

Université du Québec
INRS-ETE

Titre

Développement et validation d'une approche de remplacement des conduites pour les
réseaux d'eau potable

Par

Leïla DRIDI

Thèse présentée pour l'obtention
du grade de Philosophiae Doctor (Ph. D.)
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Examineur externe	: Claude Marche. Professeur au département des génies civil, géologique et des mines. École Polytechnique de Montréal.
Examineur externe	: Pascal Le Gauffre. Maître de conférence. Institut national des sciences appliquées (INSA)/ Lyon.
Examineur interne	: Sophie Duchesne. Associée de recherche, INRS-ETE.
Co-directeur de recherche	: Alain Mailhot. Professeur, INRS-ETE.
Co-directeur de recherche	: Marc Parizeau. Professeur au Laboratoire de Vision et Systèmes Numériques, département de génie électrique et de génie informatique, Université Laval.
Directeur de recherche	: Jean-Pierre Villeneuve. Professeur et directeur INRS-ETE

Septembre 2005

© Droits réservés de *Leïla DRIDI* 2005

RÉSUMÉ

Lorsque les réseaux de distribution d'eau potable vieillissent, le nombre de bris augmente, la capacité hydraulique diminue et la qualité de l'eau transportée risque de se dégrader. Afin d'assurer un service de qualité aux abonnés, les réseaux de distribution doivent être maintenus dans un état satisfaisant. Les gestionnaires des réseaux doivent disposer d'outils leur permettant de planifier la réhabilitation et/ou le remplacement des conduites de leur réseau, afin d'assurer la sécurité des abonnés.

L'objectif de cette étude est de développer un prototype pour la planification des interventions pour un réseau de distribution en eau puis de tester ce modèle sur des réseaux de plus d'une centaine de conduites (100 et 250 conduites). Ce modèle doit tenir compte à la fois de la détérioration de la capacité hydraulique et de l'intégrité structurale de la conduite. Ce modèle est testé sur de petites périodes de cinq ans (appelées phases) afin d'identifier l'ensemble des conduites à remplacer, lesquelles sont combinées sur une longue période, ce qui permet d'inclure le maximum d'informations et d'actualiser l'information sur l'état du réseau, à chaque fois que de nouvelles informations apparaissent.

Pour modéliser l'évolution du nombre de bris, un modèle de bris probabiliste est intégré. Ce modèle considère les intervalles de temps entre les différents bris de conduites comme des variables aléatoires, décrites par des fonctions de densité de probabilité. Pour tester le modèle développé, le modèle de bris Weibull-Exponentiel est supposé. Ce modèle combine la distribution Weibull et les distributions exponentielles. La distribution Weibull est utilisée pour modéliser les temps du premier bris et les distributions exponentielles sont utilisées pour modéliser les temps des bris d'ordre supérieur ou égal à deux. Une approche basée essentiellement sur l'inférence bayésienne est développée pour estimer les paramètres du modèle de bris. Une fois que cette approche a été vérifiée, elle a été intégrée au modèle de planification des interventions afin de tester la stratégie proposée à long terme. Un processus de mise à jour de l'information a aussi été intégré au modèle afin de tenir compte de toutes les modifications apportées au réseau à la fin de chaque phase.

La fonction coût regroupe les coûts de remplacement des conduites et de réparation des bris. Les contraintes hydrauliques sont la conservation de la masse, la conservation de l'énergie et la contrainte de pression minimale. Afin d'identifier, à chaque phase, l'ensemble des conduites à remplacer et les temps optimaux de remplacement, le problème d'optimisation est abordé en premier comme un problème monoobjectif avec contraintes à satisfaire. Un algorithme génétique (AG) générationnel est utilisé pour minimiser la fonction coût total du réseau sous la contrainte de pression minimale. Ensuite, une approche d'optimisation multiobjectif est considérée, la contrainte de pression minimale étant alors posée comme un second objectif. Un ensemble de solutions Pareto optimales est déterminé à chaque phase. Cette seconde approche nous a permis de tester différentes stratégies d'intervention, d'évaluer l'impact des décisions d'intervention, et de démontrer la supériorité de la méthode d'optimisation multiobjectif basée sur l'algorithme NSGA-II.

Étudiante :

Leïla DRIDI

Directeur de recherche :

Prof. Jean-Pierre Villeneuve

ABSTRACT

When the water distribution networks age, the number of breaks increases, the hydraulic capacity decreases, and the quality of transported water is likely to be degraded. In order to ensure quality service to the subscribers, water distribution networks must be adequately monitored and maintained. The networks managers need to have tools allowing them to rehabilitate and/or to replace the pipes of their network, in order to ensure the subscribers' safety.

The objective of this study is to develop an intervention planning prototype for a water distribution network and to test this model with networks of more than one hundred pipes (100 and 250). This model must take into account the deterioration of the hydraulic capacity and structural integrity of the pipe simultaneously. This model was tested over a small period of five years (phase) to identify the set of pipes to be replaced, and over a long period of time to allow the inclusion of a maximum amount of information, and to update the information on the state of the network as soon as new information becomes available.

To model the break number evolution, a probabilistic break model was integrated. This model considers the time intervals between different pipe breaks as random variables described by probability density functions. To test the developed model, the Weibull-Exponential break model was assumed. This model combines Weibull and exponential distributions. The Weibull distribution was used to model time intervals of the first break, and the exponential distributions were used to model time intervals from the second break. An approach based primarily on bayesian inference was developed to estimate the parameters of the break model. Once this approach was checked, it was integrated into the intervention planning model, in order to test the long-term suggested strategy. An information update process was also integrated into the model to take into account all the modifications made to the network at the end of each phase.

The objective function used contains the repair and replacement costs. The hydraulic constraints included were: conservation of mass, conservation of energy and the constraint of minimal pressure. In order to identify, at each phase, the set of the pipes to be replaced and the optimal time of replacement, the problem of optimization was tackled at first as a monoobjective problem with constraints to satisfy. A generational genetic algorithm (GA) was used to minimize the total cost function of the network to minimal pressure constraint. Then a multiobjective optimization approach was considered where the minimal pressure constraint was introduced as a second objective. A set of optimal Pareto solutions was given at each phase. This second approach enabled us to test different intervention strategies, evaluate the impact of the intervention decisions, and show the superiority of the multiobjective optimization method based on *NSGA-II* algorithm.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu, le professeur Jean-Pierre Villeneuve, directeur de recherche, pour m'avoir accueillie dans son équipe durant mes quatre années de thèse, pour la qualité de l'encadrement, pour le soutien financier qu'il m'a offert, pour la responsabilité d'enseigner qu'il m'a donnée et pour avoir ensoleillé mon espace de travail au carrefour Molson, je l'assure de ma profonde reconnaissance. J'aimerais ensuite remercier le professeur Alain Mailhot pour la qualité exceptionnelle de son encadrement, son appui scientifique, ses conseils et le temps qu'il m'a consacré et qui m'a permis de finaliser ce travail. Je remercie vivement le professeur Marc Parizeau pour m'avoir ouvert la porte de son bureau en 2003, pour m'avoir fait bénéficier de sa compétence et de son expérience sur les algorithmes génétiques, pour son soutien technique, pour sa disponibilité lors des réunions mensuelles à l'INRS-ETE, et surtout pour ses encouragements et son éternelle bonne humeur.

Antonia Dumont et Yvon Rousseau, MERCI à tous les moments passés ensemble en dehors des heures d'étude, à l'accueil chaleureux que vous m'avez fait lors de mon arrivée au Québec, au soutien que vous m'avez apporté tout au long de ma thèse et surtout pour la précieuse aide qui m'a permis de réaliser mon autre projet, je vous exprime toute ma reconnaissance.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
ABSTRACT	iii
REMERCIEMENTS	v
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES FIGURES	xvii
1. INTRODUCTION	1
1.1 Objectif de l'étude	2
1.2 Organisation de la thèse.....	9
2. REVUE DE LITTÉRATURE	13
2.1 Techniques de réhabilitation et de remplacement des conduites	14
2.2 Coûts de remplacement/réhabilitation d'une conduite et de réparation des bris.....	16
2.3 Méthodes d'estimation de l'évolution du nombre de bris de conduites en réseau	22
2.3.1 Modèles agrégés	23
2.3.2 Modèles de régression	24
2.3.3 Modèles probabilistes.....	25
2.4 Stratégies de réhabilitation/remplacement	28
2.4.1 Stratégies basées uniquement sur l'état structural des conduites.	29
2.4.2 Stratégies intégrant les aspects structural et hydraulique	36
2.4.3 Algorithmes génétiques et optimisation des stratégies de remplacement/réhabilitation des systèmes de distribution.....	40
2.5 Algorithmes génétiques multiobjectifs dans les réseaux de distribution : Dimensionnement–réhabilitation et/ou remplacement.....	44
2.6 Synthèse	49
3. MODÉLISATION DES PROBABILITÉS D'OCCURRENCE DE BRIS EN RÉSEAU	53
3.1 Fonctions statistiques	53
3.2 Distributions statistiques considérées.....	55
3.2.1 Distribution de Weibull.....	55
3.2.2 Distribution exponentielle	56
3.3 Modélisation de la probabilité d'occurrence des bris	56
3.3.1 Fonction de densité de probabilité d'occurrence du j^{e} bris.....	57
3.3.2 Modèle de bris avec paramètres λ linéairement dépendants de l'ordre de bris et modèle général	59
3.4 Évaluation du nombre moyen de bris	59
3.4.1 Probabilité conditionnelle d'occurrence de bris pour le modèle de bris général.....	60
3.4.2 Nombre moyen de bris conditionnel à un historique donné pour le modèle de bris général	62
3.4.3 Nombre moyen de bris pour le modèle de bris avec λ linéaire.....	63

3.4.3.1	Nombre moyen de bris conditionnel à l'apparition de k bris sur l'intervalle $[t_0, t']$	65
3.4.3.2	Nombre moyen de bris conditionnel à l'apparition d'aucun bris sur l'intervalle $[t_0, t']$	65
3.4.4	Résumé	66
3.5	Description du modèle de bris Weibull- Exponentiel.....	67
3.6	Fonction coût pour une conduite, cas particulier d'un modèle de bris avec paramètres linéairement dépendants de l'ordre de bris	69
3.6.1	Fonction coût avec un modèle de bris linéaire, pour une conduite ayant subi k bris.....	71
3.6.1.1	Estimation du temps optimal de remplacement d'une conduite ayant subi k bris	72
3.6.1.2	Exemple d'application	73
3.6.1.3	Influence des coûts indirects sur le moment optimal du remplacement d'une conduite	74
3.6.2	Fonction coût avec un modèle de bris linéaire, pour une conduite n'ayant subi aucun bris	75
4.	ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE DE BRIS PAR INFÉRENCE BAYÉSIENNE	77
4.1	Théorème de Bayes	77
4.2	Estimateurs bayésiens	79
4.2.1	Maximum de la distribution de probabilité <i>a posteriori</i>	79
4.2.2	Moyenne de la distribution de probabilité <i>a posteriori</i>	80
4.3	Estimation des paramètres du modèle de bris.....	80
4.3.1	Estimation des paramètres de la distribution Weibull (bris d'ordre un).....	81
4.3.1.1	Valeurs moyennes de θ et β	84
4.3.1.2	Variances de θ et β	85
4.3.1.3	Valeurs les plus probables de θ et β	86
4.3.1.4	Estimation des distributions marginales <i>a posteriori</i> des paramètres θ et β	87
4.3.2	Estimation des paramètres des distributions exponentielles (bris d'ordre deux ou plus)	88
4.3.2.1	Valeurs moyennes de la distribution <i>a posteriori</i> de λ_j	91
4.3.2.2	Variance de la distribution <i>a posteriori</i> de λ_j	91
4.3.2.3	Valeur de λ_j maximisant la distribution <i>a posteriori</i>	92
4.3.2.4	Valeurs de λ_j en fonction de l'ordre de bris j	93
5.	ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE DE BRIS PAR INFÉRENCE BAYÉSIENNE - APPLICATION À UN RÉSEAU HYPOTHÉTIQUE	95
5.1	Distributions <i>a posteriori</i> des paramètres	96
5.1.1	Distributions <i>a posteriori</i> des paramètres θ et β	98
5.1.2	Distributions <i>a posteriori</i> des paramètres λ_i (bris d'ordre ≥ 2).....	101

5.2	Estimateurs du maximum de probabilité des distributions a posteriori	103
5.2.1	Paramètres de la distribution Weibull θ et β	103
5.2.2	Paramètres des distributions exponentielles λ_i ($1 < i \leq 10$)	104
5.3	Estimation des paramètres λ_i en fonction de l'ordre de bris	106
5.4	Influence de la taille du réseau sur les distributions a posteriori	109
5.5	Analyse de sensibilité par rapport aux paramètres (α_0, β_0) (de la distribution a priori)	112
5.6	Influence de la distribution a priori sur la relation entre les paramètres λ_i et l'ordre de bris (i)	113
5.7	Conclusion et recommandations	114
6.	HYDRAULIQUE DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION	117
6.1	Réseaux de distribution de l'eau potable	117
6.2	Calcul hydraulique en réseaux	118
6.3	Formules de pertes de charge	120
6.4	Résolution des équations hydrauliques pour un réseau de distribution	122
6.4.1	Méthodes de résolution	122
6.4.2	Vitesses minimales et maximales	124
6.5	Variation de la rugosité des conduites en fonction du temps	125
7.	ALGORITHMES GÉNÉTIQUES	131
7.1	Algorithmes génétiques	132
7.1.1	Principe de base d'un AG standard	132
7.1.1.1	Sélection	135
7.1.1.2	Croisement	136
7.1.1.3	Mutation	137
7.1.2	Codage	137
7.1.3	Paramètres d'un AG	138
7.1.4	Processus d'évolution des générations : générationnel, stationnaire et élitiste	139
7.1.5	Opérateurs de croisement	140
7.2	AG en îlots (ou avec demes)	141
7.3	Optimisation multiobjectif : définition et principes de base	144
7.4	AG pour l'optimisation multiobjectif	146
7.4.1	<i>Niched Pareto Genetic Algorithm (NPGA)</i>	148
7.4.1.1	Fonction de partage (<i>fitness sharing</i>) et compteur de niche	148
7.4.1.2	Distance entre deux individus	150
7.4.1.3	Avantage et désavantage du <i>NPGA</i>	151
7.4.2	<i>Niched Pareto Genetic Algorithm 2 (NPGA 2)</i>	151
7.4.3	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II)</i>	152
7.4.3.1	Calcul de la distance de <i>crowding</i>	154
7.4.3.2	Algorithme <i>NSGA-II</i> implanté dans <i>Open-Beagle</i>	156
8.	STRATÉGIE DE PLANIFICATION DES INTERVENTIONS EN RÉSEAU	157
8.1	Exposé de la stratégie de planification des interventions en réseau	158
8.2	Actualisation de l'historique de bris	161

8.3	Fonction objectif	163
8.4	Évolution du coefficient de Hazen-Williams.....	165
8.5	Contraintes hydrauliques.....	166
8.6	Formulation du problème d'optimisation avec un AG, dans le cadre de la stratégie de planification des interventions.....	167
8.6.1	Représentation de la solution	167
8.6.2	Choix du décodage et processus d'évaluation de la fonction d'adaptation	168
9.	APPROCHE MONOOBJECTIF	173
9.1	Données relatives aux réseaux et aux historiques de bris.....	173
9.1.1	Génération de la structure des deux réseaux et historique de bris....	174
9.1.2	Réseau à 100 conduites.....	175
9.1.3	Réseau à 250 conduites.....	176
9.2	Résultats pour le réseau à 100 conduites	178
9.2.1	Influence du nombre maximal de générations.....	178
9.2.2	Influence de la taille du deme.....	179
9.2.3	Identification des conduites à remplacer sur dix phases	180
9.2.4	Influence de la taille des tournois sur la convergence vers la meilleure solution.....	187
9.3	Résultats pour le réseau à 250 conduites	189
9.4	Influence des distributions a priori sur les décisions de remplacement.....	192
9.4.1	Réseau à 100 conduites.....	192
9.4.2	Réseau à 250 conduites.....	195
9.5	Stratégie de planification des interventions considérant les aspects structural et hydraulique	198
9.5.1	Réseau à 100 conduites.....	199
9.5.2	Réseau à 250 conduites.....	206
9.6	Discussion générale et recommandations.....	209
10.	STRATÉGIES MULTIOBJECTIFS	215
10.1	Formulation mathématique des fonctions objectifs.....	216
10.2	Stratégies de remplacement multiobjectif.....	216
10.2.1	Stratégies de remplacement considérées	217
10.2.2	Implantation de l'algorithme multiobjectif pour une quelconque stratégie de remplacement	219
10.3	Analyse des résultats pour la phase 1	221
10.3.1	Comparaison des résultats du <i>NSGA-II</i> et du monoobjectif pour le réseau de 100 conduites.....	221
10.3.2	Comparaison des résultats du <i>NPGA 2</i> et du <i>NSGA-II</i> pour le réseau de 100 conduites.....	224
10.4	Analyse des résultats de différentes stratégies de remplacement pour les dix phases avec le <i>NSGA-II</i>	225
10.4.1	Réseau de 100 conduites.....	225
10.4.1.1	Première stratégie	226
10.4.1.2	Deuxième stratégie	226
10.4.1.3	Troisième stratégie.....	227

10.4.1.4	Quatrième stratégie.....	228
10.4.2	Réseau de 250 conduites.....	230
10.4.2.1	Première stratégie.....	231
10.4.2.2	Deuxième stratégie.....	232
10.4.2.3	Influence de la pression minimale imposée aux noeuds.....	233
10.4.2.4	Troisième stratégie.....	234
10.4.2.5	Quatrième stratégie.....	235
10.5	Discussion et conclusion.....	236
11.	CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS.....	239
11.1	Conclusion générale.....	239
11.2	Contributions originales.....	246
11.3	Recommandations.....	248
ANNEXE A : ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE DE BRIS PAR INFÉRENCE BAYÉSIENNE - APPLICATION À UN RÉSEAU HYPOTHÉTIQUE (suite).....		253
ANNEXE B : DONNÉES DES RÉSEAUX POUR LE DIMENSIONNEMENT.....		260
B.1	Description des données pour le dimensionnement du réseau d'Alperovits et Shamir (1977) (8 conduites).....	260
B.2	Description des données pour le dimensionnement du réseau de Hanoi (34 conduites).....	262
ANNEXE C : EXEMPLES D'APPLICATION D'UN AG EN ÎLOTS POUR LE DIMENSIONNEMENT DES RÉSEAUX.....		266
C.1	Formulation du problème de dimensionnement avec un AG.....	266
C.2	Fonction d'adaptation.....	268
C.3	Tests sur le réseau d'Alperovits et Shamir.....	268
C.4	Tests sur le réseau de Hanoi.....	271
C.4.1	Influence de la pression minimale imposée aux nœuds.....	274
C.5	Discussions sur les tests du dimensionnement.....	275
ANNEXE D : DONNÉES DES RÉSEAUX HYPOTHÉTIQUES.....		279
D.1	Description des données pour le dimensionnement du premier réseau de 100 conduites.....	280
D.2	Description des données pour le dimensionnement du second réseau de 250 conduites.....	286
ANNEXE E : APPROCHE MONOOBJECTIF (suite).....		299
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		307

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Coûts selon les différentes techniques de réhabilitation ou de remplacement (Selvakumar <i>et al.</i> , 2002)	17
Tableau 2.2	Paramètres de la régression pour l'estimation du coût de base (Clark <i>et al.</i> , 2002)	19
Tableau 2.3	Coûts moyens des techniques de réhabilitation et de remplacement (Zhao et Rajani, 2002).....	20
Tableau 2.4	Coûts moyens de réparation des bris en fonction du diamètre	22
Tableau 2.5	Distributions utilisées pour chaque ordre de bris selon différents auteurs	28
Tableau 3.1	Paramètres des distributions pour chaque ordre de bris.....	68
Tableau 3.2	Valeurs utilisées pour l'exemple d'application considéré	73
Tableau 5.1	Paramètres réels des distributions pour chaque ordre de bris	96
Tableau 5.2	Nombre de conduites ayant subi un nombre de bris i ($1 \leq i \leq 10$) pour un historique de durée donnée	97
Tableau 5.3	Valeurs des paramètres de la régression non linéaire estimés à partir de l'historique considéré	107
Tableau 5.4	Valeurs des paramètres λ_i maximisant la distribution <i>a posteriori</i> pour une distribution <i>a priori</i> Gamma (0,50, 0,50).....	112
Tableau 5.5	Valeurs des paramètres λ_i maximisant la distribution <i>a posteriori</i> pour une distribution <i>a priori</i> Gamma (0,50, 0,10).....	113
Tableau 6.1	Valeurs du coefficient k_e (Carlier, 1972).....	121
Tableau 6.2	Équations de pertes de charge en unités internationales et américaines (Walski <i>et al.</i> 2001).....	122
Tableau 6.3	Taux de croissance de la rugosité dans une conduite en fonte revêtue (Lamont 1981, Sharp et Walski 1988).....	126
Tableau 7.1	Code de Gray et code binaire pour une chaîne à trois bits	138
Tableau 9.1	Données du coût de remplacement et de réparation d'un bris.....	174
Tableau 9.2	Paramètres de l'AG-générationnel	178
Tableau 9.3	Influence du nombre maximal de générations	179
Tableau 9.4	Paramètres de l'AG-générationnel pour chaque phase	181
Tableau 9.5	Conduites devant être remplacées telles qu'identifiées par l'AG	181
Tableau 9.6	Meilleurs moments de remplacement des conduites	184
Tableau 9.7	Liste des conduites remplacées avec le nombre de bris enregistrés.....	186
Tableau 9.8	Paramètres de l'AG-générationnel (réseau à 250 conduites)	189
Tableau 9.9	Conduites nécessitant un remplacement telles qu'identifiées par l'AG (réseau à 250 conduites)	191
Tableau 9.10	Influence de la distribution <i>a priori</i> sur les décisions de remplacement pour le réseau à 100 conduites	193
Tableau 9.11	Décisions de remplacements pour le réseau à 100 conduites avec « information parfaite »	195

Tableau 9.12	Paramètres de l'AG-générationnel (réseau à 100 conduites avec contrainte hydraulique)	200
Tableau 9.13	Meilleure solution trouvée pour le réseau à 100 conduites avec une pression minimale de 20 m, durant la première phase.....	201
Tableau 9.14	Conduites devant être remplacées telles qu'identifiées par l'AG (structural et hydraulique)	206
Tableau 10.1	Paramètres nécessaires pour les algorithmes <i>NSGA-II</i> et <i>NPGA 2</i> pour une population avec un seul deme	221
Tableau 10.2	Paramètres du <i>NSGA-II</i> (réseau de 100 conduites)	222
Tableau 10.3	Solutions non dominées pour une pression minimale de 20 m (réseau de 100 conduites)	222
Tableau 10.4	Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 1 (réseau de 100 conduites).....	226
Tableau 10.5	Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 2 (réseau de 100 conduites).....	227
Tableau 10.6	Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 3 (réseau de 100 conduites).....	228
Tableau 10.7	Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 4 (réseau de 100 conduites).....	229
Tableau 10.8	Paramètres du <i>NSGA-II</i> (réseau de 250 conduites)	230
Tableau 10.9	Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 1 (réseau de 250 conduites).....	232
Tableau 10.10	Certaines solutions non dominées identifiées à la première phase (stratégie 2, réseau de 250 conduites avec pression minimale de 25 m)	232
Tableau 10.11	Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 2 (réseau de 250 conduites avec pression minimale de 25 m)	233
Tableau 10.12	Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 2 (réseau de 250 conduites avec pression minimale de 24 m)	234
Tableau 10.13	Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 3 (réseau de 250 conduites avec pression minimale de 24 m)	235
Tableau 10.14	Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 4 (réseau de 250 conduites avec pression minimale de 24 m)	236
Tableau B.1	Description des nœuds (réseau de 8 conduites)	260
Tableau B.2	Description des coûts de conduites (réseau de 8 conduites)	261
Tableau B.3	Description des nœuds (réseau de Hanoi)	262
Tableau B.4	Description des conduites (réseau de Hanoi)	263
Tableau B.5	Description des coûts de conduites (réseau de Hanoi).....	263
Tableau C.1	Coefficients de conversion de l'équation de Hazen-Williams utilisée par différents auteurs (Savic et Walters, 1997)	267
Tableau C.2	Paramètres de l'AG-générationnel pour le réseau à 8 conduites.....	269

Tableau C.3	Meilleures solutions trouvées pour le réseau d'Alperovits, avec des valeurs de diamètres discrètes.....	270
Tableau C.4	Pressions aux nœuds pour le réseau d'Alperovits et Shamir.....	270
Tableau C.5	Paramètres de l'AG-générationnel pour le réseau de Hanoi.....	272
Tableau C.6	Meilleures solutions trouvées pour le réseau de Hanoi, selon les différents auteurs.....	273
Tableau C.7	Pressions aux nœuds pour le réseau de Hanoi.....	274
Tableau D.1	Valeurs calculées du coefficient de H-W, au temps $t = 30$ ans, pour les diamètres normalisés.....	280
Tableau D.2	Description des nœuds (réseau de 100 conduites).....	281
Tableau D.3	Description des conduites (réseau de 100 conduites).....	282
Tableau D.4	Description des nœuds (réseau de 250 conduites).....	286
Tableau D.5	Description des conduites (réseau de 250 conduites).....	289
Tableau E.1	Meilleurs moments de remplacement des conduites (réseau à 250 conduites).....	304

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Modèle d'estimation des paramètres du modèle de bris du prototype de planification des interventions développé.....	6
Figure 1.2	Processus de planification des interventions sur chaque phase du prototype développé.....	7
Figure 2.1	Cycle de remplacement successifs par une même conduite (Shamir et Howard, 1979).....	31
Figure 3.1	Représentation schématique des périodes exponentielle et non-exponentielle.....	57
Figure 3.2	Représentation schématique de l'axe des temps dans le cas d'une conduite ayant subi k bris aux temps $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ durant l'intervalle $[t_0, t']$	61
Figure 3.3	Probabilité d'avoir un bris d'ordre n ($n = 1, 2$ ou 3), durant l'intervalle $[t, t + 1]$ avec ($t > 30$ ans) conditionnelle à l'apparition d'un bris d'ordre $k = 1$, durant l'intervalle $[0, 30 \text{ ans}]$ ($\lambda_2 = 0.01, \lambda_3 = 0.09, \dots, \lambda_k = \lambda_{k-1} + 0.08$).....	63
Figure 3.4	Axe des temps pour l'analyse du coût d'une conduite ayant subi k bris.....	69
Figure 3.5	Coût total, pour l'exemple de la section 3.6.1.2, en fonction du temps (nombre d'années après l'installation).....	74
Figure 3.6	Coût total, pour l'exemple de la section 3.6.1.3, en fonction du temps (nombre d'année après l'installation) en considérant les coûts indirects.....	75
Figure 4.1	Distributions <i>a priori</i> et <i>a posteriori</i>	78
Figure 4.2	Exemple de représentation schématique des temps d'occurrence des bris pour le calcul des paramètres de la distribution Weibull.....	82
Figure 4.3	Exemple de représentation schématique des temps d'occurrence des bris pour le calcul du paramètre λ_2 de la distribution exponentielle.....	88
Figure 4.4	Quelques distributions Gamma de paramètres α_0 et β_0	90
Figure 5.1	Période d'estimation des paramètres du modèle de bris.....	97
Figure 5.2	Exemple de distribution <i>a posteriori</i> pour le paramètre β pour un historique de 30 années (trait fin noir) et un historique de 75 années (trait gros gris). La distribution <i>a priori</i> utilisée est uniforme $U(1,2)$ et est représentée par le trait en pointillé.....	99
Figure 5.3	Exemple de distribution <i>a posteriori</i> pour le paramètre θ pour un historique de 30 années (trait fin noir) et un historique de 75 années (trait gros gris). La distribution <i>a priori</i> utilisée est uniforme $U(0,1000)$ et est représentée par le trait en pointillé.....	99

Figure 5.4	Moyenne et écart-type de la distribution <i>a posteriori</i> de β pour l'exemple considéré (distribution Weibull). La ligne en pointillé représente la valeur réelle de 1,28.....	100
Figure 5.5	Moyenne et écart-type de la distribution <i>a posteriori</i> de θ pour l'exemple considéré (distribution Weibull). La ligne en pointillé représente la valeur réelle de 200,73.....	100
Figure 5.6	Distribution <i>a posteriori</i> du paramètre λ_2 , la ligne en pointillé représentant la valeur réelle de 0,05.....	101
Figure 5.7	Distribution <i>a posteriori</i> du paramètre λ_3 , la ligne en pointillé représentant la valeur réelle de 0,10.....	102
Figure 5.8	Distribution <i>a posteriori</i> du paramètre λ_4 , la ligne en pointillé représentant la valeur réelle de 0,15.....	102
Figure 5.9	Écart-type, moyenne et maximum de probabilité de la distribution <i>a posteriori</i> de β	103
Figure 5.10	Écart-type, moyenne et maximum de probabilité de la distribution <i>a posteriori</i> de θ	104
Figure 5.11	Écart-type, moyenne et maximum de probabilité <i>a posteriori</i> de λ_2	105
Figure 5.12	Écart-type, moyenne et maximum de probabilité <i>a posteriori</i> de λ_3	105
Figure 5.13	Écart-type, moyenne et maximum de probabilité <i>a posteriori</i> de λ_4	106
Figure 5.14	Relation entre les valeurs des paramètres (λ_i) et l'ordre de bris (historique de 30 ans).....	107
Figure 5.15	Relation entre les valeurs des paramètres (λ_i) et l'ordre de bris (historique de 40 ans).....	108
Figure 5.16	Relation entre les valeurs des paramètres (λ_i) et l'ordre de bris (historique de 50 ans).....	108
Figure 5.17	Relation entre les valeurs des paramètres (λ_i) et l'ordre de bris (historique de 60 ans).....	109
Figure 5.18	Relation entre les valeurs des paramètres (λ_i) et l'ordre de bris (historique de 70 ans).....	109
Figure 5.19	Distribution <i>a posteriori</i> du paramètre (λ_2) pour un réseau de 534 conduites.....	110
Figure 5.20	Distribution <i>a posteriori</i> du paramètre (λ_2) pour un réseau de 100 conduites.....	110
Figure 5.21	Distribution <i>a posteriori</i> du paramètre (λ_2) pour un réseau de 47 conduites.....	111
Figure 5.22	Écart-type du paramètre (λ_2) en fonction du nombre de conduites.....	111
Figure 5.23	Relation entre λ_i et l'ordre de bris selon les différentes distributions <i>a priori</i> considérées (30 ans).....	114
Figure 5.24	Relation entre λ_i et l'ordre de bris selon les différentes distributions <i>a priori</i> considérées (60 ans).....	114

Figure 6.1	Exemple de réseaux ramifiés et maillés	118
Figure 7.1	Organigramme d'un AG standard.....	134
Figure 7.2	Représentation d'une sélection par tournoi d'individus pour un critère de maximisation. Chaque individu représente une solution possible	136
Figure 7.3	Représentation d'un croisement en un point de deux chaînes.....	137
Figure 7.4	Représentation d'une mutation de bits dans une chaîne	137
Figure 7.5	Représentation d'un croisement en deux points.....	140
Figure 7.6	Représentation d'un croisement uniforme	141
Figure 7.7	Représentation d'un AG en îlots.....	142
Figure 7.8	Processus d'évolution dans un modèle d'AG en îlots, générationnel.....	144
Figure 7.9	Exemple d'un front de Pareto	146
Figure 7.10	Sélection d'individus avec le NPGA (d'après Horn <i>et al.</i> , 1994).....	150
Figure 7.11	Principe de l'algorithme NSGA-II (Deb <i>et al.</i> , 2002).....	153
Figure 7.12	Algorithme du NSGA-II (Deb <i>et al.</i> , 2002).....	154
Figure 7.13	Distance de <i>crowding</i> , les points noirs sont des solutions appartenant au même front (Deb <i>et al.</i> , 2002)	155
Figure 7.14	Calcul de la distance de <i>crowding</i> pour chaque solution d'un front.....	155
Figure 8.1	Représentation des périodes.....	158
Figure 8.2	Organigramme de la procédure de validation	160
Figure 8.3	Exemple d'actualisation de l'historique de bris d'une conduite avec intervention.....	162
Figure 8.4	Exemple d'actualisation de l'historique de bris d'une conduite sans intervention.....	163
Figure 8.5	Organigramme pour l'évaluation de la meilleure solution (cas d'une seule phase d'intervention)	171
Figure 8.6	Organigramme pour l'évaluation de la fonction d'adaptation d'une solution.....	172
Figure 9.1	Nombre de bris enregistrés par chaque conduite, pour le réseau de 100 conduites (réseau âgé de 30 ans, état initial).....	176
Figure 9.2	Nombre de bris enregistrés par chaque conduite, pour le réseau de 250 conduites (réseau âgé de 30 ans, état initial).....	177
Figure 9.3	Meilleure fonction d'adaptation à chaque génération pour le problème du réseau à 100 conduites sans pénalité hydraulique (100 générations)	179
Figure 9.4	Influence de la taille du deme sur la convergence (réseau à 100 conduites, sans pénalité hydraulique).....	180
Figure 9.5	Meilleur temps de remplacement sur cet intervalle pour la conduite 16 (pour la phase 3, réseau à 100 conduites).....	182
Figure 9.6	Meilleur temps de remplacement sur cet intervalle pour la conduite 28 (pour la phase 3, réseau à 100 conduites).....	182
Figure 9.7	Meilleur temps de remplacement sur cet intervalle pour la conduite 63 (pour la phase 3, réseau à 100 conduites).....	183
Figure 9.8	Meilleur temps de remplacement sur cet intervalle pour la conduite 96 (pour la phase 3, réseau à 100 conduites).....	183

Figure 9.9	Moyenne par génération et meilleure fonction d'adaptation de chaque génération pour la phase 1.....	185
Figure 9.10	Moyenne par génération et meilleure fonction d'adaptation de chaque génération pour la phase 2.....	185
Figure 9.11	Valeurs réelles et valeurs estimées (maximum de la distribution <i>a posteriori</i>) des paramètres (λ_i) pour les différents ordres de bris pour une distribution <i>a priori</i> Gamma (0,50, 0,50) (réseau à 100 conduites).....	187
Figure 9.12	Influence de la taille des tournois sur la convergence vers la meilleure solution pour la phase 3 (réseau à 100 conduites)	188
Figure 9.13	Influence de la taille des tournois sur la convergence vers la meilleure solution pour la phase 1 (réseau à 250 conduites)	190
Figure 9.14	Valeurs réelles et valeurs estimées (maximum de la distribution <i>a posteriori</i>) des paramètres (λ_i) pour les différents ordres de bris pour une distribution <i>a priori</i> Gamma (2,00, 0,25) (réseau à 100 conduites).....	194
Figure 9.15	Minimum du nombre de bris enregistrés par les conduites remplacées en fonction des distributions <i>a priori</i> des paramètres λ_i (réseau à 250)	196
Figure 9.16	Nombre de remplacements par phase pour une distribution <i>a priori</i> Gamma (2,00, 0,25) et Gamma (0,50, 0,50) (réseau à 250)	197
Figure 9.17	Valeurs réelles et valeurs estimées (maximum de la distribution <i>a posteriori</i>) des paramètres (λ_i) pour les différents ordres de bris pour une distribution <i>a priori</i> Gamma (2,00, 0,25), (réseau à 250 conduites).....	198
Figure 9.18	Pressions aux nœuds au temps ($t = 30$ ans) pour le réseau à 100 conduites	199
Figure 9.19	Pressions aux nœuds au temps ($t = 35$ ans) pour la meilleure solution trouvée, pour le réseau à 100 conduites (pression minimale imposée de 17 m).....	201
Figure 9.20	Pressions aux nœuds au temps ($t = 35$ ans) pour la meilleure solution trouvée, pour le réseau à 100 conduites (pression minimale imposée de 20 m).....	202
Figure 9.21	Influence de la pression minimale pour la première phase (résultats de la meilleure solution trouvée, réseau à 100 conduites, les carrés indiquent la fonction d'adaptation et le losange le nombre de conduites remplacées).....	203
Figure 9.22	Variation de la pression au nœud 58 en fonction des temps de la première phase.....	204
Figure 9.23	Variation de la pression au nœud 58 en fonction des temps pour les dix phases pour la meilleure solution trouvée à chaque phase.....	205
Figure 9.24	Pressions aux nœuds au temps ($t = 30$ ans) pour le réseau à 250 conduites	207

Figure 9.25	Pressions aux nœuds au temps ($t = 35$ ans) pour le réseau à 250 conduites (sans contrainte hydraulique)	208
Figure 9.26	Variation de la pression au nœud 134 en fonction des temps de la première phase, pour le réseau à 250 conduites (pression minimale imposée de 25 m).....	209
Figure 10.1	Choix d'une solution non dominée selon les différentes stratégies de remplacement.....	217
Figure 10.2	Optimisation multiobjectif sur plusieurs phases avec l'algorithme (NSGA-II) pour une quelconque stratégie de remplacement.....	220
Figure 10.3	Solutions non dominées à 50, 250 et 500 générations (NSGA-II) (réseau de 100 conduites).....	223
Figure 10.4	Solutions non dominées (NPGA 2 avec différents rayons de niche et NSGA-II) pour le réseau de 100 conduites	225
Figure 10.5	État général du réseau selon les différentes stratégies, avec une distribution <i>a priori</i> Gamma (0,50, 0,50) (réseau de 100 conduites).....	230
Figure 10.6	Solutions non dominées à 1 000, 2 000 et 3 000 générations (NSGA-II) (réseau de 250 conduites, phase 1)	231
Figure A.1	Distribution <i>a posteriori</i> du paramètre λ_5 , la ligne en pointillé représente la valeur réelle de 0,20.....	253
Figure A.2	Distribution <i>a posteriori</i> du paramètre λ_6 , la ligne en pointillé représente la valeur réelle de 0,25.....	253
Figure A.3	Distribution <i>a posteriori</i> du paramètre λ_7 , la ligne en pointillé représente la valeur réelle de 0,30.....	254
Figure A.4	Distribution <i>a posteriori</i> du paramètre λ_8 , la ligne en pointillé représente la valeur réelle de 0,35.....	254
Figure A.5	Distribution <i>a posteriori</i> du paramètre λ_9 , la ligne en pointillé représente la valeur réelle de 0,40.....	255
Figure A.6	Distribution <i>a posteriori</i> du paramètre λ_{10} , la ligne en pointillé représente la valeur réelle de 0,45.....	255
Figure A.7	Écart-type, moyenne et maximum de probabilités <i>a posteriori</i> de λ_5	256
Figure A.8	Écart-type, moyenne et maximum de probabilités <i>a posteriori</i> de λ_6	256
Figure A.9	Écart-type, moyenne et maximum de probabilités <i>a posteriori</i> de λ_7	257
Figure A.10	Écart-type, moyenne et maximum de probabilités <i>a posteriori</i> de λ_8	257
Figure A.11	Écart-type, moyenne et maximum de probabilités <i>a posteriori</i> de λ_9	258

Figure A.12	Écart-type, moyenne et maximum de probabilités <i>a posteriori</i> de λ_{10}	258
Figure B.1	Topologie du réseau de distribution d'Alperovits et Shamir (1977), identification des nœuds et des conduites	261
Figure B.2	Topologie du réseau de distribution de Hanoi, identification des nœuds et des conduites.	264
Figure C.1	Meilleure fonction d'adaptation de chaque génération pour le problème à huit conduites.....	271
Figure C.2	Meilleure fonction d'adaptation de chaque génération pour le problème de Hanoi (pression minimale de 30 m).....	272
Figure C.3	Meilleure fonction d'adaptation de chaque génération pour le problème de Hanoi (pression minimale de 29,59 m).....	275
Figure D.1	Variations du coefficient de Hazen-Williams en fonction du diamètre et de l'âge des conduites (réseau à 100 conduites).	280
Figure D.2	Topologie du réseau de distribution de 100 conduites, identification des nœuds et des conduites.	285
Figure D.3	Topologie du réseau de distribution de 250 conduites, identification des nœuds et des conduites.	295
Figure E.1	Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 35 ans (aucune conduite n'a été remplacée entre la 31 ^e et la 35 ^e année).	299
Figure E.2	Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 40 ans (aucune conduite n'a été remplacée entre la 36 ^e et la 40 ^e année).	300
Figure E.3	Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 45 ans (quatre conduites ont été remplacées entre la 41 ^e et la 45 ^e année, ces conduites sont représentées en gras).	300
Figure E.4	Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 50 ans (aucune conduite n'a été remplacée entre la 46 ^e et la 50 ^e année, les conduites remplacées lors de la dernière phase sont en trait fin).	301
Figure E.5	Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 55 ans (huit conduites ont été remplacées entre la 51 ^e et la 55 ^e année).	301
Figure E.6	Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 60 ans (deux conduites ont été remplacées entre la 56 ^e et la 60 ^e année).....	302
Figure E.7	Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 65 ans (deux conduites ont été remplacées entre la 61 ^e et la 65 ^e année).....	302
Figure E.8	Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 70 ans (deux conduites ont été remplacées entre la 65 ^e et la 70 ^e année).....	303
Figure E.9	Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 75 ans (huit conduites ont été remplacées entre la 71 ^e et la 75 ^e année).	303
Figure E.10	Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 80 ans (quatre conduites ont été remplacées entre la 76 ^e et la 80 ^e année).	304

1. INTRODUCTION

Les réseaux de distribution jouent un rôle crucial dans la vie de tous les jours. Ils ont été conçus pour satisfaire aux besoins des usagers et assurer la protection incendie. L'eau distribuée doit être de bonne qualité et fournie à une pression suffisante.

Mais au fil des ans, les réseaux se détériorent, les bris de conduites deviennent de plus en plus fréquents, certains réseaux n'arrivent plus à satisfaire les pressions voulues, parfois la qualité de l'eau distribuée se dégrade ce qui peut avoir de graves conséquences sur la santé publique.

Pour améliorer l'état d'un réseau, le gestionnaire peut réhabiliter les conduites existantes, remplacer ces conduites par de nouvelles, ou encore ajouter des conduites au réseau existant dans le cas où une extension est à prévoir et qu'il faudra satisfaire à la demande de futurs consommateurs.

Le problème de la réhabilitation (et/ou) remplacement des réseaux de distribution d'eau potable est complexe et les gestionnaires de réseau ont un sérieux problème à résoudre : ils doivent identifier les conduites à remplacer ainsi que les moments de remplacement. Résoudre ce problème n'est pas aussi facile qu'on le pense car plusieurs facteurs entrent en jeu et plusieurs paramètres sont à considérer :

- la complexité du réseau
- la détérioration de la capacité de transport des conduites
- le nombre de bris enregistrés par les conduites
- les moyens financiers disponibles
- la qualité de l'eau distribuée
- la difficulté de statuer sur l'état structural et la nécessité de pouvoir statuer sur cet état

- et enfin la quantité et la qualité des données disponibles qui vont permettre de modéliser les différents processus.

Le problème du remplacement des réseaux est plus simple quand il s'agit d'étudier l'état d'une seule conduite et que l'on doit décider entre réparer ou remplacer cette conduite. La décision de remplacer ou de ne pas remplacer à un moment précis repose sur la comparaison entre les deux options suivantes : remplacer la conduite par une nouvelle conduite et assumer de la sorte les coûts de remplacement; ou maintenir la conduite actuelle en reportant les coûts de remplacement mais en risquant des coûts futurs de réparation plus importants provoqués par d'éventuels bris.

Le cas d'une simple conduite peut facilement être traité mais si l'on doit considérer l'ensemble des conduites du réseau et leurs interactions d'un point de vue hydraulique, le problème se complexifie.

Étant donné les ressources financières limitées des municipalités, il est important de développer des approches ou méthodologies afin de donner aux gestionnaires des éléments objectifs leur permettant de mieux planifier les interventions. Il devient de plus en plus nécessaire d'envisager le développement d'outils permettant de minimiser les coûts des interventions (réhabilitation/remplacement) sur les conduites, notamment pour des réseaux de distribution de grande dimension.

1.1 Objectif de l'étude

Dans le cadre de cette étude, on se propose de développer une approche pour la planification des interventions en réseau applicable sur des phases de courte durée (une phase peut être définie par exemple sur cinq ans). Cette approche repose sur l'utilisation de cinq modèles :

- un modèle pour estimer les probabilités d'occurrence des bris de conduites considérant que les intervalles entre les temps des différents bris sont des variables aléatoires décrites par des fonctions de distribution de probabilité;
- l'utilisation d'une approche d'inférence bayésienne permettant l'estimation des paramètres du modèle de bris;
- un algorithme génétique (AG) pour l'optimisation;
- un simulateur hydraulique pour le calcul des pressions aux nœuds, des vitesses d'écoulement dans les conduites, etc.;
- un modèle de détérioration de la capacité hydraulique des conduites.

L'utilisation dans notre approche d'un modèle d'optimisation, indispensable compte tenu de la complexité du problème, permet de considérer l'interaction de chaque conduite avec le système en entier. Ainsi, les techniques d'optimisation permettent de prendre en compte la performance du système en entier et d'évaluer les coûts des différentes interventions.

Le choix d'une technique d'optimisation mathématique, comme les AG, pour résoudre le problème du remplacement des conduites provient essentiellement du fait qu'il existe un grand nombre de combinaisons possibles à évaluer et tester avant de pouvoir estimer celles qui ont les coûts les plus faibles. Par exemple, considérons le cas où deux options s'offrent à nous : remplacer ou ne pas remplacer une conduite, le nombre total de combinaisons possibles pour un réseau de 100 conduites serait de 2^{100} , soit $1,26 \times 10^{30}$ combinaisons possibles, ce qui est extrêmement grand surtout si l'on doit encore ajouter l'influence des années (remplacer la 1^{re} conduite : la 1^{re} année, la 2^e année, etc.). Outre le fait que les AG peuvent résoudre des problèmes de grande dimension, ils s'adaptent très bien aux problèmes discrets, non linéaires, avec ou sans contrainte et ils ne nécessitent pas de calculs auxiliaires comme le calcul des dérivées.

Le développement du prototype pour la planification des interventions en réseau s'est effectué en deux étapes :

- 1) La première étape consiste à valider l'approche bayésienne (AB) utilisée pour estimer les paramètres du modèle de bris. La figure 1.1 résume le processus d'estimation des paramètres du modèle de bris. On suppose en premier qu'un historique de bris est disponible sur une période initiale. À défaut d'un historique réel, cet historique de bris est généré à partir d'un modèle de bris de paramètres connus. Ensuite on subdivise la future période d'analyse en plusieurs phases. Ces phases de planification des interventions (PPI) visent à définir la stratégie des interventions à mettre en œuvre au cours des années à venir.

En se basant sur toute l'information des temps d'apparition de bris de la période initiale, on va estimer les paramètres du modèle de bris avec une approche bayésienne. Ensuite, on actualise l'historique de bris sur la première phase. L'actualisation consiste à générer des bris pour chaque conduite à partir de la date du dernier bris enregistré sur la période précédente. On augmente ensuite la période initiale en ajoutant la durée de la première phase et on évalue les paramètres du modèle de bris en utilisant l'information sur l'état de toutes les conduites du réseau sur une période plus grande. Ce processus est répété plusieurs fois, phase après phase.

- 2) La seconde étape permet de prendre en compte les aspects liés aux coûts et à la détérioration de la capacité de transport des conduites. Pour la détérioration structurale, le nombre de bris enregistrés par une conduite est le principal indicateur utilisé pour modéliser son état structural. La fonction coût de réparation des bris utilisée dépend du nombre de bris enregistrés par cette même conduite. En se basant sur les informations disponibles sur la période initiale, une première optimisation est réalisée sur la première phase afin de minimiser le coût des interventions sur le réseau (figure 1.2). Cette

optimisation devra permettre la détermination de l'ensemble des conduites à remplacer afin de minimiser le coût des interventions dans ce réseau tout en respectant les contraintes hydrauliques. Il s'agira d'identifier, pour chaque conduite sélectionnée, le moment optimal pour en effectuer le remplacement.

Pour résoudre le problème d'optimisation, deux approches sont testées :

- a) La première approche utilise un AG avec ou sans contraintes (approche avec un seul objectif). Pour trouver une solution au problème, l'AG utilise la valeur de la fonction à optimiser pour déterminer la solution optimale ou proche de l'optimum. L'avantage de l'AG utilisé est que le processus de recherche de la meilleure solution se fait sur différents espaces de recherche.
- b) La seconde approche utilise des AG multiobjectifs, le premier non élitiste (*NPGA 2*) et le second élitiste (*NSGA-II*). Avec l'approche à un seul objectif, l'algorithme cherche à trouver la meilleure stratégie de remplacement qui minimise le coût sous une contrainte à caractère hydraulique. Le principe de la méthode multiobjectif est plus général et flexible car la méthode fournit à la fin non pas une seule solution, mais un ensemble de solutions connues sous le nom de solutions de Pareto optimales. Toutes ces solutions sont optimales dans le sens qu'aucune amélioration ne peut se faire sur le premier objectif (lié au critère de coût) sans la dégradation du second objectif (lié au critère hydraulique).

Les résultats de l'optimisation sur la première phase vont permettre d'appliquer les décisions d'intervention sur le réseau de distribution. Ensuite, un processus de mise à jour de l'information permet d'actualiser l'information sur la première phase. Toutes les informations supplémentaires enregistrées durant la première phase sont ajoutées à l'information déjà disponible sur la période initiale et une autre optimisation est lancée sur la phase suivante. Ce processus se poursuit de

la même façon, phase après phase, jusqu'à atteindre un nombre maximal de phases fixé préalablement. La figure 1.2 montre l'exemple du processus de planification des interventions sur la première phase.

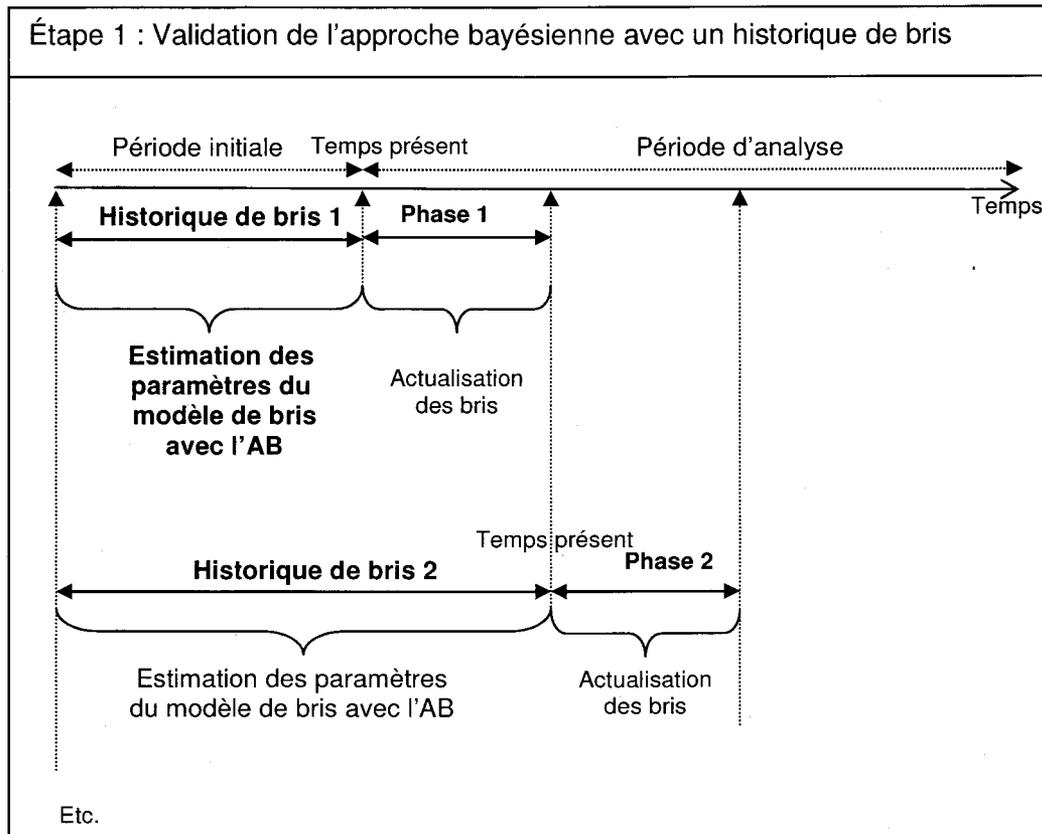


Figure 1.1 Modèle d'estimation des paramètres du modèle de bris du prototype de planification des interventions développé

La stratégie de planification des interventions développée permet de tenir compte de la variabilité de la durée des phases. La durée est fixée par défaut à cinq années dans cette étude mais elle peut aisément augmenter ou diminuer. La dimension des réseaux de distribution est aussi prise en considération, l'approche a été testée sur deux réseaux hypothétiques de 100 et 250 conduites.

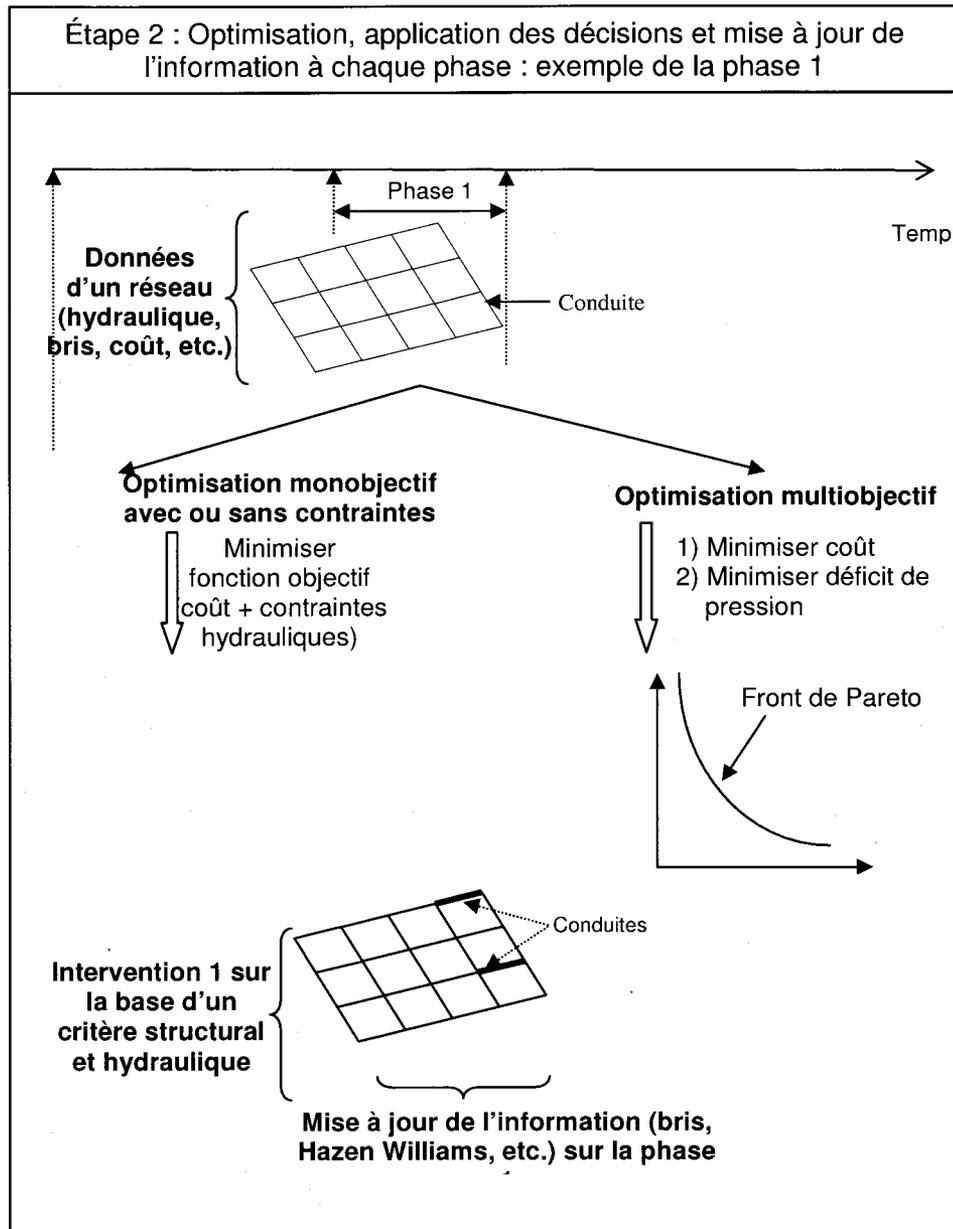


Figure 1.2 Processus de planification des interventions sur chaque phase du prototype développé

L'approche proposée pour la planification des interventions en réseau se distingue par les points suivants :

1. Par rapport à l'étude de Kleiner *et al.* (1998a,b) et Halhal *et al.* (1997), le modèle de bris que nous utilisons pour modéliser l'évolution du nombre de bris est un modèle probabiliste dans lequel les intervalles entre les temps des différents bris sont des variables aléatoires décrites par des fonctions de distribution de probabilité. Pour chaque conduite, le nombre moyen de bris et la fonction coût de réparation des bris utilisés dépendent du nombre de bris enregistrés par cette même conduite ; il est donc facile de distinguer entre une conduite qui a enregistré, par exemple, un seul bris et celle qui a enregistré une dizaine de bris.
2. Au lieu d'utiliser la méthode du maximum de vraisemblance pour l'estimation des paramètres du modèle de bris, une approche bayésienne est développée. Cette approche permet de passer d'une distribution *a priori* sur les paramètres à une nouvelle distribution *a posteriori* qui intègre toutes les informations apportées par les observations.
3. Au lieu de travailler avec une seule longue période d'analyse de 20 ou 30 ans, on a préféré utiliser une stratégie qui subdivise la période d'analyse en plusieurs phases de courtes durées (cinq ans). Cette subdivision permet de tenir compte des modifications qui peuvent avoir lieu au cours du temps et permet ainsi de se rapprocher de la réalité. La stratégie de validation proposée permet l'identification des conduites et des temps de remplacement, sur chaque phase. Ensuite, les processus de mise à jour de l'information et d'actualisation du nombre de bris, à chaque phase, permettent d'évaluer la performance à long terme de la stratégie de remplacement proposée.
4. Choix des AG et nature des AG utilisés : nous utilisons les AG car cette technique permet de tenir compte des réseaux de grande dimension alors que la programmation dynamique utilisée par Kleiner *et al.* (1998a,b) est limitée à des réseaux de moins de 20 conduites. Par rapport à l'étude de Dandy et Engelhardt (2001) qui ont utilisé un AG avec une seule population, nous utilisons un AG avec *deme* dans l'approche monoobjectif car ce type d'algorithme permet une recherche de la meilleure solution

(pour la fonction objectif) dans différents espaces de recherches. Pour l'approche multiobjectif, l'algorithme recommandé (*NSGA-II*), basé sur une approche élitiste, ne nécessite aucun paramètre de réglage. Cette seconde approche a pour avantage de produire un ensemble de solutions non dominées en un seul essai, à chaque phase, et permet de tester différentes stratégies de remplacement.

1.2 Organisation de la thèse

Cette thèse est organisée en 11 chapitres. Une revue de littérature des travaux reliés à la problématique de la réhabilitation/remplacement des conduites dans les réseaux de distribution est présentée au chapitre 2. Les méthodes de réhabilitation et de remplacement des conduites y sont décrites de même que quelques modèles d'estimation des coûts. La suite de la revue est consacrée aux différentes stratégies de réhabilitation/remplacement dans les réseaux de distribution d'eau. Les modèles de bris développés pour estimer l'évolution du nombre de bris sur les conduites sont décrits, puis certaines stratégies de réhabilitation/remplacement sont présentées. Les différents critères utilisés pour optimiser l'état d'un réseau sont identifiés et les différentes techniques d'optimisation utilisées pour résoudre le problème sont citées. La dernière section résume les applications des AG dans divers problèmes de dimensionnement et de réhabilitation/remplacement dans les réseaux de distribution.

Au chapitre 3, les éléments principaux de la modélisation des probabilités d'occurrence des bris sont présentés. Les notions de base des fonctions et des distributions statistiques sont décrites, puis le modèle de bris utilisé dans le cadre de cette étude est montré en détail. Le cas particulier d'un modèle de bris linéaire est traité en dernier lieu.

Au chapitre 4, la méthodologie proposée, basée sur l'approche bayésienne qui permet d'estimer les paramètres du modèle de bris, est élaborée. On résume d'abord le principe de la théorie bayésienne puis on développe la méthodologie d'estimation des paramètres. Notons que cette méthodologie est assez générale pour être applicable à tout modèle de bris.

On présente au chapitre 5 les principaux résultats de l'estimation des paramètres du modèle de bris avec l'approche bayésienne. La validation de la méthodologie est effectuée en comparant les paramètres estimés aux paramètres d'origine du modèle de bris ayant servi à générer les historiques de bris synthétiques.

Le chapitre 6 rappelle des notions essentielles sur les écoulements dans les réseaux de distribution d'eau potable et présente les modèles utilisés pour modéliser la variation temporelle du coefficient de Hazen-Williams dans une conduite.

Le chapitre 7 est consacré aux AG. Le principe du fonctionnement d'un AG standard est d'abord présenté puis les principales caractéristiques de l'AG en îlots (avec demes) implanté dans le *Framework OpenBeagle* sont présentées. La dernière partie est consacrée à l'optimisation multiobjectif; les algorithmes basés sur le principe Pareto (le *NPGA 2* et le *NSGA-II*) y sont exposés en détail.

Au chapitre 8, la stratégie de planification des interventions est exposée en détail. Bien que le nettoyage et le revêtement des vieilles conduites améliorent grandement la capacité de transport des conduites, ces deux options ne sont pas prises en considération dans le cadre de cette étude. Le remplacement des conduites est la seule option d'intervention envisageable dans le modèle développé. Le remplacement d'une conduite a pour conséquence d'améliorer à la fois la qualité structurale et la capacité de transport. La fonction objectif et les contraintes sont également identifiées au chapitre 8. La dernière partie de ce

chapitre est consacrée à la formulation, avec un AG, du problème de minimisation des coûts.

Au chapitre 9, les principaux résultats de l'application de la stratégie de planification des interventions à deux réseaux hypothétiques de 100 et de 250 conduites sont présentés. La première partie de ce chapitre est consacrée à l'optimisation en ne considérant que l'aspect structural des conduites. Une analyse des résultats par rapport aux paramètres de l'AG est d'abord effectuée, ensuite l'influence des distributions *a priori* des paramètres du modèle de bris sur les décisions de remplacement est présentée. La seconde partie présente les résultats de l'application de la stratégie de planification des interventions qui considère à la fois les aspects structural et hydraulique.

Au chapitre 10, on adopte une approche multiobjectif pour résoudre le problème d'optimisation. Un ensemble de solutions Pareto optimales variées et satisfaisantes est généré sur chaque phase, puis une solution est choisie et appliquée. Le choix de la solution va dépendre de la stratégie sélectionnée. L'objectif de ce chapitre est de tester différentes stratégies de remplacement.

Enfin, la conclusion générale rappelle les objectifs initiaux de la thèse et reprend brièvement les différentes étapes : méthodologie et résultats. Les contributions originales y sont également exposées. Quelques pistes pour des recherches futures sont finalement proposées.

Cinq annexes sont présentées afin d'alléger le texte de cette thèse. Quelques figures du chapitre 5 sont réunies à l'Annexe A. Les Annexes B et C présentent respectivement les principales données et les résultats du dimensionnement avec un AG de deux réseaux de distribution (d'Alperovits et Shamir, 1977 et de Hanoi (Fujiwara et Khang, 1990)). L'objectif de ces applications est de tester l'AG implanté dans le « *Framework OpenBeagle* ». L'Appendice D montre les

principales données des deux réseaux hypothétiques utilisés aux chapitres 9 et 10 et l'Annexe E regroupe quelques figures du chapitre 9.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

Cette revue de littérature s'intéresse aux différentes stratégies de réhabilitation et/ou de remplacement des conduites des réseaux de distribution. Le développement d'un modèle pour la planification de la réhabilitation (et/ou) du remplacement nécessite d'abord l'identification d'un modèle d'estimation des probabilités d'occurrence des bris, essentiel pour décrire l'évolution de la détérioration structurale des conduites d'un réseau. Le développement d'un tel modèle permet d'estimer les coûts futurs associés à la réparation des bris. La combinaison de ces coûts avec les coûts de réhabilitation/remplacement des conduites permet d'estimer un temps et un coût optimal pour procéder au remplacement/réhabilitation des conduites.

On retrouve dans la littérature plusieurs stratégies de réhabilitation/remplacement, le problème étant abordé à l'échelle d'une seule conduite ou à l'échelle d'un réseau. Chacune de ces stratégies utilise un ou plusieurs critère(s) et emploie une technique d'optimisation bien spécifique pour trouver une solution au problème de la réhabilitation/remplacement (par exemple : programmation dynamique, algorithme génétique, algorithme génétique multiobjectif).

Afin de présenter un résumé des différentes stratégies de réhabilitation/remplacement répertoriées dans la littérature, cette revue de littérature est subdivisée en cinq parties. On commence par définir et identifier à la section 2.1 les différentes techniques de réhabilitation et de remplacement des conduites. Certains modèles d'estimation des coûts pour le remplacement/réhabilitation d'une conduite et la réparation d'un bris sont présentés à la section 2.2. On présente ensuite à la section 2.3 un résumé des différents modèles d'estimation de l'évolution du nombre de bris de conduites en réseau. La section 2.4 identifie différentes stratégies de

réhabilitation/remplacement ainsi que les critères proposés par les différents auteurs. On discute ensuite des travaux récents utilisant des méthodes d'optimisation telles que les AG dans le cadre de la problématique du dimensionnement ou de la réhabilitation/remplacement des réseaux de distribution.

La dernière section (2.5) est consacrée à l'identification des principaux travaux utilisant les AG multiobjectifs, soit pour le dimensionnement des réseaux, soit pour la réhabilitation/remplacement des réseaux.

2.1 Techniques de réhabilitation et de remplacement des conduites

Plusieurs publications scientifiques ont déjà présenté les différentes techniques de réhabilitation et de remplacement des conduites d'eau et/ou d'assainissement (*CERIU*, 1997; Engelhardt *et al.*, 2000; Selvakumar *et al.*, 2002; Zhao et Rajani, 2002). On trouve principalement deux techniques qui permettent d'améliorer l'état des conduites d'un réseau de distribution : la réhabilitation et le remplacement.

- 1) La réhabilitation permet de prolonger la durée de vie d'une conduite défectueuse en améliorant son état fonctionnel. Elle nécessite d'abord un nettoyage de la conduite afin d'éliminer les dépôts des parois intérieures comme les croûtes et les incrustations. Un revêtement est ensuite appliqué après le nettoyage. Plusieurs techniques de réhabilitation existent, on citera les plus connues : le chemisage (*Cured In Place Pipe, CIPP*), le tubage (*Sliplining*) et l'intervention ponctuelle (*Spot repair*).

Le chemisage consiste à rénover ou à renforcer une conduite par installation d'une gaine souple, imprégnée d'une résine, à l'intérieur de la conduite existante.

Le tubage consiste à insérer une conduite à l'intérieur de la conduite existante. L'intervention ponctuelle est utilisée lorsque la conduite est en bon état sauf en certains endroits qui nécessitent des réparations ponctuelles. Les réparations s'effectuent avec des manchons rigides ou avec des gaines souples.

2) Le remplacement consiste à installer une nouvelle conduite en lieu et place de l'ancienne. Le remplacement de conduites peut s'effectuer soit en tranchée ouverte ou à l'aide d'une technique sans tranchée. Les techniques sans tranchée permettent de réduire l'étendue des excavations en surface. Elles ont aussi l'avantage de ne pas perturber le trafic routier et les commerces avoisinants. Plusieurs techniques de remplacement sans tranchée existent, on citera : l'éclatement (*pipe bursting*), le forage dirigé (*directional drilling*) et le microtunnelier (*microtunneling*). Chaque technique a un domaine d'application et des limites d'utilisation (CERIU, 1997) :

- L'éclatement permet de remplacer une conduite par une nouvelle de diamètre équivalent ou supérieur selon le même profil et le même alignement. Cette technique consiste à introduire dans la conduite à remplacer un outil éclateur guidé ou tiré par un câble ou une tige sous tension. L'outil progresse dans la conduite en la brisant et en repoussant les fragments dans le sol environnant. La nouvelle conduite est tirée simultanément dans l'espace créé par l'outil éclateur. Une fois l'opération effectuée, on procède aux raccordements appropriés. Ce procédé est applicable pour des conduites dont le diamètre varie entre 75 et 750 mm.
- Le forage dirigé est utilisé dans des situations de contournement d'obstacles (comme les rivières) ou de protection des aménagements existants tels les chemins de fer, les autoroutes, etc. Le procédé est réalisé en deux étapes. La première étape consiste à forer un trou pilote à

l'aide d'une tête foreuse. Cette dernière est poussée par des tiges d'acier introduites dans le sol par un système de vérins hydrauliques. Un manchon de guidage installé à l'arrière de la tête de forage permet de contrôler la direction du forage jusqu'au point d'arrivée. La deuxième étape consiste à agrandir le trou pilote pour permettre l'insertion de la nouvelle conduite. La tête foreuse est remplacée par un alésoir. Les conduites utilisées sont en PEHD (polyéthylène haute densité) ou en acier. Le diamètre de conduite peut aller jusqu'à 1 200 mm.

- Le microtunnelier est une technique utilisée pour installer une conduite par le biais d'un forage dans le sol avec de petites tolérances pour l'alignement et la pente. À partir d'un puits d'accès, une pression est appliquée sur le microtunnelier (appareil de forage) à l'aide d'un vérin. Lorsque le microtunnelier s'est avancé suffisamment dans le sol, le vérin est retiré et la conduite est insérée à l'arrière de l'appareil. Le vérin applique de nouveau une poussée, cette fois sur la conduite qui avance ainsi avec le microtunnelier. Ce processus est répété jusqu'à l'arrivée de l'appareil dans le puits de réception. Cette technique est souvent utilisée en milieu urbain dense, dans des zones ayant des contraintes environnementales très élevées, ainsi qu'à des profondeurs de plus de 5 m.

2.2 Coûts de remplacement/réhabilitation d'une conduite et de réparation des bris

Plusieurs auteurs se sont déjà penchés sur cette question. Citons par exemple : Selvakumar *et al.*, (2002), Clark *et al.*, (2002), Zhao et Rajani, (2002). Ces auteurs ont présenté des ordres de grandeur pour estimer les coûts et qui peuvent être utiles lorsqu'on veut évaluer un budget approximatif pour la réhabilitation et le remplacement des conduites d'un réseau. Ces coûts ont été obtenus après consultation du personnel ayant une certaine expérience dans la

réhabilitation, des fabricants, des entrepreneurs, ou suite à la compilation d'articles et de résumés de conférences.

Les coûts de la réhabilitation et du remplacement dépendent de différents facteurs tels que le diamètre, la longueur, le matériau de la conduite utilisé, l'accès à la conduite, le nettoyage avant l'application d'un revêtement interne dans le cas de la réhabilitation, l'excavation des trous pour l'insertion et la réception, le coût pour enlever et remplacer le pavage, l'enlèvement et le remplacement des vannes existantes, les bouches d'incendies et d'autres organes de connexion, etc.

Selvakumar *et al.*, (2002) ont compilé les données du Tableau 2.1 qui donne des exemples de coûts selon différentes techniques. Ces coûts ne tiennent compte que du coût de base de la technologie de réhabilitation ou de remplacement. Pour estimer le coût total, les coûts de plusieurs autres éléments doivent être ajoutés. Ces éléments peuvent être : l'enlèvement et le remplacement des vannes existantes, les bornes d'incendie, le contrôle du trafic, etc.

Tableau 2.1 Coûts selon les différentes techniques de réhabilitation ou de remplacement (Selvakumar *et al.*, 2002)

Technique		Diamètre (po)	Matériau utilisé	Coût (\$/po de diamètre/pi de longueur)
Réhabilitation	Mortier de ciment	4-60	Ciment-sable	1-3
	Résine Époxy	4-12	Résine d'Époxy	9-15(*)
	Tubage	4-108	PEHD,PVC,fibre de verre	4-6
	Chemisage	6-54	Résine de polyester	6-14
Remplacement	Éclatement	4-36	PEHD,PVC,fonte ductile	7-9
	Microtunnelier	12-144	PEHD,PVC, fibre de verre	17-24
	Forage dirigé	2-60	PEHD,PVC, acier, cuivre, fonte ductile et grise	10-25

\$: Dollar Américain; * : \$/pieds; po : pouce

D'après Clark *et al.* (2002), il y a différentes façons d'estimer les coûts selon le niveau de précision que l'on cherche à obtenir. On peut chercher :

- Un ordre de grandeur : cette estimation est assez rapide et très approximative. Elle peut être très utile si l'on cherche une estimation grossière.
- Une estimation pour une étude : les différentes méthodes et technologies utilisées peuvent être précisées.
- Une estimation préliminaire : chaque élément doit être évalué individuellement.
- Une estimation définitive : cette méthode nécessite des informations détaillées et tient compte de l'aspect design, c'est la méthode qui nécessite le plus de préparation.
- Une estimation détaillée : cette méthode doit spécifier tous les détails ainsi que le schéma d'exécution. Le but est de contrôler le coût du projet à construire et cette méthode est applicable à une installation bien spécifique.

Clark *et al.* (2002) ont donc présenté une méthode d'estimation qui permet une précision se situant entre le deuxième et le troisième niveau présenté ci-haut. Leur modèle prend en considération le coût de base pour l'achat et l'installation de la conduite et les coûts des différents éléments qui peuvent s'ajouter au coût de base. Par exemple, les coûts des opérations suivantes peuvent être inclus : creusement, compactage, remblayage, déblayage, vannes, raccords, prises d'eau, forage, contrôle de la circulation, etc. Plusieurs matériaux ont été considérés dans l'étude : fonte ductile, amiante ciment, PVC, avec revêtement en mortier de ciment, acier, béton et béton précontraint.

Une fonction coût pour chaque composante particulière (y), a été définie comme suit :

$$y = a + b x^c + d u^e + f x u \quad (2.1)$$

où :

y : coût d'une composante particulière en \$ US/pi;

x : paramètre de design (par exemple le diamètre en pouces);

u : variable utilisée par exemple pour montrer la différence de coût entre deux conduites de même diamètre mais avec des épaisseurs de paroi différentes ;

a, b, c, d, e et f : paramètres du modèle de régression.

Le Tableau 2.2 donne un exemple de la fonction coût en relation avec le diamètre utilisée pour estimer le coût de base pour l'installation de conduites de différents matériaux. Les conduites en fonte ductile ont différentes classes d'épaisseur et la plupart des conduites utilisées dans les systèmes de distribution en eau appartiennent à la classe 50 ou 52. Pour les conduites en amiante ciment et le PVC, la classe de pression prend la valeur de 150 et 200 (Clark *et al.*, 2002).

Tableau 2.2 Paramètres de la régression pour l'estimation du coût de base (Clark *et al.*, 2002)

Type de la conduite	Diamètre de la conduite cm (po)	Valeurs des paramètres						N*
		a	b	c	d	e	f	
Fonte ductile	10,16-91,44 (4-36) ^{a,b}	-44,0	0,33	1,72	2,87	0,74	0,0	24
	10,16-60,96 (4-24) ^{c,b}	-36,0	0,62	1,54	2,04	0,78	0,0	20
Amiante ciment	10,16-60,96 (4-24) ^d	2,6	0,0052	2,86	-0,0001	1,56	0,0048	19
PVC	10,16-30,48 (4-12) ^d	-1,0	0,0008	3,59	0,011	1,00	0,0067	10
Revêtement mortier ciment et acier revêtu	30,48-106,68 (12-42)	14,2	0,19	1,66	0,0	0,0	0,0	9
Béton	30,48-137,16 (12-54)	11,7	0,51	1,38	0,0	0,0	0,0	10
Béton précontraint	152,4-365,76 (60-144)	7,9	1,30	1,25	0,0	0,0	0,0	7

N* : nombre de points utilisés pour la régression; a : joint automatique; b : variable u (50 et 52); c : joint mécanique; d : variable u (150 et 200).

Zhao et Rajani (2002) ont présenté un rapport donnant les coûts des différentes techniques sans tranchée et en tranchée ouverte, pour les conduites d'égout et d'eau potable. Ces coûts ont été obtenus de contrats et de données rapportés aux États-Unis et au Canada. Le Tableau 2.3 donne un exemple du coût pour différentes techniques. Le coût est exprimé en dollars par millimètre de diamètre par mètre linéaire (\$/mm/m) et les coûts moyens en dollars par mètre linéaire (\$/m) pour quatre catégories de diamètres. Il s'avère que les coûts des méthodes

sans tranchée augmentent lorsque le diamètre des conduites augmente compte tenu de la plus grande complexité des travaux. Le coût le plus onéreux est celui de la méthode du microtunnelier (9,52 \$/mm/m) (Zhao et Rajani, 2002).

Tableau 2.3 Coûts moyens des techniques de réhabilitation et de remplacement (Zhao et Rajani, 2002)

Technique	Coût moyen (\$/mm diamètre / m longueur)	Catégories de diamètres (mm)				N*
		Petit (≤ 300) (\$/m)	Moyen (330-940) (\$/m)	Grand (960-1830) (\$/m)	Très grand (> 1830) (\$/m)	
Microtunnelier	9,52	2 614	4 770	15 399	46 898	51
Chemisage	1,38	299	531	2 654	-	39
Forage dirigé	2,97	265	1 791	6 239	-	10
Tubage	1,38	231	988	2 441	2 567	16
Éclatement	2,20	726	1 165	-	-	11
Tranchée ouverte	3,85	609	2 314	2 225	-	14

N* : Nombre de données utilisées

\$: Dollar canadien

Shamir et Howard (1979) ont utilisé un coût de remplacement de 50 \$US/pi et un coût de réparation de 1 000 \$US/bris, en indiquant que les coûts de réparation varient entre 500 et 2 000 \$US/bris et les coûts de remplacement varient entre 10 et 150 \$/pi, sans que ces auteurs n'aient précisé les diamètres des conduites correspondants. Puisque l'étude de Shamir et Howard (1979) ne donnait aucune indication sur les diamètres des conduites, Walski et Pelliccia (1982) ont amélioré l'estimation des coûts unitaires de réparation des bris en développant une équation qui inclut les éléments suivants :

- Le coût de la main-d'œuvre estimé en (\$/heure), le nombre d'heures dépendant de plusieurs facteurs dont le diamètre de la conduite.
- Le coût de l'équipement pour l'excavation qui varie très peu avec la dimension de la conduite.
- Le coût des gaines qui est fonction de leur longueur et épaisseur ainsi que du diamètre de la conduite.
- Le coût du repavage, basé sur un coût unitaire, exprimé en $\$/m^2$.

- Un coût additionnel de 20 % pour couvrir la supervision et les aléas peut être ajouté.
- Les coûts indirects peuvent inclure les pertes occasionnées par les interruptions de service et l'excavation des rues, les pertes d'eau par fuites, les pertes de pression pour la protection incendie durant un bris, une possible contamination de l'eau durant les réparations. Ces coûts s'ajoutent aux coûts de réparation mais sont difficilement quantifiables.
- Les coûts des dommages et des plaintes, dont la prise en compte se fait en majorant ces coûts par un coefficient multiplicatif reflétant le degré d'importance de ces coûts.

Chevalier (1996) a estimé dans son étude que le coût moyen de réparation d'un bris de conduite est de 3 159 \$/bris, tout diamètre confondu. Ce chiffre a été obtenu en considérant le coût total pour la réparation de 878 bris, sur une période allant de 1990 à 1995, dans la municipalité de Gatineau.

On peut constater que, tout comme pour le remplacement des conduites, le coût de réparation dépend de plusieurs facteurs : la position et l'importance du bris, la durée des réparations ainsi que de la dimension de la conduite. Le Tableau 2.4 présente certaines valeurs du coût moyen de réparation trouvées dans la littérature en fonction du diamètre des conduites. Le Tableau 2.4 montre qu'il y a une grande différence entre les coûts qui pourrait être due à l'année d'évaluation du coût ou à la différence d'estimation du coût entre les différents pays.

Tableau 2.4 Coûts moyens de réparation des bris en fonction du diamètre

Diamètre (mm)	Walski (1987) (\$ US)	Halhal <i>et al.</i> (1999a) Non précisé	Dandy et Engelhardt (2001) (\$ Australien)
100	-	4 500	1 575
150	6 000	6 000	1 800
200	6 000	-	2 270
250	8 000	-	2 700
300	8 000	15 000	2 800
400	10 000	-	4 225

2.3 Méthodes d'estimation de l'évolution du nombre de bris de conduites en réseau

Plusieurs facteurs peuvent avoir une incidence sur l'apparition des bris. Clark *et al.* (1982) en ont identifié quatre : 1) la qualité et l'âge de la conduite en incluant les éléments connexes (vannes, etc.); 2) l'environnement dans lequel se trouve la conduite comme la nature du sol, le gel et les charges extérieures; 3) les techniques utilisées lors de la pose de la conduite et 4) les conditions d'opération telles que la pression et les coups de bélier.

Plusieurs revues de littérature ont déjà été consacrées à ce sujet : Elnaboulsi et Alexandre (1996); Pelletier (2000); Kleiner et Rajani (2001); Rajani et Kleiner (2001). En général, deux catégories de modèle sont utilisées pour conceptualiser la détérioration des conduites. Les modèles de la première catégorie tentent de lier l'apparition des bris aux mécanismes de détérioration tels que la corrosion des parois. Ces modèles sont considérés comme étant plus robustes, leur utilisation est cependant limitée par le nombre de données disponibles. La seconde catégorie regroupe les modèles qui assimilent l'apparition des bris à un processus stochastique. Ces modèles sont les plus fréquemment utilisés car ils sont mieux adaptés aux données actuellement disponibles. Kleiner et Rajani (2001) et Rajani et Kleiner (2001) ont présenté respectivement deux revues

assez complètes de ces deux catégories de modèles développés durant les vingt dernières années. Chaque modèle a été présenté avec l'ensemble des équations le décrivant, une analyse de ses forces et faiblesses et l'identification du type de données nécessaire à son implantation.

Les modèles statistiques sont classés, en général, selon trois groupes (Andreou *et al.*, 1987a; Elnaboulsi et Alexandre, 1996) : les modèles agrégés, les modèles de régression et les modèles probabilistes.

2.3.1 Modèles agrégés

Ces modèles permettent de prédire, pour des conduites de caractéristiques homogènes, le taux de bris (le nombre de bris, par unité de temps, par unité de longueur) en fonction du temps. Plusieurs facteurs opérationnels ou environnementaux permettent de rassembler les conduites par groupes homogènes : le matériau, la période d'installation, les conditions d'opération, les pressions, etc. Ces modèles sont assez simples à utiliser et nécessitent relativement peu de données en comparaison aux autres types de modèle. Les modèles de Shamir et Howard (1979) et de Walski et Pelliccia (1982) sont les plus souvent cités. Des équations exponentielles ou linéaires sont utilisées pour décrire l'évolution du nombre de bris moyen par unité de longueur en fonction du temps. Ces équations s'écrivent :

$$N(t) = N(t_0) \exp[A(t-t_0)] \quad (2.2)$$

$$N(t) = N(t_0) + A(t-t_0) \quad (2.3)$$

où :

t : temps en année;

t_0 : année de base pour l'analyse (année d'installation de la conduite ou la première année pour laquelle les données sont disponibles);

$N(t)$: nombre moyen de bris par unité de longueur, pour l'année t ;

A : coefficient de croissance du taux de bris (1/an) (ce coefficient varie entre 0,01 et 0,15 d'après Shamir et Howard (1979)).

2.3.2 Modèles de régression

Les modèles de régression permettent de prédire le nombre moyen de bris depuis le premier bris ou le temps entre l'année d'installation et l'année d'apparition du premier bris, en établissant des relations avec des variables indépendantes qui ont une influence sur l'occurrence des bris. Ce type de modèle nécessite un grand nombre de données par rapport aux modèles agrégés, ce qui peut limiter leur applicabilité. À titre d'exemple, le modèle de Clark *et al.* (1982) repose principalement sur deux équations : la première (linéaire) estime l'âge de la conduite lorsqu'elle subit son premier bris, et la seconde (exponentielle) détermine le nombre de bris attendu après l'occurrence du premier bris. Ces équations s'écrivent :

$$NY = 4,13 + 0,338 D - 0,022 P - 0,2651 I - 0,0983 RES - 0,0003 LH + 13,28 T \quad (2.4)$$

où :

NY : nombre d'années entre l'année d'installation de la conduite et l'année d'apparition du premier bris;

D : diamètre de la conduite (pouces);

P : pression absolue à l'intérieur de la conduite (livres/pouces²);

I : pourcentage de linéaire de conduite en zone industrielle;

RES : pourcentage de linéaire de conduite en zone résidentielle;

LH : longueur de la conduite en contact avec un sol corrosif;

T : type de la conduite (1 = métallique ; 0 = béton).

$$REP = (0,1721) (e^{0,7197})^T (e^{0,0044})^{PRD} (e^{0,0865})^A (e^{0,0121})^{DEV} (SL)^{0,014} (SH)^{0,069} \quad (2.5)$$

où :

REP : nombre de bris;

T : type de la conduite, (1 = métallique ; 0 = béton);

PRD : pression différentielle (livres/pouces²);

A : durée depuis le premier bris;

DEV : pourcentage de linéaire, en sol faiblement et modérément corrosif;

SL : surface de la conduite en contact avec un sol faiblement corrosif;

SH : surface de la conduite en contact avec un sol hautement corrosif.

À noter que les valeurs de R^2 obtenues par Clark *et al.* (1982) sont de l'ordre de 0,23 pour l'équation 2.4 et 0,47 pour l'équation 2.5.

2.3.3 Modèles probabilistes

Les modèles probabilistes sont utilisés dans le cadre de cette thèse. Ces modèles permettent d'estimer la probabilité qu'un bris se produise à un temps donné et/ou la probabilité qu'une conduite entre dans un état de détérioration particulier (par exemple un stade de détérioration sévère avec plusieurs bris (Andreou *et al.*, 1987a). Les modèles probabilistes les plus souvent cités sont basés sur l'analyse de survie qui est une technique statistique de modélisation des temps de survie (Andreou *et al.*, 1987a et b; Herz, 1996; Lei et Saegrov, 1998; Eisenbeis *et al.*, 1999; Gustafson et Clancy, 1999a; Mailhot *et al.*, 2000).

Dans le cas des conduites, les variables statistiques à modéliser sont les intervalles de temps entre l'installation et le premier bris, puis entre les bris subséquents, et enfin entre le dernier bris et le temps d'analyse des conduites. L'avantage majeur de l'analyse de survie est qu'elle permet d'intégrer la période entre le dernier bris et le temps d'analyse.

Dans les modèles probabilistes, les temps entre les bris successifs (entre l'année d'installation et le premier bris puis entre les bris subséquents) sont des variables

aléatoires décrites par des fonctions de distribution. Différentes distributions peuvent être considérées selon les données utilisées par les auteurs.

Andreou *et al.* (1987a) ont montré qu'il existait deux stades de détérioration pour une conduite, un premier stade où les bris sont peu fréquents (pas plus de trois bris avec les données des conduites testées) et un second stade où les conduites enregistrent fréquemment des bris. Dans le premier stade de détérioration, le temps entre les bris est plutôt long (plusieurs années). Puisque le taux de bris est toujours faible durant ce stade, la mesure de la probabilité de subir un bris est utile pour l'évaluation de la fiabilité plutôt que pour une étude économique (réparer *versus* remplacer une conduite). Les auteurs ont utilisé le modèle de risques proportionnels développé par Cox pour modéliser le premier stade de détérioration. Ce modèle est défini par une fonction de risque de base dépendante du temps $h_0(t)$, multipliée par un facteur qui inclut l'ensemble des paramètres susceptibles d'affecter la fréquence de bris :

$$h(t; \bar{z}) = h_0(t) \exp(\bar{z} \cdot \bar{\beta}) \quad (2.6)$$

où :

\bar{z} : vecteur des covariables (exemple : longueur, diamètre, matériau, période d'installation, etc.);

$\bar{\beta}$: vecteur des coefficients de calage associés aux variables \bar{z} ;

$h(t; \bar{z})$: fonction de risque qui représente le taux de bris instantané à l'instant t (probabilité d'avoir un bris au temps $t + \Delta t$) et qui dépend du vecteur \bar{z} ;

$h_0(t)$: fonction de risque de base arbitraire dépendante du temps.

Le second stade de détérioration a été modélisé par une distribution de Poisson :

$$P(n) = \frac{(\kappa t)^n \exp(-\kappa t)}{n!} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.7)$$

où :

$P(n)$: probabilité d'avoir n bris pendant une période de temps t ;

κ : taux de bris ($[T]^{-1}$).

Eisenbeis (1994) a noté des comportements différents pour l'occurrence des premiers bris et des bris suivants ; il a donc subdivisé les bris en trois groupes et a associé une distribution ou un groupe de paramètres différents à chacun de ces groupes. Un premier groupe qui ne comprend que le premier bris, un second groupe qui inclut les deuxième, troisième et quatrième bris, et le troisième groupe qui inclut tous les bris d'ordre supérieur ou égal à cinq.

Gustafson et Clancy (1999a) ont analysé les données des conduites principales en fonte de la ville de Saskatoon et ont utilisé les distributions Gamma généralisée et l'exponentielle. Mailhot *et al.* (2000) ont développé une méthodologie basée sur l'analyse de survie pour modéliser la détérioration structurale des conduites de la municipalité de Chicoutimi (Québec), ayant un court historique de bris. Le nombre annuel de bris enregistré sur les conduites est considéré comme l'indicateur de l'état structural du réseau. Les données relatives aux bris de conduites ont été séparées en deux strates qui ont été modélisées séparément : les premiers bris et les bris subséquents. Deux types de fonction de distribution de probabilité ont été considérés pour modéliser le temps entre les bris, la distribution de Weibull et la distribution exponentielle. Ces deux distributions ont été appliquées à différents ordres de bris. Le Tableau 2.5 résume les distributions considérées pour les différents ordres de bris selon les différents auteurs.

Tableau 2.5 Distributions utilisées pour chaque ordre de bris selon différents auteurs

Auteurs	Ordre de bris				
	1 ^{er}	2 ^e	3 ^e	4 ^e	5 ^e et plus
Eisenbeis (1994)	Weibull	Weibull	Weibull	Weibull	Exponentielle
Gustafson et Clancy (1999a)	Gamma	Exponentielle	Exponentielle	Exponentielle	Exponentielle
Mailhot <i>et al.</i> (2000)	Weibull	Exponentielle	Exponentielle	Exponentielle	Exponentielle

Herz (1996) a développé un modèle s'inspirant des modèles démographiques. Ce modèle considère la durée de vie d'une conduite comme une variable aléatoire. L'auteur a défini sa propre fonction de survie dépendante de trois paramètres. Ce modèle doit être appliqué à un groupe homogène de conduites. L'inconvénient de ce modèle est qu'il ne calcule pas la probabilité de défaillance pour chaque conduite et ne permet pas de sélectionner quelle serait la conduite prioritaire pour la réhabilitation dans le cas d'une étude économique (Kleiner et Rajani, 2001).

Pour estimer les paramètres des modèles de bris, la méthode du maximum de vraisemblance (ou le logarithme de la vraisemblance) est couramment utilisée (Lei et Seagrov, 1998 ; Le Gat and Eisenbeis, 2000 ; Mailhot *et al.*, 2000).

2.4 Stratégies de réhabilitation/remplacement

Dans cette section, on distingue les stratégies de réhabilitation/remplacement des réseaux de distribution basées uniquement sur des indicateurs de l'état structural des conduites (section 2.4.1) et celles qui intègrent à la fois les aspects structural et hydraulique (section 2.4.2). La troisième partie (section 2.4.3) est consacrée aux AG souvent utilisés pour optimiser les stratégies de remplacement/réhabilitation des systèmes de distribution.

2.4.1 Stratégies basées uniquement sur l'état structural des conduites

Effectués à l'échelle d'une seule conduite, les premiers travaux utilisaient un critère coût pour décider si une conduite devait être remplacée ou s'il fallait différer son remplacement. Shamir et Howard (1979) ont été parmi les premiers à présenter une méthode pour déterminer le temps optimal de remplacement d'une conduite. Leur analyse implique l'estimation du :

- nombre moyen de bris que subira la conduite dans les années futures
- nombre de bris de la nouvelle conduite installée en fonction de sa date d'installation
- coût de réparation d'un bris
- coût de remplacement de la conduite existante
- taux d'actualisation

L'équation suivante présente pour une conduite le coût total actualisé au temps présent pour la réparation des bris et pour le remplacement :

$$C_T(t_r) = \sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{C_m(t)}{(1+r)^{t-t_p}} + \frac{C_r}{(1+r)^{t_r-t_p}} \quad (2.8)$$

où :

t_r : temps de remplacement en années;

t_p : temps présent en années;

r : taux d'actualisation;

C_r : coût de remplacement par unité de longueur de conduite;

$C_m(t)$: coût de réparation des bris. Ce dernier est estimé à l'aide de l'équation suivante :

$$C_m(t) = C_b N(t_0) \exp[A(t - t_0)] \quad (2.9)$$

où :

C_b : coût de réparation d'un bris;

t_0 : année de base pour l'analyse (année d'installation de la conduite ou la première année de disponibilité des données).

La minimisation de la somme des coûts de réparation des bris futurs et du coût de remplacement de la conduite, $C_r(t_r)$, conduit à l'évaluation d'un temps optimal de remplacement, t_r^* , donné par l'équation suivante :

$$t_r^* = t_0 + \frac{1}{A} \log \left[\frac{\log(1+r) C_r}{N(t_0) C_b} \right] \quad (2.10)$$

Shamir et Howard (1979) ont également déterminé le temps optimal de remplacement, en supposant que l'évolution temporelle du nombre moyen de bris est décrit par une équation linéaire telle que définie à l'équation (2.3). Dans ce cas, le temps optimal est donné par l'équation suivante :

$$t_r^* = t_0 + \frac{\log(1+r) C_r}{A N(t_0) C_b} \quad (2.11)$$

Les équations précédentes du temps optimal de remplacement ne sont valides que pour le cas où la conduite de remplacement ne subirait pas de bris. Pour tenir compte des bris que subira inévitablement la nouvelle conduite, Shamir et Howard (1979) ont supposé une série de cycles de remplacement successifs de durée t_c (figure 2.1). Après le premier remplacement, une conduite est remplacée à toutes les t_c années. La valeur optimale de la durée de chaque cycle t_c^* est calculée en premier puis d'autres équations similaires aux précédentes sont déduites.

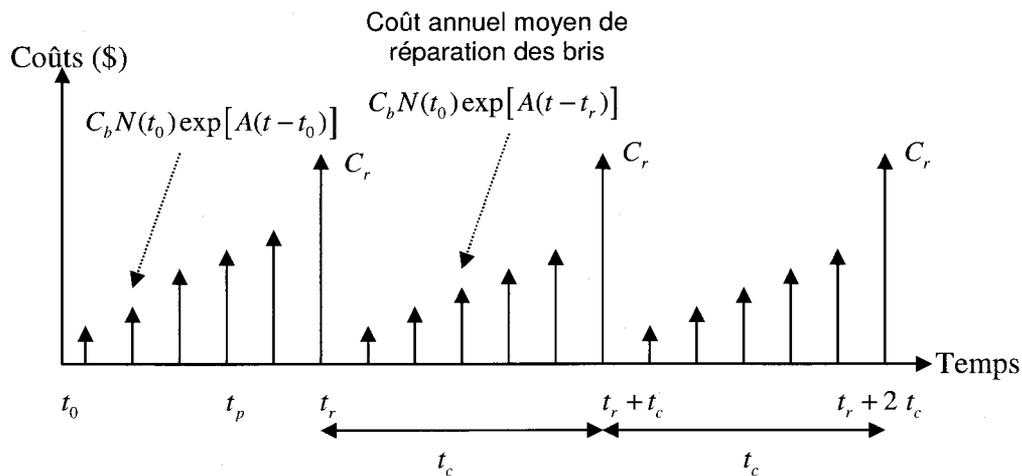


Figure 2.1 Cycle de remplacement successifs par une même conduite (Shamir et Howard, 1979)

Walski et Pelliccia (1982) ont présenté une méthode qui permettrait à un personnel technique de décider si une conduite doit être remplacée ou réparée, d'estimer les coûts vraisemblables de remplacement et les coûts de réparation. Pour l'évolution du nombre de bris, les auteurs ont proposé une équation exponentielle similaire à celle de Shamir et Howard (1979), mais ils y ont ajouté deux facteurs, c_1 et c_2 . Le premier facteur, c_1 , permet de différencier entre les conduites qui ont enregistré auparavant un nombre important de bris et celles qui en ont eu que très peu. Le second facteur, c_2 , tient compte du diamètre de la conduite. L'équation du nombre de bris moyen s'écrit :

$$N(t) = c_1 c_2 a \exp[b(t-k)] \quad (2.12)$$

où :

- a : coefficient de régression (bris/année/mille);
- b : coefficient de régression (1/année);
- k : année d'installation de la conduite (année).

Walski et Pelliccia (1982), reprenant l'analyse de Shamir et Howard (1979), obtiennent pour l'âge optimal de remplacement de la conduite :

$$t_r^* - k = \frac{1}{b} \log \left[\frac{5280 L C_r \log(1+r)}{C_b a c_1 c_2} \right] \quad (2.13)$$

où :

r : taux d'actualisation;

C_b : coût de réparation d'un bris (\$/bris);

C_r : coût de remplacement d'une conduite (\$/pi);

L : fraction de conduite à remplacer (rapport de la longueur remplacée sur la longueur totale du tronçon de conduite).

L'application de cette formule, à toutes les conduites du système avec $L=1$, a montré qu'il n'était pas nécessaire de remplacer des conduites malgré que certaines aient enregistré des bris antérieurs. Ceci était dû au paramètre de longueur qui était en général de l'ordre d'une centaine de mètres. En diminuant la fraction de longueur de la conduite à remplacer, l'âge optimal de remplacement pouvait diminuer. Comme les seules données disponibles étaient celles de longs segments (centaines de mètres), il n'était pas possible d'identifier l'âge optimal de remplacement des petits tronçons avec la formule précédente. Un taux de bris critique (J^*) a donc été introduit afin d'identifier les segments nécessitant des remplacements. Pour estimer ce taux, le principe suivant a été considéré : une conduite doit être remplacée si la valeur présente du coût de réparation des bris entre l'année courante j et l'année $j+m$ est supérieure au coût de remplacement. Si le taux de bris courant (J) d'une conduite est supérieur au taux critique ($J > J^*$), alors cette conduite sera remplacée. Le taux critique déduit est donné par :

$$J^* = \frac{5280 C_r L \log \left[\frac{\exp(b)}{1+r} \right]}{C_b \left[\left(\frac{\exp(b)}{1+r} \right)^m - 1 \right]} \quad (2.14)$$

où :

- J^* : taux de bris critique (bris/année/mille);
 L : fraction de conduite à remplacer;
 b : coefficient de régression (1/année);
 m : période d'analyse depuis la présente année (années).

Le taux de bris critique J^* est peu sensible à m car, avec les données utilisées par les auteurs, $\exp(b) < 1+r$, m peut donc prendre n'importe quelle grande valeur (> 50 ans par exemple).

Walski (1987) a amélioré les règles de remplacement des conduites déterminées par ses prédécesseurs en ajoutant à son analyse l'influence des fuites d'eau et des vannes inopérantes. Le principe est de comparer le coût de remplacement de la conduite avec la somme des coûts des bris, des pertes d'eau causées par les fuites, de détection des fuites et de réparation et de remplacement d'une vanne. Une conduite sera remplacée l'année T lorsque le coût de remplacement sera égal au coût de la maintenance et de la réparation. L'année optimale de remplacement est obtenue en résolvant l'équation suivante :

$$C_r = \frac{1}{5280r} [C_b J_0 \exp(b T) + C_w Q_0 \exp(a T) + C_d + C_v V_0 \exp(v T)] \quad (2.15)$$

où :

- T : année optimale de remplacement de la conduite (année);
 C_r : coût unitaire de remplacement de la conduite (\$/pi);
 C_b : coût unitaire de réparation d'un bris (\$/bris);
 J_0 : taux de bris durant l'année t_0 (bris/année/mille);
 b : taux annuel de croissance des bris (1/année);
 C_w : valeur de la perte d'eau (\$/million de gallons);
 Q_0 : taux de fuite durant l'année t_0 (million de gallons/mille/année);
 a : taux annuel de croissance des fuites (1/année);

- C_d : coût annuel de détection des fuites et de réparation (\$/année/mille)
- C_v : coût de remplacement d'une vanne (\$);
- V_0 : fréquence de bris pour les vannes durant l'année t_0
(nombre/année/mille);
- v : taux annuel de croissance de bris des vannes (1/année);
- r : taux d'intérêt (fraction).

Certaines simplifications (comme, par exemple, l'égalité des coefficients b , a et v), peuvent être examinées afin d'avoir une expression analytique de T . Toutefois, Walski a préféré utiliser une équation approximative indiquant un nombre de bris critique. Si le taux de bris de la conduite dépasse ce nombre, la décision prise est de remplacer cette conduite. Notons que les équations précédentes sont fonctions de plusieurs paramètres et les critères de décision issus de ces équations dépendent fortement de la qualité des paramètres utilisés.

Male *et al.* (1990) ont présenté plusieurs stratégies de remplacement des conduites principales de cinq quartiers de la ville de New-York, basées sur une procédure de simulation qui regroupe les conduites selon leur taux de détérioration. L'objectif de leur étude était d'identifier la meilleure stratégie de remplacement qui minimise la valeur présente des coûts associés aux bris. Il s'agit d'une stratégie de remplacement qui ne permet pas d'identifier un segment de conduite spécifique à remplacer, comme dans l'étude de Walski (1987). Le coût total englobe le coût de remplacement, fonction du diamètre de la conduite et du quartier, et le coût moyen de réparation supposé être constant pour toutes les conduites (8 600 \$/bris). Le coût moyen des réparations est basé sur le coût direct de réparation des bris, incluant le matériel et la main-d'œuvre pour l'excavation, la réparation de la conduite, le remblayage et le resurfaçage. Les coûts indirects, comme les dégâts causés par l'eau, le contrôle du trafic routier, etc., ne sont pas inclus dans ce coût mais sont introduits dans l'analyse

économique à travers un facteur de coût indirect. La stratégie de remplacement spécifie une condition critique, utilisée pour déterminer le pourcentage de conduites à remplacer dans un groupe donné. Cinq stratégies ont été analysées : 1) remplacement des conduites ayant enregistré un bris ou plus; 2) deux bris ou plus; 3) trois bris ou plus; 4) quatre bris ou plus et 5) ne rien faire. L'inconvénient de cette procédure est qu'elle est basée principalement sur la détérioration de l'intégrité physique des conduites. Les pertes d'eau par fuites et la détérioration de la capacité hydraulique des conduites ne sont pas prises en considération.

Gustafson et Clancy (1999b) ont appliqué la simulation Monte Carlo pour développer un critère de décision économique pour le remplacement d'une conduite principale en fonte. La simulation Monte Carlo est utilisée pour générer un historique de bris potentiel qui est compatible avec les données observées. Pour chaque bris de l'historique potentiel, la valeur présente nette des dépenses pour la réparation des bris, en incluant le bris et la valeur présente nette du remplacement durant l'année qui suit, sont calculées. La date correspondant à la valeur minimale de la somme des deux valeurs nettes précédentes définit le moment optimal pour le remplacement.

Pour traduire cette information en matière d'ordre de bris optimal, les auteurs introduisent la fonction de perte économique associée au remplacement d'une conduite après le n^e bris (le 1^{er}, le 2^e, le 3^e, etc.). Cette fonction représente la différence entre la valeur présente nette des réparations des n bris et de remplacement si le remplacement s'effectue après le n^e bris, et la valeur présente nette minimale pour les n bris ($n=1,2,\dots,20$). Ce processus est répété pour plusieurs historiques potentiels (500) pour déduire quel est l'ordre de bris qui donnerait la perte économique minimale. En moyenne, ce bris représenterait le bris optimal pour le remplacement. Cette approche a été appliquée au système de distribution d'eau de la ville de Saskatoon en regroupant les conduites en trois catégories, selon l'épaisseur des parois (mince, moyenne et épaisse). Chaque catégorie est analysée séparément. Les temps entre les bris successifs d'ordre

supérieur à un sont modélisés par des distributions exponentielles, chacune définie par une valeur de paramètre différente. Les auteurs ont trouvé qu'un remplacement après le 8^e bris donnerait la perte économique la plus basse pour une conduite en fonte à paroi mince de 100 m de longueur. Une analyse de sensibilité par rapport à la longueur des conduites a montré que cet ordre de bris pouvait monter à 15 bris pour des conduites plus longues.

Plus récemment, Loganathan *et al.*, (2002) ont identifié un seuil pour le taux de bris (Brk_{th}) (entre deux bris subséquents) qui permet de définir un ordre de bris pour le remplacement d'une conduite. Si le taux de bris courant (Brk_{cur}) est supérieur ou égal au taux de bris seuil, alors il faut remplacer la conduite. Ce taux de bris seuil est donné par l'expression suivante :

$$Brk_{th} > \frac{\ln(1+r)}{\ln\left(\frac{C_{n+1}}{F_n} + \frac{F_{n+1}}{F_n}\right)} \quad (2.16)$$

où :

r : taux d'actualisation

n : bris d'ordre n

C_n : coût de réparation du n^e bris

F_n : coût du remplacement au temps du n^e bris mesuré à partir de la date d'installation de la conduite

Le taux de bris entre deux bris subséquents représente l'inverse de la différence des temps entre ces deux bris.

2.4.2 Stratégies intégrant les aspects structural et hydraulique

Ces dernières années, les chercheurs s'intéressent de plus en plus à des stratégies applicables au niveau du réseau complet et essaient d'inclure d'autres objectifs en plus du critère de coût. Par exemple, Kleiner *et al.* (1998a) ont

proposé une approche de planification à long terme de réhabilitation/remplacement d'un système de distribution d'eau. Les détériorations de l'intégrité structurale et de la capacité hydraulique de chaque conduite dans le système sont analysées simultanément ; la première provoque une augmentation du taux de bris qui fait monter les coûts de la maintenance, et la seconde réduit la pression dans le réseau. Dans un réseau composé de p conduites et de n nœuds, chaque conduite peut être réhabilitée selon R options : le recyclage (ou revêtement interne), le remplacement par une conduite de même diamètre ou par une conduite de diamètre supérieur. L'objectif principal est de minimiser la somme des coûts associés à la réhabilitation (soit en considérant un recyclage initial puis un nombre infini de cycles de remplacement subséquents, soit un remplacement initial suivi par un nombre infini de cycles de remplacement subséquents) et les coûts de maintenance (réparation des bris) de l'ensemble des conduites du système. Le but est de planifier les différentes interventions de réhabilitation/remplacement pour chaque conduite tout en assurant une pression suffisante dans le réseau. Pour modéliser la variation temporelle du taux de bris, les auteurs adoptent l'équation de Shamir et Howard (1979), et pour modéliser les variations temporelles de la rugosité interne des conduites, ils utilisent l'équation de Sharp et Walski (1988).

Kleiner *et al.* (1998b) ont ensuite adopté une méthodologie pour implanter l'approche précédente dans un système d'aide à la décision pour faciliter l'identification de la stratégie optimale de réhabilitation/remplacement d'un réseau. Cette méthodologie est basée sur une approche de programmation dynamique, les variables de décision étant l'alternative de réhabilitation/remplacement à implanter (c'est-à-dire le recyclage, le remplacement par une conduite du même diamètre ou un diamètre plus grand) et la date de son implantation pour chaque conduite du réseau de distribution. Cette technique appelée M-PRAWDS (*Multistage-Procedure for Rehabilitation Analysis of Water Distribution Systems*) a pour fonction objectif la minimisation des coûts totaux d'investissement de réhabilitation et de maintenance sur un horizon de

temps prédéfini. Les contraintes prises en compte sont la conservation de la masse au niveau des nœuds du réseau, la conservation de l'énergie et le maintien d'une pression minimale aux nœuds. Le simulateur utilisé pour calculer les pressions aux nœuds est Epanet, une modification de la version originale a été développée puis intégrée en tant que sous-routine dans le modèle M-PRAWDS.

Suivant cette procédure, les étapes correspondent au nombre de conduites réhabilitées (exemple, étape 0 : aucune conduite n'a encore été réhabilitée et l'étape 1 correspond à la réhabilitation d'une seule conduite) et les états correspondent à une séquence unique de conduites réhabilitées (exemple, pour deux conduites et deux options de réhabilitation R_1 et R_2 : durant l'étape 1, la conduite 1 peut être réhabilitée avec R_1 au temps T_1 , la conduite 2 peut être réhabilitée avec R_2 au temps T_2 , etc.). La transition correspond à l'ajout d'une conduite aux états d'une étape pour générer les états de la prochaine étape. Le principe est de tester toutes les combinaisons, de toutes les conduites, pour trouver celle qui donnerait les coûts de réhabilitation les plus avantageux. Le moment optimal pour le remplacement doit être aussi proche que possible du temps qui donnerait le coût total minimal (pour réduire les coûts) et aussi loin que possible du temps où la pression atteint son minimum (pour respecter la contrainte hydraulique).

L'hypothèse d'un nombre infini de cycles de remplacement impose une limite à cette méthodologie car, au cours d'un cycle, le débit peut augmenter dans les centres urbains qui enregistrent une forte expansion. L'inconvénient de cette technique est que sa résolution demande beaucoup de temps de calcul et qu'elle ne peut être appliquée aux systèmes de grande dimension puisque la dimension du problème augmente rapidement avec le nombre de conduites. Pour un réseau de p conduites avec R options de réhabilitation simulées sur un horizon de H années, il faut compter un nombre de $(R + 1)^{pH}$ combinaisons. Ainsi, si le système comprend trois conduites, quatre options se présentent : le recyclage, le

remplacement par une conduite du même diamètre ou un diamètre plus grand ou ne rien faire. Au total, il y aura dans ce cas $(3+1)^3$ combinaisons par année. Si on envisage toutes les possibilités durant un horizon de 40 ans, on aurait approximativement 10^{72} combinaisons. Engelhardt *et al.* (2000) identifient deux limites au modèle de Kleiner *et al.* (1998a,b) : le modèle n'a été appliqué que sur de petits réseaux et son applicabilité à de larges réseaux n'est pas encore démontrée. De plus, il y manque une contrainte budgétaire qui est une considération pratique des gestionnaires de réseaux. D'après Kleiner *et al.* (2001), d'autres procédures de recherche combinatoires sont requises pour appliquer PRAWDS à de larges systèmes, comme les méthodes de recherche heuristiques du genre algorithmes génétiques, mais l'inconvénient de cette dernière est qu'elle ne garantit pas que le minimum global sera localisé.

L'étude de Kim et Mays (1994) diffère des précédentes, car elle inclut, en plus des coûts de remplacement, de réhabilitation et de réparation des bris, une quatrième fonction de coût associée au pompage, l'objectif étant de minimiser la somme de ces quatre coûts.

En Europe, il existe le modèle CARE-W (*Computed Aided Rehabilitation of Water networks*) créé dans le cadre d'un projet de recherche européen, par une association de 10 centres de recherche (Le Gauffre et Eisenbeis, 2004 ; <http://care-w.unife.it/>). Ce modèle comprend principalement cinq modules, reliés à une base de données commune et à des outils de gestion des données :

- 1) un module pour l'évaluation des indicateurs de performance liés à la réhabilitation du réseau (*Performance indicators*) ;
- 2) des outils de prédiction des défaillances (casses et fuites) des conduites (*Failure forecasting*) ;
- 3) un module de prédiction de la criticité des conduites vis-à-vis de la fiabilité hydraulique d'un réseau (*Water supply reliability*) ;
- 4) un module d'aide à la construction et à la comparaison de stratégies de gestion sur le long terme (*Long term rehabilitation planning*) ;

- 5) un module d'aide multicritère à la construction des programmes annuels de réhabilitation (*Annual rehabilitation planning*).

Pour la prédiction des défaillances, deux modèles sont inclus dans le modèle CARE-W : CARE-W_PHM (*Proportional Hazard Model*) et CARE-W_Poisson. Le premier utilise les données des défaillances pour développer un modèle de prévision basé sur l'analyse de survie. Après identification des variables les plus significatives, des taux de défaillance sont calculés pour chaque conduite pour des horizons de 5 à 10 ans. Le second modèle calcule un taux moyen de défaillance par groupe de conduites. Ces groupes sont identifiés en fonction des caractéristiques de la conduite (diamètre, matériau, etc.) et/ou de son environnement (sol, trafic routier, etc.). Ces deux modèles ont été testés avec les données fournies par plusieurs services d'eau européens dans le but d'estimer le bénéfice apporté par ces modèles. Le bénéfice est évalué à l'aide d'un indice qui compare les défaillances prévues et les défaillances observées sur une même période. Les tests réalisés sur le réseau de Trondheim ont permis d'estimer le bénéfice apporté par ces modèles et les résultats ont montré que si 5 % des conduites classées comme étant les plus défaillantes selon le modèle avaient été remplacées, 40 % des casses auraient pu être évitées. Pour cette application, les deux modèles testés ont donné des résultats assez proches.

2.4.3 Algorithmes génétiques et optimisation des stratégies de remplacement/réhabilitation des systèmes de distribution

Pour la compréhension de la suite de cette section, le lecteur devra consulter le chapitre 7 afin qu'il se familiarise avec la terminologie utilisée par les algorithmes génétiques.

Durant les dix dernières années, les algorithmes génétiques ont été appliqués à l'optimisation de systèmes de distribution (eau potable, gaz) avec beaucoup de succès. Dans les réseaux d'eau potable, ils ont été utilisés le plus souvent dans

les problèmes de dimensionnement des conduites qui sont des problèmes non linéaires avec contraintes (Dandy *et al.* 1996; Vairavamoorthy et Ali 2000; Savic et Walters 2000; Wu *et al.* 2001).

On trouve également d'autres applications comme le dimensionnement et le positionnement des réservoirs de stockage et ajout de nouvelles pompes (Walters *et al.* 1999) et la programmation du temps de fonctionnement des pompes et la sélection du nombre de pompes à utiliser par période, pour la minimisation du coût de l'énergie (Savic *et al.* 1997).

Dans les problèmes de dimensionnement de conduites, en plus de minimiser le coût, il faut déterminer certains paramètres du réseau (diamètre des conduites) afin de satisfaire aux contraintes de pression aux nœuds, et parfois aux contraintes de vitesses d'écoulement dans les conduites. Savic et Walters (1997) ont développé le modèle GANET pour le dimensionnement des conduites, utilisant un AG avec un code Gray (un exemple de ce code sera donné au chapitre 7). Ils ont utilisé une fonction d'adaptation représentant la somme du coût d'installation de toutes les conduites et d'une autre fonction représentant une pénalité due à la non-satisfaction de la pression minimale requise. Cette fonction pénalité mesure l'écart de pression aux nœuds par rapport à la pression minimale imposée. Les auteurs ont montré par ailleurs l'influence des incertitudes liées à l'estimation des paramètres de l'équation de Hazen-Williams sur la meilleure solution.

Dandy *et al.* (1996) ont abordé la résolution du problème du tunnel de New-York en proposant une fonction d'adaptation transformée utilisant la fonction d'adaptation élevée à une puissance n variable (cette puissance peut varier durant l'évolution des générations) et l'application du code Gray au lieu du code binaire. Ils ont également introduit un nouvel opérateur appelé *adjacency mutation* (mutation contiguë) qui permet de muter la chaîne (une chaîne représente une variable de décision) sélectionnée en une autre chaîne

représentant une variable de décision très proche de la variable de décision sélectionnée. Ceci permet une exploration locale de l'espace de recherche. Par exemple, la chaîne suivante 0001 peut muter vers le haut à 0010 (code binaire) ou vers le bas à 0000. Cet AG a été testé en utilisant les données du réseau du tunnel de New-York. Les auteurs ont trouvé une solution de plus faible coût que celles publiées jusqu'alors.

Vairavamoorthy et Ali (2000) ont utilisé un AG avec un codage en nombres réels qui permet d'éviter le problème de redondance souvent rencontré avec le code binaire et le code Gray. Les tests effectués sur deux réseaux de distribution ont montré que leur modèle est plus efficace d'un point de vue temps de calcul.

Wu *et al.* (2001) ont testé le *fast messy-GA* pour le dimensionnement de trois réseaux souvent évoqués dans la littérature (les réseaux d'Alperovitz, d'Hanoi et le tunnel de New-York). L'algorithme *messy-GA* diffère d'un simple AG par la variabilité de la longueur de la chaîne de bits (Deb et Goldberg, 1991). La comparaison des résultats de cet algorithme avec d'autres algorithmes, en nombre d'itérations, a montré la plus grande rapidité de cet algorithme.

Montesinos *et al.* (1999) ont introduit un AG modifié dans lequel certains changements ont été apportés dans le processus de sélection et de mutation, et l'ont testé sur le tunnel de New-York. Dans le processus de sélection, les chaînes sont classées en ordre croissant selon la valeur de leurs fonctions d'adaptation. Ensuite, les solutions les moins bonnes sont éliminées et remplacées par des copies des meilleures chaînes trouvées afin de maintenir le même nombre de chaînes dans la population. Une chaîne est ensuite appariée avec celle qui suit dans le classement (la 3^e avec la 4^e, la 5^e avec la 6^e, etc.). À noter que les deux premières chaînes ne sont jamais croisées afin de sauvegarder les deux meilleures chaînes dans la prochaine génération.

Les AG ont également été utilisés dans le contexte du problème de la réhabilitation/remplacement des conduites. Dandy et Engelhardt (2001) ont utilisé les algorithmes génétiques pour programmer le remplacement optimal des conduites du réseau métropolitain d'Adélaïde (Australie), composé de 488 conduites. À cause du coût élevé du revêtement des conduites, ils ne considèrent que l'alternative de remplacement. Les seuls coûts qui interviennent sont : le coût de réparation des bris (coûts directs et coût indirects; approche semblable à Walski et Pellicia (1982) dans laquelle un facteur reflétant les coûts indirects est introduit dans la fonction objectif), et le coût du remplacement. Une première analyse des données de bris de conduites a permis d'extraire deux équations de prédiction du taux de bris, équation en loi de puissance (modèle agrégé), et ce pour chaque type de conduite (fonte avec revêtement de ciment et en amiante-ciment). Ces équations sont de la forme :

$$\begin{aligned} y &= 0,02214 \exp(-8,64 \times 10^{-3} d_i) age_i^{1,337} \\ y &= 1,974 \times 10^{-3} \exp(-9,74 \times 10^{-3} d_i) age_i^{1,808} \end{aligned} \quad (2.17)$$

où :

y : taux de bris (bris/km/année);

d_i : diamètre de la conduite (mm);

age_i : âge de la conduite de diamètre d_i (années).

L'analyse économique comprend trois modèles : le premier est utilisé pour décider si une conduite devra être remplacée maintenant ou plus tard (temps de remplacement = 10 ans). Ce modèle permet d'évaluer l'efficacité du modèle génétique à identifier les conduites qui nécessiteraient d'être remplacées. Le second modèle identifie le moment du remplacement des conduites en considérant une période d'analyse de 20 années, divisée en blocs de cinq ans. Ce modèle tient compte des fonds alloués à chaque période de cinq ans. Chaque conduite a une période de cinq ans pour être remplacée, le remplacement peut s'effectuer maintenant, dans cinq ans, dans dix ans, etc. Le troisième modèle inclut le diamètre des nouvelles conduites comme variable de

décision. Le solveur hydraulique (Epanet) est intégré à ce modèle afin d'éviter les solutions donnant des pressions inférieures aux valeurs minimales imposées (20 m) et des vitesses supérieures à la vitesse maximale tolérable (3 m/s). Deux types de représentation des solutions ont été testés. Le premier permet le remplacement de toutes les conduites et le second impose une limite au nombre de conduites devant être remplacées. Les résultats ont montré qu'en général le second type était meilleur car la taille de l'espace de recherche est nettement inférieure. Une analyse de sensibilité par rapport au taux d'intérêt a montré que le nombre de conduites remplacées pouvait varier en fonction de la valeur des taux d'intérêt ; plus ces taux sont faibles plus il y a des conduites à remplacer.

2.5 Algorithmes génétiques multiobjectifs dans les réseaux de distribution : *Dimensionnement-réhabilitation et/ou remplacement*

Récemment, de plus en plus d'auteurs s'intéressent à tester les AG multiobjectifs pour des problèmes de dimensionnement, de réhabilitation et/ou de remplacement, en utilisant des réseaux bien connus dans la littérature (Keedwell et Khu 2003; Cheung *et al.* 2003a et 2003b). La terminologie utilisée dans l'approche multiobjectif peut être trouvée au chapitre 7.

Pour le dimensionnement du tunnel de New-York, Keedwell et Khu (2003) ont couplé une méthode hybride avec le *NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II)*, un algorithme considéré comme étant parmi les meilleurs en optimisation multiobjectif. Le *NSGA-II* est exécuté en premier, pendant un certain nombre de générations, ensuite une méthode de recherche locale incrémente et décrémente deux diamètres de conduites pour essayer de trouver de meilleures solutions non dominées. Les nouvelles solutions sont ensuite insérées dans la population et le processus se poursuit jusqu'à un critère d'arrêt.

Cheung *et al.* (2003a) ont testé deux algorithmes, un AG non élitiste *MOGA* (*Multi-Objective Genetic Algorithm*) et un algorithme élitiste *SPEA* (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*), sur un réseau hypothétique à 14 conduites introduit par Gessler (1985). Le premier objectif consiste à minimiser le coût total des conduites réhabilitées (nettoyées ou non), et des nouvelles conduites remplacées ou dupliquées, et le second objectif consiste à minimiser le déficit de pression pour différentes consommations aux nœuds (minimum, moyenne et de pointe). La comparaison des deux algorithmes est basée sur une performance métrique. Cette performance métrique permet de calculer la proportion de solutions dans un vecteur qui est faiblement dominée par les solutions d'un autre vecteur. D'après leurs résultats, *SPEA* est plus rapide que *MOGA* et le front obtenu avec *MOGA* est entièrement dominé par le front obtenu avec *SPEA*, et ce pour différents tests effectués sur la taille des populations. En utilisant *SPEA*, Cheung *et al.* (2003b) ont traité le même problème mais ont introduit un troisième objectif qui est la maximisation du bénéfice hydraulique du réseau, formulation proposée en premier par Halhal *et al.* (1997).

Dans le cas de la réhabilitation/remplacement des réseaux réels, l'étude la plus citée est celle de Halhal *et al.* (1997). L'approche multiobjectif consiste à maximiser, d'une part, les bénéfices résultant de l'adoption d'une solution et de minimiser, d'autre part, les coûts de cette solution, sous la contrainte qui veut que ne soit pas dépassé le budget maximal disponible pour l'amélioration de l'état du réseau. Le bénéfice total d'une solution (i) est la somme de quatre bénéfices, pondérés par des poids (w_i) choisis par l'utilisateur :

$$\begin{aligned} \text{Bénéfice}(i) = & w_h \text{Bénéfice}_{hyd}(i) + w_p \text{Bénéfice}_{phy}(i) + \\ & w_f \text{Bénéfice}_{flx}(i) + w_q \text{Bénéfice}_{qual}(i) \end{aligned} \quad (2.18)$$

où :

i : indice de la solution proposée;

$\text{Bénéfice}_{hyd}(i)$: bénéfice hydraulique;

$\text{Bénéfice}_{phy}(i)$: bénéfice d'intégrité physique;

$Bénéfice_flx(i)$: bénéfice de flexibilité;

$Bénéfice_qual(i)$: bénéfice de qualité.

Les différents bénéfices précédents sont définis comme suit :

- Le bénéfice hydraulique ($Bénéfice_hyd(i)$) traduit l'amélioration de la performance hydraulique du réseau. Il s'exprime par la différence entre les déficiences du réseau avant amélioration (son état initial) et après adoption de la solution (i), sachant que la déficience représente la somme des déficits de pression et des surplus de pression Δ_j à chaque nœud (j), pondérées par les demandes aux nœuds Q_j :

$$Deficience = \alpha \sum_{j \in jpm} (\Delta_j Q_j) + \beta \sum_{j \in jpx} (\Delta_j Q_j) \quad (2.19)$$

où :

jpm : ensemble des nœuds ayant des pressions inférieures à la pression minimale;

jpx : ensemble des nœuds ayant des pressions supérieures à la pression maximale;

α, β : poids reflétant l'importance relative accordée aux déficits et aux surplus de pression.

Pour déterminer les pressions aux nœuds et déduire la déficience d'une solution, le solveur des réseaux hydrauliques (Epanet) est utilisé.

- Le bénéfice d'intégrité physique ($Bénéfice_phy(i)$) résulte de l'amélioration de la structure du réseau en réduisant le coût des futures réparations. Il est donné par l'équation suivante :

$$Bénéfice_phy(i) = \sum_{j=1}^{Nrnw} Cost_{rep}(j) \quad (2.20)$$

où :

$Nrnw$: nombre de conduites renouvelées;

$Cost_{rep}(j)$: coût de réparation des bris de la conduite j .

Le coût de réparation des bris d'une conduite j est égal à la valeur présente du coût des réparations des bris pour une période de dix ans (les coûts associés aux bris durant la période de dix ans suivant le remplacement sont supposés négligeables). Ce coût s'écrit :

$$Cost_{rep}(j) = \sum_{t=tp}^{tr} \frac{J(t) C_b(j)}{(1+r)^{t-tp}} \quad (2.21)$$

où :

$C_b(j)$: coût de réparation d'un bris de conduite;

r : taux d'actualisation;

tp : année présente;

tr : année présente plus dix ans;

$J(t)$: taux des bris durant l'année t , approximé par la relation suivante :

$$J(t) = J_0(1+b)^t \quad (2.22)$$

où :

J_0 : taux de bris durant l'année t_0 (bris/km/année);

b : coefficient de croissance du taux de bris;

t : temps (année).

- Le bénéfice de flexibilité ($Bénéfice_flx(i)$) provient de la duplication du nombre de conduites. Il est exprimé par l'équation suivante :

$$Bénéfice_flx(i) = \sum_{j=1}^{Ndp} Diam(j) \quad (2.23)$$

où :

Ndp : nombre de nouvelles conduites en parallèle;

$Diam(j)$: diamètre de la nouvelle conduite.

- Le bénéfice de qualité ($Bénéfice_qual(i)$) s'exprime en fonction de la longueur de la conduite. Un faible coefficient de Hazen-Williams est le signe d'une corrosion, d'un entartrage, etc. Chaque conduite remplacée ou revêtue engendre une amélioration de la qualité de l'eau transportée. Ce bénéfice s'écrit :

$$Bénéfice_qual(i) = \sum_{j=1}^{Nrl} length(j) \quad (2.24)$$

où :

$Length(j)$: longueur réhabilitée ou remplacée (conduite j);

Nrl : nombre de conduites réhabilitées (revêtement) et remplacées.

Les différents coûts considérés sont : le coût d'installation de nouvelles conduites, le coût du remplacement des conduites existantes légèrement supérieur au premier et les coûts du nettoyage et du revêtement sont hypothétiques. Ces coûts varient en fonction du diamètre des conduites.

L'approche proposée a été appliquée à un réseau réel de 167 conduites, et pour chaque conduite, huit options de réhabilitation sont considérées, ce qui fait un total de : $8^{167} = 6,55 \cdot 10^{150}$ combinaisons possibles. L'utilisation de l'algorithme *Structured Messy GA (SMGA)* permet d'avoir une solution au problème car il est basé sur l'augmentation, d'une manière graduelle, de la complexité des individus représentant les solutions des populations successives. Un codage en nombres entiers (une chaîne de nombres entiers qui correspond aux variables de décision) est utilisé. La chaîne est subdivisée en deux sous-chaînes, la première correspondant au numéro de la conduite et la seconde donnant le numéro de la décision relative à la conduite. L'algorithme (*SMGA*) commence par énumérer tous les éléments simples (par exemple, réhabilitation pour une seule conduite) pour former la population initiale et évalue leurs fonctions d'adaptation. Puis les meilleurs éléments sont retenus comme population initiale pour générer les populations successives. Dans l'étape suivante, le processus de « concaténation » est appliqué. Ce processus consiste à créer une nouvelle population avec des individus ayant une plus grande chaîne. La nouvelle population, ainsi créée, va subir le processus conventionnel des algorithmes génétiques pendant un certain nombre de générations jusqu'à un critère d'arrêt. Sur quoi une nouvelle population est générée par concaténation. Ce processus continue jusqu'à ce qu'aucune amélioration n'apparaisse après deux concaténations successives, ou que la chaîne atteigne une longueur

prédéterminée. Le *SMGA* a été modifié pour pouvoir être utilisé dans le cadre d'un problème multiobjectif. La comparaison des résultats du *SGA* (*Standard GA*) avec le *SMGA* a montré que le *SMGA* a donné de meilleures solutions non dominées que le *SGA*.

Le *SMGA* a été de nouveau amélioré par Halhal *et al.* (1999a). Chaque chaîne codée a été, cette fois, subdivisée en trois sous-chaînes (au lieu de deux comme précédemment) : la première sous-chaîne de position identifie le numéro de la conduite qui vient d'être sélectionnée pour la réhabilitation; la seconde sous-chaîne de décision détermine la décision de réhabilitation codée et la troisième sous-chaîne donne la date d'implantation de la décision de réhabilitation. Cet algorithme a été appliqué à un réseau fictif de 15 conduites et un autre réseau réel de 48 conduites.

2.6 Synthèse

L'objectif de ce chapitre était de réaliser une revue de littérature assez détaillée des différentes stratégies de réhabilitation et/ou de remplacement des conduites en réseau de distribution d'eau. Les différentes techniques de réhabilitation et de remplacement des conduites et certains modèles d'estimation des coûts de remplacement/réhabilitation d'une conduite et de réparation d'un bris ont été présentés aux sections 2.1 et 2.2. Ces deux sections ont montré que les coûts de réhabilitation et de remplacement peuvent dépendre de différents facteurs tels que : diamètre, longueur, matériau, éléments connexes comme les bouches d'incendies et les vannes, etc. Les coûts de réparation des bris dépendent plus de la position et de l'importance du bris, de la durée des réparations ainsi que de la dimension de la conduite. L'objectif de ces deux sections était d'identifier des ordres de grandeur pour les coûts unitaires de remplacement et de réparation de bris qui seront utilisés dans nos applications aux chapitres 9 et 10.

Ensuite la revue de littérature de la section 2.3 décrivant les modèles d'estimation de l'évolution du nombre de bris de conduites en réseau a été réalisée afin d'identifier les différents modèles existants ainsi que le modèle à intégrer à notre stratégie de planification des interventions en réseau développée dans le cadre de cette thèse. Cette revue a montré qu'en général, trois types de modèles de nature statistique sont les plus cités : les modèles agrégés, de régression et probabilistes. Un modèle probabiliste a été sélectionné pour nos travaux. Dans le chapitre 3, nous verrons plus en détail le processus de modélisation de la probabilité d'occurrence des bris ainsi que les types de modèle de bris sélectionnés dans le cadre de cette thèse. Les deux chapitres suivants (4 et 5) montrent comment il est ensuite possible d'estimer les paramètres du modèle de bris utilisé.

La section 2.4 a permis d'identifier les différentes stratégies de réhabilitation et/ou remplacement ainsi que les critères proposés par les différents auteurs. Nous avons vu que les premiers travaux de Shamir et Howard (1979), Walski et Pelliccia (1982), Walski (1987) et Male *et al.* (1990) n'étaient basés que sur un critère structural alors que les études plus récentes comme celles de Kleiner *et al.* (1998b) et Dandy et Engelhardt (2001) intègrent les aspects structural et hydraulique à la fois. Mentionnons que pour ces deux études, les auteurs adoptent une méthodologie qui prend en considération un modèle de bris de type agrégé. La section 2.4 nous a permis de voir la limite de l'utilisation de la programmation dynamique à travers les travaux de Kleiner *et al.* (1998a, b). Pour résoudre le problème de la minimisation des coûts de remplacement, l'utilisation d'une méthode stochastique comme celle des algorithmes génétiques semble plus adaptée à notre problématique et à la dimension de nos réseaux. Nous verrons au chapitre 7 les avantages d'utilisation d'un AG ainsi que les principaux éléments qui permettent d'appliquer cette méthode pour résoudre un problème réel.

La dernière section 2.5 a montré les récents travaux de Halhal *et al.* (1997, 1999a) qui se distinguent par rapport aux autres auteurs par l'utilisation d'une approche multiobjectif pour résoudre la problématique de la réhabilitation et/ou remplacement des conduites. Ces auteurs ont introduit quatre bénéfices dans leur formulation : le bénéfice hydraulique, d'intégrité physique, de flexibilité et de qualité. Leur approche a été appliquée à un réseau réel de 167 conduites. Contrairement à Halhal *et al.* (1997, 1999a), nous ne nous limitons à intégrer que deux critères dans notre stratégie de planification des interventions basée sur une approche multiobjectif. Le critère structural présenté en détail au chapitre 3 et le critère hydraulique dont les éléments qui le composent sont exposés au chapitre 6. Nous utilisons deux algorithmes multiobjectifs, le *NPGA 2* et le *NSGA-II*, qui sont différents de ceux utilisés par Halhal *et al.* (1997, 1999a).

3. MODÉLISATION DES PROBABILITÉS D'OCCURRENCE DE BRIS EN RÉSEAU

Ce chapitre est consacré à la modélisation des probabilités d'occurrence de bris qui est utilisée dans le modèle développé pour la planification des interventions en réseau. La modélisation des bris utilisée dans cette partie est basée sur l'analyse de survie qui est une méthode d'analyse statistique permettant d'estimer les paramètres des distributions utilisés pour modéliser les temps de survie. Les temps de survie correspondent dans le présent cas d'application aux intervalles de temps entre l'installation d'une conduite et le premier bris ou aux intervalles de temps entre deux bris successifs. Les intervalles de temps entre bris sont traités comme des variables aléatoires décrites par des distributions statistiques.

Ce chapitre est organisé en six parties. On présente dans la section 3.1 les fonctions statistiques utilisées dans le cadre de ce travail. La section 3.2 définit quelques distributions statistiques. La section 3.3 est consacrée à la modélisation de la probabilité d'occurrence des bris. Dans cette section, deux modèles de bris sont définis : un modèle avec un taux de bris variant linéairement avec l'ordre de bris et un modèle plus général. La section 3.4 décrit, pour ces deux modèles de bris, les estimations du nombre moyen de bris en fonction du temps. Dans la section 3.4, les développements de certaines équations, par ailleurs obtenues par Mailhot *et al.* (2003), sont présentés lorsque nécessaire. Dans le cas contraire, seuls les résultats sont présentés. La section 3.5 décrit le modèle de bris utilisé dans le cadre du présent travail et la dernière section 3.6 présente, pour le cas d'une conduite, un exemple de l'analyse de la fonction de coût pour un modèle de bris avec paramètres linéairement dépendants de l'ordre de bris.

3.1 Fonctions statistiques

Les durées entre bris sont assimilées à des variables aléatoires et à ce titre, ces durées sont décrites par des fonctions statistiques. On considère un ensemble

de conduites ayant chacune son historique de bris depuis son installation et on définit T , la durée entre l'apparition de deux bris successifs. Les fonctions couramment utilisées dans ce type d'analyse sont la fonction de densité de probabilité, la fonction de survie et la fonction de risque (Cox et Oakes 1994).

- 1) La fonction de densité de probabilité $f(t)$ de la variable T correspond à la probabilité que le bris survienne pendant l'intervalle de temps $[t, t + \Delta t]$ et est définie par l'équation suivante :

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\text{Prob}(t \leq T < t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (3.1)$$

- 2) La fonction de survie $S(t)$ est définie comme étant la probabilité que le temps T soit égal ou dépasse un temps t . Pour une conduite donnée, c'est la probabilité qu'elle ne subisse pas de bris après un temps donné depuis l'enregistrement du dernier bris ou depuis la date d'installation de la conduite (Cox et Oakes 1994). La fonction de survie $S(t)$ est définie par l'équation (3.2), cette fonction est monotone, décroissante et continue telle que : $S(0) = 1$ et $\lim_{t \rightarrow \infty} S(t) = 0$.

$$S(t) = \text{Prob}(T \geq t) \quad t \geq 0 \quad (3.2)$$

- 3) La fonction cumulative $F(t)$ de la variable T est la probabilité que le bris survienne entre 0 et t :

$$F(t) = \text{Prob}(T < t) = \int_0^t f(u) du = 1 - S(t) \quad (3.3)$$

- 4) La fonction de risque $h(t)$ est la probabilité instantanée d'avoir un bris au temps t sachant que la conduite n'a pas subi de bris jusqu'au temps t . Cette dernière s'exprime en terme des fonctions de survie et de densité de probabilité comme suit :

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\text{Prob}(t \leq T < t + \Delta t | T \geq t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{S(t)} \quad (3.4)$$

$h(t) \Delta t$: est la probabilité d'observer un bris entre t et $t + \Delta t$ sachant qu'il n'y a pas eu de bris entre 0 et t . La fonction de risque vérifie par ailleurs la relation suivante (Andreou *et al.* 1987a) :

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} = -\frac{S'(t)}{S(t)} = -\frac{d \log(S(t))}{dt} \Rightarrow S(t) = \exp \left[-\int_0^t h(u) du \right] \quad (3.5)$$

3.2 Distributions statistiques considérées

Plusieurs distributions statistiques peuvent être utilisées pour modéliser les temps de survie (Martz et Waller, 1982; Cox et Oakes 1994) : Weibull, exponentielle, etc. Dans le cadre de ce travail, deux distributions ont été considérées, à savoir les distributions de Weibull et exponentielle.

3.2.1 Distribution de Weibull

La distribution de Weibull compte deux paramètres (θ, β) ($\theta > 0, \beta > 0$). Les fonctions de survie, de densité de probabilité et de risque sont données par les équations 3.6 à 3.8 et sont définies pour $t \geq 0$ (Martz et Waller 1982).

$$S(t) = \exp \left[-\left(\frac{1}{\theta}\right) t^\beta \right] \quad (3.6)$$

$$f(t) = \left(\frac{1}{\theta}\right) \beta t^{\beta-1} \exp \left[-\left(\frac{1}{\theta}\right) t^\beta \right] \quad (3.7)$$

$$h(t) = \left(\frac{1}{\theta}\right) \beta t^{\beta-1} \quad (3.8)$$

Selon la valeur de β , la fonction de risque $h(t)$ est monotone croissante ($\beta > 1$) ou monotone décroissante ($\beta < 1$). Si $\beta = 1$, la distribution devient une distribution exponentielle et la fonction de risque est constante (indépendante du temps).

3.2.2 Distribution exponentielle

La distribution exponentielle compte pour sa part un seul paramètre positif (λ), (Martz et Waller 1982). La fonction de densité de probabilité et la fonction de survie sont définies par les équations 3.9 à 3.11 pour $t \geq 0$:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (3.9)$$

$$S(t) = \exp(-\lambda t) \quad (3.10)$$

$$h(t) = \lambda \quad (3.11)$$

La distribution exponentielle se caractérise par une fonction de risque constante. La distribution exponentielle est un cas particulier de la distribution Weibull pour lequel $\lambda = \frac{1}{\theta}$ et $\beta = 1$.

3.3 Modélisation de la probabilité d'occurrence des bris

Dans l'approche proposée dans cette étude, les temps s'écoulant entre les bris d'ordre $(j-1)$ et les bris d'ordre (j) sont assimilés à des variables aléatoires, décrites par des fonctions de densité de probabilité (f_{dp}). Les f_{dp} définissent la probabilité d'occurrence du $(j)^{\circ}$ bris en fonction du temps, sachant que le temps initial correspond au temps d'enregistrement du $(j-1)^{\circ}$ bris. Les distributions associées à chaque ordre de bris doivent être précisées.

Nous adoptons dans ce qui suit l'approche proposée entre autres par Gustafson et Clancy (1999a) et Mailhot *et al.* (2000; 2003) qui identifie deux périodes dans le processus de vieillissement d'une conduite. La première, appelée période non exponentielle, se caractérise par l'utilisation des distributions non exponentielles pour décrire les f_{dp} des temps entre les bris. Les intervalles de temps de la seconde période, dite exponentielle, sont quant à eux décrits par des

distributions exponentielles. Un ordre de bris critique (m) délimite ces deux périodes (figure 3.1).

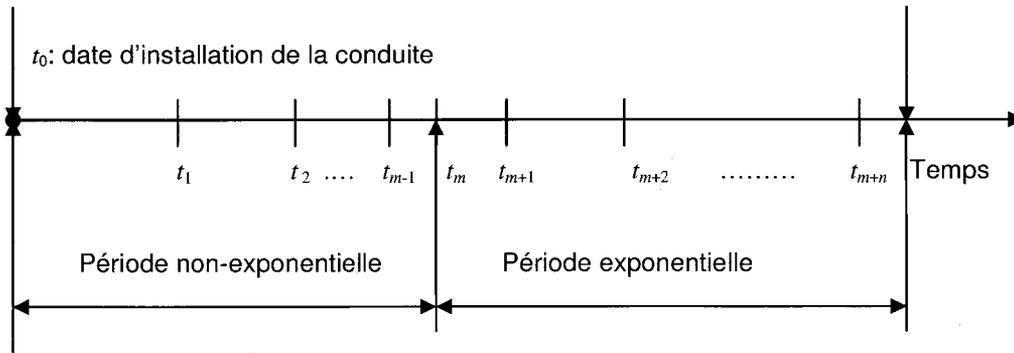


Figure 3.1 Représentation schématique des périodes exponentielle et non-exponentielle

Les temps entre les bris avec un ordre supérieur à m sont décrits par des distributions exponentielles de paramètres λ_j , où j est l'ordre de bris $j \geq m$. Dans ce cas, la fonction de densité de probabilité de la distribution exponentielle est donnée par l'équation suivante :

$$f_j(t) = \lambda_j \exp[-\lambda_j(t - t_{j-1})] \quad t > t_{j-1} \quad (3.12)$$

où :

t_{j-1} : temps d'occurrence du $(j-1)^{\text{e}}$ bris.

3.3.1 Fonction de densité de probabilité d'occurrence du j^{e} bris

De façon générale, la fonction de densité de probabilité décrivant la probabilité d'occurrence du j^{e} bris durant l'intervalle $[t, t + dt]$, $\phi_j(t)$ pour une conduite est donnée par l'équation suivante (Mailhot *et al.* 2003) :

$$\phi_j(t) = \int_{t_0}^t du \phi_{j-1}(u) f_j(t-u) \quad (3.13)$$

où :

f_j : fonction de densité de probabilité des temps entre le $(j-1)^e$ et le j^e bris.
 t_0 : temps correspondant à la date d'installation de la conduite.

En supposant que t_m corresponde au temps d'occurrence du m^e bris et en supposant que $t > t_m$, Mailhot *et al.* (2003) ont exprimé la fonction de densité de probabilité des temps d'occurrence du j^e bris ($j > m$) depuis l'installation de la conduite, comme suit :

$$\phi_j(t) = \int_{t_0}^t dt_m \phi_m(t_m) \phi_j(t | t_m) \quad (3.14)$$

$\phi_j(t)$ est obtenu en intégrant le produit de la fonction de densité de probabilité $\phi_j(t | t_m)$ d'avoir le j^e bris au temps t , sachant que le m^e bris s'est produit au temps $t = t_m$, par la *fdp* $\phi_m(t_m)$ que le m^e bris se soit produit au temps $t = t_m$.

En utilisant le théorème de convolution, ces auteurs ont montré que, pour $t > t_m$, $\phi_j(t | t_m)$ pouvait être calculé en utilisant l'expression suivante qui est fonction des paramètres de distributions exponentielles associées à chaque ordre de bris j :

$$\phi_j(t | t_m) = \sum_{i=m+1}^j \eta_{i,j}^m \exp[-\lambda_i(t - t_m)] \quad (3.15)$$

avec :

$$\eta_{i,j}^m = \frac{\prod_{k=m+1}^j \lambda_k}{\prod_{\substack{i=m+1 \\ i \neq j}}^j (\lambda_i - \lambda_i)} \quad (3.16)$$

En remplaçant $\phi_j(t | t_m)$ dans l'équation (3.14), la fonction de densité de probabilité des temps d'occurrence du j^e bris $j > m$ depuis l'installation de la conduite s'écrit comme suit :

$$\phi_j(t) = \sum_{i=m+1}^j \eta_{i,j}^m \left[\int_{t_0}^t dt_m \phi_m(t_m) \exp[-\lambda_i(t - t_m)] \right] \quad (3.17)$$

3.3.2 Modèle de bris avec paramètres λ linéairement dépendants de l'ordre de bris et modèle général

On peut définir un modèle pour lequel les paramètres λ_j décrivant les distributions exponentielles sont linéairement dépendants de l'ordre de bris :

$$\lambda_j = \lambda_0 + \alpha(j - m - 1) \quad \text{avec } j > m \quad (3.18)$$

où :

α est un paramètre définissant la pente de la relation linéaire entre l'ordre de bris et les valeurs de λ . Ce type de modèle est désigné par modèle de bris avec λ linéaire dans la suite de ce texte.

Si l'on pose $m=1$ et qu'on utilise une distribution de Weibull pour décrire le temps d'occurrence du premier bris, l'équation (3.7) peut être utilisée pour décrire $\phi_1(t)$. Le modèle est dit général dans le cas où les valeurs de λ_j sont quelconques et ne satisfont pas à une relation linéaire telle que présentée à l'équation (3.18).

3.4 Évaluation du nombre moyen de bris

Le nombre moyen de bris d'une conduite $M(t)$, par unité de temps, au temps t , est donné par l'équation suivante :

$$M(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \phi_k(t) \quad (3.19)$$

Si l'on considère les périodes exponentielle et non exponentielle, la relation précédente peut s'écrire comme suit (Mailhot *et al.* 2003) :

$$\begin{aligned}
 M(t) &= \sum_{k=1}^m \phi_k(t) + \sum_{k=m+1}^{\infty} \phi_k(t) \\
 &= \sum_{k=1}^m \phi_k(t) + \sum_{k=m+1}^{\infty} \left[\sum_{i=m+1}^k \eta_{i,k}^m \left[\int_{t_0}^t dt_m \phi_m(t_m) \exp[-\lambda_i(t-t_m)] \right] \right]
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

3.4.1 Probabilité conditionnelle d'occurrence de bris pour le modèle de bris général

On suppose que la conduite se trouve dans la période exponentielle. Le bris d'ordre m marque la fin de la période non exponentielle et le début de la période exponentielle est représenté par le temps t_m . Tous les ordres de bris suivant k sont supérieurs à m .

Considérons le cas où, au temps présent t' , k bris se sont déjà produits sur un segment de conduite, aux temps $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ (figure 3.2) et qu'aucun autre bris n'est apparu entre le temps du k^e bris, t_k , et le temps présent t' . On désire estimer la probabilité d'observer un $(k+n)^e$ bris durant l'intervalle $[t, t+dt]$, ($t > t'$). On définit par $\phi_{k+n}(t|k; t')$ la probabilité d'occurrence d'un $(k+n)^e$ bris durant l'intervalle $[t, t+dt]$ considérant que k bris se sont produits aux temps $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ durant la période $[t_0, t']$. En utilisant la probabilité conditionnelle, pour le cas spécifique où $n=1$, $\phi_{k+1}(t|k; t')$ s'écrit (Mailhot *et al.*, 2003) :

$$\phi_{k+1}(t|k; t') = \frac{f_{k+1}(t-t_k)}{S_{k+1}(t'-t_k)} \tag{3.21}$$

où : $S_{k+1}(t'-t_k)$ est la fonction de survie associée au $(k+1)^e$ bris.

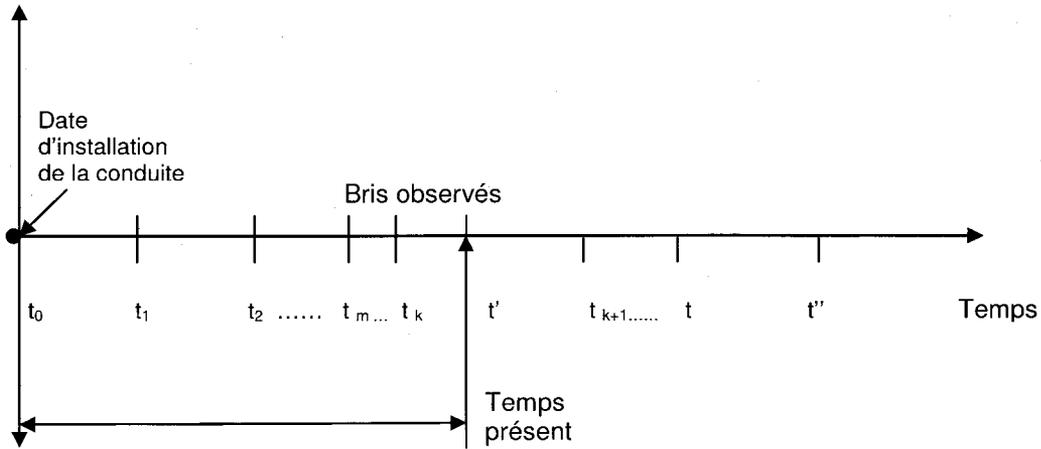


Figure 3.2 Représentation schématique de l'axe des temps dans le cas d'une conduite ayant subi k bris aux temps $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ durant l'intervalle $[t_0, t']$

En remplaçant $f_{k+1}(t - t_k)$ par la distribution exponentielle correspondante (équation 3.12), on obtient, après simplification :

$$\phi_{k+1}(t | k ; t') = \lambda_{k+1} \exp[-\lambda_{k+1}(t - t')] \tag{3.22}$$

Pour le cas général où $n > 1$, on a :

$$\phi_{k+n}(t | k ; t') = \frac{\int_{t'}^t dt_{k+1} f_{k+1}(t_{k+1} - t_k) \phi_{k+n}(t | t_{k+1})}{S_{k+1}(t' - t_k)} \tag{3.23}$$

En remplaçant $\phi_{k+n}(t | t_{k+1})$ par l'équation (3.15) et $f_{k+1}(t_{k+1} - t_k)$ et $S_{k+1}(t' - t_k)$ par les fonctions correspondantes aux distributions exponentielles et après intégration, on a :

$$\phi_{k+n}(t | k ; t') = \lambda_{k+1} \sum_{i=k+2}^{k+n} \frac{\eta_{i,k+n}^{k+1}}{(\lambda_i - \lambda_{k+1})} \{ \exp[-\lambda_{k+1}(t - t')] - \exp[-\lambda_i(t - t')] \} \tag{3.24}$$

Cette dernière équation correspond à la probabilité d'avoir un $(k+n)^e$ bris durant l'intervalle $[t, t+dt]$, sachant que le k^e bris est survenu au temps t_k .

3.4.2 Nombre moyen de bris conditionnel à un historique donné pour le modèle de bris général

Le nombre moyen de bris par unité de temps $M(t|k; t')$, considérant que k bris se sont produits durant la période $[t_0, t']$ ($t > t'$), aux temps $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ (figure 3.2), est donné par la relation suivante :

$$M(t|k; t') = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_{k+n}(t|k; t') \quad (3.25)$$

Pour estimer la probabilité d'occurrence d'un $(k+n)^e$ bris durant l'intervalle $[t, t'']$ (voir figure 3.2), $\phi_{k+n}(t, t''|k; t')$, considérant que k bris se sont produits durant la période $[t_0, t']$, on intègre $\phi_{k+n}(t|k; t')$ (équation 3.22 pour $n=1$ et équation 3.24 pour $n>1$) et on trouve respectivement pour le cas où $n=1$ et $n>1$:

$$\phi_{k+1}(t, t''|k; t') = \exp[-\lambda_{k+1}(t-t')] - \exp[-\lambda_{k+1}(t''-t')] \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} \phi_{k+n}(t, t''|k; t') = \sum_{i=k+2}^{k+n} \frac{\eta_{i, k+n}^{k+1}}{(\lambda_i - \lambda_{k+1})} \{ & [\exp[-\lambda_{k+1}(t-t')] - \exp[-\lambda_{k+1}(t''-t')]] \\ & - \frac{\lambda_{k+1}}{\lambda_i} [\exp[-\lambda_i(t-t')] - \exp[-\lambda_i(t''-t')]] \} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Ces deux dernières équations permettent donc d'estimer la probabilité d'avoir un $(k+n)^e$ bris ($n \geq 1$), durant un intervalle de temps $[t, t'']$, considérant que k bris sont survenus durant la période $[t_0, t']$.

La figure 3.3 présente un exemple du calcul de la probabilité conditionnelle d'apparition d'un bris d'ordre n ($n=1, 2$ et 3), sachant qu'un premier bris ($k=1$)

s'est produit durant la période $[t_0, t']$ (modèle de bris avec $m=1$). Dans cet exemple, on considère $t'=30$ ans et $t''=t+1$, c'est-à-dire que le calcul des probabilités conditionnelles s'effectue sur un intervalle de temps d'une année.

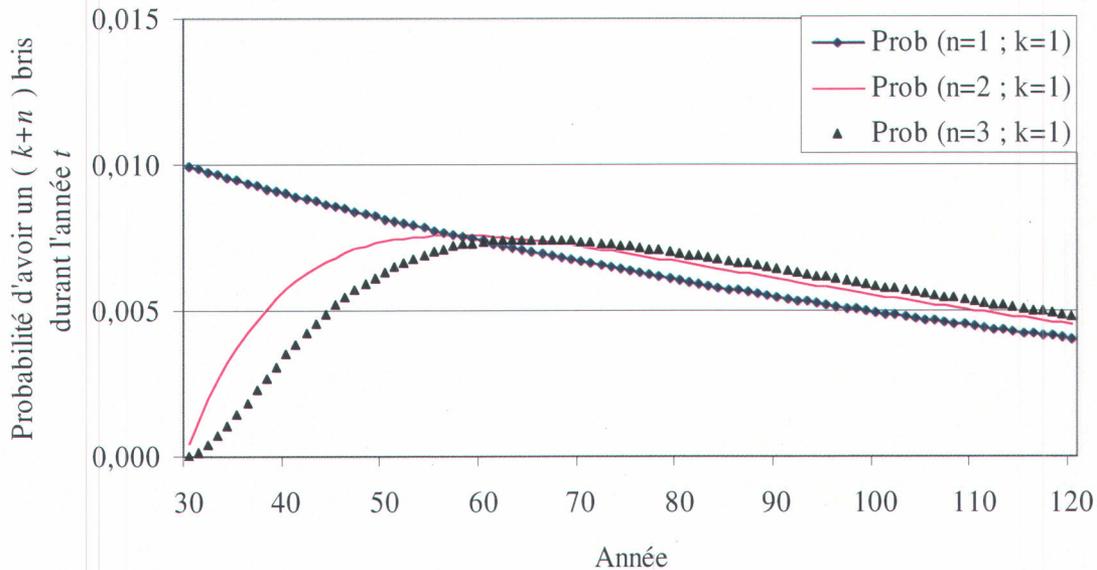


Figure 3.3 Probabilité d'avoir un bris d'ordre n ($n=1, 2$ ou 3), durant l'intervalle $[t, t+1]$ avec ($t > 30$ ans) conditionnelle à l'apparition d'un bris d'ordre $k=1$, durant l'intervalle $[0, 30$ ans] ($\lambda_2=0.01, \lambda_3=0.09, \dots, \lambda_k=\lambda_{k-1}+0.08$)

3.4.3 Nombre moyen de bris pour le modèle de bris avec λ linéaire

En supposant une conduite se trouvant dans la période exponentielle et que le bris d'ordre m marque la fin de la période non exponentielle, Mailhot *et al.* (2003) ont montré, en utilisant un modèle avec λ linéaire (équation 3.18), que le nombre de bris moyen, $M(t|t_m)$, par unité de temps, considérant que le m^e bris s'est produit au temps t_m , peut s'écrire sous la forme suivante :

$$M(t|t_m) = \lambda_{m+1} \exp[\alpha(t - t_m)] \quad (3.28)$$

Cette relation repose sur l'hypothèse que des distributions exponentielles sont utilisées pour décrire les intervalles de temps entre les bris pour $k > m$, et que les λ_j sont liés linéairement à l'ordre de bris (équation 3.18).

En considérant la contribution des périodes exponentielle et non exponentielle, le nombre moyen de bris, $M(t)$, par unité de temps, s'écrit :

$$\begin{aligned} M(t) &= \sum_{k=1}^m \phi_k(t) + \sum_{k=m+1}^{\infty} \phi_k(t) \\ &= \sum_{k=1}^m \phi_k(t) + \int_{t_0}^t dt_m \phi_m(t_m) M(t|t_m) \end{aligned} \quad (3.29)$$

où :

$\phi_k(t)$: *fdp* décrivant l'occurrence du k^e bris.

En remplaçant l'équation (3.28) dans (3.29), le nombre moyen de bris par unité de temps, dans le cas où $m=1$ et en considérant une distribution f_1 pour le temps d'occurrence du premier bris, s'écrit :

$$M(t) = f_1(t) + \lambda_2 \exp(\alpha t) \int_{t_0}^t dt_1 f_1(t_1) \exp(-\alpha t_1) \quad (3.30)$$

Si on considère le nombre moyen de bris durant un intervalle $[t, t']$, $M(t, t')$, on intègre l'équation de $M(t)$ (équation 3.30) et on obtient l'équation suivante :

$$M(t, t') = \int_t^{t'} dt'' f_1(t'') + \lambda_2 \int_t^{t'} dt'' \exp(\alpha t'') \left[\int_{t_0}^{t''} dt_1 f_1(t_1) \exp(-\alpha t_1) \right] \quad (3.31)$$

Cette dernière expression donne une estimation du nombre moyen de bris à survenir pendant l'intervalle $[t, t']$, considérant un modèle où $m=1$, où les temps entre le premier bris et la date d'installation sont décrits par une distribution f_1 et où les bris subséquents ($k > 1$) sont décrits par des distributions exponentielles dont les paramètres sont liés par la relation (3.18).

3.4.3.1 Nombre moyen de bris conditionnel à l'apparition de k bris sur l'intervalle $[t_0, t']$

Mailhot *et al.* (2003) ont montré que lorsqu'on considère une dépendance linéaire de λ en fonction de l'ordre de bris, le nombre moyen de bris durant un intervalle $[t, t + dt]$ conditionnel à l'apparition de k bris avant le temps t' ($t' > t_m$) pouvait se réécrire sous une forme exponentielle avec un coefficient égal au paramètre de la distribution exponentielle du $(k + 1)^{\text{e}}$ bris :

$$M(t | k; t') = \lambda_{k+1} \exp[\alpha(t - t')] \quad t > t' \quad (3.32)$$

3.4.3.2 Nombre moyen de bris conditionnel à l'apparition d'aucun bris sur l'intervalle $[t_0, t']$

Dans le cas particulier où aucun bris n'est observé durant l'intervalle $[t_0, t']$ (c'est dire que $k = 0$), la probabilité d'observer un bris durant un intervalle $[t, t + dt]$ avec $t' < t$ doit être estimée. Le nombre moyen de bris estimé durant l'intervalle $[t, t + dt]$, par unité de temps, dans le cas où $t' = t_0$ est donné par l'équation (3.30).

En considérant un intervalle $[t_0, t']$ durant lequel aucun bris n'est survenu, le nombre moyen de bris dans l'intervalle $[t, t + dt]$, $M(t | k = 0; t')$, conditionnel à l'apparition d'aucun bris sur l'intervalle $[t_0, t']$ peut s'écrire sous la forme suivante :

$$M(t | k = 0; t') = \frac{1}{S_1(t')} \left\{ f_1(t) + \lambda_2 \exp(\alpha t) \int_{t'}^t dt_1 f_1(t_1) \exp(-\alpha t_1) \right\} \quad (3.33)$$

où $S_1(t')$ est la fonction de survie associée au premier bris.

Le nombre de bris moyen dans un intervalle $[t, t'']$, $M(t, t'' | k = 0; t')$, sachant qu'aucun bris n'a été observé dans l'intervalle $[t_0, t']$, est donc :

$$\begin{aligned}
 M(t, t'' | k = 0; t') &= \int_t^{t''} dt_2 M(t_2 | k = 0; t') \\
 &= \frac{I}{S_1(t')} \left\{ \int_t^{t''} dt_2 f_1(t_2) + \lambda_2 \int_t^{t''} dt_2 \exp(at_2) I(t_2, t') \right\} \quad (3.34)
 \end{aligned}$$

avec :

$$I(t_2, t') = \int_t^{t_2} dt_1 f_1(t_1) \exp(-\alpha t_1)$$

L'estimation de l'intégrale dans le cas général nécessitera l'utilisation d'une méthode numérique.

3.4.4 Résumé

Dans la section 3.4, il est considéré que les temps s'écoulant entre les bris d'ordre $(j-1)$ et les bris d'ordre (j) sont assimilés à des variables aléatoires, décrites par des fonctions de densité de probabilité. Le processus de vieillissement d'une conduite est divisé en deux périodes. On utilise, dans la première période, une distribution non exponentielle (par exemple la distribution Weibull), et dans la seconde, des distributions exponentielles. Les temps entre les bris dans cette seconde période sont décrits par des distributions exponentielles de paramètres λ_j , où j est l'ordre de bris. Un ordre de bris critique sépare ces deux périodes ($m=1$ par exemple) et t_m marque la fin de la période non exponentielle.

Lorsqu'on considère le cas où, au temps présent t' , ($k \geq 1$) bris se sont déjà produits sur un segment de conduite, aux temps $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ et qu'aucun autre bris n'est apparu entre le temps du $(k)^e$ bris, t_k , et le temps présent t' , l'analyse de la modélisation des probabilités d'occurrence des bris permet de retenir essentiellement deux choses :

- 1) Dans le cas du modèle de bris linéaire où les paramètres λ_j décrivant les distributions exponentielles sont linéairement dépendants de l'ordre de bris, le nombre moyen de bris durant un intervalle $[t, t + dt]$ conditionnel à l'apparition de k bris avant le temps présent t' ($t' > t_m$) peut s'écrire sous une forme exponentielle, avec un coefficient égal au paramètre de la distribution exponentielle du $(k+1)^e$ bris (équation 3.32).

- 2) Dans le cas du modèle de bris général, où les valeurs des paramètres λ_j sont quelconques, la formule de l'équation (3.25) serait mieux adaptée pour le calcul du nombre moyen de bris par unité de temps $M(t|k; t')$, considérant que k bris se sont produits aux temps $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$, durant la période $[t_0, t']$ ($t > t'$). Cette formule représente la somme de la probabilité d'avoir un $(k+1)^e$ bris durant l'intervalle $[t, t + dt]$ (équation 3.22) et la probabilité d'avoir un $(k+n)^e$ bris ($n > 1$) (équation 3.24), sachant que le $(k)^e$ bris est survenu au temps t_k .

3.5 Description du modèle de bris Weibull- Exponentiel

Le modèle de bris qui sera testé dans cette thèse et utilisé dans les chapitres suivants (chapitres 4, 5, 9, 10 et 11) est une combinaison des distributions Weibull et exponentielle. La distribution Weibull est utilisée pour modéliser les temps d'occurrence du premier bris et les distributions exponentielles, de paramètres λ_j , sont utilisées pour modéliser les temps d'occurrence des bris d'ordre j supérieurs à un. Les paramètres des distributions exponentielles sont reliés à l'ordre du bris par une relation linéaire, de paramètre α . Le Tableau 3.1 présente les paramètres et les types de distributions utilisés pour chaque ordre de bris.

Tableau 3.1 Paramètres des distributions pour chaque ordre de bris

Ordre de bris	Types de distributions	Paramètres
Premier	Weibull	θ, β (voir équation 3.7)
Second	Exponentielle	λ_2 (voir équation 3.9)
Troisième	//	$\lambda_3 = \lambda_2 + \alpha$
.	//	
Nième	//	$\lambda_n = \lambda_{n-1} + \alpha = \lambda_2 + \alpha(n-2) \quad n \geq 2$

Les historiques de bris sont générés aléatoirement pour chaque conduite du réseau à partir de paramètres initiaux connus. Les deux équations suivantes sont utilisées, la première permet de générer le temps d'occurrence du premier bris et la seconde le temps d'occurrence des bris d'ordre supérieur ou égal à deux :

$$t_1 = [-\theta \log(1-x)]^{1/\beta} + t_{0i} \quad (3.35)$$

$$t_j = t_{j-1} + \left[-\left(\frac{1}{\lambda_j}\right) \log(1-x) \right] \quad (3.36)$$

où :

t_{0i} : date d'installation de la conduite i (on suppose la conduite installée à $t = 0$)

t_1 : temps d'occurrence du premier bris

θ, β : paramètres de la distribution Weibull

x : nombre aléatoire compris entre 0 et 1

t_j : temps d'occurrence du bris d'ordre j

λ_j : paramètre de la distribution exponentielle du bris d'ordre j

3.6 Fonction coût pour une conduite, cas particulier d'un modèle de bris avec paramètres linéairement dépendants de l'ordre de bris

Afin d'alléger les notations de cette section, l'indice de la conduite n'est pas considéré. Pour déterminer un temps optimal T_f^* pour le remplacement d'une conduite ayant enregistré plusieurs bris, on définit la fonction coût total $C_{Tot}(T_f | k)$. Cette fonction doit inclure le coût de réparation des bris, depuis l'installation de la conduite jusqu'au moment de son remplacement, $C_B(T_f | k)$, et le coût du remplacement au temps T_f , $C_R(T_f)$.

On définit les temps suivants : t_0 , le temps d'installation de la conduite; t' , le temps présent; t_a , le temps d'actualisation des coûts et T_f , le temps de remplacement de la conduite. La figure 3.4 présente ces différents temps.

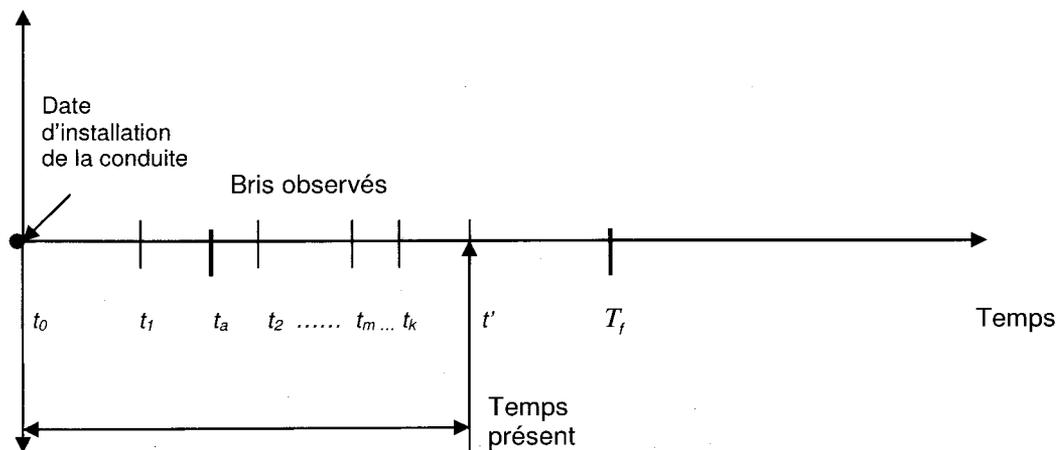


Figure 3.4 Axe des temps pour l'analyse du coût d'une conduite ayant subi k bris

En supposant une notation continue dans cette partie, la fonction coût de remplacement de la conduite au temps T_f s'écrit :

$$C_R(T_f) = C_r \ell \exp[-r (T_f - t_a)] \quad (3.37)$$

où :

- C_r : coût du remplacement de la conduite par mètre linéaire (\$/m);
- ℓ : longueur de la conduite (m);
- r : équivalent continu du taux d'actualisation;
- T_f : temps de remplacement.

On suppose une dépendance linéaire du coût de remplacement par rapport à la longueur. Le coût de réparation des bris depuis l'installation de la conduite au temps t_0 , jusqu'à son remplacement, s'écrit :

$$C_B(T_f | k) = C_b \sum_{i=1}^k \exp[-r (t_i - t_a)] + C_b \int_{t'}^{T_f} dt M(t | k ; t') \exp[-r (t - t_a)] \quad (3.38)$$

où :

- C_b : coût de réparation d'un bris (\$/bris).

Le premier terme du membre de droite correspond aux coûts de réparation des k bris enregistrés avant le temps présent (t'), et le second terme, qu'on note $\bar{C}_B(T_f | k)$, correspond au coût de la maintenance du temps présent jusqu'au remplacement de la conduite au temps (T_f). Ce coût est estimé à partir du nombre moyen de bris attendu entre t' et T_f . Ainsi, la fonction coût total $C_{Tot}(T_f | k)$ s'écrit :

$$C_{Tot}(T_f | k) = C_r \ell \exp[-r (T_f - t_a)] + C_b \sum_{i=1}^k \exp[-r (t_i - t_a)] + C_b \int_{t'}^{T_f} dt M(t | k ; t') \exp[-r (t - t_a)] \quad (3.39)$$

3.6.1 Fonction coût avec un modèle de bris linéaire, pour une conduite ayant subi k bris

En remplaçant le nombre moyen de bris, par unité de temps, $M(t|k; t')$ défini par l'équation (3.32), dans le coût moyen des réparations futures $\bar{C}_B(T_f|k)$, donné par le second terme de l'équation (3.38), on obtient :

$$\bar{C}_B(T_f|k) = C_b \int_{t'}^{T_f} dt \lambda_{k+1} \exp[\alpha(t-t')] \exp[-r(t-t_a)] \quad (3.40)$$

Soit après intégration :

$$\bar{C}_B(T_f|k) = C_b \lambda_{k+1} \exp(r t_a) \exp(-\alpha t') \frac{1}{(\alpha-r)} \left\{ \exp[T_f(\alpha-r)] - \exp[t'(\alpha-r)] \right\}$$

En multipliant par $\exp(-\alpha t')$ et après simplification :

$$\bar{C}_B(T_f|k) = C_b \frac{\lambda_{k+1}}{(\alpha-r)} \exp(r t_a) \exp(-r t') \left\{ \exp[(T_f - t')(\alpha-r)] - 1 \right\} \quad (3.41)$$

Au temps $T_f = t'$, le coût moyen $\bar{C}_B(T_f|k)$ s'annule. En remplaçant l'équation précédente dans la fonction coût de réparation des bris, $C_B(T_f|k)$, on a :

$$C_B(T_f|k) = C_b \sum_{i=1}^k \exp[-r(t_i - t_a)] + C_b \frac{\lambda_{k+1}}{(\alpha-r)} \exp(r t_a) \exp(-r t') \left\{ \exp[(T_f - t')(\alpha-r)] - 1 \right\} \quad (3.42)$$

Ainsi, la fonction coût total $C_{Tot}(T_f|k)$ s'écrit :

$$C_{Tot}(T_f|k) = C_r \ell \exp[-r(T_f - t_a)] + C_b \sum_{i=1}^k \exp[-r(t_i - t_a)] + C_b \frac{\lambda_{k+1}}{(\alpha-r)} \exp(r t_a) \exp(-r t') \left\{ \exp[(T_f - t')(\alpha-r)] - 1 \right\} \quad (3.43)$$

Pour une conduite ayant subi k bris ($k > 0$) depuis son installation ($t_0 = 0$), jusqu'au temps présent (t'), le coût total actualisé au temps ($t_0 = t_a = 0$), incluant

le coût de la réparation des bris jusqu'au temps (T_f) et le coût du remplacement au temps (T_f), est :

$$C_{Tot}(T_f | k) = C_r \ell \exp[-r(T_f)] + C_b \sum_{i=1}^k \exp(-r t_i) + C_b \frac{\lambda_{k+1}}{\alpha - r} \exp(-r t') \left\{ \exp[(T_f - t')(\alpha - r)] - 1 \right\} \quad (3.44)$$

3.6.1.1 Estimation du temps optimal de remplacement d'une conduite ayant subi k bris

Pour obtenir le moment optimal de remplacement d'une conduite T_f^* , on dérive la fonction coût total $C_{Tot}(T_f | k)$ (équation 3.44) par rapport à T_f et on a :

$$\frac{dC_{Tot}(T_f | k)}{dT_f} = -r C_r \ell \exp[-r(T_f)] + C_b \frac{\lambda_{k+1}}{(\alpha - r)} \exp(-r t') (\alpha - r) \exp[(T_f - t')(\alpha - r)] \quad (3.45)$$

Le minimum de la fonction coût est obtenu en posant la dérivée par rapport à (T_f), égale à zéro. Après simplification en multipliant par $\exp[r(T_f)]$, on trouve :

$$T_f^* = t' + \frac{1}{\alpha} \log \left(\frac{r C_r \ell}{C_b \lambda_{k+1}} \right) \quad (3.46)$$

Pour évaluer correctement le temps de remplacement identifié par l'équation 3.46, la valeur du paramètre coût de réparation d'un bris nécessite une estimation aussi précise que celle que l'on apporte au paramètre λ_{k+1} .

En utilisant une notation discrète et en adoptant une relation exponentielle pour décrire l'évolution du nombre de bris par unité de longueur par rapport au temps (voir équation 2.2), Shamir et Howard (1979) ont trouvé le temps optimal de remplacement suivant :

$$T_f^* = t_0 + \frac{1}{A} \log \left[\frac{\log(1 + R) C_r}{N(t_0) C_b} \right] \quad (3.47)$$

où :

- t_0 : année d'installation de la conduite ou la première année pour laquelle les données sont disponibles;
- $N(t_0)$: nombre de bris par unité de longueur pour l'année t_0 (bris/an);
- A : coefficient de croissance du taux de bris (1/an);
- R : taux d'actualisation (1/an);
- C_r : coût de remplacement d'une conduite de 1 000 pi de longueur (\$);
- C_b : coût de réparation d'un bris (\$).

L'équation (3.46) ressemble à l'équation de Shamir et Howard si l'on considère les valeurs suivantes : $\alpha = A$ et $\lambda_{k+1} = N(t_0)$. L'avantage d'utiliser l'équation 3.46 est que cette dernière tient compte du nombre de bris enregistrés par cette même conduite pour évaluer le temps optimal de remplacement.

3.6.1.2 Exemple d'application

On suppose une conduite possédant les caractéristiques présentées au Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Valeurs utilisées pour l'exemple d'application considéré

Variabes	Abréviatiion	Valeur	Unité
Longueur de la conduite	ℓ	100	mètre
Coût de réparation d'un bris	C_b	7 500	\$/bris
Coût unitaire du remplacement	C_r	600	\$/mètre
Taux d'actualisation	r	0,10	1/an
Année d'installation de la conduite	t_0	0	an
Temps présent	t'	30	an
Nombre de bris enregistrés par la conduite	k	11	bris
Temps d'actualisation	t_a	0	an
Pente de la relation linéaire	α	0,05	an ⁻¹
Paramètre de l'exponentielle	λ_0	0,05	an ⁻¹
Temps optimal de remplacement estimé	T_f^*	37,5	an

Le coût associé à la réparation des bris augmente au fil des années puisque ce coût est cumulatif. Le coût unitaire de remplacement de la conduite est supposé constant, et donc le coût actualisé de remplacement, compte tenu de la période d'amortissement, diminue au fil des années. Le moment optimal pour remplacer la conduite correspond au minimum de la courbe du coût total (figure 3.5), soit ($T_f^* = 38$ ans), 38 ans après l'installation de la conduite pour cet exemple.

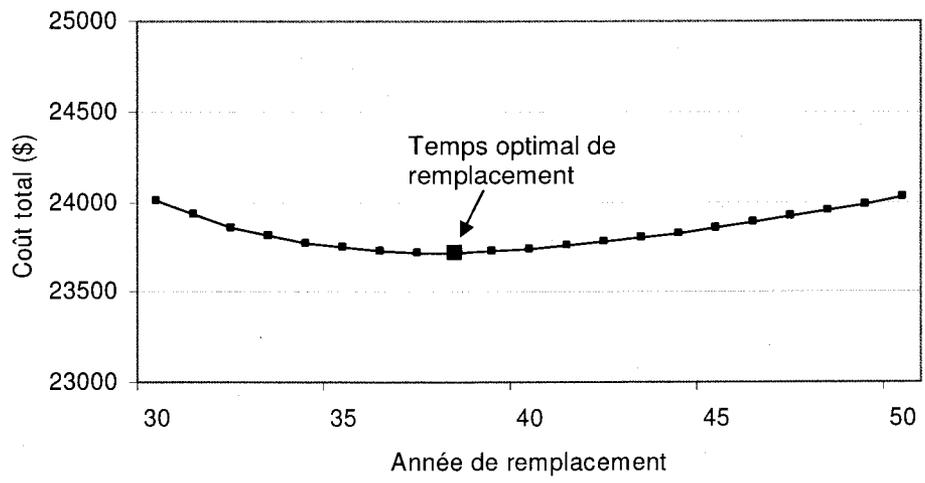


Figure 3.5 Coût total, pour l'exemple de la section 3.6.1.2, en fonction du temps (nombre d'années après l'installation)

3.6.1.3 Influence des coûts indirects sur le moment optimal du remplacement d'une conduite

Dans les sections précédentes, seuls les coûts directs de réparation des bris ont été considérés. Mais le coût réel de réparation d'une conduite peut inclure des coûts indirects comme la valeur des pertes d'eau, la perturbation du trafic routier, l'interruption du service pour les abonnés, etc. Dandy et Engelhardt (2001) ont par exemple introduit un facteur qui tient compte de la position et donc de l'importance des coûts indirects associés à chaque conduite du réseau de distribution.

Pour tenir compte de ces coûts indirects dans notre exemple, on peut supposer qu'ils représenteraient un pourcentage des coûts de réparation des bris. La figure 3.6 présente un exemple de cet impact des coûts indirects. Dans la figure 3.6, le fait de supposer que les coûts indirects représentent 15 % des coûts directs (soit une majoration de 15 % du coût de réparation des bris), fait passer le temps optimal de remplacement de l'année $T_f^* = 38$ à l'année $T_f^* = 35$.

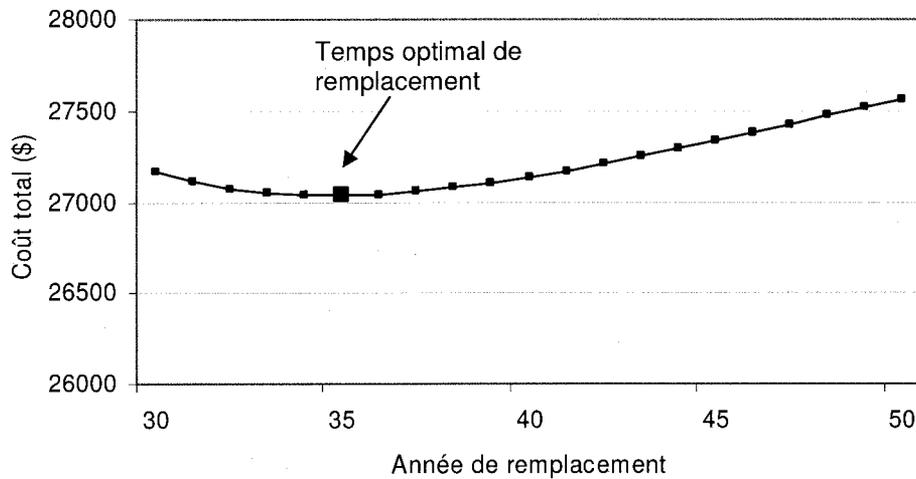


Figure 3.6 Coût total, pour l'exemple de la section 3.6.1.3, en fonction du temps (nombre d'année après l'installation) en considérant les coûts indirects

3.6.2 Fonction coût avec un modèle de bris linéaire, pour une conduite n'ayant subi aucun bris

Pour une conduite n'ayant enregistré aucun bris depuis l'installation jusqu'au temps présent, la fonction coût total $C_{Tot}(T_f | k=0)$ s'écrit :

$$C_{Tot}(T_f | k=0) = C_r \ell \exp(-r T_f) + C_b \int_0^{T_f} dt M(t | k=0 ; t') \exp(-r t) \quad (3.48)$$

où :

$M(t | k=0 ; t')$: nombre moyen de bris dans l'intervalle $[t, t + dt]$ conditionnel à l'apparition d'aucun bris sur l'intervalle $[0, t']$.

En remplaçant $M(t | k = 0 ; t')$ par l'équation 3.33, on trouve l'expression suivante :

$$C_{Tot}(T_f | k = 0) = C_r \ell \exp(-r T_f) + C_b \int_{t'}^{T_f} dt \frac{1}{S_1(t')} \{ [f_1(t) + \lambda_2 \exp(\alpha t) I(t, t')] \exp(-r t) \}$$

avec : (3.49)

$$I(t, t') = \int_{t'}^t dt_1 f_1(t_1) \exp(-\alpha t_1)$$

La résolution de l'équation se fera généralement de façon numérique.

4. ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE DE BRIS PAR INFÉRENCE BAYÉSIENNE

Ce chapitre est consacré à l'estimation des paramètres du modèle de bris qui a été présenté au chapitre 3 et qui est intégré dans le modèle développé pour la planification des interventions en réseau. Une méthodologie basée principalement sur l'approche bayésienne (AB) est utilisée dans ce chapitre pour l'estimation des paramètres du modèle de bris.

L'AB est basée sur le théorème de Bayes. Plusieurs livres ont déjà été consacrés à ce sujet, parmi lesquels : Martz et Waller (1982); Press (1989); Robert (1992); Gelman *et al.* (2000). L'AB a déjà été utilisée en hydrologie et en environnement (Campbell *et al.*, 1999; Wang, 2001; Torre *et al.*, 2001). Pour les réseaux de distribution, on trouve l'étude de Watson *et al.* (2001a,b) qui ont développé un système d'aide à la décision pour assister les gestionnaires dans l'identification des politiques de gestion des réseaux. Le système développé par ces auteurs regroupe deux éléments : le premier est un modèle statistique bayésien utilisé pour estimer un taux de bris, et le second est une simulation d'événements discrets qui a pour but de tester différents scénarios de maintenance (comme, par exemple : remplacer une conduite après un certain nombre de bris, remplacer lorsque le taux de bris excède une valeur critique, etc.)

Ce chapitre est subdivisé en trois sections. Dans la section 4.1, on présente le théorème de Bayes. La section 4.2 décrit les estimateurs bayésiens comme la moyenne et le maximum de la distribution de probabilités *a posteriori*. La dernière section 4.3 décrit l'application de l'AB au modèle de bris utilisé dans cette thèse.

4.1 Théorème de Bayes

Le théorème de Bayes stipule que, pour une distribution des paramètres $\bar{\theta}$, ($\bar{\theta}$ peut également ne représenter qu'un seul paramètre et dans ce cas, on note θ)

notant par exemple cette distribution $P(\bar{\theta})$ (dite *a priori*) qui définit l'information disponible sur ces paramètres, et une fonction de vraisemblance $\mathcal{L}(\bar{\theta}|\tilde{Z})$ qui résume toute l'information sur $\bar{\theta}$ disponible dans les observations \tilde{Z} , la distribution de $\bar{\theta}$ conditionnellement à \tilde{Z} , a pour fonction de densité :

$$P(\bar{\theta}|\tilde{Z}) = \frac{\mathcal{L}(\bar{\theta}|\tilde{Z}) P(\bar{\theta})}{\int_{\Omega_{\bar{\theta}}} \mathcal{L}(\bar{\theta}|\tilde{Z}) P(\bar{\theta}) d\bar{\theta}} \quad (4.1)$$

où :

$\Omega_{\bar{\theta}}$: espace des valeurs possibles de $\bar{\theta}$

Le dénominateur est une constante représentant la distribution marginale de \tilde{Z} , notée $P(\tilde{Z})$, qui ne dépend pas de $\bar{\theta}$. On peut donc écrire :

$$P(\bar{\theta}|\tilde{Z}) \propto \mathcal{L}(\bar{\theta}|\tilde{Z}) P(\bar{\theta}) \quad (4.2)$$

Le théorème de Bayes permet de passer de la distribution *a priori* $P(\bar{\theta})$, à une nouvelle distribution $P(\bar{\theta}|\tilde{Z})$, dite distribution *a posteriori*, qui intègre les informations apportées par les observations \tilde{Z} . La révision des distributions *a priori* – *a posteriori* est illustrée par la figure 4.1.

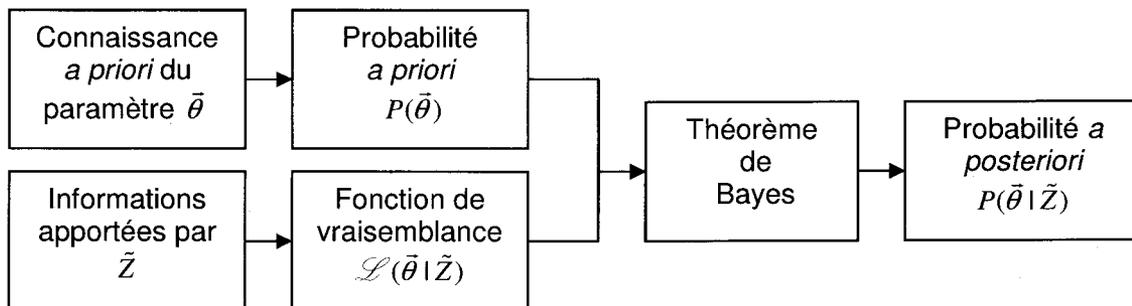


Figure 4.1 Distributions *a priori* et *a posteriori*

La distribution *a priori* représente une expression de notre connaissance de la quantité inconnue (les paramètres) avant prise en compte des données (Tanner, 1996). On distingue deux principaux types de distributions possédant des

propriétés particulières (Martz et Waller, 1982) : les distributions *a priori* conjuguées et les distributions non informatives.

Une distribution *a priori* conjuguée a l'avantage d'avoir une distribution *a posteriori* qui a la même forme que la distribution *a priori*. Les deux distributions appartiennent à la même famille de distribution (cas de la famille des exponentielles, Robert 1992). Lorsqu'aucune information n'est disponible sur le paramètre ou que l'information est relativement très limitée, on peut utiliser des distributions non informatives. La distribution uniforme, $\mathcal{U}[a,b]$, est souvent utilisée puisqu'elle attribue la même probabilité d'occurrence à toutes les valeurs de paramètre compris dans l'intervalle $[a,b]$.

D'après Robert (1992), l'aspect le plus délicat, le plus critiquable et le plus critiqué de l'analyse bayésienne est celui du choix de la distribution *a priori* des paramètres. Lorsque l'information n'est pas très abondante, il peut être nécessaire d'effectuer une analyse de sensibilité aux distributions *a priori*.

4.2 Estimateurs bayésiens

4.2.1 Maximum de la distribution de probabilité *a posteriori*

Le résultat de l'approche bayésienne est une distribution reflétant les probabilités d'occurrence des différentes valeurs du paramètre θ , considérant la distribution *a priori* de ce paramètre et l'information contenue dans les observations \tilde{Z} .

Une façon d'estimer la valeur du paramètre θ serait de choisir $\tilde{\theta}$, la valeur qui correspond à la valeur du paramètre qui est la plus probable, c'est-à-dire la valeur qui correspond au maximum de la distribution de probabilité *a posteriori*.

$$P(\tilde{\theta} | \tilde{Z}) = \underset{\tilde{\theta}}{\text{Max}} P(\tilde{\theta} | \tilde{Z}) \quad (4.3)$$

Comme le dénominateur de la fraction du théorème de Bayes (voir équation 4.1) est indépendant du paramètre θ , maximiser $P(\bar{\theta}|\tilde{Z})$ revient à chercher le maximum de la valeur du produit de la fonction de vraisemblance $\mathcal{L}(\bar{\theta}|\tilde{Z})$ par la distribution *a priori*. Si, de plus, la distribution *a priori* du paramètre est uniforme, on obtient le même estimateur que celui obtenu avec la méthode du maximum de vraisemblance, car la distribution *a priori* est indépendante de θ . Cela revient donc à maximiser la fonction de vraisemblance $\mathcal{L}(\bar{\theta}|\tilde{Z})$.

4.2.2 Moyenne de la distribution de probabilité *a posteriori*

Pour une distribution *a posteriori* $P(\bar{\theta}|\tilde{Z})$, l'estimateur bayésien de la moyenne $\bar{\theta}$ s'écrit :

$$\bar{\theta} = \int_{\Omega_{\theta}} \theta P(\bar{\theta}|\tilde{Z}) d\theta = \int_{\Omega_{\theta}} \theta \frac{\mathcal{L}(\bar{\theta}|\tilde{Z}) P(\bar{\theta})}{P(\tilde{Z})} d\theta = \frac{\int_{\Omega_{\theta}} \theta \mathcal{L}(\bar{\theta}|\tilde{Z}) P(\bar{\theta}) d\theta}{\int_{\Omega_{\theta}} \mathcal{L}(\bar{\theta}|\tilde{Z}) P(\bar{\theta}) d\theta} \quad (4.4)$$

Lorsque la distribution *a posteriori* est asymétrique, la moyenne peut sensiblement différer de la valeur la plus probable.

4.3 Estimation des paramètres du modèle de bris

On considère que toutes les observations des temps d'occurrence des j bris enregistrés par la conduite i : $t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,j}$ proviennent de lois de probabilités paramétrées, c'est-à-dire que $t_{i,j}$ suit une loi de densité de probabilité de paramètre inconnu. On utilise toute l'information disponible issue de ces observations pour améliorer notre connaissance du paramètre inconnu. On suppose le premier bris décrit par une distribution de Weibull à deux paramètres et les bris subséquents par des distributions exponentielles (voir section 3.5).

Pour tenir compte de l'ensemble des informations disponibles à l'échelle du réseau, les notations suivantes sont adoptées dans la suite de cette section :

- N : nombre total de conduites considéré;
- i : indice de la conduite;
- t^* : date d'analyse;
- j : indice du bris ($j \geq 1$);
- $t_{i,0}$: date d'installation de la conduite i ;
- $t_{i,j}$: date d'apparition du j^{e} bris subi par la conduite i ;
- n_j : nombre de conduites ayant subi j bris ou plus depuis leurs installation jusqu'au temps d'analyse;
- $\{l_j(k)\}$: liste des numéros de conduites ayant subi j bris ou plus depuis leur installation jusqu'à la date d'analyse. k représente l'indice de cette liste ordonnée en fonction des numéros de conduites;
- $\{r_j(k)\}$: liste des numéros de conduites ayant subi exactement $j-1$ bris depuis leur installation jusqu'à la date d'analyse. k représente l'indice de cette liste ordonnée en fonction des numéros de conduites;
- j_{\max} : ordre de bris maximal pour lequel on veut estimer le paramètre λ_j de la distribution exponentielle.

4.3.1 Estimation des paramètres de la distribution Weibull (bris d'ordre un)

Dans le réseau de N conduites, on considère que n_1 conduites ont subi un premier bris aux temps $t_{i,1}$ avec $i \in \{l_1(k)\}$, et les autres conduites ($N - n_1$) n'ont subi aucun bris aux temps d'analyse t^* (voir la figure 4.2).

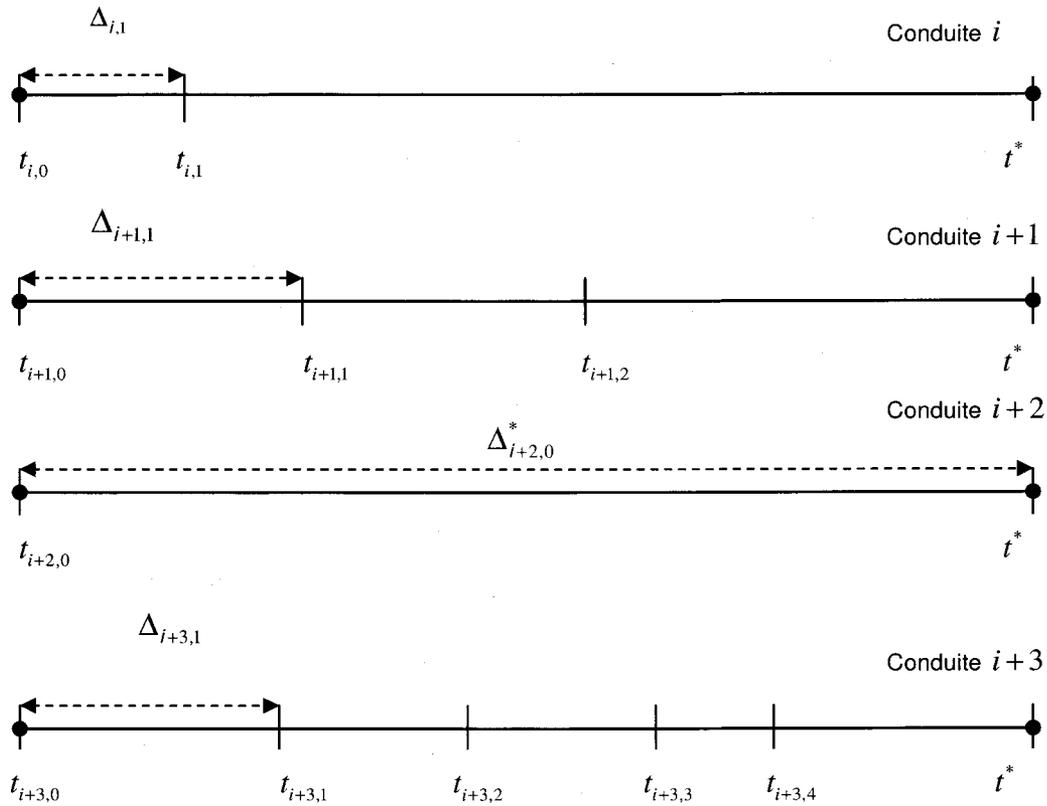


Figure 4.2 Exemple de représentation schématique des temps d'occurrence des bris pour le calcul des paramètres de la distribution Weibull.

En désignant par \tilde{Z} l'information disponible (les valeurs de $n_1, N, t_{i,1}, t^*$), la fonction de vraisemblance s'écrit (Martz et Waller, 1982) :

$$\mathcal{L}(\theta, \beta | \tilde{Z}) = \prod_{i=i_1(1)}^{i_1(n_1)} f(\Delta_{i,1}; \theta, \beta) \prod_{i=i_1(1)}^{i_1(N-n_1)} S(\Delta_{i,0}^*; \theta, \beta) \quad (4.5)$$

où :

$\Delta_{i,1}$: temps écoulé entre le premier bris et la date d'installation de la conduite i : $\Delta_{i,1} = (t_{i,1} - t_{i,0})$, pour les conduites ayant subi au moins un bris;

$\Delta_{i,0}^*$: temps écoulé entre le temps d'analyse et la date d'installation de la conduite i : $\Delta_{i,0}^* = (t^* - t_{i,0})$, pour le cas où aucun bris n'a été enregistré;

$f(\Delta_{i,1}; \theta, \beta)$: fonction de densité de probabilité de la distribution de Weibull pour le premier bris de la conduite i ;

$S(\Delta_{i,0}^*; \theta, \beta)$: fonction de survie correspondante à la distribution de Weibull.

Le premier produit correspond aux conduites ayant subi au moins un bris, et le deuxième produit correspond aux conduites n'ayant subi aucun bris. En remplaçant les deux fonctions précédentes, $f(\Delta_{i,1}; \theta, \beta)$ et $S(\Delta_{i,0}^*; \theta, \beta)$, dans la fonction de vraisemblance, on obtient :

$$\mathcal{L}(\theta, \beta | \tilde{Z}) = \left(\frac{\beta}{\theta}\right)^{n_1} \left[\prod_{i=l_1(1)}^{l_1(n_1)} \Delta_{i,1} \right]^{\beta-1} \exp \left[-\frac{1}{\theta} \left(\sum_{i=l_1(1)}^{l_1(n_1)} (\Delta_{i,1})^\beta + \sum_{i=r_1(1)}^{r_1(N-n_1)} (\Delta_{i,0}^*)^\beta \right) \right] \quad (4.6)$$

En posant $w = \sum_{i=l_1(1)}^{l_1(n_1)} (\Delta_{i,1})^\beta + \sum_{i=r_1(1)}^{r_1(N-n_1)} (\Delta_{i,0}^*)^\beta$ et $v = \prod_{i=l_1(1)}^{l_1(n_1)} \Delta_{i,1}$, on peut réécrire la vraisemblance sous la forme suivante :

$$\mathcal{L}(\theta, \beta | \tilde{Z}) = \left(\frac{\beta}{\theta}\right)^{n_1} v^{\beta-1} \exp \left(-\frac{1}{\theta} w \right) \quad (4.7)$$

On considère des distributions *a priori* uniformes pour θ , $\mathcal{U}(0, \delta_0)$ où $0 \leq \theta \leq \delta_0$, et pour β , $\mathcal{U}(\alpha_0, \beta_0)$ où $\alpha_0 \leq \beta \leq \beta_0$. On suppose que toutes les valeurs possibles de θ (de β) entre 0 et δ_0 (entre α_0 et β_0) sont équiprobables. D'après le théorème de Bayes, la distribution *a posteriori* est donnée par :

$$g(\theta, \beta | \tilde{Z}) = \frac{\mathcal{L}(\theta, \beta | \tilde{Z}) \mathcal{U}(0, \delta_0) \mathcal{U}(\alpha_0, \beta_0)}{\int_0^{\delta_0} d\theta \int_{\alpha_0}^{\beta_0} d\beta \mathcal{L}(\theta, \beta | \tilde{Z}) \mathcal{U}(0, \delta_0) \mathcal{U}(\alpha_0, \beta_0)} \quad (4.8)$$

En remplaçant la fonction de vraisemblance et après simplification, la distribution *a posteriori* s'écrit :

$$g(\theta, \beta | \tilde{Z}) = \frac{\left(\frac{\beta}{\theta}\right)^{n_1} v^\beta \exp\left(-\frac{1}{\theta} w\right)}{\int_{\alpha_0}^{\beta_0} d\beta \beta^{n_1} v^\beta \left[\int_0^{\delta_0} d\theta \left(\frac{1}{\theta}\right)^{n_1} \exp\left(-\frac{1}{\theta} w\right) \right]} \quad (4.9)$$

Après intégration sur θ au dénominateur, on obtient :

$$g(\theta, \beta | \tilde{Z}) = \frac{\left(\frac{\beta}{\theta}\right)^{n_1} v^\beta \exp\left(-\frac{1}{\theta} w\right)}{J_4} \quad (4.10)$$

où :

$$J_4 = \int_{\alpha_0}^{\beta_0} d\beta \beta^{n_1} v^\beta \frac{1}{w^{n_1-1}} \Gamma_c\left(n_1-1, \frac{w}{\delta_0}\right) \quad (4.11)$$

où : $\Gamma_c(a, z)$ est le complément de la fonction Gamma incomplète défini par la relation suivante $\Gamma_c(a, z) = \int_z^\infty dy y^{a-1} \exp(-y) = \Gamma(a) - \Gamma(a, z)$.

4.3.1.1 Valeurs moyennes de θ et β

Les estimateurs ponctuels bayésiens de la moyenne de θ et β sont donnés par les équations suivantes :

$$E(\theta | \tilde{Z}) = \int_{\alpha_0}^{\beta_0} \int_0^{\delta_0} \theta g(\theta, \beta | \tilde{Z}) d\theta d\beta \quad (4.12)$$

$$E(\beta | \tilde{Z}) = \int_{\alpha_0}^{\beta_0} \int_0^{\delta_0} \beta g(\theta, \beta | \tilde{Z}) d\theta d\beta \quad (4.13)$$

Pour le paramètre θ , on aura :

$$E(\theta | \tilde{Z}) = \frac{\int_{\alpha_0}^{\beta_0} d\beta \beta^{n_1} v^\beta \int_0^{\delta_0} \left(\frac{1}{\theta}\right)^{n_1-1} \exp\left(-\frac{1}{\theta} w\right) d\theta}{J_4} \quad (4.14)$$

Après intégration, on trouve :

$$E(\theta | \tilde{Z}) = \frac{\int_{\alpha_0}^{\beta_0} d\beta \beta^{n_1} \frac{1}{w^{n_1-2}} v^\beta \Gamma_c \left(n_1 - 2, \frac{w}{\delta_0} \right)}{J_4} \quad (4.15)$$

De même, l'estimateur de β s'écrit :

$$E(\beta | \tilde{Z}) = \frac{\int_{\alpha_0}^{\beta_0} d\beta \beta^{n_1+1} v^\beta \int_0^{\delta_0} \left(\frac{1}{\theta} \right)^{n_1} \exp \left(-\frac{1}{\theta} w \right) d\theta}{J_4} \quad (4.16)$$

Après simplification, on obtient :

$$E(\beta | \tilde{Z}) = \frac{\int_{\alpha_0}^{\beta_0} d\beta \beta^{n_1+1} \frac{1}{w^{n_1-1}} v^\beta \Gamma_c \left(n_1 - 1, \frac{w}{\delta_0} \right)}{J_4} \quad (4.17)$$

4.3.1.2 Variances de θ et β

Les variances de θ et β sont données par les équations :

$$\text{Var}(\theta | \tilde{Z}) = E(\theta^2 | \tilde{Z}) - [E(\theta | \tilde{Z})]^2 \quad (4.18)$$

$$\text{Var}(\beta | \tilde{Z}) = E(\beta^2 | \tilde{Z}) - [E(\beta | \tilde{Z})]^2 \quad (4.19)$$

où :

$E(\theta^2 | \tilde{Z})$ est donné par $\int_{\alpha_0}^{\beta_0} \int_0^{\delta_0} \theta^2 g(\theta, \beta | \tilde{Z}) d\theta d\beta$ et $E(\beta^2 | \tilde{Z})$ est donné par $\int_{\alpha_0}^{\beta_0} \int_0^{\delta_0} \beta^2 g(\theta, \beta | \tilde{Z}) d\theta d\beta$.

Pour le paramètre θ , $E(\theta^2 | \tilde{Z})$ s'écrit après intégration comme suit :

$$E(\theta^2 | \tilde{Z}) = \frac{\int_{\alpha_0}^{\beta_0} d\beta \beta^{n_1} \frac{1}{w^{n_1-3}} v^\beta \Gamma_c \left(n_1 - 3, \frac{w}{\delta_0} \right)}{J_4} \quad (4.20)$$

Et la variance de θ s'écrit :

$$Var(\theta | \tilde{Z}) = \frac{\int_{\alpha_0}^{\beta_0} d\beta \beta^{n_1} \frac{1}{w^{n_1-3}} v^\beta \Gamma_c \left(n_1 - 3, \frac{w}{\delta_0} \right)}{J_4} - [E(\theta | \tilde{Z})]^2 \quad (4.21)$$

Pour le paramètre β , $E(\beta^2 | \tilde{Z})$ s'écrit après intégration comme suit :

$$E(\beta^2 | \tilde{Z}) = \frac{\int_{\alpha_0}^{\beta_0} d\beta \beta^{n_1+2} \frac{1}{w^{n_1-1}} v^\beta \Gamma_c \left(n_1 - 1, \frac{w}{\delta_0} \right)}{J_4} \quad (4.22)$$

Et la variance de β s'écrit :

$$Var(\beta | \tilde{Z}) = \frac{\int_{\alpha_0}^{\beta_0} d\beta \beta^{n_1+2} \frac{1}{w^{n_1-1}} v^\beta \Gamma_c \left(n_1 - 1, \frac{w}{\delta_0} \right)}{J_4} - [E(\beta | \tilde{Z})]^2 \quad (4.23)$$

4.3.1.3 Valeurs les plus probables de θ et β

Les estimateurs du maximum de probabilité de la distribution *a posteriori* peuvent être obtenus par dérivation par rapport à θ et β du logarithme de la distribution *a posteriori* (voir équation 4.10). On obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{n_1}{\beta} + \text{Log } v - \frac{1}{\theta} \frac{dw}{d\beta} = 0 \\ -\frac{n_1}{\theta} + \frac{1}{\theta^2} w = 0 \end{cases} \quad (4.24)$$

En combinant les deux équations du système précédent, on trouve le système suivant, pour lequel la première équation devra être résolue par une méthode itérative comme, par exemple, la méthode de la sécante :

$$\begin{cases} \frac{n_1}{\beta} + \text{Log } v = \frac{n_1 w'}{w} \\ \theta = \frac{w}{n_1} \end{cases} \quad (4.25)$$

$$\text{où : } w' = \frac{dw}{d\beta}$$

4.3.1.4 Estimation des distributions marginales *a posteriori* des paramètres θ et β

Les distributions marginales *a posteriori* du paramètre θ et du paramètre β sont définies comme suit :

$$g(\theta | \tilde{Z}) = \int_{\alpha_0}^{\beta_0} d\beta g(\theta, \beta | \tilde{Z}) \quad (4.26)$$

$$g(\beta | \tilde{Z}) = \int_0^{\delta_0} d\theta g(\theta, \beta | \tilde{Z}) \quad (4.27)$$

En effectuant le remplacement de la distribution *a posteriori* de (θ, β) , on aura pour θ :

$$g(\theta | \tilde{Z}) = \frac{\left(\frac{1}{\theta}\right)^{n_1} \int_{\alpha_0}^{\beta_0} d\beta \beta^{n_1} v^\beta \exp\left(-\frac{1}{\theta} w\right)}{J_4} \quad (4.28)$$

Pour β , la distribution peut s'écrire sous la forme suivante :

$$g(\beta | \tilde{Z}) = \frac{\int_0^{\delta_0} d\theta \left(\frac{\beta}{\theta}\right)^{n_1} v^\beta \exp\left(-\frac{1}{\theta} w\right)}{J_4} \quad (4.29)$$

Ce qui donne après intégration :

$$g(\beta | \tilde{Z}) = \frac{\beta^{n_1} v^\beta}{J_4 w^{n_1-1}} \Gamma_c\left(n_1 - 1, \frac{w}{\delta_0}\right) \quad (4.30)$$

4.3.2 Estimation des paramètres des distributions exponentielles (bris d'ordre deux ou plus)

On suppose que la distribution décrivant les probabilités d'occurrence des temps entre le premier et le second bris est une distribution exponentielle. Dans le réseau précédent de N conduites (voir la figure 4.2), on considère que sur les n_1 conduites qui ont déjà subi un premier bris, n_2 ont subi un second bris aux temps $t_{i,2}$ avec $i \in \{l_2(k)\}$ et les autres conduites ($n_1 - n_2$) n'ont pas enregistré de second bris aux temps d'analyse t^* avec $i \in \{r_2(k)\}$ (voir la figure 4.3).

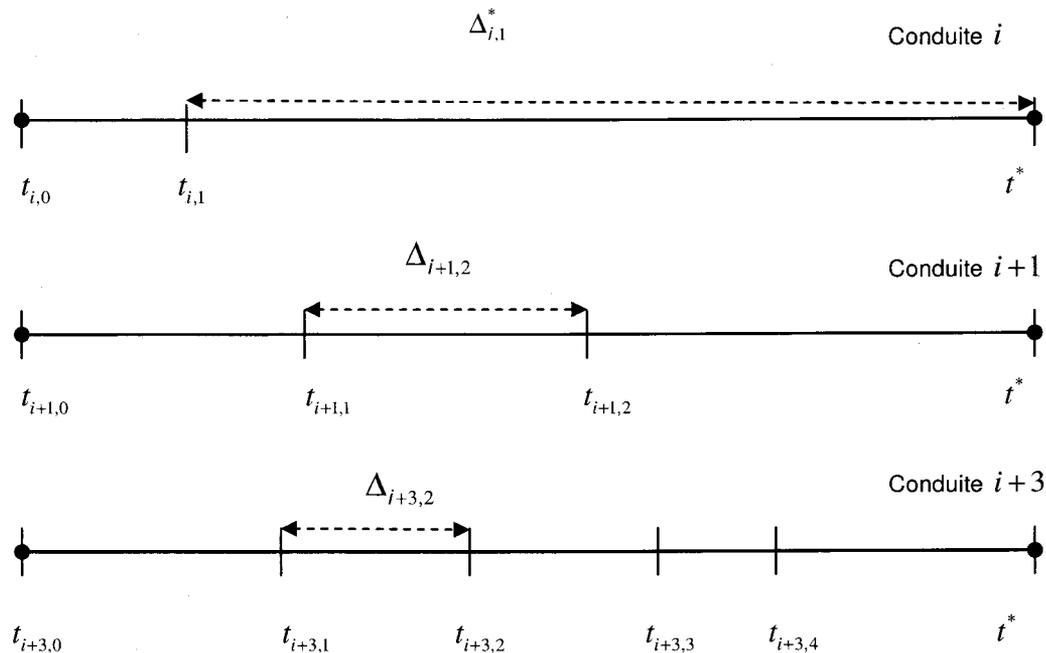


Figure 4.3 Exemple de représentation schématique des temps d'occurrence des bris pour le calcul du paramètre λ_2 de la distribution exponentielle

En désignant par \tilde{Z}_j toute l'information disponible (c'est-à-dire les valeurs de $n_j, n_{j-1}, t_{i,j}, t^*$) pour les bris d'ordre j , et en supposant que les distributions décrivant les probabilités d'occurrence des temps entre le j^{e} et le $(j-1)^{\text{e}}$ bris ($j \geq 2$) soient des distributions exponentielles de paramètres λ_j , la fonction de vraisemblance s'écrit (Martz et Waller, 1982) :

$$\mathcal{L}(\lambda_j | \tilde{Z}_j) = \prod_{i=l_j(1)}^{l_j(n_j)} f(\Delta_{i,j}; \lambda_j) \prod_{i=r_j(1)}^{r_j(n_{j-1}-n_j)} S(\Delta_{i,j-1}^*; \lambda_j) \quad (4.31)$$

où :

$\Delta_{i,j}$: temps écoulé entre le j^e bris et le $(j-1)^e$ bris pour la conduite i ,

$$\Delta_{i,j} = (t_{i,j} - t_{i,j-1}) \quad (j \geq 2);$$

$\Delta_{i,j-1}^*$: temps écoulé entre le temps d'analyse et le temps d'apparition du

$$(j-1)^e \text{ bris pour la conduite } i, \Delta_{i,j-1}^* = (t^* - t_{i,j-1}) \quad (j \geq 2).$$

Le premier produit de l'équation (4.31) correspond aux conduites ayant subi au moins j bris, et le deuxième produit correspond aux conduites ayant subi exactement $(j-1)$ bris. En remplaçant $f(\Delta_{i,j}; \lambda_j)$ par la distribution exponentielle et $S(\Delta_{i,j-1}^*; \lambda_j)$ par la fonction de survie correspondante, la fonction de vraisemblance devient :

$$\mathcal{L}(\lambda_j | \tilde{Z}_j) = \lambda_j^{n_j} \exp \left[-\lambda_j \sum_{i=l_j(1)}^{l_j(n_j)} \Delta_{i,j} \right] \exp \left[-\lambda_j \sum_{i=r_j(1)}^{r_j(n_{j-1}-n_j)} \Delta_{i,j-1}^* \right] \quad (4.32)$$

En posant $\bar{t}_j = \sum_{i=l_j(1)}^{l_j(n_j)} \Delta_{i,j} + \sum_{i=r_j(1)}^{r_j(n_{j-1}-n_j)} \Delta_{i,j-1}^*$:

On a :

$$\mathcal{L}(\lambda_j | \tilde{Z}_j) = \lambda_j^{n_j} \exp(-\lambda_j \bar{t}_j) \quad (4.33)$$

On considère la distribution de type Gamma de paramètres α_0 et β_0 , $g(\lambda_j; \alpha_0, \beta_0)$, pour décrire l'information *a priori* disponible pour le paramètre λ_j . Cette fonction s'écrit :

$$g(\lambda_j; \alpha_0, \beta_0) = \frac{\lambda_j^{\alpha_0-1}}{\beta_0^{\alpha_0} \Gamma(\alpha_0)} \exp \left(-\lambda_j \left(\frac{1}{\beta_0} \right) \right) \quad (4.34)$$

Le choix d'une distribution Gamma est à la fois pratique, car elle facilite les calculs, et flexible car elle permet de choisir différentes distributions *a priori* selon

les différentes valeurs de α_0 et β_0 . La figure 4.4 donne la forme de quelques distributions gamma pour différentes valeurs des paramètres α_0 et β_0 .

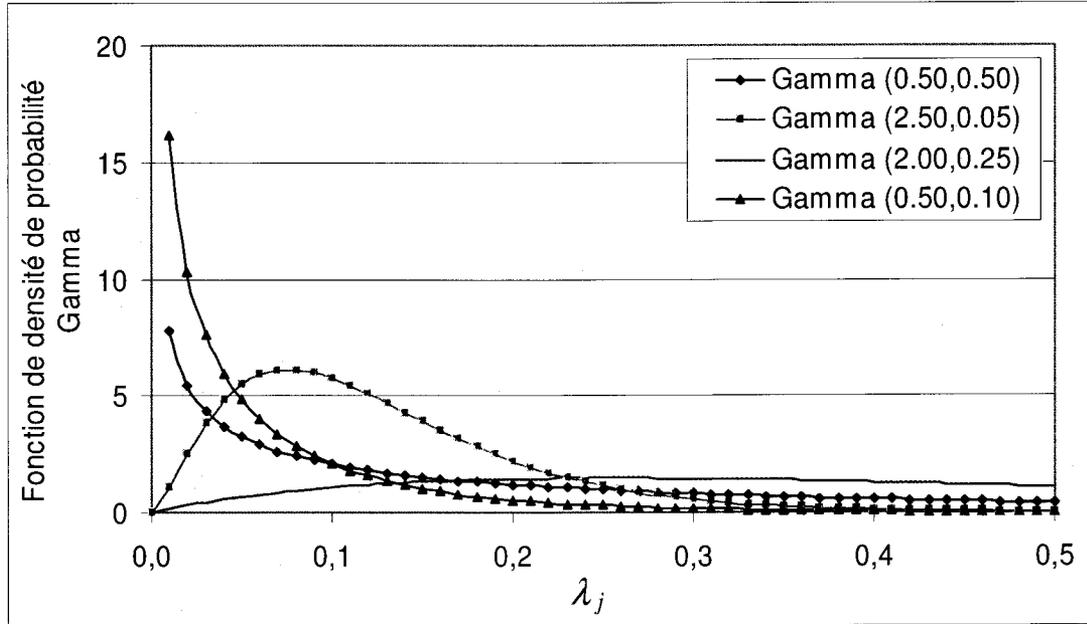


Figure 4.4 Quelques distributions Gamma de paramètres α_0 et β_0

L'application du théorème de Bayes donne la distribution *a posteriori* de λ_j définie par la relation suivante :

$$g(\lambda_j | \tilde{Z}_j) = \frac{\mathcal{L}(\lambda_j | \tilde{Z}_j) g(\lambda_j; \alpha_0, \beta_0)}{\int_0^{\infty} \mathcal{L}(\lambda_j | \tilde{Z}_j) g(\lambda_j; \alpha_0, \beta_0) d\lambda_j} \quad (4.35)$$

On obtient après substitution des expressions pour $\mathcal{L}(\lambda_j | \tilde{Z}_j)$ et $g(\lambda_j; \alpha_0, \beta_0)$:

$$g(\lambda_j | \tilde{Z}_j) = \frac{\lambda_j^{n_j} \exp(-\lambda_j \bar{t}_j) \frac{\lambda_j^{\alpha_0-1}}{\beta_0^{\alpha_0} \Gamma(\alpha_0)} \exp\left[-\lambda_j \left(\frac{1}{\beta_0}\right)\right]}{\int_0^{\infty} \lambda_j^{n_j} \exp(-\lambda_j \bar{t}_j) \frac{\lambda_j^{\alpha_0-1}}{\beta_0^{\alpha_0} \Gamma(\alpha_0)} \exp\left[-\lambda_j \left(\frac{1}{\beta_0}\right)\right] d\lambda_j} \quad (4.36)$$

Après calcul, on montre que la distribution *a posteriori* de λ_j est donnée par :

$$g(\lambda_j | \tilde{Z}_j) = \left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right)^{n_j + \alpha_0} \frac{\lambda_j^{n_j + \alpha_0 - 1}}{\Gamma(n_j + \alpha_0)} \exp \left[-\lambda_j \left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right) \right] \quad (4.37)$$

La distribution *a posteriori* de λ_j , $g(\lambda_j | \tilde{Z}_j)$, représente une distribution de type

Gamma de paramètres $\left(\alpha_0 + n_j, \frac{\beta_0}{1 + \beta_0 \bar{t}_j} \right)$.

4.3.2.1 Valeurs moyennes de la distribution *a posteriori* de λ_j

La moyenne *a posteriori* de λ_j , $\bar{\lambda}_j$, est donnée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_j &= \int_0^{\infty} \lambda_j g(\lambda_j | \tilde{Z}_j) d\lambda_j \\ &= \left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right)^{n_j + \alpha_0} \frac{1}{\Gamma(n_j + \alpha_0)} \left(\int_0^{\infty} d\lambda_j \lambda_j^{n_j + \alpha_0} \exp \left[-\lambda_j \left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right) \right] \right) \end{aligned} \quad (4.38)$$

Après intégration, on trouve :

$$\bar{\lambda}_j = \left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right)^{n_j + \alpha_0} \frac{1}{\Gamma(n_j + \alpha_0)} \frac{\Gamma(n_j + \alpha_0 + 1)}{\left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right)^{n_j + \alpha_0 + 1}} \quad (4.39)$$

Sachant que $\Gamma(n+1) = n \Gamma(n)$, la moyenne *a posteriori* de λ_j se réduit à :

$$\bar{\lambda}_j = \frac{n_j + \alpha_0}{\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j} \quad (4.40)$$

4.3.2.2 Variance de la distribution *a posteriori* de λ_j

La variance de λ_j est définie par la relation suivante :

$$\text{Var}(\lambda_j) = E(\lambda_j^2) - [E(\lambda_j)]^2 \quad (4.41)$$

où :

$$\begin{aligned}
 E(\lambda_j^2) &= \int_0^{\infty} \lambda_j^2 g(\lambda_j | \bar{Z}_j) d\lambda_j \\
 &= \left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right)^{n_j + \alpha_0} \frac{1}{\Gamma(n_j + \alpha_0)} \left(\int_0^{\infty} d\lambda_j \lambda_j^{n_j + \alpha_0 + 1} \exp \left[-\lambda_j \left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right) \right] \right)
 \end{aligned} \quad (4.42)$$

Après intégration, on trouve :

$$E(\lambda_j^2) = \frac{(n_j + \alpha_0)(n_j + \alpha_0 + 1)}{\left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right)^2} \quad (4.43)$$

En utilisant le résultat de la section précédente pour $E(\lambda_j)$, on a :

$$\text{Var}(\lambda_j) = \frac{(n_j + \alpha_0)(n_j + \alpha_0 + 1)}{\left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right)^2} - \frac{(n_j + \alpha_0)^2}{\left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right)^2} \quad (4.44)$$

Après simplification, la variance est :

$$\text{Var}(\lambda_j) = \frac{n_j + \alpha_0}{\left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right)^2} \quad (4.45)$$

4.3.2.3 Valeur de λ_j maximisant la distribution *a posteriori*

L'estimateur du maximum de probabilité de la distribution *a posteriori*, appelé également l'estimateur du maximum de vraisemblance généralisé du paramètre à estimer (Martz et Waller, 1982), a été déterminé en dérivant le logarithme de la distribution *a posteriori*, par rapport à λ_j , et on obtient dans ce cas :

$$\tilde{\lambda}_j = \frac{n_j + \alpha_0 - 1}{\bar{t}_j + \frac{1}{\beta_0}} \quad (4.46)$$

En comparant la valeur du maximum de probabilité de la distribution *a posteriori* avec la valeur de l'estimateur de la moyenne (équation 4.40), on trouve que cette dernière valeur est systématiquement plus grande.

Pour tous les bris d'ordre supérieur à deux ($j \geq 2$), on procède de la même façon pour estimer la moyenne et le maximum de probabilité de la distribution *a posteriori* jusqu'à atteindre un ordre de bris maximal ($j \leq j_{\max}$) qui va dépendre principalement de la quantité d'information disponible, c'est-à-dire les temps d'occurrence des bris d'ordre j et aussi du nombre de conduites ayant enregistré un bris d'ordre j .

Précisons également que la qualité des deux estimateurs des paramètres λ_j pour chaque ordre de bris dépendra de la quantité d'information disponible. Si l'on dispose de beaucoup d'information (longs historiques et/ou grands nombres de conduites, n_j et \bar{t}_j très grands), l'information *a priori* (α_0 et β_0) est supplantée par l'information disponible, et dans ce cas le choix de la distribution *a priori* n'aura que peu d'incidence sur la distribution *a posteriori*.

Pour chaque ordre de bris j , on a supposé que chaque paramètre λ_j de la distribution exponentielle est décrit par une distribution *a priori* de type Gamma de paramètres α_0 et β_0 . La distribution *a posteriori* du paramètre λ_j dans ce cas est aussi une distribution Gamma de paramètres $\alpha_0 + n_j$ et $\frac{\beta_0}{1 + \beta_0 \bar{t}_j}$.

4.3.2.4 Valeurs de λ_j en fonction de l'ordre de bris j

Pour estimer les valeurs de tous les paramètres des bris d'ordre supérieur à l'ordre de bris maximal (j_{\max}) et pour lesquels très peu d'information est disponible, on introduit une relation qui permet de lier l'ordre de bris au paramètre λ_j . La formule de l'équation (4.47) liant λ_j à l'ordre de bris j ($j \geq 2$) est utilisée. Le choix de cette forme provient du fait que λ_j est une fonction monotone croissante de j (le risque croît avec l'ordre de bris) :

$$\lambda_j = a + b j^c \quad (4.47)$$

où :

a, b et c : coefficients estimés par une méthode de régression (on suppose que $b \geq 0$ et $c \geq 0$)

En supposant une distribution *a priori* de type Gamma de paramètres α_0 et β_0 , $g(\lambda_j; \alpha_0, \beta_0)$ pour les paramètres λ_j , la distribution *a posteriori* de la valeur du paramètre λ_j est donnée par l'équation (4.37).

La fonction de vraisemblance pour les valeurs des paramètres λ_j , ($2 \leq j \leq j_{\max}$) s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\{\lambda_j\}) &= \prod_{j=2}^{j_{\max}} g(\lambda_j | \tilde{Z}_j) \\ &= \prod_{j=2}^{j_{\max}} \left[\left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right)^{n_j + \alpha_0} \frac{\lambda_j^{n_j + \alpha_0 - 1}}{\Gamma(n_j + \alpha_0)} \exp \left[-\lambda_j \left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right) \right] \right] \end{aligned} \quad (4.48)$$

En remplaçant la formule de l'équation 4.47 dans la fonction de vraisemblance, on obtient :

$$\mathcal{L}(\{\lambda_j\}, a, b, c) = \prod_{j=2}^{j_{\max}} \left[\left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right)^{n_j + \alpha_0} \frac{(a + b j^c)^{n_j + \alpha_0 - 1}}{\Gamma(n_j + \alpha_0)} \exp \left[-(a + b j^c) \left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right) \right] \right] \quad (4.49)$$

Pour trouver les valeurs des coefficients a, b et c qui maximisent la vraisemblance, on prend le logarithme de la vraisemblance et on dérive par rapport à a, b et c . Après calcul on obtient le système d'équations non linéaires suivant, à trois inconnus, a, b et c , qu'on résout par une méthode itérative comme la méthode de Newton-Raphson.

$$\begin{cases} \sum_{j=2}^{j_{\max}} \left[\frac{n_j + \alpha_0 - 1}{a + b j^c} - \left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right) \right] = 0 \\ \sum_{j=2}^{j_{\max}} \left[\left(\frac{n_j + \alpha_0 - 1}{a + b j^c} - \left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right) \right) j^c \right] = 0 \\ \sum_{j=2}^{j_{\max}} \left[\left(\frac{n_j + \alpha_0 - 1}{a + b j^c} - \left(\frac{1}{\beta_0} + \bar{t}_j \right) \right) j^c \log j \right] = 0 \end{cases} \quad (4.50)$$

5. ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE DE BRIS PAR INFÉRENCE BAYÉSIENNE - APPLICATION À UN RÉSEAU HYPOTHÉTIQUE

Dans ce chapitre, les principaux résultats obtenus lors de l'estimation des paramètres du modèle de bris avec l'approche bayésienne sont présentés. Dans la section 5.1, on présente les distributions *a posteriori* des paramètres associés au premier bris (distribution Weibull), puis les distributions *a posteriori* des paramètres associées aux bris d'ordre supérieur ou égal à deux (distributions exponentielles), puis on montre l'influence du nombre d'années sur les distributions *a posteriori*. Un historique généré à partir du modèle Weibull-Exponentiel est utilisé afin d'illustrer la méthodologie. Précisons que pour cette application, un seul historique est considéré mais que les résultats obtenus sont somme toute représentatifs.

Dans la section 5.2, les résultats des estimateurs associés à la moyenne et au maximum de probabilité des distributions *a posteriori* du modèle de bris sont comparés aux valeurs des paramètres ayant servi à générer les historiques synthétiques de bris.

La section 5.3 présente les résultats de la régression non linéaire qui permet de calculer les paramètres des distributions exponentielles en fonction de l'ordre de bris, et dans la section 5.4, une analyse de l'influence de la taille du réseau (nombre total de conduites) sur la qualité des estimations est développée.

L'analyse des résultats obtenus dans le cadre d'une approche bayésienne est normalement suivie d'une analyse afin d'établir la sensibilité de ces résultats à la distribution *a priori* utilisée. On se limite, dans la section suivante 5.5, à examiner dans quelle mesure les estimateurs du maximum de probabilité sont modifiés lorsqu'on change les paramètres des distributions *a priori*. La section 5.6 permet

de voir l'influence de la distribution *a priori* sur la relation liant les paramètres des distributions exponentielles (λ_i) à l'ordre de bris (i). Finalement, une conclusion et quelques recommandations sont présentées à la section 5.7.

5.1 Distributions *a posteriori* des paramètres

Afin d'illustrer et de valider l'approche, on considère un exemple où les bris sont générés aléatoirement pour chaque conduite du réseau, suivant le modèle linéaire Weibull-Exponentiel, en considérant les valeurs des paramètres présentés au Tableau 5.1.

Tableau 5.1 Paramètres réels des distributions pour chaque ordre de bris

Ordre de bris	Types de distributions	Paramètre	Valeur du paramètre
Premier	Weibull	θ	200,73
		β	1,28
Second	Exponentielle	λ_2	0,05 an ⁻¹
Troisième	//	λ_3	0,10 an ⁻¹
Quatrième	//	λ_4	0,15 an ⁻¹
.	//	.	.
.	//	.	.
N ^e	//	λ_n	$\lambda_{n-1} + 0,05 \text{ an}^{-1}$

Le réseau est constitué de 534 conduites, l'année d'installation est supposée identique pour toutes les conduites du réseau et les dates d'analyse de toutes les conduites sont identiques ($t^* = 30$ ans). Pour l'historique considéré, 187 conduites ont enregistré au minimum un bris sur une période de 30 ans alors que 347 conduites n'ont enregistré aucun bris. Le Tableau 5.2 résume le nombre de conduites ayant enregistré i bris, i allant de 1 à 10, ainsi que le nombre de conduites n'ayant subi aucun bris (n_0), en fonction de la durée de l'historique.

Tableau 5.2 Nombre de conduites ayant subi un nombre de bris i ($1 \leq i \leq 10$) pour un historique de durée donnée

Nombre d'années	n_0	Nombre de conduites ayant enregistré des bris d'ordre 1 à 10									
		n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8	n_9	n_{10}
30	347	187	83	60	33	19	15	10	7	7	4
35	325	209	103	82	50	33	25	20	16	10	8
40	292	242	128	95	72	49	39	32	24	20	18
45	269	265	160	114	91	68	54	42	36	32	26
50	239	295	191	140	106	89	75	62	52	42	36
55	221	313	222	164	131	109	91	78	70	61	54
60	204	330	250	181	146	129	110	97	88	76	74
65	179	355	274	217	179	155	135	120	111	98	88
70	156	378	295	248	215	185	152	138	127	121	111
75	140	394	308	271	234	214	193	170	158	141	130

Pour cet exemple, on utilise toute l'information sur les temps d'apparition de bris pour estimer les paramètres du modèle de bris sur la période de 30 ans. Ensuite on augmente la période de cinq ans et on génère des bris pour chaque conduite à partir de la date du dernier bris enregistré sur la période précédente. On estime alors une autre fois les paramètres des bris en utilisant l'information sur l'état de toutes les conduites du réseau sur une période, cette fois-ci plus grande et de durée égale à $t^* = 35$. Ce processus est répété plusieurs fois comme le montre la figure 5.1.

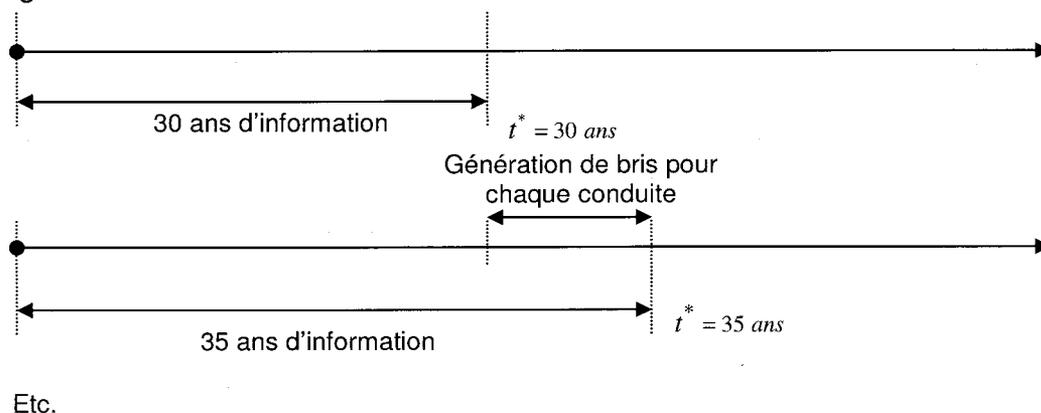


Figure 5.1 Période d'estimation des paramètres du modèle de bris

A mesure que la durée de l'historique augmente, l'estimation des paramètres du modèle de bris sera en principe plus juste. Ainsi, afin de voir cette influence de la durée de l'historique disponible, on pourra comparer les valeurs des paramètres estimés avec les valeurs des paramètres réels présentés au Tableau 5.1.

5.1.1 Distributions *a posteriori* des paramètres θ et β

La distribution *a priori* doit résumer toute l'information sur les paramètres inconnus β et θ avant la prise en compte des données des historiques de bris. Cette information peut provenir des résultats des études effectuées ailleurs ou bien fournies par un expert.

Des distributions uniformes, $U(\beta_0 = 1, \beta_1 = 2)$ pour le paramètre β , et $U(0, \delta_0 = 1000)$ pour le paramètre θ , ont été sélectionnées comme distributions *a priori*. Les distributions *a posteriori* correspondantes des paramètres β et θ (équations 4.30 et 4.28) sont présentées aux figures 5.2 et 5.3. Ces deux figures montrent également l'influence du nombre d'années sur la distribution *a posteriori* des deux paramètres. On voit clairement que plus l'historique est long, plus les distributions se resserrent autour de la valeur utilisée pour générer cet historique. La moyenne pour le paramètre θ est de 272,902 et la moyenne pour le paramètre β est de 1,382, pour un historique de 30 ans.

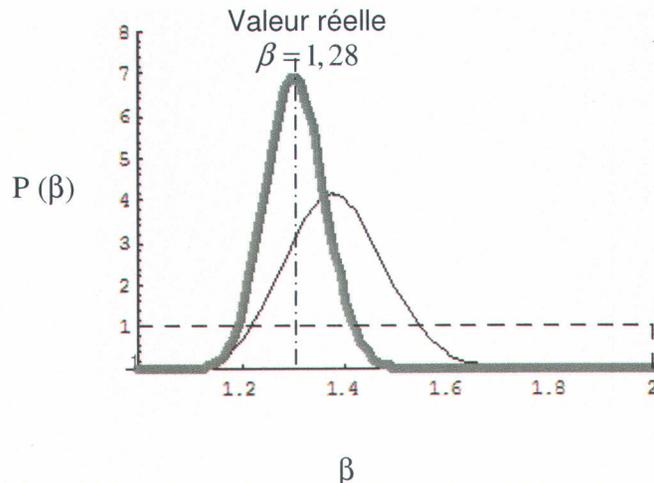


Figure 5.2 Exemple de distribution *a posteriori* pour le paramètre β pour un historique de 30 années (trait fin noir) et un historique de 75 années (trait gros gris). La distribution *a priori* utilisée est uniforme $U(1,2)$ et est représentée par le trait en pointillé.

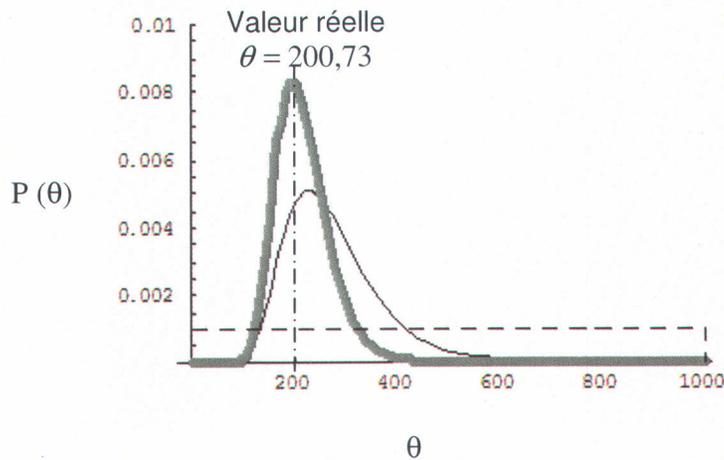


Figure 5.3 Exemple de distribution *a posteriori* pour le paramètre θ pour un historique de 30 années (trait fin noir) et un historique de 75 années (trait gros gris). La distribution *a priori* utilisée est uniforme $U(0,1000)$ et est représentée par le trait en pointillé.

Les figures 5.4 et 5.5 montrent la variation de la moyenne et de l'écart-type *a posteriori* des paramètres β et θ , en fonction du nombre d'années. On voit bien que si le nombre d'années augmente, les distributions des deux paramètres (figures 5.2 et 5.3) sont de plus en plus concentrées autour de la moyenne des distributions.

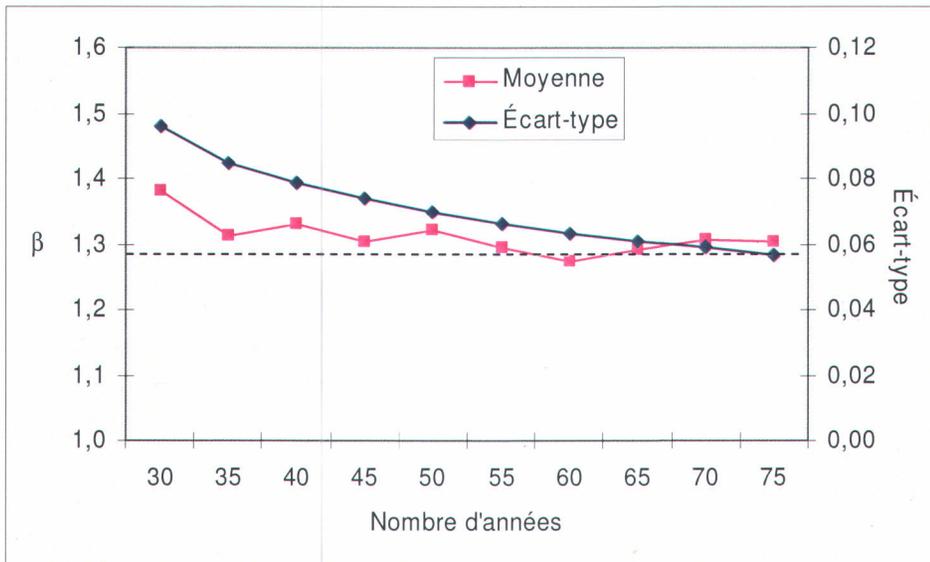


Figure 5.4 Moyenne et écart-type de la distribution *a posteriori* de β pour l'exemple considéré (distribution Weibull). La ligne en pointillé représente la valeur réelle de 1,28.

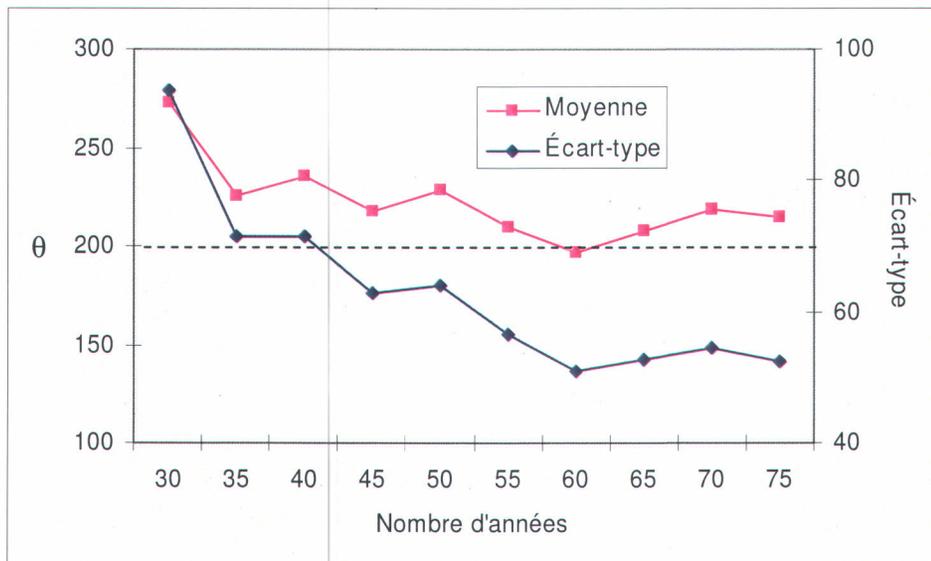


Figure 5.5 Moyenne et écart-type de la distribution *a posteriori* de θ pour l'exemple considéré (distribution Weibull). La ligne en pointillé représente la valeur réelle de 200,73.

5.1.2 Distributions *a posteriori* des paramètres λ_i (bris d'ordre ≥ 2)

Dans cette section, on se limite à examiner le cas où la même distribution *a priori* est choisie pour tous les paramètres d'ordre i , i allant de 2 à 10. On choisit donc les paramètres suivants pour la distribution *Gamma* (0,5,0,5) (la figure 4.4 indique l'allure de cette distribution *a priori*), pour avoir une moyenne *a priori* de 0,25, la variance calculée est de 0,125. En sélectionnant les mêmes distributions *a priori*, on obtient les distributions *a posteriori* présentées aux figures 5.6 à 5.8 pour les paramètres λ_i allant de 2 à 4. Les figures pour les autres paramètres ($5 \leq \lambda_i \leq 10$) sont présentées en Annexe A.

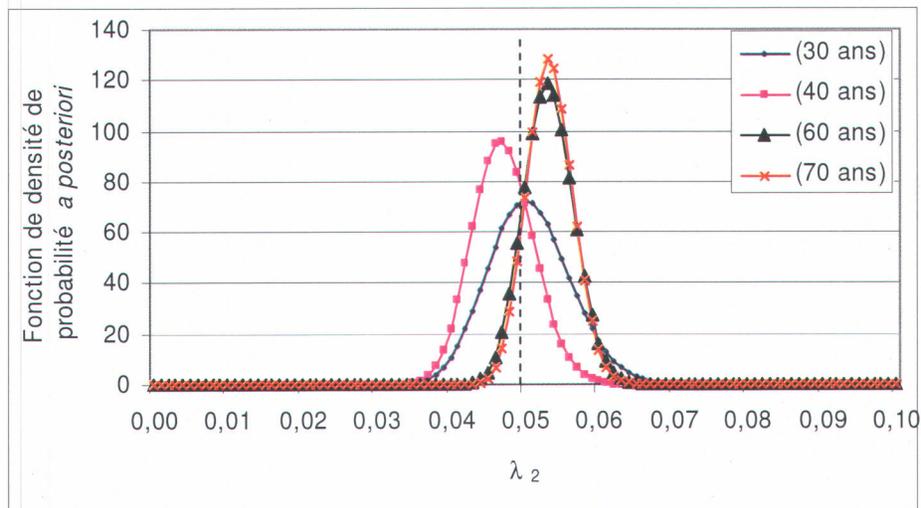


Figure 5.6 Distribution *a posteriori* du paramètre λ_2 , la ligne en pointillé représentant la valeur réelle de 0,05

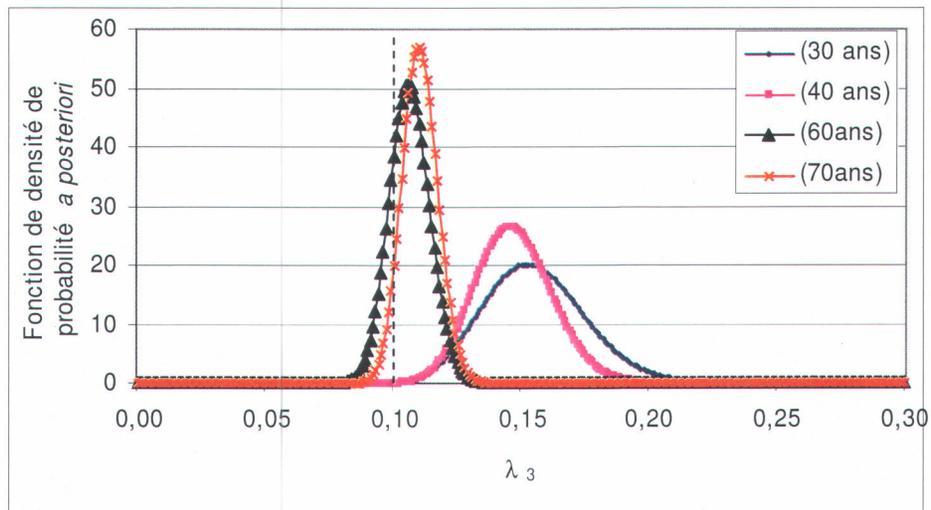


Figure 5.7 Distribution *a posteriori* du paramètre λ_3 , la ligne en pointillé représentant la valeur réelle de 0,10

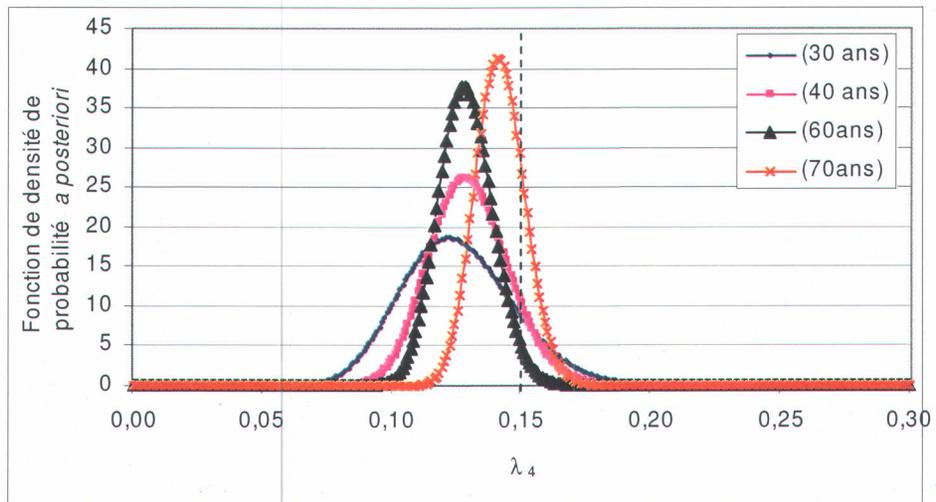


Figure 5.8 Distribution *a posteriori* du paramètre λ_4 , la ligne en pointillé représentant la valeur réelle de 0,15

5.2 Estimateurs du maximum de probabilité des distributions *a posteriori*

5.2.1 Paramètres de la distribution Weibull θ et β

Pour calculer l'estimateur du maximum de probabilité de la distribution *a posteriori* du paramètre β (équation 4.25), la méthode de la sécante a été choisie (Press *et al.*, 1992) en considérant les limites suivantes pour l'intervalle : limite minimale = 0,01, limite maximale = 4,0. La précision a été fixée à 10^{-4} . Les figures 5.9 et 5.10 présentent l'estimateur du maximum de probabilité de la distribution *a posteriori* pour les deux paramètres de la distribution Weibull, pour des périodes allant de 30 à 75 ans. La valeur recherchée pour le paramètre β est de 1,28. Pour ce paramètre, l'écart maximal entre la valeur recherchée et la valeur estimée ne dépasse pas 0,02, sauf pour la première valeur estimée avec 30 années de données (figure 5.9). Pour le paramètre θ , la valeur recherchée est de 200,73. L'écart est un peu plus important puisqu'il varie entre 2 et 27 (en terme relatif, 1 et 13 % respectivement) (figure 5.10).

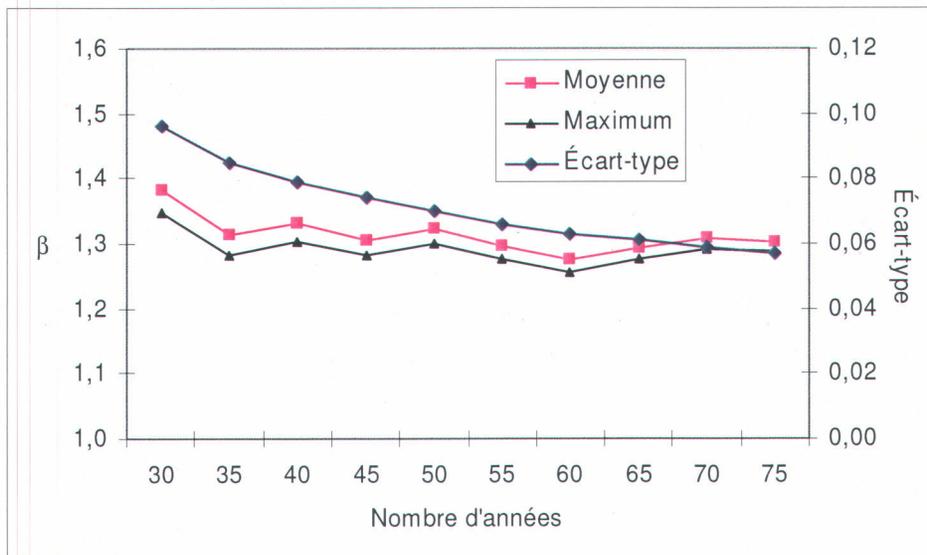


Figure 5.9 Écart-type, moyenne et maximum de probabilité de la distribution *a posteriori* de β

Les figures 5.9 et 5.10 montrent que l'estimateur du maximum de la probabilité *a posteriori* des paramètres β et θ est le plus proche des valeurs de paramètres recherchées (1,28 et 200,73 respectivement) et confirment que la moyenne a tendance à surestimer les valeurs des paramètres, à cause de la forme de la distribution *a posteriori*.

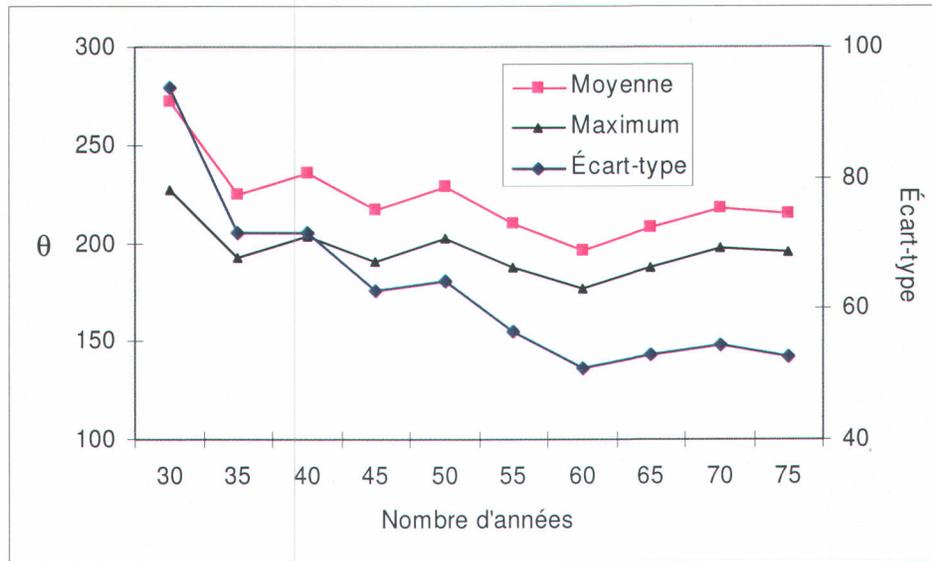


Figure 5.10 Écart-type, moyenne et maximum de probabilité de la distribution *a posteriori* de θ

5.2.2 Paramètres des distributions exponentielles λ_i ($1 < i \leq 10$)

Les figures 5.11 à 5.13 présentent les estimateurs du maximum et de la moyenne de probabilité *a posteriori* des paramètres λ_i pour i allant de 2 à 4, pour les autres bris ($5 \leq i \leq 10$), voir les figures A.7 à A.12 en Annexe A. Les figures montrent qu'il n'y a pas un grand écart entre la moyenne et le maximum de probabilité, pour les cinq premiers bris, peu importe le nombre d'années. Mais à partir du 6^e bris, on voit que l'écart est important jusqu'à 45 ans, ensuite les deux estimateurs convergent vers la même valeur.

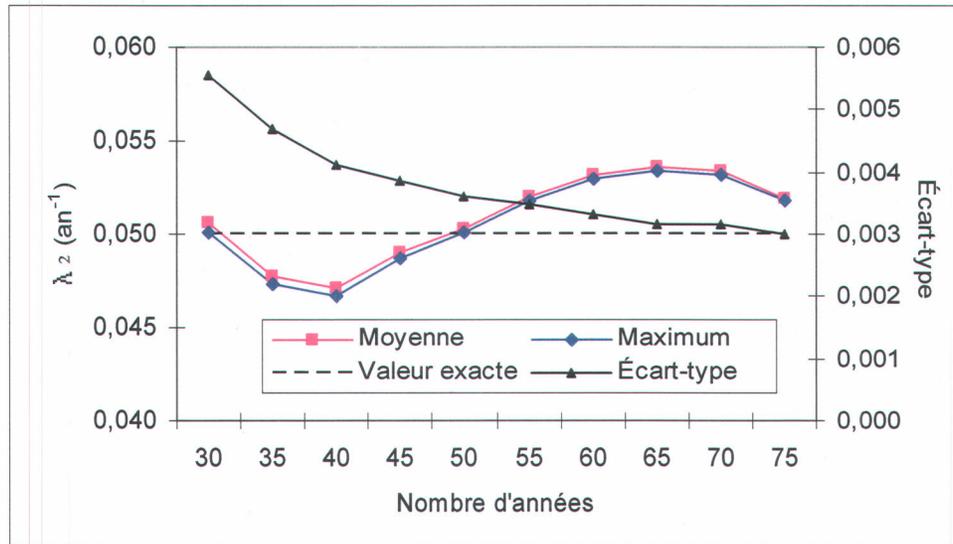


Figure 5.11 Écart-type, moyenne et maximum de probabilité *a posteriori* de λ_2

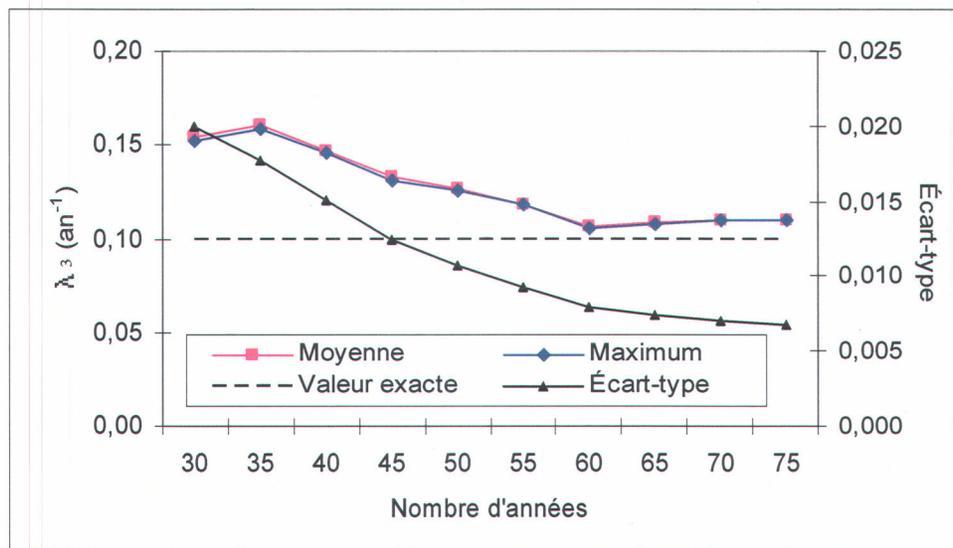


Figure 5.12 Écart-type, moyenne et maximum de probabilité *a posteriori* de λ_3

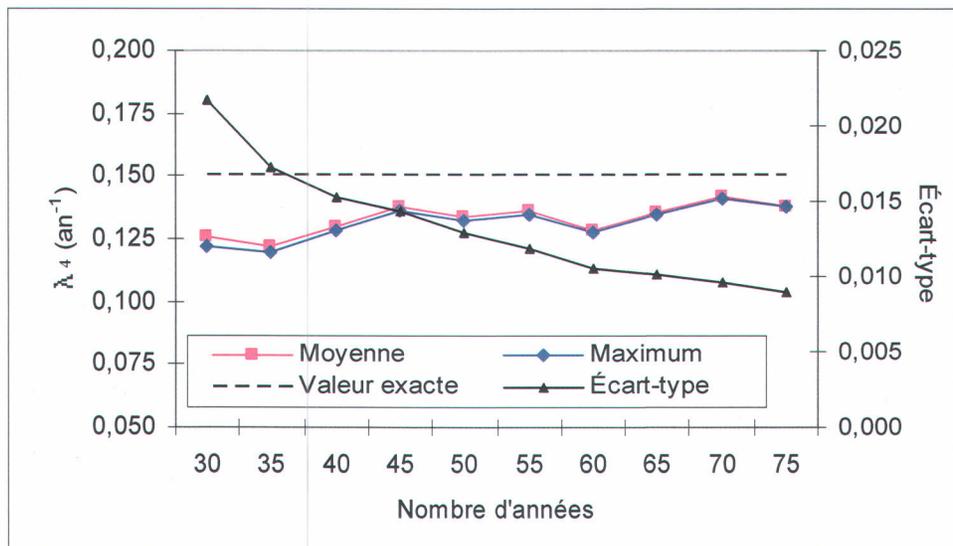


Figure 5.13 Écart-type, moyenne et maximum de probabilité *a posteriori* de λ_4

La qualité des estimateurs des paramètres dépend fortement du nombre de conduites ayant subi des bris (voir le Tableau 5.2). Les figures précédentes suggèrent qu'à partir de 60 années, dans le cas hypothétique considéré ici, le rôle de la distribution *a priori* devient presque négligeable. Plusieurs autres essais avec d'autres historiques de bris devraient être réalisés pour confirmer cette constatation.

5.3 Estimation des paramètres λ_i en fonction de l'ordre de bris

Les estimateurs du maximum de probabilité pour les conduites ayant enregistré un 11^e bris et plus n'ont pas été représentés car l'échantillon n'est pas significatif, surtout pour les historiques les plus courts (voir Tableau 5.2).

En supposant qu'une relation non linéaire lie les paramètres à l'ordre de bris de la forme $\lambda_i = a + b(i)^c$ et en maximisant la fonction de vraisemblance, le Tableau 5.3 présente les valeurs des coefficients (a , b et c) de la régression. On voit bien qu'à partir de 55 ans, le coefficient (c) est presque égal à l'unité, ce qui correspond bien à une droite, et les coefficients estimés sont presque égaux aux

valeurs recherchées (-0,05, 0.05 et 1,00) et qui ont servi à générer l'historique de bris (voir Tableau 5.1).

Tableau 5.3 Valeurs des paramètres de la régression non linéaire estimés à partir de l'historique considéré

Nombre d'années	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	Nombre d'années	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
30	-1,683	1,621	0,098	55	-0,046	0,049	1,011
35	-0,509	0,455	0,294	60	-0,012	0,028	1,245
40	-0,125	0,103	0,751	65	-0,024	0,035	1,150
45	-0,087	0,076	0,852	70	-0,029	0,039	1,105
50	-0,075	0,068	0,883	75	-0,039	0,044	1,057

Les figures 5.14 à 5.18 représentent les valeurs estimées des paramètres λ_i (pour un ordre de bris allant de 2 à 10), représentant l'estimateur du maximum de probabilité des distributions *a posteriori*, et les courbes obtenues par régression qui lient les paramètres à l'ordre de bris.

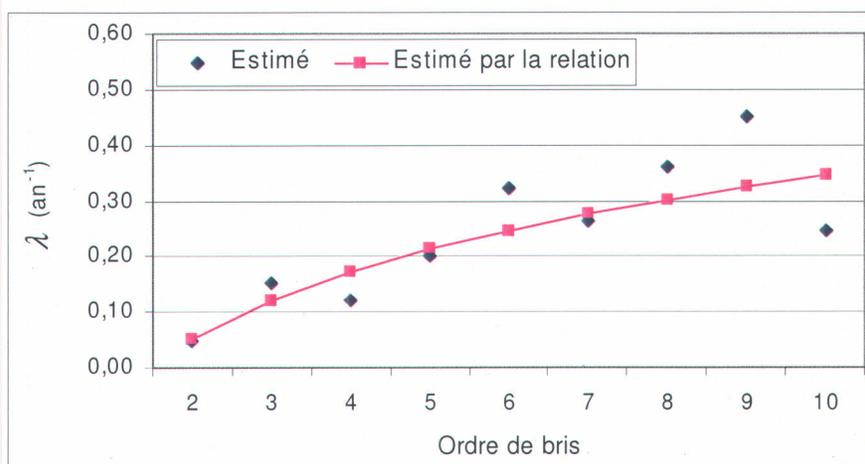


Figure 5.14 Relation entre les valeurs des paramètres (λ_i) et l'ordre de bris (historique de 30 ans)

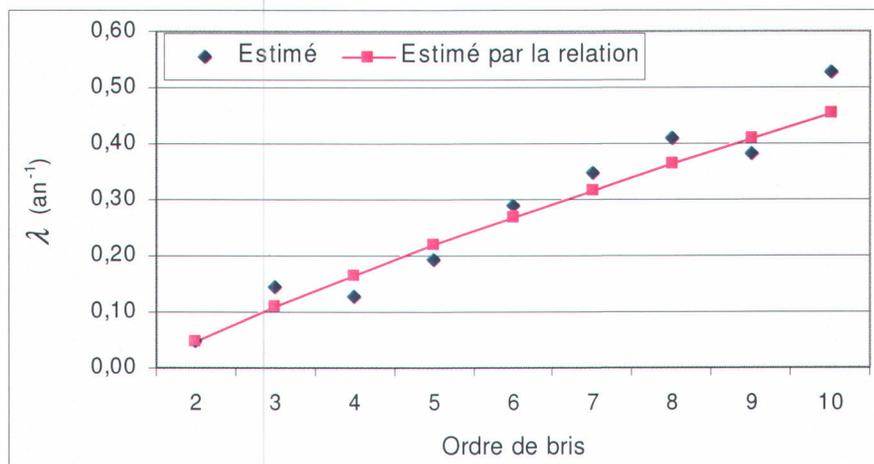


Figure 5.15 Relation entre les valeurs des paramètres (λ_i) et l'ordre de bris (historique de 40 ans)

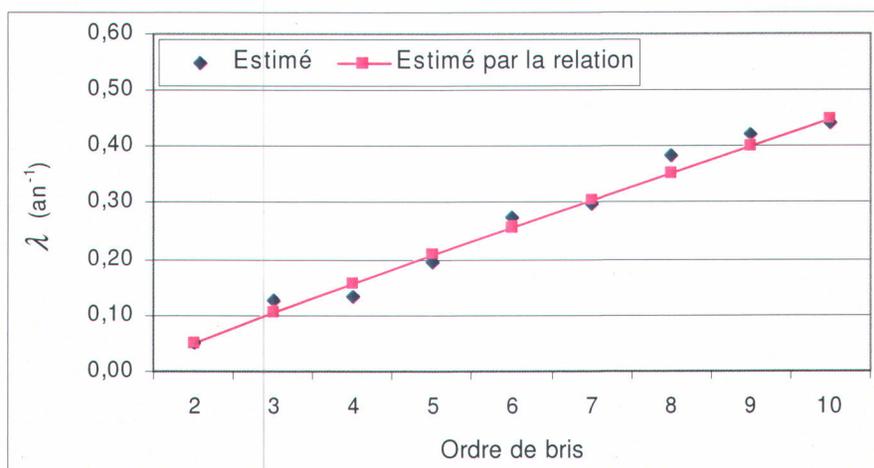


Figure 5.16 Relation entre les valeurs des paramètres (λ_i) et l'ordre de bris (historique de 50 ans)

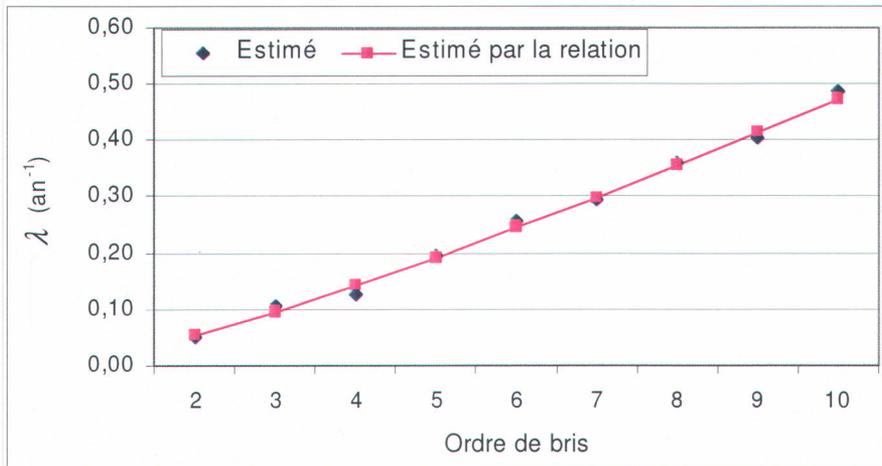


Figure 5.17 Relation entre les valeurs des paramètres (λ_i) et l'ordre de bris (historique de 60 ans)

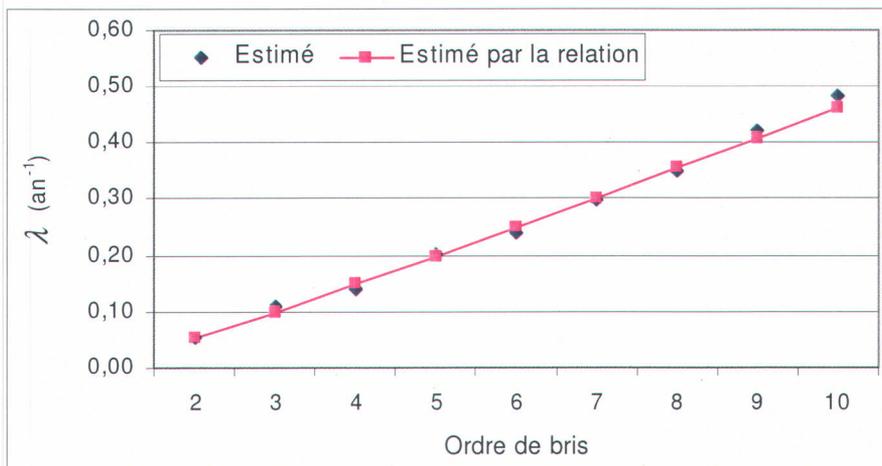


Figure 5.18 Relation entre les valeurs des paramètres (λ_i) et l'ordre de bris (historique de 70 ans)

5.4 Influence de la taille du réseau sur les distributions *a posteriori*

Dans cette section, on considère trois réseaux avec 47, 100 et 534 conduites et on compare les distributions *a posteriori* obtenues à partir d'un historique généré pour chacun de ceux-ci. On se limite à l'étude du deuxième bris. On génère des bris aléatoirement, pour chaque conduite du réseau, à partir du même modèle Weibull-Exponentiel, en considérant les valeurs des paramètres présentées au

Tableau 5.1. Les figures 5.19 à 5.21 illustrent les distributions *a posteriori* en fonction du nombre d'années pour le paramètre λ_2 . On voit bien que plus le nombre de conduites est important (figure 5.19), plus la distribution *a posteriori* se concentre autour de la vraie valeur du paramètre du 2^e bris (0,05 an⁻¹) et l'influence de la distribution *a priori* devient presque négligeable.

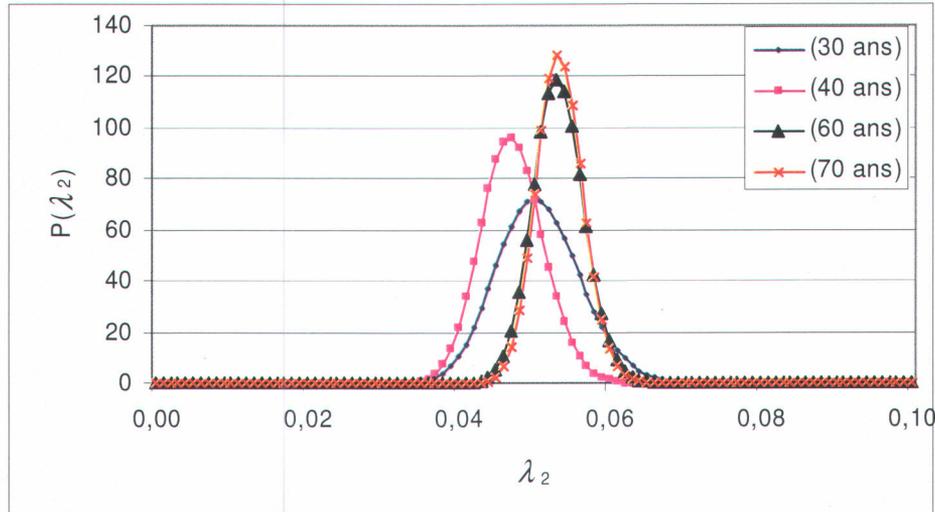


Figure 5.19 Distribution *a posteriori* du paramètre (λ_2) pour un réseau de 534 conduites

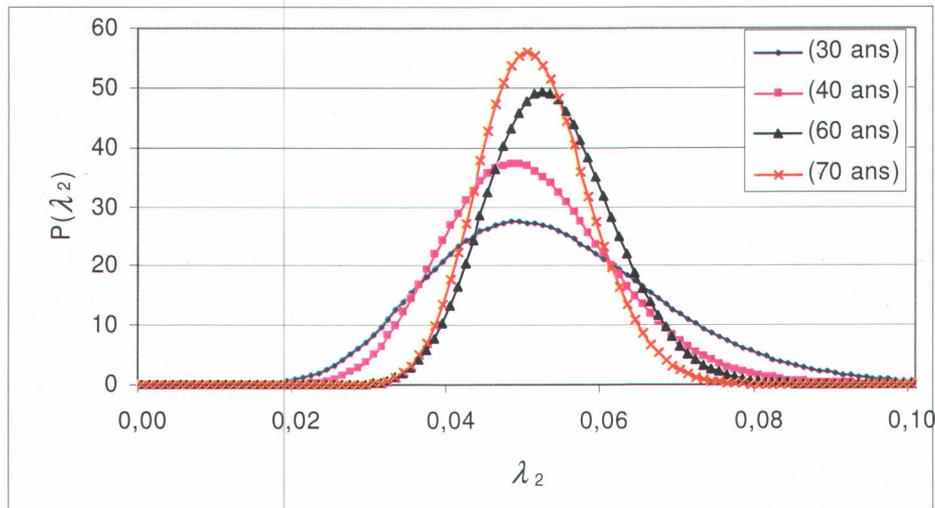


Figure 5.20 Distributions *a posteriori* du paramètre (λ_2) pour un réseau de 100 conduites

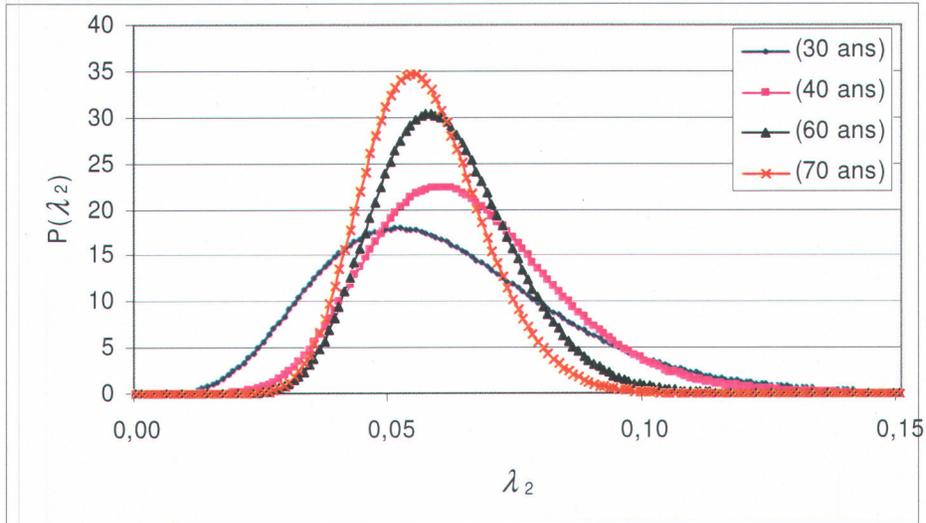


Figure 5.21 Distribution *a posteriori* du paramètre (λ_2) pour un réseau de 47 conduites

La figure 5.22 montre les variations en fonction du nombre d'années de l'écart-type estimé du paramètre λ_2 , pour les trois réseaux. On voit bien que plus le nombre de conduites est important, plus l'écart-type diminue. Pour le réseau à 534 conduites, les valeurs sont presque identiques peu importe la durée de l'historique considéré. Il faut préciser que même si ces résultats ne concernent qu'un historique particulier, ils sont représentatifs de ce que l'on peut escompter de façon générale.

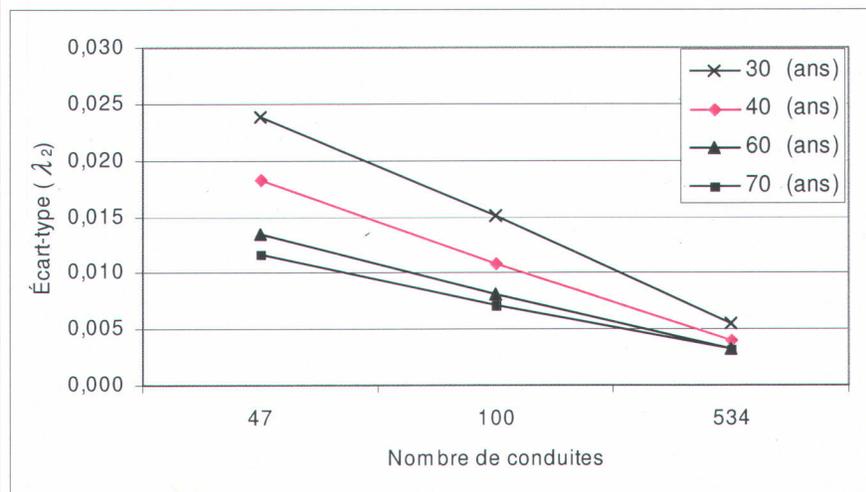


Figure 5.22 Écart-type du paramètre (λ_2) en fonction du nombre de conduites

5.5 Analyse de sensibilité par rapport aux paramètres (α_0, β_0) (de la distribution *a priori*)

L'analyse de sensibilité consiste à modifier le choix des paramètres des distributions *a priori* et à voir l'influence de ces paramètres sur l'estimation du maximum de probabilité *a posteriori* des paramètres des distributions exponentielles λ_i (i allant de 2 à 10). Deux distributions Gamma sont utilisées pour la distribution *a priori* des valeurs des paramètres λ_i : une première de paramètres $\alpha_0 = 0,50$, $\beta_0 = 0,50$ et une seconde de paramètres $\alpha_0 = 0,50$, $\beta_0 = 0,10$ (figure 4.4). La moyenne de la distribution *a priori* passe de 0,25 à 0,05, ce qui a entraîné une variation de 0,20. Précisant que le même historique de bris est utilisé dans les deux cas.

L'examen des Tableaux 5.4 et 5.5 montre que pour un réseau de 534 conduites avec un historique de 30 années, il n'y a presque pas de variations sur le maximum jusqu'au 5^e bris mais à partir du 6^e bris, on remarque une légère variation qui reste toujours moins importante par rapport aux variations des moyennes *a priori*. On constate également que, plus le nombre d'années augmente, plus l'influence de l'*a priori* devient négligeable.

Tableau 5.4 Valeurs des paramètres λ_i maximisant la distribution *a posteriori* pour une distribution *a priori* Gamma (0,50, 0,50)

Nombre d'années	Maximum des distributions <i>a posteriori</i>									
	2 ^e bris	3 ^e bris	4 ^e bris	5 ^e bris	6 ^e bris	7 ^e bris	8 ^e bris	9 ^e bris	10 ^e bris	
30	0,05	0,15	0,12	0,20	0,32	0,26	0,36	0,45	0,25	
35	0,05	0,16	0,12	0,20	0,31	0,34	0,39	0,33	0,43	
40	0,05	0,15	0,13	0,19	0,29	0,35	0,41	0,38	0,53	
45	0,05	0,13	0,14	0,19	0,27	0,30	0,39	0,47	0,44	
50	0,05	0,13	0,13	0,19	0,28	0,30	0,38	0,42	0,44	
55	0,05	0,12	0,13	0,19	0,26	0,30	0,36	0,41	0,48	
60	0,05	0,11	0,13	0,20	0,26	0,29	0,36	0,40	0,49	
65	0,05	0,11	0,13	0,20	0,26	0,30	0,36	0,42	0,47	
70	0,05	0,11	0,14	0,20	0,24	0,30	0,35	0,42	0,48	
75	0,05	0,11	0,14	0,21	0,25	0,30	0,37	0,41	0,46	

En gras : Valeurs du maximum *a posteriori* identiques pour les deux distributions *a priori* considérées

Tableau 5.5 Valeurs des paramètres λ_i maximisant la distribution *a posteriori* pour une distribution *a priori* Gamma (0,50, 0,10)

Nombre d'années	Maximum des distributions <i>a posteriori</i>									
	2 ^e bris	3 ^e bris	4 ^e bris	5 ^e bris	6 ^e bris	7 ^e bris	8 ^e bris	9 ^e bris	10 ^e bris	
30	0,05	0,15	0,12	0,18	0,27	0,21	0,25	0,29	0,16	
35	0,05	0,16	0,12	0,19	0,28	0,30	0,33	0,26	0,29	
40	0,05	0,14	0,13	0,19	0,27	0,32	0,36	0,33	0,42	
45	0,05	0,13	0,13	0,18	0,26	0,28	0,36	0,42	0,38	
50	0,05	0,13	0,13	0,19	0,27	0,29	0,36	0,39	0,40	
55	0,05	0,12	0,13	0,19	0,26	0,29	0,34	0,39	0,45	
60	0,05	0,11	0,13	0,19	0,25	0,29	0,35	0,39	0,46	
65	0,05	0,11	0,13	0,20	0,26	0,30	0,35	0,40	0,45	
70	0,05	0,11	0,14	0,20	0,24	0,29	0,34	0,41	0,47	
75	0,05	0,11	0,14	0,21	0,25	0,30	0,37	0,40	0,45	

En gras : Valeurs du maximum *a posteriori* identiques pour les deux distributions *a priori* considérées

5.6 Influence de la distribution *a priori* sur la relation entre les paramètres λ_i et l'ordre de bris (*i*)

Pour voir l'influence de la distribution *a priori* sur l'estimation des paramètres λ_i en fonction de l'ordre de bris, on a sélectionné trois distributions *a priori* ayant des paramètres différents : Gamma (0,50, 0,50), Gamma (2,50, 0,05) et Gamma (2,00, 0,25) (figure 4.4).

Pour un réseau avec 534 conduites, les relations liant les paramètres λ_i à l'ordre de bris, avec un historique sur 30 et 60 ans, sont illustrées par les figures 5.23 et 5.24 respectivement. En examinant la figure 5.23, on peut remarquer que pour les bris allant de 2 à 5, les valeurs des paramètres estimés sont assez proches des valeurs exactes qui sont représentées par une relation linéaire. On remarque également que chaque distribution *a priori* a tendance à sous-estimer les paramètres λ_i à partir d'un certain ordre de bris : le 5^e bris pour la distribution Gamma (2,50, 0,05), le 7^e bris pour la distribution Gamma (0,50, 0,50) et le 8^e bris pour la distribution Gamma (2,00, 0,25). La figure 5.24 montre qu'avec un historique de bris sur 60 ans, les trois relations issues des trois distributions *a*

priori sont presque confondues et, dans ce cas, peu importe la distribution *a priori* considérée, on obtient la même relation linéaire.

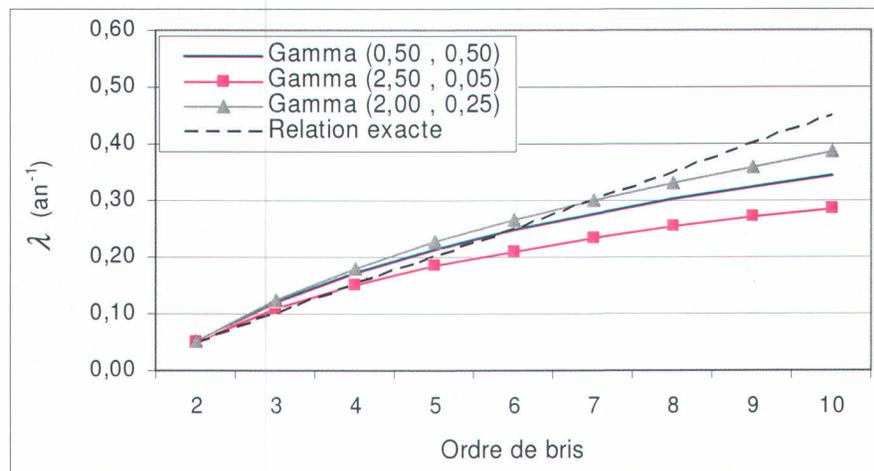


Figure 5.23 Relation entre λ_i et l'ordre de bris selon les différentes distributions *a priori* considérées (30 ans)

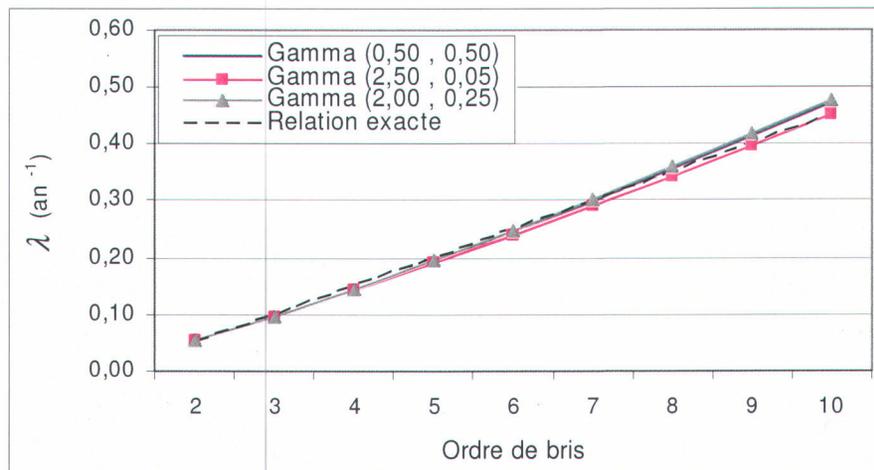


Figure 5.24 Relation entre λ_i et l'ordre de bris selon les différentes distributions *a priori* considérées (60 ans)

5.7 Conclusion et recommandations

L'application de l'approche bayésienne a été présentée et appliquée au cas où un modèle Weibull-Exponeniel est utilisé pour décrire les durées entre bris de différents ordres. Ce modèle suppose qu'une distribution Weibull est utilisée pour

modéliser le temps d'occurrence du premier bris et les distributions exponentielles sont utilisées pour modéliser les temps d'occurrence des bris d'ordre supérieur à un. On a supposé que les paramètres des distributions exponentielles sont reliés à l'ordre de bris selon une relation linéaire.

En combinant l'information provenant des temps d'occurrence des bris, le théorème de Bayes nous a montré comment on pouvait passer d'une information *a priori* plus ou moins précise à une estimation *a posteriori* assez précise.

Pour les paramètres des distributions exponentielles (bris d'ordre deux et plus), le choix d'une Gamma comme distribution *a priori* permet de résoudre analytiquement l'intégrale du dénominateur. Cependant, dans le cas de la distribution Weibull et pour les réseaux avec plus d'une centaine de conduites, le calcul de l'intégrale peut causer problème, ce qui nous a obligés à utiliser le logiciel *Mathematica* pour l'estimation et la représentation graphique des distributions *a posteriori*.

L'utilisation de la moyenne des distributions *a posteriori* comme indicateur des valeurs de paramètre ne semble pas indiquée puisque la moyenne tend à surestimer les valeurs des paramètres recherchés, compte tenu de l'asymétrie de ces distributions. La valeur la plus probable de ces distributions a donc été utilisée comme estimateur.

Une relation non linéaire a été considérée pour l'estimation des valeurs des paramètres des distributions exponentielles en fonction de l'ordre de bris. L'exemple considéré montre qu'avec de l'information sur 55 ans, les coefficients estimés étaient presque tout à fait comparables aux valeurs qui ont servi à générer l'historique de bris, et ce pour un réseau avec 534 conduites.

L'étude de l'influence du nombre d'années sur les distributions *a posteriori* a une fois de plus montré que plus la quantité d'information (nombre de conduites

ayant subi des bris et les temps d'occurrence des bris) était élevée, plus l'influence de la distribution *a priori* devenait négligeable. De plus, on a constaté pour les paramètres de l'exponentielle qu'à partir de 60 ans, le calcul de la moyenne et le maximum *a posteriori* étaient presque identiques peu importe l'ordre de bris et que les deux estimateurs convergeaient vers les vraies valeurs recherchées. La variation du nombre de conduites a également permis d'apprécier l'influence et le poids de l'information.

L'analyse de sensibilité a été limitée à l'étude de l'influence du choix des paramètres des distributions *a priori* du type Gamma sur les estimateurs de la valeur la plus probable. L'étude a montré que les variations des valeurs *a posteriori* étaient toujours moins importantes par rapport aux variations des valeurs *a priori* et que, plus le nombre d'années augmentait, plus l'influence de la distribution *a priori* devenait négligeable.

Il serait intéressant d'appliquer cette approche à un autre modèle de bris avec plus de paramètres (Weibull-Weibull-Exponentiel) et de pousser l'étude de l'analyse de sensibilité plus en détail en examinant, par exemple, le choix des distributions *a priori* pour chaque ordre de bris. Pour ce faire, on pourrait penser à utiliser une distribution uniforme ou une distribution centrée sur la valeur précédente. Dans les choses à considérer, certes il y a le choix de la distribution *a priori*, mais aussi la prise en compte des variables explicatives telles que la longueur des conduites, le matériau, etc. Enfin, l'intérêt d'une telle approche est qu'elle permet de construire les distributions des valeurs de paramètres et donc, éventuellement, de prendre en compte les incertitudes sur les valeurs de ces paramètres dans le processus de décision.

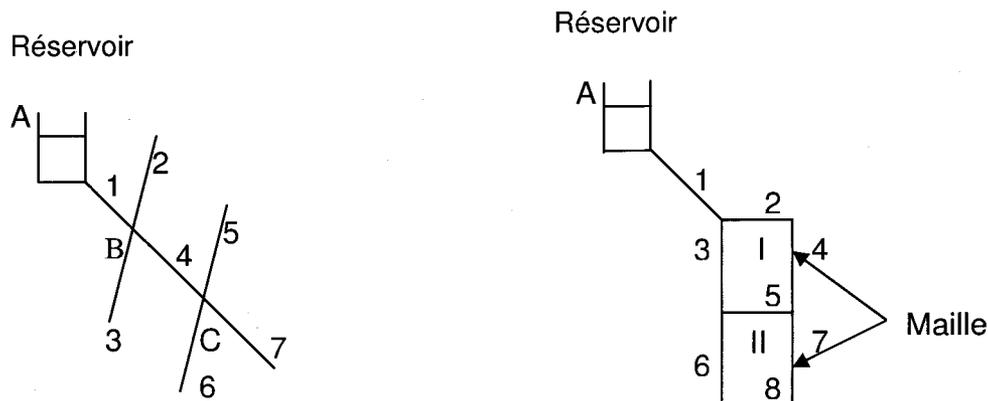
6. HYDRAULIQUE DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION

Le chapitre six est consacré à des notions essentielles de l'hydraulique des réseaux de distribution. Ce chapitre va nous permettre d'estimer la variation temporelle de la rugosité des conduites et d'évaluer les pressions aux nœuds du réseau de distribution. La connaissance de ces deux éléments est essentielle pour l'intégration de la composante hydraulique dans le modèle développé pour la planification des interventions en réseau.

Ce chapitre comporte cinq sections. Après la courte définition des réseaux de distribution de la section 6.1, on présente dans la section 6.2 le calcul hydraulique en réseaux. La section 6.3 est consacrée aux formules de pertes de charge. La section 6.4 présente quelques méthodes de résolution des équations hydrauliques pour un réseau de distribution en eau et la dernière section 6.5 est consacrée à l'étude de la variation de la rugosité des conduites en fonction du temps.

6.1 Réseaux de distribution de l'eau potable

Un réseau de distribution de l'eau potable est une infrastructure importante qui permet de distribuer l'eau en quantité suffisante pour satisfaire aux besoins actuels et à venir des usagers et, souvent, aux besoins en eau nécessaire pour lutter contre les incendies (Brière, 1997). Un réseau de distribution peut être soit maillé, soit ramifié (figure 6.1). Le réseau maillé offre un meilleur service aux usagers puisque l'eau peut atteindre un même point de consommation par plusieurs chemins, en cas de bris ou de réparation d'une conduite (Brière, 1997). Dans un réseau ramifié, on ne peut pas décrire une boucle en suivant les conduites. Le bris d'une conduite entraîne la perte de service pour tous les usagers situés en aval du bris. En plus, pour une conduite donnée, l'eau s'écoule toujours dans le même sens (Brière, 1997).



Le réseau ramifié est alimenté par le réservoir placé en A. Le réseau est composé de 7 conduites (1 à 7) et possède 2 nœuds (B et C).

Le réseau maillé est composé de 2 mailles, de 8 conduites et de 6 nœuds à charges inconnues.

Figure 6.1 Exemple de réseaux ramifiés et maillés

6.2 Calcul hydraulique en réseaux

Analyser un réseau de distribution maillé consiste à déterminer la valeur des débits et du sens de l'écoulement dans toutes les conduites ainsi que les charges aux nœuds. Pour estimer ces valeurs, on dispose des trois équations suivantes (Gomella et Guerrée, 1980) :

1. L'équation qui exprime que la perte de charge totale entre deux points donnés A et B est égale à la somme des pertes de charge entre ces deux points :

$$H_A - H_B = \sum \Delta H_{AB} \quad (6.1)$$

où :

H_A et H_B : représentent respectivement la charge aux points A et B;

ΔH : perte de charge entre les deux points A et B.

2. L'équation de continuité à un nœud j , exprime le fait qu'en chaque nœud, la somme des débits qui arrivent à ce nœud est égale à la somme des débits qui quittent ce nœud.

$$\sum_{i=1}^{\text{Conduites}} Q_{ij} = 0 \quad (6.2)$$

où :

Q_{ij} : débit circulant dans la conduite i et arrivant au nœud j .

3. L'équation des pertes de charge pour chaque maille du réseau qui exprime que la somme totale des pertes de charge est nulle pour chaque maille.

$$\sum_{i=1}^l \Delta H_i = 0 \quad (6.3)$$

où :

ΔH_i : représente la perte de charge dans la conduite i .

La relation liant les pertes de charge au débit dans une conduite est obtenue en appliquant l'équation de Bernoulli entre le point A et le point B. Cette équation permet d'exprimer la conservation de l'énergie entre ces points. Les trois termes qu'il faut considérer sont l'énergie potentielle qui correspond à la hauteur du point par rapport à un niveau de référence (z_A ou z_B), l'énergie cinétique proportionnelle à la vitesse d'écoulement au carré et la pression (P_A ou P_B), (Gomella et Guerrée, 1980; Brière, 1997) :

$$z_A + \frac{P_A}{\rho g} + \frac{v_A^2}{2g} - \left(z_B + \frac{P_B}{\rho g} + \frac{v_B^2}{2g} \right) = \sum \Delta H_{AB} \quad (6.4)$$

où :

z : énergie potentielle (m);

g : accélération de la pesanteur (9,8 m/s²);

ρ : masse volumique du liquide (kg/m³);

P : pression (Pa);

v : vitesse moyenne du liquide qui passe par un point (m/s).

Dans la plupart des réseaux de distribution, l'énergie associée à la pression et l'énergie potentielle sont plus grandes que l'énergie cinétique, puisque la vitesse est faible et le terme en $\frac{v^2}{2g}$ de l'équation précédente peut être négligé (Gomella et Guerrée, 1980).

6.3 Formules de pertes de charge

Un grand nombre de formules pour le calcul des pertes de charge linéaires ont été développées. La formule fondamentale est celle de Darcy-Weisbach qui est fonction du coefficient de perte de charge f (Gomella et Guerrée, 1980) :

$$\Delta H = \frac{f L v^2}{2 g D} \quad (6.5)$$

où :

D : diamètre de la conduite (m);

ΔH : perte de charge dans la conduite, exprimée en mètres de hauteur d'eau circulant dans la conduite;

L : longueur de la conduite (m);

v : vitesse d'écoulement (m/s).

La formule de Colebrook est la plus utilisée pour calculer le coefficient de perte de charge. Cette formule s'écrit (Carlier, 1972) :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[\frac{ke}{3,71 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (6.6)$$

où :

Re : nombre de Reynolds de l'écoulement (adimensionnel);

D : diamètre intérieur de la conduite (m);

ke : coefficient de rugosité (m).

Le coefficient de perte de charge f est fonction du régime d'écoulement (nombre de Reynolds) et de la rugosité des parois ke (ou de la rugosité relative $\frac{ke}{D}$). Cette dernière équation englobe les formules de Nikuradse (premier terme) et de Von Karman (deuxième terme). Dans la pratique, le régime turbulent rugueux se rencontre le plus souvent; en considérant l'équation de Nikuradse pour les parois rugueuses, on a :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[\frac{ke}{3,71 D} \right] \quad (6.7)$$

En ajoutant le terme $2 \log_{10} \left[\frac{ke}{D} \right]$, cette formule se réécrit également sous la forme suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} + 2 \log_{10} \left[\frac{ke}{D} \right] = 1,14 \quad (6.8)$$

Pour appliquer la formule de Colebrook, il faut connaître la valeur de la rugosité ke . Le Tableau 6.1 (Carlier, 1972) donne certaines valeurs pour les calculs pratiques des conduites neuves :

Tableau 6.1 Valeurs du coefficient ke (Carlier, 1972)

Nature de la conduite	ke (10^{-3} m)
Fonte et acier sans revêtement, béton grossier, eau de moyenne agressivité	2
Fonte ou acier avec revêtement de ciment, béton	0,5
Fonte ou acier avec revêtement de bitume	0,25
Acier (neuf), béton (paroi lisse).	0,1
Fonte ou acier avec revêtement, béton précontraint.	0,05
Amiante-ciment.	0,025

Il existe également les formules de Hazen-Williams et de Manning qui sont des équations empiriques, et ne sont généralement applicables que pour l'eau sous un régime d'écoulement turbulent (Walski *et al.* 2001). La formule de Hazen-Williams est utilisée aux États-Unis alors que celle de Darcy prédomine en

Europe. Le Tableau 6.2 présente les trois équations qui permettent de calculer la perte de charge par unité de longueur de conduite, en fonction du débit d'écoulement et du diamètre de la conduite (Walski *et al.* 2001) :

Tableau 6.2 Équations de pertes de charge en unités internationales et américaines (Walski *et al.* 2001)

Équation	Système d'unités		
	Q (m ³ /s), D (m)	Q (cfs), D (ft)	Q (gpm), D (in)
Darcy-Weisbach f : coefficient de Darcy-Weisbach	$\Delta H = \frac{0,083 f Q^2}{D^5}$	$\Delta H = \frac{0,025 f Q^2}{D^5}$	$\Delta H = \frac{0,031 f Q^2}{D^5}$
Hazen Williams C : coefficient de Hazen Williams	$\Delta H = \frac{10,7 Q^{1,852}}{D^{4,87} C^{1,852}}$	$\Delta H = \frac{4,73 Q^{1,852}}{D^{4,87} C^{1,852}}$	$\Delta H = \frac{10,5 Q^{1,852}}{D^{4,87} C^{1,852}}$
Manning n : coefficient de Manning	$\Delta H = \frac{10,3 (n Q)^2}{D^{5,33}}$	$\Delta H = \frac{4,66 (n Q)^2}{D^{5,33}}$	$\Delta H = \frac{13,2 (n Q)^2}{D^{5,33}}$

6.4 Résolution des équations hydrauliques pour un réseau de distribution

L'équation de conservation des débits pour un nœud donné est une équation linéaire, par contre, pour une maille, les équations de perte de charge sont non linéaires. La résolution simultanée de ces deux équations permet d'identifier à l'équilibre le débit qui transite dans chaque conduite (Brière, 1997).

6.4.1 Méthodes de résolution

Différentes méthodes ont déjà été développées pour déterminer les débits et les charges aux nœuds. La toute première a été développée par Hardy Cross (1936). Cette méthode consiste à fixer, dans un premier temps, une répartition arbitraire des débits, tout en respectant l'équation de continuité en chaque nœud. En second lieu, on exprime que la perte de charge avec les débits recherchés est nulle le long du périmètre d'une maille et on tire une expression générale des débits correctifs qui sont, soit à ajouter ou soit à retrancher aux débits supposés, pour obtenir les débits exacts. Ce processus d'équilibre des pertes de charge en corrigeant les débits supposés se poursuit en procédant par approximations

successives (Gomella et Guerrée, 1980). Avec le développement des ordinateurs, plusieurs autres méthodes ont été développées basées sur la méthode de Newton-Raphson ou la méthode du gradient. Ces deux méthodes sont les plus utilisées dans les logiciels d'équilibrage des réseaux (balancement hydraulique) : WATCAD (Brière, 1997 ; ce logiciel est aussi une des premières versions du logiciel AquaCad utilisé par le bureau d'étude Aquadata, www.aquadata.com) utilise la première méthode alors que le logiciel WaterCAD (Walski *et al.* 2003) est basé sur la seconde méthode.

La méthode du gradient, appelée parfois approche hybride nœud-maille, a été développée par Todini et Pilati (1987) (d'après Rossman, 2000). C'est cette méthode qui est implantée dans le simulateur hydraulique Epanet que nous utilisons dans cette étude. Pour un réseau de plusieurs nœuds, sans pompes, l'équation de continuité à un nœud donné et l'équation de perte de charge entre deux nœuds doivent être satisfaites. Connaissant la charge au nœud réservoir, on cherche à identifier une solution pour toutes les charges (H) et tous les débits (Q) qui satisfasse aux deux équations. Pour résoudre le système d'équations, Todini et Pilati (1987) ont adopté une notation matricielle leur permettant d'effectuer des simplifications et de résoudre le système analytiquement pour obtenir deux autres équations modifiées du débit et de la charge qui doivent être résolues d'une manière itérative. Ensuite, un débit initial, qui ne satisfait pas forcément l'équation de continuité, est supposé. À chaque itération de la méthode, de nouvelles charges aux nœuds sont calculées en résolvant la matrice des charges. Ensuite, de nouveaux débits Q sont calculés à partir des charges trouvées. Si la variation des débits est supérieure à une certaine tolérance, le processus se poursuit jusqu'à ce qu'on atteigne la précision voulue. Pour la toute première itération, le débit circulant dans la conduite choisie est fixé de sorte à ce qu'il corresponde à une vitesse de 1 pi/s .

6.4.2 Vitesses minimales et maximales

Concernant les vitesses d'écoulement minimales et maximales à respecter, on considère, en général, que la vitesse d'écoulement ne doit pas être trop grande pour ne pas fatiguer les joints, et pas trop faible pour éviter les dépôts. D'après Brière (1997), les conduites de distribution sont conçues de manière à ce que la vitesse maximale soit de 2,5 ou 3 m/s pour éviter que des pertes de charge énormes ne se produisent. Pour ce qui est des vitesses minimales, une vitesse nulle ou presque nulle peut entraîner une dégradation de la qualité de l'eau. Il est donc recommandé de maintenir une vitesse minimale de 0,3 m/s en période de faible consommation.

Pour Walski *et al.* (2003), il n'existe pas de vitesse limite maximale optimale valable pour toutes les situations. La vitesse est un facteur indirect intervenant dans le dimensionnement des conduites. La perte de charge, qui est fonction de la vitesse, est prise en compte lors du dimensionnement des conduites. Le problème est complexe, car dans la plupart des cas, les réseaux de distribution sont maillés et toute décision de changer le diamètre d'une conduite affecte la vitesse d'écoulement dans plusieurs autres conduites. Le dimensionnement des réseaux de conduites sur la base de la seule vitesse n'est donc pas approprié. La vitesse est utile pour vérifier les résultats du modèle lorsque l'on désire localiser les conduites où les vitesses d'écoulement sont trop grandes, conduisant à de très grandes pertes de charge. D'après Walski *et al.* (2003), pour vérifier les vitesses permises lors du dimensionnement, certains ingénieurs utilisent une vitesse maximale de 1,5 m/s, d'autres utilisent 2,4 m/s alors que certains vont jusqu'à 3,1 m/s.

6.5 Variation de la rugosité des conduites en fonction du temps

D'après Carlier (1972), les expériences ont montré que la rugosité des parois de conduites variait avec le temps du fait des incrustations¹ qui se développent sur les parois. Les tables publiées par Hazen et Williams en 1905 ont montré que le coefficient de leur formule variait en fonction de l'âge de la conduite. Les deux physiciens ont constaté que le coefficient subit une première chute aussitôt après la mise en service de la conduite, puis il continue à diminuer avec l'âge, parfois irrégulièrement. Le coefficient a été calculé d'après 86 séries d'expériences et de mesures sur des conduites neuves ou anciennes. En 1935, le comité de la *New England Water Works Association* (NEWA) a publié d'autres courbes de variations de ce coefficient en fonction de l'âge de la conduite, établies à partir de nouvelles mesures. Ils ont comparé ces courbes avec les tables des deux chercheurs et ont trouvé qu'elles étaient différentes. La courbe de Hazen et Williams avait une allure exponentielle alors que celle des autres chercheurs présentait un changement de courbure vers un âge situé entre 5 et 25 ans.

Les études montrent que l'influence de l'âge sur la variation de la rugosité dépend de plusieurs paramètres. On distingue en général trois groupes de paramètres (Carlier, 1972) : 1) les paramètres physico-chimiques du support (matériau de la conduite et nature du revêtement); 2) les paramètres hydrauliques (vitesse de l'eau et diamètre de la conduite); 3) et les paramètres physico-chimiques de l'eau.

Pour certains matériaux, la rugosité est faible et ne varie pas dans le temps (cas des tuyaux en plastique). L'acier et la fonte sont parfois soumis à des augmentations de rugosité, soit par corrosion, soit par incrustation de dépôts calcaires. La corrosion entraîne aussi la formation d'irrégularités en surface, une

¹ Incrustation (synonyme entartrage) : formation sur les parois des récipients ou des tuyauteries d'une couche de tarte (dépôts généralement dur et adhérent) constituée essentiellement des sels (carbonates, etc.) provenant des eaux dures ou calcaires (Coin, 1981).

coloration rouge de l'eau et la formation de tubercules, alors que les eaux incrustantes² donnent naissance à une couche calcaire (Valiron 1994).

Pour voir l'influence de la composition de l'eau sur l'augmentation de la rugosité des conduites, Lamont (1952, cité par Carlier, 1972) a étudié l'effet de l'âge et de la composition chimique de l'eau sur cette variable. Les résultats des nombreuses expériences ont montré que l'augmentation annuelle de la rugosité (a_k) dépendait de la composition chimique de l'eau véhiculée dans la conduite, et plus précisément de l'indice de saturation de Langelier qui caractérise le pouvoir incrustant d'une eau (Carlier, 1972). L'indice de Langelier est calculé à partir du pH mesuré de l'eau, de la concentration en ions Ca, de l'alcalinité et d'un coefficient dépendant de la température et du résidu sec de l'eau.

L'étude de Lamont (1981) a permis d'établir quatre degrés d'agressivité de l'eau (Tableau 6.3). La relation liant le taux de croissance a_k (pi/an) à l'indice de Langelier (LI) est donnée par l'équation (6.9) (Sharp et Walski 1988). Cette équation n'est valable que pour un indice de Langelier négatif et ne peut être utilisée pour des indices positifs.

$$a_k = 10^{-(4,08 + 0,38 LI)} \quad LI < 0 \quad (6.9)$$

où : a_k est exprimé en (pi/an) dans l'équation 6.9.

Tableau 6.3 Taux de croissance de la rugosité dans une conduite en fonte revêtue (Lamont 1981, Sharp et Walski 1988)

Degré	Taux de croissance pi/an (mm/année)	Valeur moyenne de LI	Degré d'agressivité de l'eau
1	0,000082 (0,025)	0	Faible
2	0,00025 (0,076)	-1,3	Modéré
3	0,00082 (0,250)	-2,6	Appréciable
4	0,0025 (0,760)	-3,9	Sévère

² On est en présence d'une eau agressive si le pH de l'eau est inférieur au pH d'équilibre, il y a alors dissolution du carbonate de calcium; mais si le pH de l'eau est supérieur au pH d'équilibre, on est en présence d'une eau incrustante et il y a précipitation du carbonate de calcium (Valiron, 1994)

Pour tenir compte de la variation du coefficient de Hazen Williams en fonction du temps, Sharp et Walski (1988) ont développé une approche pour extrapoler les valeurs du coefficient de Hazen Williams dans le futur en combinant l'équation de Darcy et l'équation de Hazen Williams. Toutes les équations qu'ils ont développées sont basées sur l'hypothèse que la hauteur de la rugosité croît approximativement linéairement avec le temps, ce qui a été vérifié avec les données récoltées de plusieurs autres systèmes de distribution.

En égalant les pertes de charge issues des deux équations et en éliminant des termes, le coefficient de Hazen Williams peut s'écrire en fonction du coefficient (f) de Darcy (en utilisant le système anglais) :

$$C = \frac{17,25}{f^{0,54} (V D)^{0,081}} \quad (6.10)$$

Le coefficient de perte de charge (f) peut être lié à la rugosité des conduites en utilisant la formule de Nikuradse applicable à un régime turbulent rugueux (équation 6.8). En remplaçant (f) par cette équation et en négligeant le terme en $(D)^{0,081}$ et pour une vitesse de 0,9 m/s (3 pi/s), Sharp et Walski (1988) ont trouvé l'équation suivante qui lie le coefficient de Hazen Williams (C) à la rugosité des parois (ke) :

$$C = \left[14,6 - 25,6 \log_{10} \left(\frac{ke}{D} \right) \right]^{1,08} \quad (6.11)$$

L'équation précédente peut être approximée par l'équation linéaire suivante (Sharp et Walski, 1988) :

$$C = 18 - 37,2 \log_{10} \left(\frac{ke}{D} \right) \quad (6.12)$$

Deux autres équations peuvent être développées en utilisant l'équation explicite de Swamee et Jain (1976) (Walski *et al.* 2001; Sharp et Walski 1988) :

$$f = \frac{1,325}{\left[\log \left(\frac{ke}{3,7 D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (6.13)$$

où :

Re : nombre de Reynolds compris entre $4,10^3$ et 10^8 (sans unité)

$\frac{ke}{D}$: rugosité relative variant entre 10^{-6} et 10^{-2} (sans unité)

Après avoir négligé le nombre de Reynolds et posé la vitesse d'écoulement égale à 0,9 m/s, le coefficient de Hazen Williams s'écrit :

$$C = 33,3 \left[\left[\log_{10} \left(\frac{ke}{3,7 D} \right) \right]^2 \right]^{0,54} \quad (6.14)$$

Cette dernière équation peut être simplifiée en (Sharp et Walski, 1988) :

$$C = 33,3 \left| \log_{10} \left(\frac{ke}{3,7 D} \right) \right|^{1,08} \quad (6.15)$$

Les équations 6.11, 6.12, 6.14 et 6.15 donnent presque les mêmes valeurs du coefficient C pour des valeurs de rugosité supérieures à 0,001 pi.

Afin d'estimer le taux de croissance de la rugosité des conduites, Sharp et Walski (1988) ont proposé deux méthodes :

- 1) La première est utilisée si le coefficient de Hazen Williams et l'âge de la conduite sont connus. L'ingénieur responsable de l'étude doit tracer la courbe des rugosités (ke) en fonction de l'âge. Les valeurs de ke sont obtenues à partir de l'équation suivante :

$$ke(t) = D \left[10^{\left(\frac{18-C(t)}{37,2} \right)} \right] \quad (6.16)$$

La pente de la courbe de ke en fonction de t donne le taux de croissance a_k (mm/an) et l'intersection avec l'axe vertical donne des indications sur la rugosité initiale de la conduite ke_0 (mm) (au temps initial lorsque la conduite est neuve) :

$$ke(t) = ke_0 + a_k t \quad (6.17)$$

Dans certains cas, les résultats peuvent donner une rugosité initiale négative attribuable à l'imprécision de l'équation ou aux erreurs de mesure. Le responsable de l'étude peut utiliser dans ce cas une valeur approximative de 0,18 mm (0,0006 pi) qui est la valeur usuelle utilisée pour les conduites en fonte (Walski *et al.* 2001).

Si les données transformées ne suivent pas une droite, l'ingénieur doit chercher à en connaître les raisons. L'explication usuelle donnée par Sharp et Walski (1988) est que la qualité de l'eau acheminée par le réseau a subi des modifications au cours du cycle de vie de la conduite. L'ingénieur doit donc essayer de déterminer a_k de la conduite connaissant la qualité de l'eau, car elle risque d'influencer les variations futures du coefficient de Hazen Williams.

- 2) La deuxième méthode est utilisée lorsque les coefficients de Hazen Williams ne sont pas disponibles ou que la qualité de l'eau viendrait à changer. L'ingénieur doit estimer le taux de croissance à partir de la qualité de l'eau et l'équation (6.9) doit être utilisée.

Ensuite, les équations d'estimation du coefficient de Hazen Williams citées précédemment peuvent être utilisées, l'équation 6.12 donnerait par exemple :

$$C(t) = 18 - 37,2 \log_{10} \left(\frac{ke_0 + a_k t}{D} \right) \quad (6.18)$$

Pour avoir une estimation des coefficients de Hazen-Williams à partir des tests dans un réseau de distribution, Ormsbee et Lingireddy (1997) ont proposé de

diviser le réseau de distribution en plusieurs zones contenant des conduites de même matériau et ayant le même âge. Ensuite, différentes conduites avec des diamètres distincts doivent être testées dans chaque zone afin d'obtenir une estimation du coefficient de Hazen-Williams pour chaque conduite. Ces estimations vont permettre de construire un nomographe adapté à tout le réseau de distribution. Pour estimer le coefficient de Hazen-Williams d'un tronçon, une partie de ce tronçon est sélectionnée et les valeurs de la longueur et du diamètre sont d'abord déterminées. Cette partie de tronçon est ensuite isolée et le débit et la différence de pression sont mesurés à partir des bouches d'incendie. Le coefficient de Hazen-Williams est alors approximé par l'application directe de l'équation de Hazen-Williams (voir Tableau 6.2).

7. ALGORITHMES GÉNÉTIQUES

Les algorithmes génétiques (AG) sont des méthodes utilisées dans les problèmes d'optimisation. Les AG tirent leur nom de l'évolution biologique des êtres vivants dans le monde réel. Ces algorithmes cherchent à simuler le processus de la sélection naturelle dans un environnement défavorable en s'inspirant de la théorie de l'évolution proposée par C. Darwin. Dans un environnement, « *les individus* » les mieux adaptés tendent à vivre assez longtemps pour se reproduire alors que les plus faibles ont tendance à disparaître (*the survival of the fittest*); Michalewicz *et al.* 1999; Tomassini 1999).

Par analogie avec l'évolution naturelle, les AG font évoluer un ensemble de solutions candidates, appelé une « population d'individus ». Un « individu » n'est autre qu'une solution possible du problème à résoudre. Chaque individu de cette population se voit attribuer une fonction appelée fonction d'adaptation (*fitness*) qui permet de mesurer sa qualité ou son poids; cette fonction d'adaptation peut représenter la fonction objectif à optimiser. Ensuite, les meilleurs individus de cette population sont sélectionnés, subissent des croisements et des mutations et une nouvelle population de solutions est produite pour la génération suivante. Ce processus se poursuit, génération après génération, jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint, comme par exemple le nombre maximal de générations.

Ce chapitre est organisé en quatre sections. Dans la section 7.1, le principe du fonctionnement d'un AG, ainsi que les principaux éléments qui caractérisent un AG standard, sont présentés. Dans la littérature, il existe plusieurs versions d'AG. Les principales caractéristiques de l'algorithme génétique en îlots (avec demes), implanté dans le « *Framework OpenBeagle* »

(http://www.gel.ulaval.ca/~beagle/index_f.html), sont présentées à la section 7.2. Cet outil permet à l'utilisateur de formuler son problème d'optimisation et de

choisir avec soin les opérateurs ainsi que le processus d'évolution des générations. Il comporte plusieurs algorithmes évolutionnaires, mais dans le cadre de cette étude, seuls les AG seront considérés. Dans le but de vérifier l'efficacité de l'AG implanté dans cet outil, le problème d'optimisation du dimensionnement des réseaux de distribution est formulé en Annexe C. Deux réseaux présentés dans la littérature (voir Annexe B) serviront à effectuer les tests, puis les résultats seront comparés à ceux déjà publiés.

La section 7.3 introduit quelques notions de base de l'optimisation multiobjectif. La dernière section 7.4 décrit quelques AG en optimisation multiobjectif et les algorithmes basés sur le principe Pareto (le *NPGA 2* et le *NSGA-II*) sont exposés en détail.

7.1 Algorithmes génétiques

Les techniques de recherche et d'optimisation sont en général classées en trois catégories (Coello Coello *et al.*, 2002) : énumératives, déterministes et stochastiques. Les AG font partie de la troisième catégorie et quatre caractéristiques les distinguent des autres techniques d'optimisation (Goldberg, 1989; 1994) :

- ils utilisent un codage des paramètres et non les paramètres eux-mêmes;
- ils travaillent sur une population d'individus (ou de solutions);
- ils n'utilisent que les valeurs de la fonction à optimiser, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire;
- ils utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes.

7.1.1 Principe de base d'un AG standard

Un AG standard nécessite en premier le codage de l'ensemble des paramètres du problème d'optimisation en une chaîne de longueur finie. Le principe d'un AG est simple, il s'agit de simuler l'évolution d'une population d'individus jusqu'à un

critère d'arrêt. On commence par générer une population initiale d'individus (solutions) de façon aléatoire. Puis, à chaque génération, des individus sont sélectionnés, cette sélection étant effectuée à partir d'une fonction objectif appelée fonction d'adaptation. Puis, les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués et une nouvelle population est créée. Ce processus est itéré jusqu'à un critère d'arrêt. Le critère le plus couramment utilisé est le nombre maximal de générations que l'on désire effectuer. La figure 7.1 présente le principe de l'AG standard.

L'AG débute par la génération d'une population initiale et l'évaluation de la fonction d'adaptation de tous les individus qui composent cette première population. Puis, des individus sont sélectionnés aléatoirement pour la reproduction selon le principe de la survie du plus adapté. Ensuite, des individus « enfants » (ou les descendants) sont générés en appliquant les deux opérateurs génétiques suivants : le croisement et la mutation. Ces enfants sont placés dans une nouvelle population $P(t)$ et vont se substituer, en tout ou en partie, à la population de la génération précédente. De nouvelles populations d'individus vont ensuite se succéder, d'une génération (t) à la génération $(t+1)$, chaque génération représentant une itération jusqu'à l'atteinte du critère d'arrêt. L'AG présenté ci-dessus est dit générationnel car tous les individus enfants générés sont placés dans une population et vont remplacer entièrement la population des individus parents.

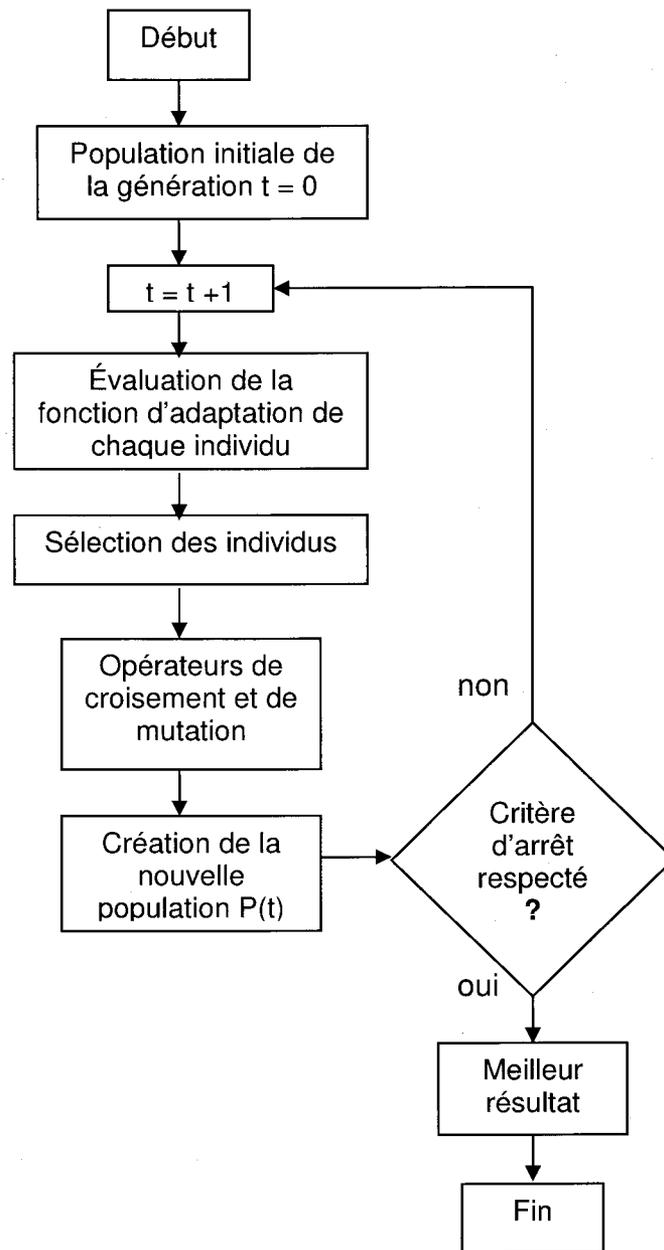


Figure 7.1 Organigramme d'un AG standard

Il existe de nombreuses méthodes pour la sélection, le croisement et la mutation.

7.1.1.1 Sélection

La sélection a pour objectif d'identifier les individus qui doivent se reproduire. Cet opérateur ne crée pas de nouveaux individus mais identifie les individus sur la base de leur fonction d'adaptation, les individus les mieux adaptés sont sélectionnés alors que les moins bien adaptés sont écartés (Deb, 2000). La sélection doit favoriser les meilleurs éléments selon le critère à optimiser (minimiser ou maximiser). Ceci permet de donner aux individus dont la valeur est plus grande une probabilité plus élevée de contribuer à la génération suivante (figure 7.2). Il existe plusieurs méthodes de sélection, les plus connues étant la « roue de la fortune » et la « sélection par tournoi » :

- La « roue de la fortune » est la plus ancienne, où chaque individu, de la population de taille maximale J_{max} , occupe une section de la roue proportionnellement à sa fonction d'adaptation $Fitness(j)$, la probabilité de sélection d'un individu (j) s'écrit :

$$Prob(j) = \frac{Fitness(j)}{\sum_{j=1}^{J_{max}} Fitness(j)} \quad (7.1)$$

À chaque fois qu'un individu doit être sélectionné, un tirage à la loterie s'effectue et propose un candidat, les individus possédant une plus grande fonction d'adaptation ayant plus de chance d'être sélectionnés.

- A chaque fois qu'il faut sélectionner un individu, la « sélection par tournoi » consiste à tirer aléatoirement (k) individus de la population, sans tenir compte de la valeur de leur fonction d'adaptation, et de choisir le meilleur individu parmi les k individus. Le nombre d'individus sélectionnés a une influence sur la pression de sélection, lorsque $k = 2$, la sélection est dite par « tournoi binaire ».

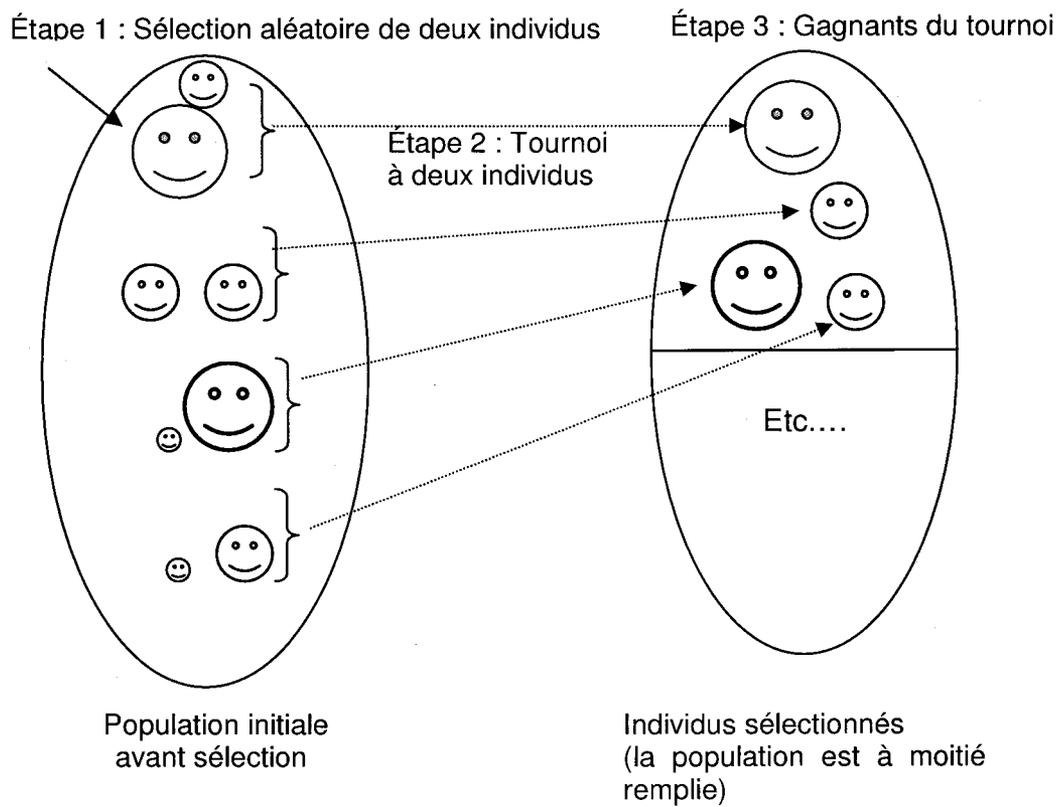


Figure 7.2 Représentation d'une sélection par tournoi d'individus pour un critère de maximisation. Chaque individu représente une solution possible

7.1.1.2 Croisement

Le croisement permet de créer de nouvelles chaînes en échangeant de l'information entre deux chaînes (figure 7.3). Le croisement s'effectue en deux étapes. D'abord les nouveaux éléments produits par la reproduction sont appariés, ensuite chaque paire de chaînes subit un croisement comme suit : un entier k représentant une position sur la chaîne est choisi aléatoirement entre 1 et la longueur de chaîne (ℓ) moins un ($\ell - 1$). Deux nouvelles chaînes sont créées en échangeant tous les caractères compris entre les positions $k + 1$ et ℓ inclusivement. L'exemple suivant (figure 7.3) montre deux chaînes (A_1 et A_2) de longueur $\ell = 5$ appartenant à la population initiale. Les deux nouvelles chaînes

(A_3 et A_4) appartenant à la nouvelle population sont obtenues par croisement à la position $k = 4$:



Figure 7.3 Représentation d'un croisement en un point de deux chaînes

7.1.1.3 Mutation

La mutation est exécutée seulement sur une seule chaîne. Elle représente la modification aléatoire et occasionnelle de faible probabilité de la valeur d'un caractère de la chaîne, pour un codage binaire cela revient à changer un 1 en 0 et vice versa (figure 7.4). Cet opérateur introduit de la diversité dans le processus de recherche des solutions et peut aider l'AG à ne pas stagner dans un optimum local.



Figure 7.4 Représentation d'une mutation de bits dans une chaîne

7.1.2 Codage

Le codage utilisé par un AG est représenté sous forme d'une chaîne de bits qui contient toute l'information nécessaire pour représenter un point de l'espace de recherche. Le codage binaire est le code le plus utilisé (Goldberg, 1989), l'inconvénient majeur du code binaire étant que deux points proches dans l'espace des variables (voir la colonne 1 du Tableau 7.1) ne sont pas nécessairement codés par deux chaînes de bits voisines (colonne 2 du Tableau 7.1). On remédie en général à ce problème en utilisant le codage de Gray qui

conserve une distance de Hamming de « 1 » entre deux chaînes (colonne 3 du Tableau 7.1). La distance de Hamming entre deux chaînes de bits est le nombre de bits qui diffère de l'une à l'autre. Pour les deux chaînes suivantes : 111 et 100, la distance est de 2.

Le Tableau 7.1 montre un exemple du code binaire et le code Gray pour des variables entières allant de 0 et 7. On voit que la distance de Hamming est de 1 pour chaque entier dans le code Gray, alors que pour les nombres binaires, pour passer de 3 à 4, la distance de Hamming est de 3.

Tableau 7.1 Code de Gray et code binaire pour une chaîne à trois bits

Variables entières	Code binaire	Code Gray
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	100	110
5	101	111
6	110	101
7	111	100

7.1.3 Paramètres d'un AG

Pour appliquer un AG à un problème réel, on doit posséder les éléments suivants :

- un codage des éléments appartenant à la population, le codage des solutions du problème à résoudre doit être choisi avec soin;
- une fonction d'évaluation ou d'adéquation ou d'adaptation de l'individu qui mesure la qualité de l'individu;
- un processus d'évolution des générations;
- des opérateurs pour modifier les individus d'une population de la génération (t) à la génération (t+1) comme le croisement et la mutation;
- des paramètres de l'AG : les opérateurs précédents dépendent de plusieurs paramètres qui sont fixés à l'avance et dont dépend fortement la convergence de l'algorithme :

1. taille de la population : c'est-à-dire le nombre d'individus dans la population. Si la taille est trop petite, l'AG peut ne pas converger, par contre si elle est trop grande, l'évaluation des individus peut être très longue;
2. probabilité de croisement et de mutation. Les valeurs de ces probabilités peuvent varier d'une application à l'autre. Par exemple, dans l'étude des AGs pour l'optimisation de cinq fonctions mathématiques, De Jong (1975) a suggéré de choisir une probabilité de croisement élevée, une probabilité de mutation faible (inversement proportionnelle à la taille de la population), et une population de taille modérée (Goldberg, 1994). La probabilité de mutation est en général très faible, inférieure à 0,1, une probabilité trop grande pouvant modifier les meilleurs individus;
3. critère d'arrêt : c'est-à-dire le nombre maximal de générations à effectuer.

7.1.4 Processus d'évolution des générations : générationnel, stationnaire et élitiste

Traditionnellement, les AG sont générationnels. Les individus de chaque génération sont testés et une nouvelle population en entier est générée, le nombre de descendants produits est donc égal au nombre d'individus parents. Les deux populations ne se chevauchent pas (Langdon, 1998). La nouvelle population d'individus enfants est formée à chaque génération. Cependant, certains individus enfants peuvent être une copie conforme des parents qui n'ont pas été perturbés ni par un croisement ni par une mutation.

La stratégie de remplacement stationnaire (*steady-state*) diffère de l'AG générationnel. Dans cette approche, il y a seulement un ou deux individus qui sont générés à la fois (Ryan, 2000). Il peut y avoir différentes façons de sélectionner « l'individu victime » à supprimer de la population. Par exemple, on

peut sélectionner un individu aléatoirement ou sélectionner celui qui a la plus petite fonction d'adaptation. Dans ce type d'AG, les nouveaux individus générés sont ajoutés à la population et peuvent immédiatement être sélectionnés comme parents de nouveaux individus (Langdon, 1998).

Approche élitiste (*elitist model*)

Les opérateurs de croisement et de mutation peuvent affecter le meilleur individu d'une génération. Le modèle élitiste a pour avantage d'écartier la possibilité de perdre cet individu. Ce modèle copie le meilleur individu de chaque génération dans la population de la génération suivante. Ce modèle peut accélérer la vitesse de domination exercée par ce super individu sur la population (Cerrolaza et Annicchiarico, 1999).

7.1.5 Opérateurs de croisement

Il existe d'autres opérateurs de croisement :

- 1) Croisement en deux points : on choisit au hasard deux points de croisement et on échange les parties de chaîne situées entre ces deux points (figure 7.5).



Figure 7.5 Représentation d'un croisement en deux points

- 2) Croisement uniforme : dans ce type de croisement, on utilise un masque de croisement (*mask*), qui consiste en un vecteur généré aléatoirement, de longueur identique aux chaînes parents, et composé de 0 et 1. Lorsque le bit du masque vaut 0, l'enfant hérite le bit du premier parent, sinon il hérite de celui du second parent. Le second enfant est le complémentaire du premier. Ce croisement peut être considéré comme une généralisation du

croisement multipoint sans connaissance préalable du point de croisement (figure 7.6).

A_1	001010	(Parent ₁)
A_2	011111	(Parent ₂)
<i>Masque</i>	001101	
A_3	001111	(Enfant ₁)
A_4	011010	(Enfant ₂)

Figure 7.6 Représentation d'un croisement uniforme

7.2 AG en îlots (ou avec demes)

Au lieu d'utiliser une seule population, on peut trouver des AG qui utilisent des ensembles de petites sous-populations (appelées des *demes*) qui évoluent séparément. Ce modèle est appelé modèle en îlots. Grâce à cette isolation, chaque îlot peut évoluer avec ses propres paramètres, dans des directions différentes, c'est-à-dire vers des solutions différentes. Dans ce type d'AG, on peut faire migrer un certain nombre d'individus d'une sous-population (j) à une sous-population voisine ($j+1$). L'îlot qui évolue vers un optimum local ou qui a convergé prématurément peut être aidé par l'arrivée d'un ou de plusieurs individus migrants. La figure 7.7 présente un exemple d'une population avec cinq *demes*, dans laquelle deux individus sont choisis aléatoirement pour migrer du deme (j) au deme ($j+1$). Les individus sélectionnés pour la migration peuvent rester dans leur îlot et seulement une copie est envoyée dans l'îlot voisin, ou bien ces individus sont envoyés directement dans l'îlot voisin.

D'après Ryan (1995), la sélection des individus migrants peut se faire de deux façons. La première est aléatoire, l'avantage de cette méthode est la plus grande variété des individus qui peut en résulter. La seconde méthode consiste à

sélectionner les individus en fonction de leurs fonctions d'adaptation et choisir les plus performants de chaque îlot pour les copier dans les autres îlots, ce qui peut engendrer une évolution plus directe que la première méthode. Cantù-Paz (2000) a testé plusieurs autres configurations, par exemple : les meilleurs migrants remplacent les moins bons, les migrants sélectionnés aléatoirement remplacent les moins bons, les meilleurs migrants remplacent des migrants sélectionnés aléatoirement. Le choix des individus migrants d'un deme à l'autre et des individus remplacés dans chaque deme peut influencer la pression de sélection. Les configurations qui sélectionnent les individus migrants ou remplacés en fonction de leur fonction d'adaptation ont tendance à accélérer la convergence.

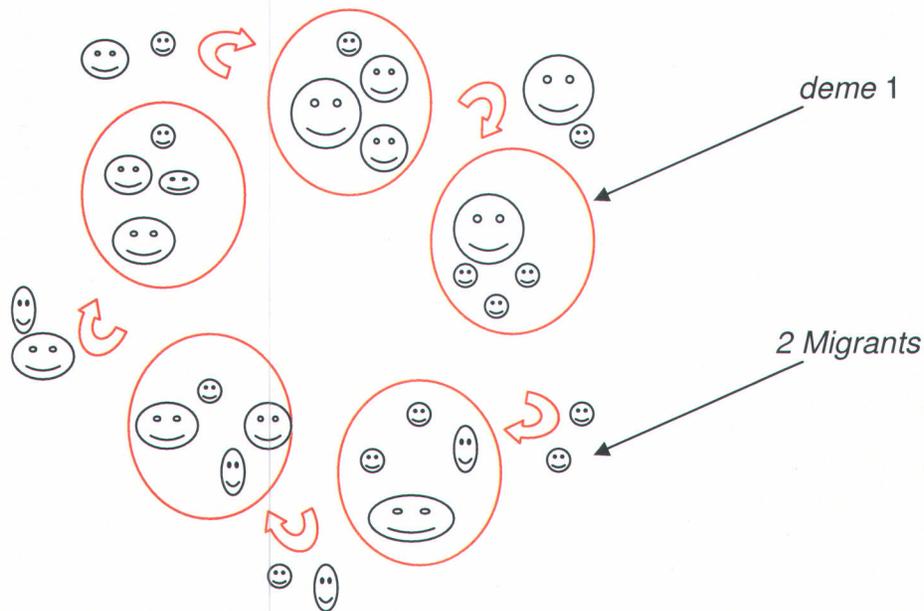


Figure 7.7 Représentation d'un AG en îlots

L'avantage du modèle en îlots est que la recherche de la meilleure solution se fait en parallèle, dans différents espaces de recherche, ce qui permet d'avoir plusieurs solutions qui peuvent être très utiles surtout dans le cas des fonctions multimodales. Le second avantage est que, lorsque l'on envoie des individus d'un îlot à l'autre, on peut éviter une convergence prématurée de l'AG dans chaque îlot et le fait de copier des individus d'un îlot à l'autre plutôt que de les

envoyer à l'îlot voisin ne cause aucune perte dans la qualité des individus, même lorsque ces individus devront s'apparier avec d'autres individus moins bons.

L'AG en îlots nécessite de préciser, en plus des paramètres de l'AG standard cités précédemment (section 7.1.3), les paramètres suivants : la taille des sous-populations (ou nombre de demes), la fréquence de migration des individus (exprimée en nombre de générations) et le nombre d'individus qui migrent à chaque fois (peut être exprimé en % de la taille du deme).

L'algorithme pour le modèle en îlots est schématisé à la figure 7.8. Dans chaque deme (sous-population), un AG est exécuté séquentiellement. Les demes peuvent s'échanger de l'information de temps à autre en permettant à certains individus de migrer d'une sous-population à l'autre selon certaines topologies.

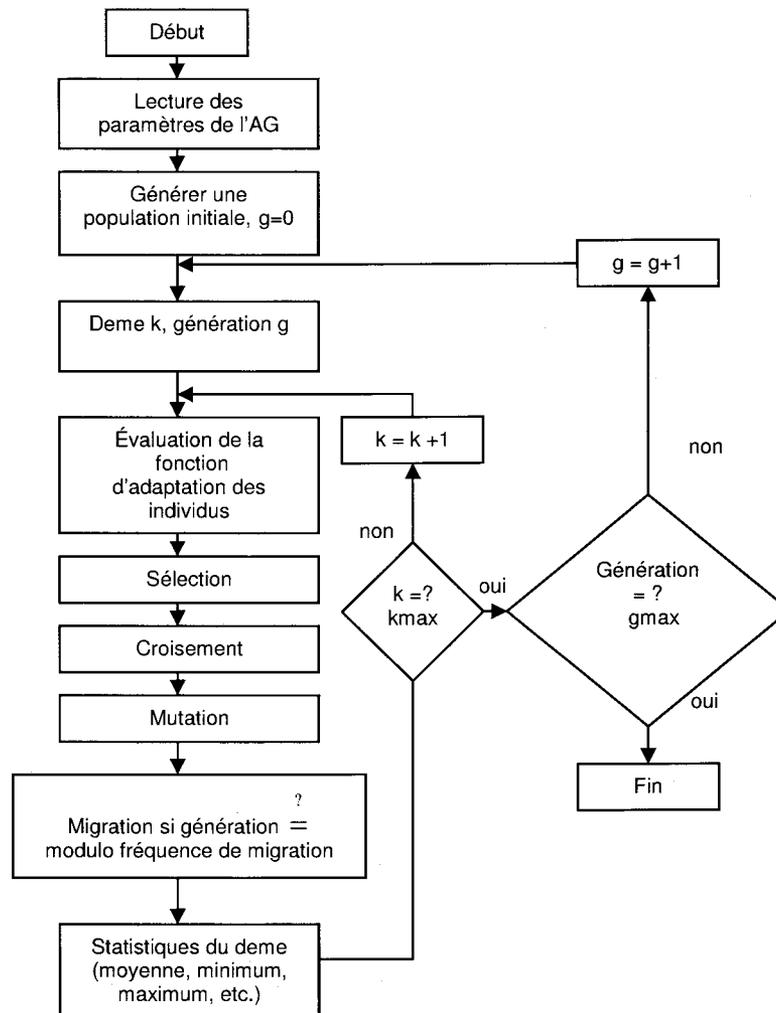


Figure 7.8 Processus d'évolution dans un modèle d'AG en îlots, générationnel

7.3 Optimisation multiobjectif : définition et principes de base

Coello Coello *et al.* (2002), Coello Coello (2000, 2001) et Miettinen (2001) ont déjà présenté les principes et les notions de base d'une optimisation à objectifs multiples. Dans cette section, les points les plus importants sont décrits. Un problème d'optimisation multiobjectif peut être formulé de la manière suivante (Coello Coello 2002) :

Trouver le vecteur $\mathbf{x}^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$ qui satisfasse les m contraintes d'inégalités et les p contraintes d'égalités suivantes :

$$g_i(\mathbf{x}) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$h_i(\mathbf{x}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, p$$

où : g_i et h_i sont les contraintes exprimées sous forme mathématique ;

en optimisant (minimiser ou maximiser) le vecteur de fonctions suivant :

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})]^T$$

sachant que $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ est le vecteur des variables de décision.

Le principe d'une optimisation multiobjectif est différent du principe d'une approche monoobjectif. Le but principal d'une optimisation monoobjectif est de trouver la solution optimale globale qui résulte en la meilleure valeur (plus petite ou plus grande) de la fonction monoobjectif. Dans un problème d'optimisation multiobjectif, il y a plus qu'une fonction objectif ($k \geq 2$), chaque fonction objectif pouvant avoir une solution optimale différente. Le but d'un problème multiobjectif est de trouver de « bons compromis » plutôt qu'une seule solution. Lorsqu'il y a plusieurs objectifs, la notion d'optimum change et il est préférable d'utiliser un autre terme, le terme le plus couramment adopté étant l'optimum de Pareto (*Pareto optimum*) (Coello Coello *et al.* 2002).

Définition 1 (Pareto optimal minimum) : Un vecteur des variables $\mathbf{x}^* \in S$ (S région réalisable) est un optimum de Pareto si, pour chaque $\mathbf{x} \in S$ et $I = \{1, 2, \dots, k\}$, soit 1) $\forall_{i \in I} (f_i(\mathbf{x}) = f_i(\mathbf{x}^*))$ ou bien, 2) il existe au moins un $i \in I$ tel que : $f_i(\mathbf{x}) > f_i(\mathbf{x}^*)$.

Au lieu d'une unique solution, l'optimisation multiobjectif donne lieu à un ensemble de solutions optimales. Toute solution de cet ensemble est

« optimale » dans le sens qu'aucune amélioration ne peut être faite sur un critère de cette solution sans dégrader au moins la valeur d'un autre critère. Ces solutions optimales forment l'ensemble des solutions Pareto optimales.

Définition 2 (La dominance) : Une solution A domine une solution B si et seulement si : $\forall i \in \{1, 2, \dots, k\} : f_i(A) \leq f_i(B)$ et $\exists j \in \{1, 2, \dots, k\} : f_j(A) < f_j(B)$.

Si la solution (A) domine la solution (B), on dit que (B) est dominée par (A) ou bien (A) est non dominée par (B) ou entre les deux solutions, (A) est la solution non dominée.

Les solutions « Pareto optimales » sont connues sous le nom de solutions « non dominées ». La représentation de ces solutions non dominées dans l'espace des objectifs est appelée « le front de Pareto ». La figure 7.9 montre l'exemple d'un front de Pareto pour le problème de minimisation de deux objectifs. Les points en blanc représentent le front de Pareto.

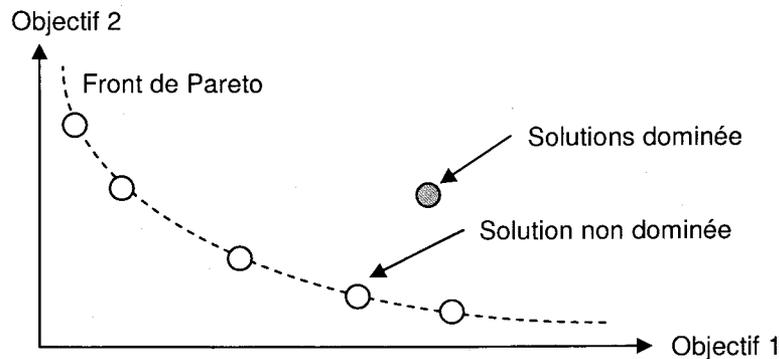


Figure 7.9 Exemple d'un front de Pareto

7.4 AG pour l'optimisation multiobjectif

Dans la plupart des AG d'optimisation multiobjectif développés, il s'agit de satisfaire les deux points suivants (Deb, 1999) : 1) trouver des solutions aussi proches que possible des vraies solutions Pareto-optimales, c'est-à-dire

converger le plus possible vers le front de Pareto, et 2) trouver un ensemble de solutions très variées, tout le long du front.

Le tout premier algorithme évolutionnaire d'optimisation multiobjectif s'appelle *VEGA* (*Vector Evaluated Genetic Algorithm*, AGEV : Algorithme Génétique à Évaluation Vectorielle) et a été présenté par Schaffer en 1985 (Coello Coello, 2001). Cet algorithme considère une population de N individus. Ces individus sont répartis en k sous-populations, chaque valeur de k représentant un objectif à optimiser. À chaque génération, un nombre de sous populations est généré par sélection en fonction de l'objectif k . Ensuite, ces sous-populations sont regroupées pour former une nouvelle population de N individus et les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués.

L'avantage de cet algorithme est qu'il est facile à implanter mais son inconvénient majeur est qu'il a tendance à générer des solutions qui excellent dans un seul objectif, sans tenir compte des autres objectifs. Toutes les solutions de moyenne performance, qui peuvent être de très bons compromis, risquent de disparaître avec ce type de sélection.

Depuis *VEGA*, un nombre considérable d'AG d'optimisation multiobjectifs ont été proposés : *NPGA* (Horn *et al.*, 1994); *NPGA 2* (Erickson *et al.* 2001); *NSGA* (Srinivas et Deb 1994); *NSGA-II* (Deb *et al.* 2002), ainsi que les algorithmes *micro-GA* qui réfèrent à des algorithmes avec de petites populations avec réinitialisation.

Tous les algorithmes présentés dans cette section sont basés sur une approche Pareto, c'est-à-dire que le principe de dominance est utilisé dans le processus de sélection. Le *NPGA* (*Niched Pareto Genetic Algorithm*) et le *NPGA 2*, une version améliorée du *NPGA*, sont présentés. Ensuite on expose dans la section suivante le principe du *NSGA-II* (*Non Dominated Sorting Genetic Algorithm-II*) qui

utilise une approche élitiste et qui est considéré comme plus efficace que le NSGA.

7.4.1 Niched Pareto Genetic Algorithm (NPGA)

Horn *et al.* (1994) ont proposé le *NPGA*, un algorithme utilisant une sélection par tournoi, basée principalement sur la dominance de Pareto. Le *NPGA* exécute les mêmes étapes que l'AG standard, la seule chose qui diffère étant la méthode de sélection. À chaque tournoi, deux individus candidats, A et B, sont sélectionnés aléatoirement dans la population initiale. Au lieu de limiter la comparaison aux deux individus (comme c'est le cas pour l'AG standard), un ensemble d'individus (ou ensemble de comparaison) est également sélectionné aléatoirement dans la population. Les deux candidats sélectionnés sont comparés à chaque individu de l'ensemble de comparaison. Si l'un des deux candidats est dominé par l'ensemble, et le second ne l'est pas, ce dernier est sélectionné pour la reproduction. Si les deux candidats sont dominés ou non dominés par l'ensemble de comparaison, alors il faut utiliser la technique basée sur la fonction de partage, définie ci-dessous, pour choisir le candidat gagnant. Le résultat du tournoi est décidé lors du calcul du compteur de niche (voir la section 7.4.1.1). La taille de l'ensemble de comparaison (t_{dom}) permet de contrôler la pression de sélection ou de domination.

7.4.1.1 Fonction de partage (*fitness sharing*) et compteur de niche

La fonction de partage a été introduite par Goldberg et Richardson (1987) et analysée en détail par Deb (1989) (d'après Horn *et al.*, 1994). La principale difficulté dans un AG est qu'un individu ayant une très bonne fonction d'adaptation a tendance à se multiplier aux dépens des autres individus de la population. Le problème est que dans les fonctions multimodales, on essaie d'avoir plusieurs optimums (ou pics) et non pas un seul optimum localisé. La fonction de partage a donc été introduite pour distribuer la population d'individus

sur les différents pics de l'espace de recherche. Pour effectuer cette distribution, la fonction d'adaptation de chaque individu (i) est dégradée par un compteur de niche (m_i), calculé pour ce même individu. Le partage permet de dégrader la fonction d'adaptation d'un individu par rapport au nombre d'individus semblables dans la population.

La nouvelle fonction de partage calculée *shared fitness* est obtenue en divisant la fonction d'adaptation de l'individu par le compteur de niche. Le compteur de niche m_i donne une estimation du nombre d'individus qui se trouvent dans le voisinage de l'individu (i). Ce coefficient est calculé pour tous les individus (j) de la population courante (Pop) :

$$m_i = \sum_{j \in Pop} Sh[d[i, j]] \quad (7.2)$$

où :

$d[i, j]$: distance entre l'individu i et j

$Sh[d[i, j]]$: fonction décroissante de $d[i, j]$, tel que : $Sh[0] = 1$
et $Sh[d \geq \sigma_{share}] = 0$

La fonction $Sh[d]$, la plus communément utilisée, est la fonction triangulaire définie comme suit :

$$Sh[d] = \begin{cases} 1 - \frac{d}{\sigma_{share}} & \text{si } d \leq \sigma_{share} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (7.3)$$

où :

σ_{share} : rayon de niche, fixé dans la plupart des cas par l'utilisateur en fonction de la distance minimale de séparation voulue entre les différents pics.

Dans le cas d'une approche multiobjectif (*NPGA*), la méthode précédente de la dégradation des fonctions des individus par le compteur de niche (*shared fitness*) n'est plus prise en compte. Ce qui compte le plus, c'est le compteur de niche de

chaque individu. Entre deux individus qui sont ni dominés, ni non dominés, l'individu ayant le plus petit compteur de niche est sélectionné, de la sorte il est possible de maintenir une diversité le long du front de Pareto. La figure 7.10 montre l'exemple de deux individus (candidats) non dominés, en considérant une maximisation selon l'axe des x et une minimisation selon l'axe des y. Dans cette figure, les deux candidats (1 et 2) pour la sélection ne sont pas dominés par l'ensemble de comparaison. Pour maintenir la diversité le long du front de Pareto, le candidat qui a le plus petit compteur de niche est sélectionné, soit le candidat numéro 2.

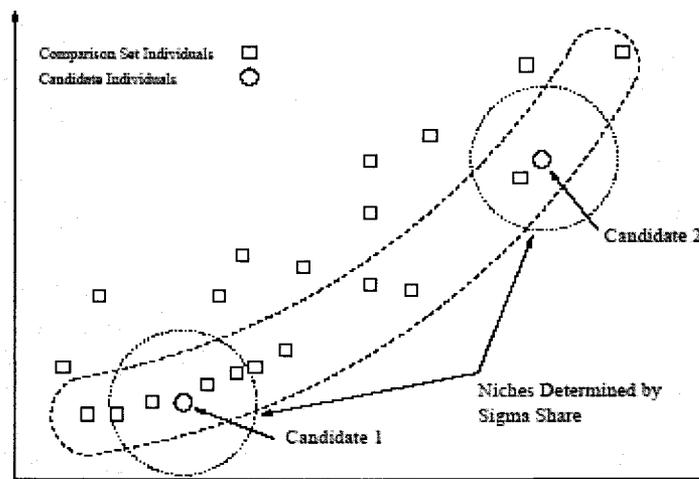


Figure 7.10 Sélection d'individus avec le NPGA (d'après Horn *et al.*, 1994)

Horn *et al.* (1994) ont trouvé que l'utilisation d'une sélection et du partage de la fonction pouvait provoquer des perturbations chaotiques dans la composition de la population. Ils ont alors suggéré l'utilisation de la technique *d'actualisation du partage* lors du calcul du compteur de niche (m) d'un individu. Le compteur de niche est alors calculé non pas avec les individus de la population courante, mais avec la population « *partiellement remplie de la génération suivante* ».

7.4.1.2 Distance entre deux individus

La distance entre deux individus, $d[x,y]$, peut être définie dans l'espace des objectifs ou dans l'espace de recherche (Bagchi, 1999). Le choix de l'espace

dépend en principe du problème. Dans l'espace des objectifs, on trouve principalement la formule suivante :

$$d[x, y] = \left(\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^p \right)^{1/p} \quad (7.4)$$

où :

x_i, y_i : valeurs du i^e objectif;

p : paramètre de la distance, si $p = 2$, la formule définit une distance euclidienne.

7.4.1.3 Avantage et désavantage du *NPGA*

D'après Coello Coello (2001), puisque l'algorithme *NPGA* n'est pas basé sur le classement de Pareto (*Pareto ranking*) de tous les individus de la population, mais sur seulement une partie, à chaque génération, il est donc considéré comme étant plus rapide que les algorithmes basés sur le tri. Le principal désavantage de cet algorithme est qu'il nécessite, en plus de spécifier le facteur de partage (σ_{share}) (*sharing factor*), un paramètre supplémentaire qui est la taille du tournoi (t_{dom}).

7.4.2 *Niched Pareto Genetic Algorithm 2 (NPGA 2)*

Erickson *et al.*, (2001) ont proposé le *NPGA 2* qui est basé sur le degré de domination d'un individu. La sélection par tournoi est utilisée comme dans l'AG standard mais le critère de sélection de l'individu gagnant du tournoi, est basé sur le classement de Pareto (*Pareto ranking*). La variable qui contrôle la sélection des compétiteurs est la taille du tournoi. En premier, un groupe de k compétiteurs est sélectionné aléatoirement dans la population. Puis, s'il existe un candidat ayant un plus petit rang que tous les autres (c'est-à-dire celui qui est le moins dominé), alors il sera sélectionné comme gagnant du tournoi. Si toutefois aucun des candidats n'est préférable aux autres alors la technique du partage

permet d'identifier le gagnant et le candidat ayant le plus petit compteur de niche est sélectionné. Comme pour le *NPGA*, le compteur de niche est calculé en utilisant les individus de la population partiellement remplie, de la génération suivante, plutôt que d'utiliser la population de la génération courante.

Erickson *et al.*, (2001) ont suggéré l'ajustement de l'unité de mesure des fonctions objectifs pour amener les valeurs des fonctions dans le même intervalle afin de déterminer la valeur du rayon de niche. Ils ont présenté comme exemple la relation suivante :

$$F'_i = \frac{F_i - F_{i,min}}{F_{i,max} - F_{i,min}} \quad (7.5)$$

où :

$F'_i, F_{i,min}$ et $F_{i,max}$: valeurs de la fonction ajustée, le minimum et le maximum de l'objectif F_i , respectivement.

7.4.3 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II)

Deb *et al.* (2002) ont proposé une nouvelle version de l'algorithme *NSGA*, le *NSGA-II*, qui est considéré comme étant plus efficace que son prédécesseur car :

- 1- Il utilise une approche élitiste qui permet de sauvegarder les meilleures solutions trouvées lors des générations précédentes.
- 2- Il utilise une procédure de tri basée sur la non-dominance, plus rapide.
- 3- Il ne nécessite aucun réglage de paramètre.
- 4- Il utilise un opérateur de comparaison basé sur un calcul de la distance de *crowding* (voir la section 7.4.3.1).

Dans cet algorithme, une population de parents (P_t) de taille N et une population d'enfants (Q_t) de taille N sont assemblées pour former une population ($R_t = P_t \cup Q_t$), comme le montre la figure 7.11. Cet assemblage permet d'assurer

l'élitisme. La population de taille $(2N)$ est ensuite triée selon un critère de non-dominance pour identifier les différents fronts F_1, F_2 , etc. Les meilleurs individus vont se retrouver dans le ou les premiers fronts. Une nouvelle population parent (P_{t+1}) est formée en ajoutant les fronts au complet (premier front F_1 , second front F_2 , etc.) tant que ceux-ci ne dépassent pas N . Si le nombre d'individus présents dans (P_{t+1}) est inférieur à (N) , une procédure de *crowding* est appliquée sur le premier front suivant, (F_i), non inclus dans (P_{t+1}). Le but de cet opérateur est d'insérer les $(N - |P_{t+1}|)$ meilleurs individus qui manquent dans la population (P_{t+1}). Les individus de ce front sont utilisés pour calculer la distance de *crowding* entre deux solutions voisines.

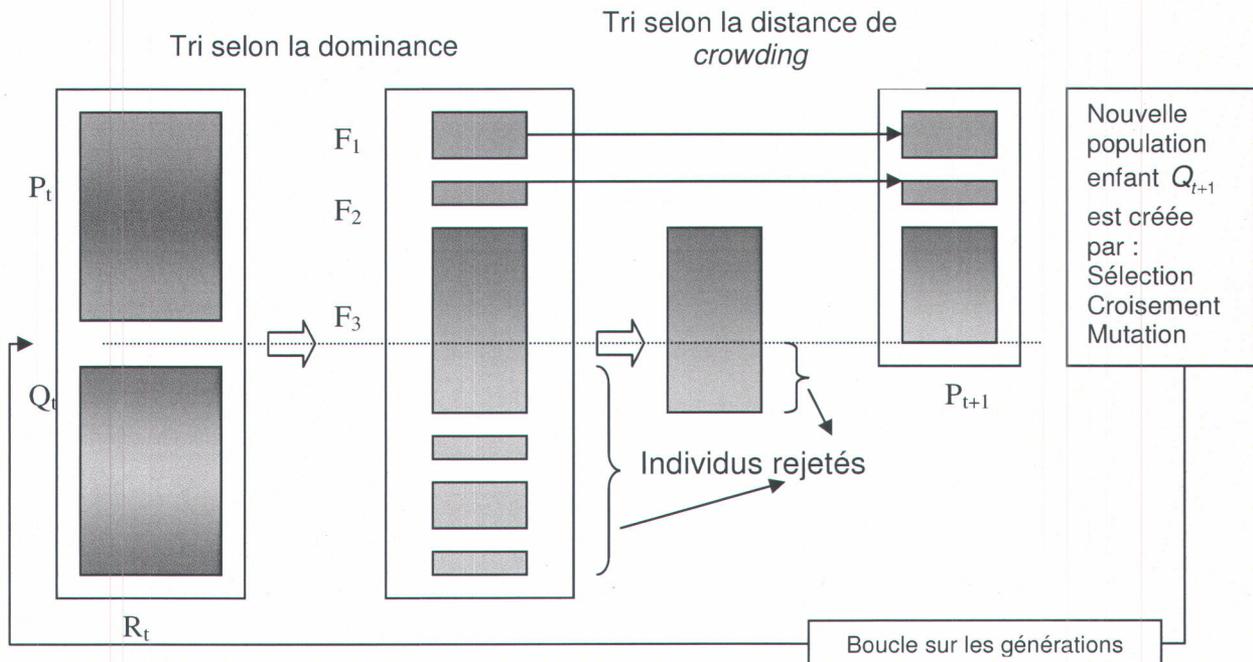


Figure 7.11 Principe de l'algorithme NSGA-II (Deb *et al.*, 2002)

Une fois que les individus appartenant à la population (P_{t+1}) sont identifiés, une nouvelle population enfant (Q_{t+1}) est créée par sélection, croisement et mutation. La sélection par tournoi est utilisée mais le critère de sélection est maintenant basé sur l'opérateur de comparaison (\prec_n) défini ci-dessous. Le processus

continue, d'une génération à la suivante, jusqu'à un critère d'arrêt. La figure 7.12 résume les différentes étapes décrites ci-dessus de l'algorithme *NSGA-II*.

Pour chaque itération t faire

$R_t = P_t \cup Q_t$ (Combiner les deux populations)

$F = \text{fast - non - dominated - sort}(R_t)$ (Calcul de tous les fronts non dominés de R_t)

$P_{t+1} = \emptyset$

$i = 1$

Tant que $|P_{t+1}| + |F_i| \leq N$ (Tant que la population n'est pas pleine)

$i = i + 1$

$P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$ (Inclure le i^{e} front non dominé dans P_{t+1})

Crowding – distance – assignment (F_i) (Calculer la distance de "crowding" du front F_i)

Sort (F_i, \prec_n) (Trier dans un ordre descendant en utilisant l'opérateur de comparaison \prec_n)

$P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i[1 : (N - |P_{t+1}|)]$ (Choisir les premiers $(N - |P_{t+1}|)$ individus du front les mieux répartis)

Générer une nouvelle population enfant (Q_{t+1}) par sélection, croisement et mutation

$t = t + 1$ (Incrémenter le compteur des générations)

Figure 7.12 Algorithme du *NSGA-II* (Deb *et al.*, 2002)

7.4.3.1 Calcul de la distance de *crowding*

La distance de *crowding* d'une solution (i) (ou d'un individu) mesure la densité des solutions présentes autour de cette solution. Elle se calcule en fonction du périmètre formé par les points les plus proches de (i) sur chaque objectif. La figure 7.13 montre une représentation à deux dimensions associée à la solution (i). Le calcul de la distance de *crowding* nécessite, avant tout, le tri des solutions selon chaque objectif, dans un ordre ascendant. Ensuite, pour chaque objectif, les individus possédant les valeurs limites (la plus petite et la plus grande valeur de fonction objectif) se voient associés une distance infinie (∞). Pour les autres solutions intermédiaires, on calcule une distance de *crowding* égale à la différence normalisée des valeurs des fonctions objectifs de deux solutions adjacentes. Ce calcul est réalisé pour chaque fonction objectif. La distance de *crowding* d'une solution est calculée en sommant les distances correspondantes à chaque objectif.

L'algorithme de la figure 7.14 montre la procédure de calcul de la distance de toutes les solutions non dominées de l'ensemble (I). Dans cet algorithme, f_m^{i+1} et f_m^{i-1} représentent respectivement la valeur de la m^e fonction objectif de la solution $i+1$ et $i-1$, alors que les paramètres f_m^{Max} et f_m^{Min} représentent les valeurs maximale et minimale de la m^e fonction objectif. Après ce calcul, toutes les solutions de I auront une distance métrique.

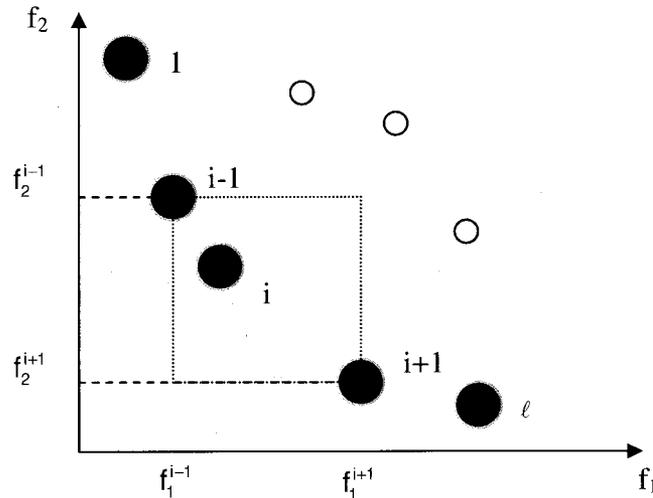


Figure 7.13 Distance de *crowding*, les points noirs sont des solutions appartenant au même front (Deb *et al.*, 2002)

$\ell = I $	Nombre de solutions dans l'ensemble I
Pour chaque i , poser $I[i]_{\text{distance}} = 0$	Initialiser les distances
Pour chaque objectif m	
$I = \text{Trier}(I, m)$	Trier selon la valeur de l'objectif m
$I[1]_{\text{distance}} = \infty$	
$I[\ell]_{\text{distance}} = \infty$	
For $i = 2$ to $(\ell - 1)$	
$I[i]_{\text{distance}} = I[i]_{\text{distance}} + (f_m^{i+1} - f_m^{i-1}) / (f_m^{\text{Max}} - f_m^{\text{Min}})$	

Figure 7.14 Calcul de la distance de *crowding* pour chaque solution d'un front

L'opérateur *crowded-comparison* (\prec_n) est utilisé pour guider le processus de sélection comme suit : chaque solution (i) de la population est identifiée par son rang (i_{rang}) et la distance de *crowding* ($i_{distance}$). L'opérateur (\prec_n) défini ci-dessous permet d'identifier un ordre de préférence entre deux solutions :

$$i \prec_n j \quad \text{si} \quad (i_{rang} < j_{rang}) \quad (7.6)$$

$$\text{ou} \quad ((i_{rang} = j_{rang}) \text{ et } (i_{distance} > j_{distance}))$$

Entre deux solutions de rangs différents, on préfère la solution avec le plus petit rang (ou le plus petit front). Pour deux solutions qui appartiennent au même front, on préfère la solution qui est localisée dans la région où la densité de solutions est moindre, soit l'individu possédant la plus grande valeur de distance de *crowding*.

7.4.3.2 Algorithme NSGA-II implanté dans Open-Beagle

L'algorithme NSGA-II implanté dans Open-Beagle commence par générer une population enfant de taille P à partir de la population parent de taille P . Pour générer la population de P individus enfants, un arbre de sélection est appelé P fois. À chaque fois, un seul individu est créé par application d'un croisement en un point ou d'une mutation, sur des individus sélectionnés aléatoirement de la population parent, puis les fonctions objectifs de cet individu sont évaluées (Gagné et Parizeau 2004). Le mode de génération de l'individu enfant s'effectue aléatoirement selon une fonction de densité de probabilité paramétrée par les deux probabilités suivantes : probabilité de croisement et probabilité de mutation de l'individu. Lorsque la population enfant compte P individus, les deux populations enfants et parents sont assemblées et un tri basé sur la non-dominance est réalisé pour identifier la population de taille P de la génération suivante.

8. STRATÉGIE DE PLANIFICATION DES INTERVENTIONS EN RÉSEAU

Dans la plupart des cas, les réseaux de distribution sont maillés et toute décision de remplacer une conduite du réseau, lorsque son état structural est jugé inadéquat, peut affecter la vitesse d'écoulement et les pressions dans toutes les autres conduites. Il importe, dans un tel contexte, d'intégrer les aspects hydrauliques à la stratégie de remplacement, de sorte qu'elle permette d'améliorer à la fois les aspects structural et hydraulique. On se propose donc de développer une approche qui tienne compte de ces deux aspects.

Dans ce chapitre, on expose la stratégie proposée pour la planification des interventions en réseau. Cette stratégie utilise les différents modèles présentés dans les chapitres précédents : l'identification du modèle de bris (chapitre 3), l'estimation des paramètres du modèle de bris (chapitre 4), l'évolution du coefficient de Hazen-Williams et l'évaluation du fonctionnement hydraulique du réseau (chapitre 6) et l'utilisation de l'AG pour coder la solution et résoudre le problème d'optimisation (chapitre 7).

Ce chapitre comporte six sections. La section 8.1 expose le principe de la stratégie pour la planification des interventions en réseau. La section 8.2 explique le processus d'actualisation de l'historique de bris des conduites. La section 8.3 identifie, pour le cas d'un modèle de bris général, la fonction coût pour un réseau. Cette fonction coût représente la fonction objectif à minimiser. La section 8.4 identifie le coefficient de Hazen-Williams de chaque conduite du réseau. La section 8.5 identifie les contraintes hydrauliques qui doivent être satisfaites. La formulation du problème du remplacement des conduites avec un AG est présentée à la dernière section 8.6. Le codage choisi pour représenter la solution est présenté, puis le processus d'évaluation de la fonction d'adaptation d'une solution est exposé. Un organigramme est présenté à la fin pour résumer les différentes étapes du calcul.

8.1 Exposé de la stratégie de planification des interventions en réseau

L'approche proposée dans la suite de cette étude consiste à considérer simultanément la détérioration structurale et hydraulique et la stratégie d'intervention à mettre en place dans un réseau de distribution. On suppose que la seule option envisageable pour améliorer l'état du réseau est le remplacement d'une conduite par une autre conduite de diamètre identique, et le matériau utilisé de la conduite neuve est semblable au précédent. On suppose en premier que l'information concernant l'état du réseau (nombre de bris enregistrés, demandes aux nœuds des consommateurs) est disponible sur une période initiale de durée L (figure 8.1). On suppose durant toute la période d'analyse de cette stratégie d'intervention qu'aucune expansion de réseau ne sera réalisée et que les demandes aux nœuds des consommateurs restent constantes.

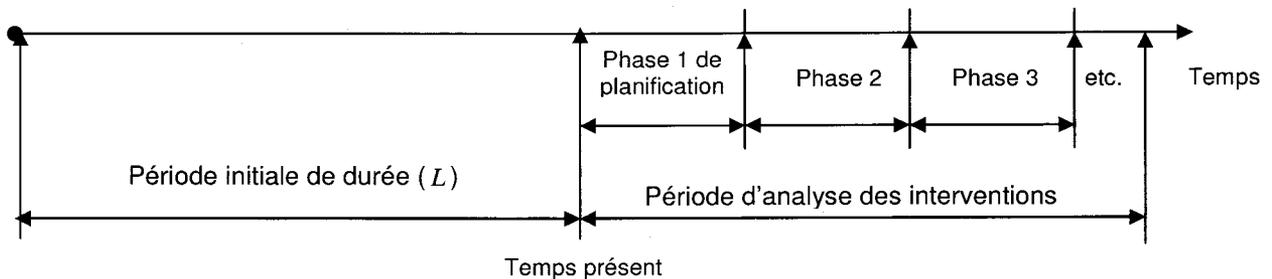


Figure 8.1 Représentation des périodes

On subdivise la période d'analyse en plusieurs phases pour se rapprocher de la situation réelle où, à intervalles fixes, les municipalités planifient les interventions à réaliser en réseau. Les phases de planification des interventions (PPI) visent à définir la stratégie des interventions à mettre en œuvre au cours des années à venir (la période considérée dans le cas présent est de cinq ans).

En se basant sur les informations disponibles sur la période initiale de durée L , une première optimisation est réalisée sur la première phase afin de minimiser

les coûts des interventions sur le réseau. Cette optimisation doit prendre en considération les aspects liés aux coûts et à l'hydraulique, et devra permettre la détermination de l'ensemble des conduites à remplacer afin de minimiser le coût des interventions dans ce réseau tout en respectant les contraintes hydrauliques. Il s'agira d'identifier, pour chaque conduite sélectionnée, le moment optimal pour effectuer le remplacement.

Le résultat de l'optimisation sur la première phase peut modifier les caractéristiques du réseau pour la phase suivante comme suit :

- 1) Les conduites sélectionnées pour un remplacement auront un nombre cumulé de bris nul à la date du remplacement. Ces nouvelles conduites peuvent aussi enregistrer un premier ou plusieurs bris à partir de la date d'installation, ou ne pas subir de bris. Du fait qu'elles sont neuves, elles vont permettre d'augmenter les pressions aux nœuds du réseau par suite de l'amélioration de leur capacité hydraulique (augmentation du coefficient de Hazen-Williams).
- 2) Les conduites qui n'ont pas été remplacées vont soit enregistrer un certain nombre de bris supplémentaires, soit garder le même nombre de bris qu'elles avaient durant la période initiale et leur capacité hydraulique diminuera aussi avec le temps.

Ainsi, toutes ces informations supplémentaires enregistrées durant la première phase seront ajoutées à l'information déjà disponible sur la période de durée L . Ensuite, une seconde optimisation est lancée sur une autre période de cinq ans (appelée phase 2), en utilisant l'information sur l'état du réseau disponible sur une période, cette fois-ci plus grande et de durée égale à $L + 5$. Ce processus se poursuit de la même façon, phase après phase, jusqu'à atteindre un nombre maximal de phases fixé préalablement.

Pour tester cette approche, on génère avec le modèle de bris un historique de bris pour la période initiale de durée L , en considérant un modèle de type Weibull-Exponentiel (voir chapitre 3, section 3.5). L'historique est construit avec des paramètres préalablement fixés. Les valeurs des paramètres du modèle de bris sont estimées en utilisant l'approche bayésienne décrite en détail au chapitre 4. Ces paramètres sont ensuite injectés dans la fonction coût et une première optimisation est réalisée pour trouver la meilleure solution qui minimisera, pour la première phase, les coûts totaux d'intervention dans tout le réseau. La meilleure solution proposée doit aussi satisfaire la contrainte de pression minimale, c'est-à-dire que toutes les pressions aux nœuds des consommateurs doivent être supérieures à une pression minimale. L'information est ensuite actualisée sur la première phase. La procédure de validation utilisée est illustrée à la figure 8.2. Pour valider cette stratégie, deux réseaux hypothétiques seront considérés.

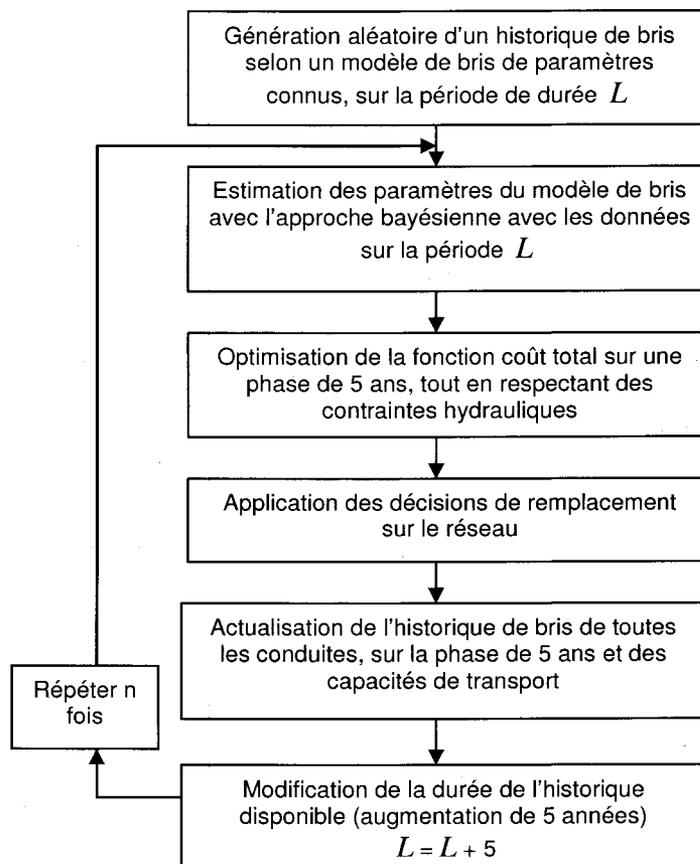


Figure 8.2 Organigramme de la procédure de validation

La stratégie de remplacement présentée précédemment consiste à remplacer les conduites sélectionnées puis à en installer de nouvelles. Le nombre total de conduites dans le réseau reste inchangé puisque qu'aucune expansion n'est supposée. Par contre, lorsque des décisions de remplacement sont réalisées, l'estimation des paramètres du modèle de bris avec l'approche bayésienne s'effectue avec les historiques des nouvelles et des anciennes conduites, le nombre total de bris pris en compte dans l'analyse ne faisant qu'augmenter.

8.2 Actualisation de l'historique de bris

Après la mise en œuvre de la stratégie d'intervention sur la première phase de planification, l'ensemble des historiques de bris doit être actualisé avant de procéder à la planification des interventions au début de la phase de planification suivante.

Le processus d'actualisation de l'historique de bris d'une conduite installée au temps t_0 est discuté ci-après. Par souci de clarté, considérons l'exemple suivant, soit une conduite installée en $t_0 = 1970$ et ayant enregistré 4 bris (figure 8.3) durant une période de 30 ans ($L = 30$ ans), aux années suivantes : 1975, 1985, 1989 et 1993.

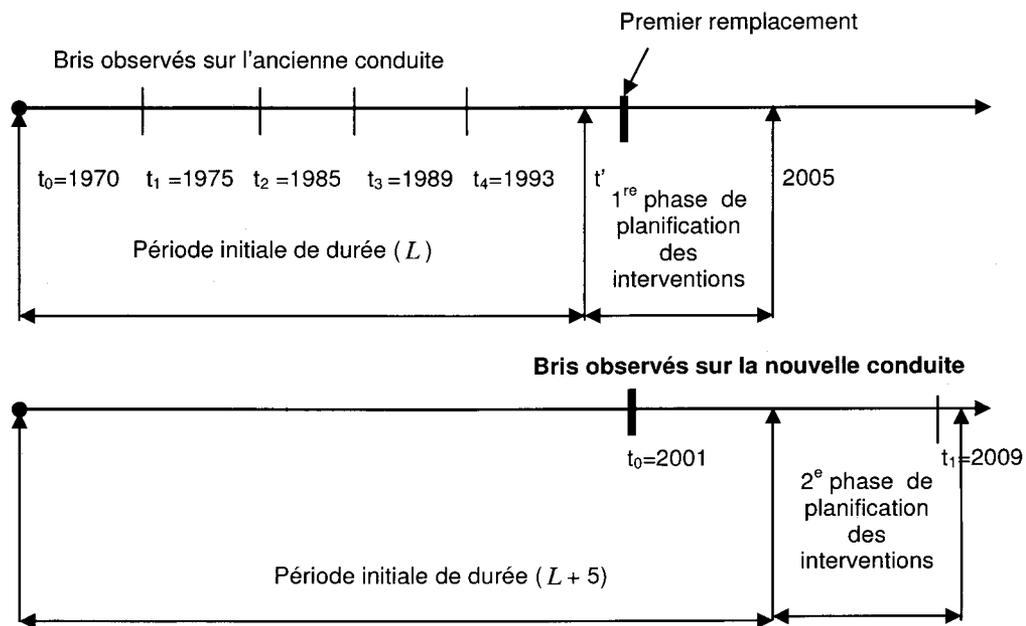


Figure 8.3 Exemple d'actualisation de l'historique de bris d'une conduite avec intervention

Pour cette conduite, deux cas se présentent suite aux résultats de l'analyse réalisée sur la première phase de planification : un premier cas où la meilleure solution suggère que cette conduite soit remplacée durant cette période, (au temps 2001, par exemple, voir la figure 8.3). Dans ce cas, l'ancienne conduite sera remplacée par une nouvelle à cette même date. Puis avec le modèle de bris, on génère pour la nouvelle conduite un premier bris Weibull, et si la date du premier bris tombe dans l'intervalle défini entre la date d'installation de la nouvelle conduite et la fin de la première phase (2005 dans cet exemple), alors l'historique de cette conduite comportera un premier bris, ensuite on vérifie si d'autres bris générés aléatoirement suivant le modèle de bris appartiennent à cet intervalle. Si la date du premier bris sur la nouvelle conduite se trouve au-delà de cet intervalle, alors la conduite ne comportera aucun bris sur la période de durée ($L + 5$) ans.

Le deuxième cas correspond à la situation où la solution optimale ne sélectionne pas cette conduite pour un remplacement durant la phase d'intervention

considérée (figure 8.4). Dans ce cas, l'historique de bris de cette conduite est remis à jour en utilisant le modèle de bris. Il suffit, dans ce cas, de vérifier que le temps d'apparition du bris suivant, généré par le modèle de bris, se trouve dans l'intervalle $[t', t' + \Delta t]$ où t' est le temps présent, Δt est la durée de la phase et $t' + \Delta t$ la date marquant le début de la prochaine phase de planification des interventions (l'année 2005 dans le cas de l'exemple précédent). L'actualisation de l'historique de bris du réseau s'effectue en répétant cette procédure pour chaque conduite du réseau.

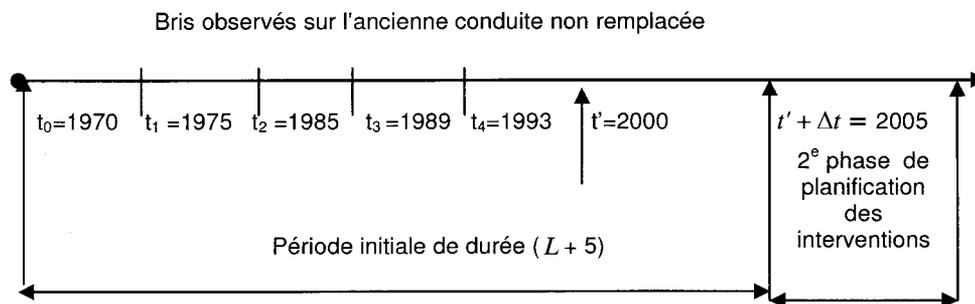


Figure 8.4 Exemple d'actualisation de l'historique de bris d'une conduite sans intervention

8.3 Fonction objectif

La fonction coût total pour le réseau, C_{Tot} , s'écrit :

$$C_{Tot} = \sum_{j=1}^N [C_{Tot}(j; T_f(j) | k(j))] \quad (8.1)$$

où :

$C_{Tot}(j; T_f(j) | k(j))$: fonction coût total pour une conduite j ;

N : nombre total de conduites dans le réseau;

$T_f(j)$: temps de remplacement de la conduite j ;

$k(j)$: nombre total de bris subis par la conduite j , au temps t' ;

Deux cas se présentent : 1) pour la conduite j qui a enregistré au moins un bris ($k(j) \neq 0$), la fonction coût total vaut $C_{Tot}(j ; T_f(j) | k(j) \neq 0)$, 2) pour la conduite qui n'a jamais enregistré de bris ($k(j) = 0$), la fonction coût total vaut $C_{Tot}(j ; T_f(j) | k(j) = 0)$.

Chaque conduite du réseau peut être remplacée entre les temps $(t'+1)$ et $t'+\Delta t$ marquant le début et la fin d'une PPI. En supposant que le pas de temps est l'année et que la durée d'une phase est de cinq ans, la première année pour effectuer un remplacement est $(t'+1)$ et la dernière année est $(t'+5)$. En adoptant une notation discrète, la fonction coût total pour une conduite j peut s'écrire sous la forme générale suivante :

$$C_{Tot}(j ; T_f(j) | k(j)) = \begin{cases} \frac{C_r(j) \ell(j)}{(1+R)^{(T_f(j)-t_a)}} + \sum_{i=1}^{k(j)} \frac{C_b(j)}{(1+R)^{(T_i(j)-t_a)}} + \sum_{t=t'+1}^{T_f(j)} \frac{C_b(j) M(t-1, t | k(j) ; t')}{(1+R)^{(t-t_a)}} & \text{si } k(j) \neq 0 \\ \frac{C_r(j) \ell(j)}{(1+R)^{(T_f(j)-t_a)}} & \text{sinon} \end{cases} \quad (8.2)$$

où :

$M(t-1, t | k(j) ; t')$: nombre moyen de bris pour la conduite j durant l'année $(t-1)$ et qui est donné par les équations 3.26 et 3.27 (voir chapitre 3);

j : indice de la conduite;

t' : temps présent;

$C_r(j)$: coût du remplacement de la conduite j (\$/m);

$\ell(j)$: longueur de la conduite j (m);

R : taux d'actualisation (valeur discrète);

t_a : temps d'actualisation des coûts;

$T_f(j)$: temps de remplacement de la conduite j ;

$T_i(j)$: temps d'occurrence du i^{e} bris subi par la conduite j ;

- $k(j)$: nombre total de bris enregistrés par la conduite j , au temps t' ;
- $C_b(j)$: coût de réparation d'un bris de la conduite j (\$/bris).

La fonction coût total de l'équation 8.2, pour la conduite j ayant subi des bris ($k(j) \neq 0$), regroupe un premier terme pour le remplacement au temps $T_f(j)$, un second terme pour la réparation des $k(j)$ bris subis par la conduite jusqu'au temps présent t' , et un troisième terme de réparation des bris calculé à partir du nombre moyen de bris estimé entre le temps présent et le temps de remplacement de la conduite $M(t-1, t | k(j); t')$. Pour la conduite j n'ayant enregistré aucun bris ($k(j) = 0$), le nombre moyen de bris, $M(t-1, t | k(j) = 0; t')$, sur un intervalle $[t-1, t]$, est supposé être nul et la fonction coût total pour cette conduite ne regroupe qu'un premier terme pour le remplacement au temps $T_f(j)$.

Tous les coûts sont actualisés à la date t_a correspondante à la date d'installation de la toute première conduite j installée dans le réseau de distribution :
 $t_a = \min[t_0(j)]$.

8.4 Évolution du coefficient de Hazen-Williams

Pour tenir compte des variations du coefficient de Hazen-Williams au fil des années, on utilise une des équations de prédiction du coefficient de Hazen-Williams citées au chapitre 6 (section 6.5). L'équation (6.18), par exemple, donne pour une conduite j de diamètre $D(j)$, installée au temps $t_0(j)$, le coefficient de Hazen-Williams suivant :

$$C_j(t) = 18 - 37,2 \log_{10} \left[\frac{ke_0 + a_k [t - t_0(j)]}{D(j)} \right] \quad t > t' \quad (8.3)$$

Si la conduite a été remplacée au temps $T_f(j)$ (appartenant à une des années de l'intervalle $[t'+1, t'+5]$), le coefficient de Hazen-Williams après remplacement s'écrit :

$$C_j(t) = 18 - 37,2 \log_{10} \left[\frac{ke_0 + a_k [t - T_f(j)]}{D(j)} \right] \quad \forall t > T_f(j) \quad (8.4)$$

8.5 Contraintes hydrauliques

Toute variation du coefficient de Hazen-Williams (ou d'une éventuelle variation du diamètre d'une des conduites), au temps t , provoque une variation de pression aux différents nœuds du réseau. Pour tenir compte de ces changements, les trois équations suivantes doivent être vérifiées, $\forall t \in \{t'+1, t'+2, \dots, t'+5\}$:

1) L'équation de continuité doit être vérifiée à chaque nœud (*noeud*) du réseau :

$$\sum_{j=1}^{Conduites} Q(j,t)_{entrant} - \sum_{k=1}^{Conduites} Q(k,t)_{sortant} = Dem_{noeud}, \quad \forall noeud \in \{1, \dots, MaxNoeud\} \quad (8.5)$$

où :

$Q(j,t)$: débit circulant dans la conduite j au temps t

Dem_{noeud} : demande aux nœuds des consommateurs

2) L'équation des pertes de charge pour chaque maille (*Maille*) s'écrit :

$$\sum_{m \in Maille j} \Delta H_m = 0, \quad \forall j \in \{1, \dots, MaxMaille\} \quad (8.6)$$

La perte de charge $\Delta H(j,t)$ dans une conduite j est calculée à partir de l'équation de Hazen-Williams :

$$\Delta H(j,t) = \frac{10,67 \ell(j)}{D(j)^{4,87} C_j(t)^{1,852}} Q(j,t)^{1,852}; \quad \forall j \in \{1, \dots, N\} \quad (8.7)$$

- 3) La contrainte de pression minimale : la charge de pression $H(\text{noeud}, t)$, en chaque nœud du réseau, doit être supérieure à la pression minimale imposée à ce nœud $H^{\min}(\text{noeud}, t)$:

$$H(\text{noeud}, t) \geq H^{\min}(\text{noeud}, t) \quad \forall \text{noeud} \in \{1, \dots, \text{MaxNoeud}\} \quad (8.8)$$

8.6 Formulation du problème d'optimisation avec un AG, dans le cadre de la stratégie de planification des interventions

Le problème d'optimisation à résoudre consiste à minimiser la fonction objectif identifiée par l'équation 8.1 sous les contraintes 8.5 à 8.8.

8.6.1 Représentation de la solution

L'algorithme génétique utilise un codage de longueur fixe, dans lequel toutes les conduites du réseau sont représentées. La représentation de la solution utilise deux nombres pour les N conduites du réseau. Le premier nombre représente la variable de décision de remplacement codée sur 1 bit; elle est égale à « 1 » si une conduite est remplacée, et à « 0 » si aucun remplacement n'est effectué. Le deuxième nombre représente un temps de remplacement. Si les temps varient entre $t'+1$ et $t'+5$, un minimum de 3 bits est nécessaire pour coder la série des temps ($2^2 < 5 < 2^3$). Ce codage permettrait par ailleurs de considérer des phases d'intervention pouvant aller jusqu'à sept ans. Afin de ne pas fixer de limite maximale de conduites remplacées par phase, on a opté pour cette représentation car elle permet d'identifier à chaque phase un nombre variable de conduites à remplacer.

Un individu représente une chaîne de longueur totale égale à $(4 \times N)$ bits. Exemple, si le réseau est composé de $N = 500$ conduites, on a :

$$\text{Individu} = c_1 \oplus c_2 \oplus c_3 \oplus \dots \oplus c_{500} \quad (8.9)$$

où :

$$c_i = v_{i1} \oplus v_{i2}$$

\oplus : opérateur de concaténation;

v_{i1} : sous-chaîne de la variable de décision de remplacement pour la conduite (i);

v_{i2} : sous-chaîne de la variable de décision « temps de remplacement » pour la conduite (i).

Par exemple, si on a pour la première conduite la chaîne suivante, $c_1 = 1011 = v_{11} \oplus v_{12} = 1 \oplus 011$, ceci implique que cette conduite est remplacée ($v_{11} = 1$) au temps identifié par la sous-chaîne ($v_{12} = 011$).

À noter que, tel qu'explicité à la section suivante, pour chaque conduite, il peut y avoir plusieurs sous-chaînes de temps représentant le même temps de remplacement. Le choix de cette représentation d'un individu permettra de considérer plus tard le cas où une conduite pourra être remplacée par une conduite de diamètre différent.

8.6.2 Choix du décodage et processus d'évaluation de la fonction d'adaptation

Le code Gray est utilisé pour le décodage de la solution trouvée (Tableau 7.1). La longueur de la chaîne de temps choisie est de trois, soit un total de huit combinaisons possibles. Comme il n'y a que cinq temps ($t'+1, t'+2, \dots, t'+5$), il résulte que certaines sous-chaînes peuvent représenter les mêmes temps. Par exemple, avec la chaîne suivante : 000-001-011-010-110-111-101-100, en posant $t' = 30$, on peut avoir la solution décodée suivante : 31-32-33-34-35-35-35-35. On voit bien que les 6^e, 7^e et 8^e sous-chaînes sont différentes, mais lors du décodage, ces sous-chaînes peuvent avoir la même valeur que celle de la 5^e sous-chaîne, soit la 35^e année.

Le coût des décisions est évalué en utilisant la fonction coût définie par l'équation 8.1. Pour l'évaluation de la fonction pénalité (pour plus de détail concernant la fonction pénalité, voir l'exemple de l'Annexe C.2), les caractéristiques hydrauliques des conduites sélectionnées pour un remplacement sont modifiées aux temps identifiés par la solution. Pour la première année ($t = t' + 1$), si la décision est de remplacer la conduite j , le coefficient de Hazen-Williams de cette conduite $C_j(t)$ est modifié par celui d'une conduite neuve de même diamètre et l'équation 8.4 est utilisée. Par contre, si la décision est de ne pas remplacer la conduite j , le coefficient $C_j(t)$ pour l'année $t' + 1$ est calculé en utilisant la formule de l'équation 8.3.

Une simulation hydraulique d'état permanent est alors lancée pour évaluer les charges aux nœuds dans tout le réseau. Si la charge de pression au nœud ($noeud$) est inférieure à la charge minimale requise en ce nœud, le déficit de pression à ce nœud est calculé à partir de l'équation suivante :

$$penap(noeud, t) = \max(0, H^{\min}(noeud) - H(noeud, t)) \quad (8.10)$$

Ensuite, le déficit maximal de pression pour la première année, $maxpenap(t)$, représentant le maximum de déficit sur tous les nœuds du réseau, est estimé à l'aide de l'équation suivante :

$$maxpenap(t) = \max_{\substack{noeud \\ (noeud=1, MaxNoeud)}} [penap(noeud, t)] \quad (8.11)$$

Le processus d'estimation du déficit de pression continue de la même façon pour les années suivantes : $t' + 2, \dots, t' + 5$. L'intérêt de cette évaluation est de vérifier que la pression aux nœuds du réseau est vérifiée pour toutes les années. Ensuite, pour estimer la fonction pénalité de la solution proposée, on calcule le déficit maximal de pression sur toutes les années en utilisant l'équation 8.12.

$$Penap = \max_t [maxpenap(t)] \quad (8.12)$$

Cette équation permet d'évaluer l'amplitude du maximum de déficit de pression par rapport à la pression demandée pendant toutes les années.

Une fois la fonction pénalité hydraulique de la solution évaluée, le coût total de la solution proposée par l'AG peut être évalué, en utilisant l'équation suivante :

$$C_{Total} = C_{Tot} + Kp Penap \quad (8.13)$$

où :

Kp : poids relatif de la contrainte hydraulique

C_{Tot} : fonction coût total pour le réseau

Le coût total de chaque individu de la population est ainsi évalué. Le processus de l'AG est répété, de nouvelles populations vont remplacer les anciennes, et ce pour un nombre maximal de générations fixé au départ. À la fin, la meilleure solution sur toutes les générations est identifiée. L'organigramme pour l'évaluation de la meilleure solution avec un AG multidemes, pour une seule phase, est présenté à la figure 8.5.

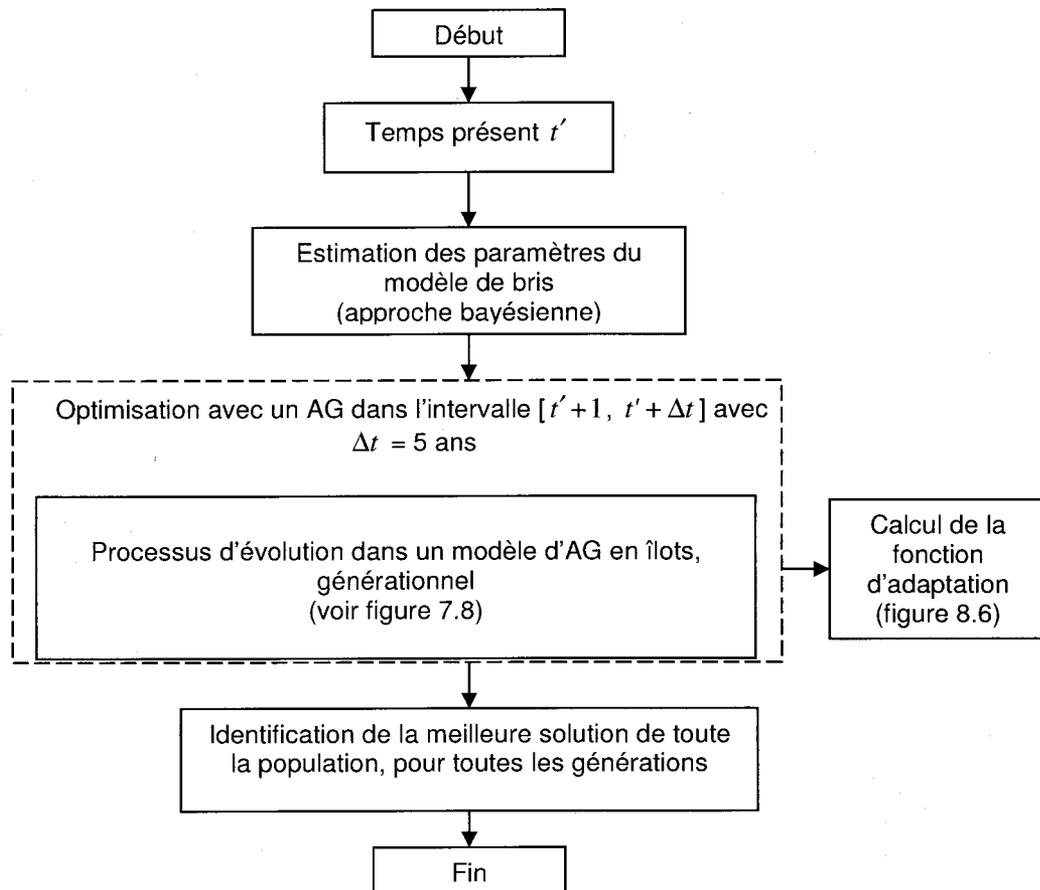


Figure 8.5 Organigramme pour l'évaluation de la meilleure solution (cas d'une seule phase d'intervention)

Une fois la meilleure solution de la première phase trouvée, il sera possible d'identifier le nombre de conduites à remplacer ainsi que les temps de remplacement optimaux (ou proches de l'optimum). L'application de la solution proposée à la fin de chaque phase permet le passage à la phase suivante. Puisque les AG ne garantissent pas la localisation du minimum global de la fonction objectif, plusieurs essais doivent être réalisés avec différentes initialisations des populations initiales et une analyse de sensibilité par rapport aux paramètres de l'AG doit être réalisée.

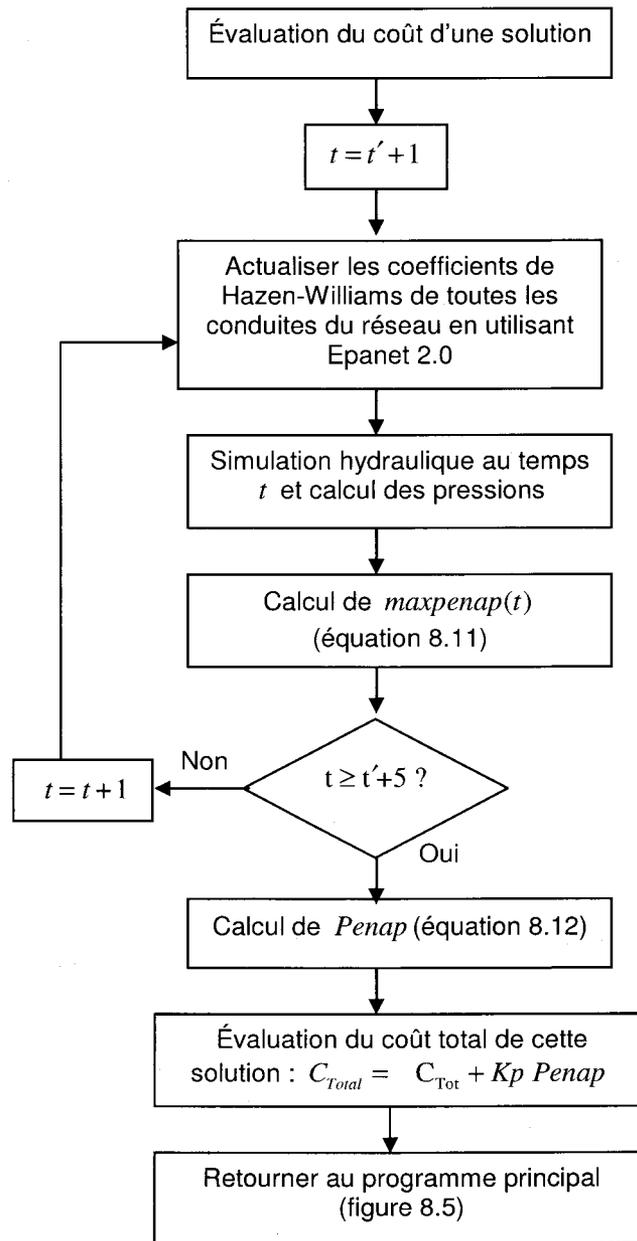


Figure 8.6 Organigramme pour l'évaluation de la fonction d'adaptation d'une solution

9. APPROCHE MONOOBJECTIF

Ce chapitre présente les résultats de l'application du modèle utilisant la stratégie de planification des interventions introduite au chapitre précédent. Les tests ont été effectués sur deux réseaux composés de 100 et 250 conduites respectivement.

Ce chapitre est organisé en six sections. La section 9.1 présente les topologies des deux réseaux testés ainsi que les principales données utilisées. Dans la section 9.2, on présente les différents résultats de l'optimisation du coût total pour le réseau à 100 conduites, lorsqu'aucune contrainte à caractère hydraulique n'est considérée. Le but de cette section est d'effectuer un certain nombre d'essais afin de voir l'impact des principaux paramètres de l'AG en îlots (avec demes) sur la performance de l'optimisation. La section 9.3 donne les principaux résultats de l'optimisation pour le second réseau à 250 conduites.

Dans la section 9.4, on évalue l'impact de la distribution *a priori* sur les décisions de remplacement réalisées à chaque phase. La section 9.5 présente les résultats de la stratégie de planification des interventions qui tiennent compte à la fois des aspects structural et hydraulique. Dans la dernière section 9.6, on présente une discussion générale ainsi que quelques recommandations.

9.1 Données relatives aux réseaux et aux historiques de bris

Afin d'estimer les coûts de remplacement, une fonction coût continue a été considérée (Fujiwara et Khang, 1990; Clark *et al.*, 2002). Cette fonction permet d'estimer le coût unitaire du remplacement de la conduite j :

$$C_r(j) = 1.1 D(j)^{1.15} \quad (9.1)$$

où :

$C_r(j)$: coût de remplacement d'un mètre de conduite (\$/mètre)

$D(j)$: diamètre de la conduite (j) en (mm.)

Le coût de réparation d'un bris est donné au Tableau 9.1. Ces coûts unitaires sont comparables à ceux rapportés par certaines références trouvées dans la littérature (voir chapitre 2, section 2.2). Il faut toutefois rappeler qu'en réalité, les coûts unitaires sont fonction de plusieurs autres paramètres tels que le type de matériau (fonte, acier, etc.), la technique de remplacement utilisée, etc. Le taux d'actualisation est supposé égal à 10 % (1/an). Le taux d'actualisation choisi appartient à l'intervalle des valeurs trouvés dans la littérature (Shamir et Howard, 1979; Mailhot *et al.* 2003).

Le Tableau 9.1 résume les coûts de remplacement d'un mètre linéaire d'une conduite et le coût de réparation d'un bris, en fonction des diamètres normalisés tirés de Brière (1997), pour toutes les conduites considérées dans ce chapitre.

Tableau 9.1 Données du coût de remplacement et de réparation d'un bris

Diamètre de la conduite (mm)	100	150	200	250	300	400	500	750
Coût unitaire du remplacement (\$/m)	219	350	487	630	776	1 081	1 397	2 227
Coût de réparation d'un bris (\$)	3 292	5 248	7 306	9 443	11 646	16 213	20 956	33 404

9.1.1 Génération de la structure des deux réseaux et historique de bris

Pour générer la structure des deux réseaux hydrauliques présentés dans cette thèse, le logiciel Analyse de réseau a été utilisé. Ce logiciel a été développé par Fortin (2004), dans le cadre d'un stage d'été à l'INRS-ETE. Ce logiciel permet la création de réseaux à mailles carrés où toutes les conduites ont les mêmes paramètres (longueur, diamètre, coefficient de Hazen-Williams) et où il n'y a

qu'un seul réservoir. La géométrie du réseau est déterminée à l'aide de deux paramètres (largeur et hauteur) qui permettent de spécifier le nombre de jonctions dans chaque direction et d'un troisième paramètre (de découpage) qui permet de produire la géométrie irrégulière. La demande et l'élévation, à chaque nœud, sont déterminées aléatoirement selon une distribution uniforme variant entre deux valeurs limites spécifiées par l'utilisateur. Ce logiciel permet aussi de visualiser les bris des conduites et les résultats de la stratégie de planification des interventions à chaque phase. Les deux réseaux créés sont ensuite dimensionnés pour satisfaire aux pressions minimales imposées aux nœuds et aux vitesses d'écoulement dans les conduites. L'Annexe D résume comment les principales données hydrauliques des deux réseaux hypothétiques ont été générées, sur la période de 30 ans.

Pour les historiques des temps d'occurrence de bris, le modèle Weibull-Exponentiel a été utilisé, sur une période de 30 ans, en considérant les valeurs des paramètres du Tableau 5.1 (voir la section 5.1). Les figures 9.1 et 9.2 présentent respectivement un exemple d'historique de bris pour le réseau à 100 et 250 conduites.

Ensuite, en se basant sur ces informations, les paramètres du modèle de bris sont estimés à l'aide de l'approche bayésienne (voir le chapitre 5). Les paramètres du modèle de bris sont estimés jusqu'à un ordre de bris limite qui est fonction du nombre maximal de bris enregistrés par les conduites de ce réseau. Pour tirer une relation entre l'ordre de bris et les paramètres des distributions exponentielles, un ordre maximal de neuf bris est considéré dans la régression non linéaire, pour les deux réseaux testés dans cette étude.

9.1.2 Réseau à 100 conduites

Le premier test s'est effectué sur un réseau composé de 100 conduites, 60 nœuds et 40 mailles (figure 9.1). Le réseau est alimenté par un seul réservoir

avec une charge totale de 80 m. les données aux nœuds sont résumées en Annexe D1. Les demandes aux nœuds sont supposées constantes durant toutes les phases. Les diamètres utilisés sont : {100 ; 150 ; 250 ; 500} mm. Ce réseau a enregistré un nombre total de 68 bris en 30 ans. La figure 9.1 montre que les conduites 16 et 28 sont celles qui ont enregistré le plus de bris : 11 et 9 bris respectivement. On s'attend donc à ce que l'AG identifie en premier ces deux conduites pour un éventuel remplacement.

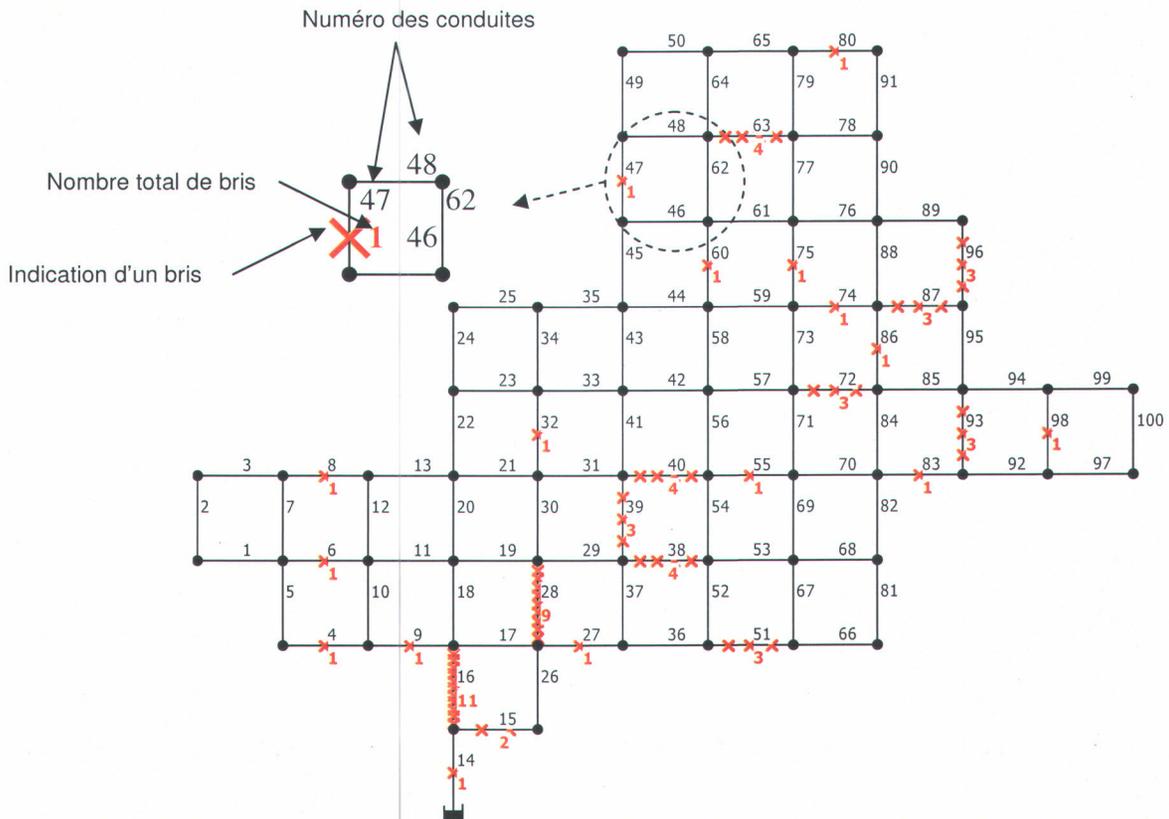


Figure 9.1 Nombre de bris enregistrés par chaque conduite, pour le réseau de 100 conduites (réseau âgé de 30 ans, état initial)

9.1.3 Réseau à 250 conduites

Le second test a été effectué sur un réseau plus grand composé de 250 conduites, 109 mailles et de 141 nœuds (figure 9.2). Le réseau est alimenté par un seul réservoir avec une charge totale de 80 m. Les données aux nœuds sont

résumées à l'Annexe D2. La gamme des diamètres en mm considérée est : {200, 300, 400, 500, 750}. Pour cet exemple, le nombre total de bris est de 214 bris en 30 ans, les conduites ayant subi le plus grand nombre de bris sont les conduites : 239, 16, 129, 28 et 196, avec respectivement : 15, 11, 10, 9 et 9 bris.

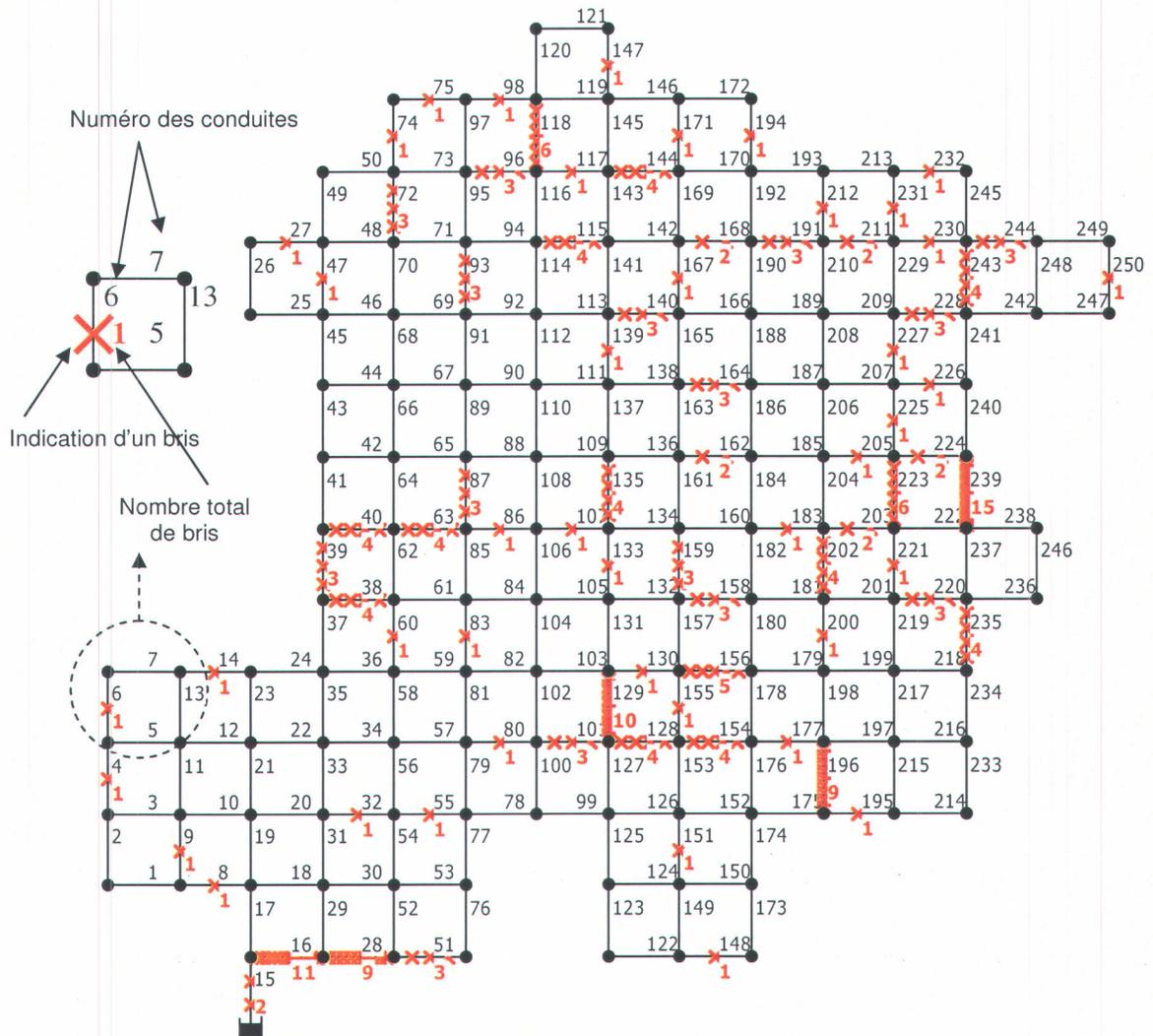


Figure 9.2 Nombre de bris enregistrés par chaque conduite, pour le réseau de 250 conduites (réseau âgé de 30 ans, état initial)

9.2 Résultats pour le réseau à 100 conduites

Avant de présenter les résultats des optimisations réalisées à l'aide de l'AG, il nous a semblé nécessaire de faire quelques tests afin de voir l'influence de certains paramètres de l'AG sur la performance de l'optimisation. Les paramètres considérés sont : le nombre maximal de générations et la taille de chaque deme. Les résultats présentés dans les sections 9.2.1 et 9.2.2 ne concernent que la première phase de cinq ans.

9.2.1 Influence du nombre maximal de générations

Dans ces essais, on cherche à voir l'influence du nombre de générations sur la convergence vers la meilleure solution pour un AG-générationnel. Dans tous ces essais, la population est composée de cinq demes ayant chacun 200 individus. À toutes les 10 générations, 5 % des individus migrent au deme suivant. Ces individus migrants ne sont que des copies des individus du deme et vont remplacer des individus sélectionnés aléatoirement du deme suivant. La longueur totale de la chaîne est de 400 bits pour cet exemple car le réseau est composé de 100 conduites et chaque conduite est représentée par 4 bits (voir chapitre 8). Dans chaque deme, les mêmes opérations sont exécutées, à savoir sélection par tournoi, croisement en un point et mutation. Les paramètres de l'AG sont résumés au Tableau 9.2.

Tableau 9.2 Paramètres de l'AG-générationnel

Nombre de demes	5
Taille des demes	200
Fréquence de migration des individus	10
Nombre d'individus qui migrent (5 %)	10
Taille des tournois	4
Probabilité de croisement	0,30
Probabilité de mutation de l'individu	1,00
Probabilité de mutation des bits	0,01
Nombre maximal de générations	variable

La figure 9.3 montre le résultat d'un essai effectué avec un nombre maximal de 100 générations. Le Tableau 9.3 résume les valeurs des meilleures fonctions d'adaptation obtenues, en fonction du nombre maximal de générations. Ce Tableau montre clairement que 50 générations ne sont pas suffisantes pour atteindre la meilleure solution et qu'en augmentant le nombre maximal de générations à 200, puis 500, le résultat de la fonction d'adaptation n'est pas forcément meilleur.

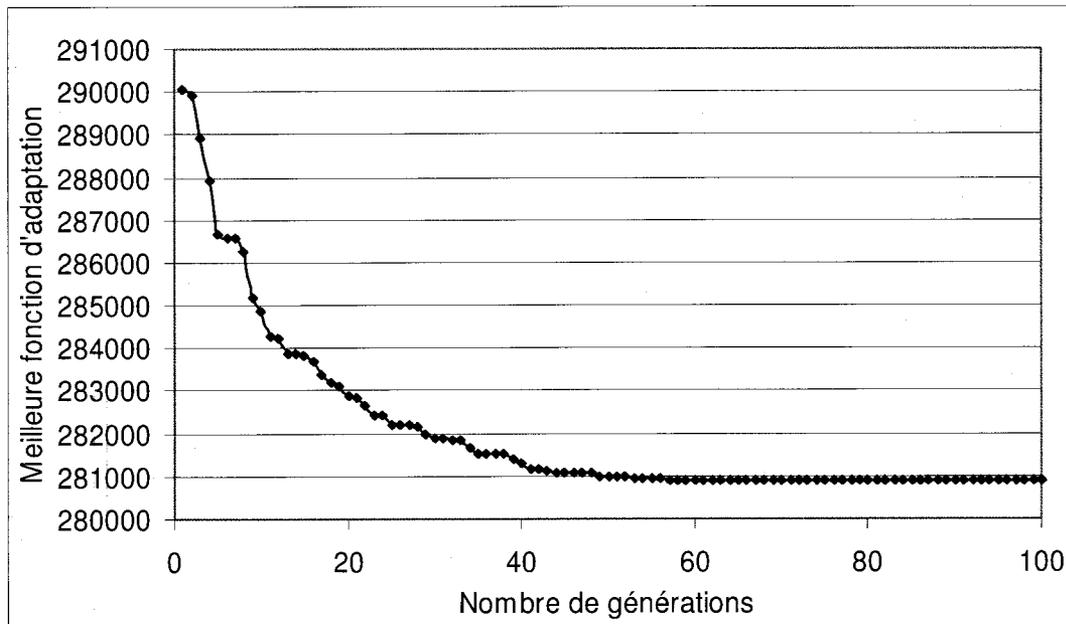


Figure 9.3 Meilleure fonction d'adaptation à chaque génération pour le problème du réseau à 100 conduites sans pénalité hydraulique (100 générations)

Tableau 9.3 Influence du nombre maximal de générations

Nombre maximal de générations	50	100	200	500
Meilleure fonction d'adaptation	280 940,375	280 891,156	280 891,156	280 891,156

9.2.2 Influence de la taille du deme

Dans cette partie, on modifie seulement la taille du deme et on garde les mêmes valeurs des paramètres du Tableau 9.2. La figure 9.4 montre les résultats obtenus pour des essais sur la taille des deme pour un nombre maximal de 50 générations. On note que les résultats sont meilleurs lorsque l'on considère des deme de 200 individus par rapport à des deme de 50 individus. Aucune différence significative n'apparaît toutefois lorsque des deme de 1 000 individus sont considérés.

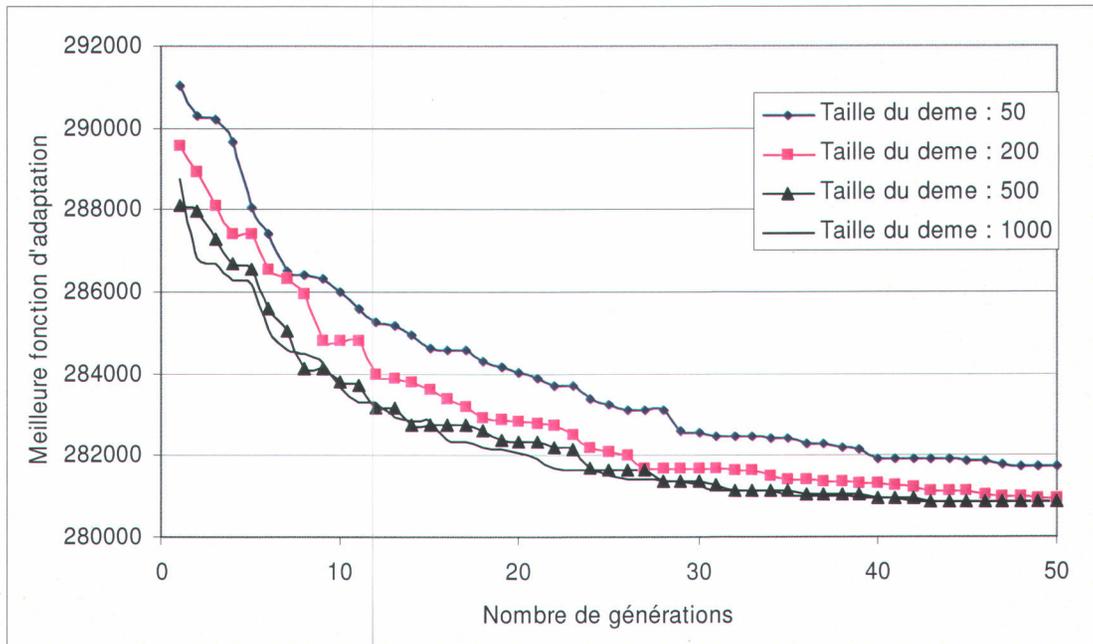


Figure 9.4 Influence de la taille du deme sur la convergence (réseau à 100 conduites, sans pénalité hydraulique).

9.2.3 Identification des conduites à remplacer sur dix phases

Dans cette partie, il s'agit d'appliquer la stratégie présentée au chapitre 8 et de déterminer si une conduite nécessite un remplacement ou non. Plusieurs essais ont été exécutés avec différentes initialisations des populations de départ, et dans tous les cas, les mêmes conduites ont été identifiées.

Considérant les paramètres de l'AG du Tableau 9.4, les conduites identifiées et les meilleures fonctions d'adaptation obtenues sont présentées au Tableau 9.5. Il

est intéressant de remarquer que les premières conduites sélectionnées (les conduites 16 et 28) sont celles qui ont enregistré le plus grand nombre de bris durant la première phase (voir figure 9.1).

Tableau 9.4 Paramètres de l'AG-générationnel pour chaque phase

Nombre de demes	5
Taille des demes	200
Fréquence de migration des individus	10
Nombre d'individus qui migrent (5 %)	10
Taille des tournois	4
Probabilité de croisement	0,30
Probabilité de mutation de l'individu	1,00
Probabilité de mutation des bits	0,01
Nombre maximal de générations	500

Tableau 9.5 Conduites devant être remplacées telles qu'identifiées par l'AG

Numéro de la phase	Nombre de conduites remplacées	Numéro de la conduite (<i>Temps de remplacement, en années</i>)								Meilleure fonction d'adaptation
1 : [30,35]	0									280 891,156
2 : [35,40]	0									229 118,156
3: [40,45]	4	16 <u>41</u>	28 <u>41</u>	63 <u>41</u>	96 <u>44</u>					202 785,328
4: [45,50]	0									101 760,977
5: [50,55]	8	4 <u>53</u>	8 <u>51</u>	15 <u>51</u>	27 <u>55</u>	38 <u>51</u>	39 <u>51</u>	40 <u>51</u>	87 <u>51</u>	90 960,960
6: [55,60]	2	51 <u>56</u>	93 <u>59</u>							51 175,738
7: [60,65]	2	6 <u>64</u>	14 <u>64</u>							41 026,597
8: [65,70]	2	70 <u>68</u>	83 <u>66</u>							31 553,517
9: [70,75]	8	1 <u>72</u>	9 <u>74</u>	28 <u>74</u>	30 <u>74</u>	72 <u>71</u>	73 <u>74</u>	74 <u>72</u>	85 <u>74</u>	28 806,699
10: [75,80]	4	24 <u>76</u>	60 <u>76</u>	75 <u>80</u>	76 <u>78</u>					18 661,787

Afin de valider les résultats de l'AG et vérifier les résultats présentés au Tableau 9.5, un calcul a été réalisé afin de comparer le coût total de chaque conduite (coût moyen de réparation des bris plus le coût du remplacement) sur les cinq années, pour les dix phases. La solution donnant le coût minimal est considérée

comme étant la meilleure solution. Les figures 9.5 à 9.8 montrent, à titre d'exemples, les temps de remplacement trouvés pour la phase 3. Seules les conduites remplacées et qui ont subi un nombre important de bris sont illustrées.

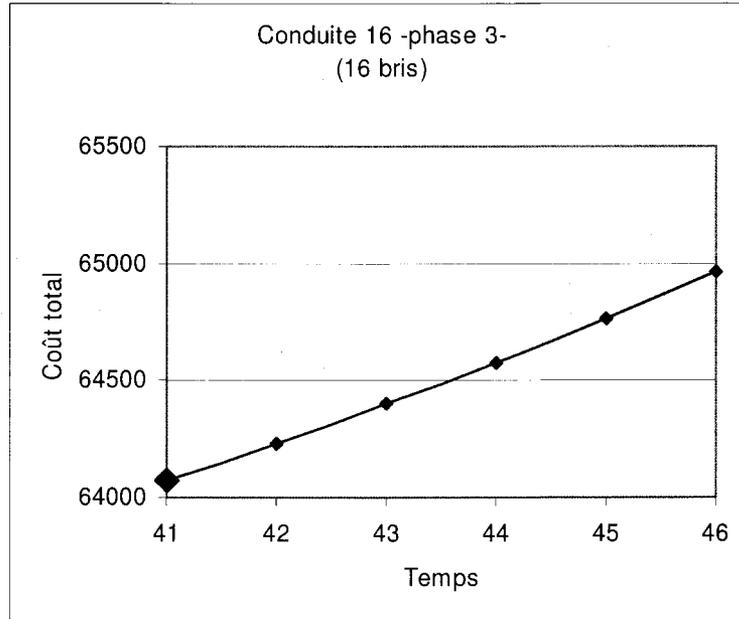


Figure 9.5 Meilleur temps de remplacement sur cet intervalle pour la conduite 16 (pour la phase 3, réseau à 100 conduites)

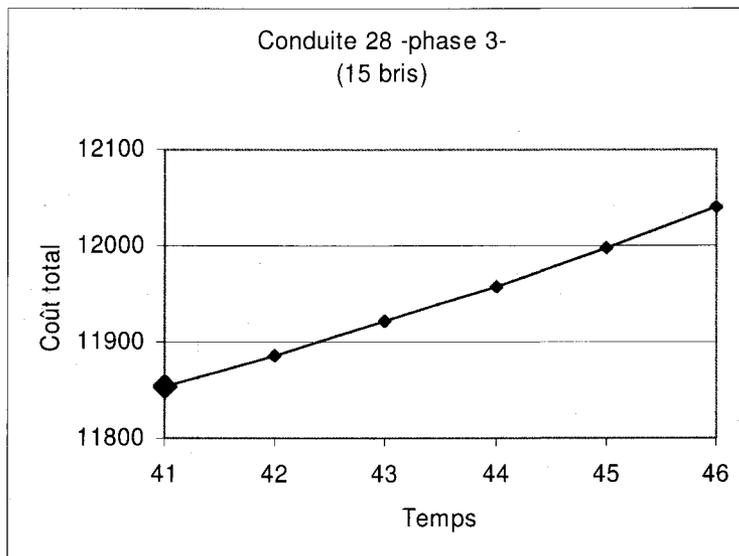


Figure 9.6 Meilleur temps de remplacement sur cet intervalle pour la conduite 28 (pour la phase 3, réseau à 100 conduites)

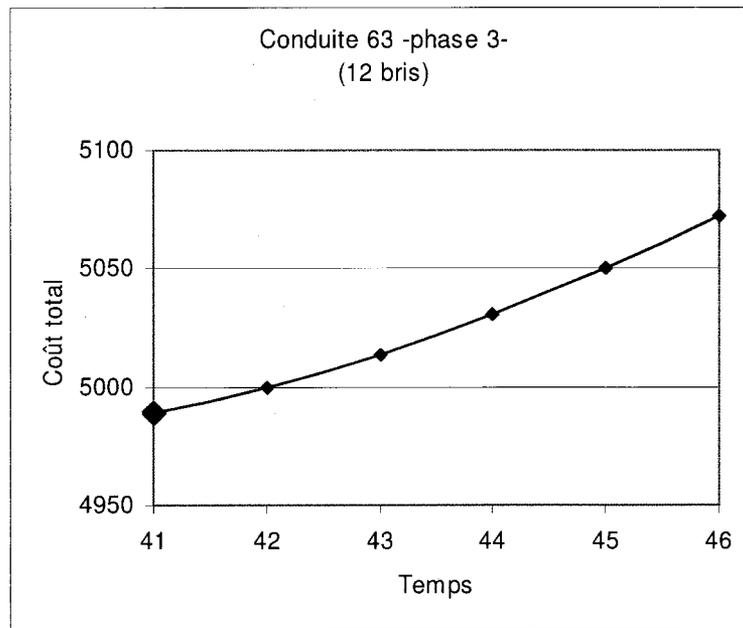


Figure 9.7 Meilleur temps de remplacement sur cet intervalle pour la conduite 63 (pour la phase 3, réseau à 100 conduites)

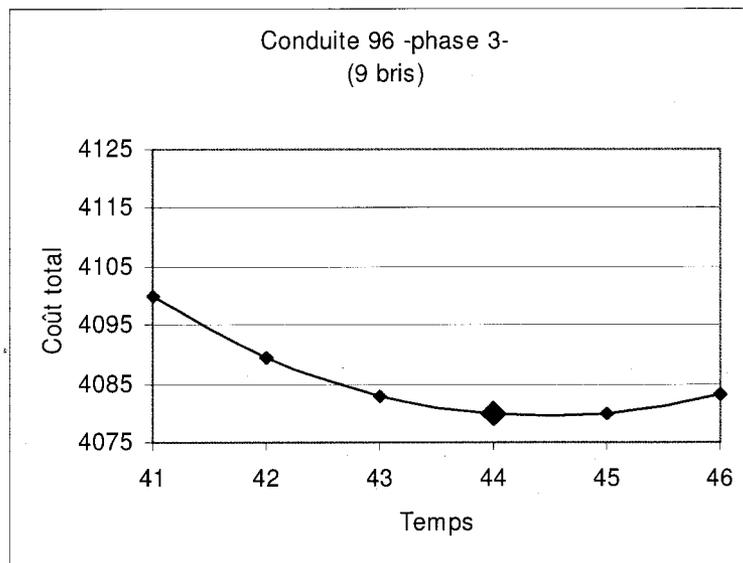


Figure 9.8 Meilleur temps de remplacement sur cet intervalle pour la conduite 96 (pour la phase 3, réseau à 100 conduites)

Le Tableau 9.6 résume les temps optimaux de remplacement des conduites estimés numériquement³. Cette méthode n'est applicable que dans le cas spécifique où aucune contrainte hydraulique n'est considérée.

Tableau 9.6 Meilleurs moments de remplacement des conduites

Numéro de la phase	Nombre de conduites remplacées	Numéro de la conduite <i>(Temps optimal de remplacement, en années)</i>							
1 : [30,35]	0								
2 : [35,40]	0								
3: [40,45]	4	16 (41)	28 (41)	63 (41)	96 (44)				
4: [45,50]	0								
5: [50,55]	8	4 (53)	8 (51)	15 (51)	27 (55)	38 (51)	39 (51)	40 (51)	87 (51)
6: [55,60]	2	51 (56)	93 (59)						
7: [60,65]	2	6 (64)	14 (64)						
8: [65,70]	2	70 (68)	83 (66)						
9: [70,75]	8	1 (72)	9 (74)	28 (74)	30 (74)	72 (71)	73 (74)	74 (72)	85 (74)
10: [75,80]	4	24 (76)	60 (76)	75 (80)	76 (78)				

La comparaison des deux Tableaux 9.5 et 9.6 permet de vérifier l'efficacité de l'AG quant à l'identification des bonnes conduites à chaque phase pour ce réseau. Les figures 9.9 et 9.10 présentent, à titre d'exemple, les moyennes par génération et les meilleures fonctions d'adaptation de chaque génération, obtenues pour la phase 1 et 2. On peut voir que le choix d'un nombre maximal de générations de 500 est suffisant pour la taille de ce réseau.

³ La méthode numérique consiste à vérifier la valeur de la fonction coût pour toutes les années d'une phase, l'année optimale de remplacement est définie comme étant l'année où la fonction coût est à son minimum.

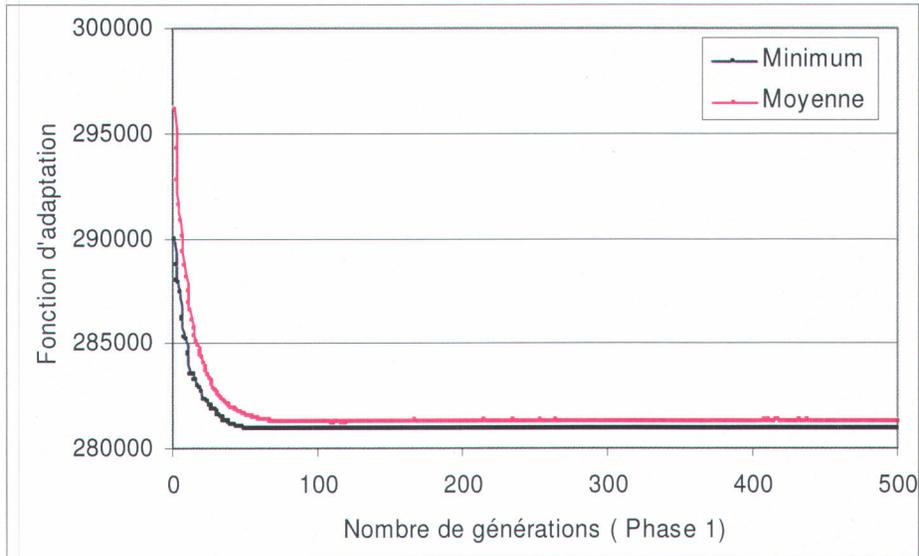


Figure 9.9 Moyenne par génération et meilleure fonction d'adaptation de chaque génération pour la phase 1

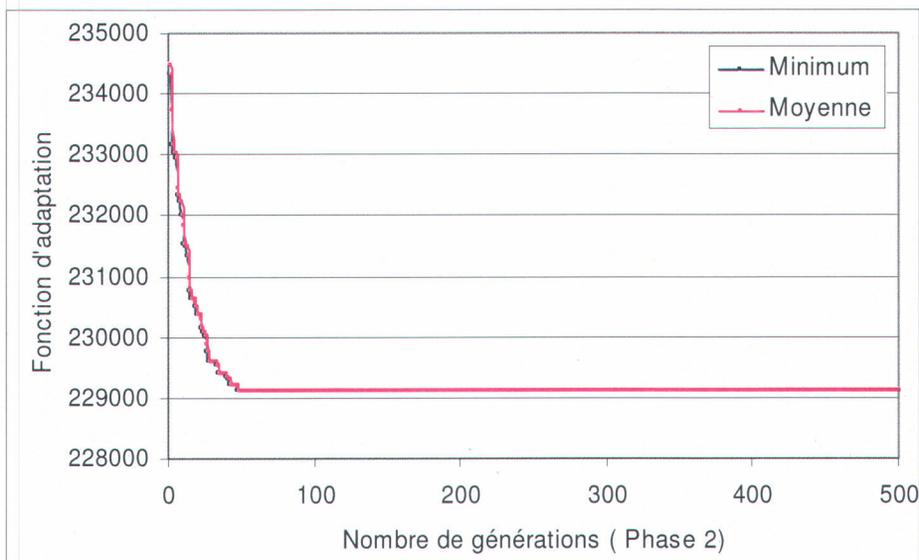


Figure 9.10 Moyenne par génération et meilleure fonction d'adaptation de chaque génération pour la phase 2

Les figures qui montrent les remplacements suggérés par l'AG à chaque phase ainsi que le nombre de bris actualisé de chaque conduite à la fin de chaque phase sont présentées en Annexe E (figures E.1 à E.10). Le Tableau 9.7

présente un résumé des conduites remplacées à chaque phase en fonction du nombre de bris enregistré à la fin de la phase précédente. En examinant ce Tableau, on peut remarquer que durant les dernières phases, les conduites sont remplacées après avoir enregistré un minimum de 8 à 9 bris. On remarque aussi que pour les deux premières phases, aucune conduite n'a été remplacée malgré que certaines d'entre elles aient enregistré plus de 9 bris (voir les figures E.1 et E.2 en Annexe E). Ceci s'explique par le fait que, durant les premières phases, peu d'information était disponible sur les temps d'occurrence des bris, ce qui fait que les paramètres estimés du modèle de bris (λ_i) sont plus sensibles aux distributions *a priori* considérées (figure 9.11). Comme la distribution *a priori* que nous avons considérée (la distribution Gamma($\alpha_0 = 0,5, \beta_0 = 0,5$) déjà considérée au chapitre 5), favorise les petites valeurs de (λ_i), c'est-à-dire des temps entre bris plus grands, il en résulte que très peu de conduites sont remplacées au début.

Ensuite, au fur et à mesure que des bris s'enregistrent, l'estimation des paramètres (λ_i) s'améliore et les valeurs estimées (les valeurs des phases 5, 10, 15 de la figure 9.11) auront tendance à converger vers les vraies valeurs des paramètres.

Tableau 9.7 Liste des conduites remplacées avec le nombre de bris enregistrés

N° phase	Numéro de la conduite (<i>nombre de bris enregistrés avant le remplacement</i>)							
1								
2								
3	16 (16)	28 (15)	63 (12)	96 (9)				
4								
5	4 (8)	8 (9)	15 (9)	27 (7)	38 (9)	39 (13)	40 (9)	87 (10)
6	51 (10)	93 (8)						
7	6 (9)	14 (9)						
8	70 (11)	83 (18)						
9	1 (10)	9 (9)	28 (9)	30 (9)	72 (11)	73 (9)	74 (10)	85 (9)
10	24 (10)	60 (12)	75 (8)	76 (9)				

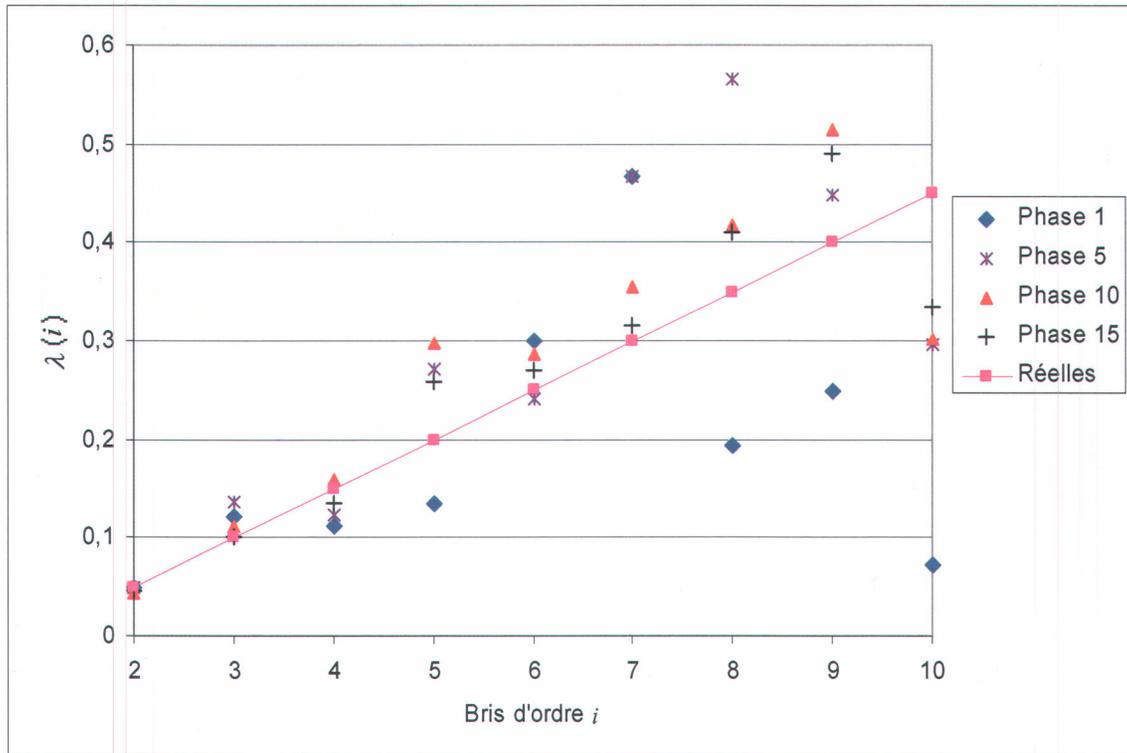


Figure 9.11 Valeurs réelles et valeurs estimées (maximum de la distribution *a posteriori*) des paramètres (λ_i) pour les différents ordres de bris pour une distribution *a priori* Gamma (0,50, 0,50) (réseau à 100 conduites).

9.2.4 Influence de la taille des tournois sur la convergence vers la meilleure solution

Pour voir l'impact de la taille des tournois sur la convergence vers la meilleure solution, la taille du tournoi a été modifiée alors que les autres paramètres de l'AG ont été maintenus à leurs valeurs initiales (Tableau 9.4). Puisque les décisions de remplacer une conduite, à chaque phase, vont influencer la valeur de la fonction d'adaptation de la phase qui suit, on ne présentera, à titre d'exemple, que les résultats de la troisième phase pour le réseau à 100 conduites.

La figure 9.12 montre que, pour un même nombre de générations, l'essai effectué avec une sélection par tournoi à deux individus a donné une fonction

d'adaptation de (202 838,64) alors que les trois autres essais réalisés avec respectivement trois, quatre et dix individus ont donné le même résultat, soit la meilleure fonction d'adaptation trouvée (202 785,3).

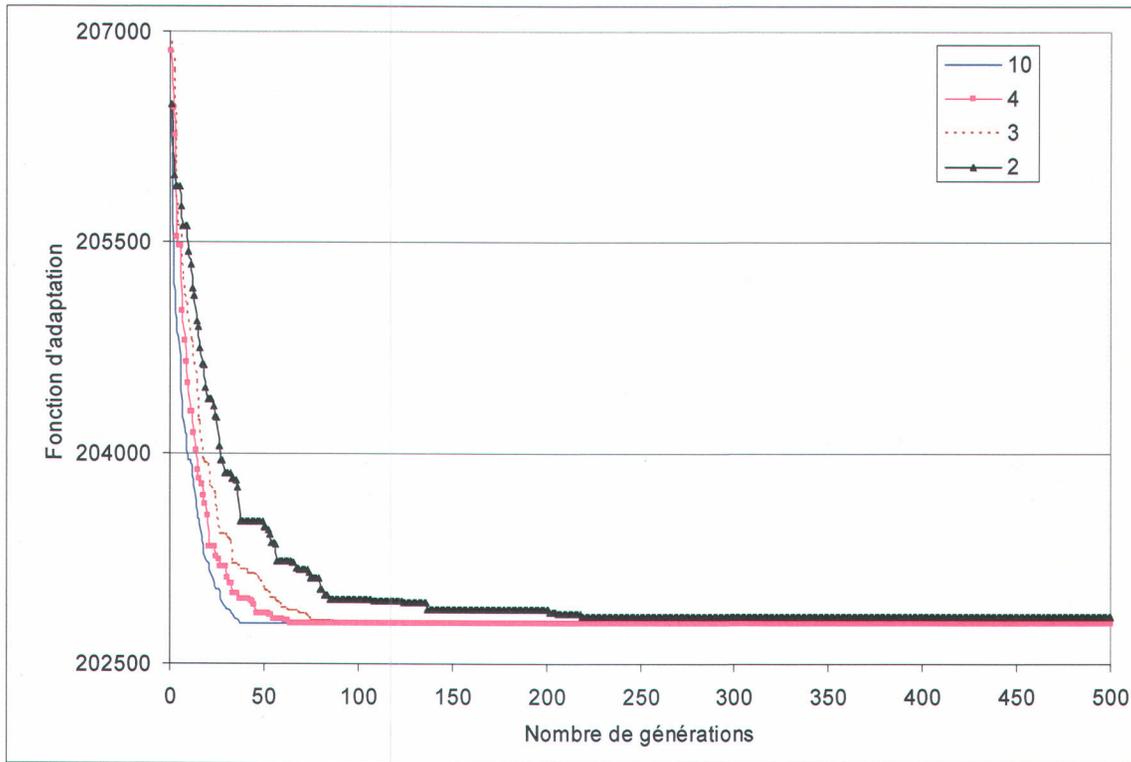


Figure 9.12 Influence de la taille des tournois sur la convergence vers la meilleure solution pour la phase 3 (réseau à 100 conduites)

Comme on pouvait s'y attendre, plus le nombre d'individus qui participent dans un tournoi est petit, plus la pression de sélection est petite et plus la convergence est lente. Pour avoir la meilleure solution tout en maintenant une valeur minimale de la taille des tournois (2), il faudra soit augmenter la taille des demes ou le nombre de demes ou le nombre maximal de générations. Augmenter l'un de ces paramètres a cependant pour conséquence d'augmenter les temps de calcul.

9.3 Résultats pour le réseau à 250 conduites

Comme précédemment, les opérations suivantes sont effectuées dans chaque deme : sélection par tournoi, croisement en un point et mutation (voir l'organigramme de la figure 8.5). Pour cet exemple, on a augmenté la taille et le nombre de demes ainsi que la taille des tournois et la probabilité de croisement. Les paramètres de l'AG sont résumés au Tableau 9.8.

Tableau 9.8 Paramètres de l'AG-générationnel (réseau à 250 conduites)

Nombre de demes	10
Taille des demes	500
Fréquence de migration des individus	25
Nombre d'individus qui migrent (5 %)	25
Taille des tournois	10
Probabilité de croisement	0,50
Probabilité de mutation de l'individu	1,00
Probabilité de mutation des bits	0,01
Nombre maximal de générations	1 000

La taille des tournois a un impact sur la convergence vers la meilleure solution. La figure 9.13 montre que, pour un même nombre de générations, les essais effectués avec une sélection par tournoi à deux, quatre et dix individus ont donné respectivement une fonction d'adaptation de 1 303 998,63, 1 298 703,88 et 1 298 031,8. On voit bien que la meilleure fonction d'adaptation a été obtenue avec un tournoi à dix individus sans affecter significativement le temps de calcul.

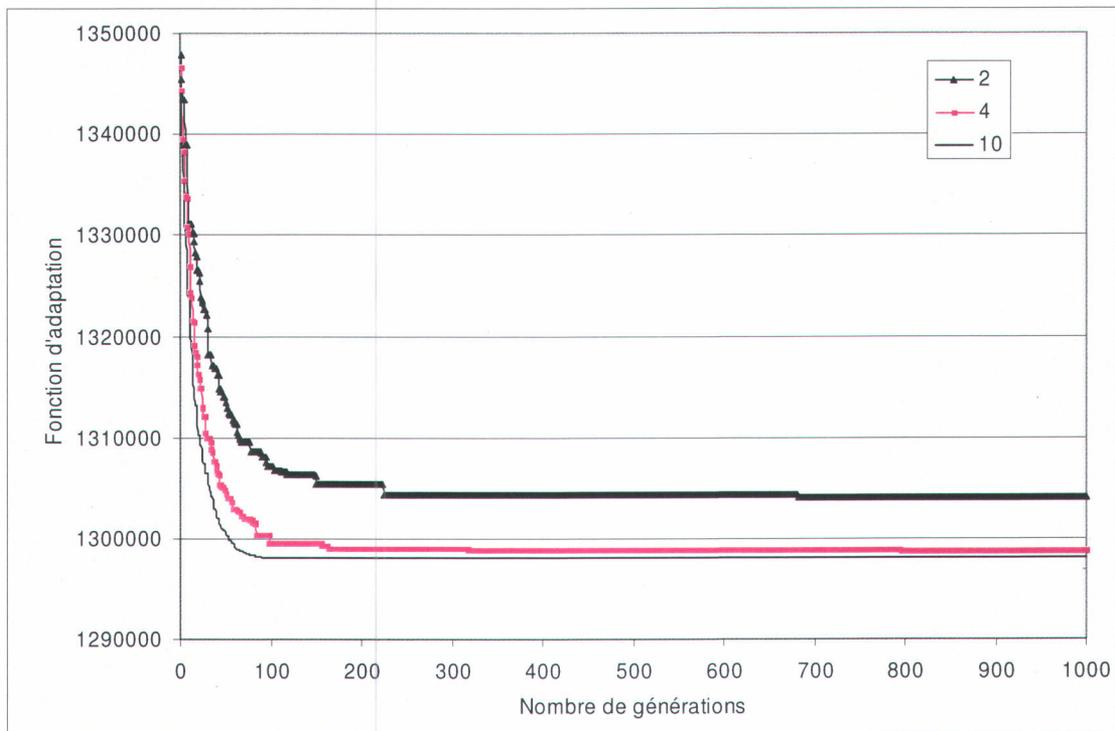


Figure 9.13 Influence de la taille des tournois sur la convergence vers la meilleure solution pour la phase 1 (réseau à 250 conduites)

Le Tableau 9.9 identifie, pour différentes initialisations de la population de départ, les meilleures solutions trouvées par l'AG, et les différentes valeurs des fonctions d'adaptations correspondantes. Pour identifier ces conduites, il a fallu augmenter le nombre maximal de générations à 1 000 car, pour cet exemple, la longueur de la chaîne (de l'individu) est plus grande (1 000 bits, 4 bits par conduite) et, de ce fait, l'espace de recherche est beaucoup plus important. On peut facilement remarquer, en examinant la figure 9.2 et le Tableau 9.9, que les premières conduites remplacées sont effectivement celles qui ont enregistré le plus de bris.

Tableau 9.9 Conduites nécessitant un remplacement telles qu'identifiées par l'AG (réseau à 250 conduites)

N° phase	Nombre de conduites	Numéro de la conduite (bris enregistré avant le remplacement) temps de remplacement en années										Meilleure fonction d'adaptation		
1	0													1 298 031,87
2	0													1 080 304,25
3	1	239 (23) 41												955 305,25
4	5	16 (18) 46	28 (22) 46	118 (16) 49	129 (18) 46	196 (24) 46								799 794,00
5	2	101 (19) 52	244 (19) 52											596 927,62
6	7	40 (17) 60	87 (24) 56	140 (22) 56	154 (17) 60	164 (21) 56	168 (19) 57	202 (22) 56						554 774,68
7	6	115 (19) 63	135 (22) 61	156 (19) 62	220 (18) 65	223 (20) 61	243 (21) 61							469 362,40
8	10	8 (14) 69	63 (16) 66	96 (14) 70	128 (17) 66	162 (17) 66	167 (18) 66	211 (20) 66	228 (20) 66	235 (17) 66	240 (14) 70			368 147,71
9	11	38 (13) 75	47 (14) 72	51 (17) 71	67 (17) 71	158 (17) 71	195 (13) 75	200 (16) 71	226 (13) 75	231 (14) 72	237 (12) 75	250 (13) 75		279 017,93
10	6	4 (17) 76	43 (16) 77	83 (16) 77	107 (16) 77	159 (17) 76	186 (22) 76							227 638,98

La comparaison des résultats du Tableau 9.9 avec l'estimation numérique des temps de remplacement (voir le Tableau E.1 en Annexe E) a montré que, pour cet essai, l'AG a identifié les mêmes conduites et les mêmes temps de remplacement jusqu'à la 6^e phase. À la 7^e phase, les mêmes conduites sont identifiées par l'AG sauf que le temps de remplacement de la 115^e conduite est différent. L'AG identifie la 63^e année de remplacement au lieu de la 62^e année. Cette différence est attribuable au fait que l'écart entre les fonctions coûts totaux à la 62^e et la 63^e année est très petit pour cette conduite. À partir de la 8^e phase, les mêmes conduites sont identifiées sauf que l'AG ajoute à la 9^e phase la 237^e conduite.

9.4 Influence des distributions *a priori* sur les décisions de remplacement

9.4.1 Réseau à 100 conduites

Dans les sections précédentes, nous avons supposé une distribution *a priori* de type Gamma ($\alpha_0 = 0.5, \beta_0 = 0.5$), identique pour tous les paramètres λ_i (i allant de 2 à 10), de moyenne $0,25 \text{ an}^{-1}$ et de variance $0,125 \text{ an}^{-1}$. Pour voir l'influence de la distribution *a priori* sur les décisions de remplacement, on modifie les paramètres de la distribution Gamma et on choisit une distribution Gamma (2,00, 0,25) (voir la figure 4.4), de moyenne $0,50 \text{ an}^{-1}$, plus grande que la moyenne de la première distribution *a priori*.

Un historique de bris est généré pour chaque conduite du réseau, sur la période de 30 ans, historique identique quelles que soient les distributions *a priori* utilisées. Au début de chacune des phases, la distribution *a priori* permet d'estimer les valeurs des paramètres (λ_i) jusqu'à un certain ordre maximal de bris. Une relation liant les paramètres estimés à l'ordre de bris est alors utilisée. Ensuite, dès que des conduites sont identifiées par l'AG pour être remplacées à une phase donnée, les historiques de bris de chaque conduite vont changer et, de ce fait, on ne peut pas faire de comparaison entre les numéros des conduites remplacées et identifiés par chaque distribution *a priori*. La seule comparaison qui se fera concerne l'ordre de bris où il y a remplacement. Le nombre maximal de phases dans cet essai est de 15 phases.

Le Tableau 9.10 permet d'apprécier la sensibilité des résultats des remplacements aux différents choix des paramètres de la distribution *a priori*. Pour un réseau de 100 conduites, on voit bien que le rôle de la distribution *a priori* n'est plus négligeable pour les premières phases. Les résultats des différents essais ont montré que, plus les valeurs *a priori* des paramètres λ_i sont supposées grandes, plus le nombre de conduites remplacées est important.

Tableau 9.10 Influence de la distribution *a priori* sur les décisions de remplacement pour le réseau à 100 conduites

Phase	Gamma (0,50, 0,50)								Gamma (2,00, 0,25)									
	Moyenne <i>a priori</i> : 0,25								Moyenne <i>a priori</i> : 0,50									
	Numéro de la conduite bris enregistré avant le remplacement								Numéro de la conduite bris enregistré avant le remplacement									
1																		
2																		
3	16	28	63	96					16	28	63	96						
	16	15	12	9					16	15	12	9						
4									39	40	87							
									8	8	9							
5	4	8	15	27	38	39	40	87	4	8	15	27	38	93				
	8	9	9	7	9	13	9	10	8	9	9	7	9	7				
6	51	93							6	51	72	74						
	10	8							6	9	11	7						
7	6	14							14	29	30	76						
	9	9							6	8	6	6						
8	70	83							1	9	62	73						
	11	18							7	7	7	7						
9	1	9	28	30	72	73	74	85	48	75								
	10	9	9	9	11	9	10	9	11	7								
10	24	60	75	76					13	17	31	43	46	47	53	80	83	86
	10	12	8	9					9	6	11	7	6	8	7	8	11	9
11	31								85									
	9								7									
12	29	48	58	80					28	52	58	70						
	10	9	9	10					7	8	6	6						
13	37	54							60									
	10	9							6									
14	5	47	52	62	86	100			63	98								
	8	11	11	8	11	10			7	7								
15	19	43	44	63	96				6	32	37	42	44	77	78			
	8	8	8	9	8				6	6	6	6	9	6	8			
Nombre total de conduites remplacées	48								52									
Nombre de bris minimal avant de remplacer sur toutes les phases	7								6									

D'après le tableau précédent, on voit qu'à partir de la cinquième phase, le nombre moyen de bris oscille entre huit et dix bris (sauf à la 8^e phase) pour une distribution *a priori* Gamma (0,50, 0,50) et entre six et neuf bris pour une distribution *a priori* Gamma (2,00, 0,25).

Comme le montre la figure 9.14, le choix d'une distribution *a priori* Gamma (2,00, 0,25) a tendance à favoriser de plus grandes valeurs des paramètres λ_i , au début des phases par rapport à une distribution *a priori* Gamma (0,50, 0,50) (voir la figure 9.11).

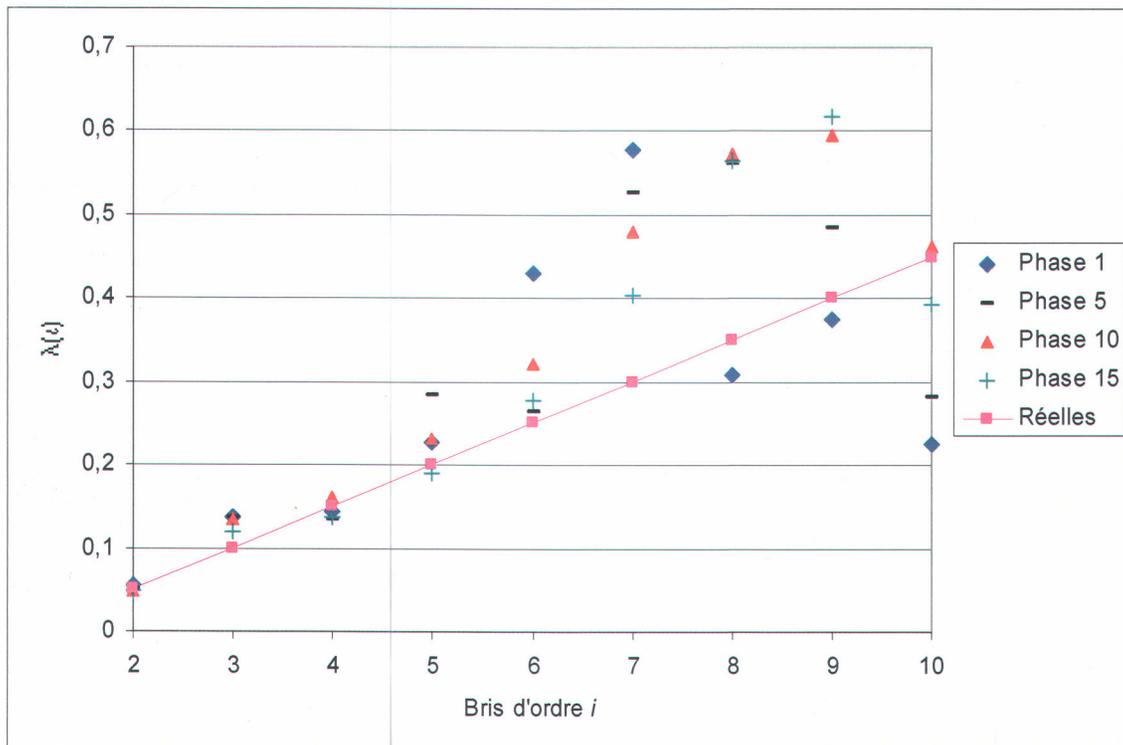


Figure 9.14 Valeurs réelles et valeurs estimées (maximum de la distribution *a posteriori*) des paramètres (λ_i) pour les différents ordres de bris pour une distribution *a priori* Gamma (2,00, 0,25) (réseau à 100 conduites).

Comme dernier essai, nous avons voulu savoir quels seraient réellement les résultats de l'optimisation, c'est-à-dire le nombre de conduites à remplacer, le numéro des conduites et surtout l'ordre minimal de bris pour lequel il y aura

remplacement, si on disposait d'une « information parfaite » sur tous les paramètres du modèle de bris pour l'historique de bris de la figure 9.1. On suppose que les coefficients de la régression non linéaire sont connus et on lance une optimisation sur chaque phase. Les résultats de cet essai sont consignés au Tableau 9.11. Il est intéressant de remarquer qu'il faut au minimum environ 11 bris pour qu'une conduite soit sélectionnée.

Tableau 9.11 Décisions de remplacements pour le réseau à 100 conduites avec « information parfaite »

Phase	Numéro de la conduite bris enregistré avant le remplacement				
1	16 11				
2	28 11				
3	87 11				
4					
5	40 96 15 11				
6	38 63 72 13 12 12				
7	1 24 51 67 83 16 12 12 17 11				
8	4 9 15 39 20 11 11 12				
9	6 76 12 17				
10	8 58 74 11 11 12				
11	14 53 60 93 13 12 11 11				
12	37 46 86 91 14 18 14 16				
13	44 54 80 11 12 11				
14	29 49 75 77 85 13 15 13 11 11				
15					
Bris minimal avant de remplacer	11				

9.4.2 Réseau à 250 conduites

La figure 9.15 montre le nombre de bris minimal qu'il a fallu pour qu'une conduite soit remplacée à chaque phase, pour les deux distributions *a priori* utilisées précédemment. On remarque que la distribution *a priori* a une grande influence

au début des phases puisque la variation du minimum du nombre bris de chaque distribution est très grande. Cette figure montre que, pour la distribution Gamma (0,50, 0,50), le minimum du nombre de bris est toujours plus grand que celui de la distribution Gamma (2,00, 0,25), ceci s'explique par le fait que les paramètres estimés avec une Gamma (0,50, 0,50) sont sous-estimés comparativement à ceux de la Gamma (2,00, 0,25), et donc la distribution Gamma (0,50, 0,50) a tendance à retarder le remplacement des conduites.

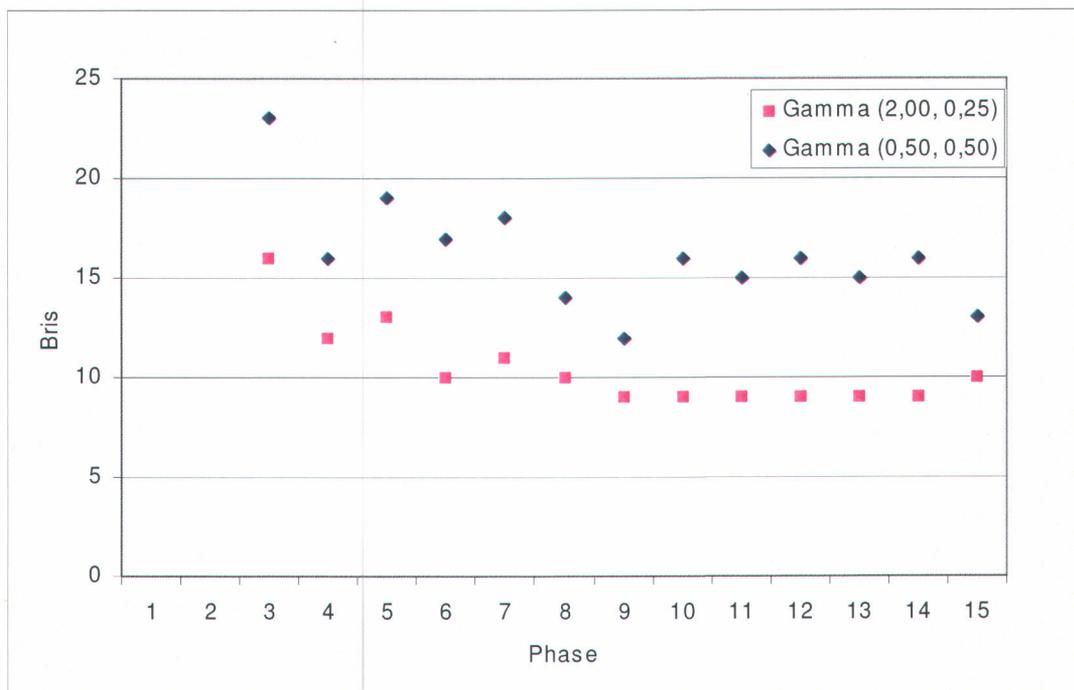


Figure 9.15 Minimum du nombre de bris enregistrés par les conduites remplacées en fonction des distributions *a priori* des paramètres λ_i (réseau à 250)

La figure 9.16 montre qu'en général, la distribution *a priori* Gamma (2,00, 0,25) est celle qui a donné le plus grand nombre de remplacements par phase (9 phases sur 13). Le nombre total de remplacements pour cette distribution est de 118 remplacements alors que la distribution Gamma (0,50, 0,50) a donné 107 remplacements. Si l'on devait tenir compte du coût de remplacement des conduites qui, jusqu'à maintenant, a été écarté de cette analyse, on verrait que la distribution *a priori* Gamma (2,00, 0,25) est celle qui coûterait le plus cher.

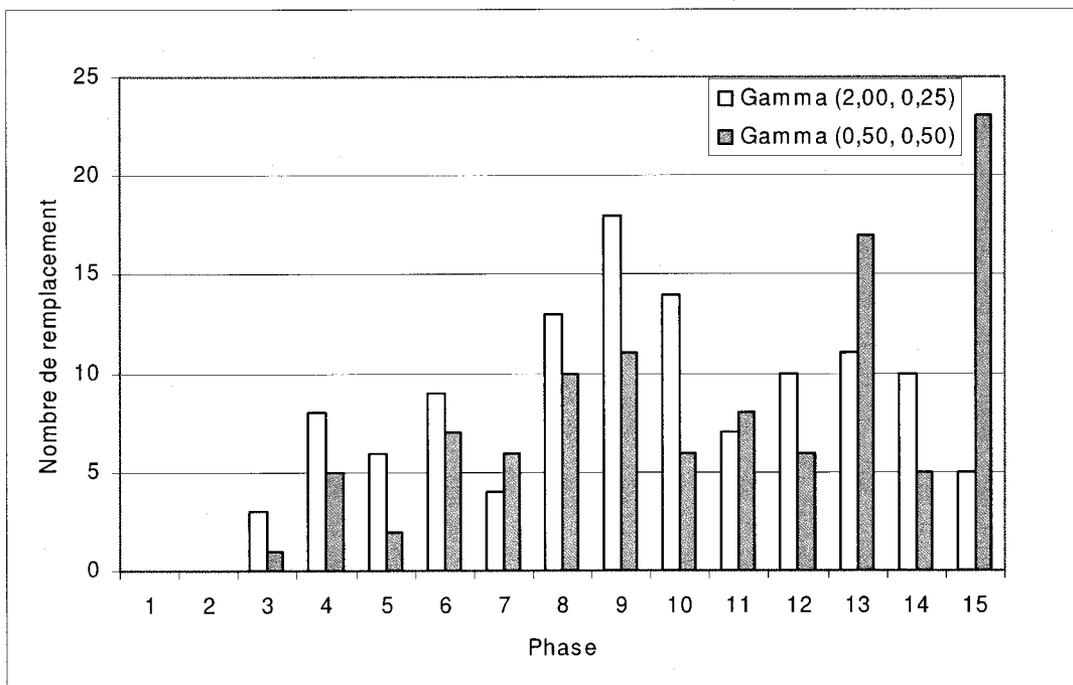


Figure 9.16 Nombre de remplacements par phase pour une distribution *a priori* Gamma (2,00, 0,25) et Gamma (0,50, 0,50) (réseau à 250)

La figure 9.17 montre les valeurs des paramètres estimés du modèle de bris (λ_i), pour une distribution *a priori* Gamma (2,00, 0,25). On remarque que pour un réseau plus grand (250 conduites), les paramètres (λ_i) sont mieux estimés comparativement au réseau à 100 conduites (voir la figure 9.14). La figure 9.17 montre clairement que l'estimation des valeurs des paramètres (λ_i) s'améliore à chaque fois que les phases augmentent (phases 5, 10, 15), les valeurs estimées convergeant vers les vraies valeurs des paramètres.

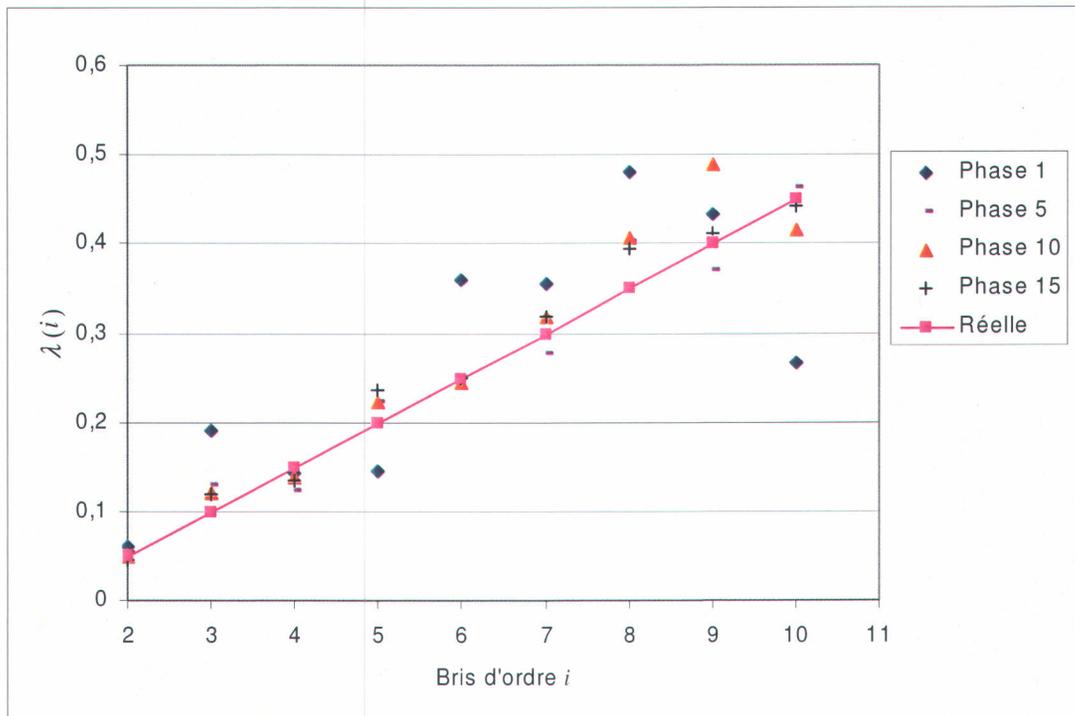


Figure 9.17 Valeurs réelles et valeurs estimées (maximum de la distribution *a posteriori*) des paramètres (λ_i) pour les différents ordres de bris pour une distribution *a priori* Gamma (2,00, 0,25), (réseau à 250 conduites).

9.5 Stratégie de planification des interventions considérant les aspects structural et hydraulique

Dans cette section, il s'agit d'identifier une solution représentant l'ensemble des conduites à remplacer ainsi que les moments optimaux de leur remplacement de telle sorte que la pression soit respectée à tous les nœuds du réseau. L'utilisation d'un AG permet de tenir compte de la contrainte de pression minimale (équation 8.8). Chaque solution proposée par l'AG doit être vérifiée avec le simulateur hydraulique pour s'assurer que toutes les pressions aux nœuds du réseau sont supérieures à une pression minimale imposée. Les solutions non réalisables, qui ne satisfont pas la condition de pression minimale, ne sont pas écartées de la population d'individus mais leurs fonctions

d'adaptation sont pénalisées. Le coefficient K_p de l'équation 8.13 doit être choisi de façon à garder le même ordre de grandeur que le coût de la réparation des bris et du remplacement.

9.5.1 Réseau à 100 conduites

Pour montrer l'influence de la pression minimale imposée aux nœuds sur la solution identifiée par l'AG, considérons l'exemple du réseau à 100 conduites. La figure 9.18 montre les pressions calculées aux nœuds, au temps $t = 30$ ans, pour le réseau à 100 conduites.

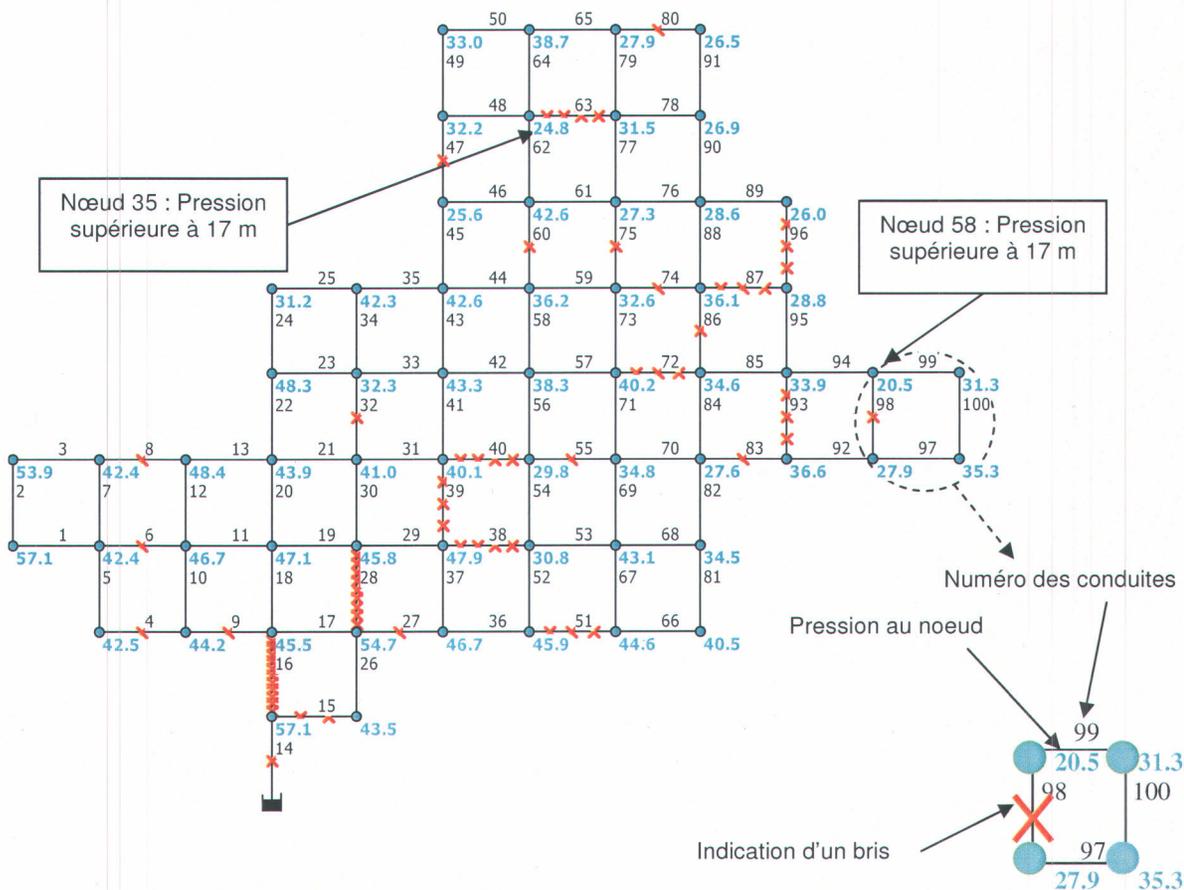


Figure 9.18 Pressions aux nœuds au temps ($t = 30$ ans) pour le réseau à 100 conduites

Dans la suite de cette section, on impose une pression minimale de 17 m⁽⁴⁾ à chaque nœud et on lance une optimisation, tout en considérant les paramètres de l'AG présentés au Tableau 9.12.

Tableau 9.12 Paramètres de l'AG-générationnel (réseau à 100 conduites avec contrainte hydraulique)

Nombre de demes	5
Taille des demes	200
Fréquence de migration des individus	10
Nombre d'individus qui migrent (5 %)	10
Taille des tournois	4
Probabilité de croisement	0,30
Probabilité de mutation de l'individu	1,00
Probabilité de mutation des bits	0,01
Nombre maximal de générations	1 000

Les pressions aux nœuds correspondant à la meilleure solution trouvée en considérant une pression minimale imposée de 17 m sont illustrées à la figure 9.19. On voit bien que toutes les pressions aux nœuds sont supérieures à 17 m. La meilleure fonction d'adaptation obtenue est de 280 891,15, ce qui correspond à la solution trouvée à la section 9.2.3.

Pour voir l'influence de la pression minimale sur les décisions de remplacement durant la première phase, on modifie la valeur de pression minimale acceptable. Si l'on impose une pression minimale de 25 m, les nœuds 35 et 58 deviennent les nœuds critiques car les pressions sont de : 23,9 m et 19,2 m respectivement (voir la figure 9.19).

⁴ 17 m = 24,18 PSI
17 m = 166,77 KPa

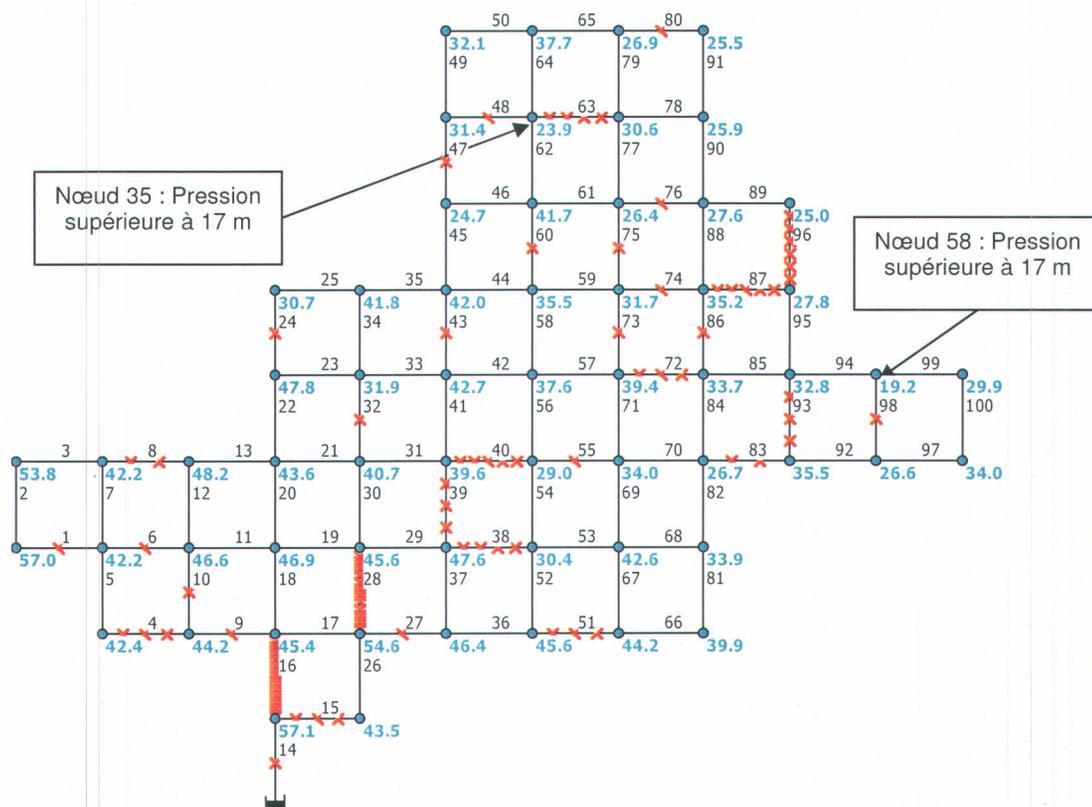


Figure 9.19 Pressions aux nœuds au temps ($t = 35$ ans) pour la meilleure solution trouvée, pour le réseau à 100 conduites (pression minimale imposée de 17 m).

En imposant une pression minimale de 20 m, on s'attend à ce que l'AG remplace certaines conduites durant la première phase pour augmenter la pression au 58^e nœud, même si on a vu que ce n'est pas économique d'un point de vue structural de remplacer une conduite durant cette phase (voir le Tableau 9.5). Le Tableau 9.13 résume la meilleure solution trouvée lorsqu'on impose une pression minimale de 20 m. La figure 9.20 illustre les pressions aux nœuds, au temps $t = 35$ ans, correspondant à la meilleure solution trouvée en considérant une pression minimale imposée de 20 m.

Tableau 9.13 Meilleure solution trouvée pour le réseau à 100 conduites avec une pression minimale de 20 m, durant la première phase

Fonction d'adaptation	281 220,656
Numéro de la conduite remplacée	94
Année de remplacement	32

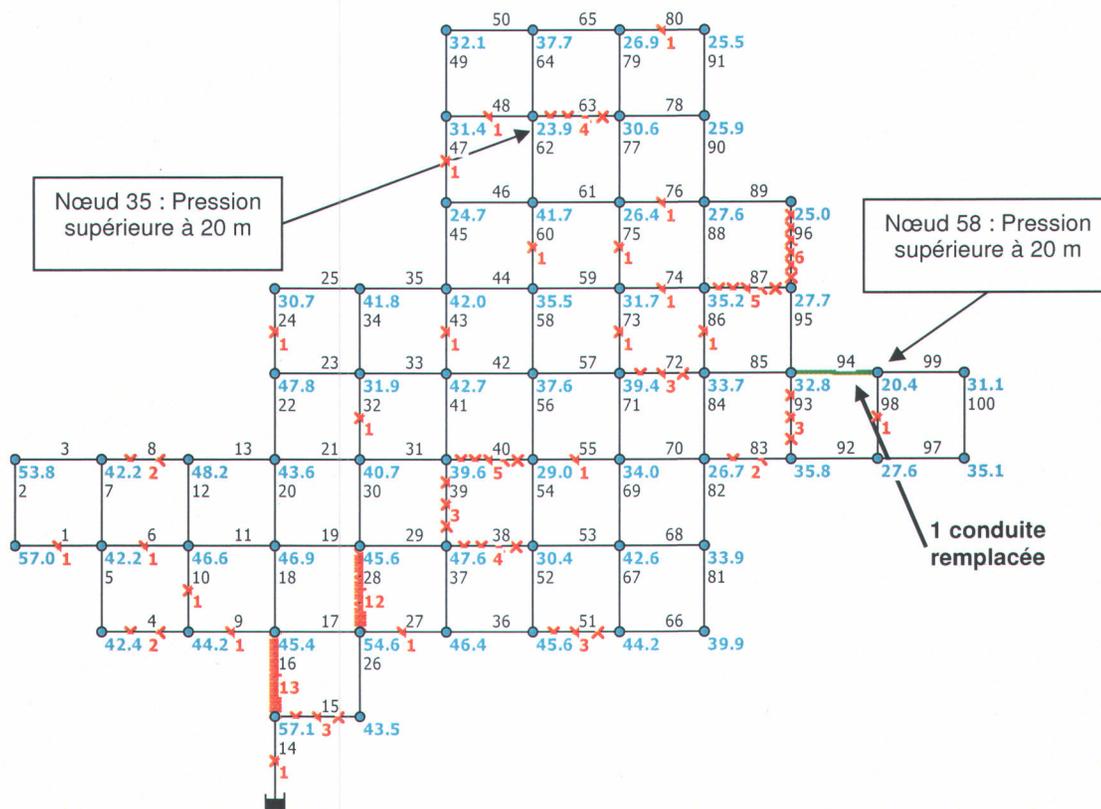


Figure 9.20 Pressions aux nœuds au temps ($t = 35$ ans) pour la meilleure solution trouvée, pour le réseau à 100 conduites (pression minimale imposée de 20 m).

Pour augmenter les pressions aux nœuds, les résultats montrent qu'il faut remplacer la 94^e conduite malgré que celle-ci n'ait pas enregistré de bris. D'un point de vue pratique, remplacer une conduite coûte beaucoup plus cher que de la réhabiliter et cette possibilité ne devra être envisageable que lorsque l'état structural de la conduite est dans un état très critique car, dans la plupart des cas, les municipalités n'ont pas les ressources financières pour remplacer les conduites de leurs réseaux et, de ce fait, ils n'agissent que lorsqu'il y a urgence.

Mais dans notre cas, étant donné que cette conduite a un petit diamètre de 100 mm et qu'il est connu que remplacer une conduite a un double effet, à savoir améliorer son coefficient de Hazen-Williams et son état structural, nous allons poursuivre cette analyse en supposant que la seule option est le remplacement.

Pour voir l'influence de la pression minimale imposée sur l'ensemble des conduites à remplacer, la pression minimale à respecter a été modifiée de 17 à 23 par tranche de 3 m. La figure 9.21 montre bien que plus les pressions aux nœuds sont sévères, plus le nombre de conduites à remplacer est important et plus la fonction d'adaptation est grande.

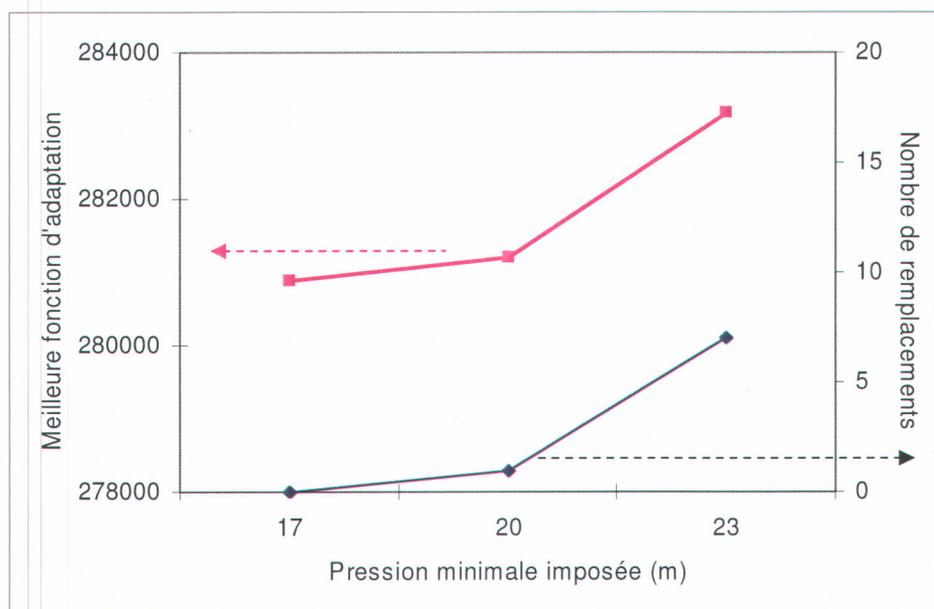


Figure 9.21 Influence de la pression minimale pour la première phase (résultats de la meilleure solution trouvée, réseau à 100 conduites, les carrés indiquent la fonction d'adaptation et le losange le nombre de conduites remplacées)

La figure 9.22 présente la variation de la pression au nœud 58 en fonction du temps, pour la meilleure solution trouvée lorsqu'aucune contrainte hydraulique n'est considérée et la meilleure solution trouvée dans le cas où on impose une pression minimale de 20 m, avec un coefficient K_p égal à 100 000 et 1 000. Pour un petit coefficient, $K_p = 1\,000$, la solution est non réalisable puisque cette solution donne des pressions inférieures à 20 m à la 32^e année et à la 35^e année (les pressions calculées sont de 19,94 et 19,96 m, respectivement), comme le montre la figure 9.22, et propose de remplacer la conduite N° 83 à la 33^e année.

Alors que pour un coefficient $K_p = 100\ 000$, les pressions aux nœuds de toutes les années sont supérieures à 20 m (solution du Tableau 9.13). Il apparaît clairement que le poids de la fonction pénalité a un grand impact sur la solution trouvée par l'AG.

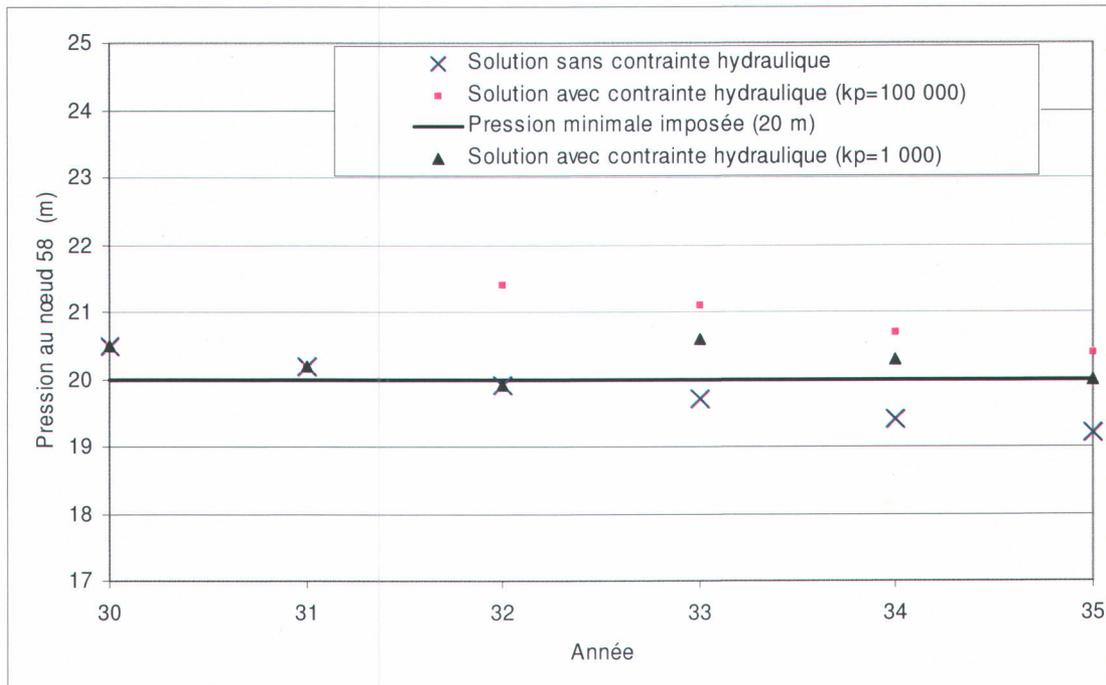


Figure 9.22 Variation de la pression au nœud 58 en fonction des temps de la première phase

La figure 9.23 permet de voir l'influence de la contrainte hydraulique imposée de 20 m sur la pression du 58^e nœud, sur toutes les phases, pour un coefficient K_p ajusté à chaque phase par essai et erreur. On voit bien que si on néglige la contrainte de pression, les solutions proposées par l'AG (sans contrainte hydraulique) ne tiennent compte que de la fonction coût de réparation des bris et de remplacement et que les variations de pression surviennent lors du remplacement de conduites résultant d'une détérioration de l'aspect structural (voir le Tableau 9.5 qui indique les temps optimaux de remplacement).

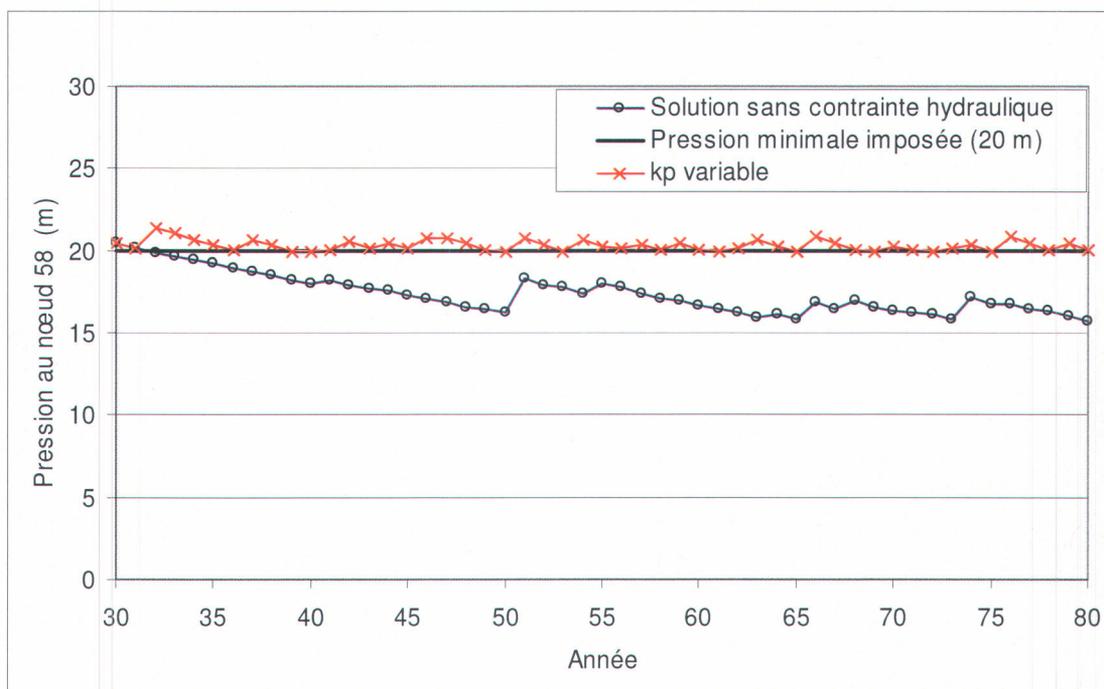


Figure 9.23 Variation de la pression au nœud 58 en fonction des temps pour les dix phases pour la meilleure solution trouvée à chaque phase

Le Tableau 9.14 résume l'ensemble des conduites remplacées et les meilleures fonctions d'adaptation obtenues lorsque les deux aspects structural et hydraulique sont considérés en même temps. Ces résultats ont été obtenus en considérant les paramètres de l'AG présentés au Tableau 9.12 et en augmentant la taille du deme à 500 individus. Le nombre total de conduites remplacées sur les 10 phases passe à 43 conduites. Ce Tableau montre que la valeur de la pression minimale imposée aux nœuds fait que certaines conduites se font remplacer même plusieurs fois (94^e, 83^e).

Tableau 9.14 Conduites devant être remplacées telles qu'identifiées par l'AG (structural et hydraulique)

Numéro de la phase	Nombre de conduites remplacées	Numéro de la conduite (Temps de remplacement, en années)								Meilleure fonction d'adaptation
1 : [30,35]	1	<u>94</u> <u>32</u>								281 220,65
2 : [35,40]	2	<u>83</u> <u>37</u>	<u>87</u> <u>40</u>							228 769,73
3 : [40,45]	4	<u>16</u> <u>41</u>	<u>28</u> <u>41</u>	<u>38</u> <u>44</u>	<u>92</u> <u>42</u>					198 875,32
4 : [45,50]	6	<u>4</u> <u>46</u>	<u>39</u> <u>46</u>	<u>40</u> <u>47</u>	<u>63</u> <u>46</u>	<u>72</u> <u>50</u>	<u>96</u> <u>46</u>			102 919,46
5 : [50,55]	5	<u>8</u> <u>51</u>	<u>15</u> <u>52</u>	<u>27</u> <u>51</u>	<u>93</u> <u>51</u>	<u>94</u> <u>54</u>				70 455,78
6 : [55,60]	3	<u>29</u> <u>57</u>	<u>74</u> <u>56</u>	<u>85</u> <u>59</u>						44 252,11
7 : [60,65]	6	<u>6</u> <u>65</u>	<u>37</u> <u>61</u>	<u>44</u> <u>63</u>	<u>51</u> <u>61</u>	<u>60</u> <u>61</u>	<u>70</u> <u>62</u>			37 312,80
8 : [65,70]	4	<u>9</u> <u>69</u>	<u>31</u> <u>70</u>	<u>54</u> <u>66</u>	<u>62</u> <u>69</u>					28 593,68
9 : [70,75]	8	<u>1</u> <u>73</u>	<u>14</u> <u>73</u>	<u>43</u> <u>72</u>	<u>47</u> <u>75</u>	<u>48</u> <u>75</u>	<u>52</u> <u>74</u>	<u>73</u> <u>72</u>	<u>76</u> <u>71</u>	22 455,53
10 : [75,80]	4	<u>77</u> <u>78</u>	<u>83</u> <u>79</u>	<u>94</u> <u>76</u>	<u>99</u> <u>79</u>					14 119,56

9.5.2 Réseau à 250 conduites

La figure 9.24 illustre les pressions initiales calculées aux nœuds au temps $t = 30$ ans. La figure 9.25 montre les pressions aux nœuds obtenues à la fin de la première phase lorsque aucune contrainte hydraulique n'est considérée. On voit bien que, d'un point de vue structural, aucune conduite n'a été remplacée et les résultats aux nœuds montrent que toutes les pressions au temps $t = 35$ ans sont supérieures à 20 m.

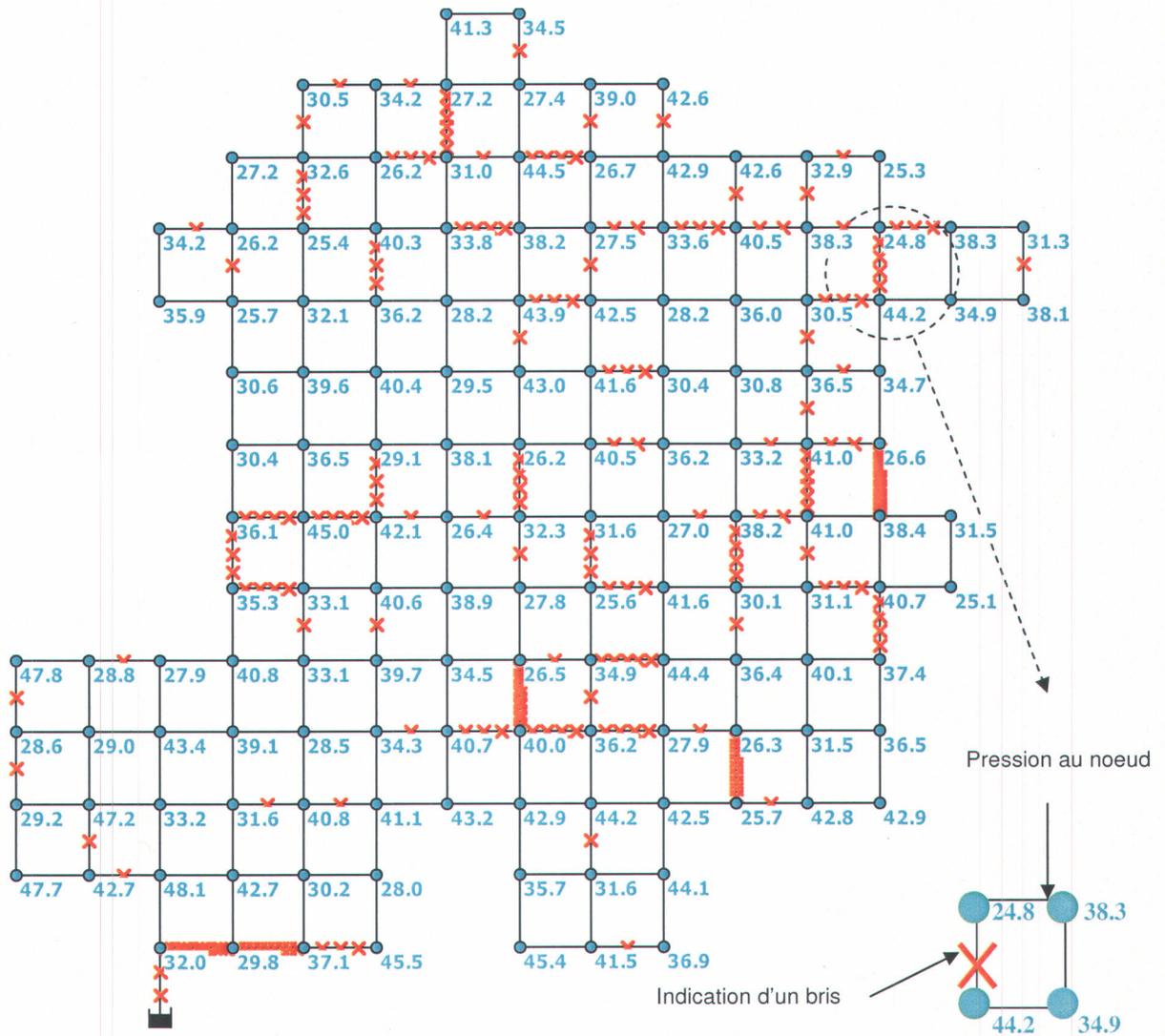


Figure 9.24 Pressions aux nœuds au temps ($t = 30$ ans) pour le réseau à 250 conduites

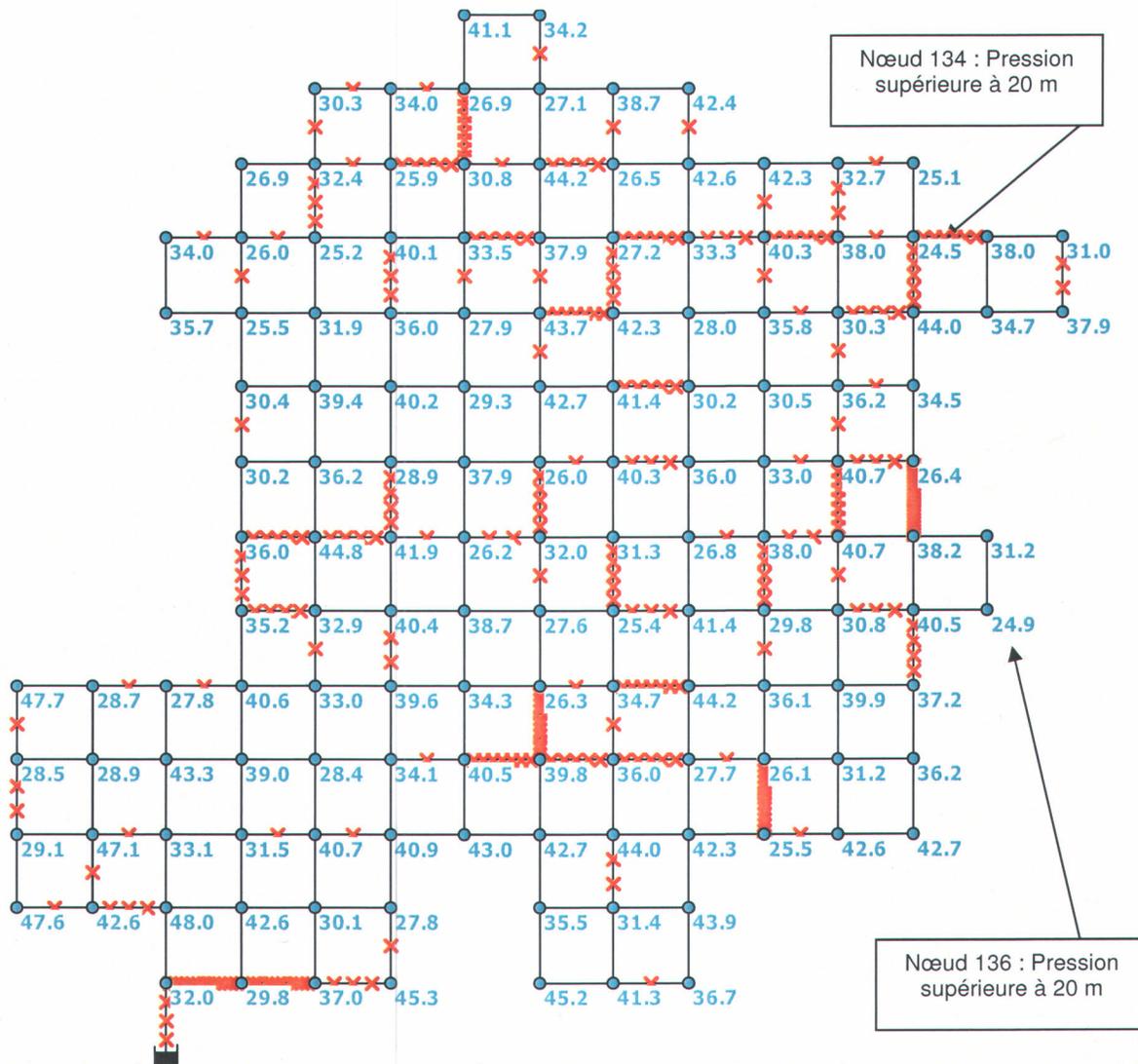


Figure 9.25 Pressions aux nœuds au temps ($t = 35$ ans) pour le réseau à 250 conduites (sans contrainte hydraulique)

Pour voir l'influence de la pression minimale imposée aux nœuds sur les décisions de remplacement des conduites de ce réseau, on impose à ce réseau, par exemple, une pression minimale de 25 m à chaque nœud et on lance une optimisation sur la première phase, tout en considérant les paramètres de l'AG présentés au Tableau 9.8. On doit s'attendre à ce que certaines conduites soient remplacées durant la première phase afin d'augmenter la pression aux nœuds

n°134 et 136 puisque la figure 9.25 indique respectivement des pressions de 24,5 m et 24,9 m, au temps $t = 35$ ans. La figure 9.26 illustre l'évolution de la pression obtenue au nœud 134, en considérant une pression minimale de 25 m et un coefficient K_p égal à 1 000 000. Pour cet essai ($K_p = 1\,000\,000$), la fonction d'adaptation trouvée est de 1 302 188,0 et la pénalité $Penap$ est nulle. Pour un coefficient K_p égal à 1 000 000, l'AG propose de remplacer les conduites avec les temps suivants : 19(31), 28(32), 31(34), 40(31) et 51(33).

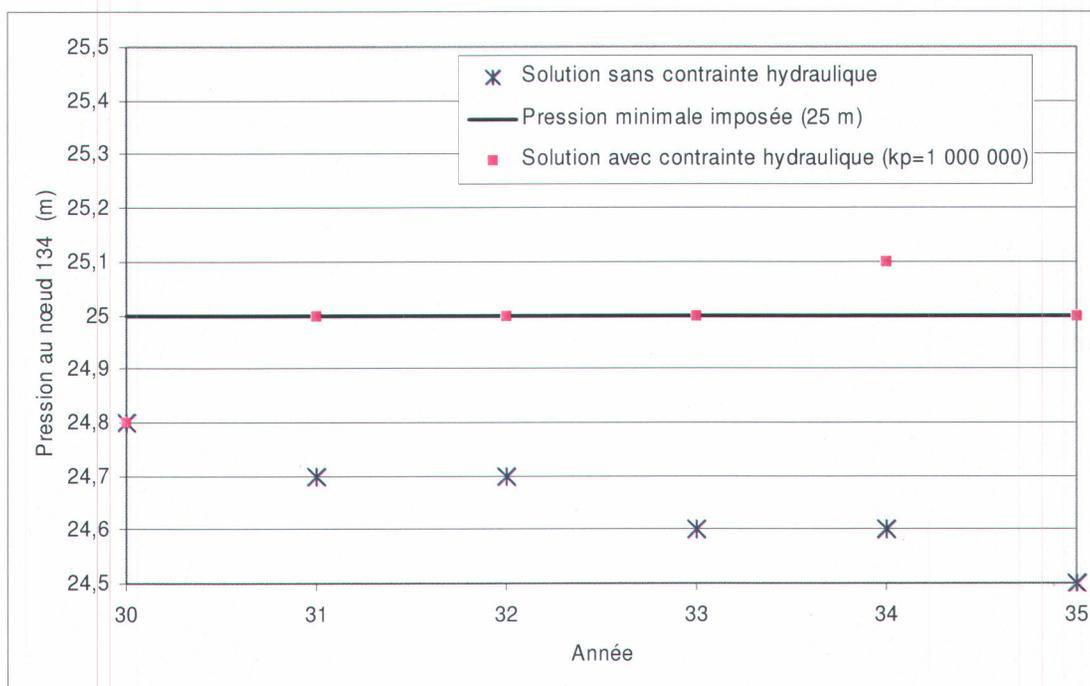


Figure 9.26 Variation de la pression au nœud 134 en fonction des temps de la première phase, pour le réseau à 250 conduites (pression minimale imposée de 25 m).

9.6 Discussion générale et recommandations

L'objectif de ce chapitre était de tester, avec deux réseaux de distribution hypothétiques de 100 et 250 conduites, la stratégie de planification des interventions multiphases proposées dans le chapitre précédent, et qui intègre à la fois la détérioration de la capacité hydraulique et l'intégrité structurale des

conduites. La stratégie proposée implique l'identification d'un certain nombre de conduites à remplacer pour chaque phase ainsi que l'année de leur remplacement, de sorte que durant toute la période d'analyse, les pressions aux nœuds du réseau restent supérieures à une pression minimale imposée.

Dans la première partie de cette étude, qui n'inclut que l'aspect structural, les résultats de l'optimisation ont montré qu'en général l'AG-générationnel, avec une sélection par tournoi et un croisement en un point, a permis d'identifier les conduites qui ont subi le plus de bris comme étant les conduites à remplacer, et ce pour les deux tailles de réseau. Une analyse de sensibilité par rapport aux paramètres de l'AG a d'abord été réalisée, puis les paramètres de l'AG ont été fixés afin de déterminer les conduites à remplacer et les dates de remplacement. Lors de l'analyse de sensibilité, on a noté que le nombre d'individus qui participent au tournoi peut avoir une grande influence sur la vitesse de convergence vers la meilleure solution. On a vu également que pour un réseau de 100 conduites, cinq demes à 200 individus et 500 générations permettaient d'atteindre les meilleures solutions, alors que pour un réseau à 250 conduites, il a fallu augmenter le nombre maximal de générations à 1 000 et utiliser 10 demes à 500 individus pour atteindre les meilleures solutions.

Concernant l'influence des distributions *a priori* sur l'estimation des paramètres du modèle de bris, les résultats ont montré que la distribution *a priori* a une plus grande influence au début des phases car la taille de l'échantillon de conduites ayant enregistré des bris de différents ordres n'est alors pas très grande. Ensuite, au fur et à mesure que la taille de cet échantillon augmente, la distribution *a priori* a de moins en moins d'influence sur l'estimation des paramètres λ_i , surtout pour les premiers ordres de bris (2^e bris, 3^e bris, ..., 6^e bris) (voir par exemple à cet effet les figures 9.11, 9.14 et 9.17). Plus le nombre de phases augmente, plus les valeurs estimées des paramètres de distribution exponentielle tendent vers les valeurs réelles.

L'influence des distributions *a priori* sur les décisions de remplacement a aussi été évaluée. Pour les deux réseaux testés, la distribution *a priori* Gamma (2,00, 0,25) a montré que le minimum du nombre de bris enregistrés par les conduites remplacées est beaucoup plus petit que celui de la distribution *a priori* Gamma (0,50, 0,50). Ceci s'explique par le fait que, pour la distribution *a priori* Gamma (2,00, 0,25), les valeurs estimées des paramètres λ_i sont plus grandes que celles estimées avec la distribution Gamma (0,50, 0,50). Comme ces valeurs sont utilisées pour estimer les différents coûts, de petites valeurs pour ces paramètres λ_i auront tendance à retarder les remplacements de conduites.

Le choix d'une distribution *a priori* Gamma (2,00, 0,25) a tendance à favoriser de plus grandes valeurs des paramètres λ_i au début des phases par rapport à une distribution *a priori* Gamma (0,50, 0,50). Vu la taille des deux réseaux et la durée de l'historique initial de bris (30 années), on a préféré utiliser une distribution *a priori* Gamma (0,50, 0,50) qui nous permet d'adopter une approche plutôt prudente et économique où l'on a tendance à retarder les remplacements au début des phases. Avec cette distribution *a priori*, les différents tests réalisés avec les historiques de bris ont montré que, durant les dernières phases, les conduites sont remplacées après avoir enregistré un minimum de huit à neuf bris pour le réseau à 100 conduites, alors que pour le réseau à 250 conduites, le nombre de bris minimal variait entre 12 et 16 bris.

Dans la deuxième partie de cette étude, l'aspect hydraulique a été considéré. L'équation de Sharp et Walski (1988), qui permet d'estimer comment évolue le coefficient de Hazen-Williams avec le temps, a été utilisée. Une des limites de notre approche est qu'il est supposé que le taux de croissance de la rugosité est identique pour toutes les conduites alors que, dans la réalité, les conduites ne se détériorent pas au même rythme. Ces coefficients sont normalement déterminés à partir de données historiques ou bien en se basant sur les données de la qualité de l'eau transportée. Il faut néanmoins préciser que, dans la version

actuelle du modèle, il est très facile de modifier ces valeurs, pourvu que l'information soit disponible.

Dans cette deuxième partie, on a vu la nécessité de l'utilisation d'un AG par rapport à la méthode numérique lorsque la contrainte hydraulique de pression minimale est considérée. Chaque solution proposée par l'AG doit être testée avec le simulateur hydraulique afin de vérifier la faisabilité de la solution. Les différents essais effectués avec les deux réseaux, sur la première phase, ont montré que le coefficient de la fonction pénalité a un grand impact sur la solution choisie par l'AG. Une très grande valeur va forcer l'AG à ne sélectionner que des solutions réalisables, sans tenir compte de la région proche des solutions non réalisables (c'est-à-dire des solutions qui ne respectent pas la contrainte de l'équation 8.8), alors qu'une petite valeur va forcer l'AG à ne sélectionner que des solutions proches de la région des solutions non réalisables. Ce coefficient doit être choisi avec précaution pour chaque réseau étudié.

Les différents essais effectués avec le réseau à 100 conduites, durant la première phase, ont montré que la valeur de la pression minimale imposée aux différents nœuds a également un rôle non négligeable et a une grande influence sur les décisions de remplacement; plus les conditions sur les pressions minimales à maintenir sont sévères, plus le nombre de conduites à remplacer est important.

Les essais réalisés sur les dix phases, en supposant une pression minimale de 20 m pour le réseau à 100 conduites, ont montré que des conduites pouvaient être remplacées pour satisfaire seulement la contrainte de pression minimale, même si ces conduites n'ont pas enregistré de bris. Ceci nous amène à envisager, dans de futurs travaux, l'option de réhabiliter une conduite avant de la remplacer.

Dans cette étude, on a supposé que la seule option possible est de remplacer une conduite par une autre de même diamètre. Cette hypothèse peut facilement être acceptable dans la mesure où aucune extension de réseau n'est supposée et aucune augmentation de la demande des consommateurs aux nœuds n'est envisageable. Cependant, il est possible d'incorporer dans la version actuelle du modèle, moyennant de légères modifications, l'option d'avoir des conduites de diamètre plus grand; en effet, le codage utilisé peut facilement incorporer une troisième variable qui pourrait être, par exemple, le diamètre de la nouvelle conduite.

Concernant le taux d'actualisation, nous avons supposé, comme première approximation, un taux constant de 10 %. Étant donné que la période d'analyse étudiée est assez longue (50 années), il était plutôt aléatoire de faire des prévisions et de choisir un taux d'actualisation variable puisque celui-ci dépend de plusieurs facteurs. Pour améliorer les résultats, il est fortement recommandé d'essayer plusieurs taux et de comparer les résultats de l'optimisation avec de courtes périodes de 10 à 15 ans.

Actuellement, la stratégie présentée n'a été développée que pour un modèle de bris du type Weibull-Exponentiel. Il serait intéressant d'inclure d'autres modèles pour que les utilisateurs puissent sélectionner le modèle de bris qui s'ajuste le mieux à leurs données réelles et surtout d'inclure l'influence de la longueur des conduites sur la probabilité d'apparition de bris, car cette possibilité a été écartée dans cette étude. Nous avons plutôt choisi de supposer que toutes les conduites des deux réseaux avaient la même longueur, alors qu'il est bien connu que plus la conduite est longue, plus la probabilité qu'elle subisse des bris est grande.

Concernant le choix des distributions *a priori*, il sera nécessaire d'étudier la possibilité de sélectionner une distribution *a priori* propre à chaque ordre de bris pour améliorer l'estimation des paramètres du modèle de bris au début des phases.

La stratégie a été testée sur des réseaux hypothétiques simples qui n'incluent que des conduites et un seul réservoir source. Il serait intéressant d'inclure des réservoirs de stockage et d'autres organes qui permettront de mieux se rapprocher des réseaux réels, et surtout d'aborder le même problème en testant une approche multiobjectif qui a pour avantage de produire un ensemble de solutions plutôt qu'une solution unique, ce qui évite le réglage du coefficient de la fonction pénalité à chaque phase.

10. STRATÉGIES MULTIOBJECTIFS

Dans le chapitre précédent, le problème de planification des interventions en réseau a été abordé dans le contexte d'une approche monoobjectif. Dans ce chapitre, le même problème est analysé dans un contexte multiobjectif. L'avantage de l'approche multiobjectif est qu'elle fournit non pas une seule solution optimale, mais un ensemble de solutions connues sous le nom de « solutions Pareto optimales ». Toutes les solutions de cet ensemble sont optimales dans le sens qu'aucune amélioration ne peut se faire sur un objectif sans la dégradation d'au moins un autre objectif. Le second avantage est que cette approche est très flexible car elle permet au gestionnaire de choisir la solution qui lui semble la plus appropriée. Le choix d'une solution peut aussi être fonction de plusieurs autres facteurs. Par exemple, dans le cas qui nous intéresse, le budget alloué sur chaque phase pour le remplacement de conduites peut influencer la décision.

Dans ce chapitre, on se propose de tester la stratégie de planification des interventions présentée précédemment dans un contexte multiobjectif. Un ensemble de solutions Pareto optimales est d'abord généré à chaque phase. Ensuite, pour passer d'une phase à la suivante, une solution est choisie et appliquée. Le choix de la décision va dépendre de la préférence du « gestionnaire ». Différentes stratégies (ou scénarios) de remplacement sont définies puis testées. Toutes les applications s'effectuent sur les réseaux de conduites considérés au chapitre précédent.

Ce chapitre est organisé en cinq sections. La section 10.1 présente la formulation mathématique des fonctions objectifs à optimiser. La section 10.2 identifie les stratégies de remplacement proposées. La section 10.3 présente l'analyse des principaux résultats obtenus pour une phase, avec le réseau à 100 conduites. Les résultats de l'application du *NPGA 2* et du *NSGA-II* sont présentés et une comparaison est effectuée avec ceux de l'approche

monoobjectif. La section 10.4 présente les principaux résultats obtenus avec les différentes stratégies de remplacement en considérant le *NSGA-II* pour les deux réseaux de 100 et 250 conduites. La section 10.5 présente enfin une discussion et une conclusion.

10.1 Formulation mathématique des fonctions objectifs

Les deux objectifs à optimiser sur chaque phase sont : 1) la minimisation du coût total du réseau (qui regroupe un coût total pour chaque conduite j du réseau, lequel va dépendre du nombre de bris $k(j)$ que la conduite a enregistrés) et 2) la minimisation du déficit de pression sur toutes les années :

$$\text{Minimise } f_1 = C_{Tot} = \sum_{j=1}^N [C_{Tot}(j ; T_f(j) | k(j))] \quad (10.1)$$

$$\text{Minimise } f_2 = \max_{(t=t'+1, t'+5)} \left[\max_{\substack{t \\ \text{noeud} \\ (\text{noeud}=1, \text{MaxNoeud})}} [\max(0, H^{\min}(\text{noeud}) - H(\text{noeud}, t))] \right] \quad (10.2)$$

où : $C_{Tot}(j ; T_f(j) | k(j))$ a déjà été défini par l'équation 8.2.

10.2 Stratégies de remplacement multiobjectif

A chaque phase, un ensemble de solutions Pareto optimales est généré (figure 10.1). Pour passer à la phase suivante, une seule solution non dominée est choisie puis appliquée. Différentes stratégies de remplacement peuvent être définies selon la solution choisie.

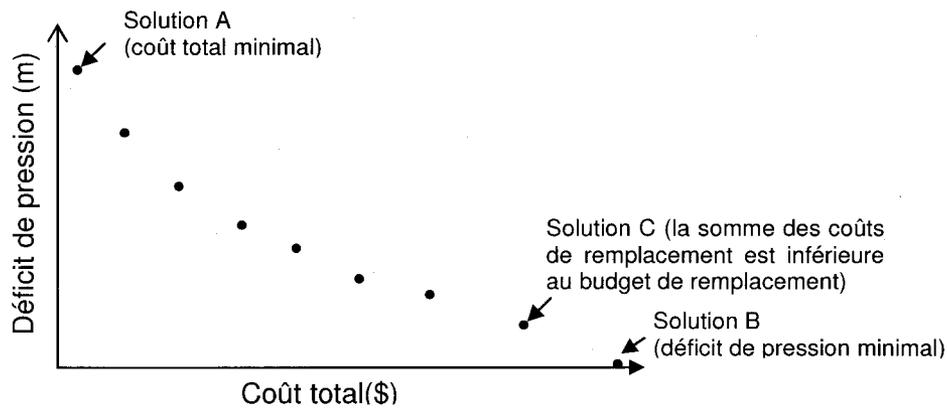


Figure 10.1 Choix d'une solution non dominée selon les différentes stratégies de remplacement

10.2.1 Stratégies de remplacement considérées

Dans ce travail, on définit quatre stratégies. Les deux premières tiennent uniquement compte de l'aspect structural ou structural et hydraulique, la troisième tient compte de la disponibilité du budget de remplacement des conduites sur chaque phase, et la quatrième fixe un nombre maximal prédéfini de conduites à remplacer à chaque phase. Ces stratégies sont :

- 1) Stratégie « prostructural » : on choisit la solution donnant la plus petite valeur de la fonction coût total (soit la solution A présentée à la figure 10.1). Cette stratégie est semblable au cas d'une approche monoobjectif sans contraintes hydrauliques.
- 2) Stratégie « structural-hydraulique » : on choisit la solution donnant la plus petite valeur du déficit de pression (soit la solution B présentée à la figure 10.1). C'est la stratégie qui devrait assurer que toutes les pressions aux nœuds sont supérieures aux pressions minimales imposées.

- 3) Stratégie avec contrainte budgétaire : on choisit la solution donnant la plus petite valeur du déficit de pression et qui respecte aussi la contrainte budgétaire donnée par l'équation suivante :

$$\sum_{j=1}^N \beta(j) C_r(j) \ell(j) \leq Budget \quad (10.3)$$

où :

- N : nombre total de conduites dans le réseau;
- $\beta(j)$: variable décisionnelle de remplacement égale à 1 si la conduite j est remplacée, sinon à 0;
- $Budget$: budget disponible, par phase, pour le remplacement des conduites;
- $C_r(j)$: coût unitaire du remplacement d'une conduite de diamètre $d(j)$ (voir le Tableau 9.1);
- $\ell(j)$: longueur de la conduite j (m).

Pour identifier cette solution, on procède comme suit : on choisit d'abord la solution donnant la plus petite valeur du déficit de pression (soit la solution B), puis on vérifie la contrainte de l'équation 10.3. Cette dernière solution est sélectionnée si le coût total de remplacement respecte le budget de remplacement. Dans le cas où cette solution ne respecte pas cette contrainte, on remonte le front de Pareto et on choisit la solution voisine qui respecte la contrainte budgétaire (par exemple la solution C présentée à la figure 10.1).

- 4) Stratégie avec un nombre maximal prédéfini de conduites à remplacer : on choisit la solution donnant la plus petite valeur du déficit de pression et qui respecte aussi le nombre maximal de conduites remplacées, ($Jmax$), par phase :

$$\sum_{j=1}^N \beta(j) \leq Jmax \quad (10.4)$$

Pour l'identification de cette solution, on procède comme pour la troisième stratégie. On choisit la solution B, puis on vérifie que le nombre total de conduites remplacées de cette solution ne dépasse pas le nombre maximal.

Dans le cas où la condition n'est pas respectée, on remonte le front et on choisit la solution qui ne dépasse pas le nombre maximal fixé. On suppose que la valeur du nombre maximal de remplacement est fixée par le gestionnaire.

Ces stratégies ne sont que des exemples, d'autres stratégies qui tiennent compte de l'aspect pratique peuvent également être définies pour répondre à la requête du gestionnaire du réseau.

10.2.2 Implantation de l'algorithme multiobjectif pour une quelconque stratégie de remplacement

La figure 10.2 résume les différentes étapes effectuées avec l'algorithme multiobjectif *NSGA-II* pour identifier une solution de remplacement selon une des stratégies citées précédemment :

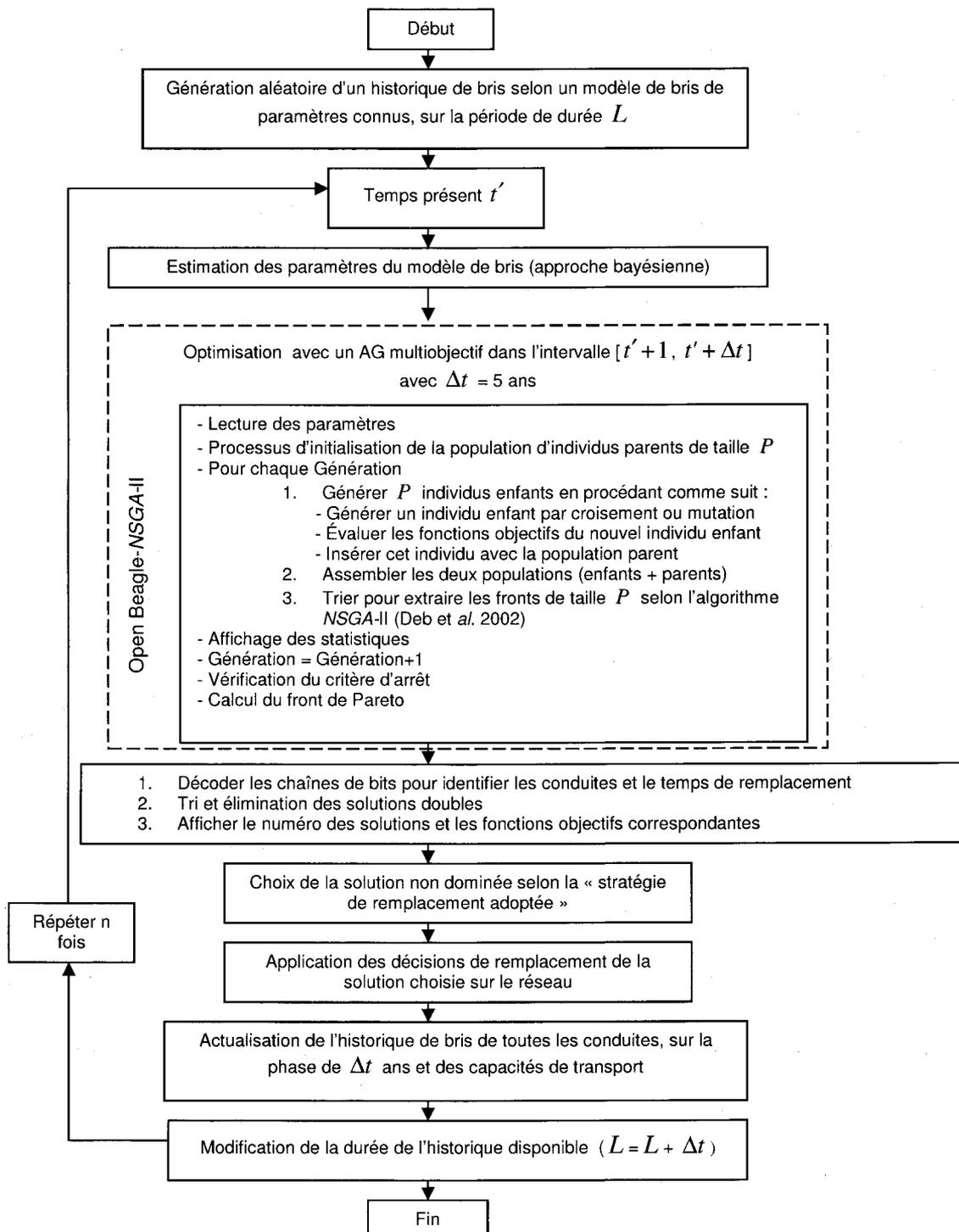


Figure 10.2 Optimisation multiobjectif sur plusieurs phases avec l'algorithme (NSGA-II) pour une quelconque stratégie de remplacement

10.3 Analyse des résultats pour la phase 1

Aucune étude de sensibilité par rapport au nombre de demes ne sera réalisée dans ce chapitre. Pour toutes les applications de type multiobjectif, un seul deme est utilisé. La population est donc confondue avec le deme et aucune migration ne peut s'effectuer. Pour l'algorithme *NPGA 2*, il n'y a que la méthode de sélection qui change et les paramètres du *NPGA 2* ne diffèrent de ceux d'un AG que par le rayon de niche et la taille des tournois. Le Tableau 10.1 résume l'ensemble des paramètres nécessaires pour effectuer une optimisation sur une phase avec les deux algorithmes *NSGA-II* et *NPGA 2*, pour les deux réseaux.

Tableau 10.1 Paramètres nécessaires pour les algorithmes *NSGA-II* et *NPGA 2* pour une population avec un seul deme

Nom du paramètre	<i>NSGA-II</i>	<i>NPGA 2</i>
Nombre de demes	1	1
Taille du deme = taille de la population	oui	oui
Fréquence de migration des individus	-	-
Nombre d'individus qui migrent	-	-
Probabilité de croisement	oui	oui
Probabilité de mutation de l'individu	oui	oui
Probabilité de mutation des bits	oui	oui
Rayon de niche (<i>NPGA 2</i>)	-	oui
Taille des tournois (<i>NPGA 2</i>)	-	oui
Nombre maximal de générations	oui	oui

10.3.1 Comparaison des résultats du *NSGA-II* et du monoobjectif pour le réseau de 100 conduites

Pour vérifier les solutions trouvées au chapitre 9, une pression minimale de 20 m est fixée et une première optimisation est lancée sur la première phase en considérant les paramètres de l'AG présentés au Tableau 10.2 et en utilisant la même distribution *a priori* Gamma ($\alpha_0 = 0.5, \beta_0 = 0.5$).

Tableau 10.2 Paramètres du NSGA-II (réseau de 100 conduites)

Nombre de demes	1
Taille du deme (ou de la population)	1 000
Fréquence de migration des individus	0
Nombre d'individus qui migrent	0
Probabilité de croisement	0,50
Probabilité de mutation de l'individu	0,50
Probabilité de mutation des bits	0,01
Nombre maximal de générations	500

Le Tableau 10.3 résume le nombre total de solutions non dominées trouvées après élimination des solutions doubles, ainsi que la valeur de la fonction coût total pour le réseau (premier objectif : coût, équation 10.1) et la valeur du déficit maximal de pression sur toutes les années (deuxième objectif : déficit de pression, équation 10.2). Il est intéressant de remarquer que la première solution trouvée est identique à celle trouvée avec l'approche monoobjectif dans le cas où aucune contrainte hydraulique n'est imposée (voir le Tableau 9.5), alors que la dernière solution est celle trouvée avec l'approche monoobjectif avec contrainte hydraulique, en imposant une pression minimale de 20 m (voir Tableau 9.13).

Tableau 10.3 Solutions non dominées pour une pression minimale de 20 m (réseau de 100 conduites)

Numéro de la solution	Premier objectif : coût (\$)	Deuxième objectif : déficit de pression (m)	Numéro de la conduite identifiée (temps de son remplacement)
1	280 891,1	0,81	Aucune
2	280 940,3	0,56	40 (35)
3	280 995,1	0,54	40 (34)
4	281 025,8	0,31	83 (34)
5	281 104,0	0,05	83 (33)
6	281 220,6	0,00	94 (32)

Le Tableau précédent indique que sur six solutions identifiées, cinq proposent une conduite pour un remplacement afin d'augmenter les pressions aux noeuds. La première solution est celle qui a la fonction coût la plus faible car aucune conduite n'est remplacée et c'est aussi celle qui donne le plus grand écart de

pression aux noeuds. La dernière solution est celle qui a la fonction coût la plus importante et qui assure que toutes les pressions aux nœuds sont au-dessus de 20 m. Puisque toutes les solutions proposent de remplacer une conduite de 100 mm de diamètre, le coût total de remplacement de chaque solution est égal à 21 947,90 \$.

La figure 10.3 montre bien que les solutions obtenues lors de la génération 50 sont moins bonnes que celles de la dernière génération et que 50 générations ne sont pas suffisantes pour s'approcher des meilleures solutions non dominées. On remarque également qu'il n'y a pas une grande différence entre les résultats à la 250^e génération et ceux à la 500^e génération.

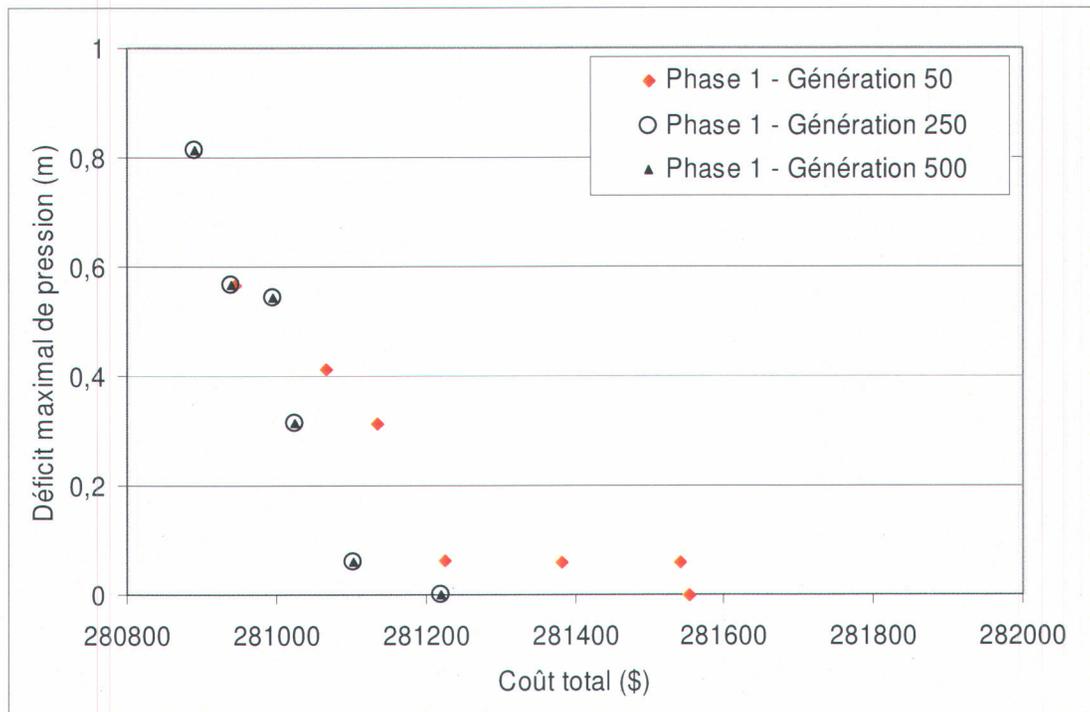


Figure 10.3 Solutions non dominées à 50, 250 et 500 générations (NSGA-II) (réseau de 100 conduites)

10.3.2 Comparaison des résultats du *NPGA 2* et du *NSGA-II* pour le réseau de 100 conduites

Pour comparer les résultats des deux algorithmes *NPGA 2* et *NSGA-II*, on a ajusté les valeurs du premier objectif qui représente la fonction coût (en divisant par 500 000) pour amener la valeur de la fonction coût dans l'intervalle entre 0 et 1 afin de choisir la valeur du rayon de niche. Pour cela on a utilisé la relation suivante pour calculer le premier objectif :

$$F'_1 = \frac{F_1}{500\,000} \quad (10.5)$$

où : F'_1 est la valeur de la fonction ajustée du premier objectif F_1 .

Pour le second objectif, on garde la même fonction car la valeur du maximum de déficit de pression varie entre 0 et 1. La figure 10.4 présente, pour un nombre maximal de 500 générations, les solutions non dominées obtenues avec trois essais effectués avec le *NPGA 2* en utilisant un tournoi à quatre individus et des rayons de niche de 0,05, 0,10 puis 0,50, ainsi que les résultats du *NSGA-II*. On voit bien que les solutions du *NPGA 2* dépendent fortement du rayon de niche. Pour le même nombre de générations, le *NSGA-II* est l'algorithme qui donne les meilleures solutions non dominées.

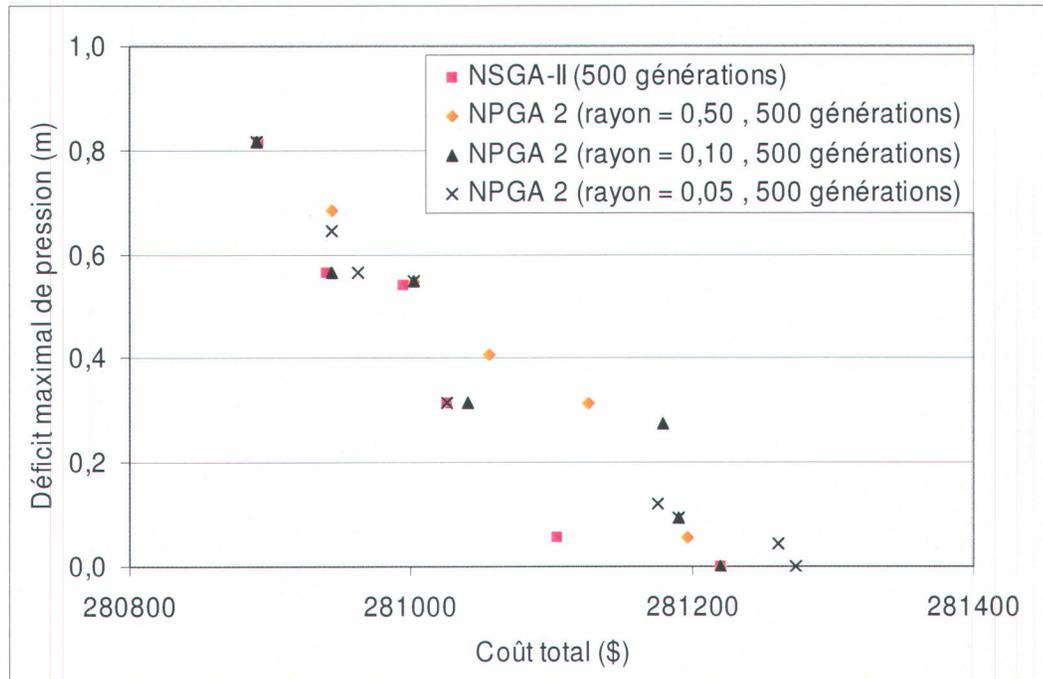


Figure 10.4 Solutions non dominées (NPGA 2 avec différents rayons de niche et NSGA-II) pour le réseau de 100 conduites

10.4 Analyse des résultats de différentes stratégies de remplacement pour les dix phases avec le NSGA-II

En utilisant le NSGA-II, on se propose dans cette partie de comparer les stratégies de remplacement définies précédemment, tout en supposant une distribution *a priori* Gamma (0,5, 0,5) pour les deux réseaux. Les quatre stratégies de remplacement sont testées.

10.4.1 Réseau de 100 conduites

On fixe une pression minimale de 20 m pour l'ensemble des nœuds du réseau à 100 conduites et on suppose un budget de remplacement de 250 000 \$/phase pour la stratégie 3 et un nombre maximal de cinq conduites pour la stratégie 4. Les Tableaux 10.4 à 10.7 présentent un résumé des résultats suite à l'application

du *NSGA-II* aux quatre stratégies définies ci-dessus. Les paramètres du *NSGA-II* utilisés sont ceux du Tableau 10.2.

10.4.1.1 Première stratégie

Une comparaison entre les résultats de la première stratégie (Tableau 10.4) et les résultats du Tableau 9.5, obtenus en considérant une approche monoobjectif, montre que les fonctions d'adaptation sont identiques aux fonctions coûts, et ce pour toutes les phases. La comparaison de cette première stratégie par rapport aux autres stratégies de remplacement montre que celle-ci conduit au plus grand déficit de pression sur toutes les phases (en moyenne 3,14 m/phase).

Tableau 10.4 Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 1 (réseau de 100 conduites)

N° phase	Nombre de conduites remplacées	Objectif 1 : fonction coût (\$)	Objectif 2 : déficit de pression (m)	Coût des remplacements (\$)	Nombre total de solutions sur le front de Pareto/numéro de la solution choisie
1	0	280 891,1	0,81	0,0	7/1
2	0	229 118,1	2,01	0,0	15/1
3	4	202 785,3	2,65	244 662,5	47/1
4	0	101 760,9	3,83	0,0	53/1
5	8	90 960,9	2,56	414 466,4	69/1
6	2	51 175,7	3,26	56 934,1	74/1
7	2	41 026,5	4,15	174 690,0	79/1
8	2	31 553,5	3,68	56 934,1	60/1
9	8	28 806,6	4,18	386 498,6	103/1
10	4	18 661,7	4,28	167 912,8	96/1
Total	30			1 502 098,9	

10.4.1.2 Deuxième stratégie

Le Tableau 10.5 indique que la seconde stratégie donne le coût total de remplacement le plus important et c'est aussi celle qui assure que toutes les pressions aux noeuds du réseau sont supérieures à la pression minimale imposée de 20 m.

Tableau 10.5 Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 2 (réseau de 100 conduites)

N° phase	Nombre de conduites remplacées	Objectif 1 : fonction coût (\$)	Objectif 2 : déficit de pression (m)	Coût des remplacements (\$)	Nombre total de solutions sur le front de Pareto/numéro de la solution choisie
1	1	281 220,6	0,00	21 947,8	6 / 6
2	2	228 769,7	0,00	43 895,7	8 / 8
3	4	198 875,3	0,00	231 624,2	29 / 29
4	6	102 919,4	0,00	211 808,6	6 / 6
5	6	70 469,4	0,00	316 526,1	20 / 20
6	4	42 660,3	0,00	113 868,3	17 / 17
7	6	35 137,5	0,00	265 853,1	23 / 23
8	4	27 815,2	0,00	231 624,2	41 / 41
9	3	21 426,6	0,00	78 882,0	39 / 39
10	6	20 099,8	0,00	239 776,4	19 / 19
Total	42			1 755 806,7	

10.4.1.3 Troisième stratégie

Les résultats de la troisième stratégie sont présentés au Tableau 10.6. Pour les phases 3, 4, 9 et 10, les solutions ayant des déficits nuls avaient toutes un coût supérieur au budget de 250 000 \$, ce qui fait que d'autres solutions respectant la contrainte budgétaire ont été sélectionnées. Pour les autres phases, toutes les solutions choisies respectent le budget et permettent d'avoir un déficit de pression nul. Pour cette stratégie, le déficit de pression sur toutes les phases est de 0,17 m/phase.

Tableau 10.6 Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 3 (réseau de 100 conduites)

N° phase	Nombre de conduites remplacées	Objectif 1 : fonction coût (\$)	Objectif 2 : déficit de pression (m)	Coût des remplacements (\$)	Nombre total de solutions sur le front de Pareto/numéro de la solution choisie
1	1	281 220,6	0,00	21 947,8	7/7
2	2	228 769,7	0,00	43 895,7	6/6
3	4	196 638,9	0,09	244 662,5	28/22
4	4	98 599,1	1,01	231 624,2	34/3
5	5	63 476,1	0,00	135 816,1	105/105
6	4	48 550,2	0,00	113 868,3	36/36
7	3	41 244,1	0,00	78 882,0	36/36
8	4	37 041,5	0,00	126 906,6	34/34
9	6	34 472,1	0,06	239 776,4	48/45
10	3	29 512,8	0,54	237 644,0	16/3
Total	36			1 475 023,6	

10.4.1.4 Quatrième stratégie

Pour la quatrième stratégie (Tableau 10.7), trois fois sur dix le nombre de conduites à remplacer a dépassé le nombre maximal de cinq conduites. La sélection de solutions respectant ce nombre maximal fait que les pressions, en certaines années, ne sont pas respectées au nœud 58. Pour cette stratégie, le déficit de pression sur toutes les phases est de 0,05 m/phase.

Tableau 10.7 Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 4 (réseau de 100 conduites)

N° phase	Nombre de conduites remplacées	Objectif 1 : fonction coût (\$)	Objectif 2 : déficit de pression (m)	Coût des remplacements (\$)	Nombre total de solutions sur le front de Pareto/numéro de la solution choisie
1	1	281 220,6	0,00	21 947,8	6/6
2	2	228 769,7	0,00	43 895,7	7/7
3	5	196 684,7	0,00	240 533,7	28/28
4	5 *	103 436,7	0,28	279 648,8	16/9
5	4	61 500,1	0,00	100 829,9	41/41
6	5	49 371,7	0,00	176 822,3	27/27
7	4	38 282,5	0,00	113 868,3	20/20
8	5 *	34 535,1	0,13	148 854,5	58/50
9	5 *	30 383,0	0,07	189 860,7	33/32
10	3	24 483,8	0,00	119 888,1	32/32
Total	39			1 436 150,3	

* : Pression non respectée au nœud 58

Pour voir l'influence des différentes stratégies sur l'état général du réseau à 100 conduites, on a tracé à la figure 10.5 le nombre total de bris enregistrés à la fin de chaque phase, (après application des décisions de remplacement et actualisation des bris sur chaque phase). La figure montre que :

- La deuxième stratégie est celle qui réduit le plus le nombre de bris. Cette stratégie est celle qui a permis de remplacer le plus de conduites (42 au total) car elle doit assurer une pression suffisante en chaque nœud du réseau, ce qui implique que plusieurs conduites sont remplacées afin de satisfaire uniquement au critère de pression minimale.
- La première stratégie est celle qui enregistre le plus de bris car c'est la stratégie qui a permis de remplacer le moins de conduites (30 conduites au total), les conduites ne sont remplacées que lorsqu'elles atteignent un nombre de bris minimal.
- La troisième et la quatrième sont des stratégies intermédiaires. Pour les premières phases, le nombre de bris pour ces deux stratégies est presque égal à celui de la deuxième stratégie mais, à partir de la cinquième phase, l'écart entre les nombres de bris devient de plus en plus important.

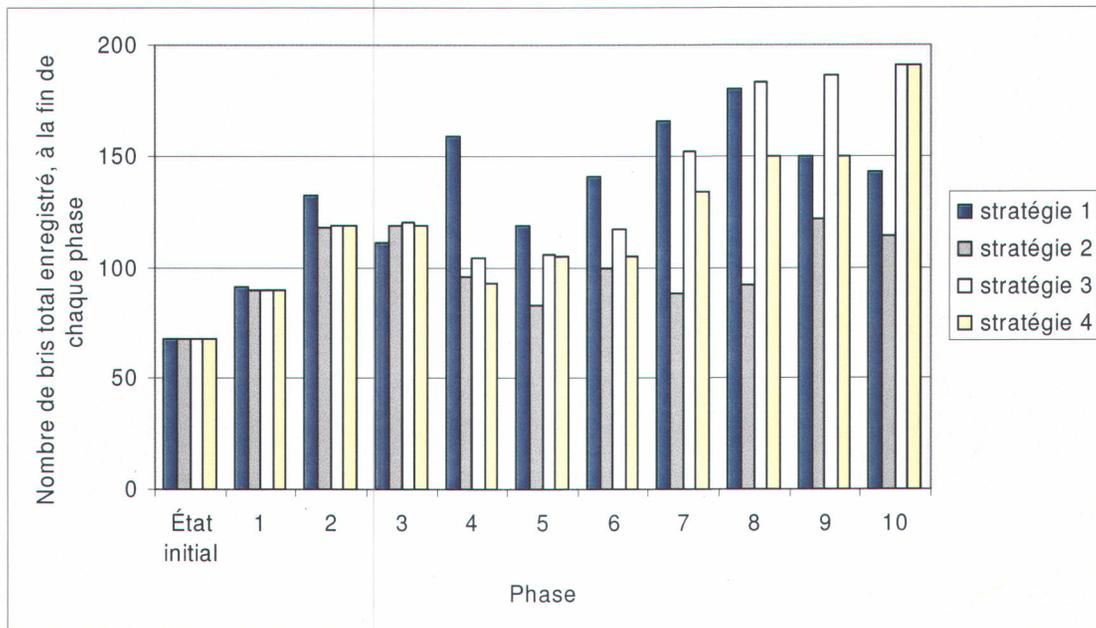


Figure 10.5 État général du réseau selon les différentes stratégies, avec une distribution *a priori* Gamma (0,50, 0,50) (réseau de 100 conduites).

10.4.2 Réseau de 250 conduites

Pour vérifier les solutions trouvées au chapitre 9, on suppose d'abord, pour les deux premières applications, que la pression minimale est fixée à 25 m pour l'ensemble des nœuds du réseau. Une première optimisation est lancée sur la première phase en considérant les paramètres de l'AG présentés au Tableau 10.8 et en utilisant la distribution *a priori* Gamma ($\alpha_0 = 0.5, \beta_0 = 0.5$). Pour ce réseau, on a augmenté la taille du deme ainsi que le nombre maximal de générations.

Tableau 10.8 Paramètres du NSGA-II (réseau de 250 conduites)

Nombre de demes	1
Taille du deme (ou de la population)	1 500
Fréquence de migration des individus	0
Nombre d'individus qui migrent	0
Probabilité de croisement	0,50
Probabilité de mutation de l'individu	0,50
Probabilité de mutation des bits	0,01
Nombre maximal de générations	3 000

10.4.2.1 Première stratégie

La figure 10.6 présente, pour un nombre maximal de 1 000, 2 000 et 3 000 générations, les solutions non dominées obtenues pour le réseau de 250 conduites.

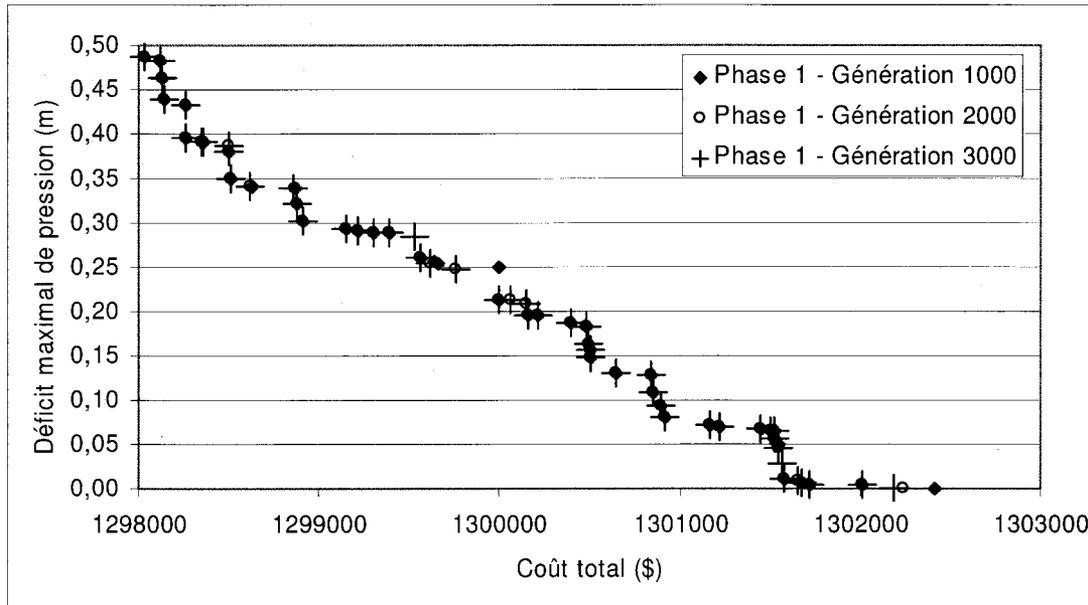


Figure 10.6 Solutions non dominées à 1 000, 2 000 et 3 000 générations (NSGA-II) (réseau de 250 conduites, phase 1)

Le Tableau 10.9 présente un résumé des résultats obtenus pour la première stratégie de remplacement. Une comparaison avec les résultats du Tableau 9.9 montre que, jusqu'à la 6^e phase, les fonctions d'adaptation sont identiques aux valeurs de la fonction coût (colonne 3 du Tableau 10.9). À la 7^e phase, la valeur de la fonction coût trouvée (469 362,0) est inférieure à la valeur de la fonction d'adaptation (469 362,4); les mêmes numéros de conduites sont identifiés mais le temps de remplacement de la 115^e conduite est cette fois-ci égal à 62 ans. L'approche multiobjectif arrive à identifier la solution exacte. Cette première stratégie donne en moyenne 1,20 m de déficit de pression et coûte 4,02 millions de dollars.

Tableau 10.9 Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 1 (réseau de 250 conduites)

N° phase	Nombre de conduites remplacées	Objectif 1 : fonction coût (\$)	Objectif 2 : déficit de pression (m)	Coût des remplacements (\$)	Nombre total de solutions sur le front de Pareto/numéro de la solution choisie
1	0	1 298 031,8	0,48	0	53/1
2	0	1 080 304,2	0,71	0	123/1
3	1	955 305,2	0,93	108 084,0	436/1
4	5	799 794,0	1,00	418 641,6	988/1
5	2	596 927,6	1,19	126 344,7	1130/1
6	7	554 774,6	1,34	517 563,1	835/1
7	6	469 362,0	1,54	561 031,1	1234/1
8	10	368 147,5	1,59	905 054,7	939/1
9	10	279 017,6	1,58	783 611,7	1194/1
10	7	228 178,8	1,70	608 561,5	1062/1
Total	48		12,06	4 028 892,8	

10.4.2.2 Deuxième stratégie

Pour la seconde stratégie, l'approche multiobjectif appliquée à la première phase a permis de produire plusieurs solutions avec des déficits de pressions nuls ou presque nuls; le Tableau 10.10 résume les valeurs des cinq meilleures solutions trouvées :

Tableau 10.10 Certaines solutions non dominées identifiées à la première phase (stratégie 2, réseau de 250 conduites avec pression minimale de 25 m)

N° de la solution	Nombre de conduites remplacées	Objectif 1 : fonction coût (\$)	Objectif 2 : déficit de pression (m)	Coût des remplacements (\$)	Numéro de la conduite remplacée (temps de remplacement)
53	5	1 302 241,0	0,000	360 773,6	19(31),28(32),31(34), 51(33),223(35)
52	5	1 302 015,8	0,004	360 773,6	19(31),28(32),31(34), 51(33),63(35)
51	6	1 301 755,0	0,005	409 479,0	19(31),28(32),31(34), 51(33),63(35),223(35)
50	5	1 301 671,7	0,005	360 773,6	19(31),28(31),31(33), 51(34),63(35)
49	5	1 301 657,8	0,007	360 773,6	19(31),28(32),31(33), 40(31),51(35)

Le Tableau 10.11 résume, pour les dix phases, le nombre de conduites remplacées pour la deuxième stratégie qui tient compte des aspects structural et hydraulique. Le coût total de remplacement des conduites est de 9,34 millions de dollars, soit plus du double du coût de la 1^{re} stratégie.

Tableau 10.11 Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 2 (réseau de 250 conduites avec pression minimale de 25 m)

N° phase	Nombre de conduites remplacées	Objectif 1 : fonction coût (\$)	Objectif 2 : déficit de pression (m)	Coût des remplacements (\$)	Nombre total de solutions sur le front de Pareto/numéro de la solution choisie
1	5	1 302 241,0	0,00	360 773,6	53/53
2	6	1 052 683,8	0,00	528 236,3	155/155
3	14	785 740,5	0,00	1 095 680,0	295/295
4	5	527 955,5	0,00	595 318,3	171/171
5	10	426 888,3	0,00	780 926,0	508/508
6	14	342 168,2	0,00	1 248 742,7	404/404
7	11	225 694,8	0,00	891 695,8	292/292
8	9	164 804,8	0,00	913 042,2	266/266
9	13	137 631,5	0,00	1 137 973,0	349/349
10	21	106 820,8	0,00	1 791 379,2	593/593
Total	108		0,00	9 343 767,4	

10.4.2.3 Influence de la pression minimale imposée aux noeuds

La valeur de la pression minimale a aussi une très grande influence sur le nombre de solutions produites à chaque phase. En fixant une pression minimale de 25 m, le Tableau 10.10 nous a montré qu'à la première phase, il fallait remplacer cinq à six conduites pour satisfaire le critère de pression. En abaissant cette pression à 24 m, le Tableau 10.12 indique qu'avec une telle pression, aucune conduite n'est remplacée durant cette première phase.

Les résultats du Tableau 10.12 montrent également que durant les quatre premières phases, aucune conduite n'est remplacée à cause du critère de pression. La taille du deme et le nombre maximal de générations pour cet essai ont été fixés respectivement à 500 et 2 000.

Tableau 10.12 Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 2 (réseau de 250 conduites avec pression minimale de 24 m)

N° phase	Nombre de conduites remplacées	Objectif 1 : fonction coût (\$)	Objectif 2 : déficit de pression (m)	Coût des remplacements (\$)	Nombre total de solutions sur le front de Pareto/numéro de la solution choisie
1	0	1 298 031,8	0,00	0,0	1/1
2	0	1 080 304,2	0,00	0,0	1/1
3	1	955 305,2	0,00	108 084,0	1/1
4	5	799 795,8	0,00	418 641,6	3/3
5	9	597 103,2	0,00	496 216,6	155/155
6	10	516 991,6	0,00	900 858,3	229/229
7	8	374 846,3	0,00	982 809,8	35/35
8	9	294 404,5	0,00	765 351,0	108/108
9	15	226 773,8	0,00	1 148 581,7	232/232
10	10	148 793,2	0,00	783 611,7	222/222
Total	67		0,00	5 604 154,7	

10.4.2.4 Troisième stratégie

Pour cette stratégie, on garde une pression minimale de 24 m, le Tableau 10.13 résume pour les dix phases le nombre de conduites remplacées lors de l'application du NSGA-II à la troisième stratégie qui tient compte du budget de remplacement. Un budget maximal de 1 000 000 \$ a été fixé par phase pour ce réseau. La pression au nœud 134 est légèrement en dessous de 24 m, à la phase 8 et 9, et le déficit total de pression n'est que de 0,06 m pour cette troisième stratégie, le coût total de remplacement est de 5,5 millions de dollars.

Tableau 10.13 Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 3 (réseau de 250 conduites avec pression minimale de 24 m)

N° phase	Nombre de conduites remplacées	Objectif 1 : fonction coût (\$)	Objectif 2 : déficit de pression (m)	Coût des remplacements (\$)	Nombre total de solutions sur le front de Pareto/numéro de la solution choisie
1	0	1 298 031,8	0,00	0,0	1/1
2	0	1 080 304,2	0,00	0,0	1/1
3	1	955 305,2	0,00	108 084,0	1/1
4	5	799 795,8	0,00	418 641,6	5/5
5	10	597 100,1	0,00	573 856,0	168/168
6	11	511 513,1	0,00	920 629,8	118/118
7	6	377 445,4	0,00	706 088,1	14/14
8	10 *	303 076,3	0,01	990 681,6	91/85
9	9 *	210 503,1	0,05	947 347,7	324/214
10	12	148 540,8	0,00	847 892,2	246/246
Total	64		0,06	5 513 221	

* : Pression en dessous de 24 m, au nœud 134

10.4.2.5 Quatrième stratégie

Le Tableau 10.14 résume, pour les dix phases, le nombre de conduites remplacées lors de l'application du NSGA-II à la quatrième stratégie. Un nombre maximal de dix conduites est supposé. Pour ce réseau, une fois sur dix, le nombre de conduites à remplacer, déterminé par les différentes solutions, dépasse les dix conduites. Pour ce cas, la solution donnant le déficit de pression nul est choisie par défaut. Pour cette stratégie, le total du déficit de pression est de 0,13 m et le coût total de remplacement est de 5,9 millions de dollars.

Tableau 10.14 Nombre de conduites remplacées telles qu'identifiées par la stratégie 4 (réseau de 250 conduites avec pression minimale de 24 m)

N° phase	Nombre de conduites remplacées	Objectif 1 : fonction coût (\$)	Objectif 2 : déficit de pression (m)	Coût des remplacements (\$)	Nombre total de solutions sur le front de Pareto /numéro de la solution choisie
1	0	1 298 031,8	0,00	0,0	1/1
2	0	1 080 304,2	0,00	0,0	1/1
3	1	955 305,2	0,00	108 084,1	1/1
4	5	799 795,8	0,00	418 641,6	5/5
5	7	597 082,7	0,00	369 871,8	144/144
6	10 *	531 390,1	0,01	903 544,1	303/282
7	10 *	399 660,6	0,09	1 022 301,3	100/35
8	8	277 148,7	0,00	891 811,5	66/66
9	19 **	206 606,6	0,00	1 459 139,2	217/217
10	10 *	124 850,0	0,03	783 611,7	220/189
Total	70		0,13	5 957 005	

* : Solution respectant le nombre maximal de remplacement mais le déficit de pression n'est pas nul

** : Solution avec déficit de pression nul, choisie par défaut car aucune des solutions ne respecte le nombre maximal de remplacements

Pour le réseau à 250 conduites et une pression minimale imposée de 24 m, on remarque qu'il n'y a pas une grande différence entre les coûts de remplacement des stratégies 2, 3 et 4, néanmoins la deuxième stratégie est préférable car, d'un point de vue hydraulique, c'est la stratégie qui assure un déficit de pression nul. La première stratégie est celle qui a permis de remplacer le moins de conduites (48 au total). La troisième stratégie semble meilleure que la quatrième car, avec un coût de 5,5 millions et 64 conduites remplacées, le déficit de pression n'est que de 0,06 m.

10.5 Discussion et conclusion

Ce chapitre a d'abord permis de comparer la performance de deux algorithmes multiobjectifs, le *NPGA 2* et le *NSGA-II*, avec les résultats obtenus au chapitre 9 où l'on avait utilisé une approche monoobjectif qui intègre une fonction de pénalité. Les deux algorithmes ont été testés sur la première phase avec un

réseau de 100 conduites. Les résultats ont montré que, pour un même nombre de générations, le *NSGA-II* donne de meilleures solutions non dominées alors que le *NPGA 2* donne des solutions qui dépendent de la valeur du rayon de niche considérée. L'approche multiobjectif a permis d'identifier les deux solutions trouvées avec l'approche monoobjectif (solution avec et sans contrainte hydraulique), ainsi que plusieurs autres solutions, et ce en un seul essai. Une analyse de sensibilité aux nombres de générations a également été réalisée afin de fixer le nombre maximal de générations pour chaque réseau.

Une fois que la supériorité du *NSGA-II* a été démontrée sur une phase, l'algorithme a été utilisé pour tester différentes stratégies de remplacement sur plusieurs phases, pour les deux réseaux. Les résultats des différents essais ont montré que plus la taille du réseau est grande, plus le temps d'exécution augmente. Par exemple, pour le réseau de 100 conduites avec les valeurs des paramètres du Tableau 10.2, le temps d'exécution ne dépasse pas les 15 minutes par phase, alors que pour le réseau de 250 conduites avec les valeurs des paramètres du Tableau 10.8, le temps d'exécution atteint près de quatre heures par phase (4 secondes par génération). Notons cependant que ce temps de calcul évalué en heures est tout à fait négligeable par rapport à la durée de la phase de 5 ans. Les résultats des tests effectués ont aussi montré que la valeur de la pression minimale imposée aux nœuds a également une influence sur le nombre de solutions produites sur le front de Pareto, à chaque phase. Les données de chaque réseau de distribution conditionnent énormément les temps d'exécution du modèle ainsi que le nombre de solutions sur chaque front.

L'approche multiobjectif a permis de tester et d'évaluer, d'un point de vue monétaire, l'impact des différentes stratégies de remplacement à long terme. Pour les historiques de bris testés et générés aléatoirement, les résultats ont montré que si le gestionnaire disposait d'un budget assez élevé, la deuxième stratégie lui serait recommandée. Le taux de remplacement (c'est-à-dire le

nombre de conduites remplacées par rapport au nombre total de conduites du réseau) est de 42 % pour le réseau à 100 conduites et de 26,8 % pour le réseau à 250 conduites, sur une période de 50 ans, ce qui représente moins d'une conduite remplacée par année. Entre minimiser les coûts totaux de remplacement et améliorer l'état structural et hydraulique du réseau subsistera toujours un compromis.

11. CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

11.1 Conclusion générale

L'objectif de cette étude était de développer un prototype pour la planification des interventions en réseau, basée sur une inférence bayésienne, qui tienne compte de la détérioration de l'intégrité structurale et de la capacité hydraulique des conduites dans un réseau de distribution en eau. Le modèle proposé intègre à la fois une analyse sur de petites périodes (appelées phases), pour lesquelles la stratégie d'intervention est élaborée sur cinq ans, et une analyse sur de longues périodes qui présente l'intérêt d'incorporer le maximum d'information et d'actualiser l'information sur l'état du réseau au fur et à mesure que ces informations deviennent disponibles. Le modèle développé considère, en même temps, la détérioration et le processus d'intervention mis en place. Pour simplifier l'étude, nous avons supposé que la seule option envisageable pour améliorer l'état du réseau est le remplacement d'une conduite par une autre conduite de caractéristiques identiques, qu'aucune expansion de réseau ne sera réalisée et que les demandes aux nœuds des consommateurs restent constantes durant toute la période d'analyse.

Pour montrer l'importance de la valeur de l'information relative au nombre de bris enregistrés par chaque conduite en fonction du temps, un modèle de bris avec des paramètres initiaux connus est en premier lieu supposé. Puis une approche bayésienne (AB) est appliquée et testée afin de retrouver les paramètres de ce modèle de bris. Le modèle de bris utilisé dans cette étude, Weibull-Exponentiel, considère les durées entre les bris comme des variables aléatoires, décrites par des fonctions de densité de probabilité de Weibull et exponentielle.

Dans cette thèse, l'AB est utilisée uniquement pour déduire une distribution *a posteriori* des paramètres du modèle de bris, à partir des distributions *a priori* sur les paramètres et des observations issues du modèle de bris. Le théorème de

Bayes qui est à la base de l'AB a montré comment il était possible de passer d'une information *a priori* sur les paramètres du modèle de bris, plus ou moins précise, à une estimation *a posteriori* assez précise, en combinant toutes les informations qui provenaient des données du réseau de distribution. Pour les deux paramètres de la distribution Weibull, des distributions *a priori* uniformes sont supposées et pour le paramètre de la distribution exponentielle, une distribution Gamma est considérée. Pour chaque ordre de bris variant entre deux et dix, une même distribution *a priori* Gamma est supposée pour le paramètre de la distribution exponentielle.

Pour les paramètres des distributions exponentielles, le choix d'une Gamma comme distribution *a priori* a permis de résoudre analytiquement l'intégrale du dénominateur et a montré que la distribution *a posteriori* est aussi une Gamma mais de paramètres différents. Pour les paramètres de la distribution Weibull, le choix des distributions *a priori* uniformes a montré que pour des réseaux d'une centaine de conduites et plus, le calcul numérique de l'intégrale du dénominateur pouvait causer problème à cause des précisions recherchées ; le logiciel *Mathematica* a donc été utilisé pour la représentation graphique des distributions *a posteriori* et l'estimation de la moyenne *a posteriori* des deux paramètres de la Weibull. Le calcul du maximum de la distribution *a posteriori* a quant à lui été facilement estimé avec une méthode numérique.

L'utilisation de la moyenne des distributions *a posteriori* comme indicateur des valeurs de paramètre ne semble pas recommandée puisqu'on a vu que la moyenne tend à surestimer les valeurs des paramètres initiaux. La valeur la plus probable de ces distributions a donc été utilisée comme estimateur des paramètres du modèle de bris.

Les différents essais réalisés sur la taille du réseau (47, 100 et 534 conduites) ont montré que plus la taille du réseau de distribution augmentait, plus la

distribution *a posteriori* du paramètre de la distribution exponentielle pour le deuxième bris se concentrait autour de la valeur initiale recherchée.

L'analyse de sensibilité par rapport au choix des paramètres de la distribution *a priori* Gamma s'est limitée à la perturbation d'une des valeurs des paramètres de la distribution *a priori*. Les résultats ont montré que, pour un réseau de grande dimension (534 conduites), les variations des valeurs *a posteriori* sont moins importantes par rapport aux variations des valeurs *a priori* et que plus le nombre d'années augmentait, plus l'influence de la distribution *a priori* devenait négligeable.

L'étude de l'influence du nombre d'années sur les distributions *a posteriori* des paramètres du modèle de bris, pour un réseau à 534 conduites, a montré que plus la quantité d'information (nombre de conduites ayant subi des bris et temps d'occurrence des bris) était élevée, plus le rôle de la distribution *a priori* devenait négligeable.

Une fois que l'AB ait été testée et vérifiée puis qu'elle ait permis d'estimer les valeurs des paramètres initiaux, elle a été intégrée au modèle de planification des interventions en réseau. L'AB permet d'estimer les paramètres du modèle de bris jusqu'à un ordre de bris limite qui est fonction du nombre maximal de bris enregistrés sur chaque conduite pour chaque réseau de distribution. Ces paramètres sont ensuite utilisés pour calculer un nombre moyen probable de bris sur chaque intervalle d'un an, pour chaque conduite. Le nombre moyen de bris est estimé à partir des probabilités conditionnelles d'occurrence des bris. On estime pour chaque conduite qui a subi un k ($k \geq 1$) bris, avant le temps présent, la probabilité d'avoir un $(k+1)^e$ bris, un $(k+2)^e$ bris, etc. L'utilisation du nombre de bris comme indicateur pour l'évaluation du nombre moyen de bris permet une meilleure estimation des coûts futurs de réparation de bris.

Une fonction coût total est ensuite utilisée à l'échelle du réseau. Cette fonction regroupe le coût de remplacement, le coût de réparation des bris jusqu'au temps présent et le coût futur de réparation des bris calculé à partir du nombre moyen de bris estimés entre le temps présent et le temps de remplacement de la conduite.

Le problème d'optimisation des coûts totaux a été abordé avec un AG. Pour chaque phase, la fonction coût développée à l'échelle du réseau est minimisée à l'aide d'un AG en îlots implanté dans l'outil *Open-Beagle*. Le modèle développé est capable d'identifier, à chaque phase, la conduite qui doit être remplacée dans le réseau de distribution et le moment de son remplacement de telle sorte que la valeur présente des coûts totaux de réparation des bris et de remplacement soit minimale, en considérant trois contraintes hydrauliques : l'équation de la conservation de la masse, l'équation de la conservation de l'énergie et l'équation de contrainte de pression minimale.

Pour résoudre le problème hydraulique, le simulateur (Epanet 2.0) a été intégré dans le modèle développé. Ce simulateur a pour objectif de résoudre les deux premières contraintes hydrauliques. Pour évaluer les variations du coefficient de Hazen-Williams en fonction du temps, le modèle de détérioration de la capacité hydraulique développé par Sharp et Walski (1988), déjà utilisé par Kleiner *et al.* (1998a, b), est intégré à notre modèle. Puis, à la fin de chaque phase, les décisions de remplacer les conduites sont appliquées et les historiques de bris sont actualisés. Un processus de mise à jour de l'information est intégré, ce qui permet d'actualiser l'information sur le nombre de bris enregistrés par toutes les conduites du réseau sur une période de cinq ans, permettant de la sorte une meilleure estimation des paramètres du modèle de bris.

Le problème d'optimisation des coûts totaux a été résolu avec deux approches différentes. La première approche, classique, aborde le problème sous forme monoobjectif avec une contrainte de pression minimale à satisfaire.

L'inconvénient majeur de cette approche est la nécessité de régler à chaque phase, pour chaque réseau étudié, le coefficient de la fonction pénalité. La seconde approche, basée sur une approche d'optimisation multiobjectif (AOM), considère la contrainte de pression minimale comme second objectif.

Dans la première partie de l'approche monoobjectif, qui n'inclut que l'aspect structural, les résultats de l'optimisation ont montré qu'en général, l'AG-générationnel avec demes utilisé a permis d'identifier les conduites qui ont subi le plus de bris, pour les deux tailles de réseau. Une analyse de sensibilité par rapport aux paramètres de l'AG a été réalisée et les résultats des différents tests ont montré que le nombre d'individus qui participent à un tournoi peut avoir une grande influence sur la vitesse de convergence vers la meilleure solution. Les résultats ont aussi montré qu'un plus grand réseau nécessite un plus grand nombre de demes, avec beaucoup plus d'individus, et un très grand nombre de générations afin d'obtenir des solutions se rapprochant de l'optimum.

Une fois les paramètres de l'AG fixés, l'application du modèle a permis d'identifier, à chaque phase, un nombre variable de conduites à remplacer ainsi que les numéros de conduites et les dates de remplacement. Les tests effectués ont montré que les résultats de l'approche monoobjectif sans contraintes sont satisfaisants pour le réseau à 100 conduites, et que pour le réseau à 250 conduites, plusieurs essais sont nécessaires avant de retrouver les bons résultats. Les résultats de cette première partie ont été validés avec une méthode numérique.

La distribution *a priori* choisie a aussi un rôle non négligeable sur les décisions de remplacement. Les différents choix des distributions *a priori* ont montré que le nombre minimal de bris enregistrés par les conduites remplacées pouvait dépendre de la distribution *a priori*. Puisque le rôle de la distribution *a priori* est hautement significatif, durant les premières phases, cette distribution doit être choisie avec prudence surtout pour les réseaux de petite taille. Les résultats ont

aussi confirmé que lorsque le nombre de phases augmente, les valeurs estimées des paramètres des distributions exponentielles tendent vers les valeurs réelles.

Dans la deuxième partie, l'approche classique monoobjectif avec une contrainte de pression minimale a été testée sur le réseau à 100 conduites pour les dix phases. Chaque solution proposée par l'AG a été testée avec le simulateur hydraulique afin de vérifier la faisabilité de la solution. Les différents essais effectués ont montré que le coefficient de la fonction pénalité a un grand impact sur la solution choisie par l'AG. Le coefficient de pondération doit être choisi avec précaution pour chaque réseau étudié. D'autres essais ont montré que la valeur de la pression minimale imposée aux différents nœuds a un rôle non négligeable et a une grande influence sur les décisions de remplacement. Plus les pressions minimales imposées aux nœuds sont sévères, plus le nombre de conduites à remplacer est important. La solution choisie par l'AG dépend du coefficient de pondération. La formulation classique à un seul objectif semble être plus efficace lorsque la taille du réseau ne dépasse pas la centaine de conduites. En effet, dans la plupart des essais pour le réseau à 100 conduites, il a été plus facile d'identifier les bonnes conduites à remplacer et leur temps de remplacement que pour le réseau à 250 conduites.

Pour éliminer le réglage du coefficient de la fonction pénalité à chaque phase, l'AOM a été développée puis utilisée pour tester différentes stratégies de remplacement et évaluer le coût des remplacements à long terme. Dans cette approche, un ensemble de solutions Pareto optimales est généré à chaque phase puis, pour passer d'une phase à l'autre, une seule solution est choisie et appliquée. Le choix de la décision dépend bien évidemment de la préférence du gestionnaire du réseau.

L'application de l'algorithme *NPGA 2* pour résoudre le problème multiobjectif a montré la limite de cet algorithme puisque les solutions obtenues dépendent de la valeur du rayon de niche considérée. La supériorité de l'algorithme *NSGA-II*

est confirmée à plusieurs reprises par nos travaux. L'utilisation du *NSGA-II* a permis de comparer les résultats des quatre stratégies de remplacement testées et de démontrer que la seconde stratégie, qui tient compte des aspects structural et hydraulique, est préférable aux autres puisque c'est la stratégie qui nous assure un déficit de pression nul et qui donne un coût de remplacement raisonnable vu la durée totale des phases considérées.

Les tests réalisés avec les deux réseaux ont montré que les données de chaque réseau de distribution (comme la taille du réseau et la pression minimale imposée aux nœuds) conditionnent énormément les temps d'exécution du modèle développé ainsi que le nombre de solutions produites sur chaque front de Pareto.

Bien que le problème d'optimisation ait été résolu avec une approche monoobjectif avec contraintes et avec une AOM, on encourage l'utilisation de l'AOM car celle-ci est relativement plus flexible et apporte un plus grand avantage puisqu'elle fournit en un seul essai un ensemble de solutions qui représentent le front Pareto et qu'elle permet aussi à tout gestionnaire de choisir la solution qui lui semble la plus appropriée. L'AG multiobjectif est celui que nous recommandons à cause de la nature multiobjectif du problème de remplacement des conduites et aussi parce que cet algorithme est basé sur des populations d'individus; il est donc très bien adapté pour résoudre des problèmes de grande dimension.

L'applicabilité et l'utilisation des AGs (générationnel et *NSGA-II*) à d'autres systèmes de distribution ne devrait pas être très compliquée. La tâche qui semble peut-être la plus complexe et qui demande le plus de temps est reliée au choix des paramètres à donner aux algorithmes, qui généralement s'effectue par essai et erreur.

Le modèle de planification des interventions développé pourrait être très utile sur tout réseau de distribution d'eau potable pour identifier un plan d'intervention, sur une période quinquennale, à condition d'avoir une bonne quantité d'information. Différents historiques de bris probables peuvent être générés, puis analysés. Ceci permettrait à tout gestionnaire de tester différentes stratégies de remplacement et d'estimer les coûts des différentes décisions.

11.2 Contributions originales

Les contributions de cette thèse peuvent être résumées comme suit :

1. Le développement du modèle pour la planification des interventions dans les réseaux de distribution de grande dimension : le modèle développé est capable d'identifier le numéro de la conduite qui doit être remplacée, ainsi que son temps de remplacement, de telle sorte que toutes les contraintes du système soient satisfaites. Les résultats obtenus ont été validés à différents niveaux puisque le modèle a été testé sur des réseaux de distribution pouvant atteindre 250 conduites.
2. La méthodologie choisie pour résoudre le problème du remplacement des conduites : l'approche proposée permet de considérer simultanément la détérioration et la stratégie d'intervention mise en place dans le réseau, sur une longue période d'analyse. La subdivision de cette période en plusieurs phases avait pour but de se rapprocher de la situation réelle où les interventions s'effectuent à des intervalles fixes. Les phases de planification utilisées de cinq ans permettent de planifier les interventions tout en tenant compte des budgets alloués sur chaque phase quinquennale.
3. Le modèle de bris utilisé pour modéliser l'évolution du nombre de bris est différent de celui qu'on trouve dans le modèle de Kleiner *et al.* (1998a, b) ou Halhal *et al.* (1997; 1999a, b) : le modèle choisi est un modèle probabiliste dans lequel les intervalles entre les temps des différents bris sont des variables aléatoires décrites par des fonctions de distribution de

probabilité. Le nombre moyen de bris estimés pour chaque conduite, dépend du nombre de bris enregistrés par cette même conduite.

4. L'intégration d'une approche bayésienne pour l'identification des paramètres du modèle de bris testé : cette approche a montré comment on pouvait passer d'une distribution *a priori* sur les paramètres plus ou moins précise, à une nouvelle distribution *a posteriori* qui intègre toutes les informations apportées par les observations. Cette approche permet de réviser, d'une part, les probabilités à chaque fois que de nouvelles observations d'occurrence de bris surviennent et d'améliorer, d'autre part, l'estimation des paramètres du modèle de bris.
5. La cinquième contribution est liée au rassemblement des différents éléments suivants pour résoudre le problème de la minimisation des coûts des interventions en réseau : 1) intégration d'un modèle de bris probabiliste pour estimer le nombre moyen de bris; 2) estimation des paramètres d'un modèle de bris par l'approche bayésienne; 3) formulation du problème d'optimisation avec deux objectifs, la minimisation du coût total et la minimisation du déficit de pression; 4) intégration de l'outil *Open-Beagle-GA* développé en C++ (Gagné et Parizeau, 2004) pour résoudre le problème; 5) utilisation du simulateur hydraulique Epanet 2.0 qui demeure l'un des outils les plus cités par la communauté scientifique dans l'analyse des réseaux de distribution et 6) intégration du modèle de Sharp et Walski (1988) pour l'extrapolation des valeurs du coefficient de Hazen Williams dans le futur.

Le résultat obtenu est un ensemble de solutions Pareto optimales, ce qui permet aux gestionnaires de réseaux de distribution de choisir la solution la plus adaptée. L'évaluation de la performance du front de Pareto obtenu avec *NSGA-II* a été vérifiée en comparant le résultat avec un autre algorithme multiobjectif (*NPGA 2*).

6. Enfin, la contribution la plus importante est le développement d'un modèle qui pourra être testé sur des réseaux de distribution réels dans un futur rapproché. D'autres modèles de bris doivent toutefois être intégrés pour

que les utilisateurs puissent sélectionner le modèle de bris qui s'ajuste le mieux à leurs données réelles. Le développement de ce modèle devra être poursuivi afin d'étudier toute la partie d'analyse de sensibilité des résultats aux paramètres des différents modèles qui composent le modèle développé.

11.3 Recommandations

Concernant les données utilisées dans cette étude, la plupart d'entre elles ont été générées aléatoirement, alors que d'autres ont été prises des références bibliographiques rapportées par certains auteurs. Puisque le modèle proposé n'a été testé que sur des systèmes hypothétiques, la recommandation première pour les travaux futurs serait de tester ce modèle avec des données « plus réalistes » en considérant d'autres topologies de réseaux.

La seconde recommandation concerne le choix de l'AG. Durant toute cette étude, un AG avec des chaînes de bits a été employé. Le modèle développé peut être amélioré en utilisant un AG en nombres réels, évitant ainsi l'étape du codage et de décodage des chaînes de bits.

Enfin, cette recherche ne représente que la fondation pour le développement d'autres modèles pour la planification des interventions en réseau. Le modèle développé pourra être amélioré en incluant d'autres modules, comme par exemple :

- Un module d'estimation des coûts unitaires de remplacement et de réparation des bris plus précis. Ce module devra tenir compte du matériau de la conduite remplacée et des coûts indirects liés à la position de la conduite dans le réseau puisque, en cas de bris, les dégâts occasionnés par une conduite alimentant un immeuble (ou un hôpital) qui passe par une rue principale sont plus importants que ceux provoqués par une

conduite qui alimente une maison individuelle et qui se trouve dans une rue secondaire.

- Dans notre étude, on a supposé que toutes les conduites sélectionnées pour un remplacement sont substituées par des conduites de même diamètre et de même matériau. Un module qui tient compte de la variation du diamètre de la conduite remplacée peut être envisagé. Néanmoins, ce module devra tenir compte des contraintes pratiques comme les limites de vitesse d'écoulement et les variations des diamètres entre deux conduites voisines.
- Un module qui tient compte de l'option de réhabilitation des conduites.
- La contrainte de pression minimale utilisée dans cette recherche évalue l'amplitude de la plus sévère insuffisance de pression par rapport à la pression demandée sur toutes les années. Cette contrainte peut être améliorée en considérant, par exemple, une valeur moyenne qui tient compte de l'insuffisance de pression par rapport à la pression demandée pour tous les nœuds du réseau et pour toutes les années. Ceci permettra de tenir compte de la variabilité des pressions de tous les nœuds du réseau.
- L'analyse proposée considère que toutes les demandes aux nœuds des consommateurs restent constantes tout au long des années. Un autre module pourra tenir compte de l'incertitude liée à l'estimation des demandes à long terme.
- Un module qui utilise la simulation Monte Carlo pour générer plusieurs historiques de bris (des centaines) peut être incorporé. Ce module permettra de voir la distribution des coûts et aussi d'évaluer et d'analyser les différentes décisions issues de chaque historique de bris.
- L'AOM n'a été testée qu'avec deux objectifs; on pourra penser à inclure les coûts de remplacement des conduites (ou le déficit par rapport au budget de remplacement) comme troisième objectif.
- Et enfin, un module décisionnel qui permet de comparer, d'un point de vue pratique, une solution non dominée par rapport à une autre solution non

dominée. Par exemple, supposons deux solutions, une qui propose de remplacer deux conduites voisines à un coût C_1 , et une autre solution qui propose de remplacer deux conduites distantes de plusieurs kilomètres à un coût C_2 légèrement inférieur à C_1 . Bien que le coût de la seconde solution soit inférieur à la première solution, il est plus avantageux de choisir la première solution car, d'un point de vue pratique, effectuer des travaux de remplacement en un même endroit a pour avantage de réduire les coûts indirects. Le choix d'une solution appropriée peut dépendre de plusieurs autres critères qui ne sont pas forcément inclus dans l'AOM. D'autres critères doivent être pris en considération, par exemple la possibilité de réaliser des travaux en même temps que des travaux sont effectués sur d'autres réseaux ou lors de la réfection des routes.

ANNEXE A
ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE DE BRIS PAR
INFÉRENCE BAYÉSIENNE - APPLICATION À UN RÉSEAU
HYPOTHÉTIQUE (suite)

ANNEXE A : ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE DE BRIS PAR INFÉRENCE BAYÉSIENNE - APPLICATION À UN RÉSEAU HYPOTHÉTIQUE (suite)

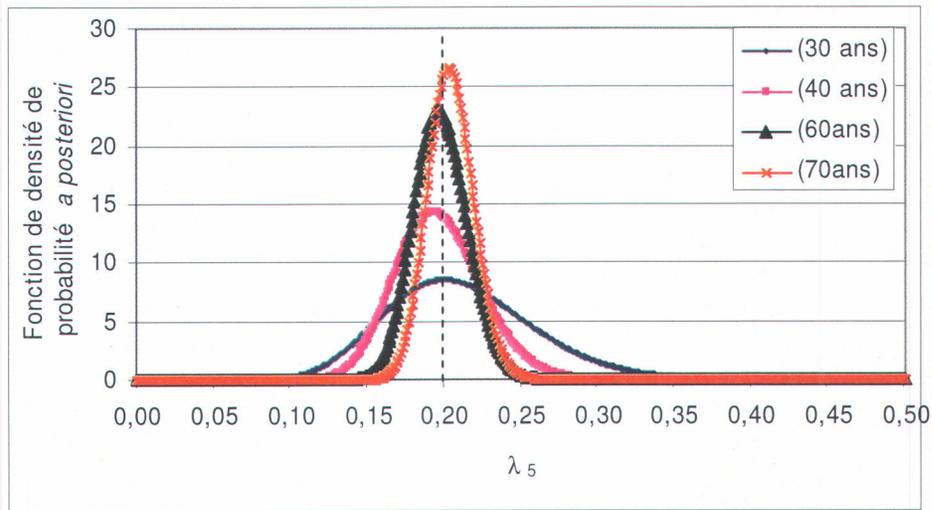


Figure A.1 Distribution *a posteriori* du paramètre λ_5 , la ligne en pointillé représente la valeur réelle de 0,20

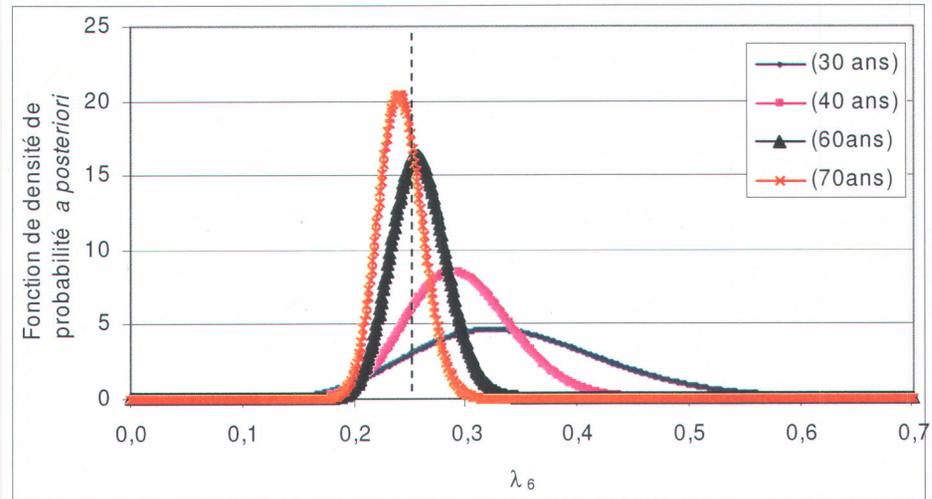


Figure A.2 Distribution *a posteriori* du paramètre λ_6 , la ligne en pointillé représente la valeur réelle de 0,25

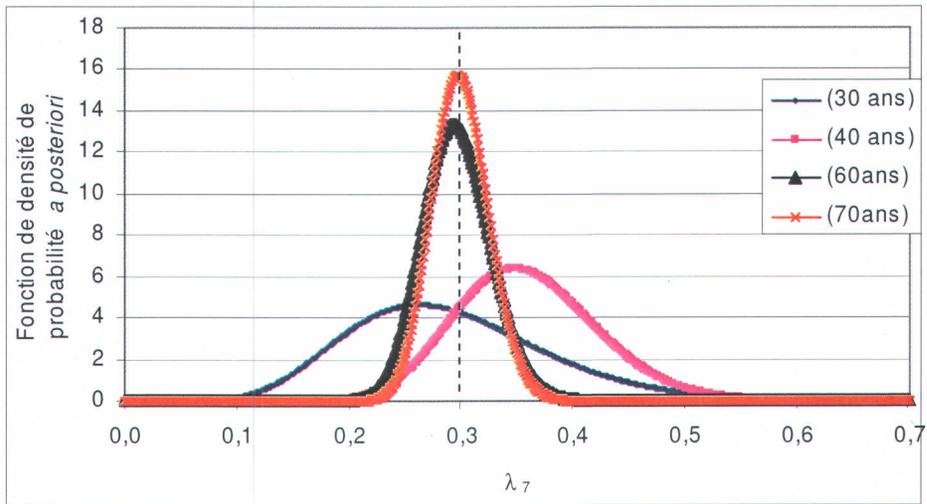


Figure A.3 Distribution *a posteriori* du paramètre λ_7 , la ligne en pointillé représente la valeur réelle de 0,30

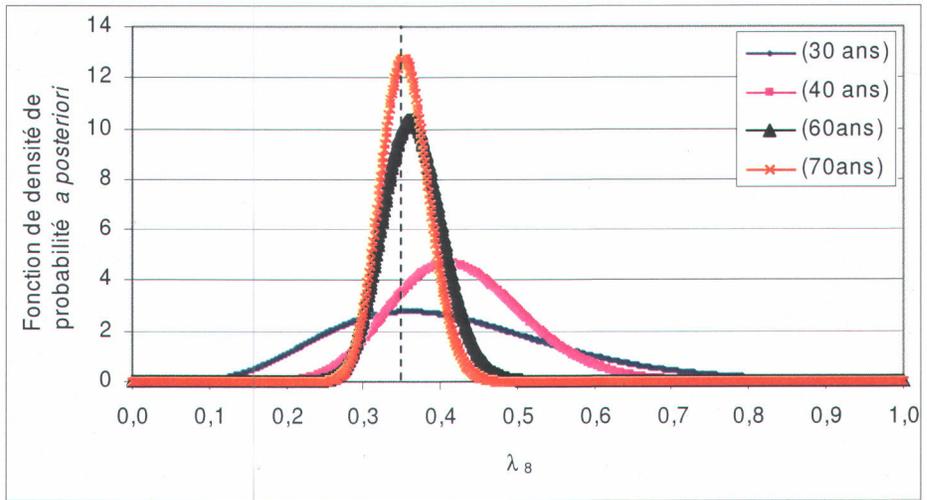


Figure A.4 Distribution *a posteriori* du paramètre λ_8 , la ligne en pointillé représente la valeur réelle de 0,35

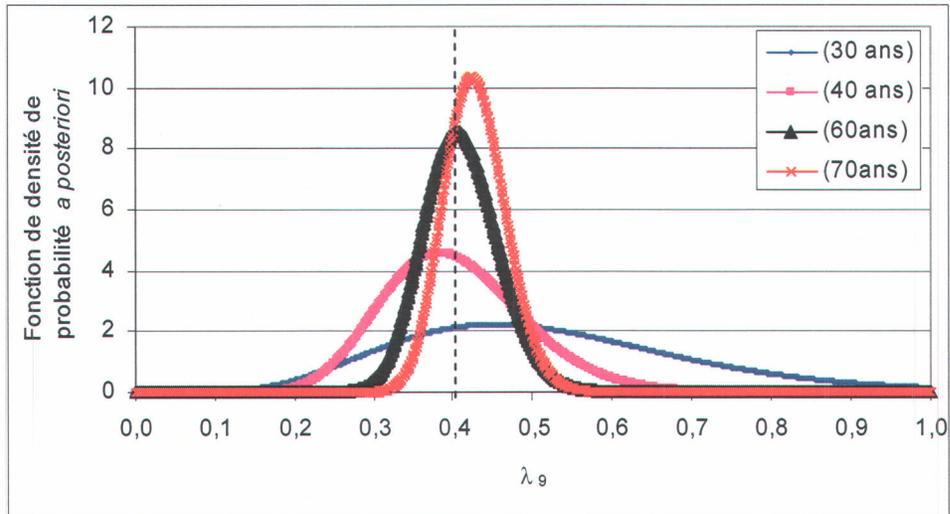


Figure A.5 Distribution *a posteriori* du paramètre λ_9 , la ligne en pointillé représente la valeur réelle de 0,40

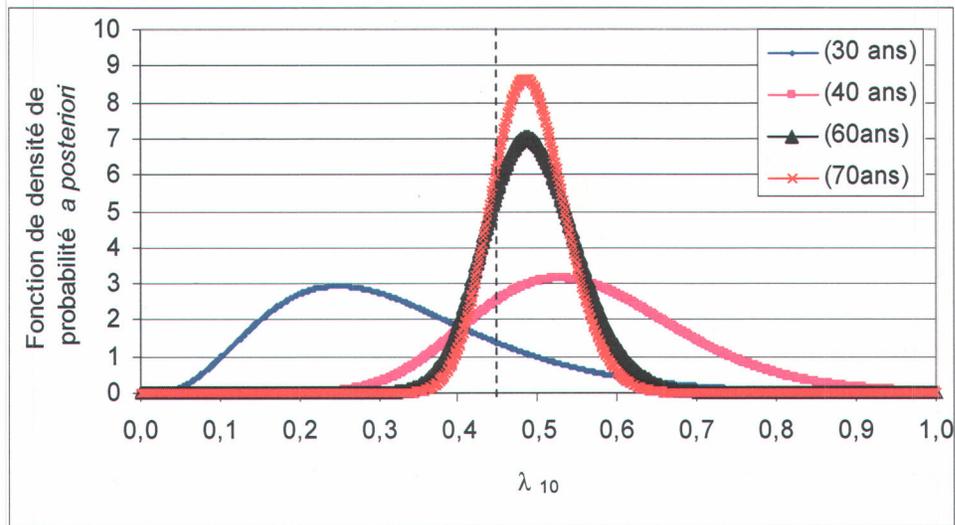
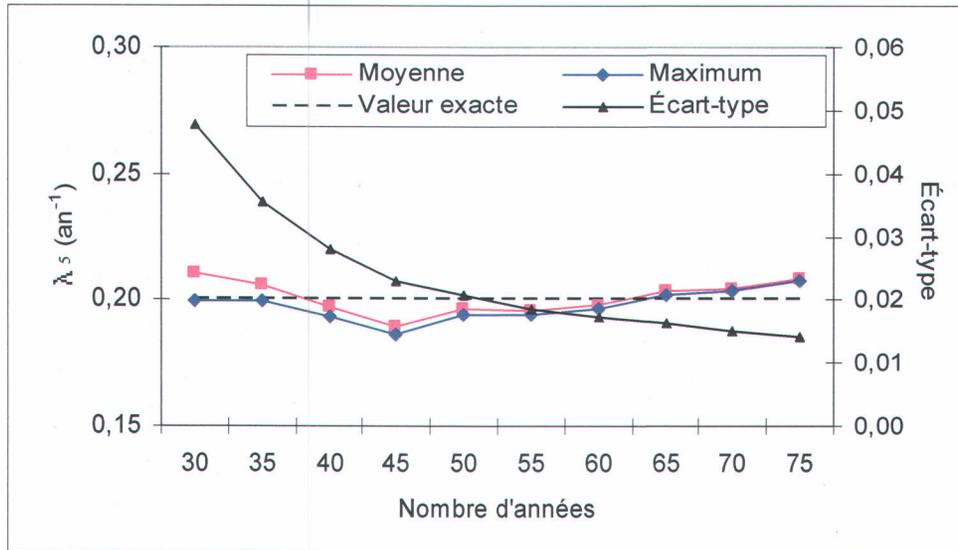
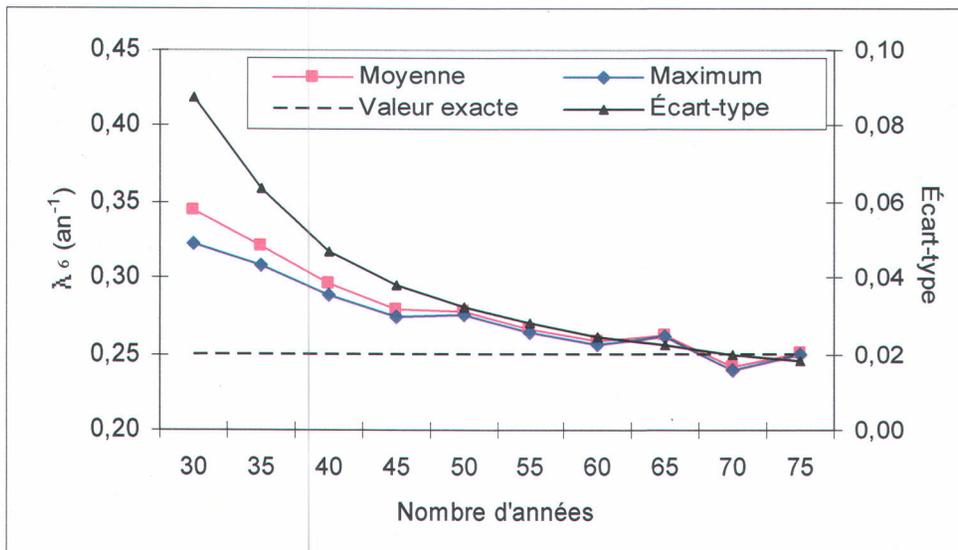


Figure A.6 Distribution *a posteriori* du paramètre λ_{10} , la ligne en pointillé représente la valeur réelle de 0,45

Figure A.7 Écart-type, moyenne et maximum de probabilités *a posteriori* de λ_5 Figure A.8 Écart-type, moyenne et maximum de probabilités *a posteriori* de λ_6

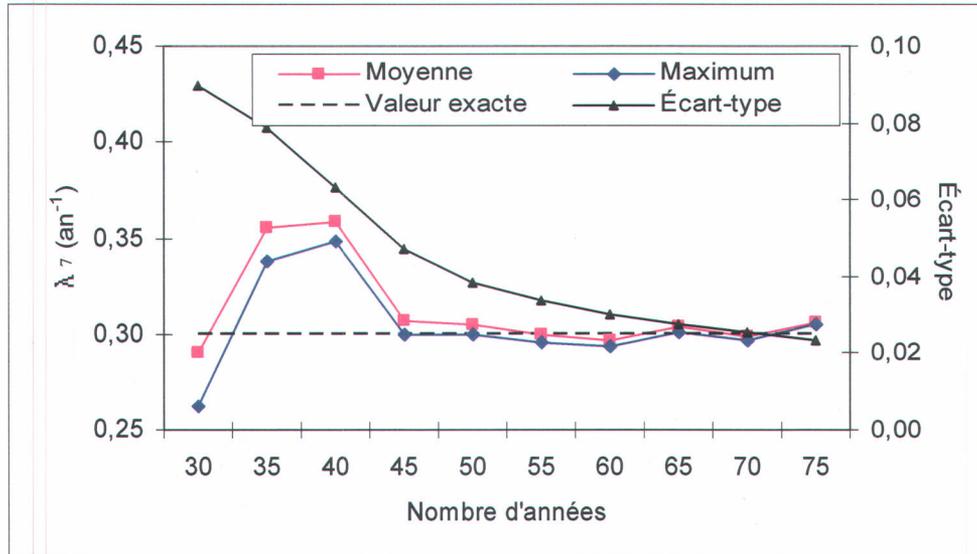


Figure A.9 Écart-type, moyenne et maximum de probabilités *a posteriori* de λ_7

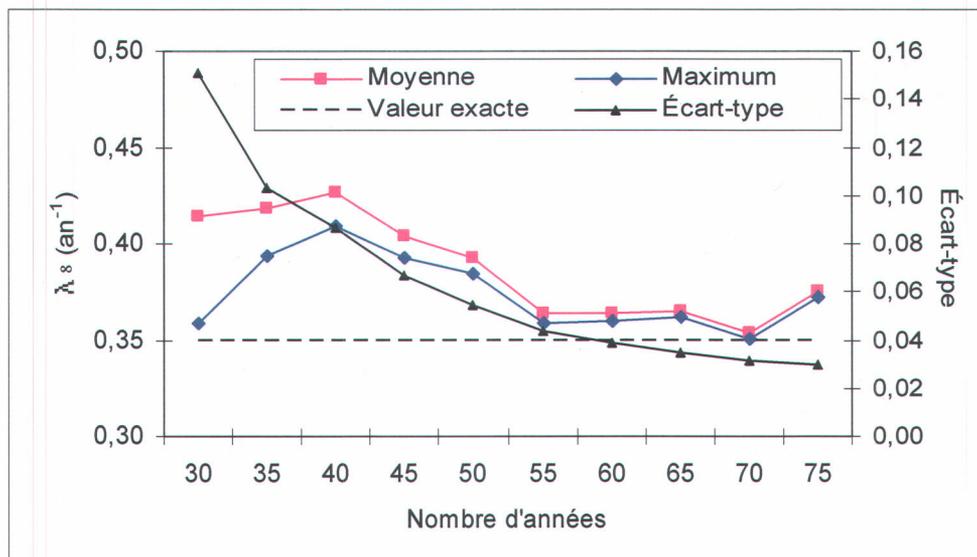
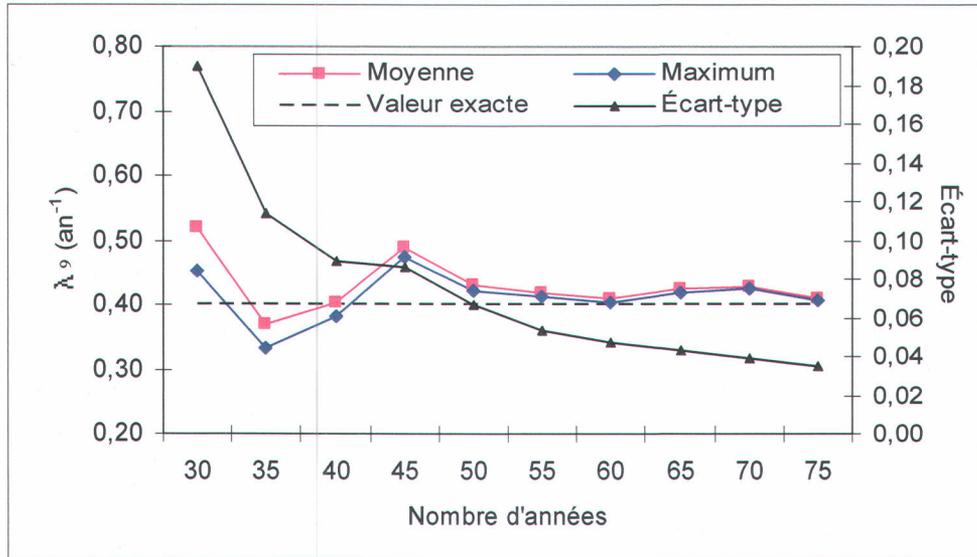
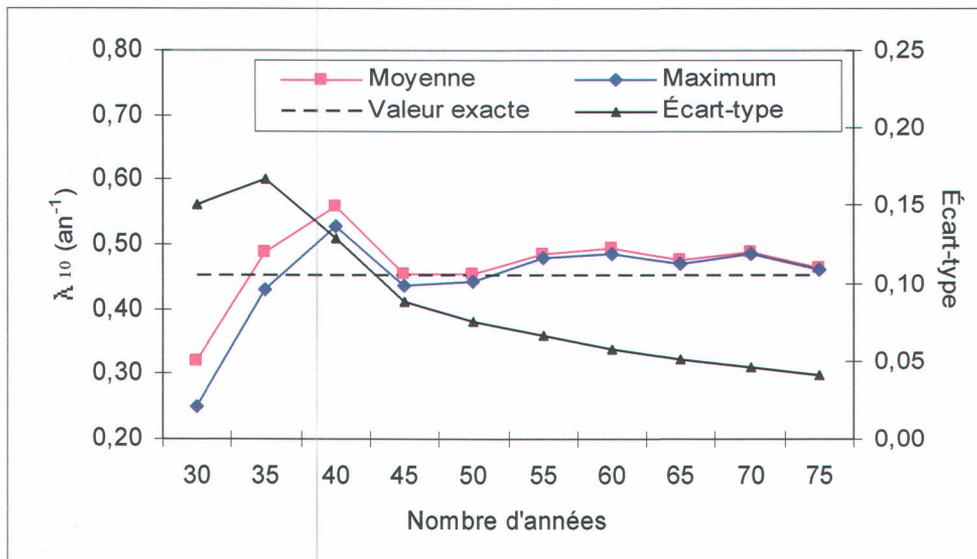


Figure A.10 Écart-type, moyenne et maximum de probabilités *a posteriori* de λ_8

Figure A.11 Écart-type, moyenne et maximum de probabilités *a posteriori* de λ_9 Figure A.12 Écart-type, moyenne et maximum de probabilités *a posteriori* de λ_{10}

ANNEXE B
DONNÉES DES RÉSEAUX POUR LE
DIMENSIONNEMENT

ANNEXE B : DONNÉES DES RÉSEAUX POUR LE DIMENSIONNEMENT

B.1 Description des données pour le dimensionnement du réseau d'Alperovits et Shamir (1977) (8 conduites)

La topologie du réseau est illustrée par la figure B.1 et les données correspondantes sont résumées dans les Tableaux B.1 et B.2, les longueurs de toutes les conduites sont de 1 000 m.

Nombre total de conduites : 08

Nombre total de nœuds : 06

Nombre de réservoirs : 01

Nombre de pompes : 00

Tableau B.1 Description des nœuds (réseau de 8 conduites)

Nœud	Cote (m)	Demande (m ³ /h)
Jonction 7 (Source)	210,0	-1 120,0
Jonction 1	150,0	100,0
Jonction 2	160,0	100,0
Jonction 3	155,0	120,0
Jonction 4	150,0	270,0
Jonction 5	165,0	330,0
Jonction 6	160,0	200,0

Tableau B.2 Description des coûts de conduites (réseau de 8 conduites)

Diamètres (mm)	Coût unitaire (\$/mètre linéaire de conduite)
25,4	2
50,8	5
76,2	8
101,6	11
152,4	16
203,2	23
254,0	32
304,8	50
355,6	60
406,4	90
457,2	130
508,0	170
558,8	300
609,6	550

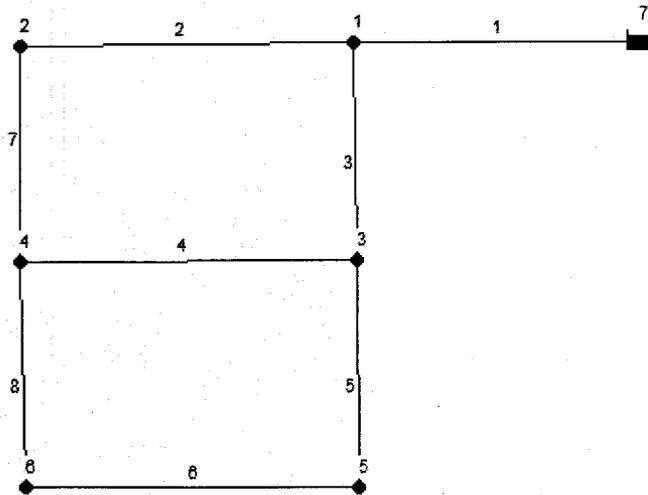


Figure B.1 Topologie du réseau de distribution d'Alperovits et Shamir (1977), identification des nœuds et des conduites

B.2 Description des données pour le dimensionnement du réseau de Hanoi (34 conduites)

La topologie du réseau est illustrée par la figure B.2 et les données correspondantes sont résumées dans les Tableaux B.3, B.4 et B.5.

Nombre total de conduites : 34

Nombre total de nœuds : 31

Nombre de réservoirs : 01

Nombre de pompes : 00

Tableau B.3 Description des nœuds (réseau de Hanoi)

Nœud	Demande (m ³ /h)	Nœud	Demande (m ³ /h)
Jonction 32 (Source)	-19 940,0	Jonction 16	865,0
Jonction 1	890,0	Jonction 17	1 345,0
Jonction 2	850,0	Jonction 18	60,0
Jonction 3	130,0	Jonction 19	1 275,0
Jonction 4	725,0	Jonction 20	930,0
Jonction 5	1 005,0	Jonction 21	485,0
Jonction 6	1 350,0	Jonction 22	1 045,0
Jonction 7	550,0	Jonction 23	820,0
Jonction 8	525,0	Jonction 24	170,0
Jonction 9	525,0	Jonction 25	900,0
Jonction 10	500,0	Jonction 26	370,0
Jonction 11	560,0	Jonction 27	290,0
Jonction 12	940,0	Jonction 28	360,0
Jonction 13	615,0	Jonction 29	360,0
Jonction 14	280,0	Jonction 30	105,0
Jonction 15	310,0	Jonction 31	805,0

Tableau B.4 Description des conduites (réseau de Hanoi)

Conduite	Longueur (m)	Conduite	Longueur (m)
1	100,0	18	800,0
2	1 350,0	19	400,0
3	900,0	20	2 200,0
4	1 150,0	21	1 500,0
5	1 450,0	22	500,0
6	450,0	23	2 650,0
7	850,0	24	1 230,0
8	850,0	25	1 300,0
9	800,0	26	850,0
10	950,0	27	300,0
11	1 200,0	28	750,0
12	3 500,0	29	1 500,0
13	800,0	30	2 000,0
14	500,0	31	1 600,0
15	550,0	32	150,0
16	2 730,0	33	860,0
17	1 750,0	34	950,0

Tableau B.5 Description des coûts de conduites (réseau de Hanoi)

Diamètres (mm)	Coût unitaire (\$/mètre linéaire de conduite)
304,8	45,726
406,4	70,400
508,0	98,378
609,6	129,333
762,0	180,748
1 016,0	278,280

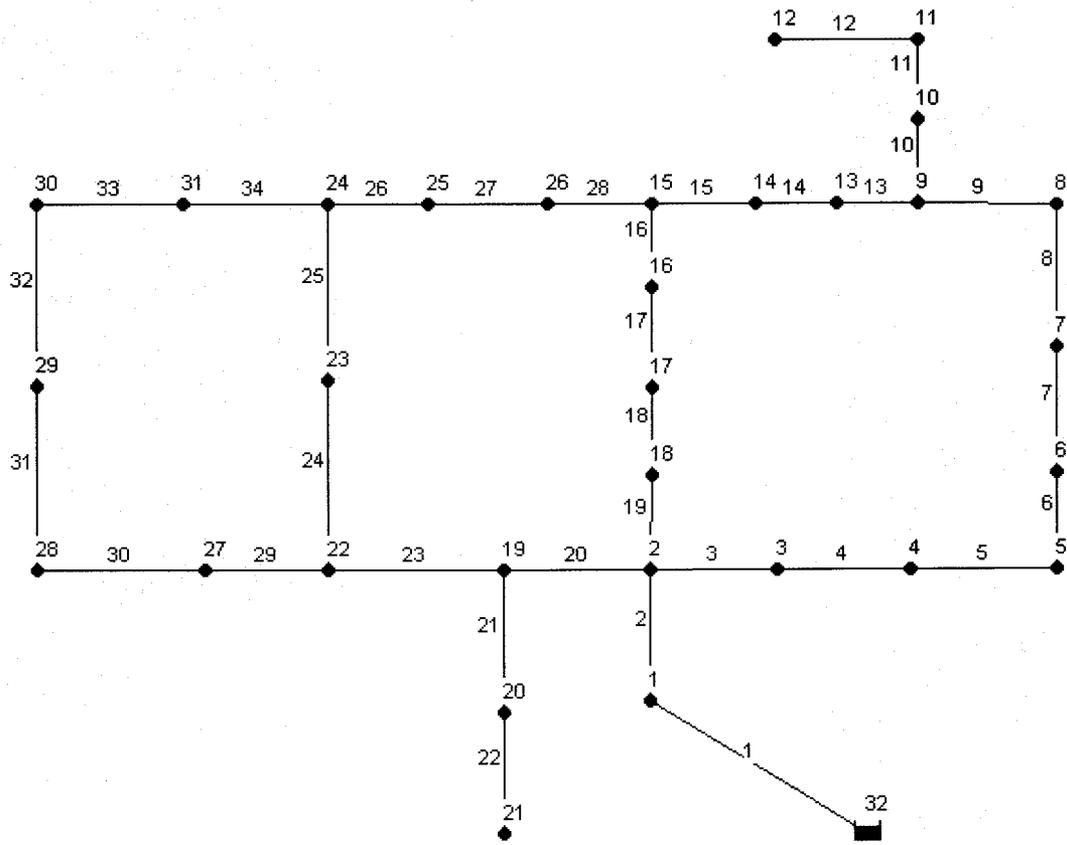


Figure B.2 Topologie du réseau de distribution de Hanoi, identification des nœuds et des conduites.

ANNEXE C
EXEMPLES D'APPLICATION D'UN AG EN ÎLOTS POUR LE
DIMENSIONNEMENT DES RÉSEAUX

ANNEXE C : EXEMPLES D'APPLICATION D'UN AG EN ÎLOTS POUR LE DIMENSIONNEMENT DES RÉSEAUX

Pour vérifier l'AG implanté dans le « Framework d'*OpenBeagle-GA* », deux réseaux cités dans la littérature sont considérés. Le premier réseau comporte deux mailles et a été introduit par Alperovits et Shamir (1977), et le second réseau est celui de Hanoi présenté par Fujiwara et Khang (1990). La comparaison des résultats avec ceux publiés se fera aux sections C.3 et C.4.

C.1 Formulation du problème de dimensionnement avec un AG

Les notations utilisées dans cette section sont spécifiques au problème du dimensionnement. Les variables décrivant le réseau sont : le nombre maximal de conduites (N), les longueurs des conduites (L), les cotes du terrain, la charge du réservoir, les demandes (Dem_{noeud}) et les pressions minimales imposées aux nœuds. Le problème du dimensionnement d'un réseau est un problème d'optimisation d'une fonction de coût. Il s'agit de choisir les diamètres des conduites (D) qui minimisent le coût total, tout en respectant certaines contraintes. La fonction objectif s'écrit :

$$f(D_1, D_2, \dots, D_N) = \sum_{j=1}^N C(D_j) L_j \quad (C.1)$$

où :

$C(D_j)$: coût unitaire de la conduite j de diamètre D_j

L_j : longueur de la conduite j

Le problème d'optimisation doit être résolu en respectant les contraintes physiques suivantes :

- 1) L'équation de continuité à chaque nœud du réseau, sauf le nœud source
- 2) L'équation des pertes de charge pour chaque maille du réseau

- 3) L'équation de perte de charge dans une conduite peut s'exprimer en fonction du débit (Q), du diamètre de la conduite (D), de la longueur (L), du coefficient C (coefficient qui dépend de la formule de perte de charge utilisée; voir le Tableau 6.2) et d'une constante de conversion (ω).

$$\Delta H_j = \frac{\omega L_j}{D_j^\alpha C_j^\beta} Q_j^\beta; \quad \forall j \in \{1, \dots, N\} \quad (\text{C.2})$$

avec : $\alpha = 4,871$; $\beta = 1,852$

- 4) Un ensemble de diamètres commerciaux de conduites à valeurs discrètes $\{D\}$ doit être utilisé pour le dimensionnement :

$$D_j \in \{D\} \quad \forall j \in \{1, \dots, N\} \quad (\text{C.3})$$

- 5) La contrainte de pression minimale dans chaque nœud du réseau est donnée comme suit :

$$H(i) \geq H^{\min}(i) \quad \forall i \in \{1, \dots, \text{MaxNoeud}\} \quad (\text{C.4})$$

où : $H(i)$: pression au nœud i

$H^{\min}(i)$: pression minimale requise en chaque nœud

MaxNoeud : nombre maximal de nœuds dans le réseau

Savic et Walters (1997) ont présenté plusieurs valeurs du coefficient de conversion (ω), utilisées par différents auteurs (Tableau C.1). La plus grande et la plus petite valeur rapportées sont : 10,9031 et 10,5088 respectivement.

Tableau C.1 Coefficients de conversion de l'équation de Hazen-Williams utilisée par différents auteurs (Savic et Walters, 1997)

N°	Auteurs	Coefficient (ω) de l'équation (C.2)		
		D (m) Q (m ³ /s)	D (ft) Q (cfs)	D (in) Q (cfs) 10 ⁵
1	Alperovits and Shamir (1977)	10,6792	4,7269	8,515
2	Alperovits and Shamir (1977)	10,7109	4,7409	8,540
3	Quindry <i>and al.</i> (1981)	10,9031	4,8306	8,710
4	Ormsbee and Wood (1986)	10,6866	4,7302	8,521
5	Fujiwara and Khang (1990)	10,5088	4,6847	8,439
6	Murphy and Simpson (1992)	10,6744	4,7270	8,524
7	Murphy <i>and al.</i> (1993)	10,6792	4,7291	8,528
8	Simpson <i>and al.</i> (1994)	10,6750	4,7272	8,524

C.2 Fonction d'adaptation

La variable de décision recherchée est le diamètre affecté à chaque conduite du réseau. Pour chaque combinaison de diamètres identifiée par l'AG, une simulation hydraulique est effectuée pour vérifier la faisabilité de la solution en calculant les pressions aux nœuds. Le simulateur hydraulique utilisé permet de résoudre les équations de continuité et de perte de charge. Signalons que pour l'équation (C.2), (ω) est fixé à 10,67 (SI).

Plusieurs possibilités existent pour le choix de la fonction pénalité. On peut prendre comme approximation la violation de la contrainte hydraulique, le carré de la violation de la contrainte, etc. Pour tenir compte des solutions qui ne respectent pas la contrainte de pression (équation C.4), une simple fonction pénalité identique à celle proposée par Savic et Walters (1997) et Eusuff et Lansey (2003) est introduite. Cette fonction pénalité mesure l'écart maximal de pression aux nœuds :

$$penap = \max_{i=1, MaxNoeud} \left[\max (0, H^{\min} (i) - H(i)) \right] \quad (C.5)$$

La fonction d'adaptation choisie pour effectuer les tests s'écrit :

$$g(D_1, D_2, \dots, D_N) = \sum_{j=1}^N C(D_j) L_j + Kp \left[\max_{i=1, MaxNoeud} \left[\max (0, H^{\min} (i) - H(i)) \right] \right] \quad (C.6)$$

où :

Kp : coefficient multiplicatif introduit pour tenir compte de l'ordre de grandeur des coûts; ce coefficient doit être ajusté en fonction des données de chaque réseau de distribution.

C.3 Tests sur le réseau d'Alperovits et Shamir

L'Annexe B.1 résume les données du système (Figure B.1 et les Tableaux B.1 et B.2). Comme il y a huit diamètres de conduites et que chaque conduite peut prendre une des 14 valeurs possibles, une chaîne sera composée de huit sous-

chaînes à 4 bits. La longueur totale de la chaîne est égale à 32 bits. Puisqu'avec 4 bits, 16 combinaisons de valeurs sont possibles et qu'il n'y a que 14 valeurs de diamètre disponibles, il y aura par conséquent deux sous-chaînes qui vont représenter les mêmes diamètres. Au lieu d'utiliser un simple codage binaire, le code Gray a été utilisé (Tableau 7.1). L'espace de recherche pour cet exemple est de 14^8 , soit : $1,47 \times 10^9$ combinaisons possibles. La pression minimale imposée en chaque nœud est de 30 m.

Pour ce premier exemple, on a choisi un AG générationnel utilisant une sélection par tournoi et un croisement en un point. Les valeurs des paramètres utilisés sont présentées au Tableau C.2. Ces paramètres ont permis de retrouver la meilleure solution obtenue jusqu'à présent (dans le cas d'un problème discret), soit 419 000 \$.

Tableau C.2 Paramètres de l'AG-générationnel pour le réseau à 8 conduites

Nombre de demes	5
Taille des demes	200
Fréquence de migration des individus	10
Nombre d'individus qui migrent entre chaque deme, à chaque génération (5 %)	10
Taille des tournois	2
Probabilité de croisement en un point	0,30
Probabilité de mutation de l'individu	1,00
Probabilité de mutation des bits	0,01
Nombre maximal de générations	100

Le Tableau C.3 présente les valeurs des diamètres trouvées avec les différentes valeurs du coefficient ω utilisé par les auteurs. La solution identifiée (colonne 6 du Tableau C.3) est identique à celle trouvée par la méthode du recuit simulé (Cunha et Sousa, 1999), par l'algorithme génétique standard avec code Gray (Savic et Walters, 1997) et par le *fast messy genetic algorithm* (Wu *et al.*, 2001).

Tableau C.3 Meilleures solutions trouvées pour le réseau d'Alperovits, avec des valeurs de diamètres discrètes

Conduite	Savic et Walters (1997)		Cunha et Sousa (1999)	Wu <i>et al.</i> (2001)	<i>Open-beagleGA</i>	
	(in)	(in)	(in)	(in)	(in)	(mm)
1	18	20	18	18	18	(457,2)
2	10	10	10	10	10	(254,0)
3	16	16	16	16	16	(406,4)
4	4	1	4	4	4	(101,6)
5	16	14	16	16	16	(406,4)
6	10	10	10	10	10	(254,0)
7	10	10	10	10	10	(254,0)
8	1	1	1	1	1	(25,4)
Coût (\$)	419 000	420 000	419 000	419 000	419 000	
ω	10,5088	10,9031	10,5088	10,5088	10,67	

1 in. = 2,54 cm

Le Tableau C.4 présente les pressions aux nœuds (la dernière colonne de ce tableau identifie les numéros des nœuds utilisés dans notre application). La figure C.1 illustre l'évolution de la meilleure fonction d'adaptation trouvée à chaque génération pour le réseau à huit conduites. On voit bien que, pour cet exemple, la meilleure fonction d'adaptation (419 000) est atteinte après seulement 31 générations.

Tableau C.4 Pressions aux nœuds pour le réseau d'Alperovits et Shamir

Nœud	Savic et Walters (1997)		Cunha et Sousa (1999)	Wu <i>et al.</i> (2001)	<i>Open-beagleGA</i>	Nœuds d'après l'Annexe B.1
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	
2	53,26	55,97	53,27	53,27	53,24	1
3	30,45	30,77	30,50	30,51	30,46	2
4	43,48	46,60	43,48	43,49	43,44	3
5	33,77	32,29	33,85	33,85	33,80	4
6	30,49	30,86	30,49	30,49	30,44	5
7	30,62	30,99	30,60	30,60	30,55	6

Pression doit être supérieure ou égale à 30 m.

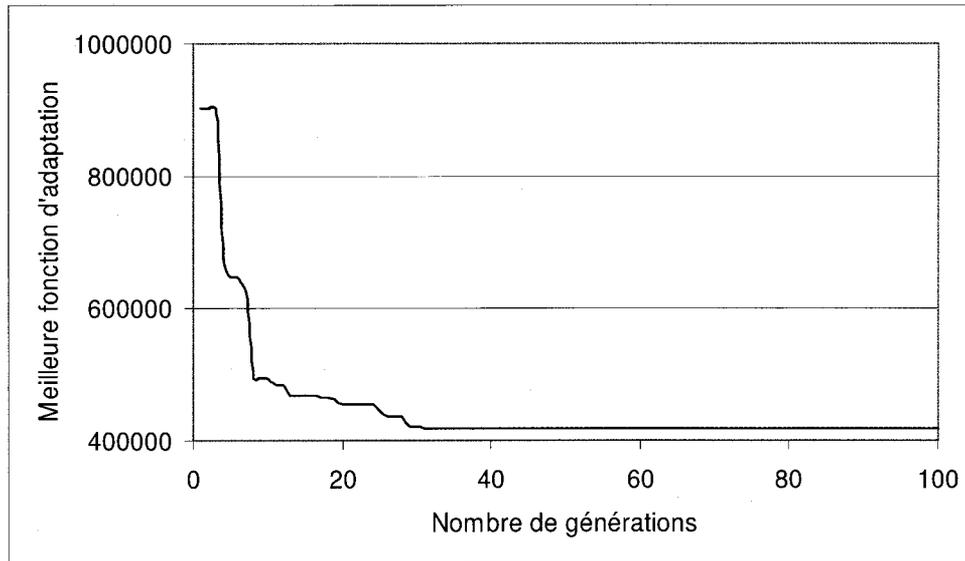


Figure C.1 Meilleure fonction d'adaptation de chaque génération pour le problème à huit conduites

C.4 Tests sur le réseau de Hanoi

La figure B.2 montre le second réseau testé (voir Annexe B). Ce réseau est composé de trois mailles, 31 nœuds et un nœud source ayant une charge fixée à 100 m. Les données du système sont présentées aux Tableaux B.3, B.4 et B.5 (Annexe B). Il y a 34 conduites de longueurs différentes. La pression minimale requise à chaque nœud est fixée à 30 m. La série des diamètres commerciaux en mm est : {304,8; 406,4; 508,0; 609,6; 762,0; 1016,0}. Une fonction de coût continue est utilisée pour calculer le coût unitaire (\$/m), connaissant le diamètre de la conduite en (*pouces*) : $C(D_i) = 1,1 D_i^{1,5}$. L'espace de recherche pour cet exemple est de 6^{34} , soit : $2,86 \times 10^{26}$ combinaisons possibles. La longueur totale d'un individu est égale à 102 bits et chaque chaîne est composée de 34 sous-chaînes à 3 bits.

La figure C.2 illustre l'évolution de la meilleure fonction d'adaptation en relation avec les générations. La meilleure solution obtenue (6,081 millions) apparaît à la 3 875^e génération. Les meilleurs résultats obtenus par différents auteurs sont

présentés au Tableau C.6, dans lequel la dernière colonne montre les résultats obtenus en utilisant les paramètres de l'AG présentés au Tableau C.5. La solution que nous avons trouvée ne diffère de celle de Cunha et Sousa (1999) que par une seule conduite, la conduite N°18 qui a un diamètre de 609,6 mm (plutôt que 508 mm), ce qui implique que le coût que nous proposons est légèrement plus grand.

Tableau C.5 Paramètres de l'AG-générationnel pour le réseau de Hanoi

Nombre de demes	5
Taille des demes	500
Fréquence de migration des individus	10
Nombre d'individus qui migrent (2 %)	10
Taille des tournois	2
Probabilité de croisement en un point	0,30
Probabilité de mutation de l'individu	1,00
Probabilité de mutation des bits	0,01
Nombre maximal de générations	5 000

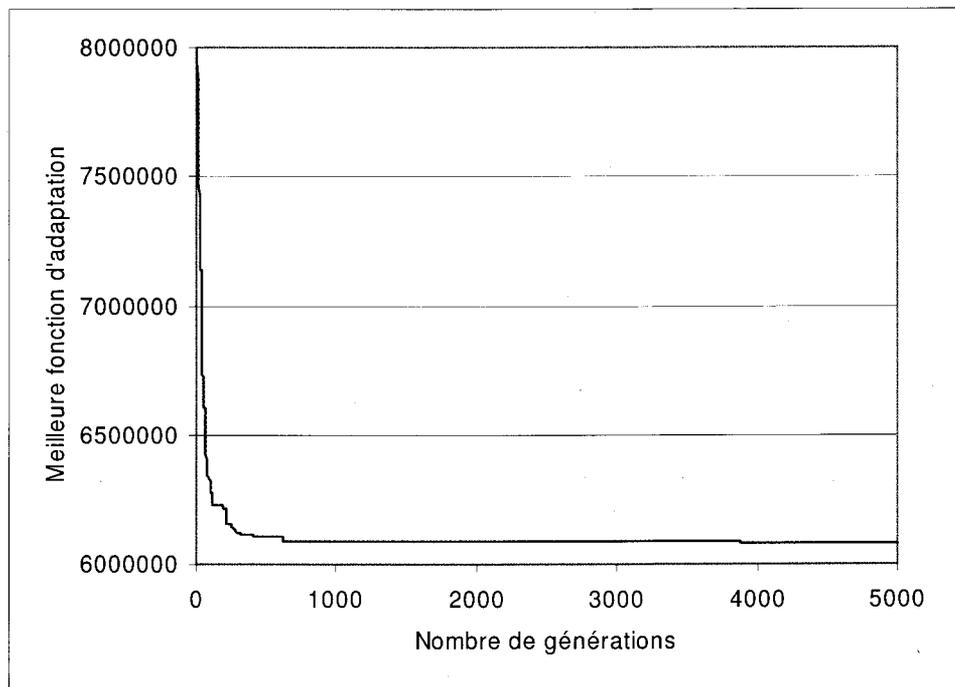


Figure C.2 Meilleure fonction d'adaptation de chaque génération pour le problème de Hanoi (pression minimale de 30 m)

Tableau C.6 Meilleures solutions trouvées pour le réseau de Hanoi, selon les différents auteurs

Conduite	Savic et Walters (1997)		Cunha et Sousa (1999)	Wu <i>et al.</i> (2001)	<i>Open-beagle GA</i>
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	1 016	1 016	1 016	1 016	1 016
2	1 016	1 016	1 016	1 016	1 016
3	1 016	1 016	1 016	1 016	1 016
4	1 016	1 016	1 016	1 016	1 016
5	1 016	1 016	1 016	1 016	1 016
6	1 016	1 016	1 016	1 016	1 016
7	1 016	1 016	1 016	1 016	1 016
8	1 016	1 016	1 016	1 016	1 016
9	1 016	762	1 016	1 016	1 016
10	762	762	762	762	762
11	609,6	762	609,6	609,6	609,6
12	609,6	609,6	609,6	609,6	609,6
13	508	406,4	508	406,4	508
14	406,4	406,4	406,4	304,8	406,4
15	304,8	304,8	304,8	304,8	304,8
16	304,8	406,4	304,8	304,8	304,8
17	406,4	508	406,4	508	406,4
18	508	609,6	508	609,6	<u>609,6</u>
19	508	609,6	508	609,6	508
20	1 016	1 016	1 016	1 016	1 016
21	508	508	508	508	508
22	304,8	304,8	304,8	304,8	304,8
23	1 016	1 016	1 016	1 016	1 016
24	762	762	762	762	762
25	762	762	762	762	762
26	508	508	508	609,6	508
27	304,8	304,8	304,8	304,8	304,8
28	304,8	304,8	304,8	304,8	304,8
29	406,4	406,4	406,4	406,4	406,4
30	406,4	406,4	304,8	406,4	304,8
31	304,8	304,8	304,8	304,8	304,8
32	304,8	304,8	406,4	406,4	406,4
33	406,4	406,4	406,4	406,4	406,4
34	508	508	609,6	609,6	609,6
Coût (M \$)	6 073	6 195	6 056	6 182	6 081
ω	10,5088	10,9031	10,5088	10,9031	10,67

Solution avec une pression minimale imposée de 30 m

Le Tableau C.7 dresse la liste des pressions aux nœuds calculées pour la meilleure solution trouvée lorsque la pression minimale est de 30 m.

Tableau C.7 Pressions aux nœuds pour le réseau de Hanoi

Nœuds	<i>Open-beagle</i> GA (m)	Nœuds	<i>Open-beagle</i> GA (m)
Réservoir	100	16	33,40
1	97,14	17	49,92
2	61,67	18	55,09
3	56,91	19	50,61
4	51,02	20	41,26
5	44,81	21	36,09
6	43,35	22	44,52
7	41,61	23	38,92
8	40,22	24	35,33
9	39,20	25	31,70
10	37,64	26	30,76
11	34,21	27	38,93
12	30,00	28	30,13
13	35,52	29	30,41
14	33,71	30	30,70
15	31,30	31	33,18
ω	10,67		
Pression minimale	30 m		

Pressions calculées avec Epanet2.0

C.4.1 Influence de la pression minimale imposée aux nœuds

En utilisant Epanet2.0, Eusuff et Lansey (2003) ont testé les solutions trouvées par Savic et Walters (1997) et Cunha et Sousa (1999) et ont trouvé que certains nœuds présentaient des pressions inférieures à 30 m, la plus petite pression étant de 29,59 m. Pour essayer de retrouver la meilleure solution identifiée par Cunha et Sousa (1999) (6 056 M \$), tout en utilisant le simulateur Epanet2.0, la pression minimale imposée aux nœuds a été abaissée à 29,59 m et les paramètres de l'AG présentés au Tableau C.5 ont été conservés. La figure C.3 illustre la variation de la meilleure fonction d'adaptation en fonction des générations. La valeur de 6 056 M \$ est retrouvée après seulement 1 951 générations.

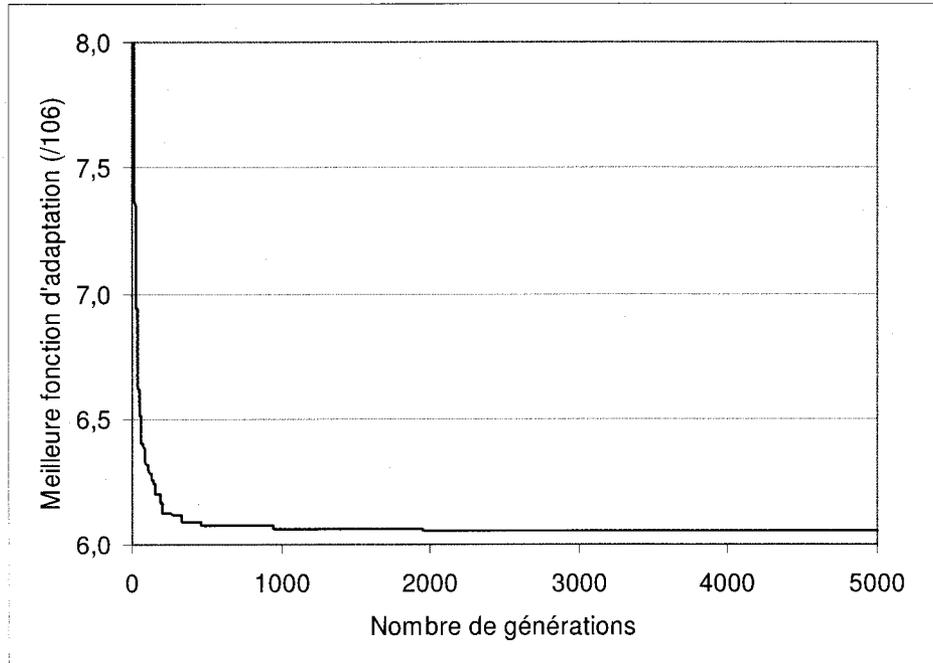


Figure C.3 Meilleure fonction d'adaptation de chaque génération pour le problème de Hanoi (pression minimale de 29,59 m).

C.5 Discussions sur les tests du dimensionnement

L'utilisation de l'outil *OpenBeagle-GA* et la formulation du problème de dimensionnement pour deux exemples pris de la littérature ont permis de vérifier l'efficacité de l'AG en îlots pour la résolution de ce type de problème.

L'outil *OpenBeagle-GA* présente plusieurs avantages. Par exemple, il permet à tout utilisateur d'incorporer un opérateur pour minimiser sa fonction objectif, sans être obligé de modifier la forme de la fonction à optimiser. Un autre avantage est que l'utilisateur peut choisir les différents opérateurs (méthode de sélection, croisement, etc.) et le processus d'évolution des générations. Dans notre cas, on a opté pour un AG générationnel avec une sélection par tournoi et un croisement en un point. La formulation d'un problème de dimensionnement et son application sur deux réseaux ont montré que nos résultats sont satisfaisants

puisque toutes les comparaisons faites avec des solutions trouvées dans la littérature ont donné des résultats similaires. Les résultats ont également montré que les pressions calculées pouvaient dépendre du simulateur hydraulique utilisé.

Il faut surtout préciser que l'évaluation d'une fonction d'adaptation dépend fortement des coefficients affectés aux différentes contraintes. L'utilisateur doit s'arranger pour guider la recherche vers les bonnes solutions, ce qui implique que plusieurs essais sont nécessaires. Nous avons présenté à chaque fois des solutions donnant le meilleur coût pour pouvoir comparer nos résultats mais le modèle a l'avantage de présenter à l'utilisateur plusieurs solutions à des coûts différents (la meilleure solution, la 2^e, la 3^e, etc.).

Le modèle développé pour le dimensionnement n'est qu'un outil de recherche. Bien que les résultats obtenus avec les deux réseaux hypothétiques semblent être satisfaisants, il faut signaler que la réalité est extrêmement différente. Les réseaux sont munis, en plus de conduites, d'accessoires (coudes, vannes, etc.), d'un ou plusieurs réservoirs de stockage, de pompes, etc. Nous nous sommes limités à traiter des problèmes de dimensionnement de réseaux simples sans introduire des réseaux réalistes car ceci demeure en dehors du cadre de cette étude.

ANNEXE D
DONNÉES DES RÉSEAUX HYPOTHÉTIQUES

ANNEXE D : DONNÉES DES RÉSEAUX HYPOTHÉTIQUES

Pour tester les algorithmes développés et implantés dans notre modèle, deux réseaux hypothétiques de tailles différentes ont été utilisés. À défaut de données réelles, on a dû générer des données pour des réseaux âgés de 30 ans en procédant en deux étapes :

- Premièrement, on a dimensionné les deux réseaux comme s'ils étaient neufs pour satisfaire aux pressions minimales imposées aux nœuds et aux vitesses d'écoulement dans les conduites. Les réseaux ont été dimensionnés avec un AG comme celui utilisé en Annexe C, mais comportant certaines modifications. On a supposé que toutes les conduites ont un coefficient de Hazen-Williams de 130. On a considéré un régime de consommation de pointe en chaque nœud du réseau. Les demandes aux nœuds sont générées aléatoirement suivant une loi uniforme et variant entre 10 et 30 m³/h (2,78 et 8,33 l/s). Les conduites du réseau sont supposées faites du même matériau (en fonte ou en acier sans revêtement intérieur) et installées la même année. Les longueurs des tronçons de conduite sont toutes identiques et sont, par défaut, égales à 100 m. Les côtes des nœuds sont également générées aléatoirement selon une loi uniforme et varient entre 20 et 40 m pour le réseau à 100 conduites, et entre 30 et 50 m pour le réseau à 250 conduites. Les diamètres des conduites des deux réseaux ont été identifiés de manière à ce que les vitesses d'écoulement de l'eau soient acceptables, les limites minimales et maximales utilisées sont respectivement de 0,1 m/s et 3,0 m/s.
- Deuxièmement, en se basant sur les données précédentes (diamètres, demandes aux nœuds, etc.), on a modifié les coefficients de Hazen-Williams des conduites du réseau. On a utilisé l'équation 8.3, définie au chapitre 8, et supposé que la rugosité initiale et la valeur moyenne du taux de croissance de la rugosité sont respectivement de 0,18 mm et 0,0762 mm/an. La figure D.1 résume la variation des valeurs du coefficient

de Hazen-Williams en fonction du diamètre et de l'âge des conduites utilisés dans cette étude.

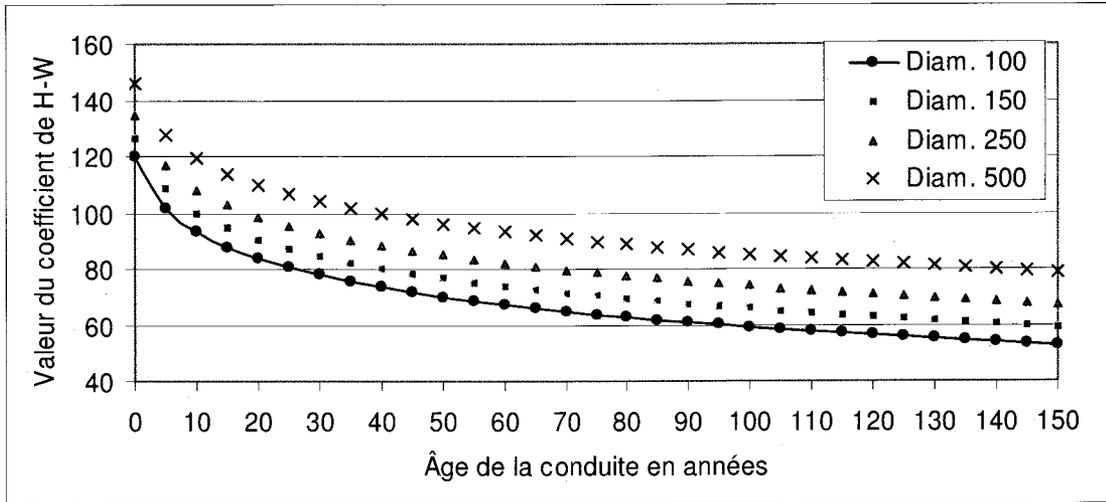


Figure D.1 Variations du coefficient de Hazen-Williams en fonction du diamètre et de l'âge des conduites (réseau à 100 conduites).

Le Tableau D.1 donne, à titre d'exemple, la valeur calculée de ces coefficients, au temps $t = 30$ ans, pour l'ensemble des diamètres normalisés utilisés dans cette étude.

Tableau D.1 Valeurs calculées du coefficient de H-W, au temps $t = 30$ ans, pour les diamètres normalisés

Diamètre (mm)	100	150	200	250	300	400	500	750
Coefficient H-W (t=30 ans)	77,82	84,37	89,02	92,62	95,57	100,21	103,82	110,37

D.1 Description des données pour le dimensionnement du premier réseau de 100 conduites

Les diamètres nominaux des conduites pour ce réseau sont de 100, 150, 250 et 500 mm. La topologie du réseau est illustrée par la figure D.2 et les données correspondantes sont résumées dans les Tableaux D.2 et D.3 .

Caractéristiques du réseau : nombre total de conduites : 100; nombre total de nœuds : 60; nombre de réservoirs : 01; nombre de pompes : 00; aucune singularité (exemple, les vannes, coudes, etc.).

Tableau D.2 Description des nœuds (réseau de 100 conduites)

Nœud	Cote (m)	Demande (m ³ /h)	Demande (l/s)	Charge (m)	Pression (m)
Jonction 1	20,22	10,74	2,98	78,49	58,27
Jonction 2	23,31	20,20	5,61	78,44	55,13
Jonction 3	34,96	16,87	4,69	78,58	43,62
Jonction 4	35,07	11,04	3,07	78,56	43,49
Jonction 5	34,17	13,44	3,73	78,14	43,97
Jonction 6	34,55	29,84	8,29	79,20	44,65
Jonction 7	31,95	20,08	5,58	79,12	47,17
Jonction 8	27,04	17,95	4,99	77,61	50,57
Jonction 9	22,30	10,63	2,95	79,61	57,31
Jonction 10	33,57	14,79	4,11	79,38	45,81
Jonction 11	29,55	14,35	3,99	78,14	48,59
Jonction 12	29,65	13,95	3,88	76,66	47,01
Jonction 13	22,56	25,78	7,16	75,38	52,82
Jonction 14	38,20	16,96	4,71	74,75	36,55
Jonction 15	35,86	13,91	3,86	79,58	43,72
Jonction 16	24,66	20,44	5,68	79,55	54,89
Jonction 17	30,80	11,11	3,09	78,10	47,30
Jonction 18	32,48	22,13	6,15	76,63	44,15
Jonction 19	39,88	12,74	3,54	75,95	36,07
Jonction 20	27,08	21,50	5,97	74,72	47,64
Jonction 21	27,41	27,69	7,69	76,87	49,46
Jonction 22	26,42	20,61	5,73	76,95	50,53
Jonction 23	29,45	10,88	3,02	74,81	45,36
Jonction 24	26,26	20,76	5,77	74,79	48,53
Jonction 25	26,49	17,98	4,99	74,57	48,08
Jonction 26	38,30	20,53	5,70	72,27	33,97
Jonction 27	31,59	13,26	3,68	72,23	40,64
Jonction 28	29,32	10,96	3,04	71,62	42,30
Jonction 29	27,47	10,98	3,05	76,48	49,01
Jonction 30	39,38	13,44	3,73	75,11	35,73
Jonction 31	35,42	21,06	5,85	72,95	37,53
Jonction 32	27,25	15,82	4,39	73,04	45,79
Jonction 33	29,26	19,72	5,48	72,98	43,72
Jonction 34	21,21	12,59	3,50	72,24	51,03
Jonction 35	37,53	15,48	4,30	71,64	34,11
Jonction 36	23,35	24,52	6,81	71,50	48,15
Jonction 37	26,88	11,41	3,17	75,56	48,68
Jonction 38	25,39	23,60	6,56	74,32	48,93
Jonction 39	29,91	14,10	3,92	72,70	42,79

Jonction 40	24,32	18,67	5,19	72,60	48,28
Jonction 41	30,60	30,00	8,33	72,00	41,40
Jonction 42	35,81	27,65	7,68	71,95	36,14
Jonction 43	30,30	19,74	5,48	71,42	41,12
Jonction 44	33,70	11,73	3,26	71,31	37,61
Jonction 45	27,59	11,21	3,11	74,13	46,54
Jonction 46	33,45	17,24	4,79	74,04	40,59
Jonction 47	35,07	21,72	6,03	71,79	36,72
Jonction 48	27,95	20,98	5,83	71,74	43,79
Jonction 49	26,08	10,19	2,83	71,57	45,49
Jonction 50	33,60	24,33	6,76	71,55	37,95
Jonction 51	34,69	29,75	8,26	71,30	36,61
Jonction 52	34,92	12,00	3,33	71,24	36,32
Jonction 53	21,94	21,53	5,98	70,13	48,19
Jonction 54	25,69	21,05	5,85	70,50	44,81
Jonction 55	31,51	20,20	5,61	70,78	39,27
Jonction 56	34,91	15,58	4,33	71,04	36,13
Jonction 57	27,89	11,87	3,30	69,04	41,15
Jonction 58	35,50	12,97	3,60	69,11	33,61
Jonction 59	20,25	15,00	4,17	68,94	48,69
Jonction 60	24,13	17,18	4,77	68,88	44,75
Réservoir 61	-	-1 054,43	-292,90	80,00	0,00

Tableau D.3 Description des conduites (réseau de 100 conduites)

Conduite	Diamètre (mm)	Vitesse (m/s)
Pipe 1	250	0,39
Pipe 2	250	0,33
Pipe 3	150	0,60
Pipe 4	250	1,24
Pipe 5	500	0,29
Pipe 6	150	0,85
Pipe 7	250	1,00
Pipe 8	250	1,14
Pipe 9	500	0,98
Pipe 10	500	0,63
Pipe 11	250	1,59
Pipe 12	150	1,45
Pipe 13	250	1,56
Pipe 14	500	1,49
Pipe 15	500	0,37
Pipe 16	500	1,11
Pipe 17	100	0,35
Pipe 18	150	1,30
Pipe 19	500	0,45
Pipe 20	100	1,11

Pipe 21	500	0,37
Pipe 22	100	1,03
Pipe 23	150	0,86
Pipe 24	150	0,91
Pipe 25	250	0,23
Pipe 26	500	0,35
Pipe 27	150	1,98
Pipe 28	150	1,42
Pipe 29	250	1,73
Pipe 30	150	1,43
Pipe 31	150	1,61
Pipe 32	250	1,30
Pipe 33	150	1,26
Pipe 34	150	1,30
Pipe 35	250	0,58
Pipe 36	250	0,96
Pipe 37	250	0,40
Pipe 38	150	1,61
Pipe 39	150	1,75
Pipe 40	100	1,26
Pipe 41	500	0,24
Pipe 42	150	1,57
Pipe 43	250	0,72
Pipe 44	150	1,49
Pipe 45	150	1,82
Pipe 46	250	0,25
Pipe 47	250	0,29
Pipe 48	100	0,67
Pipe 49	100	0,68
Pipe 50	100	0,30
Pipe 51	150	1,11
Pipe 52	150	1,38
Pipe 53	150	1,02
Pipe 54	150	1,76
Pipe 55	250	0,75
Pipe 56	100	0,25
Pipe 57	100	0,58
Pipe 58	250	0,34
Pipe 59	150	1,15
Pipe 60	150	0,99
Pipe 61	150	0,60
Pipe 62	150	0,88
Pipe 63	150	0,52
Pipe 64	150	0,41
Pipe 65	100	0,36
Pipe 66	100	1,09
Pipe 67	100	1,01
Pipe 68	150	0,58

Pipe 69	100	1,17
Pipe 70	150	1,10
Pipe 71	250	0,46
Pipe 72	100	0,83
Pipe 73	150	0,88
Pipe 74	150	0,73
Pipe 75	250	0,30
Pipe 76	150	0,71
Pipe 77	100	0,64
Pipe 78	150	0,37
Pipe 79	100	0,27
Pipe 80	100	0,22
Pipe 81	150	0,31
Pipe 82	100	1,39
Pipe 83	100	1,18
Pipe 84	250	0,31
Pipe 85	100	1,01
Pipe 86	150	0,44
Pipe 87	100	0,79
Pipe 88	250	0,24
Pipe 89	150	0,80
Pipe 90	100	0,42
Pipe 91	100	0,20
Pipe 92	100	0,94
Pipe 93	100	0,52
Pipe 94	100	1,07
Pipe 95	150	0,59
Pipe 96	150	0,56
Pipe 97	150	0,33
Pipe 98	100	0,21
Pipe 99	100	0,40
Pipe 100	100	0,20

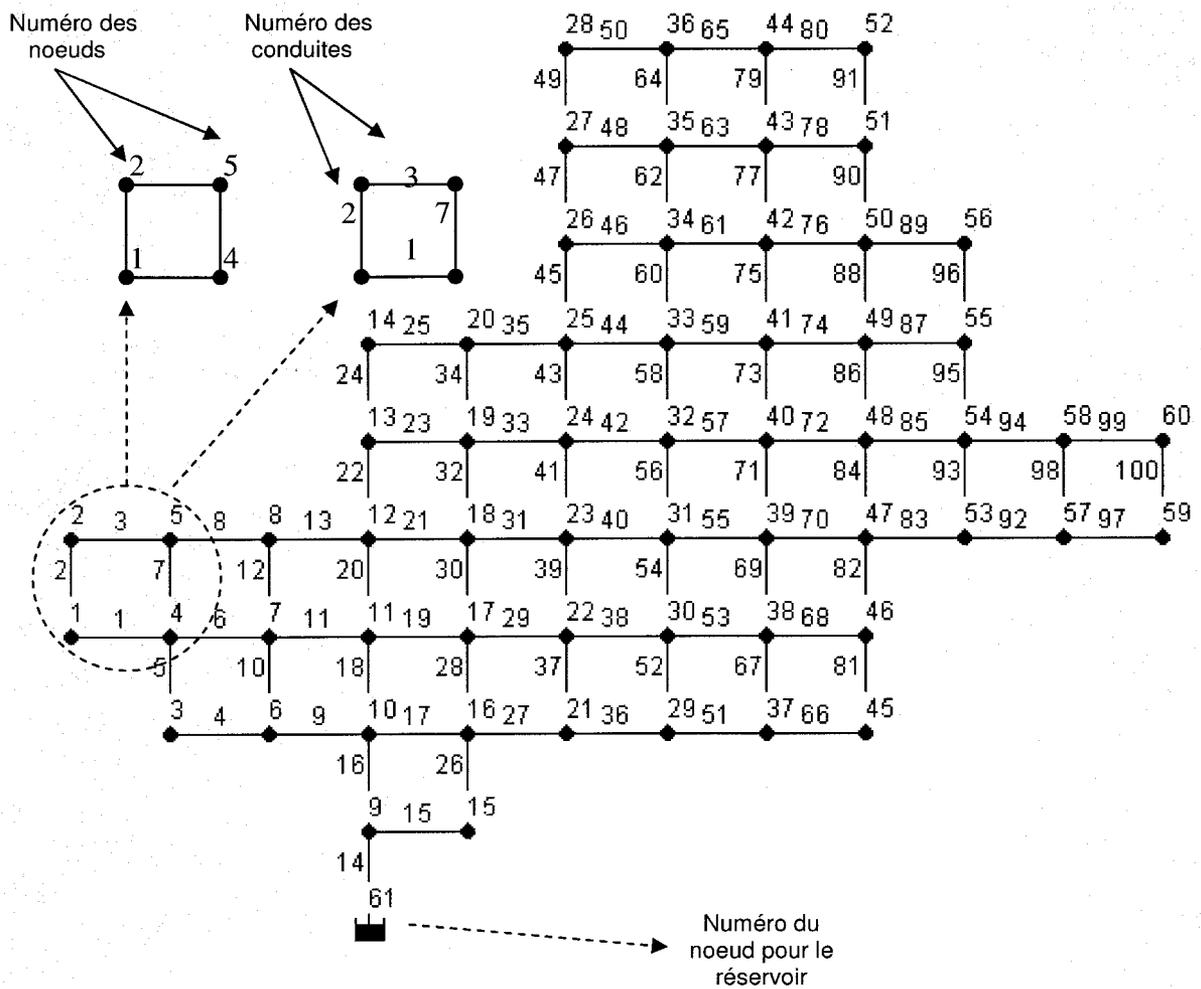


Figure D.2 Topologie du réseau de distribution de 100 conduites, identification des nœuds et des conduites.

D.2 Description des données pour le dimensionnement du second réseau de 250 conduites

Les diamètres nominaux des conduites pour ce réseau sont de 200, 300, 400, 500 et 750 mm. La topologie du réseau est illustrée à la figure D.3 et les données correspondantes sont résumées dans les Tableaux D.4 et D.5. Caractéristiques du réseau : nombre total de conduites : 250; nombre total de nœuds : 141; nombre de réservoirs : 01; nombre de pompes : 00; aucune singularité (exemple, les vannes, coudes, etc.).

Tableau D.4 Description des nœuds (réseau de 250 conduites)

Nœud	Cote (m)	Demande (m ³ /h)	Demande (l/s)	Charge (m)	Pression (m)
Jonction 1	30,52	14,79	4,11	78,83	48,31
Jonction 2	48,82	23,26	6,46	78,68	29,86
Jonction 3	49,28	16,37	4,55	78,61	29,33
Jonction 4	30,03	23,04	6,40	78,57	48,54
Jonction 5	35,85	10,56	2,93	79,01	43,16
Jonction 6	31,00	13,87	3,85	78,79	47,79
Jonction 7	48,82	14,94	4,15	78,60	29,78
Jonction 8	48,79	25,30	7,03	78,46	29,67
Jonction 9	47,56	17,51	4,86	79,67	32,11
Jonction 10	31,17	28,54	7,93	79,44	48,27
Jonction 11	44,67	11,67	3,24	78,62	33,95
Jonction 12	34,30	16,15	4,49	78,55	44,25
Jonction 13	49,50	18,24	5,07	78,33	28,83
Jonction 14	39,05	25,36	7,04	76,92	37,87
Jonction 15	40,74	20,22	5,62	76,91	36,17
Jonction 16	49,40	15,57	4,33	79,43	30,03
Jonction 17	36,22	25,77	7,16	79,22	43,00
Jonction 18	45,72	20,87	5,80	78,33	32,61
Jonction 19	38,09	25,29	7,03	78,20	40,11
Jonction 20	36,31	27,95	7,76	78,14	41,83
Jonction 21	41,48	17,92	4,98	77,97	36,49
Jonction 22	40,22	20,16	5,60	77,69	37,47
Jonction 23	44,71	13,34	3,71	77,03	32,32
Jonction 24	44,47	18,43	5,12	76,98	32,51
Jonction 25	49,29	24,33	6,76	76,94	27,65
Jonction 26	48,77	19,40	5,39	76,90	28,13
Jonction 27	47,74	15,80	4,39	76,88	29,14
Jonction 28	40,98	21,75	6,04	78,74	37,76
Jonction 29	47,40	25,87	7,19	78,49	31,09
Jonction 30	36,32	20,96	5,82	78,18	41,86

Jonction 31	48,30	24,71	6,86	78,00	29,70
Jonction 32	43,47	23,55	6,54	77,86	34,39
Jonction 33	43,34	26,60	7,39	77,75	34,41
Jonction 34	30,75	20,97	5,83	77,38	46,63
Jonction 35	38,71	21,01	5,84	77,04	38,33
Jonction 36	35,47	14,21	3,95	77,00	41,53
Jonction 37	42,91	18,24	5,07	76,95	34,04
Jonction 38	49,51	29,39	8,16	76,89	27,38
Jonction 39	42,27	15,20	4,22	76,87	34,60
Jonction 40	44,36	15,19	4,22	76,87	32,51
Jonction 41	31,23	17,10	4,75	77,96	46,73
Jonction 42	48,71	22,62	6,28	77,95	29,24
Jonction 43	35,52	20,52	5,70	77,88	42,36
Jonction 44	41,68	17,82	4,95	77,51	35,83
Jonction 45	36,22	13,56	3,77	77,50	41,28
Jonction 46	34,82	28,52	7,92	77,17	42,35
Jonction 47	33,02	18,71	5,20	77,03	44,01
Jonction 48	46,08	14,68	4,08	77,02	30,94
Jonction 49	34,63	14,00	3,89	76,98	42,35
Jonction 50	38,77	24,07	6,69	76,94	38,17
Jonction 51	34,59	18,16	5,04	76,87	42,28
Jonction 52	48,69	23,37	6,49	76,85	28,16
Jonction 53	40,55	15,27	4,24	76,81	36,26
Jonction 54	32,61	25,37	7,05	77,41	44,80
Jonction 55	35,12	24,65	6,85	77,39	42,27
Jonction 56	41,03	22,90	6,36	77,26	36,23
Jonction 57	36,46	11,60	3,22	77,15	40,69
Jonction 58	48,65	10,25	2,85	77,00	28,35
Jonction 59	36,78	24,53	6,81	76,89	40,11
Jonction 60	45,36	22,48	6,24	76,88	31,52
Jonction 61	46,69	14,15	3,93	76,85	30,16
Jonction 62	41,10	13,39	3,72	76,85	35,75
Jonction 63	43,82	20,43	5,68	76,84	33,02
Jonction 64	47,61	22,83	6,34	76,81	29,20
Jonction 65	33,48	22,83	6,34	76,80	43,32
Jonction 66	30,20	13,80	3,83	77,24	47,04
Jonction 67	39,83	19,47	5,41	77,24	37,41
Jonction 68	32,74	10,07	2,80	77,28	44,54
Jonction 69	35,45	10,89	3,03	77,20	41,75
Jonction 70	48,88	14,99	4,16	77,16	28,28
Jonction 71	47,51	13,97	3,88	77,13	29,62
Jonction 72	42,67	22,00	6,11	76,91	34,24
Jonction 73	48,68	21,75	6,04	76,89	28,21
Jonction 74	31,86	17,52	4,87	76,85	44,99
Jonction 75	30,92	14,61	4,06	76,83	45,91
Jonction 76	36,63	26,92	7,48	76,81	40,18
Jonction 77	30,18	18,56	5,16	76,75	46,57
Jonction 78	47,35	24,04	6,68	76,77	29,42

Jonction 79	40,26	16,20	4,50	76,78	36,52
Jonction 80	34,06	15,01	4,17	77,23	43,17
Jonction 81	43,90	26,06	7,24	77,23	33,33
Jonction 82	31,15	16,93	4,70	77,15	46,00
Jonction 83	39,14	15,81	4,39	77,13	37,99
Jonction 84	40,03	22,10	6,14	76,91	36,88
Jonction 85	49,27	25,10	6,97	76,89	27,62
Jonction 86	43,30	28,32	7,87	76,87	33,57
Jonction 87	34,30	23,55	6,54	76,84	42,54
Jonction 88	33,10	26,03	7,23	76,80	43,70
Jonction 89	32,21	19,58	5,44	76,79	44,58
Jonction 90	47,22	22,73	6,31	76,76	29,54
Jonction 91	47,97	25,70	7,14	76,75	28,78
Jonction 92	35,70	15,50	4,31	76,75	41,05
Jonction 93	38,65	15,86	4,41	77,22	38,57
Jonction 94	31,35	12,09	3,36	77,20	45,85
Jonction 95	32,53	20,47	5,69	76,95	44,42
Jonction 96	47,07	11,32	3,14	76,93	29,86
Jonction 97	30,52	14,78	4,11	76,91	46,39
Jonction 98	33,30	23,34	6,48	76,89	43,59
Jonction 99	47,84	26,17	7,27	76,86	29,02
Jonction 100	38,60	20,34	5,65	76,84	38,24
Jonction 101	44,29	16,05	4,46	76,79	32,50
Jonction 102	46,48	18,52	5,14	76,77	30,29
Jonction 103	41,00	21,91	6,09	76,72	35,72
Jonction 104	31,74	21,70	6,03	76,72	44,98
Jonction 105	31,99	15,25	4,24	76,74	44,75
Jonction 106	49,25	27,35	7,60	76,94	27,69
Jonction 107	48,58	20,85	5,79	76,90	28,32
Jonction 108	38,42	25,67	7,13	76,83	38,41
Jonction 109	44,71	13,26	3,68	76,82	32,11
Jonction 110	36,53	12,26	3,41	76,80	40,27
Jonction 111	41,43	15,84	4,40	76,76	35,33
Jonction 112	43,87	25,03	6,95	76,74	32,87
Jonction 113	38,60	18,22	5,06	76,74	38,14
Jonction 114	33,99	26,05	7,24	76,68	42,69
Jonction 115	31,92	17,65	4,90	76,68	44,76
Jonction 116	32,09	18,84	5,23	76,88	44,79
Jonction 117	43,44	19,97	5,55	76,89	33,45
Jonction 118	34,67	21,89	6,08	76,82	42,15
Jonction 119	43,71	25,71	7,14	76,81	33,10
Jonction 120	33,67	28,79	8,00	76,74	43,07
Jonction 121	33,60	17,04	4,73	76,70	43,10
Jonction 122	38,09	15,94	4,43	76,70	38,61
Jonction 123	44,01	11,23	3,12	76,68	32,67
Jonction 124	36,25	28,04	7,79	76,67	40,42
Jonction 125	41,58	16,06	4,46	76,66	35,08
Jonction 126	31,93	22,42	6,23	76,87	44,94

Jonction 127	38,38	13,00	3,61	76,85	38,47
Jonction 128	37,35	22,50	6,25	76,81	39,46
Jonction 129	34,03	23,72	6,59	76,80	42,77
Jonction 130	36,18	21,19	5,89	76,72	40,54
Jonction 131	47,94	25,51	7,09	76,71	28,77
Jonction 132	39,79	24,75	6,88	76,67	36,88
Jonction 133	30,25	11,26	3,13	76,65	46,40
Jonction 134	49,71	17,83	4,95	76,65	26,94
Jonction 135	49,17	19,70	5,47	76,66	27,49
Jonction 136	49,58	20,26	5,63	76,77	27,19
Jonction 137	43,22	11,38	3,16	76,76	33,54
Jonction 138	39,51	16,20	4,50	76,64	37,13
Jonction 139	36,18	16,15	4,49	76,63	40,45
Jonction 140	36,30	26,31	7,31	76,63	40,33
Jonction 141	43,12	27,71	7,70	76,62	33,50
Réservoir 142	-	-2 776,70	-771,31	80,00	0,00

Tableau D.5 Description des conduites (réseau de 250 conduites)

Conduite	Diamètre (mm)	Vitesse (m/s)
Pipe 1	300	0,70
Pipe 2	300	0,65
Pipe 3	400	0,64
Pipe 4	500	0,61
Pipe 5	500	0,15
Pipe 6	500	0,44
Pipe 7	400	0,64
Pipe 8	400	1,37
Pipe 9	400	0,95
Pipe 10	200	0,54
Pipe 11	200	0,56
Pipe 12	300	0,39
Pipe 13	200	0,48
Pipe 14	400	0,71
Pipe 15	750	1,75
Pipe 16	400	1,01
Pipe 17	750	1,45
Pipe 18	500	1,10
Pipe 19	400	1,94
Pipe 20	400	1,11
Pipe 21	500	0,60
Pipe 22	200	0,78
Pipe 23	400	0,93
Pipe 24	500	1,02
Pipe 25	400	0,24
Pipe 26	400	0,18

Pipe 27	400	0,14
Pipe 28	300	1,47
Pipe 29	200	0,59
Pipe 30	300	1,52
Pipe 31	300	1,69
Pipe 32	400	0,77
Pipe 33	500	0,80
Pipe 34	400	0,91
Pipe 35	400	0,48
Pipe 36	300	0,91
Pipe 37	500	0,96
Pipe 38	400	0,95
Pipe 39	300	0,90
Pipe 40	200	0,74
Pipe 41	200	1,11
Pipe 42	400	0,16
Pipe 43	400	0,41
Pipe 44	200	0,17
Pipe 45	400	0,41
Pipe 46	200	0,16
Pipe 47	300	0,28
Pipe 48	300	0,20
Pipe 49	300	0,25
Pipe 50	400	0,10
Pipe 51	200	1,22
Pipe 52	300	0,84
Pipe 53	300	1,29
Pipe 54	300	0,96
Pipe 55	400	1,13
Pipe 56	200	0,55
Pipe 57	200	0,95
Pipe 58	400	0,76
Pipe 59	300	1,04
Pipe 60	400	0,64
Pipe 61	200	1,04
Pipe 62	400	1,26
Pipe 63	200	0,79
Pipe 64	400	1,21
Pipe 65	500	0,24
Pipe 66	500	0,40
Pipe 67	300	0,23
Pipe 68	400	0,42
Pipe 69	400	0,25
Pipe 70	200	0,33
Pipe 71	200	0,16
Pipe 72	300	0,16
Pipe 73	200	0,20
Pipe 74	400	0,11

Pipe 75	200	0,31
Pipe 76	500	0,17
Pipe 77	500	0,60
Pipe 78	400	1,43
Pipe 79	300	1,05
Pipe 80	400	0,69
Pipe 81	300	0,18
Pipe 82	300	0,82
Pipe 83	200	0,76
Pipe 84	200	0,15
Pipe 85	300	0,62
Pipe 86	400	0,34
Pipe 87	400	0,16
Pipe 88	200	0,47
Pipe 89	400	0,39
Pipe 90	200	0,39
Pipe 91	400	0,40
Pipe 92	200	0,36
Pipe 93	400	0,51
Pipe 94	400	0,25
Pipe 95	400	0,26
Pipe 96	500	0,12
Pipe 97	200	0,24
Pipe 98	400	0,10
Pipe 99	500	0,81
Pipe 100	300	0,20
Pipe 101	300	0,74
Pipe 102	300	0,59
Pipe 103	200	0,39
Pipe 104	400	0,64
Pipe 105	400	0,29
Pipe 106	300	0,66
Pipe 107	400	0,58
Pipe 108	200	0,42
Pipe 109	400	0,10
Pipe 110	300	0,11
Pipe 111	200	0,24
Pipe 112	200	0,21
Pipe 113	200	0,18
Pipe 114	300	0,11
Pipe 115	300	0,29
Pipe 116	400	0,12
Pipe 117	200	0,38
Pipe 118	300	0,31
Pipe 119	200	0,22
Pipe 120	500	0,11
Pipe 121	300	0,22
Pipe 122	400	0,14

Pipe 123	500	0,11
Pipe 124	500	0,27
Pipe 125	500	0,41
Pipe 126	300	0,60
Pipe 127	300	0,47
Pipe 128	400	0,50
Pipe 129	300	0,28
Pipe 130	200	0,66
Pipe 131	200	0,23
Pipe 132	200	0,64
Pipe 133	200	0,61
Pipe 134	300	0,31
Pipe 135	500	0,33
Pipe 136	300	0,33
Pipe 137	400	0,38
Pipe 138	300	0,34
Pipe 139	400	0,21
Pipe 140	300	0,33
Pipe 141	200	0,16
Pipe 142	200	0,28
Pipe 143	200	0,30
Pipe 144	500	0,11
Pipe 145	200	0,16
Pipe 146	200	0,19
Pipe 147	300	0,15
Pipe 148	300	0,15
Pipe 149	200	0,10
Pipe 150	300	0,26
Pipe 151	300	0,45
Pipe 152	300	0,76
Pipe 153	300	0,22
Pipe 154	200	0,58
Pipe 155	300	0,78
Pipe 156	500	0,18
Pipe 157	400	0,27
Pipe 158	500	0,16
Pipe 159	300	0,23
Pipe 160	300	0,17
Pipe 161	300	0,26
Pipe 162	500	0,14
Pipe 163	200	0,26
Pipe 164	400	0,17
Pipe 165	200	0,13
Pipe 166	200	0,16
Pipe 167	300	0,24
Pipe 168	200	0,26
Pipe 169	300	0,16
Pipe 170	300	0,26

Pipe 171	300	0,10
Pipe 172	300	0,13
Pipe 173	200	0,19
Pipe 174	200	0,66
Pipe 175	500	0,19
Pipe 176	400	0,24
Pipe 177	400	0,32
Pipe 178	200	0,18
Pipe 179	300	0,46
Pipe 180	200	0,16
Pipe 181	200	0,33
Pipe 182	300	0,27
Pipe 183	200	0,29
Pipe 184	300	0,21
Pipe 185	200	0,35
Pipe 186	300	0,35
Pipe 187	300	0,36
Pipe 188	300	0,23
Pipe 189	200	0,22
Pipe 190	200	0,28
Pipe 191	300	0,28
Pipe 192	300	0,12
Pipe 193	200	0,27
Pipe 194	200	0,15
Pipe 195	200	0,29
Pipe 196	300	0,30
Pipe 197	500	0,23
Pipe 198	200	0,34
Pipe 199	400	0,10
Pipe 200	400	0,18
Pipe 201	400	0,14
Pipe 202	300	0,17
Pipe 203	200	0,32
Pipe 204	200	0,25
Pipe 205	200	0,30
Pipe 206	200	0,17
Pipe 207	200	0,25
Pipe 208	400	0,12
Pipe 209	200	0,28
Pipe 210	200	0,28
Pipe 211	300	0,17
Pipe 212	300	0,13
Pipe 213	300	0,18
Pipe 214	300	0,16
Pipe 215	300	0,11
Pipe 216	300	0,31
Pipe 217	200	0,32
Pipe 218	200	0,15

Pipe 219	300	0,17
Pipe 220	300	0,17
Pipe 221	200	0,33
Pipe 222	200	0,16
Pipe 223	200	0,23
Pipe 224	200	0,11
Pipe 225	400	0,12
Pipe 226	200	0,18
Pipe 227	300	0,18
Pipe 228	200	0,24
Pipe 229	300	0,16
Pipe 230	200	0,17
Pipe 231	300	0,14
Pipe 232	400	0,15
Pipe 233	200	0,17
Pipe 234	300	0,33
Pipe 235	400	0,18
Pipe 236	300	0,24
Pipe 237	200	0,35
Pipe 238	200	0,25
Pipe 239	400	0,14
Pipe 240	200	0,24
Pipe 241	200	0,20
Pipe 242	400	0,15
Pipe 243	300	0,11
Pipe 244	200	0,17
Pipe 245	400	0,10
Pipe 246	300	0,16
Pipe 247	300	0,15
Pipe 248	200	0,10
Pipe 249	200	0,13
Pipe 250	200	0,11

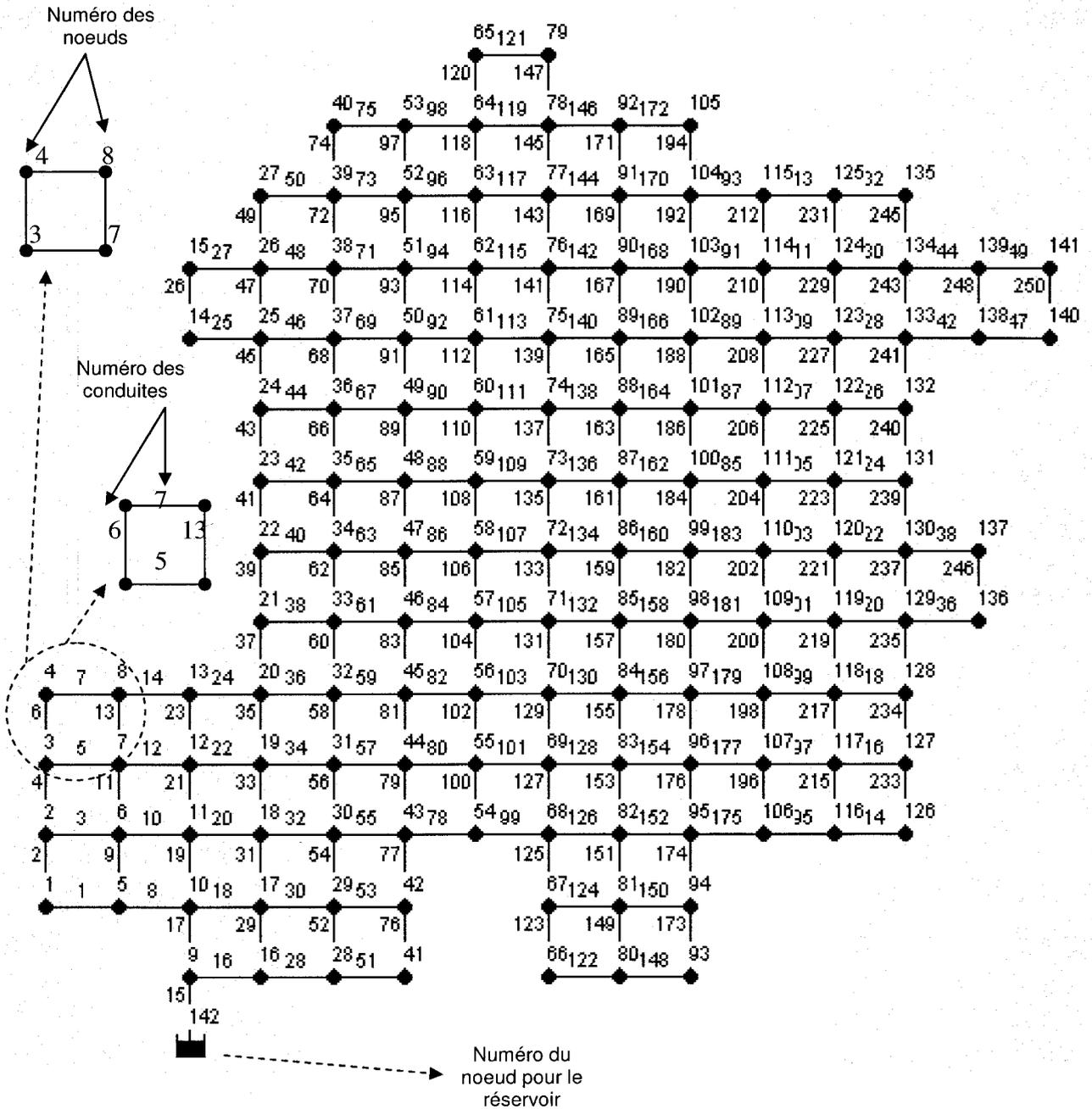


Figure D.3 Topologie du réseau de distribution de 250 conduites, identification des nœuds et des conduites.

ANNEXE E : APPROCHE MONOOBJECTIF (suite)

ANNEXE E : APPROCHE MONOOBJECTIF (suite)

Les figures E.1 à E.10 montrent les remplacements suggérés par l'AG à chaque phase ainsi que le nombre de bris actualisé de chaque conduite à la fin de chaque phase, pour le réseau à 100 conduites. Ces figures supposent que les décisions de remplacer les conduites sélectionnées ont été réalisées et qu'ensuite le modèle de bris a été utilisé pour actualiser le nombre de bris de toutes les conduites du réseau.

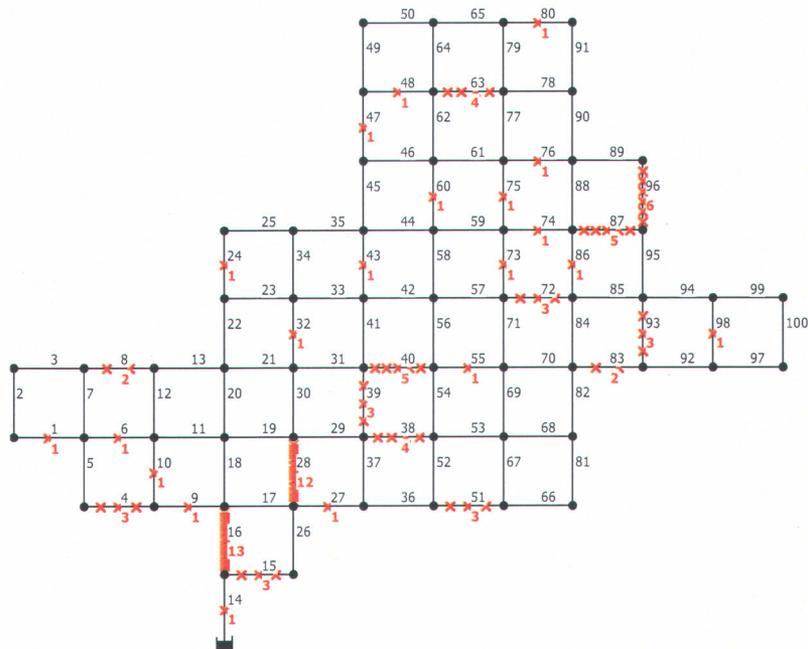


Figure E.1 Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 35 ans (aucune conduite n'a été remplacée entre la 31^e et la 35^e année).

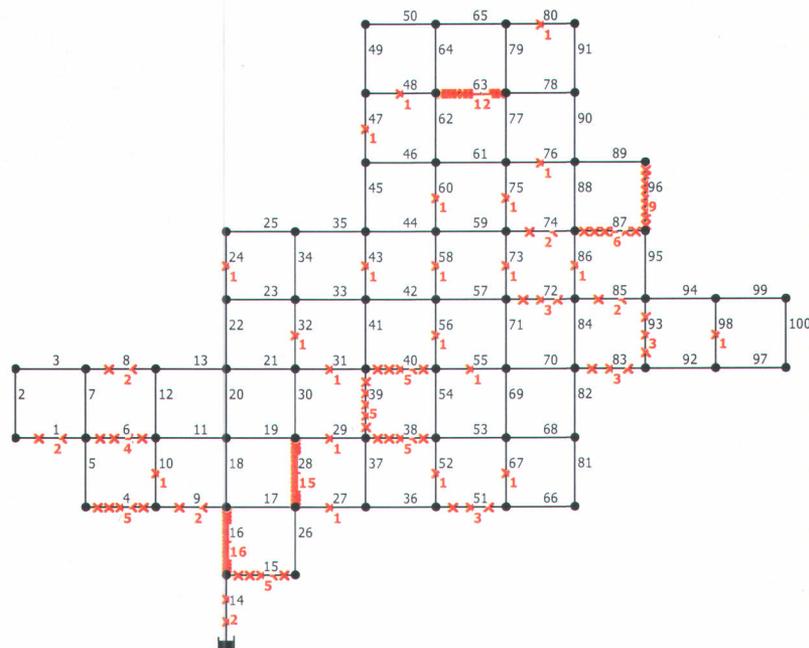


Figure E.2 Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 40 ans (aucune conduite n'a été remplacée entre la 36^e et la 40^e année).

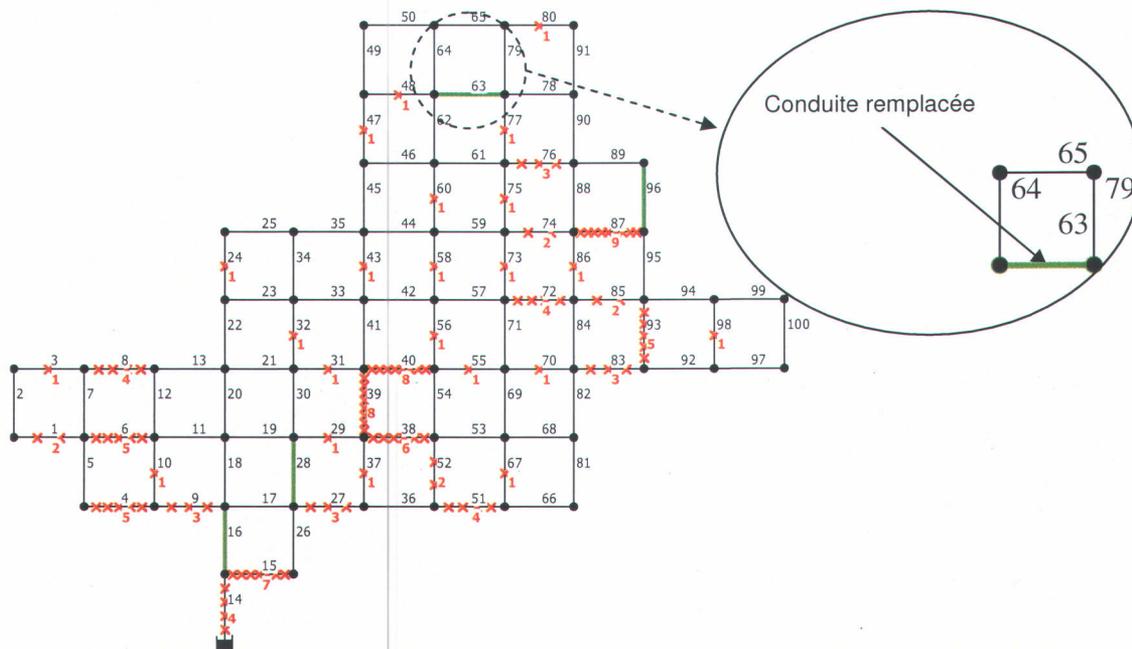


Figure E.3 Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 45 ans (quatre conduites ont été remplacées entre la 41^e et la 45^e année, ces conduites sont représentées en gras).

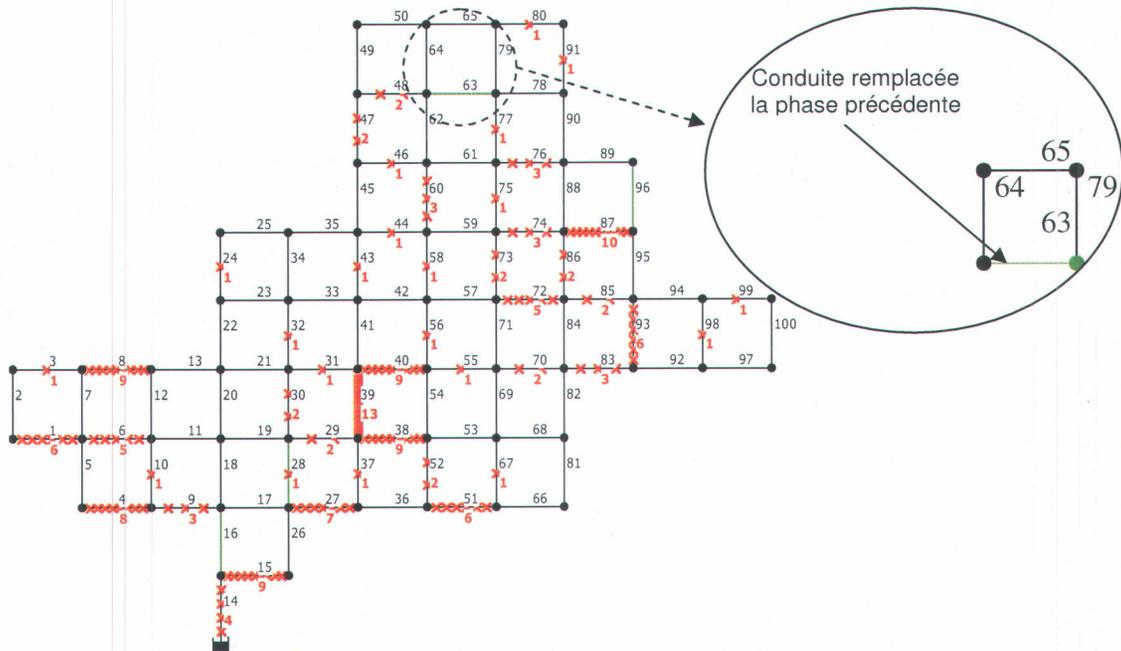


Figure E.4 Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 50 ans (aucune conduite n'a été remplacée entre la 46^e et la 50^e année, les conduites remplacées lors de la dernière phase sont en trait fin).

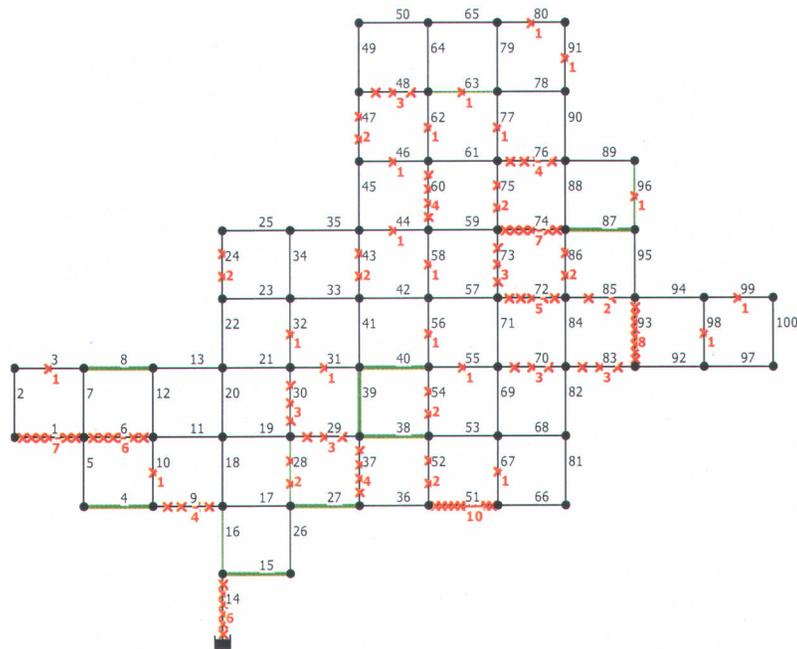


Figure E.5 Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 55 ans (huit conduites ont été remplacées entre la 51^e et la 55^e année).

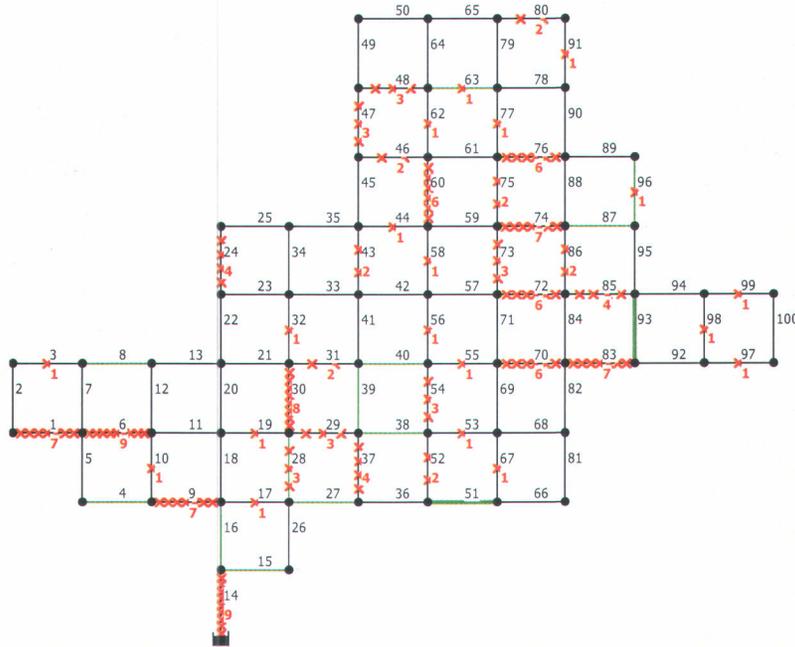


Figure E.6 Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 60 ans (deux conduites ont été remplacées entre la 56^e et la 60^e année).

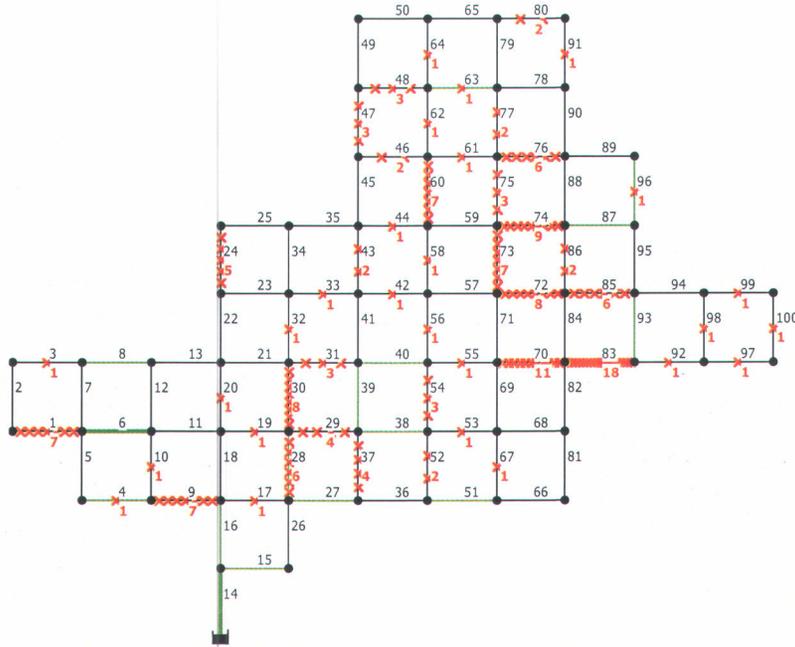


Figure E.7 Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 65 ans (deux conduites ont été remplacées entre la 61^e et la 65^e année).

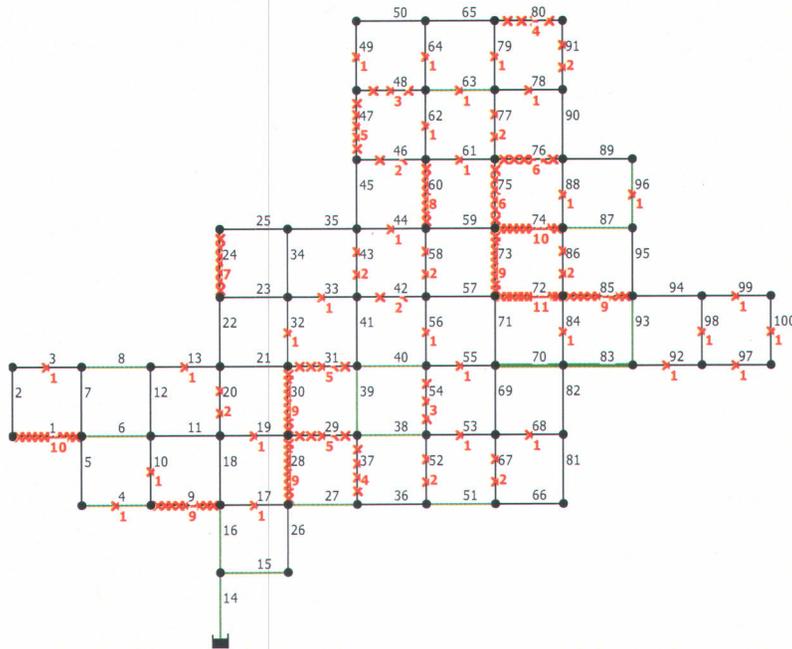


Figure E.8 Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 70 ans (deux conduites ont été remplacées entre la 65^e et la 70^e année).

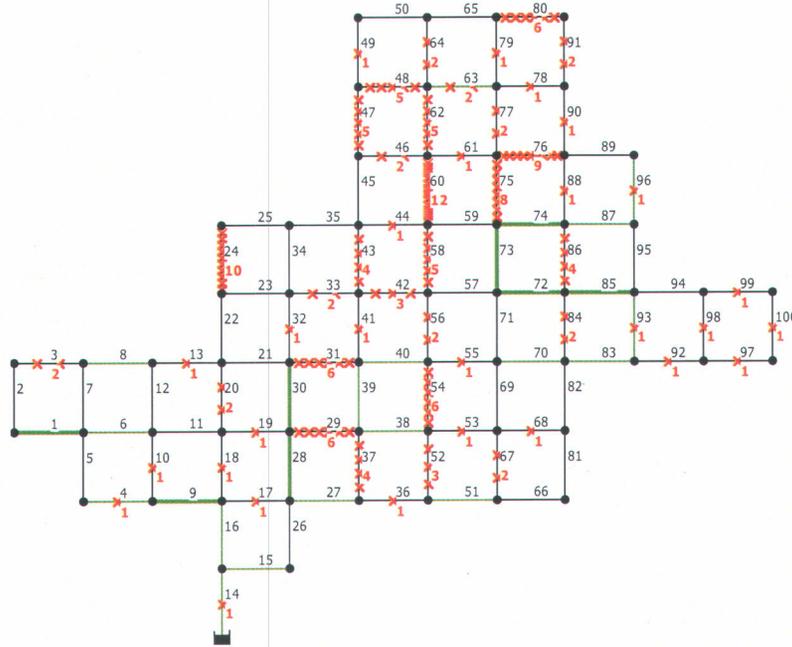


Figure E.9 Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 75 ans (huit conduites ont été remplacées entre la 71^e et la 75^e année).

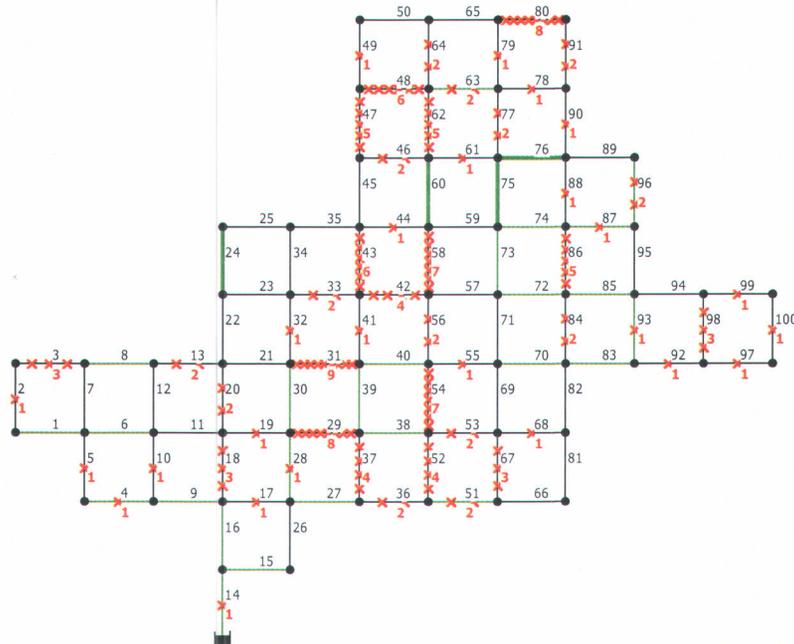


Figure E.10 Nombre de bris enregistrés pour chaque conduite après 80 ans (quatre conduites ont été remplacées entre la 76^e et la 80^e année).

Tableau E.1 Meilleurs moments de remplacement des conduites (réseau à 250 conduites)

N° phase	Nombre de conduites remplacées	Numéro de la conduite											
		<i>bris enregistré avant le remplacement - temps de remplacement en années</i>											
1	0												
2	0												
3	1	239 23-41											
4	5	16 18-46	28 22-46	118 16-49	129 18-46	196 24-46							
5	2	101 19-52	244 19-52										
6	7	40 17-60	87 24-56	140 22-56	154 17-60	164 21-56	168 19-57	202 22-56					
7	6	115 19-62	135 22-61	156 19-62	220 18-64	223 20-61	243 21-61						
8	10	8 14-69	63 16-66	96 14-69	128 17-66	162 17-66	167 18-66	211 20-66	228 20-66	235 17-66	240 14-69		
9	10	38 13-74	47 14-72	51 17-71	67 17-71	158 17-71	195 13-74	200 16-71	226 13-74	231 14-72	250 13-74		
10	6	4 17-76	43 16-77	83 16-77	107 16-77	159 17-76	186 22-76						

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alperovits E. et Shamir U. (1977). "Design of optimal water distribution systems". *Water Resources Research*, Vol. 13, N° 6, pp. 885-900.
- Andreou S.A., Marks D.H. et Clark R.M. (1987a). "A new methodology for modelling failure patterns in deteriorating water distribution systems: Theory". *Advances in Water Resources*, Vol. 10, N° 3, pp. 2-10.
- Andreou S.A., Marks D.H. et Clark R.M. (1987b). "A new methodology for modelling failure patterns in deteriorating water distribution systems: Applications". *Advances in Water Resources*, Vol.10, N° 3, pp. 11-20.
- Bäck T. (2000). *Introduction to evolutionary algorithms*. In "Evolutionary computation 2: Advanced algorithms and operators". Édité par : Bäck T., Fogel D.B. et Michalewicz Z.; Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 265 p.
- Bagchi T.P. (1999). *Multiobjective Scheduling by Genetic Algorithms*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 358 p.
- Banzhaf W., Nordin P., Keller R.E. et Francone F.D. (1998). *Genetic Programming: An Introduction, On the Automatic Evolution of Computer Programs and Its Applications*. Morgan Kaufmann Publishers-Dpunkt-verlag, 470 p.
- Brière F.G. (1997). *Distribution et collecte des eaux*. Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, édition revue et augmentée, 365 p.

- Campbell E.P., Fox D.R. et Bates B.C. (1999). "A bayesian approach to parameter estimation and pooling in nonlinear flood event models". *Water Resources Research*, Vol. 35, N° 1, pp.211-220.
- Cantù-Paz E. (2000). *Efficient and accurate parallel genetic algorithms*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 162 p.
- Carlier M. (1972). *Hydraulique générale et appliquée*. Collection du centre de recherches et d'essais de Chatou, Édition Eyrolles, Paris, 565 p.
- CERIU (1997). *Infrastructures souterraines, les techniques d'auscultations et de réhabilitation des infrastructures souterraines*. Publication du centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines.
- Cerrolaza M. et Annicchiarico W. (1999). "Genetic algorithms in shape optimization : finite and boundary element applications", pp.283-323. Dans : "Evolutionary algorithms in engineering and computer science: recent advances in genetic algorithms, evolution strategies, evolutionary programming, genetic programming and industrial applications". Édité par : Makela M., Miettinen K., Neittaanmaki P. et Periaux J., Chichester; New York: Wiley, 500 p .
- Cheung P.B., Reis F.R., Formiga K.T.M., Chaudhry F.H. et Ticona W.G.C. (2003a). "Multiobjective evolutionary algorithms applied to the rehabilitation of water distribution systems: a comparative study". Dans : *Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Second International Conference, EMO 2003, Faro, Portugal, Proceedings*. Édité par : Carlos M. Fonseca, Peter J. Fleming, Eckart Zitzler, Kalyanmoy Deb et Lothar Thiele: *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 662-676.

- Cheung P.B., Reis F.R. et Carrijo I.B. (2003b). "Multi-objective optimization to the rehabilitation of a water distribution network". Dans : *Advances in Water Supply Management: Proceedings of the International Conference on Computing and Control for the Water Industry*, London, Uk. Édité par : Maksimovic C., Butler D. et Memon F.A., 732 p, pp. 315-325.
- Chevalier M. (1996). "Entre la construction et la réhabilitation : les systèmes d'information des travaux publics". *Semaine des infrastructures urbaines*, Montréal, Québec, pp. 279-290.
- Clark R. M., Sivaganesan M., Selvakumar A. et Sethi V. (2002). "Cost models for water supply distribution systems". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 128, N° 5, pp.312-321.
- Clark R.M., Stafford C. L. et Goodrich J.A. (1982). "Water distribution systems: A Spatial and Cost Evaluation". *Journal of the Water Resources Planning and Management Division*, Vol. 108, N° WR3, pp. 243-256.
- Coello Coello Carlos A. (2000). "An updated survey of GA-based multiobjective optimization techniques". *ACM Computing Surveys*, ACM Press, Vol. 32, N° 2, pp.109-143.
- Coello Coello Carlos A. (2001). "A Short Tutorial on Evolutionary Multiobjective Optimization". In Eckart Zitzler, Kalyanmoy Deb, Lothar Thiele, Carlos A. Coello Coello and David Corne (éditeurs), *First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, Springer-Verlag, Lecture Notes in Computer Science N° 1993, pp. 21-40.
- Coello Coello Carlos A., Van Veldhuizen D.A. et Lamont G.B. (2002). *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Kluwer Academic Publishers, New York 576 p.

- Coin L. (1981). *La pratique de l'eau : usages domestiques collectifs et industriels*. Éditions du Moniteur, Paris, 435 p.
- Cox D.R. et Oakes D. (1994). *Analysis of Survival Data* : Chapman & Hall, London, 201 p.
- Cunha C.M. et Sousa J. (1999). "Water distribution network design optimization: simulated annealing approach". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 125, N° 4, pp. 215-221.
- Dandy G.C. et Engelhardt M. (2001). "Optimal scheduling of water pipe replacement using genetic algorithms". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 127, N° 4, pp. 214-223.
- Dandy G.C., Simpson A.R. et Murphy L.J. (1996). "An improved genetic algorithm for pipe network optimization". *Water Resources Research*, Vol. 32, N° 2, pp. 449-458.
- Deb K. et Goldberg D.E. (1991). "*mGA in C: A Messy Genetic Algorithm in C*". ILLiGAL Report N°91008. Illinois Genetic Algorithms Laboratory, Department of general Engineering, Urbana, 115 p.
- Deb K. (1999). "*Evolutionary Algorithms for Multi-Criterion Optimization in Engineering design*", pp. 135-161. Dans : "Evolutionary algorithms in engineering and computer science: recent advances in genetic algorithms, evolution strategies, evolutionary programming, geneti programming and industrial applications". Édité par : Makela M., Miettinen K., Neittaanmaki P. et Periaux J., Chichester; New York: Wiley, 500 p .

- Deb K. (2000). *Introduction to selection*. Dans : "Evolutionary computation 1: advanced algorithms and operators". Édité par : Bäck T., Fogel D.B., et Michalewicz Z.; Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 331 p.
- Deb K., Pratap A., Agarwal S. et Meyarivan T. (2002). "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II." IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, N° 2, pp.182–197.
- De Jong K. (1999). "Evolutionary Computation: Recent Developments and Open Issues", pp. 43-54. Dans : "Evolutionary algorithms in engineering and computer science: recent advances in genetic algorithms, evolution strategies, evolutionary programming, genetic programming and industrial applications". Édité par : Makela M., Miettinen K., Neittaanmaki P. et Periaux J., Chichester; New York: Wiley, 500 p.
- Eisenbeis P. (1994). "Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable". Études du Cémagref, Série Équipements pour l'eau et l'environnement. N° 17, 248 p.
- Eisenbeis P., Rostum J. et Le Gat Y. (1999). "Statistical models for assessing the technical state of water networks: some European experiences". Annual conference American water works association, Chicago, USA, 20-24 juin, 13 p.
- Elnaboulsi J. et Alexandre O. (1996). "Le renouvellement des réseaux d'eau potable : une revue critique". *Canadian Water Resources Journal (Revue canadienne des ressources hydriques)*, Vol. 21, N° 4, pp.341-354.

Engelhardt M.O., Skipworth P.J., Savic D.A, Saul A.J. et Walters G.A. (2000). "Rehabilitation strategies for water distribution networks: a literature review with a UK perspective". *Urban Water*, N° 2, pp.153-170.

Erickson M., Mayer A. et Horn J. (2001). "*The Niche Pareto Genetic Algorithm 2 Applied to the Design of Groundwater Remediation Systems*". Dans : Eckart Zitzler, Kalyanmoy Deb, Lothar Thiele, Carlos A. Coello Coello et David Corne, éditeurs, First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, pp. 681-695. Springer-Verlag. Lecture Notes in Computer Science, N° 1993, pp. 681-695.

Eusuff M.M. et Lansey K.E. (2003). "Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 129, N° 3, pp. 210-225.

Fortin M. (2004). Analyse de réseau, manuel de référence. INRS-ETE, 24 p.

Fujiwara O. et Khang D.B. (1990). "A two phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks". *Water Resources Research*, Vol. 26, N° 4, pp. 539-549.

Gagné C. et Parizeau M. (2004). Open BEAGLE, a versatile EC framework (*Open BEAGLE, un environnement générique pour effectuer des AE*). http://www.gel.ulaval.ca/~beagle/index_f.html

Gelman A., Carlin J.B., Stern H.S. et Rubin D.B. (2000). *Bayesian data analysis*. Chapman & Hall, 526 p.

Goldberg D.E. (1994). *Algorithmes génétiques : exploration, optimisation et apprentissage automatique*. Traduction de l'anglais (américain) par Vincent Corruble. Éditions Addison-Wesley France, 417 p.

- Goldberg D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley Longman, 412 p.
- Gomella C. et Guerrée H. (1980). *La distribution d'eau dans les agglomérations urbaines et rurales*. Éditions Eyrolles, Paris, 280 p.
- Gustafson J.M. et Clancy D.V. (1999a). "Modeling the occurrence of breaks in cast iron water mains using methods of survival analysis". Proceedings of the AWWA annual conference, Chicago.
- Gustafson J.-M. et Clancy D.V. (1999b). "Using Monte Carlo simulation to develop economic decision criteria for the replacement of cast iron water mains". Proceedings of the AWWA annual conference, Chicago.
- Herz R.K. (1996). "Ageing processes and rehabilitation needs of drinking water distribution networks". *J Water SRT-Aqua*, Vol. 45, N° 5, pp.221-231.
- Halhal D., Walters G.A., Ouazar D. et Savic D.A. (1997). "Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, N° 3, pp. 137-146.
- Halhal D., Walters G.A., Savic D.A. et Ouazar D. (1999a). "Scheduling of water distribution system rehabilitation using structured messy genetic algorithm". *Evolutionary Computation*, Vol. 7, N° 3, pp. 311-329.
- Halhal D., Walters G.A., Savic D.A. et Ouazar D. (1999b). "Optimal Phasing of Water Distribution Systems Rehabilitation". Dans : *Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications*, Vol. 2, Savic, D.A. et G.A. Walters (éditeurs), Research Studies Press, Baldock, Hertfordshire, England, pp. 437-448.

- Horn J. et Nafpliotis N. (1993). “ *Multiobjective Optimization using the Niche Pareto Genetic Algorithm*”. Technical Report IlliGAI Report 93005, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, USA, 32 p.
- Horn J., Nafpliotis N. et D.E. Goldberg (1994). “A *Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization*”. Dans : Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence, Vol. 1, pp. 82-87, Piscataway, New Jersey. IEEE Service Center.
- Keedwell E.C. et Khu S.T. (2003). “More choices in water systems design through hybrid optimisation”. Dans : *Advances in Water Supply Management: Proceedings of the International Conference on Computing and Control for the Water Industry*, London, Uk. Edité par : Maksimovic C., Butler D. et Memon F.A., 732 p., pp. 257-264.
- Kim J. H. et Mays L. W. (1994). “Optimal Rehabilitation Model for Water Distribution Systems”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 120, N° 5, pp. 674-692.
- Kleiner Y. et Rajani B.B. (1999). “Using limited data to assess future needs”. *Journal of American Water Works Association*. Vol. 91, N° 7, pp.47-61.
- Kleiner Y., Adams B.J. et Rogers J.S. (1998a). “Long-term planning methodology for water distribution system rehabilitation”. *Water Resources Research*, Vol. 34, N° 8, pp. 2039-2051.
- Kleiner Y., Adams B.J. et Rogers J.S. (1998b). “Selection and scheduling of rehabilitation alternatives for water distribution systems”. *Water Resources Research*, Vol. 34, N° 8, pp. 2053-2061.

- Kleiner Y. et Rajani B.B. (2001). "Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models". *Urban Water*, Vol.3, N° 3, pp.131-150.
- Kleiner Y., Adams B.J. et Rogers J.S. (2001). "Water distribution network renewal planning". *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 15, N° 1, pp.15-26.
- Lamont P.A. (1981). "Common pipe flow formulas compared with the theory of roughness". *Journal of American Water Works Association*. Vol. 73, N° 5, pp. 274-280.
- Langdon W.B. (1998). " Genetic programming and data structures: genetic programming + data structures = automatic programming !". Boston: Kluwer Academic Publishers, 278 p.
- Lei J. et Seagrov S. (1998). "Statistical approach for describing failures and lifetimes of water mains". *Water Science and Technology*, Vol.38, N° 6, pp. 209-217.
- Le Gauffre P. et Eisenbeis P. (2004). "Gestion patrimoniale des infrastructures : de nouveaux outils d'aide à la décision". Dix-septièmes entretiens Jacques Cartier. Colloque « Eau potable et technologies environnementales : enjeux internationaux », Centre Eau, Terre et Environnement – Institut national de la recherche scientifique. Québec, 4 - 5 octobre 2004, pp. 1-15.
- Le Gat Y. et Eisenbeis P. (2000). "Using maintenance records to forecast failures in water networks". *Urban Water*, Vol. 2, N° 3, pp. 173-181.
- Lencastre A. (1996). *Hydraulique générale*. Éditions Eyrolles, Paris, 633 p.

- Lévin L. (1966). Difficultés du calcul des pertes de charge linéaires dans les conduites forcées. *La Houille Blanche*, N° 1, pp.41-54.
- Loganathan G.V., Park S. et Serali H.D. (2002). "Threshold break rate for pipeline replacement in water distribution systems". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 128, N° 4, pp. 271-279.
- Mailhot A., Pelletier G., Noël J.-F. et Villeneuve J.-P. (2000). "Modeling the evolution of the structural state of water pipe networks with brief recorded pipe break histories: methodology and application ". *Water Resources Research*, Vol. 36, N° 10, pp. 3053-3062.
- Mailhot A., Poulin A. et Villeneuve J.-P. (2003). "Optimal replacement of water pipes". *Water Resources Research*, Vol. 39, N° 5, 1136, doi:10.1029/2002WR001904.
- Male J.W., Walski T.M. et Slutsky A.H. (1990). "Analyzing water main replacement policies". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 116, N° 3, pp. 362-374.
- Martz H.F. et Waller R.A. (1982). *Bayesian reliability analysis*. John Wiley & Sons Inc., New York, 745 p.
- Meadows M.E. et Walski T.M. (1997). *Computer applications in hydraulic engineering*. Third edition, Haestad Press, 316 p.
- Michalewicz Z., Deb K., Schmidt M. et Stidsen TH. (1999). "Evolutionary algorithms for engineering applications". pp.73-94. Dans : "Evolutionary algorithms in engineering and computer science: recent advances in genetic algorithms, evolution strategies, evolutionary programming, genetic

programming and industrial applications". Edité par : Makela M., Miettinen K., Neittaanmaki P. et Periaux J., Chichester; New York: Wiley, 500 p.

Miettinen K. (2001). "Some Methods for Nonlinear Multi-objective Optimization". Dans : Eckart Zitzler, Kalyanmoy Deb, Lothar Thiele, Carlos A. Coello Coello et David Corne (éditeurs), *First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, Springer-Verlag, Lecture Notes in Computer Science, N° 1993, pp. 1-20.

Montesinos P., Garcia-Guzman A. et Ayuso J.L. (1999). "Water distribution network optimization using a modified genetic algorithm". *Water Resources Research*, Vol. 35, N° 11, pp. 3467-3473.

Ormsbee L. E. et Lingireddy S. (1997). "Calibrating hydraulic network models". *Journal of American Water Works Association*. Vol. 89, N° 2, pp. 42-50.

Pelletier G. (2000). *Impact du remplacement des conduites d'aqueduc sur le nombre annuel de bris*. Thèse de doctorat, INRS-Eau, 232 p.

Pelletier G., Mailhot A. et Villeneuve J.-P. (2003). "Modeling water pipe breaks – three case studies". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 129, N° 2, pp. 115-123.

Press S.J. (1989). *Bayesian statistics: principles, models, and applications*. John Wiley & Sons Inc. New York, 237 p.

Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. et Flannery B.P. (1992). *Numerical Recipes in C, The art of scientific computing*. Cambridge University Press, Cambridge, 994 p.

- Rajani B.B. et Kleiner Y. (2001). "Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models". *Urban Water*, Vol.3, N° 3, pp.151-164.
- Robert C.P. (1992). *L'analyse statistique bayésienne*. Economica, 393 p.
- Rossman L.A. (2000). *EPANET 2 Users Manual*. Environmental Protection Agency, 200 p. <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/wswrd/EN2manual.PDF>
- Ryan C. (1995). "Niche and species formation in genetic algorithms". Dans : *Practical handbook of genetic algorithms: applications, volume 1*. Édité par : Lance Chambers, pp. 57-74.
- Ryan C. (2000). *Automatic Re-Engineering of Software using Genetic Programming*. Kluwer Academic Publishers, 140 p.
- Savic D. A., Walters G. A., et Schwab M. (1997). "Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling in water supply". Dans : *AISB International Workshop on Evolutionary Computing. Lecture Notes in Computer Science 1305*, pp. 227-236, Berlin, Springer-Verlag.
- Savic D.A. et Walters G.A. (1997). "Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, N° 2, pp. 67-77.
- Savic D.A. et Walters G.A. (2000). "Genetic algorithm optimization for design and management of water systems". *Engineering Design Optimization: Product and Process Improvement, Proceedings of the 2nd ASMO/ISSMO Conference on Engineering Design Optimization*, Swansea, Wales, 10-11 juillet, J. Sienz (ed.), pp. 205-210.

- Saegrov S., Melo Baptista J.F., Conroy P., Herz R.K., LeGauffre P., Moss G., Oddevald J.E., Rajani B. et Schiatti M. (1999). "Rehabilitation of water networks. Survey of research needs and on-going efforts". *Urban Water*, Vol. 1, N° 1, pp. 15-22.
- Selvakumar A., Clark R. M. et Sivaganesan M. (2002). "Costs for water supply distribution system rehabilitation". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 128, N° 4, pp.303-306.
- Shamir U. et Howard C.D.D. (1979). "An analytic approach to scheduling pipe replacement". *Journal of American Water Works Association*. N°71, pp. 248-258.
- Sharp W.W. et Walski T.M. (1988). "Predicting internal roughness in water mains". *Journal of American Water Works Association*. N° 80, pp.34-40.
- Srinivas N. et Deb K. (1994). "*Multiobjective Optimization using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms*". *Evolutionary Computation*, Vol. 2, N° 3, pp. 221-248.
- Tanner M.A. (1996). *Tools for statistical inference: methods for the exploration of posterior distributions and likelihood functions*. New York, Springer, 207 p.
- Todini E. et Pilati S. (1987). "A gradient algorithm for the analysis of pipe networks", Proceedings of the International Conference On Computer Applications for water supply and distribution, Leicester polytechnic, Leicester, UK.
- Todini E. (2003). "A more realistic approach to the extended period simulation of water distribution networks". Dans : *Advances in Water Supply Management : Proceedings of the International Conference on Computing*

and Control for the Water Industry, London, Uk. Édité par : Maksimovic C., Butler D. et Memon F.A., 732 p., pp. 173-183.

Tomassini M. (1999). "Parallel and distributed evolutionary algorithms: A Review". pp.113-133. Dans : "Evolutionary algorithms in engineering and computer science: recent advances in genetic algorithms, evolution strategies, evolutionary programming, genetic programming and industrial applications". Édité par : Makela M., Miettinen K., Neittaanmaki P. et Periaux J., Chichester; New York: Wiley, 500 p .

Torre F., Boreux J.-J. et Parent E. (2001). "The Metropolis-Hastings Algorithm, a handy tool for the practice of Environmental Model Estimation: illustration with Biochemical Oxygen Demand Data". Site Internet <http://193.55.107.45/DURHAM/torre/TORRE.HTM>

Vairavamoorthy K. et Ali M. (2000). "Optimal design of water distribution systems using genetic algorithm". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 15, N° 5, pp. 374-382.

Valiron F. (1994). *Mémento du gestionnaire de l'alimentation en eau et de l'assainissement*. Tome 1 : Eau dans la ville, alimentation en eau. Lyonnaise des eaux. Techniques et Documentation – Lavoisier -, Paris 435 p.

Vetterling W.T., Press W.H., Teukolsky S.A. et Flannery B.P. (1992). *Numerical Recipes example book [C], The art of scientific computing*. Cambridge University Press, Cambridge, 325 p.

Walski T.M et Pelliccia A. (1982). "Economic analysis of water main breaks". *Journal of American Water Works Association*. N° 74, pp.140-147.

- Walski T.M. (1987). "Replacement rules for water mains". *Journal of American Water Works Association*. N° 79, pp.33-37.
- Walski T.M., Chase D.V. et Savic D. (2001). *Water Distribution Modelling*. Waterbury Ct : Haestad Press, 441 p.
- Walski T.M., Chase D.V., Savic D., Grayman W.M., Beckwith S. et Koelle E. (2003). *Advanced water distribution modelling and management*. Waterbury Ct: Haestad Press, 751 p.
- Walters G. A., Halhal D., Savic D. A. et Ouazar D. (1999). "Improved design of "Anytown" distribution network using structured messy genetic algorithms". *Urban Water* N° 1, pp. 23-38.
- Wang Q.J. (2001). "A bayesian joint probability approach for flood record augmentation". *Water Resources Research*, Vol. 37, N° 6, pp. 1707-1712.
- Watson T., Christian C., Mason A., Smith M. et Myers R. (2001a). Bayesian based Decision Support System for Water distribution Systems. www.esc.auckland.ac.nz/Mason/Papers/Water_WatsonUK2002/WatsonHydroinformatics.pdf
- Watson T., Christian C., Mason A. et Smith M. (2001b). Maintenance of Water Distribution Systems. Dans : Proceedings of the the 36th Annual Conference of the Operational Research Society of New Zealand, University of Canterbury, New Zealand, 30 novembre - 1 décembre, pp. 57-66.
- Wu Z.Y., Boulos P.F., Orr C.H. et Ro J.J. (2001). "Using genetic algorithms to rehabilitate distribution systems". *Journal of American Water Works Association*. Vol. 93, N° 11, pp.74-85.

Zhao J.Q. et Rajani B. (2002). "Construction and Rehabilitation Costs for Buried Pipe with a Focus on Trenchless Technologies". IRC Research Report, N° 101. <http://www.nrc.ca/irc/fulltext/rr101/rr101.pdf>

**REPROGRAPHIE DE LA REMISE FINALE
DU MÉMOIRE OU DE LA THÈSE**

Lors de la remise finale de mon mémoire ou de ma thèse, les photocopies ont été effectuées par :

l'étudiant(e) :

DRIDI Léila



*Les photocopies effectuées par l'étudiant(e)
seront sous sa responsabilité.*

Nom



Signature

Nom du directeur de recherche:

Jean-Pierre Villeneuve

Nom du co-directeur de recherche:

Alain Jailhot et Yara Parizeau

Boursier ou non-boursier: