13)$$

- IE = interruption d'eau
- IDV = indice de durée de vie (cf. équation 2.7)
- tr = heures de réparation (cf. table 6.9)
- ISC = indice de sensibilité clients (cf. table 6.9)

Source [Confidentiel]

tr (heures)	ISC	Description
5	7,5	Fonte grise et $\phi > 300mm$
4	6	Fonte grise et $\phi \leq 300mm$
3	4,5	Autres et $\phi > 300mm$
2	3	Autres et $\phi \leq 300mm$

TABLE 6.9: Valeurs de tr et ISC

Source [Confidentiel]

Remarque : $ISC = 1,5 \times tr$

6.8 PARMS

Il semble que PARMS, depuis 2008 permet le calcul d'indicateurs monétisés qui sont ensuite intégrés dans la Net Present Value (NPV) (cf. équation 11.15).

$$C_{customerImpact} = C_C \times NI \quad (6.14)$$

- $C_{customerImpact}$ = coûts liés à l'impact sur les consommateurs à une échelle globale (dollars)
- C_C = Coût de la pénalité par consommateur par interruption de service (dollars)
- NI = Nombre d'interruptions

$$C_C = NCM \times NCC \times PFL \times tr \times C_{SCI} \quad (6.15)$$

- C_C = Coût de la pénalité par consommateur par interruption de service (dollars)
- NCM = Nombre de branchements
- NCC = Nombre de consommateurs par branchement
- PFL = Pourcentage de défaillances qui conduisent à une coupure d'eau (%)
- tr = temps de réparation (heures)
- C_{SCI} = Coût social par interruption de service (dollars/client/heure)

Source [Davis et al., 2008, p. 249]

Localisation / horaire	6h00 – 9h00	9h00 – 16h00	16h00 – 19h00	19h00 – 6h00
Quartier central des affaires	2,11	7,77	7,77	1,33
Artère principale	0	0	0	0
Rue commerçante	2,11	7,77	7,77	1,33
Rue de banlieue	0	0	0	0

TABLE 6.10: Valeurs de C_{SCI} (dollars/client/heure)

Source [Burn et al., 2002]

6.9 Aware-P

$$UDY = \sum_i \delta\delta_i \times tr_i \times Q_{unmet_i} \quad (6.16)$$

- UDY = volume prévu de demande non satisfaite dans un service d'eau sur une année
- $\delta\delta_i$ = nombre attendu de défaillances pour le tronçon i
- tr_i = temps de coupure moyen pour le tuyau i

- Q_{unmet_i} = valeur de la demande non satisfaite en cas de coupure d'eau dans le tuyau i

Source [Vitorino et al., 2012, p. 29].

6.10 Modèle [Scholten, 2013]

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^3 C_i \cdot n_{f,i}}{\sum_{i=1}^3 C_i \cdot n_i} \quad (6.17)$$

- R = Reliability index
- C_i = Poids pour le groupe de tronçons de même classe de diamètre i . $C_1=1$ pour le groupe des tronçons de diamètre ≤ 150 mm. $C_2=5$ pour le groupe de tronçons avec $150 \text{ mm} < \phi < 200 \text{ mm}$. $C_3=10$ pour le groupe des tronçons de diamètre ≥ 200 mm.
- $n_{f,i}$ = Nombre de défaillances au sein du groupe de tronçons i
- n_i = Nombre de tronçons au sein du groupe i

Source [Scholten, 2013, p. 89].

Nous avons présenté des indicateurs de risque, nous allons maintenant présenter des indicateurs de dommage lorsque l'accident a été réalisé. Les indicateurs de dommage sont ceux de l'International Water Association (IWA), association reconnue dans le domaine de l'eau, ainsi que ceux du rapport français sur le prix et la qualité du service (RPQS) qui doivent être publiés obligatoirement chaque année par les services d'eau français selon la loi Barnier du 2 février 1995.

6.11 Indicateurs d'évaluation de l'IWA

6.11.1 par personne

$$QS13 = \frac{D35}{F1 \times 24 \times H1} \times 100 \quad (6.18)$$

- $QS13$ = coupure d'eau (%)
- $D35$ = Coupure d'eau (personnes \times heures)
- $F1$ = Population desservies (personnes)
- $H1$ = Période d'évaluation (jours)

Source [Alegre et al., 2010, p. 183]

$$D35 = \sum_{j=1}^{D36} tr_j \times NP_j \quad (6.19)$$

- j = coupure d'eau numéro j

- $D36$ = nombre de coupure d'eau pendant la période d'évaluation
- NP = population soumise a la coupure d'eau (personnes)
- tr = durée de la coupure (heures)

Source [[Alegre et al., 2010, p. 233](#)]

6.11.2 par branchement

$$QS14 = \frac{D36 \times \frac{365}{H1}}{C24 \times 1000} \quad (6.20)$$

- $QS14$ = Interruptions par branchement (Nombre/1000 branchements/an)
- $C24$ = Nombre de branchements
- $D36$ = Nombre d'interruptions de service
- $H1$ = Période d'évaluation (jours)

Source [[Alegre et al., 2010, p. 183](#)]

6.12 Indicateurs d'évaluation du RPQS

$$P151.1 = \frac{NCNP}{NA} \times 1000 \quad (6.21)$$

- $P155.1$ = Taux d'occurrence des interruptions de service non programmées (nombre/millier d'abonnés)
- $NCNP$ = nombre de coupures d'eau au cours de l'année dont les abonnés n'ont pas été informés à l'avance
- NA = nombre d'abonnés

Source [[fiche RPQS P155.1](#)]

6.13 Synthèse

6.13.1 Echelle de temps

Nom	Dommages	Danger		Éléments vulnérables		
		Probabilité	Intensité	Quantité	Vulnérabilité	Valeur
CARE-W-ARP	<i>PCWI</i>	$\delta\delta$	<i>tr</i>	<i>NPS</i>	<i>SC</i>	<i>SC</i>
CARE-W-ARP	<i>PWI</i>	$\delta\delta$	<i>tr</i>			
CARE-W-ARP	<i>PFWI</i>	$\delta\delta$	<i>tr</i>			
CARE-W-RelNet	<i>HCI</i>	1	$\sum_n Q_{new}$	$Q_{total} - \sum_n$	ω_n	ω_n
ES Lausanne	<i>HCI_{laus}</i>	$\delta\delta$	$\sum_n Q_{new}$	$Q_{total} - \sum_n$		
Criticité	C_i	TD_i	$tr_i;$ $\sum_n Q_{disp_{n,i}}$	$\sum_n Q_{moy_n}$		
T	<i>PH</i>	<i>IDV</i>		<i>IH</i>		
T	<i>IE</i>	<i>IDV</i>	<i>tr</i>	<i>ISC</i>	C_{SCI}	
PARMS	<i>C_{customerImpact}</i>	<i>NI; PFL</i>	<i>tr</i>	<i>NCM; NCC</i>		
Aware-P	<i>UDY</i>	$\delta\delta_i$	$tr_i; Q_{unmet_i}$	Q_{unmet_i}		
Scholten, 2013	<i>R</i>	$n_{f,i}$		$C_i; n_i$		

TABLE 6.11: Indicateurs de niveau de risque (ex-ante)

Nom	Dommages	Danger	Éléments vulnérables			
			Source	Gravité	Intensité	Quantité
IWA	<i>QS13</i>	$tr_j; D36$		NP_j		
IWA	<i>QS14</i>	$D36$		$C24$		
RPQS	<i>P151.1</i>	<i>NCNP</i>		NA		

TABLE 6.12: Indicateurs de niveau de dommages (ex-post)

Pour rappel dans cette section, le danger primaire est la défaillance d'une canalisation et/ou sa réparation et/ou son renouvellement. Le danger secondaire est une baisse de volume d'eau ou robinet ou une coupure d'eau. Les éléments vulnérables sont les consommateurs d'eau (hôpitaux, dialysés, dentiste, usine de bière, coiffeur, crèche, maison, etc.). Les dommages peuvent aller du simple dérangement, énervement des consommateurs, en passant par la baisse du chiffre d'affaire de certaines entreprises, jusqu'à la déshydratation de personnes (cf. figure 6.2).

Le niveau de risque de dommages dépend alors des 2 dimensions des dangers : leur probabilité d'occurrence et leur son intensité ; et des 3 dimensions des éléments vulnérables touchés par le danger : leur quantité, leur vulnérabilité, et leur valeur.

Tous les indicateurs présentés précédemment ne prennent pas forcément en compte toutes ces dimensions (cf. cases vides dans le tableau 6.11).

Par exemple *HCI* caractérise la gravité des dommages lorsque la probabilité d'apparition des défaillances est de 100 %. Le service des eaux de Lausanne a corrigé cela en rajoutant une probabilité de défaillance afin d'obtenir un vrai risque. *HCI* est néanmoins le seul à résulter d'un calcul basé sur un modèle hydraulique. C_i est l'indicateur le plus complet de ceux présentés précédemment puisque toutes les dimensions sont présentes. Néanmoins pour des raisons de simplicité le coefficient ω_n de C_i prend à la fois la dimension vulnérabilité et la dimension valeur.

Enfin seul *C_{customerImpact}* contient un coefficient C_{SCI} qui prend en compte la valeur des usagers de façon

monétarisée.

Il est à noter que R n'est pas un indicateur de risque mais un indicateur de la fiabilité c'est à dire il est environ équivalent au contraire du risque sans prendre en compte les caractéristiques des éléments vulnérables.

QS13, QS14 et P151.1 ne sont pas des indicateurs de risque ex ante puisque ce sont des indicateurs d'évaluation des dommages de la situation ex post ; en effet la probabilité de l'évènement est égale à 1 puisque ce sont des évènements qui se sont déjà produits. On constate que ces indicateurs caractérisent uniquement la dimension « quantité » des éléments vulnérables.

6.13.2 Echelle d'espace

Nom	Dommages	Espace	
		Réseau	Tronçon
Logiciel/Source	Gravité		
CARE-W-ARP	$PCWI$		X
CARE-W-ARP	PWI		X
CARE-W-RelNet	HCI		X
Criticité	C_i		X
T	PH		X
T	IE		X
PARMS	$C_{customerImpact}$		X
Aware-P	UDY	X	
Scholten, 2013	R	X	
IWA	QS13	X	
IWA	QS14	X	
RPQS	P151.1	X	

TABLE 6.13: Echelle d'espace des indicateurs

Ces indicateurs ne sont pas tous à la même échelle. Les indicateurs d'évaluation ex-post sont tous à l'échelle du réseau alors que la majorité des indicateurs de niveau de risque sont calculés à une échelle plus petite : celle du tronçon (cf. table 6.13). En effet pour que l'indicateur de niveau de risque puisse impacter la décision de changer tel ou tel tronçon, il faut qu'il soit calculé à l'échelle du tronçon.

Chapitre 7

Modèles de la famille M2 : Impact des travaux sur les usagers des voiries

7.1 Préliminaire

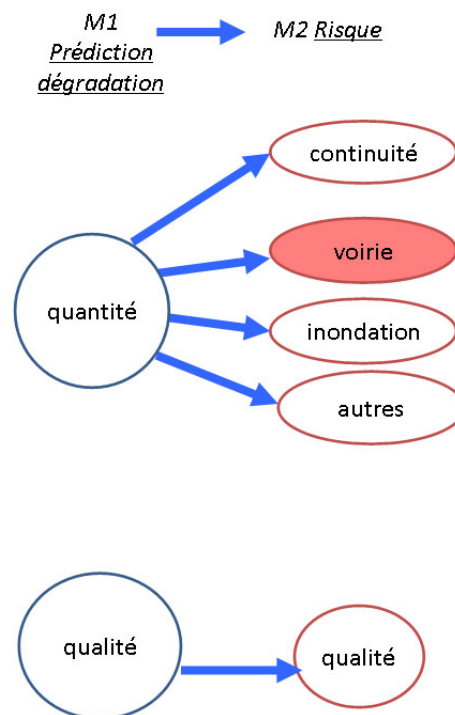


FIGURE 7.1: Lien des modèles de risque « voirie » avec les autres modèles, court terme

Nous allons maintenant détailler les modèles de risque dérangement des usagers de la voirie suite à une défaillance ou à des travaux sur le réseau d'eau potable.



FIGURE 7.2: Schéma du risque dérangement des usagers de la voirie suite à une fuite d'eau

Dans ce cas, le danger primaire est la défaillance d'une canalisation et/ou sa réparation et/ou son renouvellement. Le danger secondaire est la coupure de la route (en totalité ou partiellement). Les éléments vulnérables sont les usagers de la route et de la rue (Tramway, Trolleybus, bus, camions, voitures, vélos, rollerman, piétons ...). Les dommages potentiels vont de l'énerverment des usagers jusqu'à la perte de chiffres d'affaires de certaines entreprises (cf. figure 7.2).

7.2 CARE-W-ARP

Source [Haidar, 2006, p. 70].

$$DT = \delta\delta \times SR \tag{7.1}$$

- DT = perturbation du trafic routier
- $\delta\delta$ = probable failure rate = nombre annuel de défaillance estimé (nombre/an)
- SR = sensitivity of road = vulnérabilité de la route et intensité du trafic routier

Valeur de SR	Description
1	Voies pour l'accès aux services d'urgence (hôpitaux, etc.)
0,75	Voies avec trafic intense d'entrée et de sortie de la ville
0,5	Voies du centre ville
0,25	Autres voies

TABLE 7.1: Valeurs de SR à Reggio Emilia (Italie) [Haidar, 2006, p. 70]

Valeur de SR	Description
1	Chaussée
0,7	Indéterminée
0.4	Autre

TABLE 7.2: Valeurs de SR au Grand Lyon [Grand Lyon, 2013]

7.3 SIROCO

$$I2_i = NTR_i \times tr_i \times \delta\delta_i \quad (7.2)$$

- i = tronçon n^o i
- $I2_i$ = indice de perturbation du trafic routier au dessus de i
- NTR_i = niveau du trafic routier au dessus de i (cf. table 7.3)
- tr_i = temps de réparation, dépend du diamètre (ϕ) et de la localisation de i (h /défaillance) (cf. table 7.4)
- $\delta\delta_i$ = Nombre annuel de défaillances estimé (défaillances/an)

Valeur de NTR	Description
0	Trafic nul
1	Trafic Faible
5	Trafic Modéré
10	Trafic Important

TABLE 7.3: Valeurs de NTR

ϕ	Couverture		
	Sous terrain naturel, accotement ou chemin	Sous chaussée revêtue ou trottoir	Sous zone urbaine aménagée ou exigüe
$100 \geq \phi$	3	3,5	4
$100 < \phi \leq 200$	3,5	4	4,5
$\phi > 200$	4	4,5	5

TABLE 7.4: Valeurs de tr (heures/défaillance)

Source [Renaud, 2011, ch. 3 dia. 49]

7.4 Logiciel T

$$TR = IDV \times CSV \quad (7.3)$$

- TR = trafic routier
- IDV = indice de durée de vie (cf. paragraphe 2.4.3)
- CSV = caractéristique stratégique de la voie

Valeur sans voie publique	Valeur avec voie publique	Description (SIG)
1	1,5	Pas de trafic (chemin vicinal et rue priorité piéton)
1,5	2,25	Faible trafic (réseau de quartier)
2	3	Moyen trafic (réseau secondaire)
3	4,5	Fort trafic (réseau primaire)

TABLE 7.5: Valeurs de CSV

Source [Confidentiel]

7.5 PARMS

PARMS permet le calcul d'indicateurs monétisés qui sont ensuite intégrés dans la net present value (NPV).

$$C_{traficDisruption} = C_{TDI} \times NI \quad (7.4)$$

- $C_{traficDisruption}$ = coûts liés à l'impact sur la circulation routière à une échelle globale (dollars)
- C_{TDI} = coût total de la perturbation du trafic routier par interruption (dollars)
- NI = nombre d'interruptions

$$C_{TDI} = TD \times tr \times C_{TD} \quad (7.5)$$

- C_{TDI} = coût total de la perturbation du trafic routier par interruption (dollars)
- TD = intensité du trafic (véhicules/heure)
- tr = temps de réparation (heures)
- C_{TD} = coût unitaire de la perturbation du trafic (dollars/véhicule/heure)

Source [Davis et al., 2008, p. 249]

Localisation / horaire	6h00 – 9h00	9h00 – 16h00	16h00 – 19h00	19h00 – 6h00
Quartier central des affaires	0,57	0,63	0,87	0,06
Artère principale	1,23	0,52	1,75	0,02
Rue commerçante	1,98	2,52	3,46	0,03
Rue de banlieue	0	0	0	0

TABLE 7.6: Valeurs de C_{TD} (dollars/véhicule/heure)

Source [Burn et al., 2002]

7.6 Synthèse

7.6.0.1 Échelle de temps

Nom	Dommages	Danger		Éléments vulnérables		
		Probabilité	Intensité	Quantité	Vulnérabilité	Valeur
CARE-W-ARP	DT	$\delta\delta$		SR	SR	SR
SIROCO	$I2_i$	$\delta\delta_i$	tr_i	NTR_i		NTR_i
T	TR	IDV		CSV	CSV	CSV
PARMS	$C_{traficDisruption}$	NI	tr	TD	C_{TD}	C_{TD}

TABLE 7.7: Indicateurs du niveau de risque (ex-ante)

Pour rappel dans cette section, le danger primaire est la défaillance d'une canalisation et/ou sa réparation et/ou son renouvellement. Le danger secondaire est la coupure de la route (en totalité ou partiellement). Les éléments vulnérables sont les usagers de la route et de la rue (Tramway, Trolleybus, bus, camions, voitures, vélos, rollerman, piétons ...). Les dommages potentiels vont de l'énerverment des usagers jusqu'à la perte de chiffres d'affaires de certaines entreprises (cf. figure 7.2).

Le niveau de risque de dommages potentiel dépend alors des 2 dimensions du danger : sa probabilité d'occurrence et son intensité et des 3 dimensions des éléments vulnérables touchés par le danger : leur quantité, leur vulnérabilité et leur valeur.

Tous les indicateurs présentés précédemment ne prennent pas en compte toutes ces dimensions du risque (cf. cases vides dans le tableau 7.7). Par exemple les indicateurs *TR* et *DT* ne prennent pas en compte l'intensité du danger c'est à dire la durée de la perturbation routière.

7.6.0.2 Échelle d'espace

Tous les indicateurs de risque « voirie » sont à l'échelle du tronçon.

Chapitre 8

Modèles de la famille M2 : Impact d'une inondation provoquée par une fuite sur la zone urbaine

8.1 Préliminaire

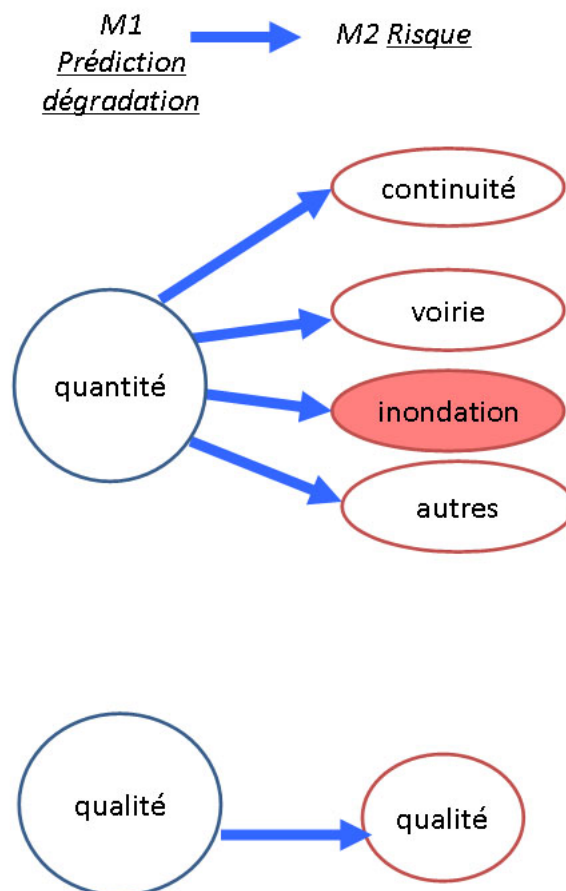


FIGURE 8.1: Liens entre les modèles risque « inondation » et les autres modèles, court terme

Nous allons présenter des modèles essayant d'estimer le risque de défaillances induisant une inondation.



FIGURE 8.2: Schéma du risque de dégradation de biens par une inondation liée à une fuite

Dans ce cas, le danger est la fuite d'une canalisation d'eau potable. Les éléments vulnérables sont les biens (voitures, bitume de la chaussée, maison, ...) ou les personnes à proximité. Les dommages potentiels vont de l'énerverment des usagers, en passant par la destruction de bien, la perte de chiffres d'affaires de certaines entreprises, et dans le pire des cas, jusqu'à blesser voire tuer des êtres vivants (cf. figure 8.2).

8.2 CARE-W-ARP

1. Vulnérabilité des zones urbaines

$$DFH = \delta\delta \times \phi^2 \times H \times VFH \quad (8.1)$$

- DFH = dommages dus aux inondations en zone d'habitation
- $\delta\delta$ = probable break rate = taux de défaillances probable induisant une fuite importante
- ϕ = diamètre
- H = pression
- VFH = vulnérabilité aux inondations de la zone d'habitation ($\in [0,1]$), cf. table 8.1

VFH	Description
0.8	Lyon-Villeurbanne et zones de balmes
0.4	Lyon-Villeurbanne sans balmes
0.3	Périphérie et zones de balmes
0	Périphérie sans balmes

TABLE 8.1: Exemple de valeurs de VFH [Grand Lyon, 2013]

2. Vulnérabilité des zones industrielles ou commerciales

$$DFI = \delta\delta \times \phi^2 \times H \times VFI \quad (8.2)$$

- DFI = dommages dus aux inondations dans les zones industrielles ou commerciales
- $\delta\delta$ = probable break rate = taux de défaillances probable induisant une fuite importante

- ϕ = diamètre
- H = pression
- VFI = vulnérabilité aux inondations de la zone industrielle ou commerciale ($\in [0,1]$)

Source [Haidar, 2006, p. 66].

VFI	Description
1	Voies ferrées et parking et balmes
0.9	Voies ferrés et zones de balmes
0.9	Parking et zones de balmes
0.8	Parking et voies ferrées
0.5	Voies ferrées
0.3	Parking

TABLE 8.2: Exemple de valeurs de VFI [Grand Lyon, 2013]

3. Vulnérabilité des autres infrastructures

$$DDI = \delta\delta \times \phi^2 \times H \times SI \quad (8.3)$$

- DDI = dégâts ou perturbations sur d'autres infrastructures
- $\delta\delta$ = probable failure rate = taux de défaillances probable
- ϕ = diamètre
- H = pression
- SI = vulnérabilité de l'infrastructure [0,1]

SI	Description
1	Vieille ville
0.8	Z.I. sensible
0.6	Haute densité
0.5	Centre village
0.4	Moyenne densité
0.4	Z.I. normale
0.2	Faible densité
0	Transport bouclage
0	Zone verte

TABLE 8.3: Valeurs de SI à eauservice Lausanne [Apotheloz, 2009, p.7]

8.3 Logiciel T

$$IN = IDV \times H \times \phi^2 \times PTE \times Za \quad (8.4)$$

- IN = indice inondation
- IDV = indice de durée de vie (cf. paragraphe 2.4.3)
- H = pression
- ϕ = diamètre

- PTE = pente
- Za = Zone d'affectation

Za	Description
5	Centre de T
4	Industries artisanat
3	Rural pavillonnaire, zone de développement
1	Zone inintéressante

TABLE 8.4: Valeurs de Za

Source [Confidentiel]

8.4 Synthèse

8.4.0.3 Échelle de temps

Nom Logiciel	Dommages	Danger		Éléments vulnérables		
		Probabilité	Intensité	Quantité	Vulnérabilité	Valeur
CARE-W-ARP	DFH	$\delta\delta$	$\phi^2; H; IFH$	VFH	VFH	VFH
CARE-W-ARP	DFI	$\delta\delta$	$\phi^2; H; IFI$		VFI	VFI
CARE-W-ARP	DDI	$\delta\delta$	$\phi^2; H$	SI	SI	SI
T	IN	IDV	$\phi^2; H; PTE$	Za	Za	Za

TABLE 8.5: Indicateurs du niveau de risque (ex-ante)

Pour rappel dans cette section, le danger est la fuite d'une canalisation d'eau potable. Les éléments vulnérables sont les biens (voitures, bitume de la chaussée, maison, ...) ou les personnes à proximité. Les dommages potentiels vont de l'énerverment des usagers, en passant par la destruction de bien, la perte de chiffres d'affaires de certaines entreprises, et dans le pire des cas, jusqu'à blesser voire tuer des êtres vivants (cf. figure 8.2).

Le niveau de risque de dommages potentiel dépend alors des 2 dimensions du danger : sa probabilité d'occurrence et son intensité et des 3 dimensions des éléments vulnérables touchés par le danger : leur quantité, leur vulnérabilité et leur valeur.

On constate que l'intensité du danger est prise en compte dans tous ces indicateurs par au moins 2 critères (le diamètre et la pression). Certaines caractéristiques des éléments vulnérables ne sont pas prises en compte (cf. cases vides dans le tableau 8.5). Par exemple l'indicateur DFI ne contient aucune indication sur la quantité d'éléments vulnérables potentiellement impactés par l'inondation.

8.4.0.4 Échelle d'espace

Tous ces indicateurs sont calculés à l'échelle du tronçon.

Chapitre 9

Modèles de la famille M2 : Impact d'un glissement de terrain provoqué par une fuite

9.1 Préliminaire

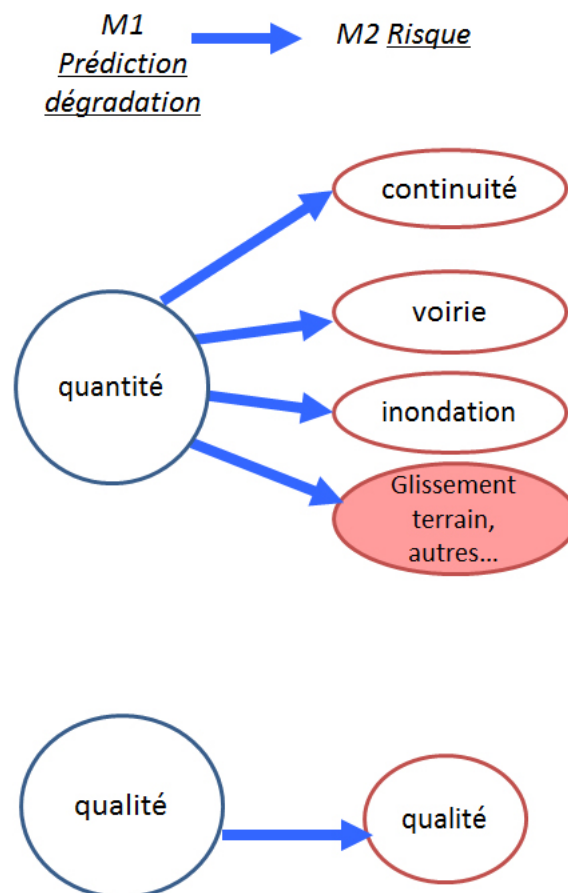


FIGURE 9.1: Liens entre les modèles risque « glissement de terrain » et les autres modèles, court terme

Nous allons présenter des modèles essayant d'estimer le risque de défaillances induisant un glissement de terrain ou tout autres mouvements de sol pouvant provoquer des dommages sur des biens et/ou des personnes.

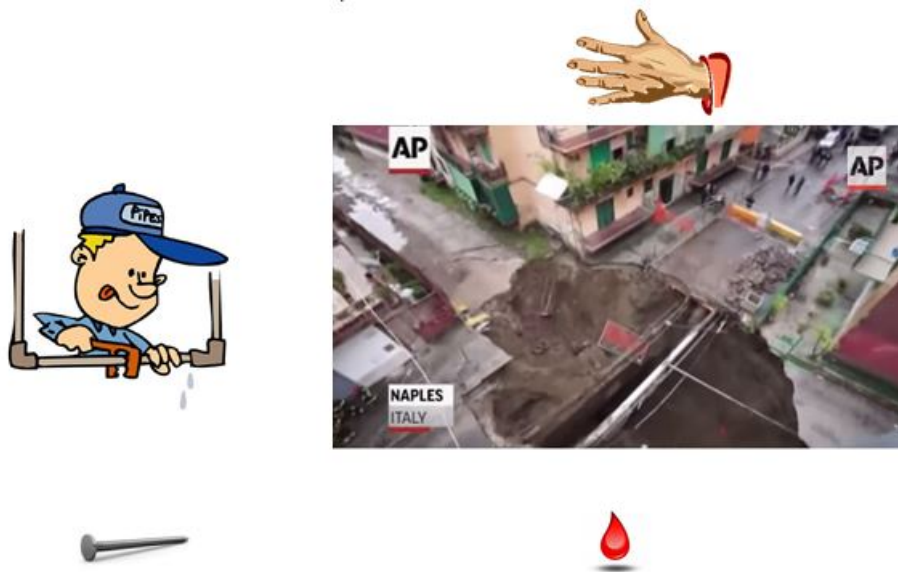


FIGURE 9.2: Schéma du risque de dégradation de biens et de personnes par un effondrement de terrain liée à une fuite

Dans ce cas, le danger primaire est la fuite d’une canalisation d’eau potable. Le danger secondaire est l’effondrement du terrain à cause de cette fuite. Les éléments vulnérables sont les biens (voitures, bitume de la chaussée, maison, ...) ou les personnes à proximité. Les dommages potentiels vont de l’énervement des usagers, en passant par la destruction de bien, la perte de chiffres d’affaires de certaines entreprises, et dans le pire des cas, jusqu’à blesser voire tuer des êtres vivants (cf. figure 9.2).

9.2 CARE-W-ARP

$$DSM = \delta\delta \times \phi^2 \times H \times LS \tag{9.1}$$

- DSM = dommages dus aux mouvements de sol
- $\delta\delta$ = probable break rate = taux de défaillances probable induisant une fuite importante
- ϕ = diamètre
- H = pression
- LS = vulnérabilité au glissement de terrain de la zone ($\in [0,1]$), cf. table 9.1

LS	Description
1	Zones de balmes
0	Sans balmes

TABLE 9.1: Exemple de valeurs de LS [Grand Lyon, 2013]

Chapitre 10

Les modèles sur la qualité de l'eau liée au réseau

Actuellement il existe peu de modèles sur la qualité de l'eau liée au réseau (problème d'eau rouge, d'eau noire, de plomb, etc.). Pourtant c'est un sujet qui risque de monter en puissance dans les services d'eau avec la problématique des CVM (chlorure de vinyle monomère). Depuis décembre 2003 (cf. directive européenne 98/83/CE) la teneur en chlorure de vinyle monomère (CVM) résiduel dans l'eau potable doit être \leq à 0,5 $\mu\text{g/L}$. Le CVM est un produit chimique purement synthétique. Au niveau des réseaux de distribution d'eau potable, la présence de CVM peut provenir notamment d'une migration dans l'eau à partir de certaines conduites en polychlorure de vinyle (PVC). En effet, la fabrication du PVC repose sur la polymérisation du CVM. Les matériaux en PVC antérieurs à 1980 ont une teneur en CVM résiduel beaucoup plus élevée que les PVC après 1980, et sont selon [Ministre de la Santé, 2012] ceux qu'il faut absolument surveiller. Cette législation a vu le jour car les CVM peuvent induire un dysfonctionnement du foie (infections par les virus des hépatites, cancer, etc.). [Comité Canadien, 2012; Ministre de la Santé, 2012] .

10.1 Modèles de la famille M1 : Détérioration de la qualité de l'eau lié au réseau, Q-WARP

Q-WARP est un outil pour prédire la détérioration de la qualité de l'eau dans le réseau de distribution. Q-WARP modélise cela par une carte « fuzzy cognitive ». Cela permet l'évaluation des stratégies (par exemple, le renouvellement, programme de contrôle des branchements) pour réduire le risque des problèmes de qualité d'eau, ce qui conduit à une meilleure prise de décision. Q-WARP est actuellement un logiciel prototype, mis à la disposition du public par l'intermédiaire du WRF (Water Research Fondation) [Liu et al., 2012, p. 111].

10.2 Modèles de la famille M2 : Impact d'une eau de mauvaise qualité vis-à-vis des consommateurs

10.2.1 Préliminaire

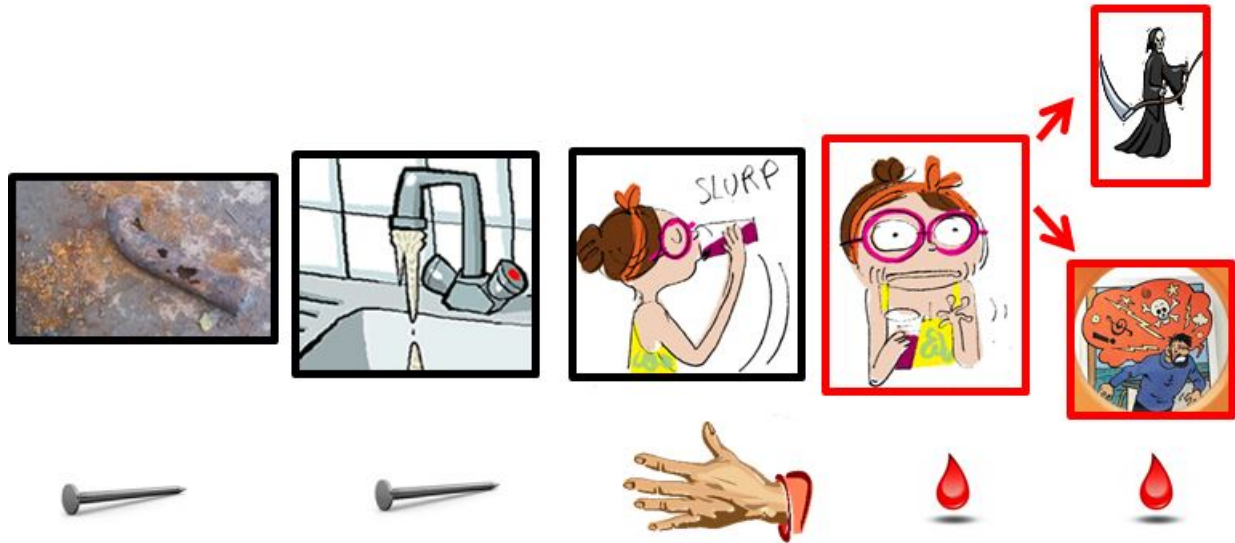


FIGURE 10.1: Schéma du risque de rendre les consommateurs d'eau du robinet en mauvaise santé suite à un problème du réseau

Dans ce cas, le danger primaire est la présence d'une canalisation qui introduit des éléments pathogènes dans l'eau. Le danger secondaire est le fait que cette eau de mauvaise qualité soit acheminée jusqu'au robinet du consommateur. Les éléments vulnérables sont les consommateurs d'eau potable (entreprises agro-alimentaires, restaurants, habitants de maison, ...). Les dommages potentiels vont de l'énerverment des usagers, en passant par la perte de chiffres d'affaires de certaines entreprises, et dans le pire des cas, jusqu'à rendre malade voire tuer des êtres vivants (cf. figure 10.1).

10.2.2 CARE-W-ARP

$$WQD_i = \text{fonction}(\text{plaintes}) \tag{10.1}$$

— WQD_i = water quality deficiencies at pipe number i

Valeur de WQD_i	Description
1	Plaintes enregistrées de consommateurs logeant dans la rue au-dessus du tronçon i
0	Aucune plainte de consommateurs logeant dans la rue au-dessus du tronçon i

TABLE 10.1: Valeurs de WQD_i [Haidar, 2006, p. 74].

Valeur de WQD_i	Description
1	> 2 plaintes de consommateurs dans la rue du tronçon i
0.5	2 plaintes de consommateurs dans la rue du tronçon i
0.2	1 plainte enregistrée de consommateurs dans la rue du tronçon i
0	Aucune plainte

TABLE 10.2: Valeurs de WQD_i [Grand Lyon, 2013]

WQD_i est un indicateur de dommage comme les indicateurs d'évaluation du RPQS. Nous allons présenter ces indicateurs.

10.2.3 RPQS

10.2.3.1 microbiologie

$$P101.1 = \frac{NC_{micr} \times 100}{NT_{micr}} \quad (10.2)$$

- $P101.1$ = Taux de conformité des prélèvements d'eau distribuée réalisés au titre du contrôle sanitaire par rapport aux limites de qualité pour ce qui concerne la microbiologie
- NC_{micr} = Nombre de prélèvements microbiologiques conformes
- NT_{micr} = Nombre total de prélèvements microbiologiques réalisés au cours de l'année

Source [Fiches RPQS, + de 5 000 hab].

10.2.3.2 physico-chimie

$$P102.1 = \frac{NC_{phychim} \times 100}{NT_{phychim}} \quad (10.3)$$

- $P102.1$ = Taux de conformité des prélèvements d'eau distribuée réalisés au titre du contrôle sanitaire par rapport aux limites de qualité pour ce qui concerne les paramètres physico-chimiques
- $NC_{phychim}$ = Nombre de prélèvements physico-chimiques conformes
- $NT_{phychim}$ = Nombre total de prélèvements physico-chimiques réalisés au cours de l'année

Source [Fiches RPQS, + de 5 000 hab].

10.2.4 Synthèse

10.2.4.1 Échelle de temps

Les 3 indicateurs présentés précédemment sont des indicateurs de dommages (ex-post). WQD_i est un indicateur d'évaluation a posteriori des dommages comme les indicateurs du RPQS. Dans la revue bibliographique effectuée nous n'avons rencontré aucun modèle avec un vrai indicateur de risque en son sein, prenant en compte la probabilité de défaillance sur le plan qualitatif.

10.2.4.2 Échelle d'espace

Nom	Dommages	Espace	
		Réseau	Tronçon
CARE-W-ARP	WQD_i		X
RPQS	$P101.1$	X	
RPQS	$P102.1$	X	

TABLE 10.3: Echelle d'espace des indicateurs

WQD_i est un indicateur à l'échelle du tronçon.

Quatrième partie

Modèles de la famille M3 : Économique

Chapitre 11

Modèles de la famille M3 : Économiques

11.1 Préliminaire

11.1.1 Quels sont les effets qui peuvent être monétarisés ?

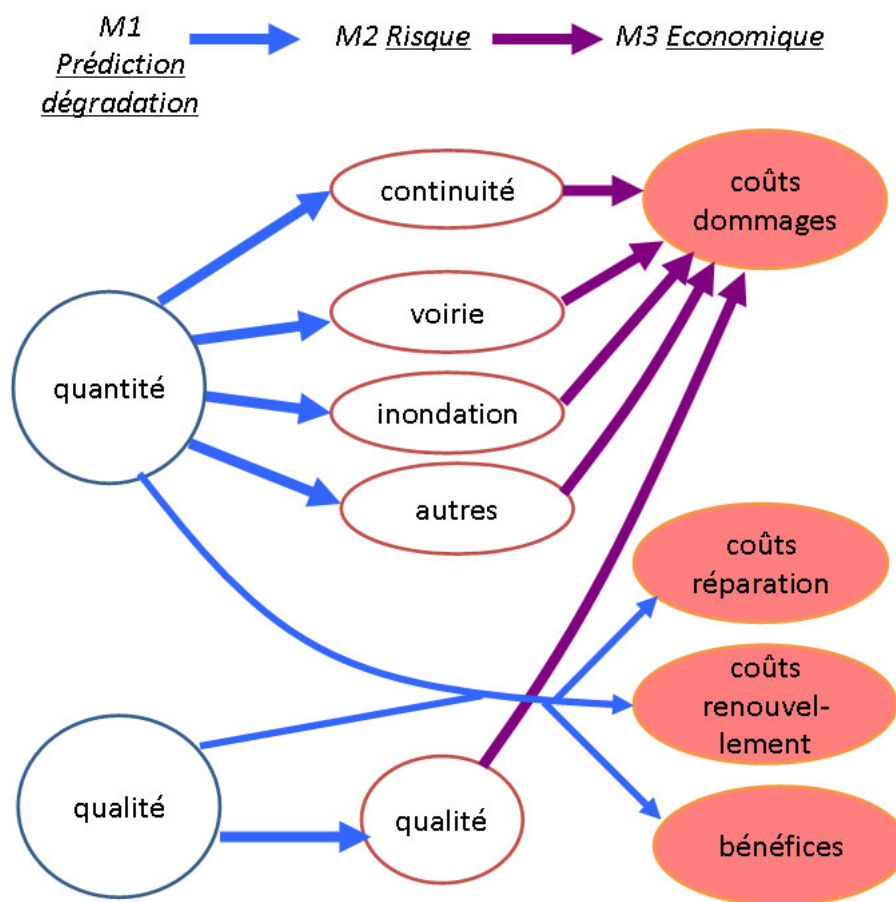


FIGURE 11.1: Liens entre les modèles économiques et les autres sur du court terme

Les effets de la gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable peuvent être positifs, par exemple :

- augmentation de la satisfaction des usagers de l'eau,
- diminution de la pression sur la ressource,

- gain d'image de marque du service.

Mais ils peuvent aussi être négatifs, par exemple :

- coupure d'eau et/ou diminution temporaire de la pression,
- route barrée un certain temps.

Ils peuvent être classés en :

- direct (les réalisations du gestionnaire ont une part très importante dans l'apparition de ces effets),
- indirect (les réalisations du gestionnaire ont une part moyenne dans l'apparition de ces résultats sur le territoire),
- induits (les réalisations du gestionnaire ont une part faible dans l'apparition de ces résultats sur le territoire) [cf. figure 11.2 et 11.3].

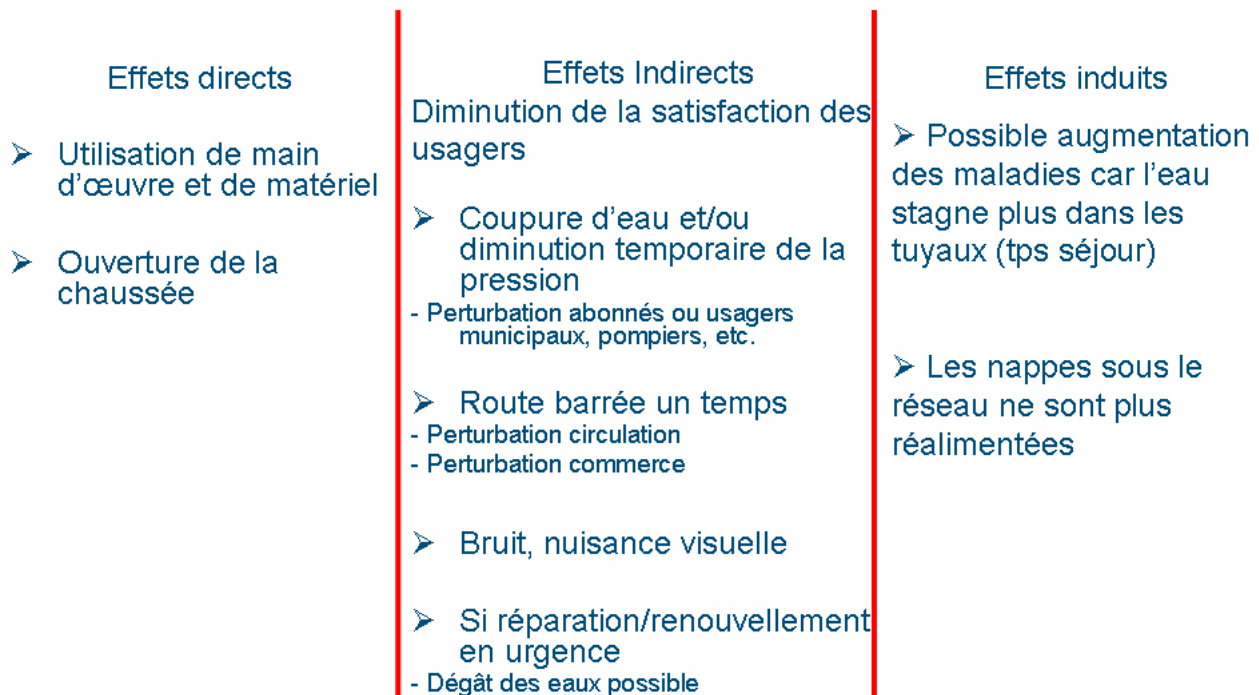


FIGURE 11.2: Effets négatifs d'une réparation/renouvellement d'une canalisation (anthropocentrée) qui peuvent être monétarisés

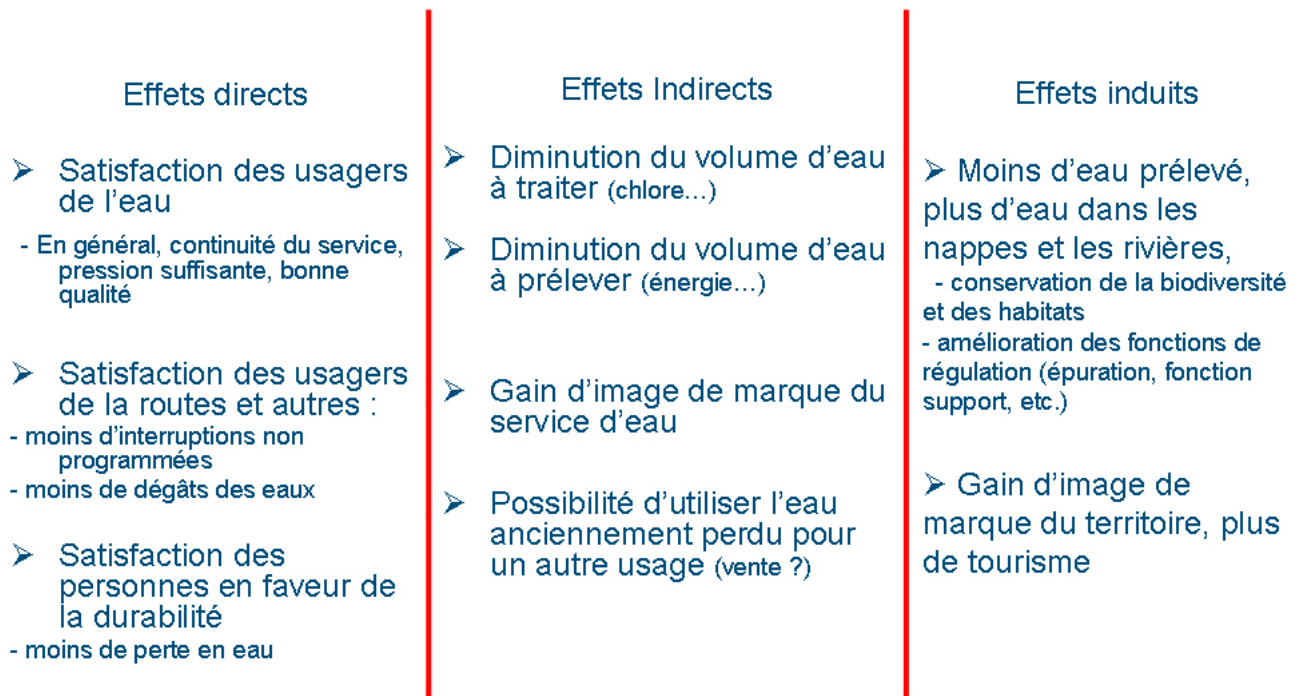


FIGURE 11.3: Effets positifs du renouvellement d'une canalisation au « bon » moment (anthropocentrée) qui peuvent être monétarisés

A noter :

Les notions d'effet direct ou indirect sont relatives : un effet peut être direct pour l'évaluation d'une prestation donnée et indirect pour une autre prestation. Un travail de clarification de ces frontières devra être réalisé afin de pouvoir concevoir le modèle désiré dans le cadre de cette thèse.

11.1.2 Classification des principales méthodes pour estimer les coûts (et les bénéfices)

Il y a différentes méthodes et « écoles » pour estimer les coûts (et les bénéfices) des actions (cf. figure 11.4) [Bouleau and Guérin-Schneider, 2011, p. 75] ; [Nicholson, 1998].

Certaines méthodes comme la « life cycle cost » (LCC) introduisent un taux d'actualisation c'est à dire « un taux de conversion permettant de rendre commensurable les sommes perçues et dépensées à des époques différentes, tout en intégrant une estimation quantifiée des risques de toutes natures (économiques, financiers, industriels, technologiques, sociaux...) susceptibles de peser sur la rentabilité des investissements publics. » [AERMC, 2007]

D'autres méthodes telles que l'analyse coûts bénéfices (ACB) vont prendre en compte les bénéfices marchands (en termes comptables et financiers les recettes concrètes que vont rapporter le projet ou les coûts financiers réellement évités), voire même les bénéfices non marchands (liés à la valeurs que les hommes attribuent à un bien) (cf. figure 11.4) .

		Utilisation du taux d'actualisation	Avec bénéfices	Avec coûts non-marchand	Avec bénéfices non marchand
Méthodes "gestionnaires"	Coût complet (direct et indirect) du bien				
	Coût direct du bien				
	Coût par activité				
Méthodes "ingénieurs"	Coût d'investissement	X			
	Coût d'exploitation				
Méthodes "économétriques"	Coût statistique				
Méthodes "financiers"	Life cycle cost (LCC)	X			
	Analyse coûts bénéfices (ACB) simple	X	X		
Méthodes "économistes de l'environnement"	WLC (Whole Life Cost) socio-env.	X		X	
	ACB socio-environnementale	X	X	X	X

FIGURE 11.4: Synthèse des différentes méthodes d'estimation des coûts (et des bénéfices)

Ces différentes méthodes ont chacune leurs lots d'avantages et d'inconvénients. Par exemple les méthodes dite « gestionnaires » [Bouleau and Guérin-Schneider, 2011, p. 75] sont plus fiables mais moins transposables d'un service à l'autre que les autres méthodes (cf. figure 11.5).

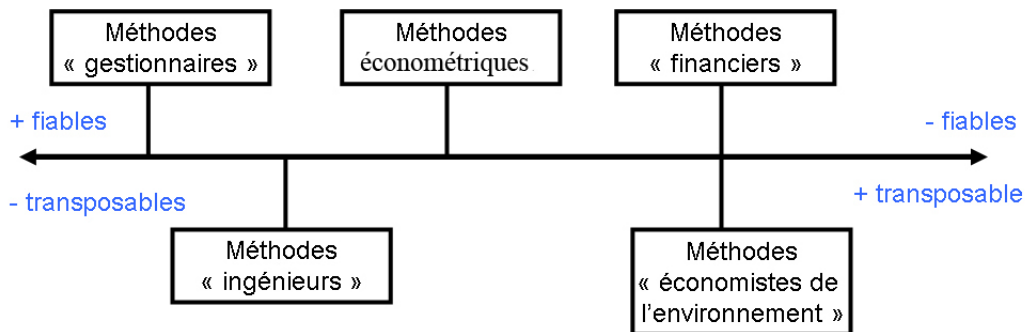


FIGURE 11.5: Avantages et inconvénients des différentes méthodes d'estimation des coûts (et des bénéfices)

Nous allons maintenant présenter quelques modèles économiques rencontrés lors de la revue bibliographique, en les classant du plus simple au plus complexe.

11.2 CARE-W-ARP

$$ARC = \delta\delta \times CUR_p \tag{11.1}$$

- ARC = coût de réparation annuel
- $\delta\delta$ = nombre annuel de défaillances estimé (nombre/an)
- CUR_p = Unit cost of repair, coût unitaire de réparation dépendant notamment du diamètre (ϕ)

CUR_p	Description
1 100 €	$100 \geq \phi$
2 200 €	$100 < \phi \leq 200$
3 200 €	$\phi > 200$

TABLE 11.1: Valeurs de CUR_p en théorie (Euro)

Source [Haidar, 2006, p. 70]

CUR_p Coût [CHF]	Materiau	Diamètre (mm)
4 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi < 250$
6 000	Acier, fonte ductile, PE, fer	$\phi \geq 250$
20 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BAT	$\phi < 250$
40 000	Fonte grise, PRFV, Eternit, BAT	$\phi \geq 250$

TABLE 11.2: Valeurs de CUR_p (CHF) à Lausanne

Source [Apotheloz, 2009, p. 3]

11.3 Logiciel T

$$CR = IDV \times SFr \quad (11.2)$$

- CR = Coût réparation
- IDV = indice de durée de vie (cf. paragraphe 2.4.3)
- SFr = coût réparation

Source [Confidentiel]

Valeur de SFr	Description
7 500	Inconnu
5 000	$\phi < 300$ et espace rural
6 500	$\phi < 300$ et banlieue/espace résidentiel ou $\phi \geq 300$ et espace rural
7 300	$\phi \geq 300$ et banlieue/espace résidentiel ou $\phi < 300$ et centre ville
10 000	$\phi \geq 300$ et centre ville

TABLE 11.3: Valeurs de SFr (Francs Suisse)

11.4 Aware-P

$$IVI_t = \frac{\sum_i (CS_{i,t} \times \frac{VR_{i,t}}{VU_i})}{\sum_i CS_{i,t}} \quad (11.3)$$

- i = tronçon i

- t = année de l'évaluation
- IVI = infrastructure value index
- CS = coût de remplacement du tronçon i l'année t
- $VR_{i,t}$ = durée de vie restante du tronçon i l'année t
- VU_i = durée de vie totale du tronçon i

Source [Vitorino et al., 2012, p. 30].

$$Inv(Y) = \sum_{y=0}^Y \frac{C_{renouvellement}}{(1+r)^y} \quad (11.4)$$

- $Inv(Y)$ = Coût d'investissement actualisé sur l'horizon temporel Y

source chapitre 3 livre Alegre

11.5 SIROCO

$$I3_i = \frac{CURP_i \times TD_i \times DARN}{CLRN_i \times 1000} \quad (11.5)$$

- i = tronçon i
- $I3$ = ratio coût de réparation sur coût de renouvellement
- $CURP$ = coût unitaire de réparation (*Euro*)
- TD = taux de défaillances (défaillances/*km/an*)
- $DARN$ = durée d'amortissement des réseaux neufs (*ans*), souvent égale à 60 ans.
- $CLRN$ = coût linéaire de renouvellement (*Euros/m*) (cf. table 11.4).

ϕ	Couverture		
	Sous terrain naturel, accotement ou chemin	Sous chaussée revêtue ou trottoir	Sous zone urbaine aménagée ou exigüe
60	37 €	66 €	88 €
80	38 €	68 €	90 €
100	42 €	72 €	93 €
125	47 €	77 €	98 €
150	54 €	87 €	108 €
200	89 €	121 €	143 €
250	108 €	141 €	162 €
300	134 €	170 €	191 €

TABLE 11.4: Valeurs de $CLRN$ (€)

$$CURP_i = CUHM_i + 2 \times tr_i \times CHGS + AC_i \times PVAC \quad (11.6)$$

- $CUHM$ = coût unitaire de réparation hors main d'oeuvre (€) (cf. table 11.5)
- $CHGS$ = coût horaire global salarié (€), souvent égal à 20 €

- $PVAC$ = plus value amiante ciment (€), souvent égal à 650 €
- AC = pourcentage en amiante ciment du tronçon
- tr = temps de réparation (cf. table 7.4)

ϕ	Couverture		
	Sous terrain naturel, accotement ou chemin	Sous chaussée revêtue ou trottoir	Sous zone urbaine aménagée ou exigüe
60	225 €	305 €	445 €
80	255 €	335 €	475 €
100	295 €	375 €	515 €
125	325 €	405 €	545 €
150	410 €	505 €	670 €
200	520 €	615 €	780 €
250	585 €	685 €	850 €
300	1 025 €	1 125 €	1 290 €

TABLE 11.5: Valeurs de $CUHM$ (€)

Source [Renaud, 2011, ch. 3 dia. 50]

11.6 Modèle [Shamir and Howard, 1979]

Dans le modèle de [Shamir and Howard, 1979] la date optimale de renouvellement τ_r est telle que le coût de remplacement actualisé du tronçon et le coût de maintien en service actualisé du même tronçon de la pose au temps τ soit minimum. C'est à dire la dérivée en τ_r est nulle.

$$\frac{d\left(\sum_{\tau=\tau_p}^{\tau_r} \frac{C_b f(\tau)}{(1+r)^{\tau-\tau_p}} + \frac{C_r}{(1+r)^{\tau_r-\tau_p}}\right)}{d\tau}(\tau_r) = 0 \quad (11.7)$$

- $f(\tau)$ = Nombre moyen de défaillances annuelles par unité de longueur l'année τ (cf. équation 2.6)
- τ_r = Année de remplacement optimale
- τ_p = Année actuelle
- C_b = Coût de réparation d'une défaillance
- C_r = Coût de remplacement par unité de longueur de conduite
- r = taux d'actualisation

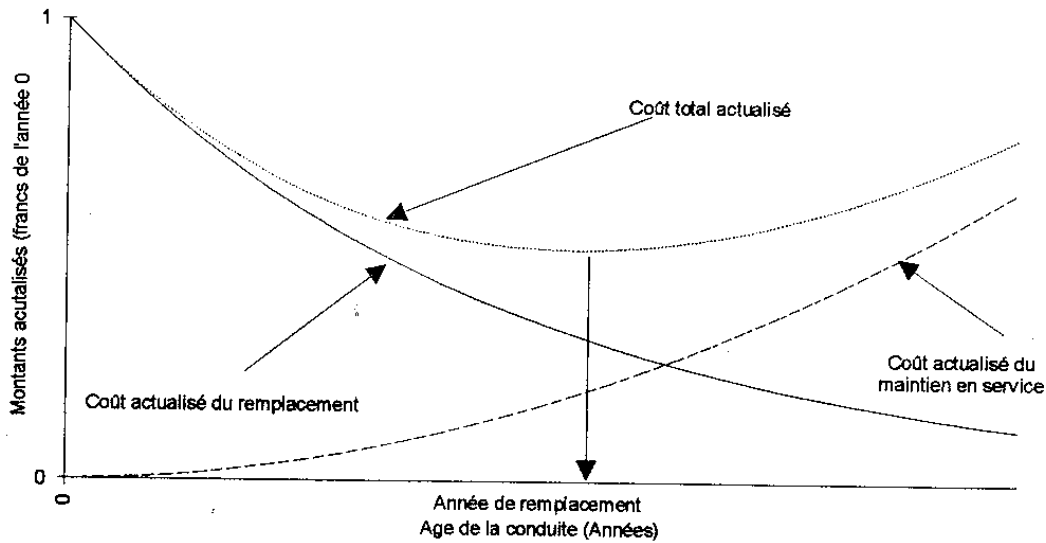


FIGURE 11.6: Exemple de calcul de la date optimale de renouvellement [Shamir and Howard, 1979]

Source [Shamir and Howard, 1979]; [Eisenbeis, 1994, p. 176] et [Dridi, 2005, p. 29]

11.7 Modèle [Walski, 1987]

$$M_1 = J_0 e^{bT} \tag{11.8}$$

- M_1 = Modèle prévisionnel de défaillance des tronçons
- J_0 = Taux de défaillance l'année t_0
- b = Taux annuel d'augmentation du nombre de défaillances
- T = Année optimale de remplacement de la conduite

$$C_r = \frac{1}{5280r} [C_b M_1 + C_w Q_0 e^{aT} + C_d + C_v V_0 e^{vT}] \tag{11.9}$$

- C_r = Coût unitaire de remplacement du tronçon (\$/pied)
- C_b = Coût unitaire de réparation d'une défaillance (\$/défaillance)
- C_w = Valeur de la perte d'eau (\$/million de gallons)
- Q_0 = taux de fuite l'année t_0 (millions de gallons/mille/année)
- a = taux annuel de croissance des fuites (%/an)
- C_d = Coût annuel de détection des fuite et de réparation (\$/an/mille)
- C_v = Coût de remplacement d'une vanne durant l'année t_0 (\$)
- V_0 = Fréquence de défaillances pour les vannes durant l'année t_0 (nombre/année t_0 /mille)
- v = taux annuel de croissance des défaillances des vannes (%/an)
- r = taux d'intérêt

Source [Walski, 1987] et [Dridi, 2005, p. 34]

La conduite doit être remplacé à T optimal, lorsque C_r est égal aux coûts de maintenance et de réparation ou lorsque le taux de casses est supérieur à un seuil fixé.

11.8 Modèle [Park, 2000]

$$Brk_{th} > \frac{\ln(1+r)}{\ln\left(\frac{C_{n+1}}{CC_n} + \frac{CC_{n+1}}{CC_n}\right)} \quad (11.10)$$

- Brk_{th} = Seuil théorique du taux de défaillances à partir duquel il faut remplacer le tronçon
- C_n = Coût de réparation de la n ième défaillance
- CC_n = Coût de remplacement du tronçon au temps de la n ième défaillance mesurée à partir de la date d'installation de la conduite
- r = taux d'actualisation

Source [Park, 2000]; [Loganathan et al., 2002] et [Dridi, 2005, p. 36]

11.9 Modèle [Cousin et Taugourdeau, 2015]

Le modèle [Cousin and Taugourdeau, 2015] essaye d'établir un lien économique entre le coût du renouvellement des canalisations et les pertes en eau. Néanmoins la prédiction de la dégradation des canalisations est basée sur le modèle [Cador, 2002b]. Or ce dernier n'est vraiment pas un modèle de prédiction de la dégradation à la long terme des canalisations satisfaisant. Par conséquent les calculs qui suivent sont largement trop impactés par ce choix de modèle.

11.10 Vision

A l'échelle du secteur hydraulique, ce logiciel cherche à minimiser les coûts en fonction d'une performance variable. Les deux indicateurs suivis sont : le nombre de fuites signalées et détectées et le volume de fuite (perte en eau) (Cf. NRR natural rate of rise).

11.10.0.1 Coût

CAPEX : Le « capital expenditure » ou dépenses d'investissement peut prendre en compte : les coûts du renouvellement.

OPEX : L « operational expenditure » ou dépenses d'exploitation peut prendre en compte dans ce logiciel les coûts des réparations, les coûts de la recherche active de fuite, les coûts marginaux du prix de l'eau (chlore + électricité) et dans certaines études les coûts des dégâts aux tiers.

11.10.0.2 Bénéfice

B : Les bénéfices pris en compte peuvent être les coûts évités lors du traitement et du pompage de l'eau qui n'est plus perdue par les fuites évitées et les coûts des réparations évitées.

11.10.0.3 Solde

$$\text{Solde} = B - OPEX - CAPEX \quad (11.11)$$

source [UKWIR, 2005]; [UKWIR, 2009, fonction T4]; [Le Quiniou and Sandraz, 2012a, dia. 9]; [Le Quiniou and Sandraz, 2012b] et [VEDIF, 2013]

11.11 Kanew

Impacts de la stratégie de réhabilitation monétarisée

11.11.1 Bénéfice 1 = coûts annuels évités sur $[0; \Theta]$ par la réduction des réparations d'urgence grâce aux défaillances évitées suite à la stratégie du gestionnaire

[Kropp, 2003, p. 41].

Ce bénéfice est calculé à partir des données suivantes rentrées par l'opérateur :

- taux de défaillances initial
- pourcentage annuel d'augmentation des défaillances
- temps de résistance (jusqu'à cet âge les nouveaux tronçons n'ont pas de défaillances)
- facteur d'inefficacité
- Coût de la réparation d'une défaillance
- % d'augmentation annuel de ce coût
- taux d'actualisation
- taux d'inflation

et à partir des données suivantes calculées par Kanew :

- taux de défaillances à Θ si aucune stratégie de réhabilitation n'est mise en place
- taux de défaillances à Θ si la stratégie de réhabilitation est mise en place

11.11.2 Bénéfice 2 = coûts annuels évités par la réduction des fuites sur Θ

[Kropp, 2003, p. 42].

Ce bénéfice est calculé à partir des données suivantes rentrées par l'opérateur (en plus de celles présentés précédemment) :

- indice linéaire de perte (ILP)
- pourcentage annuel d'augmentation de l'ILP
- Coût de la production d'un m^3 d'eau
- % d'augmentation annuel de ce coût

11.11.3 Coût 1 = Coût annuel d'investissement sur Θ

[Kropp, 2003, p. 43].

Ce coût est calculé à partir des données suivantes rentrées par l'opérateur (en plus de celles présentés précédemment) :

- coût du renouvellement d'une canalisation par km
- % d'augmentation annuel de ce coût

11.11.4 Coût 2 = Coût annuel d'entretien, d'inspection et de réparation sur Θ

[Kropp, 2003, p. 44].

Ce coût est calculé à partir des données suivantes rentrées par l'opérateur (en plus de celles présentés précédemment) :

- Coût de la maintenance et de l'inspection par km
- % d'augmentation annuel de ce coût

Source [Kropp, 2003, p. 17].

11.11.5 Solde = Solde annuel entre les bénéfices et les coûts sur Θ

$$\text{Solde} = B_1 + B_2 - C_1 - C_2$$

11.12 WiLCO

$$C_{burst} = C_{repair} + C_{indB} + C_{extB} \quad (11.12)$$

- C_{burst} = coût d'une défaillance
- C_{repair} = coût des réparations
- C_{indB} = somme des coûts indirects assumés par le gestionnaire (cf. équation 11.13)
- C_{extB} = somme des coûts externes liés aux défaillances (cf. équation 11.14)

$$C_{indB} = C_{regB} + C_{compensation} + C_{complaints} + C_{imageB} + C_{pendB} \quad (11.13)$$

- C_{regB} = coût annuel lié aux activités de régulation
- $C_{compensation}$ = coût annuel des compensations versées aux usagers et aux tiers du fait des défaillances
- $C_{complaints}$ = coût de traitement des plaintes
- C_{imageB} = coût de perte d'image de marque de l'organisme gestionnaire
- C_{pendB} = coût des éventuelles pénalités infligées par l'autorité de régulation en cas de taux de défaillances non conforme

$$C_{extB} = C_{disrup} + C_{WTP} \quad (11.14)$$

- C_{disrup} = coût total des perturbations induites par les défaillances
- C_{WTP} = consentement à payer des clients pour une fréquence de défaillances plus faible

Source [Skipworth et al., 2002] et [Haidar, 2006, p. 30].

11.13 PARMS

Développé par le CSIRO en Australie.

$$NPV = \sum_{t=0}^{\Theta} \frac{C_t}{(1+r_t)^t} \quad (11.15)$$

- NPV = net present value = valeur actuelle nette
- Θ = horizon temporel considéré
- C_t = coûts pour l'année t
- r_t = discount rate = taux d'actualisation pour l'année t

$$C_t = C_{renewal} + C_{customerImpact} + C_{trafficDisruption} \quad (11.16)$$

- C_t = coûts pour l'année t
- $C_{renewal}$ = fonction coûts de remplacement pour chaque tronçon
- $C_{customerImpact}$ = coûts liés à l'impact sur les consommateurs d'eau à une échelle globale
- $C_{trafficDisruption}$ = coûts liés à l'impact sur la circulation routière à une échelle globale

$$C_{renewal} = \alpha \cdot C_{design} + \beta \cdot C_{trench} + \gamma \cdot C_{layings} + \delta \cdot C_{reinstatement} \quad (11.17)$$

- C_{design} = coûts de la conception
- C_{trench} = coûts d'excavation, de remblayage et d'évacuation des eaux
- $C_{layings}$ = coût des tuyaux, de leurs pose / assemblage et de la mise en service
- $C_{reinstatement}$ = coût de l'aménagement paysager, remise à l'état initial (engazonnée), réparation des trottoirs (bitume, béton) et réparation de la chaussée
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ = coefficients à déterminer pour chaque tronçon

Source [Burn et al., 2003, p. 4]

11.14 Modèle [Davis et al., 2008]

11.14.1 Préliminaire

Développé par le CSIRO en Australie.

$$NPV = \sum_{t=0}^{\Theta} \frac{C_t}{(1+r_t)^t} - \sum_{t=0}^{\Theta} \frac{B_t}{(1+r_t)^t} \quad (11.18)$$

- NPV = net present value = valeur actuelle nette
- Θ = horizon temporel considéré
- C_t = valeur des coûts pour l'année t
- B_t = valeur des bénéfices pour l'année t = coûts évités des réparations d'urgence
- r_t = discount rate = taux d'actualisation pour l'année t

11.14.2 Estimation des coûts

$$C_t = C_{renewal} + C_{inspect} + C_{customerImpact} + C_{trafficDisruption} \quad (11.19)$$

- C_t = valeur des coûts pour l'année t (AU\$)
- $C_{renewal}$ = Coûts de remplacement total
- $C_{inspect}$ = frais d'inspection, coût d'un échantillon pour mesurer le taux de dégradation
- $C_{customerImpact}$ = Coûts liés à l'impact sur les consommateurs d'eau à une échelle globale
- $C_{trafficDisruption}$ = Coûts liés à l'impact sur la circulation routière à une échelle globale

$$C_{renewal} = C_{repair} + C_{OHS} + C_{excav} + C_{install} + C_{backfill} \quad (11.20)$$

- $C_{renewal}$ = Coûts de remplacement totaux (AU\$)
- C_{repair} = Coûts de réparation
- C_{OHS} = Frais de sécurité et santé au travail payé à des entreprises intervenant sur des conduites en amiante ciment
- C_{excav} = Coûts d'excavation basés sur une tranchée de 6 m de long, 2 m de large et 4 m de profondeur
- $C_{install}$ = Coûts d'installation d'une nouvelle conduites, basés sur 6 m de tuyau en PVC de diamètre 100.
- $C_{backfill}$ = Coût du remblai, à base de bitume.

$$C_{customerImpact} = NI \times PFL \times NCM \times NCC \times tr \times C_{SCI} \quad (11.21)$$

- $C_{customerImpact}$ = Coût de la pénalité par interruption de service par consommateur (AU\$)
- NI = Nombre de défaillance
- PFL = Pourcentage de défaillances qui aboutissent à une interruption de service (%)
- NCM = Nombre de branchements
- NCC = Nombre de consommateurs par branchement
- tr = Temps de réparation (hours)
- C_{SCI} = Coût social par interruption (AU\$/customer/hour)

$$C_{trafficDisruption} = NI \times TD \times tr \times C_{TD} \quad (11.22)$$

- $C_{trafficDisruption}$ = Coûts totaux de la perturbation du trafic routier (AU\$)
- TD = Intensité du trafic(vehicles/hour)
- C_{TD} = Coût unitaire de la perturbation du trafic (AU\$/vehicle/hour)

11.14.3 Estimation des bénéfices

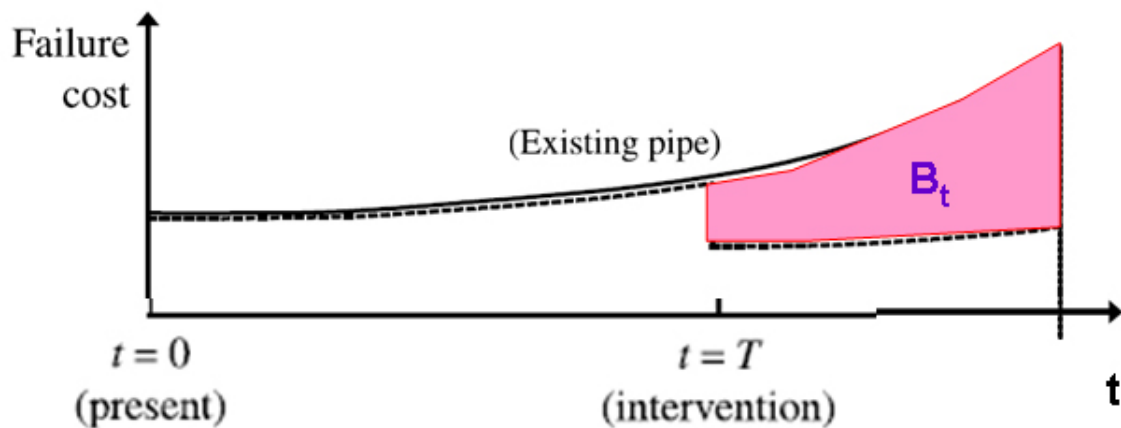


FIGURE 11.7: Méthode d'évaluation des bénéfices

B_t représente le bénéfice associé à l'intervention sur la canalisation par le service d'eau. Ce bénéfice est défini comme la différence entre 1) les coûts des défaillances susceptibles d'être encourues en laissant cette canalisation dans le sol et 2) les coûts des défaillances susceptibles de survenir en remplaçant la canalisation existante par une nouvelle au temps T. [Davis et al., 2008, p. 248].

11.15 Synthèse

11.15.1 Les données prises en compte dans les modèles économiques

Noms des modèles		Aspects pris en compte														
		CARE-W-ARP	T	Nessie	Patrimoine expert	SIROCO	Shamir et al. 1979	Aware-P	Walski 1987	Park 2000	Cousin & Taugourd	Vision	Kanew	WILCO	PARMS	Davis et al. 2008
Coûts	Réparation des défaillances	X	X			X	X		X	X		X	X	X	X	X
	Remplacement canalisations			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
	Inspection, détection défaillance								X			X			X	X
	Perte d'eau								X		X	X				
	Domage lié coupure d'eau													X	X	X
	Domage lié coupure voirie													X	X	X
	Autre dommage (inondation, etc.)											X		X		
Bénéfices	Coûts évités des réparations d'urgence											X				X
	Coûts évités des fuites (eau non perdu)										X	X	X			
	Domages évités															
	Satisfaction des usagers															

FIGURE 11.8: Synthèse des aspects économiques pris en compte dans les modèles économiques présentés précédemment

Les modèles économiques présentés précédemment ne prennent pas en compte les même coûts et les même bénéfices. Certains modèles ne vont prendre en compte que les coûts de réparation des défaillances comme CARE-W-ARP(cf. figure 11.8). D'autres modèles au contraire vont prendre en compte en plus des coûts et des bénéfices beaucoup plus diversifiés comme le coût de remplacement des canalisations, les coûts de certains dommages et les bénéfices engendrés par les coûts évités lors de réparations d'urgence (cf. [Davis et al., 2008]).

11.15.2 Échelle de temps

Presque tous ces indicateurs sont des indicateurs prévisionnels (ex-ante) sauf IVI_t qui va être un indicateur ex-post si $t \leq$ année actuelle ou un indicateur ex-ante si $t >$ année actuelle.

11.15.3 Appartenance à quelles familles de modèles économiques ?

	Méthode "ingénieur"	LCC	ACB simple	WLC	ACB socio-eco
CARE-W-ARP	X				
T	X				
SIROCO	X				
Aware-P	X				
Nessie	X				
Patrimoine expert	X				
Shamir et al. 1979		X			
Walski 1987		X			
Park 2000		X			
Vision			X		
Kanew			X		
WilCO				X	
PARMS				X	
Davis et al. 2008					X

FIGURE 11.9: Synthèse des familles de modèles économiques auxquelles appartiennent ces modèles

Les modèles économiques présentés précédemment peuvent être classés en 5 familles présentées au paragraphe 11.1.2, allant du plus simple au plus complexe (cf. figure 11.9).

11.15.4 Échelle d'espace

Nom	Coût	Espace		
Logiciel	Importance	Réseau	Secteur	Tronçon
CARE-W-ARP	ARC			X
T	CR			X
SIROCO	$I3_i$			X
Aware-P	IVI_t	X		
NESSIE		X		
Patrimoine expert		X		
Shamir et al. 1979				X
Park 2000				X
Walski 1987				X
Vision	$Solde$		X	
Kanew	$Solde$	X		
WiLCO	C_{burst}	X		
PARMS	NPV	X		
Davis et al. 2008	NPV	X		

TABLE 11.6: Echelle d'espace des indicateurs

Les sorties des ces modèles ne sont pas toutes à la même échelle d'espace (cf. table 11.6). Ainsi CARE-W-ARP est à l'échelle du tronçon alors que PARMS initialement à l'échelle du tronçon (modèle de défaillance) agrège ensuite ses résultats à l'échelle du réseau. En effet l'utilisation de ces modèles économiques n'est pas du tout la même.

Cinquième partie

Autres critères d'arbitrage

Chapitre 12

Autres critères d'arbitrage

12.1 Préliminaire

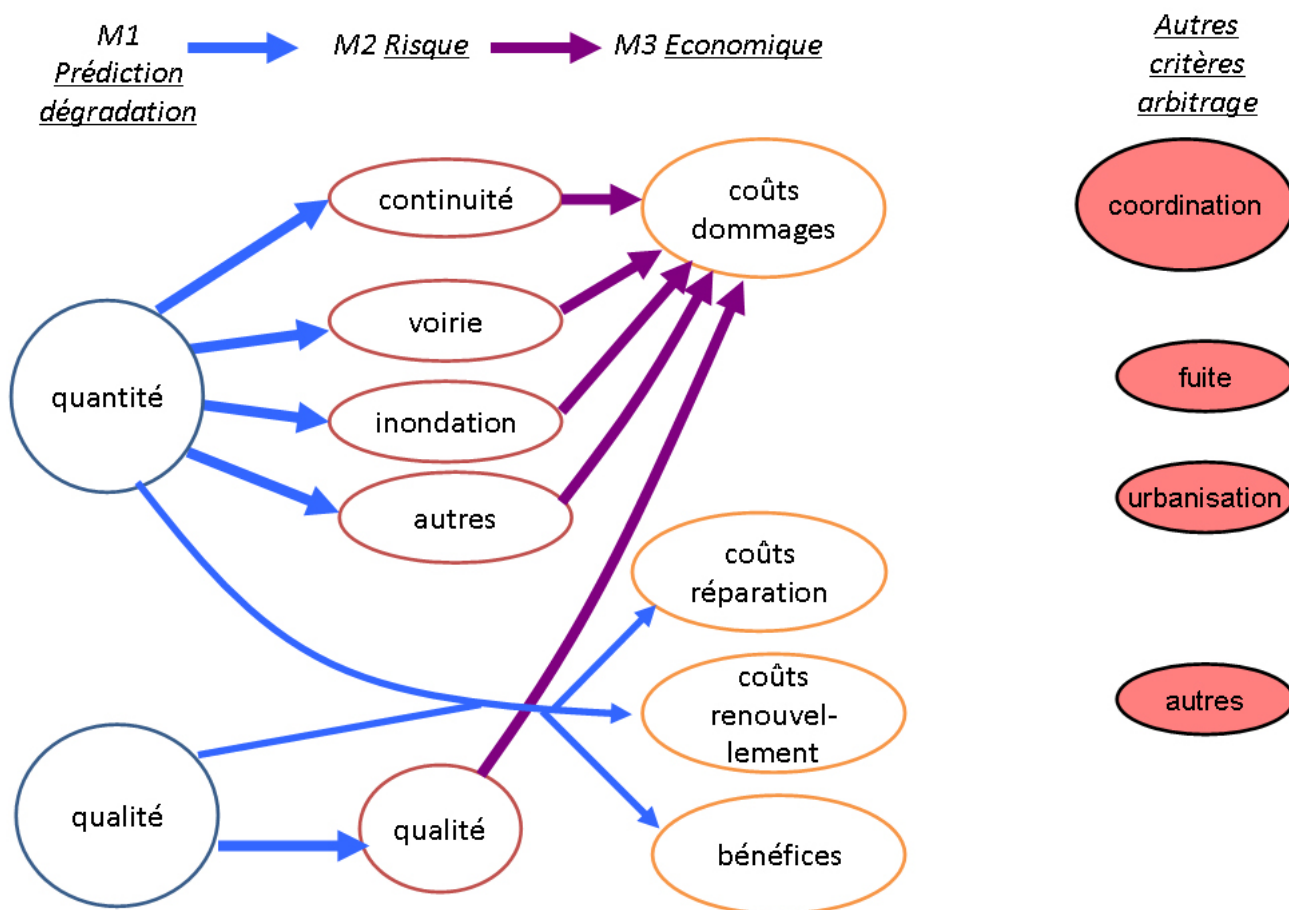


FIGURE 12.1: Schéma des autres critères permettant d'arbitrer les décisions (en rouge)

Le premier autre critère d'arbitrage que nous allons présenter est la coordination du service d'eau avec les autres services de la commune (gaz, électricité, voirie, etc.). Le second critère d'arbitrage que nous exposerons est le niveau du volume de fuite. Le troisième critère politique d'arbitrage que nous décortiquerons est l'évolution de l'urbanisation.

12.2 Coordination entre contraintes et opportunités

12.2.1 CARE-W-ARP

COS = Coordination Score $\in [-1,1]$

Valeur de COS	Description
1	Travaux prévus dans l'année sur les réseaux de gaz ou d'assainissement
0,5	Travaux de réfection de la chaussée prévus dans l'année
-1	Une réfection de chaussée a été réalisée durant les 5 dernières années
0	Autres cas

TABLE 12.1: Valeurs de COS à Reggio Emilia (Italie)

Source [Haidar, 2006, p. 74].

12.2.2 SIROCO

CC_i = Indice de coordination selon la couverture dépend de la nature de la surface sous laquelle est situé le tronçon i et du degré de coordination possible avec d'autres travaux ($\in [1,10]$) (cf. table 12.2)

Sol	Travaux		
	Travaux réalisés	Travaux ni programmés ni réalisés	Travaux programmés
Sous terrain naturel accotement ou chemin	1	1	1
Sous chaussée revêtue ou trottoir	1	2	8
Sous zone urbaine aménagée ou exigüe	1	4	10

TABLE 12.2: Valeurs théoriques de CC

Source [Brémond et al., 2005] et [Renaud, 2011, ch. 3 dia 58]

12.2.3 Synthèse

12.2.3.1 Échelle de temps

Les deux indicateurs précédents mixent des informations passées (ex-post) et des informations prévisionnelles (ex-ante).

12.2.3.2 Échelle d'espace

Ces deux indicateurs sont à l'échelle du tronçon.

Le deuxième autre critère que nous allons présenter ici est le niveau de fuite du réseau d'eau potable.

12.3 Volume de fuites

12.3.1 SIROCO

$$ILP_i = \frac{V_{perd_i}}{L_i \times 365} \quad (12.1)$$

- ILP_i = Indice linéaire de pertes pour le tronçon i ($m^3/km/jour$)
- V_{perd_i} = Volume perdu sur 12 mois au tronçon i (m^3)
- L_i = Longueur du tronçon i (km)

Source [Renaud, 2011, ch. 3 dia. 54]

12.3.2 CARE-W-ARP

$$WLI = fonction(SMNF) \quad (12.2)$$

- WLI = Water Losses Index
- $SMNF$ = Specific Minimum Night Flows

Valeur de WLI	Description
0	SMNF non mesuré
0,1	$SMNF \leq 0,3 \text{ m}^3/km/h$
0,2	$0,3 < SMNF \leq 0,6 \text{ m}^3/km/h$
0,3	$0,6 < SMNF \leq 0,9 \text{ m}^3/km/h$
0,4	$0,9 < SMNF \leq 1,2 \text{ m}^3/km/h$
0,5	$1,2 < SMNF \leq 1,5 \text{ m}^3/km/h$
0,6	$1,5 < SMNF \leq 1,8 \text{ m}^3/km/h$
0,7	$1,8 < SMNF \leq 2,1 \text{ m}^3/km/h$
0,8	$2,1 < SMNF \leq 2,4 \text{ m}^3/km/h$
0,9	$2,4 < SMNF \leq 2,7 \text{ m}^3/km/h$
1	$SMNF > 2,7 \text{ m}^3/km/h$

TABLE 12.3: Valeurs de WLI [Haidar, 2006, p. 74] à Reggio Emilia (Italie)

Valeur de WLI	Description
1	$SMNF$ élevé
0,9	$SMNF$ entre moyen et élevé
0,6	$SMFM$ moyen
0,3	$SMFM$ faible
0	$SMNF < 1 \text{ m}^3/km/h$

TABLE 12.4: Valeurs de WLI [Grand Lyon, 2013]

12.3.3 Kanew

Le *FLR* (Future network leakage rate) est calculé à partir de la stratégie choisie par le gestionnaire mais aussi selon l'équation suivante :

$$FLR(\Theta) = LR_{y_0} \times k^\Theta \quad (12.3)$$

- Θ = horizon temporel (en année)
- *FLR* = Future network leakage rate (FLR) ($m^3/km/h$) : futur indice linéaire de perte ($m^3/km/h$)
- $LR_{(y_0)}$ = network leakage rate (FLR) ($m^3/km/h$) : indice linéaire de perte ($m^3/km/h$) l'année de début de la simulation y_0
- k = pourcentage annuel d'augmentation de l'ILP

Source [Kropp, 2003, p. 38].

12.3.4 TCO-LCA-PAM

L'outil TCO-LCA-PAM signifie en anglais "Total Cost of Ownership (TCO) and environmental Life Cycle Assessment (LCA) of potable water pipework tool development for Pont-A-Mousson (PAM)" donc en Français : Coût total patrimonial et développement d'un outil d'Analyse du Cycle de Vie environnementale (ACV) des canalisations d'eau potable pour l'entreprise Pont-A-Mousson (PAM). Cet outil a été développé notamment par le bureau d'étude Quantis.

$$WL(y) = ILI(a) \times L \times 365.25 \times \frac{(1+r)^y - 1}{(1+r)^a - 1} \quad (12.4)$$

- y = prospective year = année prospective désirée
- a = expected service life : durée de maintien en service des canalisations (en année)
- $WL(y)$ = quantity of water loss during the year y (m^3) : volume de fuite l'année y (m^3) à l'échelle du réseau
- $ILI(a)$ = Infrastructure Leakage Index at the end of the expected service life ($m^3/km/day$) : indice linéaire de perte le jour de la mise hors service ($m^3/km/jour$)
- L = length of the network (km) : linéaire du réseau (km)
- r = water leaks yearly increase (forecasted) : taux prévisionnel annuel de croissance du volume de fuite

source [Bayart and Vargas, 2015, p. 18].

12.3.5 Vision

Ce modèle fonctionne à l'échelle du secteur hydraulique et sur du moyen terme.

$$NRR_t = aL^{1,2} \times A^{0,8} + b(N \times H)^{0,6} + ct \times J^\alpha \quad (12.5)$$

- $NRR(t)$ = Natural Rate of Rise of failure = taux naturel d'augmentation du volume de fuite (dus aux défaillances naturelles et défaillances détectées par la recherche active) [m^3/an]

- t = temps (en année)
- L = Longueur des canalisation
- A = age moyen des canalisations
- N = Nombre de branchements
- H = Pression moyenne
- J = Nombre de fuites réparées
- α = facteur additionnel (=1.7), impact de la recherche active de fuite et du renouvellement.
- a , b , et c = coefficients à déterminer

Source [UKWIR, 2005] et [UKWIR, 2009, fonction T4] et [Le Quiniou and Sandraz, 2012a, dia. 13] et [Le Quiniou and Sandraz, 2012b]

12.3.6 Indicateurs d'évaluation du RPQS

$$P106.3 = \frac{(V_{dis} - V_{aut})}{L \times 365} \quad (12.6)$$

- $P106.3$ = Indice linéaire de pertes en réseau ($m^3/km/jour$)
- V_{dis} = Volume mis en distribution sur 12 mois (m^3) = volume produit + volume acheté en gros – volume vendu en gros
- V_{aut} = Volume consommé autorisé (m^3) = volume comptabilisé + volume consommateurs sans comptage + volume de service du réseau
- L = Longueur du réseau de desserte (km)

Source [fiche RPQS P106.3]

12.3.7 Synthèse

12.3.7.1 Échelle de temps

Trois des indicateurs précédents sont des indicateurs d'évaluation des dommages a posteriori (ex-post) et 3 autres (ceux dans Kanew, TCO-LCA et Vision) sont des indicateurs prévisionnels (ex-ante).

Nom	Dommages	Temps	
		ex-ante	ex-post
logiciel/source	Gravité		
CARE-W-ARP	WLI		X
SIROCO	ILP_i		X
Kanew	FLR	X	
TCO-LCA	$WL(y)$	X	
Vision	NRR_t	X	
RPQS	$P106.3$		X

TABLE 12.5: Echelle de temps des indicateurs

12.3.7.2 Échelle d'espace

Nom logiciel/source	Dommages Gravité	Espace			
		Réseau	Secteur	Strate	Tronçon
CARE-W-ARP	WLI		X		X
SIROCO	ILP_i		X		X
Kanew	FLR			X	
TCO-LCA	$WL(y)$	X			
Vision	NRR_t		X		
RPQS	$P106.3$	X			

TABLE 12.6: Echelle d'espace des indicateurs

Le niveau de fuite est difficile à associer à un tronçon. En général les résultats de la recherche active de fuite sont au minimum à l'échelle d'un secteur. Par conséquent pour CARE-W-ARP comme pour SIROCO c'est l'indicateur à l'échelle du secteur qui est donné au tronçon appartenant à ce secteur (cf. table 12.6).

Le troisième autre critère d'arbitrage que nous allons présenter est l'urbanisation, c'est à dire tenter de mettre en adéquation l'emplacement et la dimension des conduites avec l'évolution de la demande (besoin en renforcement ou l'inverse?).

12.4 Urbanisation entre contraintes et opportunités

12.4.1 SIROCO

BR_i = Besoin en renforcement, dépend de la capacité du tronçon à assurer correctement sa fonction en situation actuelle ou future (cf. table 12.8).

Valeur de BR	Besoin en renforcement ?
1	Inutile ou à long terme (>15 ans)
3	A moyen terme (> 5 ans)
10	A court terme (< 5 ans)

TABLE 12.7: Valeurs de BR

Source [Renaud, 2011, ch. 3 dia. 59]

Indicateur ex-ante à l'échelle du tronçon.

12.4.2 CARE-W-ARP Lausanne

DIM_i = Critère indiquant les conduites où les pertes de charges sont les plus importantes, principalement dans les conduites de transport avec pompage. Ce sont des conduites qui sont donc sous-dimensionnées. Les pertes de charge j [m/km] sont calculées par simulation hydraulique (EPANET).

Perte de charge	Valeur de DIM_i	Bon diamètre ?
$j \leq 10$	0	tronçon OK
$10 < j \leq 20$	0.5	tronçon sous-dimensionné
$j > 20$	1	tronçon fortement sous-dimensionné

TABLE 12.8: Valeurs de DIM_i

Source [[Apotheloz, 2009, p. 11](#)]

12.5 Synthèse

Les autres critères d'arbitrage ne sont pas forcément pris en compte à l'aide d'équation. Il est à noter que la coordination est un critère d'arbitrage qui pèse souvent très lourd dans la prise de décision des services des eaux.

Nous allons maintenant présenter quelques modèles décisionnels.

Sixième partie

Modèles de la famille M4 : décisionnel

Chapitre 13

Modèles de la famille M4 : prise en compte des décisions

13.1 Préliminaire

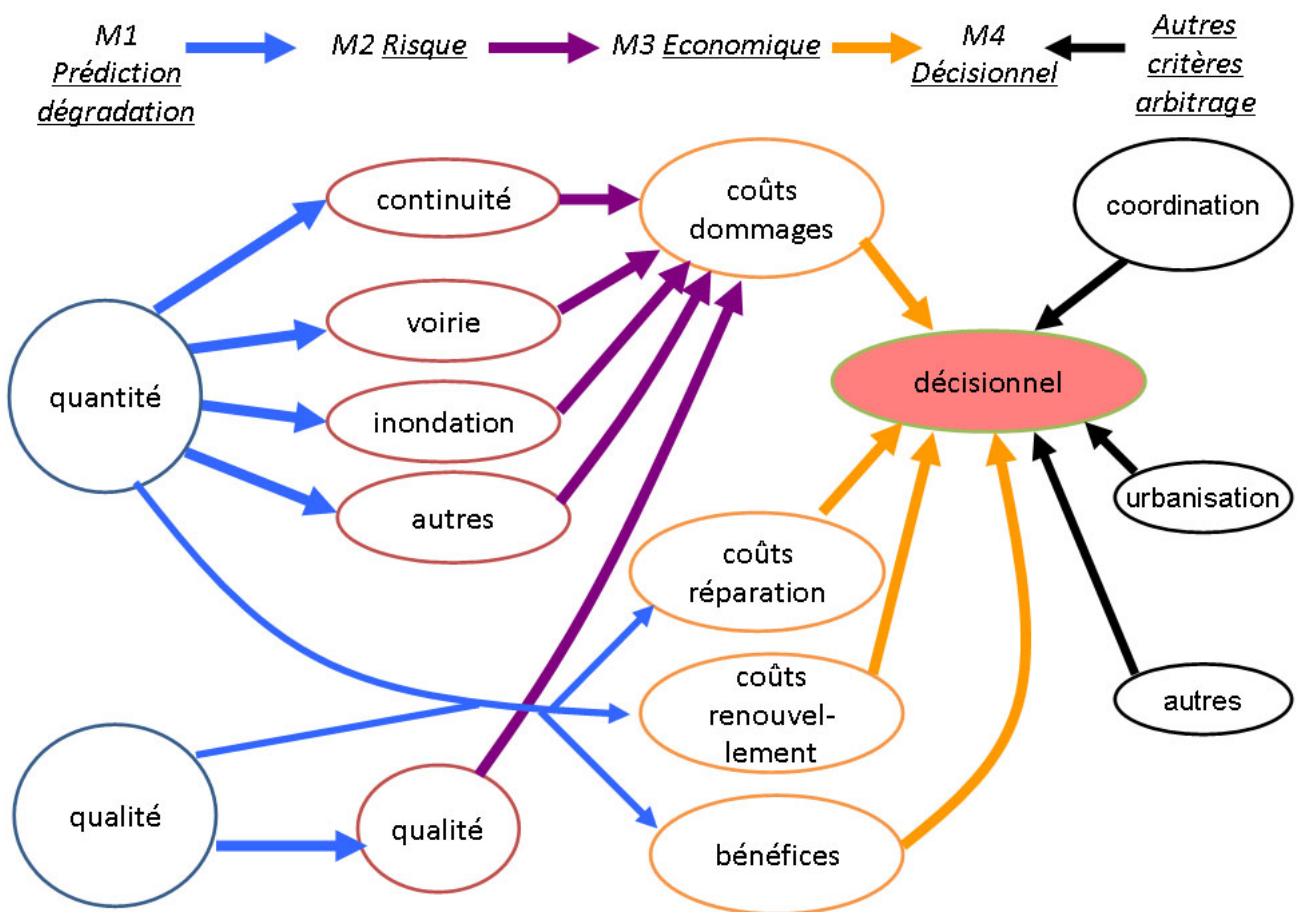


FIGURE 13.1: Liens des modèles décisionnels avec les autres modèles, court terme

L'objectif global d'un service d'eau est de fournir à chaque consommateur assez d'eau de bonne qualité. Les risques doivent être minimisés, et l'ensemble des coûts doivent être acceptables. Ces objectifs peuvent être résumés par les mots suivants : continuité, quantité, qualité et coûts acceptables. Le renouvellement des canalisations d'eau potable comporte donc plusieurs objectifs, souvent contradictoires. Par exemple plus les risques sont minimisés, plus les coûts ont tendance à augmenter. La prise de décision est donc multi-critères

et nécessite des choix ou jugements. Il existe tout un pan disciplinaire qui travaille sur ces méthodes (matrice de jugement, l'optimum de Pareto etc.).

Plusieurs chercheurs ont travaillé à classer ces méthodes (cf. [Hajkowicz and Collins, 2007] ; [Ananda and Herath, 2009]). [Scharling, 1985] cité par [Lehoux and Vallée, 2004] explique que ces méthodes peuvent être divisées en 3 catégories selon la façon dont les jugements sont agrégés :

- agrégation complète : on cherche à agréger n critères afin de les réduire en un critère unique [cf. Somme des notes (WSM), Multiplication des ratios (WPM), Analytic Hierarchy Process (AHP), Multi Attribute Utility Theory, etc.]
- agrégation partielle : on cherche à comparer des actions potentielles ou des classements les uns aux autres et à établir entre ces éléments des relations de surclassement [cf. ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE), Prométhée, Melchior, Qualifex, Orestre, Regim, Naïade, etc.].
- agrégation locale et itérative : on cherche en premier lieu une solution de départ. Par la suite on procède à une recherche itérative pour trouver une meilleure solution (cf. Cônes d'amélioration, goal programming, STEM, Ziont-Wallenius, etc.).

Nous allons maintenant présenter des méthodes décisionnelles utilisées dans le domaine du renouvellement des canalisations d'eau potable.

13.2 Analyse multi-critères simple

Le budget alloué au renouvellement est fixe donc le nombre de tronçons à renouveler est contraint. La méthode d'analyse multi-critère, employée ici, aide à choisir un lot de tronçons. Au sein de cette méthode, d'abord on regarde le critère 1, si le tronçon rempli les conditions prédéfinies le gestionnaire le classe à renouveler sinon on regarde le critère 2 si le tronçon rempli les conditions prédéfinies le gestionnaire le classe à renouveler sinon on regarde le critère 3, etc. La méthode s'arrête quand on a assez de tronçons correspondant au budget fixé initialement.

Exemple simplifié extrait de la grille employée par Veolia sur le territoire du SEDIF avant 2011 :

1. Matériaux en amiante-ciment
2. Nombre de défaillances ≥ 2 défaillances / hm / 5 ans sur les tronçons inférieurs à 100 mètre linéaire
3. Travaux de voirie imposant un renouvellement si l'âge du réseau est supérieur à 5 ans
4. Taux probable futur de défaillances élevé issue de MOSARE ou de CASSES
5. Risque élevé vis-à-vis d'un tiers

Source [Bruyeron and Re, 2012a, p 11]

L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait qu'il est difficile de comprendre la logique de la hiérarchie des critères. Par exemple pourquoi le taux probable de défaillance est en dessous du nombre de défaillances alors que ce sont deux critères qui portent sur l'état de dégradation du réseau ?

13.3 Analyse multi-critères avec agrégation complète

13.3.1 SIROCO

13.3.1.1 Normalisation des critères

$$UX_{n,i} = \frac{X_{n,i} - \min(X_n)}{\max(X_n) - \min(X_n)} \quad (13.1)$$

- $UX_{n,i}$ = Valeur normalisée du critère X_n pour le tronçon i
- $X_{n,i}$ = valeur du critère X_n pour le tronçon i
- $\min(X_n)$ = valeur minimale prise par X_n pour le tronçon i
- $\max(X_n)$ = valeur maximale prise par X_n pour le tronçon i

13.3.1.2 Calcul du score d'impact

Deux méthodes sont proposées dans ce logiciels pour agréger les 5 critères d'impact (continuité du service, perturbation trafic routier, pertes, importance hydraulique, Coûts).

1. Soit la somme pondérée :

$$SCI_i = \sum_{n=1}^5 \alpha_n \times UI_{n,i} \quad (13.2)$$

- SCI_i = score d'impact du tronçon i
- α_n = poids du critère UI_n
- $UI_{n,i}$ = Valeur normalisé du critère d'impact I_n pour le tronçon i

2. Soit l'agrégation selon la méthode Lounis et Vanier :

$$SCI_i = \sqrt{\sum_{n=1}^5 UI_{n,i}^2} \quad (13.3)$$

13.3.1.3 Calcul du score d'opportunité

Deux méthodes sont proposées dans ce logiciels pour agréger les 2 critères d'opportunité (urbanisation et coordination).

1. Soit la somme pondérée :

$$SCO_i = \sum_{n=1}^2 \alpha_n \times UO_{n,i} \quad (13.4)$$

- SCO_i = score d'opportunité du tronçon i
- α_n = poids du critère UO_n
- $UO_{n,i}$ = Valeur normalisé du critère d'opportunité O_n pour le tronçon i

2. Soit l'agrégation selon la méthode Lounis et Vanier :

$$SCO_i = \sqrt{\sum_{n=1}^2 UO_{n,i}^2} \quad (13.5)$$

13.3.1.4 Calcul du score global

Deux méthodes sont proposées pour calculer le score global :

1. Soit la somme pondérée :

$$SCG_i = \gamma_1 \times USCI_i + \gamma_2 \times USCO_i \quad (13.6)$$

- SCG_i = score global du tronçon i
- γ_1 et γ_2 = coefficients de pondération
- $USCI_i$ = Valeur normalisée du score d'impact pour le tronçon i
- $USCO_i$ = Valeur normalisée du score d'opportunité pour le tronçon i

2. Soit la méthode hybride :

$$SCG_i = USCI_i \times (USCI_i + \lambda \times USCO_i) \quad (13.7)$$

- λ = coefficient de pondération

Source [Renaud, 2011, ch. 3 dia. 65]

L'avantage de cette méthode est qu'elle est intuitivement simple. Néanmoins cette apparence simple lors de la normalisation cache des défauts. Par exemple les risques très graves mais peu probables ne sont pas très bien pris en compte, ou si une conduite à une valeur maximale très élevée alors toutes les autres valeurs vont être ramassées.

13.3.2 MOSARE

MOSARE tout comme SIROCO contient un modèle d'agrégation complète simple avec une pondération du gestionnaire sur les risques et les opportunités. Les scores de risque correspondent à la probabilité future de défaillance multiplié par un indicateur normalisé entre 1 et 5 lié aux caractéristiques des éléments vulnérables (charges roulantes ou consommateurs...) issu d'un SIG (système d'information géographique). MOSARE peut prendre en compte tous les risques possibles, le modèle n'est pas figé [VEDIF, 2013]

Cette méthode a pour avantage d'être très connecté au SIG donc d'éviter des manipulations à l'opérateur. Le point faible de cette méthode semble résider dans la normalisation des critères entre 1 et 5 qui induit les mêmes défauts que ceux présentés pour SIROCO.

13.4 Analyse multi-critères avec agrégation partielle

13.4.1 CARE-W-ARP

La méthode utilisée pour agréger les critères et prendre en compte les décisions du gestionnaire, dans le logiciel CARE-W-ARP, est celle du surclassement « ELECTRE TRI ». On doit définir des seuils d'indifférence et de préférence (Cf. explication de cette méthode [Poinard, 2006, p. 92 et pp 207-213]).

La méthode ELECTRE est plus sensible que celle présentée précédemment : le raisonnement va être plus nuancé, plus fin. Cela a plus de sens de faire des groupes de tronçons (méthode ELECTRE) que de faire un classement complet (méthode SIROCO). ELECTRE tri peut bien prendre en compte des risques très graves mais peu probables. Néanmoins cette méthode est beaucoup plus complexe et non intuitive, ce qui peut rebuter les gestionnaires.

13.4.2 Kanew

Kanew utilise la méthode nommée WRaP (Weighing and Ranking Procedure), [Herz et al., 2003, p. 15]. C'est une méthode qui fait partie des analyse multi-critères avec agrégation partielle.

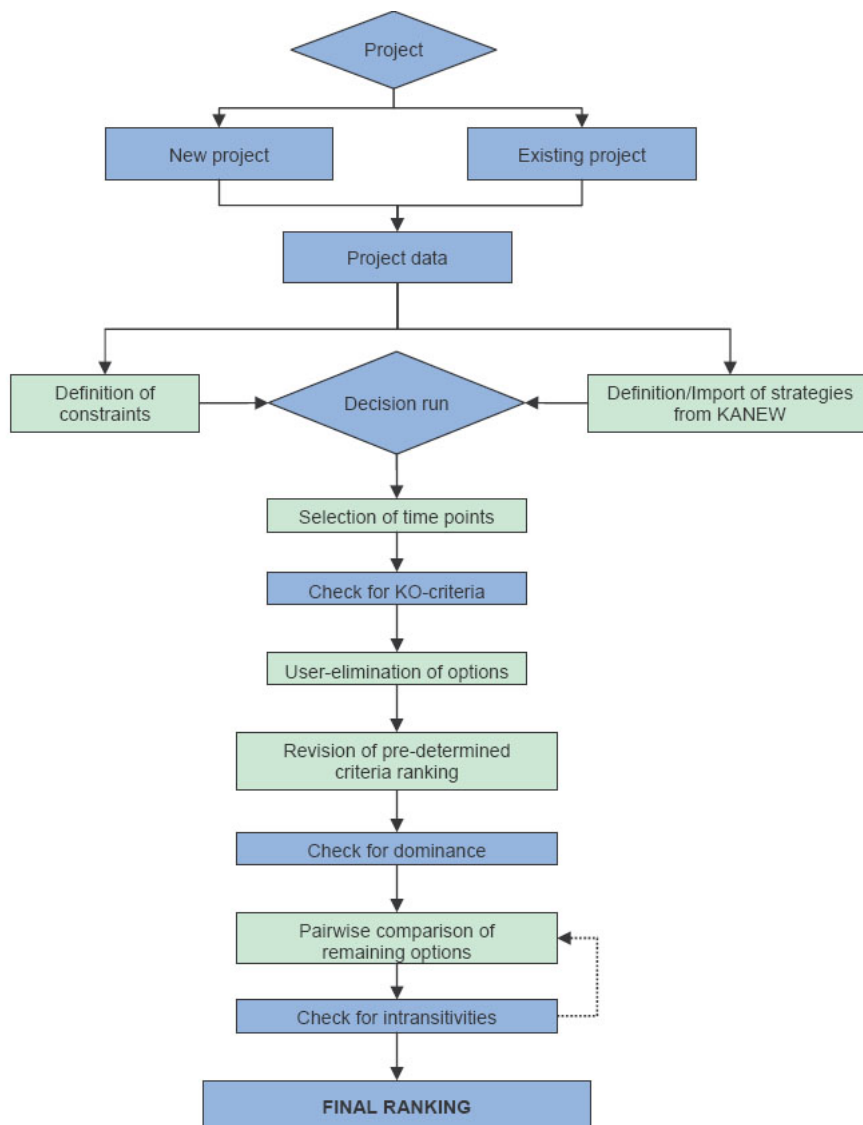


FIGURE 13.2: Schéma de fonctionnement du modèle décisionnel WRaP

13.5 Synthèse

Nous avons présenté succinctement 3 modèles décisionnels employés dans les outils en gestion patrimoniale. SIROCO et CARE-W-ARP sont des outils pour des résultats sur du court terme alors que Kanew est un outil long terme. Le modèle décisionnel dans Kanew sert à comparer différentes stratégies entre elles alors que dans SIROCO et CARE-W-ARP le modèle décisionnel sert à classer les tronçons soit un à un (SIROCO) soit par groupe (CARE-W-ARP).

Nous en avons fini avec la revue bibliographique des modèles en gestion patrimoniale, nous allons maintenant présenter le cadre méthodologique de l'étude.

Chapitre 14

Définition du cadre méthodologique

14.1 Contexte méthodologique

Les 3 terrains d'étude, SEDIF, Grand Lyon et Eauservice Lausanne, sont déjà équipés d'outils pour la gestion des réseaux d'eau potable (cf. figure 14.1). Au mois de juillet 2013 une enquête dans les 3 terrains d'étude a été réalisée afin de connaître notamment quelles étaient les pratiques en gestion patrimoniale, les outils et leur degré de satisfaction.

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

FIGURE 14.1: Les logiciels employés dans les terrains d'étude

Même si l'étude à venir se focalise plus sur le long terme, il était nécessaire de comprendre les raisonnements à court terme pour les décliner sur le long terme. Sur le court terme, tous sont bien équipés pour prévoir les défaillances quel que soit le logiciel employé et ils sont satisfaits de leurs outils.

En revanche sur le long terme, le seul outil rencontré est Patrimoine expert. Or le Grand Lyon tout comme le SEDIF ne sont pas totalement satisfaits du modèle contenu dans cet outil. Le Grand Lyon voudrait aller plus loin et progresser dans le futur vers un outil progressivement plus pertinent. L'âge du réseau et la durée de vie fixée à dire d'expert sont des critères qui ont trop de poids dans ce logiciel. Le budget, au lieu d'être une sortie du logiciel, comme le souhaite les gestionnaires, est une entrée.

Or nous avons présenté dans le chapitre 4 d'autres outils long terme. Nous aimerions essayer de conjuguer dans un modèle les avantages de ces modèles déjà existants tout en éliminant un maximum de défauts. Tout comme Kanew nous souhaitons travailler avec les courbes de survie de la variable aléatoire : « âge à la mise hors service des tronçons » car cela a pour avantage de donner une lecture rapide du taux de renouvellement. Néanmoins contrairement à Kanew nous souhaiterions que cette courbe soit déduite de manière statistique à partir des données historiques réelles.

14.2 Résumé du cadre méthodologique

La première étape est la collecte et le traitement des données du SEDIF, d'Eauservice Lausanne et du Grand Lyon. Cette étape a été réalisée depuis janvier 2013 et est toujours en cours.

La seconde étape consiste en le développement d'un modèle long terme générique à tous les terrains.

Un modèle long terme complet contient plusieurs modèles (M1, M2, M3, M4) imbriqués les uns dans les autres. L'ACBe (analyse coûts bénéfiques environnementale) est à la fois un modèle M3 économique et M4 décisionnel. La solution pour l'instant envisagée est de démarrer une analyse des coûts (AC) et peut-être des bénéfiques (B) à l'échelle du tronçon afin de déterminer sa fonction de survie. Le budget renouvellement nécessaire sur le réseau sur l'horizon temporel T sera donc égal au résultat de l'équation 14.1

$$\sum_i (S_i(t) - S_i(t+1)) \times L_i \times C_u \quad (14.1)$$

- $S_i(t)$ = survie de la variable aléatoire « âge à la mise hors service » du tronçon i l'année t
- L_i = longueur du tronçon
- C_u = Coûts unitaires

14.2.1 Le modèle de prédiction de la dégradation

Proposition de cadre méthodologique pas à pas pour le modèle de prédiction de la dégradation M1 :

Analyse des tronçons archivés de nos 3 terrains d'étude :

1. Tracer les courbes brutes de mises hors service des tronçons archivées
2. Tracer les courbes de mises hors service des tronçons archivées en prenant en compte la troncature à gauche et la censure (cf. par exemple via la méthode décrite dans [Turnbull, 1976]). C'est à dire tracer la courbe empirique passée de survie de T (âge des canalisations à laquelle la vie prend fin) pour nos 3 terrains d'études.
3. Synthétiser les méthodes décisionnelles des terrains d'étude à partir des entretiens de terrain. Puis essayer de comprendre à partir des données décisionnelles des terrains, pourquoi la courbe de survie empirique a cette forme (mauvais état, âge fixe, canalisation stratégiques vis-à-vis des dommages potentiels, coordination, urbanisation, obsolescence...).
4. Essayer de retrouver à partir de méthodes statistiques les facteurs décisionnels de remplacement (par exemple via la méthode de Weibull) à partir notamment des taux de défaillances à la mise hors service, des données tronçons, des données environnementales. Puis tracer la courbe de mise hors service des tronçons archivés.
5. Comparer les facteurs décisionnels mis en exergue à l'étape 3 et 4.
6. Comparer la courbe issue de l'étape 2 et celle de l'étape 4.

14.2.2 L'estimation des besoins en renouvellement

Estimer les besoins en renouvellement basés sur le vieillissement des canalisations. C'est à dire tracer des courbes de survie bâti sur les paramètres par exemple de la méthode de Weibull, notamment avec les paramètres liés aux taux de défaillances. C'est à dire, définir, calculer et tracer une courbe $S1(t)$ de survie future probable basée uniquement sur le mauvais état probable (en fonction des statistiques passées) et les objectifs de performance futurs des terrains (taux de casses dans certains zones, eaux rouges, etc..)

14.2.3 Modèle décisionnel et économique

Le gestionnaire choisi ensuite sa stratégie de renouvellement. Pour cela une solution envisagée est de classer les tronçons par classe de « vulnérabilité » (au sens large) et le gestionnaire choisie un taux de défaillances maximal admissible pour chaque classe de vulnérabilité. De cette décision on pourra déduire une probabilité de survivre après une défaillance. On en déduira un linéaire à renouveler.

Puis par la multiplication de ce linéaire à renouveler par des coûts unitaires, on en déduira le budget nécessaire sur une période donnée.

14.3 Illustration du cadre méthodologique : modèle de prédiction de la dégradation

14.3.1 Etape 1 : Courbes brutes de mise hors service des tronçons archivés

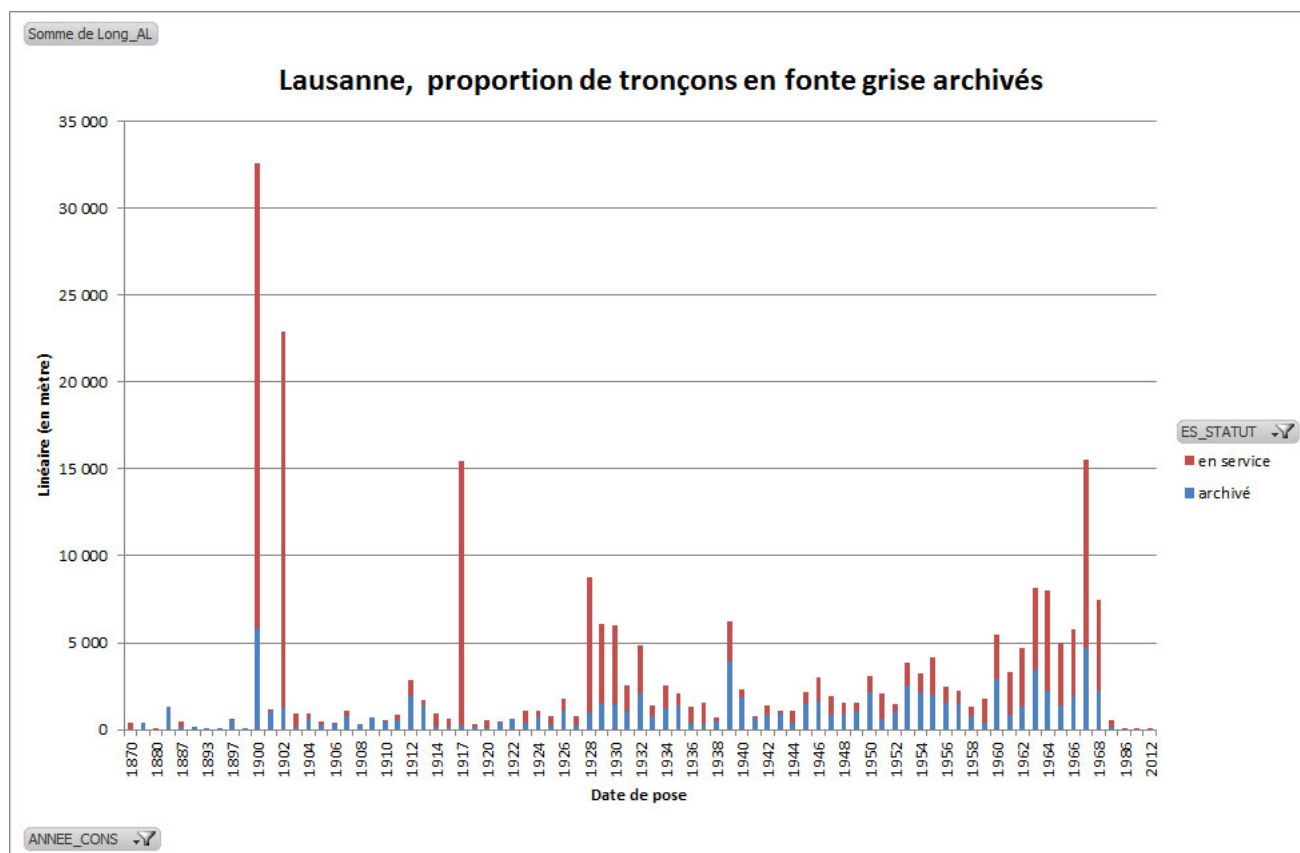


FIGURE 14.2: Proportion de tronçons en fonte grise archivés à Eauservice Lausanne

Une partie des tronçons posés dans le passé sont actuellement hors service (cf. figure 14.2). Par conséquent pour ces tronçons il est possible de calculer un âge à la mise hors service pour ces tronçons hors service (cf. tronçons rouge sur la figure 14.2). Puis de tracer la courbe « brute » de mise hors service de ces tronçons (cf. figure 14.3).

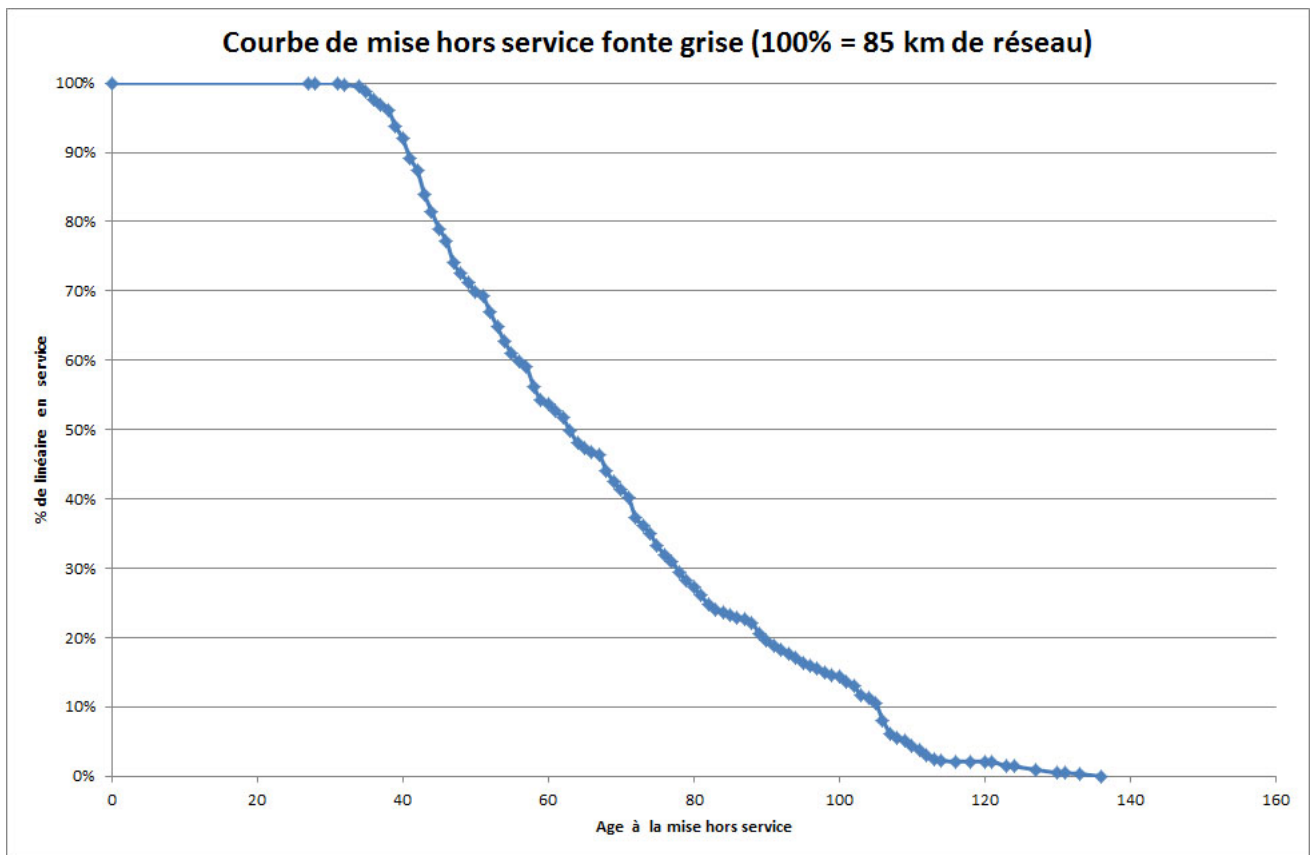


FIGURE 14.3: Courbe « brute » de mise hors service des tronçons en fonte grise à Eauservice Lausanne, fonction de survie des âges à la mise hors service

14.3.2 Etape 2 : Courbes corrigées de mise hors service des tronçons archivés

La courbe « brute » est faussée car si l'on regarde les dates de mise hors service (DHS) par exemple de la fonte grise à Lausanne, elles n'ont été observées qu'entre 2000 (a) et 2012 (b). La période d'observation de ces tronçons est [a;b]. Les données sont donc tronquées à gauche : depuis la première date de mise hors service jusqu'à 2000 (a). C'est à dire que pour toute année antérieure à 2000 le nombre de tronçons posés cette année là est inconnu (seuls sont connus les tronçons qui ont survécus au delà de 2000). Et elles sont censurées, l'âge à la mise hors service des conduites encore en service fin 2012 (b) est inconnu (cf. figure 14.4). Par conséquent il faut corriger la courbe brute en prenant en compte la troncature et la censure. [Turnbull, 1976] propose une méthode pour les prendre en compte. La figure 14.5 expose le résultat.

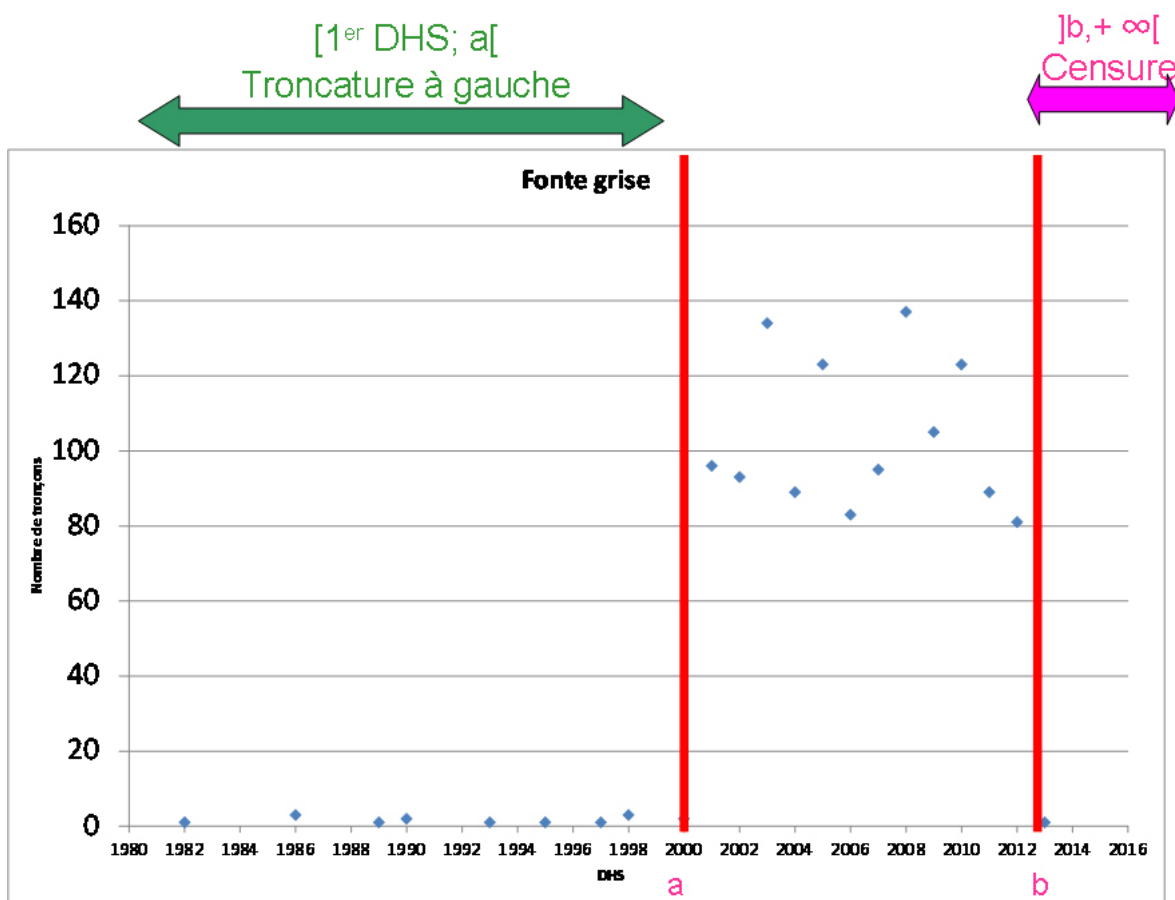


FIGURE 14.4: La notion de troncature à gauche et de censure. Date de mise hors service (DHS) des tronçons en fonte grise à Lausanne en fonction du nombre de tronçons

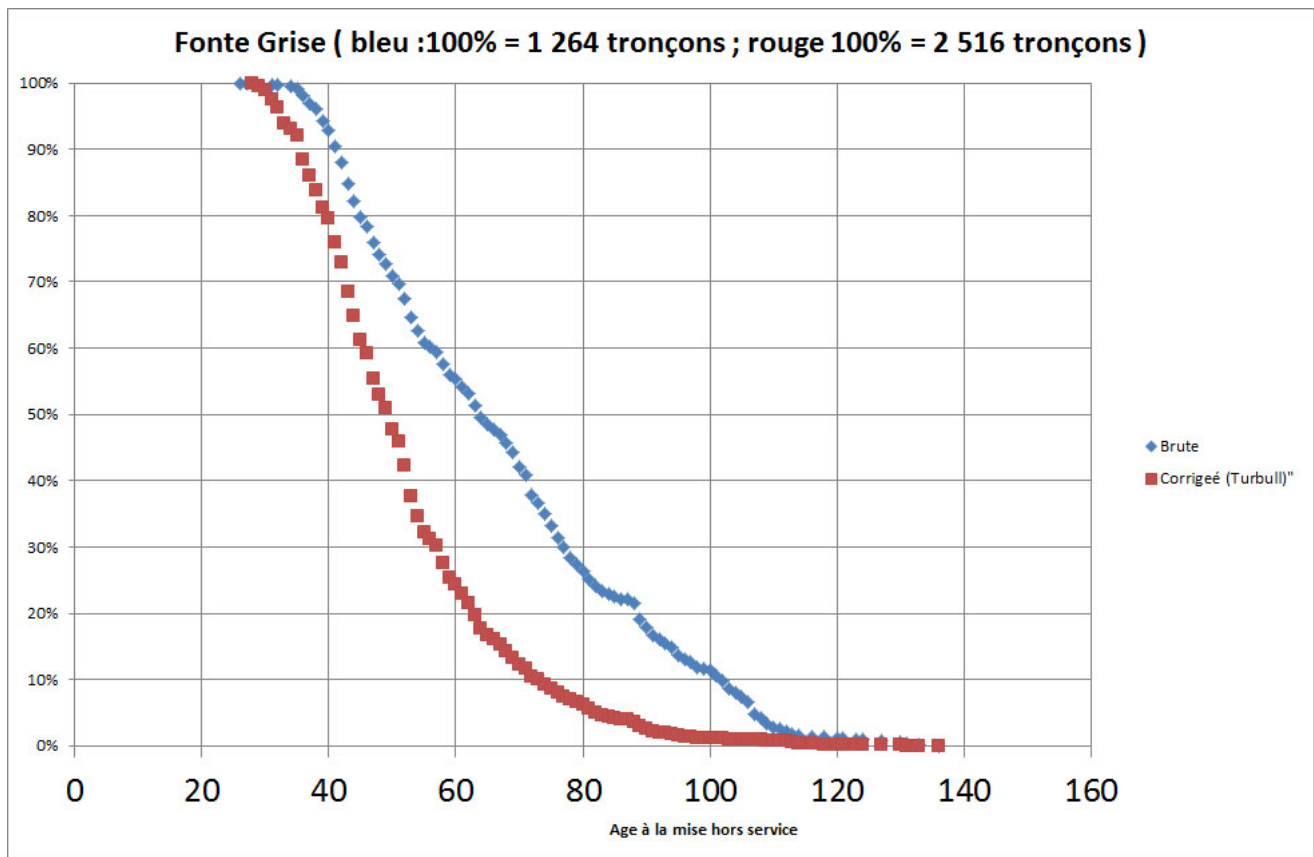


FIGURE 14.5: Courbe de mise hors service des tronçons en fonte grise (Lausanne). En bleu : courbe brute, en rouge : courbe corrigée par la méthode de Turnbull

14.3.3 Etape 3 : les méthodes décisionnelles

La courbe rouge corrigée de Turnbull (cf. figure 14.5) est issue des décisions des gestionnaires. Par exemple les décisions au Grand Lyon sur du court terme peuvent être schématisées ainsi :

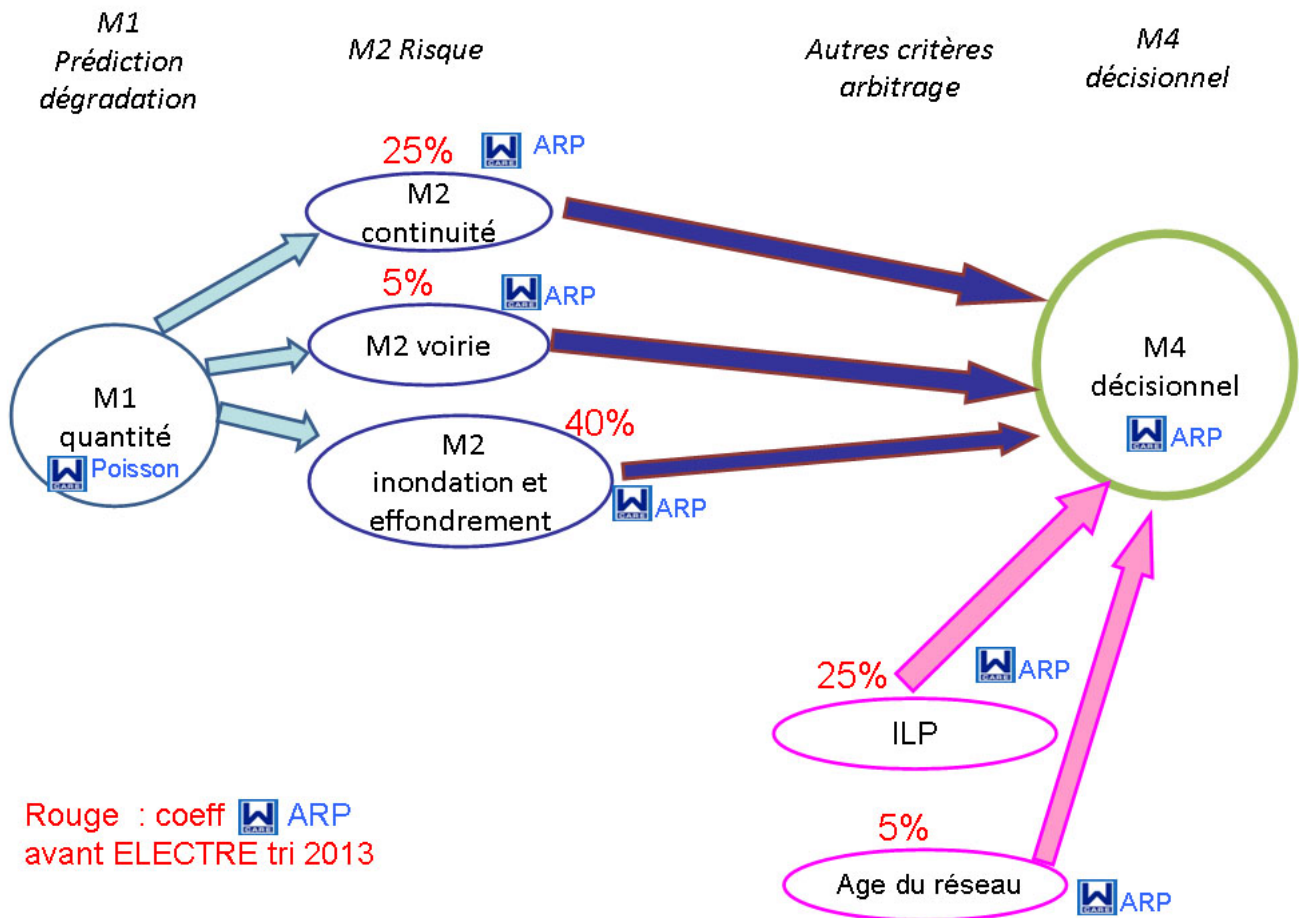


FIGURE 14.6: Schéma de la prise de décision au Grand Lyon pour le renouvellement des canalisations, première partie

Au Grand Lyon le modèle de prédiction des dégradations quantitatives (fuite) est celui du logiciel CARE-W-Poisson. Ensuite les modèles de risque et décisionnel sont contenus dans le logiciel CARE-W-ARP. Le modèle décisionnel dans CARE-W-ARP est le modèle ELECTRE-TRI. En rouge sont représentés les poids de chaque critère attribué en 2013 avant ELECTRE-TRI (cf. figure 14.6) au Grand Lyon. Par exemple 40% est attribué au risque inondation et au risque d’effondrement. En effet une grande partie du territoire du Grand Lyon est située sur des cavités aussi nommés Balme qui peuvent s’effondrer à cause de l’érosion provoquée par des fuites.

Les sorties du modèle décisionnel sont des groupes de tronçons dont le groupe nommé C33 est le plus prioritaire à renouveler. Néanmoins d’autres critères d’arbitrage vont ensuite intervenir dans le choix des chantiers de renouvellement (cf. figure 14.7). Ainsi la coordination avec d’autres chantiers (notamment la voirie) intervient dans 25% des chantiers environ.

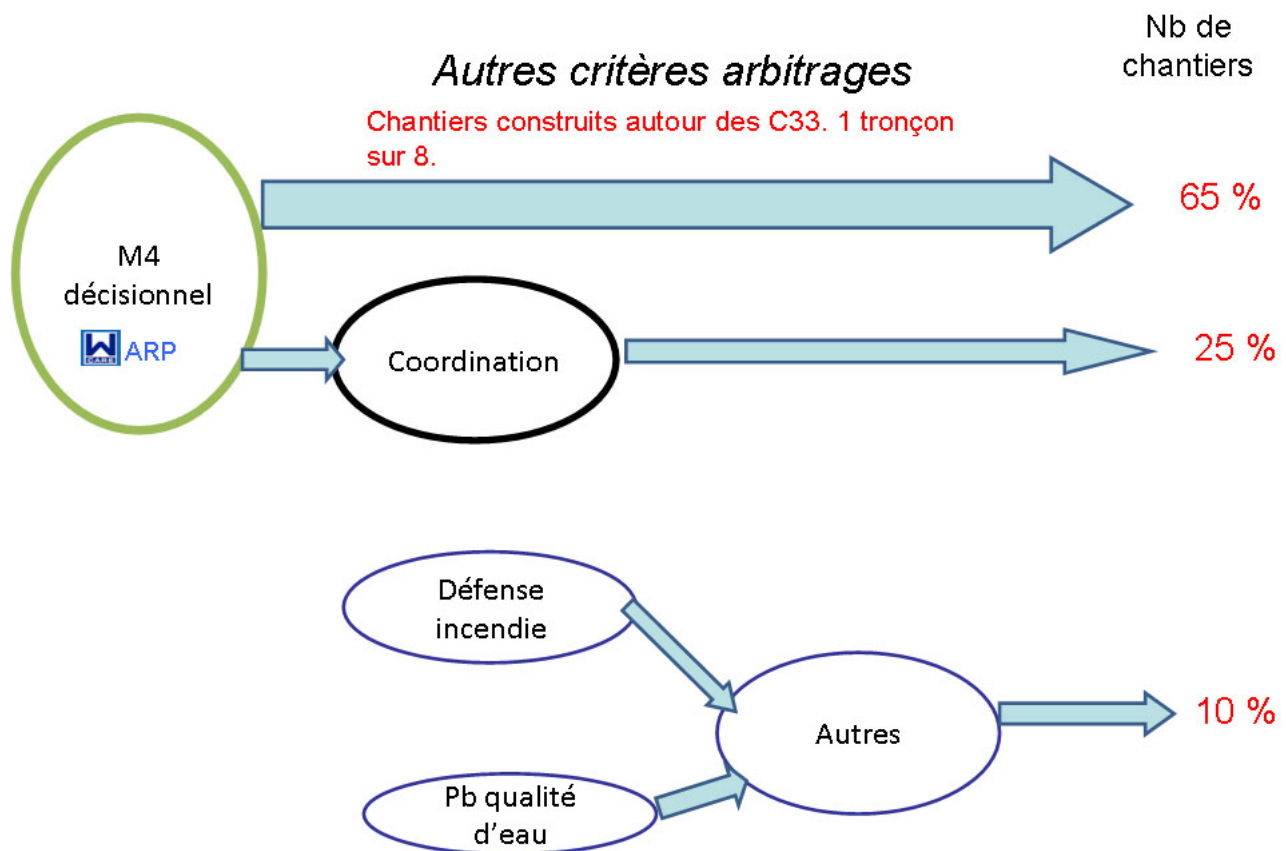


FIGURE 14.7: Schéma de la prise de décision au Grand Lyon pour le renouvellement des canalisations, deuxième partie

L'étape suivante consistera à essayer de retrouver à partir de méthodes statistiques ces mêmes facteurs décisionnels de remplacement.

14.4 Conclusion

Ce document présente une revue bibliographique des logiciels en gestion patrimoniale. La majorité sont des logiciels court terme à l'échelle du tronçon. A cette échelle beaucoup a déjà été fait. En revanche les modèles long terme sont bien moins nombreux et quand ils existent, la plupart sont assez frustrés. Le but de cette thèse est de faire avancer les modèles long terme afin qu'ils soient mieux capables de prendre en compte une réalité complexe avec des objectifs souvent contradictoires.

Annexe A

Les structures ayant développés des outils d'aide à la décision en gestion patrimoniale des réseau d'eau potable

Nom du logiciel ou du modèle	Créateur	Pays	Modèle seul	Modèle + logiciel
[Kettler and Goulter, 1985]	Kettler and Goulter	Canada	X	
[Rajani & Makar, 2000]	Rajani & Makar	Canada	X	
KANEW	Université de Dresde + Baur&Kropp / 3S Consult	Allemagne		X
PIReM Drinking Water	GUEP Software Gmbh	Autriche		X
Vision	Véolia	France		X
[UKWIR, 2009]	UKWIR	United Kingdom	X	
[Shamir & Howard, 1979]	Shamir & Howard		X	
[Walski and Pelliccia, 1982]	Walski and Pelliccia	Canada	X	
Modele logiciel T	Confidentiel	Confidentiel		X
[Clark et al., 1982]	Clark et. al.	USA	X	
UtilNets	(Hadzilacos et al., 2000)	EU		X
[Malandain, 1999] Poisson	INSA Lyon	France		X
CARE-W-Poisson	INSA Lyon	France		X
I-WARP	CNRC	Canada		X
[Eisenbeis, 1994] Weibull	CEMAGREF-IRSTEA	France		X
CARE-W-PHM	CEMAGREF-IRSTEA	France		X
[Rostum, 2000] NHPP	SINTEF-NTNU	Norvège		X
CARE-W-NHPP	SINTEF-NTNU	Norvège		X
Casses	CEMAGREF-IRSTEA	France		X
[Le Gat, 2009] LEYP	CEMAGREF-IRSTEA	France	X	
MOSARE	Véolia	France		X
PREVOIR Canalisation	Lyonnaise des Eaux	France		X
Aware-P	LNEC + SINTEF-NTNU	Portugal + Norvège		X
Cador	Université de Caen	France	X	
NESSE - NESSIE curve	South Australian Water Company	Australie		X
PARMS	CSIRO	Australie		X
Patrimoine expert	Pöyry- Naldeo	France		X
CARE-W-ARP	INSA Lyon	France		X
SIROCO	G2C Environnement + CEMAGREF-IRSTEA	France		X
CARE-W-RelNet	Brno Univ of technology	République Tchèque		X
CARE-W-FailNetReliab	CEMAGREF-IRSTEA	France		X
W-PIPER	US Army	USA		X

Nom du logiciel ou du modèle	Créateur	Pays	Modèle seul	Modèle + logiciel
Criticité	CEMAGREF-IRSTEA	France		X
SynerGEE reliability module	Germanischer Lloyd (GL)	Allemagne		X
WaterCAD Darwing Design Module	Bentley	USA		X
PICCOLO module criticité	Safege	France		X
[Scholten, 2013]	EAWAG	Suisse	X	
Q-WARP	CNRC	Canada		X
Repair and Replace tool (RRTool)	InfraPLAN and B&K	USA Germany		X
PARMS Risks	CSIRO	Australia		X
WILCO	University of Exeter	Grande Bretagne		X
D-WARP	CNRC	Canada		X
T-WARP	CNRC	Canada		X
M-PRAWDS	CNRC	Canada		X
CDSS (TSM + CM)	AwwaRF	USA		X
GAnetXIs	University of Exeter	Grande Bretagne		X
PRMS	Vinci	France		X
FAST	Berlin	Allemagne		X
PHARE AEP	IRH	France		X
MRP	Germanischer Lloyd (GL)	Allemagne		X
LCC	Ammar	Canada	X	
Care-W (Poisson, PHM, LTP, ARP, REL, etc.)	CEMAGREF-IRSTEA + Université de Dresde + SINTEF-NTNU + Brno Univ of technology + LNEC + Univ Bologna, Ferrara, Reggio Emilia + WRc	F + D + N + CZ + P + I + GB + CH		X
MISER	Tynemarch	UK		X
Asset Performance Toolkit/SALVO	international research consortium comprising industry partners, academia and consultants	UK		X
RIVA	Riva Modelling Systems Inc., a Toronto-based company	Canada		X
VFA facility	VFA Inc	USA		X
Walski 1987	Walski	USA	X	
Park 2000	Virginia Polytechnic university	USA	X	
Grille MS7	Pöyry			X
CapPlan Water	Innovyze	USA		X
PIONEER	Tynemarch	UK		X
Halcrow's Water Supply and Distribution System Optimization software	Halcrow	UK		X
InfraPLAN Data Analytics Tool	InfraPLAN	USA		X
Replacement and Rehabilitation Planning tool (RRPT)	InfraPLAN	USA		X

Annexe B

Les modèles dans les logiciels

Nom du logiciel ou du modèle	M1 dégradat	M2 risque	MR Long Terme	M3 financ	M4 décision	Nom du logiciel ou du modèle	M1 dégradat	M2 risque	MR Long Terme	M3 financ	M4 décision
[Kettler and Goulter, 1985]	X					Repair and Replace tool (RRTool)				X	
[Jacobs and Kerney, 1994]	X					VFA facility				X	
W-PIPER	X					Walski 1987				X	
[McMullen, 1982]	X					Park 2000				X	
[Rajani & Makar, 2000]	X					life-cycle methodology [Delaney, 2008]				X	
Vision	X					WILCO			X	X	X
[UKWIR, 2009]	X					CDSS (TSM + CM)				X	X
[Shamir & Howard, 1979]	X					GAnetXIs				X	X
[Walski and Pelliccia, 1982]	X					FAST	X	X			X
Modele logiciel T	X					PHARE AEP	X	X			X
[Clark et al., 1982]	X					MRP	X				
UtilNets	X					LCC				X	
[Malandain, 1999] Poisson	X					MISER				X	X
CARE-W-Poisson	X					Asset Performance Toolkit/SALVO				X	X
I-WARP	X					RIVA				X	X
D-WARP	X					PIONEER				X	X
T-WARP	X					Halcrow's Water Supply and Distribution System Optimization software				X	X
Q-WARP	X					Patrimoine expert			X	X	
PRMS	X					NESSIE			X	X	
M-PRAWDS	X					PARMS Risks		X		X	X
[Eisenbeis, 1994] Weibull	X					CARE-W-ARP		X		X	X
CARE-W-PHM	X					SIROCO		X		X	X
[Rostum, 2000] NHPP	X					[Cador, 2002]			X	X	
CARE-W-NHPP	X					KANEW	X		X	X	X
Casses	X					PiReM Drinking Water	X		X	X	X
[Le Gat, 2009] LEYP	X					PARMS	X	X	X	X	X
CARE-W-RelNet		X				MOSARE	X	X			X
CARE-W-FailNetReliab		X				Grille MS7	X	X			X
Criticité		X				CapPlan Water	X	X		X	X
SynerGEE reliability module		X				PREVOIR Canalisation	X	X		X	X
WaterCAD Darwing Design Module		X				Aware-P	X	X		X	X
PICCOLO module criticité		X				[Scholten, 2013]	X	X	X	X	X
[Randall-Smith et al., 1992]			X			Care-W (Poisson, PHM, LTP, ARP, REL, etc.)	X	X	X	X	X

Annexe C

Validation des modèles probabiliste de défaillance (M1)

Le principe de base de la validation des modèles est de confronter les prévisions de défaillances avec la réalité des défaillances effectivement survenues durant une période au cours de laquelle les défaillances ont été observées (cf. figure C.1).

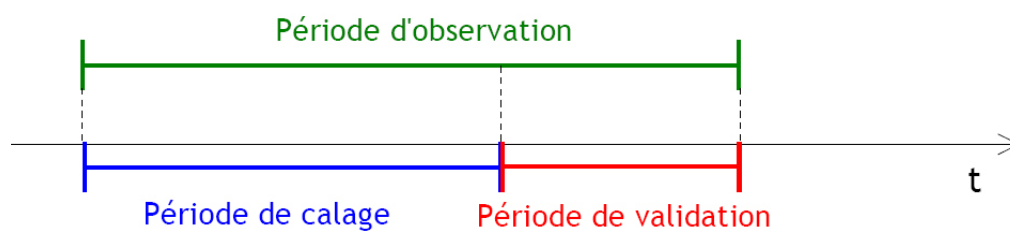


FIGURE C.1: Schéma de la période de validation [Renaud, 2011, dia 29]

Pour cela on mesure la concentration des évènements sur les individus que le modèle donne les plus sensibles à la défaillance (cf. figure C.2).

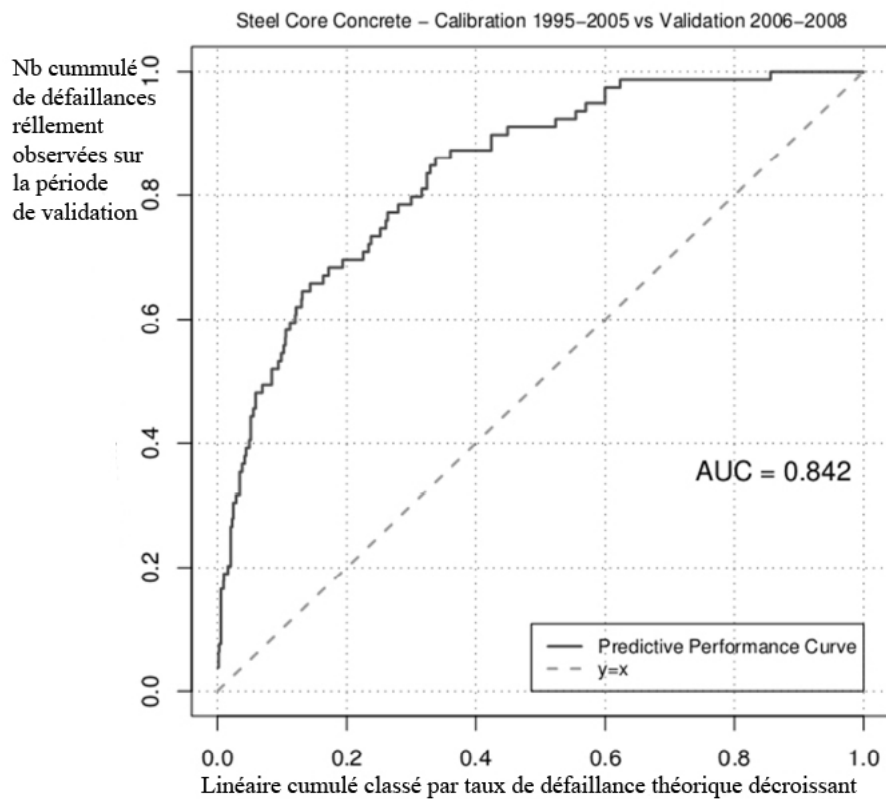


FIGURE C.2: Evaluation de la performance prédictive des modèles [Le Gat, 2014]

Si le modèle n'était pas du tout valide, et qu'on avait juste le simple hasard alors la performance du modèle serait la courbe $y=x$. En revanche plus l'aire entre la courbe de prédiction et la courbe $y=x$ est élevée plus le modèle est valide. Dans l'exemple de la figure C.2 le modèle est bien validé l'aire sous la courbe et entre $x=y$ est de 0,342.

Annexe D

Densité, fonction de répartition et fonction de survie de Loi statistiques

D.1 Cas général

Il est possible de retrouver $f(t)$ à partir de $S(t)$ cf. démonstration ci-dessous.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (\text{D.1})$$

$$F(t) = \mathbb{P}(T \leq t) = \int_{-\infty}^t f(u) du \quad (\text{D.2})$$

$$S(t) = 1 - F(t) \quad (\text{D.3})$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (\text{D.4})$$

- $f(t)$ = densité de probabilité de T
- $F(t)$ = fonction de répartition de T
- $S(t)$ = fonction de survie
- $h(t)$ = fonction de risque instantané

D.2 Loi normale

D.3 Loi de Herz

D.3.1 Densité de probabilité $f(t)$

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \forall t \in [0, c] \\ \frac{(a+1)be^{b(t-c)}}{(a+e^{b(t-c)})^2} & \forall t > c \\ 0 & \forall t = +\infty \end{cases} \quad (\text{D.5})$$

Source [Herz, 2002] et [Renaud, 2011, ch. 3 dia. 96]

D.3.2 Fonction de survie $S(t)$

$$S(t) = \begin{cases} 1 & \forall t \in [0, c] \\ \frac{a+1}{a+e^{b(t-c)}} & \forall t > c \\ 0 & \forall t = +\infty \end{cases} \quad (\text{D.6})$$

Source [Herz, 2002, p. 5].

- T = Variable aléatoire, âge des canalisations à la mise hors service.
- $S(t)$ = probabilité de survie d'une catégorie de tronçons, fonction de survie
- $0 \leq S(t) \leq 1$
- a, b, c = paramètres déterminés à dire d'expert
- a : Le facteur de vieillissement « a » décrit la douceur de la phase de démarrage du processus de vieillissement. Plus cette valeur est élevée, moins abrupte sera le démarrage du processus de vieillissement. Lorsque $a = 0$, la distribution de Herz se transforme en distribution exponentielle, ce qui selon [Kropp, 2003, p. 9] n'est pas pertinent pour décrire le processus de vieillissement des conduites, car la courbe du taux de défaillances en fonction de l'âge démarre en général brusquement et reste constante tout au long de la durée de vie de la cohorte.
- b : Le facteur de défaillances « b » est le taux de défaillances définitif à un âge très avancé. Plus b est élevé, plus vite le processus de vieillissement est exécuté.
- c : $c \geq 0$ et jusqu'à c date de résistance, il est supposé qu'il n'y a pas de défaillance.

Source [Kropp, 2003, p. 9].

D.3.3 Espérance et variance

- μ : valeur attendue de la moyenne de toutes les valeurs t de la variable aléatoire T .

$$\mu(a, b) = E(T) = \int_0^{+\infty} tf(t)dt = c + \frac{(a+1)\ln(a+1)}{ab} \quad (\text{D.7})$$

— σ : L'écart-type σ est égal à la racine carré de la variance. $\sigma = \sqrt{Var(T)}$.

$$Var(T) = \int_0^{+\infty} [t - E(T)]^2 f(t) dt \quad (D.8)$$

Source [Herz, 2002, p. 5] et [Kropp, 2003, p. 9].

D.3.4 Graphiques

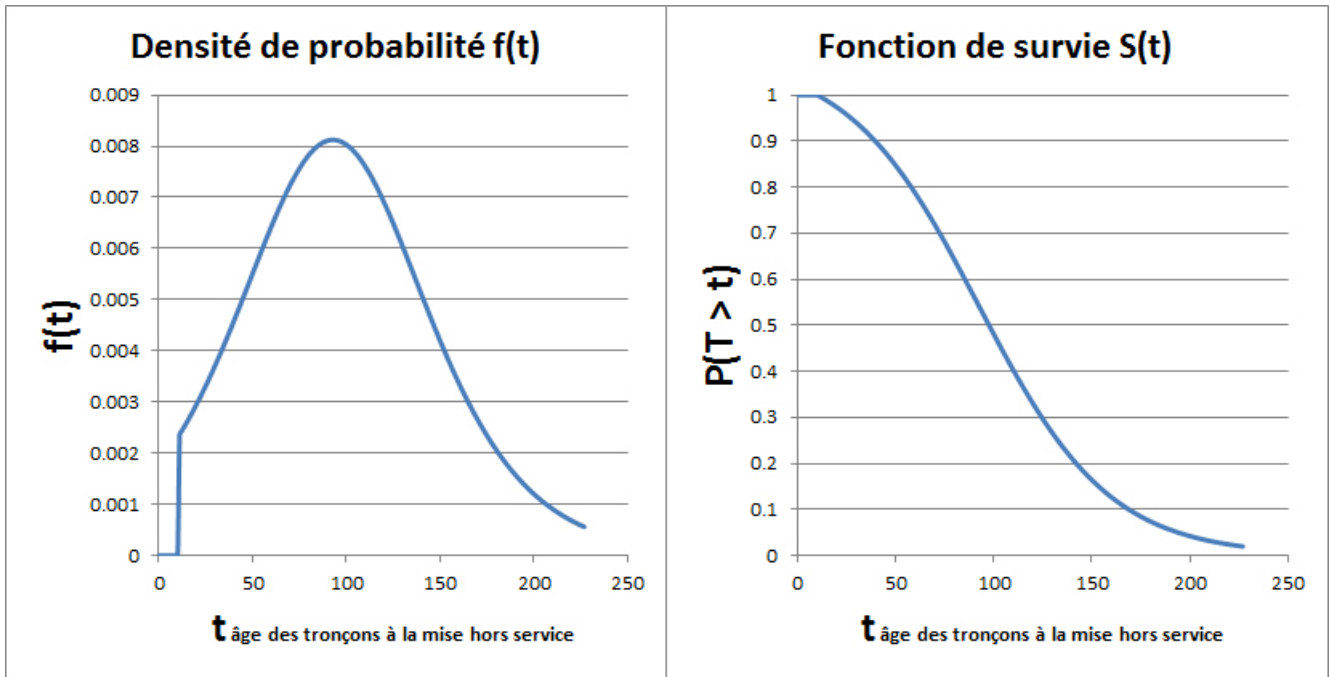


FIGURE D.1: Densité de probabilité et fonction de survie d'une variable aléatoire suivant une loi de Herz de paramètres $a = 12$, $b = 0.03$ et $c = 10$

D.4 Loi de Weibull

D.5 Loi de Poisson

Bibliographie

AERMC

2007. *Outils socio-économiques pour une nouvelle culture de l'eau, glossaire, guide technique*. AERMC.

Alegre, H., J. M. Baptista, E. Cabrera, F. Cubillo, P. Duarte, W. Hirner, and R. Parena

2010. *Performance Indicators for water supply services, second edition*. IWA publishing (First published 2006, reprinted 2010).

Ananda, J. and G. Herath

2009. A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning. *Ecological Economics*, 68(10) :2535–2548.

Apotheloz, S.

2009. *Utilisation du module ARP de Care-W, mode d'emploi dans le cadre de MEDIREL. (Méthode de Diagnostic du Réseau d'Eau de Lausanne)*. Eauservice Lausanne.

AWWA

2010. *Buried no longer : confronting america's water infrastructure challenge*.

Babykina, E.

2010. *Modélisation statistique d'évènements récurrents. Exploration empirique des estimateurs, prise en compte d'une covariable temporelle et application aux défaillances des réseaux d'eau*. PhD thesis, Ecole doctorale de Mathématiques et Informatique, Université de Bordeaux II, France.

Bayart, J. and M. Vargas

2015. *Total Cost of Ownership and Environmental Life Cycle Assessment of potable water pipework tool development. Methodological report prepared for : SAINT-GOBAIN PAM*. Quantis.

Bouleau, G. and L. Guérin-Schneider

2011. *Des tuyaux et des hommes. Les réseaux d'eau en France*. Quae éditions.

Brémond, B., C. Laplaud, B. Huchin, J. C. De Massiac, and E. Renaud

2005. *Système intégré d'aide au renouvellement optimisé des conduites adapté aux petites et moyennes collectivités : SIROCO*.

Bruyeron, N. and C. Re

2012a. *Gestion patrimoniale du reseau d'eau potable du SEDIF, phase 1 - Etude bibliographique.*

Bruyeron, N. and C. Re

2012b. *Prestations techniques de conseil, de suivi et d'expertise liées aux critères de choix des conduites à renouveler dans le cadre de la gestion patrimoniale du réseau d'eau potable du SEDIF, Marche subsequent 7, phase 2 - Réalisé par le bureau d'étude Naldeo, number 111.*

Burn, S., S. Tucker, M. Rahilly, P. Davis, R. Jarrett, and M. Po

2002. *[CD] Pipeline Asset and Risk Management System (PARMS), demonstration CD.*

Burn, S., S. Tucker, M. Rahilly, P. Davis, R. Jarrett, and M. Po

2003. Asset planning for water reticulation systems – the parms model. *Water Science and Technology : Water Supply*, 3(1-2) :55–62.

Cador, J.

2002a. *Le patrimoine en canalisations d'AEP en France, Bilan des huit enquêtes départementales et estimation nationale.*

Cador, J.

2002b. *Le renouvellement du patrimoine en canalisations d'eau potable en France.*

ChevassusAuLouis, B.

2007. *L'analyse des risques – L'expert, le décideur et le citoyen.* Versailles : QUAE.

Clark, R. M., C. L. Stafford, and J. A. Goodrich

1982. Water distribution systems : A spatial and cost evaluation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 108(3) :243–256.

Comité Canadien, E. P.

2012. *Le chlorure de vinyle dans l'eau potable.*

Cousin, E. and E. Taugourdeau

2015. *Trade-off between water loss and water infrastructure quality : A cost minimization approach.*

Dauphiné, A.

2001. *Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer.* Armand Colin.

Davis, P., D. De Silva, D. Marlow, M. Moglia, S. Gould, and S. Burn

2008. Failure prediction and optimal scheduling of replacements in asbestos cement water pipes. *Journal of Water Supply : Research and Technology*, 57.4 :239–252.

Dridi, L.

2005. *Développement et validation d'une approche de remplacement des conduites pour les réseaux d'eau potable*. PhD thesis, Université du Québec, Institut National Canadien de la Recherche Scientifique (INRS), Canada.

Drouillard, M., Y. Le Gat, C. Leclerc, and E. Sigoillot

2015. Assessing the dégradation of water service cconnection with varying levels of asset knowledge. *Water Asset Management International*, 11.2 :8–11.

Eauservice

2013. *Compte-rendu des entretiens menés à Eauservice Lausanne, le 8 et 9 Juillet 2013 avec Mme Linda Viguet, M. Marvin Ancian, M. Débieu, M. Mickael Wissa, M. Hadem Boudra, M. Frédéric Cunin, M. Aitor Ibarrola et M. Sébastien Apotheloz*.

Eisenbeis, P.

1994. *Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable*. PhD thesis, Université Louis Pasteur Strasbourg, France.

Eisenbeis, P., K. Laffréchine, P. Le Gauffre, Y. Le Gat, J. Røstum, L. Tuhovčák, and P. Valkovič

2003. *D4, CARE-W : WP2 Description and validation of technical tools. - Report 2.2 Tests and validation of technical tools.*, number 2.2. CEMAGREF, INSA Lyon, SINTEF-NTNU et Brno University.

Eisenbeis, P., Y. Le Gat, K. Laffréchine, P. Le Gauffre, A. König, J. Røstum, L. Tuhovčák, and P. Valkovič

2002a. *D3, CARE-W : WP2 Description and validation of technical tools. - Report 2.1 models description*, number 2.1. CEMAGREF, INSA Lyon, SINTEF-NTNU et Brno University.

Eisenbeis, P., Y. Le Gat, and M. Poulton

2002b. Failure forecast and hydraulic reliability models for rehabilitation decision aid. In *International Conference for Computer aided rehabilitation of water networks (CARE-W), in Dresden Germany, November 1st.*, Pp. 97–106.

Eisenbeis, P., M. Poulton, K. Laffréchine, and P. Le Gauffre

2004. *D5, CARE-W : WP2 Description and validation tools. - Report 2.3 Guidelines for the use of technical tools*. CEMAGREF et INSA Lyon.

Haidar, H.

2006. *Réhabilitation des réseaux d'eau potable : méthodologie d'analyse multicritère des patrimoines et des programmes de réhabilitation*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

Hajkowicz, S. and K. Collins

2007. A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Resources Management*, 21(9) :1553–1566.

Herz, R.

2002. Developing rehab strategies for drinking water networks, dresden university of technology, germany. In *Proceedings of the 9 DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components*, P. 11.

Herz, R. and I. Kropp

2002. *D10, CARE-W : WP4 Strategic Planning and Investment.- Report 4.2 Development of the Rehab Strategy Manager software.*, number 4.2. Université technique de Dresde.

Herz, R., I. Kropp, R. Baur, and A. Lipkow

2003. *D11, CARE-W : WP4 Strategic Planning and Investment. - Report 4.3 Development of the Rehab Strategy Evaluator software.* Université technique de Dresde.

Horaud, C.

2002. Prévission des défaillances des conduites d'eau potable. Master's thesis, Université Bordeaux I, DESS Modélisation Stochastique et Recherche Opérationnelle.

ISO-73

2009. *ISO guide. Management du risque – Vocabulaire. – Risk management – Vocabulary.* International Organization for Standardization. AFNOR.

Jacobs, P. and B. Kerney

1994. Gis development with application to cast iron water main break rate. In *2nd International conference of water pipeline systems, Edinburgh, Scotland.*

Kettler, A. J. and I. C. Goulter

1985. An analysis of pipe break in urban water distribution networks. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 12 :286–293.

Kleiner, Y. and B. Rajani

2001. Comprehensive review of structural deterioration of water mains : statistical models. *Urban Water Journal*, 3 :131–150.

Kropp, I.

2003. *KANEW 3.0, user guide.* Dresden, Germany.

Kropp, I.

2013. *Kanew software, version 4, manual.* 3S Consult GmbH.

Kuhr, S., D. Lanning, G. Nestel, and H. Reynolds

2007. *Challenges in the water industry : meeting demand while facing Dwinling Supplies. Planning and*

Financing Water and Wastewater Utility Infrastructure Replacement. Step 3 : Create Long-term Cash Flow Forecasts.

Labeau, A.

2008. Une extension du processus de yule pour la modélisation stochastique des évènements récurrents. analyse des relations spatiales sur les casses du réseau du syndicat des eaux d'île de france (sedif). Master's thesis, Université Bordeaux I et II, CEMAGREF, Master Ingénierie Mathématique, Statistique et Economique (MIMSE).

Le Gat, Y.

2009. *Une extension du processus de Yule pour la modélisation stochastique des événements récurrents. Application aux défaillances de canalisations d'eau sous pression.* PhD thesis, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), France.

Le Gat, Y.

2014. Extending the yule process to model recurrent pipe failures in water supply networks. *Urban Water Journal*, 11(8) :617–630.

Le Gat, Y., I. Kropp, and M. Poulton

2013. Is the service life of water distribution pipelines linked to their failure rate? *Water Science and Technology : Water Supply*, 13.2 :386–393.

Le Quiniou, M. and A. Sandraz

2012a. *Integration of water losses in Veolia Water's drinking asset management strategy and tools for water network.*

Le Quiniou, M. and A. Sandraz

2012b. Integration of water losses in veolia water's drinking water networks asset management strategy and tools. In *Water Losses, 26-29 février, Manilla, Philippines*, P. 9.

Lehoux, N. and P. Vallée

2004. *Analyse multicritères.*

Liu, Z., Y. Kleiner, B. Rajani, L. Wang, and W. Condit

2012. *Condition assessment technologies for water transmission and distribution systems.* United States Environmental Protection Agency (EPA).

Loganathan, G. V., S. Park, and H. D. Sherali

2002. Threshold break rate for pipeline replacement in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128 :271–279.

Lomet, A.

2009. Etude du modèle leyp dans le cadre de prévisions à long terme. Master's thesis, Université Bordeaux I et II, CEMAGREF, Master Ingénierie Mathématique, Statistique et Economique (MIMSE).

Lyre

2015. *Compte-rendu de la réunion avec M. Cyril Leclerc sur le logiciel PREVOIR, le 19/08/2015*. Suez-Environnement, Lyonnaise Recherche.

Mailhot, A., G. Pelletier, J. F. Noël, and J. P. Villeneuve

2000. Modeling the evolution of the structural state of water pipe networks with brief recorded pipe break histories : Methodology and application. *Water Resources Research*, 36(10) :3053–3062. doi :10.1029/2000WR900185.

Malandain, J.

1999. *Modélisation de l'état de santé des réseaux de distribution d'eau pour l'organisation de la maintenance : étude du patrimoine de l'agglomération de Lyon*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, France.

Malm, A., O. Ljunggren, O. Bergstedt, T. J. R. Pettersson, and G. M. Morrison

2012. Replacement predictions for drinking water networks through historical data. *Water Research*, 46 :2149–2158.

Marlow, D.

2009a. *PARMS-Planning, Pipeline Asset and Risk Management System*.

Marlow, D.

2009b. *PARMS-Priority, Pipeline Asset and Risk Management System*.

Marlow, D., S. Gould, P. Davis, N. Goodman, and G. Tjandraatmadja

2014. *Asset Renewal Decision Making*. Water Corporation Western Australia.

Marlow, D., A. Urquhart, P. Davis, D. Trans, D. Beale, and S. Burn

2009. *Remaining Asset Life : A State of the Art Review*. IWA publishing.

Martins, A.

2011. *Stochastic models for prediction of pipe failures in water supply systems*. PhD thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade técnica de Lisboa, Portugal.

McMullen, L. D.

1982. Advanced concepts in soil evaluation for exterior pipeline corrosion. In *AWWA Annual Conference, Miami, USA*.

Ministre de la Santé, . d. a. s.

2012. *Instruction DGS/EA4/2012/366 du 18 octobre 2012 relative au repérage des canalisations en polychlorure de vinyle susceptibles de contenir du chlorure de vinyle monomère résiduel risquant de migrer vers l'eau destinée à la consommation humaine et à la gestion des risques sanitaires en cas de dépassement de la limite de qualité des eaux destinées à la consommation humaine pour le chlorure de vinyle monomère.*

Naldeo

2013. *Patrimoine expert, Outil de simulation du vieillissement du patrimoine canalisations AEP, Manuel de l'utilisateur, Version 3.4.* Naldeo ingénierie et conseil.

Nedey, F.

2014. Services d'eau et d'assainissement : un équilibre financier fragilisé. *Techni.Cités*, 273 :31–36. version papier.

Nicholson, W.

1998. *Microeconomic theory, basic principles and extensions, seventh edition.* The dryden press, Harcourt Brace College Publishers.

Park, S.

2000. *An optimal pipe replacement scheduling model for water distribution systems.* PhD thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.

Poinard, D.

2006. *Modèles pour la conception de stratégies et de programmes de réhabilitation des réseaux urbains d'eau potable.* PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, France.

Poinard, D. and P. Le Gauffre

2005. *CARE-W-Poisson, presentation and application.*

Pradier, P. C.

2006. *La notion de risque en économie.* La découverte.

Rajani, B. and Y. Kleiner

2001. Comprehensive review of structural deterioration of water mains : physically based models. *Urban Water Journal*, 3 :151–164.

Randall-Smith, M., A. Russel, and R. Oliphant

1992. *Guidance manual for the structural condition assessment of trunk mains.*

Renaud, E.

2011. *La gestion patrimoniale des réseaux d'alimentation en eau potable.*

Renaud, E., Y. Le Gat, and S. Sabatie

2011a. *Manuel d'utilisation du logiciel Criticité, Free, Version 1.1.0.* CEMAGREF-IRSTEA, Cestas, France.

Renaud, E., Y. Le Gat, S. Sabatie, K. Haddane, T. Cluchat, and F. Guillon

2011b. *Manuel d'utilisation du logiciel Casses, free, version 2.0.0.* CEMAGREF-IRSTEA, Cestas, France.

Røstum, J.

2000. *Statistical Modelling of Pipe Failures in Water Networks.* Doctor engineer dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Trondheim, Norway.

Salvetti, M. and C. Wittner

2012. *Observatoire des services publics d'eau et d'assainissement, Panorama des services et de leurs performances.*

Scharling, A.

1985. *Décider sur plusieurs critères.* Presses Polytechniques Romandes.

Scholten, L.

2013. *Multi-criteria decision analysis for water supply infrastructure planning under uncertainty.* PhD thesis, ETH Zurich, Switzerland.

Shamir, U. and C. Howard

1979. An analytic approach to scheduling pipe replacement. *Journal of American Water Works Association*, 71 :248–258.

Skipworth, P., M. Engelhardt, A. Cashman, D. Savic, A. Saul, and G. Walters

2002. *Whole life costing for water distribution network management.* Thomas Telford.

Taillandier, F.

2009. *La notion de risque comme clef du pilotage d'un parc patrimonial immobilier.* PhD thesis, Université de Savoie, spécialité : génie civil, France.

Turnbull, B. W.

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

Ugarelli, R. and S. Bruaset

2010. *Review of deterioration modelling approach for ageing infrastructure.*

UKWIR

2005. *Natural Rate of Rise in Leakage, report 05/WM/08/33*. UKWIR (United Kingdom Water Industry Research).

UKWIR

2009. *Factors Affecting the Natural Rate of Rise of Leakage, 09/WM/08/40*. UKWIR (United Kingdom Water Industry Research).

VEDIF

2013. *Compte-rendu des entretiens menés au VEDIF et à Véolia direction technique, Nanterre le 18 Juillet 2013 avec Le Quiniou, Morgane and Buttoudin, Sébastien and Sandraz, Anne-Claire*.

Višcor, P.

1997. *Spolehlivost vodovoních sítí*. PhD thesis, University of Technology, Brno, Czech Republic.

Vitorino, D., S. T. Coelho, H. Alegre, A. Martins, J. P. Leitão, and M. S. Silva

2012. *Aware-P software documentation*. LNEC.

Walski, T. M.

1987. Replacement rules for water mains. *Journal of American Water Works Association*, 79 :33–37.

Walski, T. M. and A. Pelliccia

1982. Economic analysis of water main breaks. *Journal of American Water Works Association*, 74(3) :140–147.