

THÈSE DE DOCTORAT

Université Louis Pasteur, Strasbourg I

Discipline : *Sciences de Gestion*

LA PROGRAMMATION PLURIANNUELLE DU RENOUVELLEMENT DES RESEAUX D'EAU POTABLE

Par : *Amir NAFI*

Soutenue publiquement le : 08/12/2006

Composition du jury :

Patrick Roger, Professeur à l'Université Louis Pasteur, Strasbourg (Rapporteur)

Dominique Gueguan, Professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan (Rapporteur)

Vincent Giard, Professeur à l'Université Paris Dauphine (Rapporteur)

Bernard Brémond, Directeur de recherche au Cemagref Bordeaux (Examineur)

Jerzy Korczak, Professeur à l'Université Louis Pasteur (Invité)

Patrick Llerena, Professeur à l'Université Louis Pasteur (Directeur de thèse)

Caty Wery, Docteur à l'Ecole Nationale de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg-Cemagref (Co-encadrante)

Laboratoire d'accueil

Unité Mixte de Recherche en Gestion des Services Publics

Cemagref-Enges

1 quai Koch PB61039

67070 Strasbourg cedex.

Remerciements

Je tiens à remercier mes collègues de l'UMR Cemagref-Enges en Gestion des Services Publics (GSP) qui m'ont soutenu tout au long de la thèse et pour le soutien matériel et logistique de la part de l'unité de recherche GSP, du Bureau d'Economie Théorique et Appliquée (BETA) et de l'Université Louis Pasteur pour la réalisation de ce travail de recherche.

Je remercie tout particulièrement mon encadrante Mme Caty WEREY et mon directeur de thèse M.Patrick LLERENA pour leur encadrement, les remarques et conseils qu'ils m'ont prodigués au cours de l'élaboration de ce modeste travail.

Un vif merci à ma famille qui m'a toujours soutenu, réconforté et cru en moi dans cette formidable et unique aventure qui est la thèse. A mes parents, à ma femme, à mes frères et à ma sœur.

Sommaire

Introduction générale **20**

Chapitre 1 - Problématique de thèse et éléments de réponse

1. Introduction	29
2. La problématique de renouvellement des réseaux d'eau potable	30
3. Le renouvellement et les choix d'investissement	34
4. La gestion du patrimoine et les réseaux d'eau potable	37
4.1 La gestion du patrimoine - Asset Management : Définition	38
4.2 La gestion du patrimoine appliquée aux réseaux AEP	40
4.2.1 L'analyse économique	42
4.2.2 L'analyse technique	43
5. La programmation pluriannuelle et la décision de renouvellement	44
5.1 Absence de contraintes budgétaires, disponibilité de la ressource financière	46
5.2 Contraintes budgétaires, insuffisance de la ressource financière	47
6. Conclusion	49

Chapitre 2 - Fonctionnement du réseau AEP et fiabilité hydraulique

1. Introduction	54
2. L'Alimentation en Eau Potable (AEP)	54
2.1 Fonctions d'Alimentation en Eau Potable	54
3. La distribution de l'eau potable en France	55
4. La distribution et les réseaux AEP	57
4.1 Structure du réseau AEP	57
4.1.1 Les conduites	58
4.1.2 Les nœuds	61
4.1.3 Topologie du réseau AEP	64
5. La modélisation hydraulique du réseau AEP	65
5.1 Modèle pour le dimensionnement du réseau	65
5.2 Modèle pour l'analyse du fonctionnement hydraulique et diagnostic	65
5.3 Modèle pour la gestion du réseau	65
5.4 Modèle pour la mesure de la qualité de l'eau	66
5.5 Précision du modèle et représentation du réseau AEP	66
6. Etude de la fiabilité hydraulique des réseaux	67
6.1 Modèles pour la fiabilité hydraulique des réseaux AEP	70
6.1.1 Failnet-Reliab (CEMAGREF)	71
6.1.2 Relnet (Université de Technologie de Brno)	72
6.1.3 Aquarel (SINTEF)	73
7. Prise en compte de l'effet réseau et mesure de l'importance d'une conduite	74
7.1 Indices de fiabilité hydrauliques	76
7.1.1 Indice de Criticité Hydraulique	76
7.1.2 Indice de déficience aux nœuds	78
7.2 Données nécessaires et calcul des indices de fiabilité	78
8. Conclusion	81

Chapitre 3 - Modèles et approches pour le renouvellement des réseaux d'eau potable

1.	Introduction	84
2.	Les approches pour la hiérarchisation des conduites	84
2.1	Approches basées sur la prévision des défaillances	84
2.1.1	Approche par chaînes de Markov	85
2.1.2	L'analyse multicritères	87
3.	Les approches d'optimisation de la date de renouvellement	89
3.1	Approche d'optimisation à l'aide de méthodes exactes	89
3.1.1	Le modèle de référence	89
3.1.2	L'approche MNRAP (Multistage Network Rehabilitation Analysis Procedure)	90
3.1.3	Approche d'optimisation par méthodes des cohortes	91
3.1.4	Le modèle RENCANA	92
3.1.5	Approche d'optimisation par Branch & Bound	93
3.1.6	Approches d'optimisation par méthodes non-exactes	94
3.2	Les modèles d'aide à la décision	94
3.2.1	Le modèle KANEW	94
3.2.2	Le modèle UtilNets	94
3.2.3	Le WLC (Whole Life Costing)	95
3.2.4	Le modèle PARMS (Pipeline Asset and Risk Management System)	96
3.2.5	Le modèle CARE-W (Computer Aided Rehabilitation of Water Networks)	96
4.	Conclusion	100

Chapitre 4 - Les algorithmes génétiques et l'optimisation multiobjectif

1.	Introduction	104
2.	Principes : Définition et vocabulaire	104
3.	L'Algorithme Génétique Simple (AGS)	106
3.1	Génération de la population initiale et codage des individus	106
3.2	Evaluation de la population	106
3.3	La sélection des individus	107
3.3.1	La sélection par tournoi	107
3.3.2	La sélection par roulette	107
3.3.3	La sélection par rang	107
3.4	L'opération de croisement	108
3.4.1	Opération de croisement simple	108
3.4.2	Opération de croisement uniforme	108
3.5	L'opération de mutation	109
4.	Métaheuristiques, optimisation multiobjectif et algorithmes génétiques	110
4.1	Définition d'un problème multi-objectif	111
4.2	Méthodes de résolution	112
4.2.1	Méthodes scalaires	112
4.2.2	Méthode non-Pareto	113
4.2.3	Méthodes Pareto	114
5.	Approche multiobjectif et Algorithme Génétique	115
5.1	Les méthodes non élitistes	115
5.1.1	Multiple Objective Genetic Algorithm (MOGA)	115
5.1.2	Non dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)	116

5.1.3	Niched Pareto Genetic Algorithm (NPGA)	117
5.2	Les méthodes élitistes	118
5.2.1	Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)	118
5.2.2	Pareto Archived Evolution Strategy (PAES)	118
5.2.3	Pareto Envelope based Selection Algorithm (PESA)	119
5.2.4	Pareto Envelope based Selection Algorithm II (PESA II)	119
5.2.5	Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA II)	120
5.2.6	Non sorting Genetic Algorithm II (NSGA II)	120
5.3	Comparaison des approches multiobjectif	121
6.	Applications diverses des algorithmes génétiques et de l'optimisation multiobjectif	124
6.1	Algorithme génétique et infrastructures routières	124
6.2	Algorithmes génétiques et problèmes d'ordonnancement	127
6.3	Algorithmes génétiques dans le domaine de l'eau	129
6.3.1	Les algorithmes génétiques et le dimensionnement des réseaux AEP	129
6.3.2	Les algorithmes génétiques et le renouvellement des réseaux AEP	131
7.	Conclusion	136

Chapitre 5 - Présentation du modèle d'aide à la décision

1.	Introduction	139
2.	Les hypothèses	139
3.	Identification des données	141
3.1	Données portant sur la conduite et le réseau	141
3.2	Données liées au coût des travaux	142
3.2.1	Les coûts liés à la conduite	143
3.2.2	Les coûts de terrassement	143
4.	Sélection des conduites candidates	145
4.1	Analyse de la fiabilité hydraulique	145
4.2	Analyse de la détérioration structurelle	146
4.3	Prise en compte de l'état de la chaussée et travaux de voirie	148
5.	Formulation du problème	149
5.1	Les variables de décision	151
5.2	Fonctions objectifs et contraintes	152
6.	Approche d'optimisation multiobjectif	153
6.1	Définition du codage et génération des solutions	155
6.2	Evaluation de la fonction objectif technique	156
6.3	Evaluation de la fonction objectif économique	157
6.4	Détermination du rang et calcul de la fonction d'adaptation	158
6.5	Création de nouvelles solutions	160
6.5.1	La procédure de sélection	160
6.5.2	Le croisement et la mutation	160
6.6	Mélange avec la solution initiale	161
6.7	Convergence de l'algorithme	161
7.	Programmation pluriannuelle	162
7.1	Programmation des travaux sur le réseau	163
8.	Le modèle d'aide à la décision	166
9.	Conclusion	168

Chapitre 6 – Implémentation du modèle

1.	Identification des données	173
1.1	Identification des données sur la conduite et le réseau	173
1.2	Identification des données de coûts	175
2.	Sélection des conduites candidates	176
2.1	Analyse du fonctionnement du réseau	177
2.2	Analyse de la fiabilité hydraulique en cas de défaillance	178
2.3	Détérioration structurelle	181
3.	Détermination de politiques de renouvellement acceptables	185
4.	Programmation pluriannuelle	194
4.1	Identification d'une programmation des travaux de renouvellement	195
4.2	Impact de la programmation des travaux sur le fonctionnement du réseau AEP	200
4.3	Etude de sensibilité de la programmation pluriannuelle à la politique budgétaire	205
5.	Conclusion	210
	Conclusion générale	213
	Bibliographie	220
	Annexes	230

Liste des figures

Figure 1. Description du processus de détérioration des conduites d'eau potable (Adapté de Rajani & Kleiner, 2001).	33
Figure 2. Types d'investissement.	35
Figure 3. La processus de gestion du patrimoine (Adapté de FHWA,1999 et EPA, 2003)	39
Figure 4. La gestion du réseau d'eau potable	40
Figure 5. Outil d'aide à la décision pour la gestion du réseau AEP (Adapté de Skipworth et al., 2002)	42
Figure 6. Décision de renouvellement et programmation budgétaire	46
Figure 7. Programmation du renouvellement sous contrainte budgétaire	47
Figure 8. Relation entre la contrainte budgétaire, la réalisation des travaux de renouvellement et la performance du réseau	48
Figure 9. Le processus de production et distribution de l'eau	55
Figure 10. Exemple de courbe caractéristique d'une pompe	60
Figure 11. Exemple de Courbe de consommation Courbe de modulation au jour de pointe	62
Figure 12. Exemple de courbe de volume d'un réservoir	63
Figure 13. Représentation schématique d'un réseau d'alimentation en eau potable	64
Figure 14. Modélisation du réseau AEP : prise en compte de l'aspect hydraulique et structurelle	66
Figure 15. Niveau de desserte en fonction de la pression (Adapté de Wagner et al.,1988)	76
Figure 16. Calcul des Indices de fiabilité hydraulique	77
Figure 17. Collecte des données	85
Figure 18. Profils de performance de 3 conduites en considérant 5 critères et 3 classes de conduites	88
Figure 19. Principe de recherche de solutions dans les algorithmes génétiques	105
Figure 20. Codage d'une solution sous forme de chromosome	106

Figure 21. Procédure de croisement dans le cas d'un codage binaire	108
Figure 22. Procédure de croisement uniforme dans le cas d'un codage entier	109
Figure 23. Opération de mutation	109
Figure 24. Les principales étapes d'un algorithme génétique	110
Figure 25. Dominance et solutions Pareto optimales pour un problème de minimisation	114
Figure 26. Comparaison des performances des approches d'optimisation multiobjectif (les flèches pointent vers les meilleurs) Adapté de (Roudenko, 2004).	121
Figure 27. Coupe de fouille retenue pour les travaux de terrassement et pose d'une conduite neuve (Janel et al., 2001)	143
Figure 28. La sélection des conduites candidates au renouvellement	148
Figure 29. Exemple d'une politique de renouvellement concernant p conduites et I alternatives de renouvellement	151
Figure 30. Algorithme d'optimisation multiobjectif Politique_Ren	154
Figure 31 . Exemple d'une politique de renouvellement concernant p conduites et 3 alternatives de renouvellement.	155
Figure 32. Procédure de calcul de la fonction objectif technique F1	157
Figure 33. Procédure de calcul de la fonction objectif économique	158
Figure 34. L'opération de croisement	160
Figure 35. L'opération de mutation	161
Figure 36. La détermination d'une politique de renouvellement acceptable	162
Figure 37. Programmation des travaux de renouvellement sur Ω années	165
Figure 38. Le modèle d'aide à la décision	167
Figure 39. La modélisation hydraulique du réseau étudié	175
Figure 40. Répartition de la valeur à neuf d'une conduite	176
Figure 41. La courbe de consommation domestique au jour de pointe (Epanet2)	177
Figure 42. La détérioration de la capacité hydraulique du réseau à la période de pointe (Epanet 2)	178
Figure 43. La macro Mesure_fiabilité qui calcule les indices de fiabilité hydraulique	179
Figure 44. Evolution du ICH sur 24 h pour la conduite 184	180
Figure 45. Evolution de l'IDN sur 24 h pour la conduite 184.	181

Figure 46. Les solutions non-dominées représentant des politiques de renouvellement acceptables	188
Figure 47. Les solutions non dominées représentant des politiques de renouvellement acceptables	191
Figure 48. Les solution non dominées pour la première année de programmation pluriannuelle	193
Figure 49. La programmation pluriannuelle et la contrainte budgétaire.	191
Figure 50. Répartition des coûts de travaux renouvellement.	193
Figure 51. Evolution de la fonction F3 .	196
Figure 52. Evolution de la pression minimale dans le réseau	197
Figure 53. Evolution de la proportion de la longueur des conduites renouvelées en raison de leur détérioration structurelle.	198
Figure 54. Répartition des coûts de renouvellement pour les 4 programmes identifiés.	198
Figure 55. Longueur du réseau renouvelé à chaque à chaque année	198
Figure 56. Comparaison de l'évolution de la fonction F3	201
Figure 57. Comparaison de l'évolution de la proportion de conduites de la longueur des conduites renouvelées en fonction de la détérioration structurelle	202
Figure 58. Evolution de la pression minimale	203
Figure 59. Evolution des coûts de renouvellement pour les 3 scénarios	203
Figure 60. Evolution de la longueur du réseau renouvelée pour les 3 scénarios	204
Figure 61. Evolution de la performance hydraulique dans le réseau pour les 3 scénarios	207
Figure 62. Comparaison de l'évolution de la proportion de conduites de la longueur des conduites renouvelées en fonction de la détérioration structurelle.	208

Liste des algorithmes

Algorithme .1. Calcul des indices de fiabilité ICH et IDN à l'aide de Mesure_fiabilité.	80
Algorithme. 2. Calcul de rang et de la fonction d'adaptation	159

Liste des tableaux

Tableau 1. La gestion du patrimoine adaptée au renouvellement des réseaux d'eau potable	41
Tableau 2. Modes de gestion des services de distribution et d'assainissement en France (Tavernier, 2001)	56
Tableau 3. Parts de marché des prestataires privés dans la distribution de l'eau (Tavernier 2001)	56
Tableau 4. Caractéristiques des conduites selon le matériau la constituant	59
Tableau 5. La courbe de consommation ou courbe de modulation	61
Tableau 6. Comparaison des approches et modèles pour le renouvellement	99
Tableau 7. Algorithmes génétiques et vocabulaire	105
Tableau 8. comparaison des méthodes d'optimisation multiobjectif	122
Tableau 9. Algorithmes génétiques et infrastructures routières	126
Tableau 10. Algorithme génétique et problèmes d'ordonnancement.	128
Tableau 11. Algorithme génétique et réseaux d'eau potable	133
Tableau 12. Application des algorithmes génétiques et de l'optimisation multiobjectif pour la renouvellement des réseaux AEP	135
Tableau 13. Adaptation du vocabulaire concernant l'algorithme génétique au renouvellement	158
Tableau 14. Description de la population à chaque génération	159
Tableau 15. Les variables de décision pour la programmation des travaux	163
Tableau 16. Vocabulaire liés à la programmation des travaux et l'algorithme génétique.	164
Tableau 17. Correspondance entre les conduites inventoriées et celles du modèle hydraulique	174
Tableau 18. Relation entre diamètre de remplacement, diamètre de renforcement et le matériau	175
Tableau 19. Résultats de la régression sur durée de survie à l'aide du modèle PHM	182
Tableau 20. Les conduites candidates au renouvellement.	184
Tableau 21. Evaluations des politiques de renouvellement à l'aide de Eval_solution	186

Tableau 22. Calcul de la métrique C	187
Tableau 23. Comparaison des simulations pour la détermination de la probabilité de mutation	189
Tableau 24. Les politiques de renouvellement proposées par l'algorithme génétiques	189
Tableau 26. Les conduites faisant l'objet de renouvellement dans la majorité des solutions proposées	190
Tableau 27. Répartition des conduites faisant l'objet de renouvellement en fonction du critère de sélection	190
Tableau 28. Les politiques de renouvellement proposées par l'algorithme génétique	192
Tableau 29. Les conduites faisant l'objet de travaux dans la majorité des solutions proposées	193
Tableau 30. Répartition des conduites faisant l'objet de travaux en fonction du critère de sélection	193
Tableau 31. La solution retenue pour la programmation pluriannuelle	194
Tableau 32. Programmation pluriannuelle des travaux de renouvellement, Programme1	196
Tableau 33. Programmation pluriannuelle des travaux de renouvellement, Programme 2	200
Tableau 34. Programmation pluriannuelle des travaux de renouvellement, Programme 3.	201
Tableau 35. Programmation pluriannuelle des travaux de renouvellement, Programme 4.	206
Tableau 36. Augmentation du budget de 10 % par an.	206
Tableau 37. Diminution du budget de 10 % par an.	206
Tableau 38. Programme des travaux pour le scénario 2, augmentation du budget de 10 % par an.	206
Tableau 39. Programme des travaux pour le scénario 3, diminution du budget de 10 % par an.	206

Notations

a : taux d'actualisation

$C_m(t)$: coût de maintenance à une année t

$C_{rép}$: exprime le coût de réparation d'une défaillance

C_{remf} : exprime le coût de remplacement d'une conduite

C_{renf} : exprime le coût de renforcement d'une conduite

C : coefficient de rugosité de Hazen-Williams

c : coefficient de perte de charge singulière propre à la vanne

$\overline{D_c}$: durée de vie comptable

$\overline{D_{vie}}$: durée de vie technique

d : diamètre de la conduite, en millimètres

$En_{réseau}$: Energie disponible dans le réseau

$En_{dissipée}$: Energie dissipée dans le réseau

$En_{delivrée}$: Energie mise dans le réseau

H_L : perte de charge linéaire, en mètres

H_s : perte de charge singulière en mètres

I_r : indice de résilience

j : indice qui désigne une conduite du réseau

K_2 : représente le coefficient de pointe horaire

K_1 : représente le coefficient de pointe journalier

L : longueur de la conduite en mètres

g : gravité en m / s^2

gen : nombre de génération

μ_t : le multiplicateur de la demande pour une heure t

η : le rendement du réseau

$\psi_{pb}(i, t)$: Pressure benefit

HB_{SD} : Hydraulic Benefit

ft_j : indice de non satisfaction

n : nombre de nœuds dans le réseau

t_0 : la date de pose de la conduite

t_d : date de début d'observation de la conduite

λ : taux de défaillance pour une fonction exponentielle

β_i : Coefficients de régression

$S(t)$: fonction de survie

$f(t)$: fonction densité de probabilité

$H(t)$: fonction de risque instantané

$b_0(t)$: fonction de risque instantané de base

$N(t)$: Nombre de défaillances à l'année t

m : taille de la population de départ

l : longueur du chromosome

P_{sup} : pression désirée pour un fonctionnement normal du réseau en mètres

p : nombre de conduites dans le réseau

Période : plage horaire, début et fin de la simulation

P_i : pression au nœud i en mètres

P_{inf} : pression inférieure requise pour la desserte en eau en mètres

P_m : Probabilité de mutation

P_c : Probabilité de croisement

Q : consommation en m^3 / s

Q_i : demande au nœud i

Q_{Total} : demande totale sur l'ensemble du réseau

Q_{Nom} : consommation réelle au nœud

$Q_{dem}(i,t)$: exprime la demande au nœud i à l'instant t

\bar{Q} : consommation moyenne

Q_t : consommation à une période t

r_i : rang d'une solution

σ_{share} : fonction de partage pour l'espace des solutions

Ω : horizon de planification en années

PF : nombre de défaillances antérieures

$t_{simulation}$: date de début de simulation, correspond au début de l'horizon de planification

v : vitesse d'écoulement de l'eau dans la conduite supportant la vanne en m/s

v_{ji} : correspond à la consommation au nœud i pour la défaillance de la conduite j

V_i : correspond à la consommation au nœud i à l'heure de pointe du jour de pointe

ω_i : pondération décrivant l'importance du nœud i dans le réseau,

$Y_i(\text{Fitness})$: fonction d'adaptation pour la solution Y_i

ξ_i : covariable traduisant une variable endogène ou exogène.

Abréviations

ABC: Activity Based Costing

AEP : Alimentation en Eau Potable

AWWA : American Water Works Association

CARE-W: Computer Aided Rehabilitation of Water Networks

DDAF : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt

DSP : Délégation de Service Public

HCI: Hydraulic Critical Index

ICH: Indice de Criticité Hydraulique

IDN: Indice de Déficience aux Nœuds

LCA : Life Cycle Assessment

MOP : Multiobjective Optimization Problem

MTTR: Mean Time To Repair

NHPP :Non Homogenous Poisson Process

PEHD : Polyéthylène Haute Densité

PHM: Proportional Hazard Model

PRV : Composite en Stratifié Verre-Resine

PVC : Polychlorure de Vinyle

RCPSP: Resource Constrained Project Scheduling Problem

RLP: Resource Levelling Problem

Introduction générale

Positionnement du problème et
description du travail de thèse

Le travail de thèse porte sur la problématique de programmation du renouvellement d'infrastructures publiques faisant apparaître la notion de **réseau** : les réseaux d'autoroutes, réseaux de ponts, réseaux électriques, réseaux de transport et de manière particulière les réseaux d'Alimentation en Eau Potable. En effet l'exploitation de ces infrastructures qui subissent l'usure physique et l'obsolescence technique nécessite la remise à niveau de leur performance dans une démarche d'amélioration continue. Des travaux de renouvellement sont donc indispensables afin de pérenniser l'accès à un service donné. Ils représentent des investissements de modernisation dont le but est de réduire les coûts d'exploitation et de maintenance des infrastructures existantes en améliorant leur fonctionnement. Ces investissements ne génèrent pas nécessairement de nouveaux flux financiers « *Cash-Flow* », d'où la difficulté pour les services publics à les supporter. Ils représentent des immobilisations et un patrimoine dont la durée de vie est importante.

La gestion du patrimoine ou « Asset Management » est une approche qui permet de suivre l'évolution d'un patrimoine et d'anticiper les travaux à réaliser pour son maintien en service tout au long de sa durée de vie. La mise en place d'une telle approche nécessite la prise en compte dans le processus de décision de critères à la fois économiques, techniques et sociaux. L'analyse économique à elle seule ne suffit pas : la disposition des infrastructures en réseau nécessite la mesure de la fiabilité, de la criticité de chaque composante et de son rôle dans le réseau. Il est donc indispensable de comprendre le fonctionnement de ces infrastructures et de pouvoir définir des objectifs précis permettant leur évaluation. Il est nécessaire de décrire l'impact de leur configuration et de leur topologie sur leur fonctionnement.

La décision en matière de renouvellement est sensible à des critères économiques et financiers, liés à la disponibilité de ressources suffisantes dans le temps. Afin de remédier à l'insuffisance des ressources financières, un lissage des besoins est effectué, les travaux les plus urgents seront prioritaires. Les critères sociaux sont traduits par les impacts liés au dysfonctionnement des infrastructures, à des dommages ou une interruption du service. Ces critères sont généralement traduits par un manque à gagner ou des pénalités.

Nous proposons un outil d'aide à la décision permettant d'évaluer les besoins en renouvellement, de déterminer les priorités et de programmer dans le temps la réalisation des travaux sur un horizon donné de manière pluriannuelle. Nous considérons des sources d'incertitude liées à l'état du patrimoine et la disponibilité des ressources financières requises. Dans le cadre de la thèse, ce patrimoine est constitué par les conduites formant les réseaux d'Alimentation en Eau Potable (AEP).

L'outil élaboré propose une séquence acceptable d'interventions sur le réseau en identifiant les conduites devant faire l'objet de travaux, ainsi que la nature des interventions à effectuer. Ceci, tenant compte de contraintes liées à la disponibilité des ressources financières et aux prescriptions techniques de fonctionnement du réseau sur un horizon de planification donné.

La programmation pluriannuelle nécessite une hiérarchisation des travaux à réaliser et un lissage des besoins financiers sur l'horizon de planification. L'outil développé utilise une optimisation multi-objectif basée sur l'optimum de Pareto, faisant appel à un algorithme génétique pour la recherche de politiques acceptables. Il propose une démarche adaptée à la réalité du terrain pour la détermination d'un ensemble de solutions viables, parmi lesquelles le gestionnaire du réseau d'eau peut choisir une politique de renouvellement traduisant une programmation pluriannuelle des travaux de renouvellement.

Dans le Chapitre 1, Nous définissons le contexte qui caractérise le secteur de la distribution de l'eau en France, par l'identification des priorités des services d'eau en matière de gestion du réseau et de la nécessité de la mise en œuvre de travaux de renouvellement. La décision de renouvellement est sensible à la manifestation d'événements imprévus (casses, ruptures, fuites) susceptibles de décrire la détérioration des conduites. Cette détérioration peut être décrite selon trois niveaux en fonction de l'élément d'analyse pris en compte. Nous distinguons : **la détérioration structurelle** de la conduite qui se manifeste par une rupture de la conduite, fuite ou un affaissement de la chaussée. C'est une détérioration physique liée au vieillissement. **La détérioration hydraulique** se manifeste par une baisse de pression et de débit en raison du rétrécissement de la section (diamètre) interne des conduites causé par des dépôts de sédiments, la corrosion ou des fuites, et enfin **la détérioration de la qualité** de l'eau qui se manifeste par une coloration de l'eau provoquée par à des infiltrations de substances ou matières dans les conduites.

Dans le cadre de la thèse nous tenons compte seulement des deux premiers niveaux. Le renouvellement est un investissement matériel qui consiste à remplacer un équipement ou un patrimoine par un autre patrimoine identique ou de fonction identique. A travers la revue des différents types d'investissements, nous identifions les spécificités du renouvellement et mettons en exergue les insuffisances liées aux critères économiques permettant la prise de décision en matière d'investissement : VAN, TRI. Il est clair que la décision de renouvellement des réseaux AEP doit tenir compte au delà des critères économiques, des critères liés au fonctionnement du réseau et à sa topologie. Par la suite, nous introduisons la notion de gestion du patrimoine ou « Asset Management », en décrivant la démarche et les différentes étapes qui la caractérisent.

Par analogie à la gestion du patrimoine (EPA, 2003), nous proposons une démarche de gestion du réseau d'alimentation en eau potable dans laquelle le renouvellement des réseaux AEP est partie intégrante. La réalisation des travaux de renouvellement requiert la disponibilité d'enveloppes budgétaires importantes. Pour pallier l'insuffisance des ressources financières, un lissage des travaux est effectué dans le temps permettant d'effectuer les travaux les plus urgents en premier. Nous identifions l'approche de nivellement des ressources traitée par (Boctor, 2005) comme une démarche exploitable pour la programmation du renouvellement des réseaux AEP et l'estimation de l'enveloppe budgétaire nécessaire annuellement. Nous émettons deux hypothèses qui seront vérifiées dans le dernier chapitre. Ces hypothèses permettent de vérifier pour un même budget sur l'horizon de planification :

- la relation entre la performance du réseau et l'ordre de réalisation des travaux de renouvellement
- la relation entre la performance du réseau et la politique budgétaire qui peut prévoir un budget équivalent sur l'ensemble de l'horizon de planification, une augmentation ou une diminution annuelle de la répartition du budget.

Ce chapitre permet d'introduire la problématique de renouvellement et fait apparaître la nécessité d'intégration de critères économiques et techniques sur le moyen et long terme dans le processus de prise de décision.

Dans le chapitre 2, nous introduisons les notions et concepts permettant de comprendre le fonctionnement du réseau AEP. Les réseaux d'eau potable sont un assemblage d'organes et de dispositifs hydrauliques sous pression, qui ont pour fonction le captage, l'acheminement et la distribution de l'eau potable. Nous distinguons des dispositifs de traitement des eaux, de stockage à travers les bâches, réservoirs, des organes d'acheminement et de distribution à travers les pompes, vannes et conduites. Les réseaux AEP sont des réseaux enterrés, le suivi de l'évolution de l'état des canalisations dans le temps est donc difficile. La nécessité d'intervenir sur le réseau apparaît en cas de détérioration de la conduite. L'analyse du fonctionnement du réseau d'eau potable permet d'identifier les variables endogènes (diamètre, longueur, nombre de défaillance, nature de l'eau, rugosité des conduites) et exogènes (nature du terrain, occupation du sol, niveau de trafic) qui décrivent la détérioration des conduites et la manifestation du vieillissement.

Nous mettons en exergue la sensibilité des conduites à la topologie du réseau et à l'indisponibilité de certaines conduites. De plus nous traitons de la problématique de modélisation du réseau.

Deux aspects doivent être pris en compte : l'aspect lié à la **détérioration structurelle** qui tend à considérer l'ensemble des conduites du réseau et l'aspect lié au **fonctionnement hydraulique** du réseau qui tend à simplifier le réseau pour faciliter la modélisation. Il s'agit donc de trouver un compromis permettant de traduire fidèlement le fonctionnement réel du réseau. Nous utilisons des indices de fiabilité pour mesurer l'impact de la survenue d'une casse sur l'ensemble du réseau en nous inspirant des travaux de (Wagner et al., 1988).

Dans le chapitre 3, nous analysons les différents modèles et approches proposés pour la pratique du renouvellement des réseaux AEP en distinguant 3 niveaux d'analyse. **Le premier niveau** comporte l'ensemble des outils, modèles et méthodes qui cherchent à **décrire la détérioration structurelle du réseau à l'aide des variables susmentionnées et hiérarchiser les conduites sans** proposer une programmation des travaux à effectuer, en utilisant diverses approches : chaîne de Markov, analyse multicritère, analyse statistique. **Le second niveau d'analyse, s'appuie sur la détermination d'échéances pour le renouvellement.** A l'aide d'outils d'optimisation, des choix sont effectués et une programmation des travaux permet de traiter les éléments dits critiques identifiés au niveau initial. L'optimisation s'articule sur des objectifs économiques ou techniques. La méthode d'optimisation utilisée généralement est la Programmation Dynamique. Nous identifions deux limites principales. L'implémentation de la méthode dans le cas de plusieurs alternatives d'intervention sur le réseau crée un accroissement du nombre de sommets des graphes de décision, en particulier pour des réseaux de taille importante. La seconde limite concerne le caractère uni-objectif de la recherche des solutions ne permet pas de tenir compte de plusieurs critères à la fois. Nous explicitons les insuffisances de chaque approche et introduisons les méta-heuristiques, particulièrement les algorithmes génétiques (Goldberg, 1994) comme approche d'optimisation appliquée à la problématique de renouvellement et aux problèmes multi-objectif (Halhal et al., 1997). **Le troisième niveau traite des modèles d'aide à la décision intégrés de gestion du réseau dans son ensemble,** qui s'articulent sur des données et modules de calcul pour le renouvellement des réseaux AEP. L'intérêt est de décrire le processus d'aide à la décision et de s'en inspirer pour proposer une approche pour la programmation des travaux de renouvellement.

Dans le Chapitre 4, nous présentons les méthodes utilisées pour **l'optimisation multi-objectif** et de résolution non-exacte en utilisant les **algorithmes génétiques**. La décision de renouveler revêt un caractère multi-objectif. Elle doit tenir compte d'un ensemble de critères incommensurables et de contraintes diverses liées à l'état de la conduite, à la structure et au fonctionnement du réseau, ainsi qu'à la disponibilité des ressources financières.

Le modèle développé dans le cadre de la thèse considère ces critères à travers une approche d'optimisation multi-objectif utilisant la notion de dominance au sens de Pareto. Cela permet d'obtenir des solutions offrant un compromis entre critères économiques et techniques.

Nous identifions des approches d'ordonnement de tâches en atelier et de gestion de projet traitant de problèmes multi-objectif que nous avons exploitées pour la programmation des travaux sur le réseau. Nous discutons de l'utilisation d'algorithmes génétiques dans le domaine de l'eau principalement pour le dimensionnement des réseaux (Sirvinas et al., 1994), l'optimisation du fonctionnement des pompes (Cheung, 2003) et le renouvellement des réseaux AEP. L'utilisation des algorithmes génétiques nécessite la définition d'un certain nombre de variables de décision, de codes et d'opérateurs génétiques. Nous identifions les liens entre l'utilisation des algorithmes génétiques, l'optimisation multi-objectif et la problématique de renouvellement.

Dans le chapitre 5, nous proposons une approche originale par rapport à la littérature, pour la prise de décision en matière de renouvellement des réseaux AEP. Elle s'articule sur un ensemble de données (que nous identifions), la détermination des conduites critiques et l'utilisation d'un algorithme génétique considérant les variables de décision du problème, un codage spécifique, ainsi qu'une construction des opérateurs génétiques à utiliser. La détermination des conduites critiques s'appuie sur l'évaluation de la détérioration structurelle des conduites à l'aide d'un modèle statistique et l'évaluation du rôle hydraulique de chaque conduite. Nous utilisons le modèle de risques proportionnels, *Proportional Hazard Model (PHM)* appliqué à l'étude du vieillissement des conduites d'eau par (Eisenbeis, 1996) qui cherche à décrire l'état des conduites à l'aide de variables endogènes et exogènes à la conduite collectées depuis la date de pose des conduites ou sur une fenêtre d'observation. L'intervention sur une conduite donnée peut avoir un effet sur plusieurs autres conduites. Nous proposons des indices qui mesurent le rôle de chaque conduite dans la desserte en eau des usagers. Les variables de décision représentent les travaux de renouvellement à réaliser sur le réseau.

Nous identifions trois types d'interventions à savoir : **ne rien faire et donc réparer** s'il y a défaillance, **remplacer** la conduite par une conduite de même diamètre et **renforcer** la conduite en effectuant un remplacement avec un diamètre supérieur. La description de la détérioration structurelle des conduites ne tient pas compte de la topographie du réseau, de la structure du réseau et de son fonctionnement. Nous proposons d'intégrer un calcul hydraulique permettant de mesurer la performance hydraulique du réseau pour un programme de travaux donné en utilisant le simulateur hydraulique Epanet2 (Rossman, 2001).

Nous définissons la notion de politique de renouvellement, comme la séquence des décisions :réparer, remplacer ou renforcer. Chaque politique de renouvellement sera codée à l'aide d'entiers traduisant les alternatives de renouvellement à considérer. Nous utilisons un algorithme génétique adapté de (Deb et al., 2000) pour l'exploration de l'espace des solutions (ensemble des politiques). A l'aide d'un ensemble de politiques de départ (sous-ensemble de l'espace des solutions), l'algorithme génétique permettra d'explorer un nombre important de solutions, en retenant la meilleure ou les meilleures solutions trouvées. Nous évaluons chaque politique à l'aide de deux fonctions objectif. La première mesure la performance du réseau en déterminant la surpression disponible à l'échelle du réseau. La seconde évalue le coût des travaux à mettre en oeuvre pour une politique donnée. L'évaluation de ces politiques tient compte de la criticité des conduites, des contraintes techniques liées aux niveaux de pression requis pour un fonctionnement adéquat du réseau et de la disponibilité des ressources financières. A partir d'une politique de renouvellement donnée, nous proposons une approche de programmation des travaux spécifique, qui permet d'estimer les enveloppes budgétaires annuelles. Nous présentons une formalisation de l'approche de renouvellement proposée à travers un modèle d'aide à la décision qui synthétise la démarche décrite ci-dessus.

Dans le Chapitre 6, nous présentons l'implémentation du modèle d'aide à la décision que nous proposons. La première étape consiste à décrire l'état du réseau AEP par l'analyse du fonctionnement hydraulique du réseau et la description de l'état des conduites par l'utilisation du modèle *PHM*. Ainsi, Le modèle permet d'identifier les conduites vulnérables dans le réseau d'un point de vue structurel et fonctionnel. Nous appliquons le modèle élaboré sur un réseau AEP d'un syndicat de communes en Alsace (Bas-Rhin) en milieu rural, constitué d'environ 320 nœuds et 450 conduites assurant la desserte en eau de 5042 abonnés, 2 industriels, 1 maison de retraite et une piscine. Nous proposons de limiter l'horizon de planification à 5 ans. L'implémentation du modèle permet d'obtenir un ensemble de politiques viables d'un point de vue technique et économique. Nous évaluons les différentes propositions et décrivons les critères de choix d'une politique de renouvellement en effectuant une analyse de sensibilité des résultats aux paramètres des opérateurs génétiques de l'algorithme. La programmation des travaux de renouvellement s'effectue sur la base de la politique sélectionnée et permet d'identifier la nature des travaux et la date de leur réalisation en fonction de l'horizon défini et du budget annuel disponible au niveau du service d'eau.

Problématique de thèse et éléments de réponse

La programmation pluriannuelle du renouvellement des réseaux d'eau potable cherche à identifier et programmer dans le temps les travaux à réaliser sur les conduites du réseau, tout en estimant les ressources financières requises. Le but est d'améliorer la fiabilité et le fonctionnement du réseau. La programmation pluriannuelle s'effectue selon un processus de prise de décision qui tient compte d'un ensemble de variables liées à la conduite et à son environnement, les conditions d'exploitation du réseau, des contraintes techniques et financières.

Le travail de thèse cherche à décrire le processus d'aide à la décision, en identifiant les variables et critères à prendre en compte. L'intérêt est de proposer une approche pour la programmation des travaux de renouvellement et l'estimation de l'enveloppe budgétaire nécessaire à leur réalisation. Dans un premier temps, nous décrivons la problématique de renouvellement. Par la suite, nous identifions la place de la programmation du renouvellement dans la gestion du réseau d'alimentation en eau potable (AEP) dans son ensemble. Enfin, Nous caractérisons la problématique de renouvellement en identifiant les difficultés d'identification des besoins et le lissage des travaux de renouvellement dans le temps.

Sommaire

1. Introduction	29
2. La problématique de renouvellement des réseaux d'eau potable	30
3. Le renouvellement et les choix d'investissement	34
4. La gestion du patrimoine et les réseaux d'eau potable	37
5. La programmation pluriannuelle et la décision de renouvellement	44
6. Conclusion	49

1. Introduction

Il est intéressant de définir dans un premier temps le contexte actuel dans lequel évoluent les services d'eau. Les priorités et objectifs des services ont changé, en effet de grands chantiers de pose de conduites d'eau ont été lancés après la seconde guerre mondiale. La cadence s'est intensifiée vers les années 1960 jusqu'au début des années 1980. L'acheminement de l'eau vers les habitations étant assuré, les priorités des services de l'eau évoluent afin de permettre la continuité du service : la desserte en eau de la population en quantité et qualité satisfaisante. Pour ce faire, une amélioration du rendement des réseaux est nécessaire, par l'accroissement de la fiabilité du réseau (maillage, renouvellement, renforcement) et une meilleure gestion des défaillances.

Dans l'objectif de réduire la gêne occasionnée aux usagers et les risques de contamination de l'eau, le service d'eau ne doit pas seulement assurer la distribution de l'eau mais anticiper aussi l'évolution future du réseau et de la demande des usagers, afin de pérenniser l'approvisionnement en eau. La nécessité du renouvellement se fait ressentir car une bonne partie du réseau d'Alimentation en Eau Potable (AEP) en France a été posée entre la fin des années 1940 et 1970. De plus, la durée de vie moyenne d'une conduite est d'environ 70 ans, il sera bientôt urgent de remplacer une grande partie du réseau.

Afin de connaître l'état des réseaux et d'identifier les besoins en renouvellement, des initiatives locales de recensement et de collecte de données relatives aux réseaux d'eau potable ont été menées. L'opération pionnière est celle menée dans le département de la Manche en 1996. Par la suite une enquête nationale fut lancée afin d'établir un inventaire du patrimoine des réseaux d'eau à l'échelle nationale, à cet effet 8 départements ont été retenus : l'Allier (03), l'Aveyron (12), le Doubs (25), l'Hérault (34), l'Indre-et-Loire (37), La manche (50), La somme (80) et le Bas-Rhin (67). L'étude entreprise évaluée à un milliard d'euros par an les besoins de renouvellement de l'ensemble des réseaux d'eau potable en France estimés à environ 850 000 km, la valeur à neuf de ce patrimoine est de 85 milliards d'Euros (Cador, 2002).

2. La problématique de renouvellement des réseaux d'eau potable

Un réseau AEP est constitué de conduites enterrées (donc inaccessibles), de diamètres et de matériaux différents. La difficulté réside dans l'incapacité de suivre l'évolution de l'état de la conduite, le vieillissement se manifeste par des fuites ou un affaissement de chaussée.

Notre étude vise donc à permettre au gestionnaire du service d'eau, de programmer les travaux sur le réseau et d'estimer les enveloppes budgétaires nécessaires à court et moyen terme. Cela a pour but le maintien en service du réseau d'alimentation en eau potable à travers le renouvellement des conduites, en prenant en compte un ensemble de variables et critères dans le processus de prise de décision. : des variables qui sont liées à la conduite, à son environnement et au service de l'eau.

La programmation pluriannuelle du renouvellement vise à estimer les enveloppes financières nécessaires pour effectuer un ensemble de travaux sur le réseau, afin d'améliorer son fonctionnement. L'estimation du budget nécessaire, requiert l'identification des conduites sur lesquelles il est prioritaire d'intervenir, la nature des interventions à prévoir et tient compte de la disponibilité des ressources financières au niveau du service d'eau, représentant une contrainte budgétaire qui dépend du prix de l'eau, des volumes facturés et l'origine du financement (interne ou externe)¹.

Ainsi, dans le cadre de la thèse, nous utilisons le terme **renouvellement** pour décrire l'ensemble des interventions sur les conduites susceptibles d'améliorer le fonctionnement du réseau. Sur l'ensemble des dispositifs hydrauliques constituant le réseau, nous considérons exclusivement le renouvellement des conduites d'alimentation en eau potable. Pour le service de l'eau, le renouvellement peut être inscrit dans le cadre d'une politique à long terme, donc planifiée dans le temps et s'effectuant selon une approche préventive précise. D'un autre côté, le renouvellement peut être fait de manière arbitraire, se basant sur des critères empiriques et de manière curative non planifiée. Le renouvellement est inéluctable, il concerne des conduites dont la durée de vie technique est importante mais limitée dans le temps et qui est définie comme la période de temps durant laquelle la conduite fonctionne en garantissant des spécifications précises.

¹ . Le recours à l'endettement pour financer les travaux de renouvellement peut entraîner une augmentation du prix de l'eau, cette répercussion n'est pas traitée dans le cadre de la thèse, nous estimons les besoins sans spécifier l'origine du financement des travaux de renouvellement. .

Le renouvellement consiste à remplacer la conduite à la fin de sa durée de vie technique ou à cause de critères économiques, d'obsolescence ou de modernisation. D'un point de vue comptable, nous distinguons la durée de vie comptable, de la durée de vie technique. La durée de vie comptable correspond à la période sur laquelle le service de l'eau pratique l'amortissement d'une conduite, cette durée est comprise entre 50 et 70 ans environ.

Les conduites subissent des dégradations tout au long de leur exploitation, ces dégradations accélèrent le processus de vieillissement et réduisent la performance du réseau, impliquant des travaux sur les conduites. Nous distinguons des travaux de maintenance qui en général, désignent l'ensemble des activités planifiées ou non planifiées afin de préserver la conduite dans son état d'origine. La maintenance consiste à inspecter de manière périodique le réseau afin de contrôler son état et son niveau de performance. La maintenance du réseau peut être préventive afin d'assurer un bon fonctionnement et d'atteindre une durée de vie technique préalablement établie, ou curative se manifestant par des réparations à l'occurrence de pannes et d'événements imprévus. Les dépenses qu'engendrent les travaux de maintenance sont enregistrées comme dépenses de fonctionnement, imputées à la section exploitation du budget des services d'eau. Les travaux de renouvellement représentent un investissement lourd pour les services de l'eau, d'où la nécessité de les programmer dans le temps et dégager les enveloppes budgétaires nécessaires à leur réalisation. Les dépenses engendrées sont inscrites à la section investissement du budget du service de l'eau.

Même si les travaux de renouvellement font l'objet d'une programmation dans le temps, souvent les critères pris en compte ne tiennent pas compte de la performance du réseau et de l'état de détérioration des conduites. Afin de réaliser une économie d'échelle et éviter l'interdiction d'ouverture de tranchée suite à la réfection de chaussée qui est d'environ 5 ans, les services d'eau préfèrent se caler sur les travaux de voirie. Les travaux de renouvellement se concentrent exclusivement sur les conduites se trouvant dans les rues figurant dans le programme de réfection de voirie. Cette solution peut être viable d'un point de vue économique mais ne l'est pas forcément d'un point de vue technique. L'optimum économique ne l'est pas forcément d'un point de vue technique. Cette pratique du renouvellement ne permet pas de pallier les déficiences liées à la détérioration du réseau.

Pour (Rajani & Kleiner, 2001) la détérioration du réseau se manifeste par l'occurrence de défaillances rendant le réseau incapable d'atteindre la performance assignée. Les auteurs identifient la:

- détérioration structurelle : rupture physique des conduites, casses nécessitant réparation
- détérioration hydraulique ou fonctionnelle : diminution de la capacité hydraulique qui se traduit par des baisses de pression et débit dans le réseau.
- détérioration de la qualité de l'eau : dégradation de la qualité de l'eau, présence d'eau rouge, coloration, présence d'odeur.

En ce qui nous concerne, nous prenons en compte les deux premiers points dans la description de l'état de la détérioration du réseau. La fiabilité d'une conduite sera traduite par son degré de détérioration structurelle et de détérioration hydraulique².

La Figure 1 décrit les relations entre la détérioration structurelle et fonctionnelle du réseau, tout en identifiant les variables et paramètres à considérer dans la prise de décision en matière de renouvellement.

Ces variables qui sont liées à la conduite et à son environnement permettent d'évaluer l'état des conduites et donc de mesurer la fiabilité du réseau. La disposition des conduites en réseau doit être prise en compte, en effet l'impact du renouvellement d'une conduite dépend de sa localisation, de ses dimensions et de son rôle dans la desserte des abonnés. La prise de décision d'appuie sur des critères liés à :

- la performance, le fonctionnement et la fiabilité du réseau
- la topologie du réseau
- l'estimation des coûts de réparation, remplacement, renforcement, réhabilitation, sociaux
- la programmation d'autres travaux et coordination avec les services de : voirie, gaz, électricité
- la disponibilité des ressources financières

² . Nous introduisons dans le chapitre 2, la notion de fiabilité hydraulique qui traduit le rôle d'une conduite dans le fonctionnement du réseau et la capacité du réseau à pallier la survenue d'une défaillance. Ce qui entraîne une perte de pression pouvant perturber l'alimentation en eau de certains consommateurs.

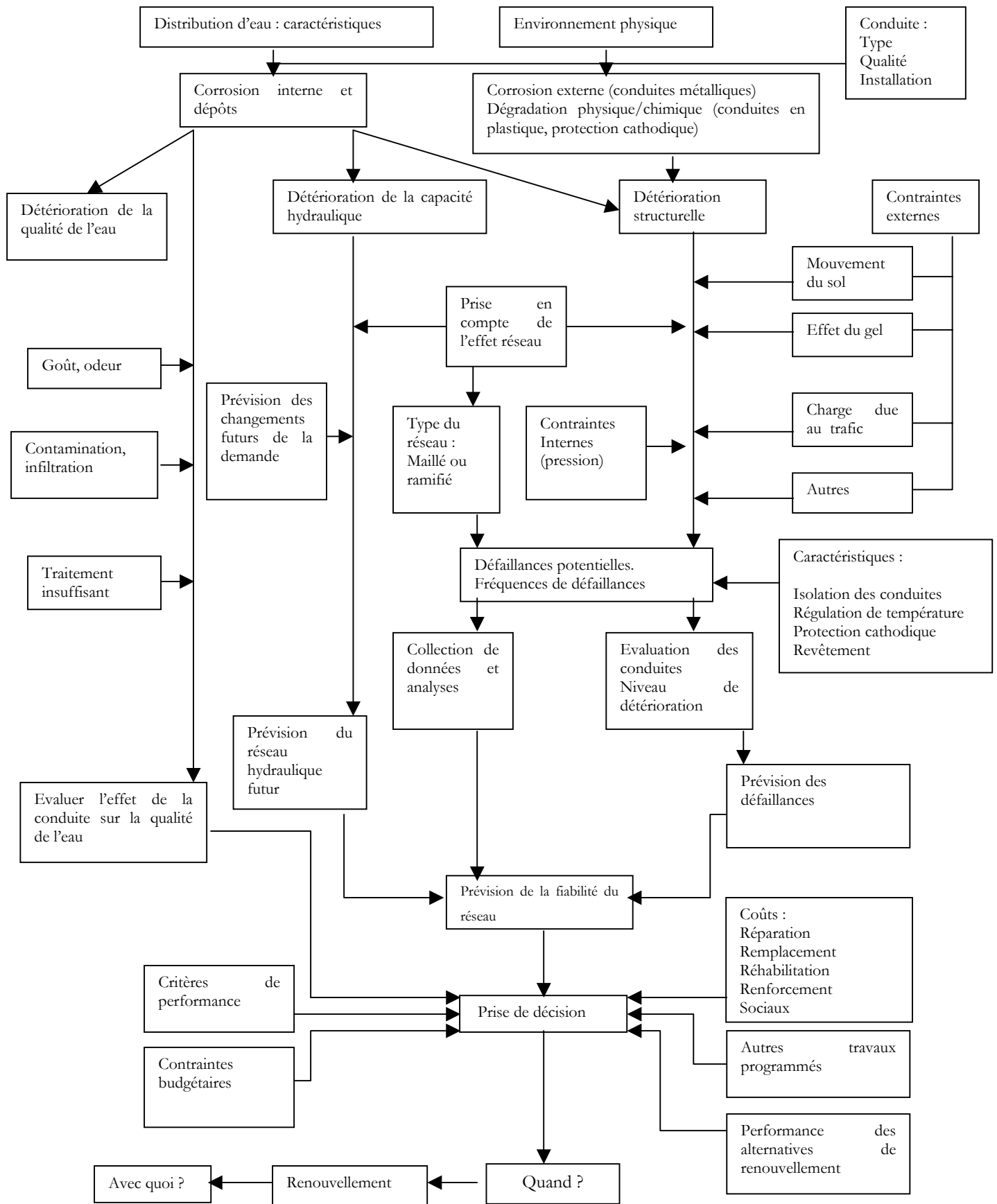


Figure 1. Description du processus de détérioration des conduites d'eau potable (Adapté de Rajani & Kleiner, 2001).

Discussion

Il n'existe pas d'approche unique pour la mise en place du renouvellement. La décision en matière de renouvellement dépend des variables et des critères liés au réseau et à son environnement, de la disponibilité de données, des objectifs à atteindre, des méthodes d'optimisation et de recherche des solutions utilisées. Le travail de thèse vise donc à proposer un modèle d'aide à la décision incluant les points suivants :

- la compréhension du fonctionnement du réseau AEP et la mise en place de critères d'évaluation. Ces critères sont d'ordre technique et économique
- la description du phénomène de détérioration du réseau, l'étude de la fiabilité du réseau et de sa performance
- l'identification des conduites vulnérables prioritaires pour le renouvellement
- la proposition d'une approche de programmation du renouvellement qui permette de considérer des critères techniques et économiques à la fois
- la description de l'impact de la topologie du réseau sur le niveau de performance et sa vulnérabilité en cas de défaillance
- la considération de la décision de renouvellement comme une décision globale sur l'ensemble du réseau et non à l'échelle de la conduite
- l'identification des données devant être disponibles au niveau du service d'eau
- la proposition d'une approche de programmation budgétaire des travaux de renouvellement
- l'étude de la problématique de disponibilité des ressources financières en étudiant le phénomène de lissage des ressources sur un horizon de planification donné
- l'identification du positionnement du renouvellement dans la gestion du réseau dans son ensemble à long terme.

3. Le renouvellement et les choix d'investissement

(Bancel & Richard, 1995) considèrent que la notion d'investissement diffère en fonction du secteur d'activité. Pour les économistes, il s'agit essentiellement d'un flux de capital permettant de modifier le stock existant, qui constitue avec le facteur travail l'un des principaux facteurs de la fonction de production.

Pour les gestionnaires, l'investissement représente un coût pour l'entreprise, qui génère de nouveaux cash-flows (avantages). D'où la nécessité de hiérarchiser les divers projets possibles à partir d'un bilan global (coût-avantages) qui mesure la rentabilité de chaque projet.

(Dafflon, 1998) définit l'investissement comme une dépense qui accroît la valeur du patrimoine et dont l'utilité s'étend sur plusieurs années. Cette dépense conserve ou améliore l'usage du patrimoine sur plusieurs années d'un point de vue qualitatif et quantitatif. Par analogie, le renouvellement des réseaux d'eau potable (investissement) aura comme incidence l'augmentation de la durée de vie des conduites, la baisse de l'occurrence des défaillances, l'amélioration de la desserte en eau des usagers, le gain de performance du réseau de manière générale et la réduction des coûts opérationnels et de maintenance. Nous distinguons les investissements de renouvellement et les autres types d'investissement et établissons un lien avec les investissements de modernisation. Pour (Kohel, 2003) les investissements de renouvellement permettent un renouvellement des équipements mais pas nécessairement à l'identique. Ils ont pour vocation de compenser la dépréciation des équipements installés entraînée par l'usure³ ou l'obsolescence⁴.

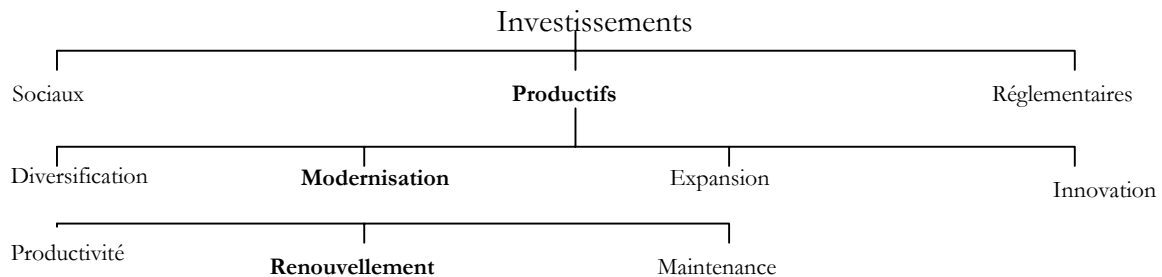


Figure 2. Types d'investissement.

(Alexandre, 1993) définit le renouvellement comme tout investissement correspondant à la réalisation d'une immobilisation qui se substitue à l'identique ou à fonction identique à une immobilisation existante. La notion d'investissement se rapporte fortement à la notion de durée de vie de l'équipement, au capital investi et au risque. Le risque peut être lié à l'équipement ou à l'apparition d'évènements imprévus réduisant des avantages ou engendrant des pertes financières. La décision en matière d'investissement dépend de plusieurs critères, en majorité économiques. (Koehl, 2003) et (Vizzavona, 1990) présentent un ensemble de critères en avenir certain.

³. L'usure est traduite par l'altération physique d'un équipement en raison de son utilisation ce qui réduit sa durée de vie technique

⁴. L'obsolescence traduit la diminution de la valeur du capital d'un équipement en raison de progrès technologique.

En avenir certain, la décision d'investissement s'appuie soit sur la comparaison des flux financiers dégagés par l'investissement sur une durée de vie donnée avec le montant de l'investissement, ou par l'évaluation de la durée de vie permettant de récupérer le capital investi.

- Le taux de rentabilité moyen permet de comparer les flux moyens dégagés par l'investissement avec le montant moyen de l'investissement.
- Le délai de récupération permet d'évaluer la durée sur laquelle le montant de l'investissement sera récupéré.
- La valeur actuelle nette (VAN) traduit la différence entre la valeur actuelle des flux générés par l'investissement et les dépenses d'investissement. L'investissement sera rentable pour une $VAN > 0$.
- Le Temps Interne de Rendement correspond au temps d'actualisation qui rend la VAN nulle.

Ces approches supposent la connaissance du montant exacte du *Cash-Flow* dégagé et du taux d'actualisation. Elles ne tiennent pas compte de l'incertitude liée à l'évolution de l'environnement économique. En ce sens, nous citons les travaux de (Arrow & Fischer, 1979) et les travaux de (Henry, 1979) qui introduisent des modèles de décision en information croissante. Ils définissent des valeurs d'option pour la prise de décision en fonction de trois conditions réunies simultanément à savoir : un ensemble de décisions, une incertitude dans la réalisation des états dans le futur et une information croissante dans la réalisation de ces états. La prise de décision en matière d'investissement s'appuie sur la notion de valeur d'option qui permet de différer l'investissement jusqu'à ce que des informations plus fiables soient disponibles permettant de réduire l'incertitude.

La définition donnée par (Bancel & Richard, 1995) nous semble intéressante. La notion d'avantages résultants de la décision d'investir va au delà de la création de flux financiers. Comme le renouvellement est un investissement de modernisation il tend à réduire les coûts de maintenance d'un patrimoine et améliorer sa performance.

Nous considérons le renouvellement des réseaux AEP comme un investissement de modernisation. Il requiert des dépenses importantes mais ne dégage pas de nouveaux flux financiers lors de l'exploitation du réseau. Les conduites d'eau potable ne constituent pas un équipement de production propre au même titre qu'un équipement industriel pour lequel une valeur de *Cash-Flow* peut être évaluée.

Discussion

Les approches susmentionnées présentent donc des limites. Pour répondre à la problématique de renouvellement des réseaux d'eau potable, il est nécessaire d'intégrer des critères économiques et techniques. L'analyse économique se basant sur l'estimation des flux financiers générés par l'investissement paraît inadéquate pour notre problématique. L'impact du renouvellement sera mesuré en terme de :

- nombre de casses et défaillances évitées permettant de réduire les fuites et les pertes d'eau
- baisse du nombre de plaintes, d'interruption de service et amélioration de la desserte en eau des usagers
- réduction des coûts de maintenance et de réparation
- augmentation de la fiabilité du réseau, augmentation des durée de vie des conduites
- réduction des coûts sociaux ou indirects qui traduisent la gêne occasionnée et le manque à gagner pour certains professionnels : (commerces, médecins) en cas d'interruption du service ou de déviation pour travaux et les risques de dégâts importants en cas de rupture de conduites.

4. La gestion du patrimoine et les réseaux d'eau potable

La gestion du patrimoine ou « *Asset Management* » s'intéresse à la gestion d'immobilisations corporelles : actifs, infrastructures, installations, dont la durée de vie est importante. Elle concerne de manière générale, des municipalités, des services publics, des entreprises publiques ou privées. Ces immobilisations constituent un patrimoine qui doit être géré de manière satisfaisante. Il peut se présenter sous forme de :

- Réseaux enterrés : Réseau AEP, Réseau Assainissement, Réseau de Gaz
- Infrastructures routières: routes, autoroutes, ouvrages d'art
- Equipements et installations industriels

Ces immobilisations nécessitent un investissement initial considérable et un suivi tout au long de leur durée de vie. La gestion du patrimoine cherche à minimiser les coûts d'exploitation, de maintenance et de renouvellement d'un patrimoine donné tout au long de sa durée de vie.

Les réseaux d'alimentation et les installations permettant l'approvisionnement des consommateurs en eau sont considérés comme un patrimoine du service de l'eau pour lequel une bonne gestion est nécessaire pour en assurer la survie et le bon fonctionnement. Nous pouvons dire que la problématique de renouvellement s'intègre dans un processus plus global qui est celui de la gestion du patrimoine.

4.1 La gestion du patrimoine - Asset Management : Définition

La gestion du patrimoine ou «Asset Management » cherche à suivre d'une manière continue l'état d'un patrimoine constitué d'immobilisations corporelles. Selon (Hoskins et al., 1998), la gestion du patrimoine vise à assurer le bon fonctionnement des ces immobilisations par la planification de diverses actions de maintenance, réparation et réhabilitation. D'après (FHWA, 1999) la gestion du patrimoine est un processus continu, itératif, adaptatif et flexible aux changements, évolutions et orientations pouvant s'opérer. Pour (EPA, 2003) la gestion du patrimoine est un processus de planification qui permet de maintenir la valeur d'une immobilisation à son plus haut niveau et de dégager les ressources financières nécessaires pour la réhabilitation ou le renouvellement du patrimoine quand cela est nécessaire. La gestion du patrimoine intègre aussi des actions permettant de réduire les coûts de fonctionnement et d'améliorer la fiabilité du patrimoine considéré. Le processus de gestion du patrimoine fait appel à un ensemble d'outils d'analyse et d'ingénierie financière comprenant des analyses coûts/bénéfices, analyse du coût sur la durée de vie du système, analyse des risques d'ordre : financier, opérationnel et naturel. La gestion du patrimoine se situe à un niveau stratégique de décision. Elle nécessite :

- la mise en place d'objectifs de performance
- un inventaire du patrimoine à gérer
- l'identification des ressources disponibles : financières et autres
- la mise en place d'une politique organisationnelle pour le suivi du processus de gestion du patrimoine
- l'inventaire des informations et données relatives à la performance du système et l'analyse afin d'identifier les besoins futurs et les dysfonctionnements.
- l'utilisation d'outils, procédures d'estimation des coûts en fonction des stratégies choisies, et l'allocation du budget afin de satisfaire les attentes des usagers.

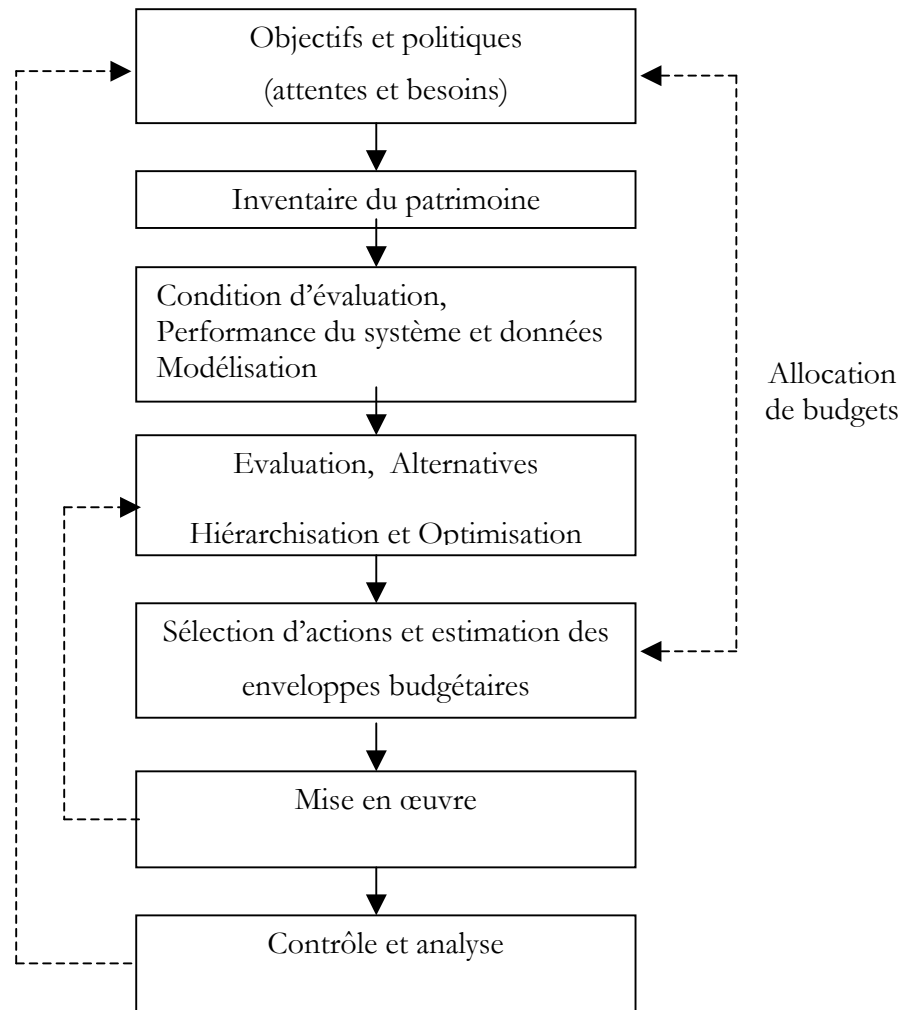


Figure 3. La processus de gestion du patrimoine (Adapté de FHWA,1999 et EPA, 2003)

Cette approche doit être adaptée à chaque organisation⁵, permettant de définir un ensemble d'indicateurs de performance et des variables de décision traduisant la politique de l'organisation et ses objectifs. Elle se traduit par des objectifs fixés, le type de patrimoine à considérer, le budget alloué, les procédures opérationnelles, la structure organisationnelle et les pratiques financières.

Le processus décrit par la Figure 3 regroupe les étapes principales à intégrer dans la gestion du patrimoine. A travers un patrimoine, l'organisation cherche à répondre à des besoins, fournir un service ou un produit. L'étape préalable est donc de définir les objectifs et le niveau de performance à atteindre. L'inventaire du patrimoine cherche à identifier l'ensemble des moyens dont dispose l'organisation pour assurer sa mission.

⁵ Représente le gestionnaire du patrimoine : municipalités, services publics, entreprises,...

Ensuite, vient l'étape d'évaluation de la condition et de l'état du patrimoine. Cette étape permet d'identifier les déficiences du patrimoine et les variables et paramètres liés à son fonctionnement. L'étape de modélisation cherche à comprendre le fonctionnement du patrimoine en simulant son fonctionnement à l'aide de modèles. La compréhension du fonctionnement du système vise à identifier les insuffisances afin de hiérarchiser le patrimoine considéré de manière à établir des priorités et identifier les actions correctives à apporter. Ces actions se manifestent par des décisions à court, moyen et long terme. La mise en œuvre vise à tester les décisions prises et à mesurer leur impact sur le fonctionnement du patrimoine. La mesure de fonctionnement du patrimoine se fait sur des critères liés à :

- la durée de vie technique et/ou comptable du patrimoine
- la disponibilité de ressources financières suffisantes
- la performance à atteindre par le patrimoine
- les coûts de fonctionnement et de maintenance.

La gestion du patrimoine prend en compte l'ensemble de ces critères tout au long de la durée de vie du patrimoine.

4.2 La gestion du patrimoine appliquée aux réseaux AEP

Le renouvellement des réseaux d'eau potable cherche donc à gérer un patrimoine constitué par les conduites d'eau potable, les organes hydrauliques, les installations de pompes, de traitement et de stockage de l'eau. Il s'inscrit dans une démarche de gestion du patrimoine.

Dans le cadre de la thèse nous considérons seulement les conduites d'alimentation en eau potable, qui constituent pour certains services environ 80 % (en valeur) des immobilisations corporelles. D'un point de vue décisionnel, la problématique du renouvellement des réseaux d'eau potable implique des décisions à court et moyen terme qui dépendent d'une approche stratégique (à long terme). Voir Figure 4

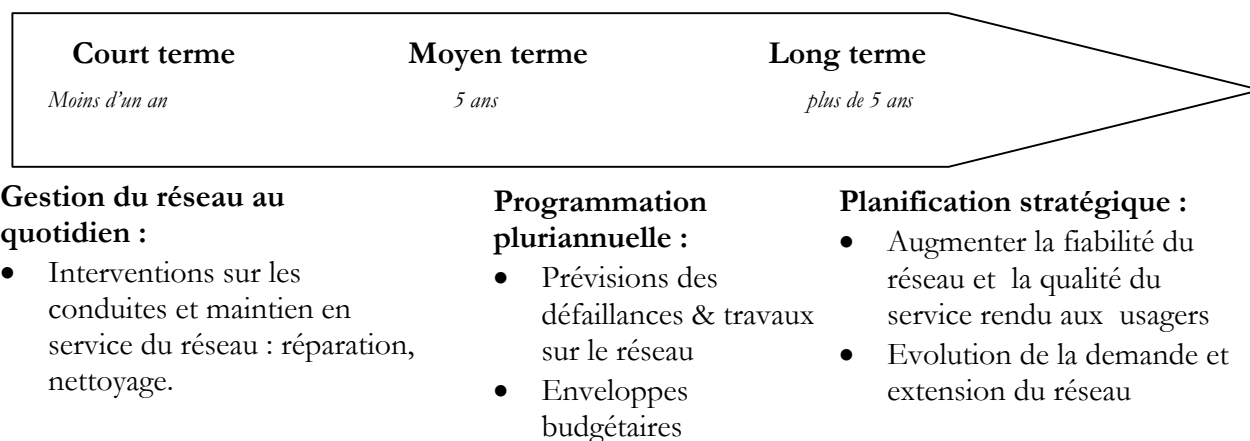


Figure 4. La gestion du réseau d'eau potable

Le service d'eau cherche à travers le réseau d'eau potable à satisfaire les besoins des abonnés en eau. Ceci, en assurant la continuité du service et la satisfaction des abonnés en quantité et qualité, par l'augmentation de la fiabilité du réseau à un coût minimum. Le renouvellement des réseaux d'eau répond à ces attentes à travers une politique qui s'inscrit dans le cadre d'une gestion du patrimoine à court, moyen et long terme.

Tableau 1. La gestion du patrimoine adaptée au renouvellement des réseaux d'eau potable

Processus de gestion du Patrimoine et réseau d'eau potable	
Objectifs et Politiques	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentation en eau en quantité et qualité - Augmenter la fiabilité du réseau et réduire la gêne occasionnée en cas de défaillance - Réduire les coûts de maintenance et de remplacement - Niveau de service satisfaisant : débit et pression aux nœuds de consommation
Inventaire du Patrimoine et collecte des données	<ul style="list-style-type: none"> - Inventaire du réseau : identification des conduites constituant le réseau - Collecte de données et d'information concernant la nature des conduites, la date de pose, longueur, diamètre - Identifier les sources de l'eau, les zones de stockage - Mesurer la demande et les niveaux de pression
Evaluation de la condition et Etat du patrimoine	<ul style="list-style-type: none"> - Défaillances antérieures, fuites. - Plaintes des abonnés - Déficience en débit et pression
Performance du système et modélisation	<ul style="list-style-type: none"> - Etude du phénomène de vieillissement - Modélisation hydraulique et fonctionnement du réseau
Evaluation des alternatives et optimisation	<ul style="list-style-type: none"> - identification des conduites vulnérables - Hiérarchisation des conduites et priorités - proposition de politique de renouvellement
Sélection des alternatives à court et long terme	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluation des politiques et sélection
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> - Implémentation des politiques et mesure de l'impact en terme d'amélioration du réseau
Contrôle et Analyse	<ul style="list-style-type: none"> - Suivi de l'implémentation des politiques - Actions correctives suivant l'évolution de l'état du réseau, du service de l'eau et son environnement

Nous proposons dans Le Tableau 1 une adaptation du processus de gestion du patrimoine à la gestion du réseau d'eau potable. Nous remarquons que l'approche décrite s'appuie sur une analyse du fonctionnement du réseau et de sa performance, ainsi qu'une analyse économique liée à la déficience du réseau et la mise en place de travaux de maintenance et de renouvellement.

En ce sens (Skipworth et al., 2002) préconisent l'intégration d'une analyse purement économique avec une approche d'analyse de performance du réseau AEP dans la prise de décision. Voir Figure 5.

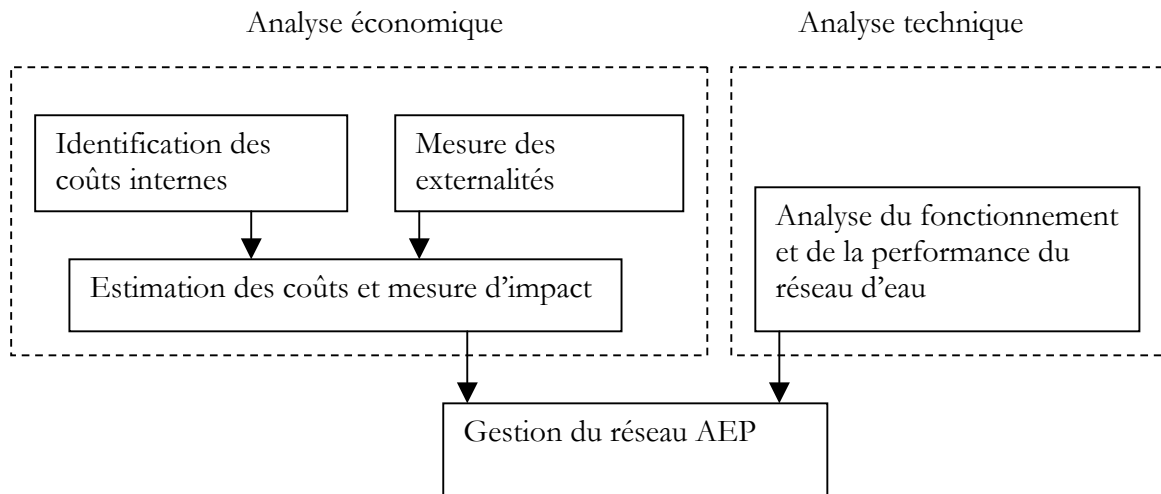


Figure 5. Outil d'aide à la décision pour la gestion du réseau AEP (Adapté de Skipworth et al., 2002)

Il apparaît que le renouvellement des réseaux AEP fait partie d'un processus plus global qui est la gestion du réseau AEP dans son ensemble. Nous proposons d'adapter l'approche proposée par (Skipworth et al., 2002) en identifiant les données devant être considérées au cours de notre analyse et les évaluations permettant de mesurer la performance du réseau AEP. La collecte, la mise à jour et le traitement des données sont gérés dans le cadre du système d'information du service de l'eau. Nous identifions des Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGBD) et un Système d'Information Géographique (SIG) contenant des données graphiques du réseau. Ces données cherchent à décrire la topologie du réseau et la localisation des conduites et organes hydrauliques constituant le réseau à l'aide de cartes et plans ainsi que la nature des abonnés desservis. Les deux dispositifs communiquent afin d'avoir une information complète sur le réseau AEP. De plus en plus de services d'eau se dotent d'un système d'information permettant une meilleure prise en compte des données pour alimenter le processus de prise de décision. L'analyse des données nécessaires porte sur :

4.2.1 L'analyse économique

L'analyse économique porte sur l'ensemble des coûts liés aux réseaux AEP et aux conduites à savoir les coûts directs : d'installation des conduites, d'inspection, de réparation, de maintenance et de remplacement. Les coûts indirects sont plus difficiles à mesurer d'un point de vue économique car induits par des événements imprévisibles et liés aux externalités qui traduisent l'impact sur l'environnement du réseau en cas de défaillances ou travaux de renouvellement :

dégâts, inondation, interruption du service, manque à gagner, gêne pour le trafic (Care-W, 2003). Le renouvellement est tributaire des ressources financières disponibles. L'analyse porte sur l'ensemble de la durée de vie technique de la conduite. Tout au long de cette durée de vie, il est nécessaire d'identifier les coûts directs :

- d'acquisition et d'installation de la conduite
- de réparation et maintenance
- de dépose et renouvellement.

Ainsi que l'identification de coûts indirects liés :

- à la gêne occasionnée lors de travaux sur le réseau
- au manque à gagner du au à la baisse d'activité lors de travaux
- à la dégradation de biens en cas de casse ou fuites : inondations, affaissement de la chaussée
- aux plaintes d'usagers en cas de déficience de pression ou interruption du service.

4.2.2 L'analyse technique

Cette analyse cherche à étudier l'évolution de l'état du réseau tout au long de la durée de vie des conduites. Il s'agit d'apporter une description et une mesure aux phénomènes de détérioration structurelle (physique) des canalisations qu'accompagne le vieillissement des conduites et la détérioration hydraulique qui se rapporte au fonctionnement du réseau qui se manifeste par une déficience de la desserte en eau. Le renouvellement du réseau d'eau potable nécessite la description du mécanisme de détérioration des conduites en identifiant les facteurs qui conduisent à une dégradation du réseau (facteurs de désordre), et ceux qui peuvent donner lieu à un renouvellement (facteurs déclencheurs). Une connaissance du réseau est indispensable. Elle est assurée par la localisation de l'emplacement des conduites, matériaux de constitution, diamètre, âge, localisation et type des autres éléments du réseau (pompes, vannes, etc.). Ces informations alimentent les bases de données du service d'eau et son système d'information (SIG⁶, Progiciel de gestion, fiches d'immobilisation⁷). Une fois les éléments du réseau identifiés, nous devons être en mesure de décrire leur fonctionnement, en effectuant des mesures de certaines grandeurs. Pour chaque partie constituant le réseau, il est important de connaître :

- le volume distribué annuellement, celui comptabilisé et non comptabilisé
- les pressions et débits au niveau des conduites et nœuds de consommation
- le coefficient de rugosité (Hazen Williams)

6 . Système d'Information Géographique

7 . Propre à chaque immobilisation assurant un suivi comptable (pratique de l'amortissement).

L'intérêt est de pouvoir définir des indicateurs de performance du réseau à travers des caractéristiques liées à la distribution, aux canalisations et à la qualité de l'eau distribuée. Un inventaire des interventions et travaux sur le réseau doit être effectué, cela passe par le recueil sur le terrain d'informations en matière d'interventions, réparations dans le but d'alimenter les bases de données qui répertorient :

- la date d'occurrence des défaillances
- les caractéristiques de la conduite, nature du matériau, longueur, diamètre, année de pose
- les types de défaillances observées,
- le type de remblai, environnement de la conduite,
- les éléments liés aux interventions (durée, pièces, coûts).

Ces données permettent aussi d'actualiser les informations sur les plans de réseau, et de déterminer les secteurs à forte fréquence de défaillance.

Discussion

Il apparaît que le renouvellement des réseaux d'alimentation en eau potable fait partie intégrante de la politique de gestion du réseau dans son ensemble. Nous considérons cette politique comme une gestion du patrimoine constitué par les conduites, les composants et installations hydrauliques du service d'eau. Nous soulignons l'importance de la disponibilité de données, à la fois économiques et techniques en rapport avec l'exploitation du réseau, qui permettent d'alimenter le processus de décision. La politique de renouvellement doit être en adéquation avec la gestion de l'ensemble des éléments et installations formant le réseau AEP à long terme.

5. La programmation pluriannuelle et la décision de renouvellement

Nous distinguons deux étapes dans le processus de prise de décision. La première étape qui est décrite ci-dessus et qui cherche à apporter une analyse économique et technique au réseau et à l'interaction avec son environnement (usagers, condition d'exploitation, emplacement des conduites). Cette étape vise à comprendre le fonctionnement du réseau et décrire sa détérioration au cours du temps afin d'identifier les conduites prioritaire au renouvellement. Il est clair que parmi l'ensemble des conduites du réseau, une partie seulement devra faire l'objet de travaux de renouvellement.

La seconde étape consiste à évaluer l'impact du renouvellement des conduites critiques identifiées sur la performance du réseau. L'intérêt est d'effectuer une analyse *coût/bénéfice*. Il est important d'identifier plusieurs scénarios à cette étape, cela permet au service de l'eau de prévoir différents programmes de renouvellement en fonction des spécifications techniques requises mais aussi en fonction des ressources financières dont il dispose. Il s'agit donc de programmer un ensemble de travaux sur le réseau sur un horizon de temps donné en général égal à 5 ans, en favorisant les conduites critiques et en utilisant les ressources financières de manière satisfaisante. Nous établissons une analogie avec la problématique d'ordonnancement de projet (Giard, 2004) et la réalisation de travaux de renouvellement au moyen de ressources limitées. Des ressources qui peuvent être renouvelables et disponibles sur l'ensemble de l'horizon de planification à l'exemple d'équipement de production, main d'œuvre, machine, ou non renouvelable et disponibles de manière restreinte sur l'ensemble de l'horizon de planification comme le budget. Nous supposons qu'il n'y a pas de conflit sur la disponibilité de main d'œuvre et l'exécution des travaux de renouvellement. La limite concerne la ressource financière traduite par le budget disponible pour la réalisation de travaux de renouvellement. Dans le cadre de la thèse, nous établissons une analogie entre la programmation du renouvellement et :

- les problèmes d'ordonnancement de projet sous contraintes de ressources (Resource Constrained Project Scheduling Problem, RCPS)⁸
- les problèmes de nivellement de ressources (Resource Levelling Problem, RLP)⁹

Lors de la planification d'un projet le gestionnaire décompose le problème d'ordonnancement. Il cherche dans un premier temps à déterminer les ressources à allouer au projet qui traduisent par la suite une limite, souvent arbitraire. Par la suite il planifie les tâches du projet par la détermination des dates d'exécution et les ressources à allouer pour chaque tâche. En considérant la détermination des ressources comme donnée exogène définie par le gestionnaire, plusieurs travaux proposent des approches de planification, une revue de la littérature est contenue dans (Kloisch & Padaman, 2001). D'après (Boctor, 2005) la décomposition du problème peut présenter des insuffisances en rapport avec l'estimation des ressources à allouer au projet, qui n'est pas forcément optimale et ne permet pas toujours de réaliser le projet avant la date limite souhaitée.

⁸ . RCPS cherche à proposer un ordonnancement qui tient compte des contraintes de précédence et les ressources disponibles pour la réalisation de travaux donnés, plusieurs heuristiques sont proposées pour la résolution de ce type de problèmes dans (Al-Fawzan & Houari, 2006). (Drezet & Tacuad, 2003) présentent également une synthèse bibliographique des ce type problèmes.

⁹ . RLP consiste à modifier les dates d'exécution des tâches non critiques afin de réduire les fluctuations des quantités de ressources requises (Boctor, 2005).

Cette critique porte sur le nivellement des ressources qui ne peut s'effectuer indéfiniment dans le temps. La disponibilité des ressources est donc limitée dans le temps et le nivellement des ressources permet de minimiser les coûts du projet. Plusieurs approches sont proposées dans la littérature (Hegazi, 1999) , (Son & al., 1999) et (Hiyassat, 2001). Nous établissons une analogie entre la programmation du renouvellement et l'ordonnancement de projet tel que:

- les tâches du projet correspondent aux travaux de renouvellement à réaliser sur le réseau
- les contraintes de précédence sont désignées par les niveaux de priorité de renouvellement des conduites et leur rôle dans le fonctionnement du réseau
- pour chaque année de l'horizon de planification, la réalisation des travaux de renouvellement ne doit pas dépasser la ressource disponible qui correspond au budget alloué
- la programmation pluriannuelle vise à minimiser les coûts de renouvellement et à améliorer le fonctionnement du réseau.

Le délai de réalisation des travaux de renouvellement est compris entre 1 et 5 ans. L'estimation de la ressource financière s'effectue à l'aide du modèle d'aide à la décision que nous avons élaboré.

Nous considérons deux cas de figure :

5.1 Absence de contraintes budgétaires, disponibilité de la ressource financière

Le service de l'eau dispose des ressources financières nécessaires à la réalisation des travaux de renouvellement, dans ce cas il s'agira de déterminer un coût minimum permettant de réaliser les travaux nécessaires en assurant un fonctionnement adéquat du réseau.

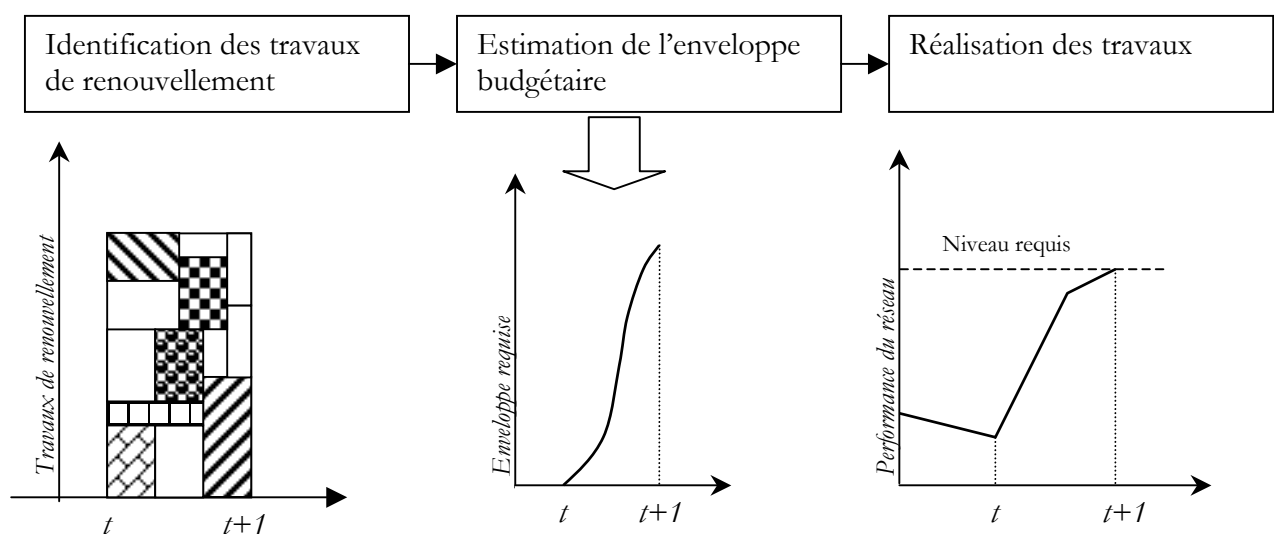


Figure 6. Décision de renouvellement et programmation budgétaire

Nous illustrons dans La Figure 6 l'impact d'un investissement important sur la performance du réseau. (AWWA, 1998) conditionne la fiabilité du réseau par les investissements consentis pour l'amélioration du réseau. Dans ce cas précis, la disponibilité de ressources financières pour la réalisation des travaux de renouvellement permet une amélioration significative et rapide de la performance du réseau.

5.2 Contraintes budgétaires, insuffisance de la ressource financière

Dans ce cas, le service de l'eau ne dispose pas de ressources financières suffisantes. Il s'agira d'identifier la programmation de travaux qui permette d'assurer un bon fonctionnement du réseau tout en minimisant les coûts d'intervention sur le réseau. Une fois une programmation satisfaisante identifiée, un lissage des travaux de renouvellement permet de répartir le coût de mise en œuvre sur l'ensemble de l'horizon de programmation. Il s'agira d'améliorer le fonctionnement du réseau tout en respectant la contrainte sur le budget et une utilisation optimale de la ressource disponible.

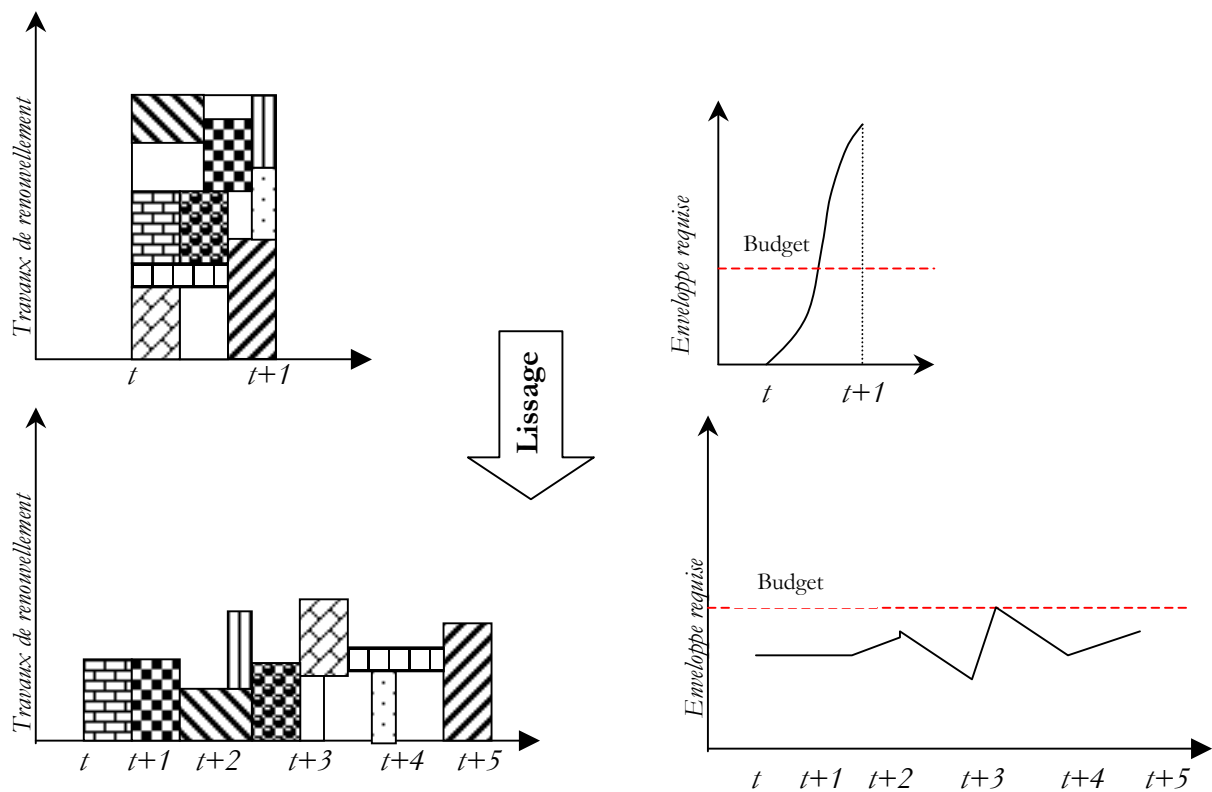


Figure 7. Programmation du renouvellement sous contrainte budgétaire

La Figure 7 illustre une approche de programmation pluriannuelle sous contrainte budgétaire. L'identification des travaux de renouvellement fait apparaître une insuffisance des ressources financières pour la réalisation des travaux de renouvellement. Les travaux sont lissés sur l'ensemble de l'horizon de planification. La réalisation des travaux doit prendre en compte les priorités de renouvellement des conduites d'eau et l'impact sur la performance du réseau, la contrainte budgétaire peut être égale sur l'ensemble de l'horizon de planification, croissante ou décroissante traduisant ainsi la disponibilité des ressources. Nous pensons que le niveau de performance du réseau dépend de la programmation pluriannuelle des travaux de renouvellement. Le niveau de performance peut être amélioré de manière significative dès la première année des travaux. Dans un premier temps, nous proposons une illustration de cet impact, que nous devons vérifier dans la suite de la thèse.

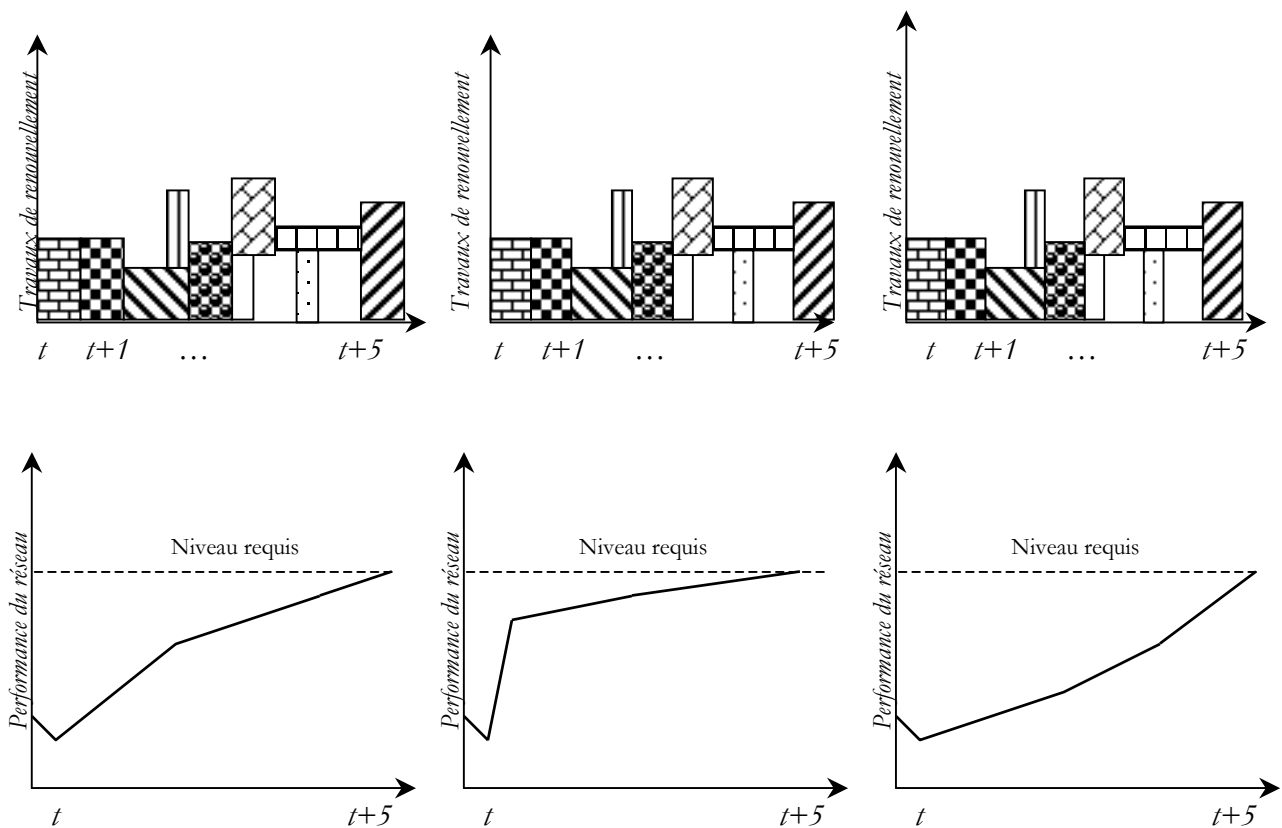


Figure 8. Relation entre la contrainte budgétaire, la réalisation des travaux et la performance du réseau

L'hypothèse illustrée par la Figure 8 traduit l'impact d'une programmation donnée des travaux sur le réseau. Il ne suffit pas d'identifier les travaux de renouvellement à effectuer pour chaque conduite, il est important de mesurer l'influence de ces travaux sur la performance du réseau en présence d'une contrainte budgétaire annuelle. Nous vérifierons cette hypothèse dans le chapitre 6.

6. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le contexte qui caractérise la distribution de l'eau en France et d'introduire la problématique de renouvellement. Il apparaît que la décision en matière de renouvellement est partie intégrante d'un processus à long terme de gestion du patrimoine qui nécessite une intégration de critères économiques et techniques liés au fonctionnement et à la performance du réseau.

La programmation pluriannuelle du renouvellement fait apparaître l'impact de l'insuffisance des ressources financières sur la réalisation des travaux. Il convient de tenir compte des critères techniques qui décrivent l'impact de ces travaux sur la performance du réseau. En nous inspirant des approches développées dans l'ordonnancement de projet sous contrainte de ressources, nous proposons d'étudier la programmation des travaux de renouvellement, et leur impact sur la performance du réseau. Il n'existe pas d'approche unique pour la mise en place du renouvellement. Nous identifions un ensemble de critères devant être pris en compte dans le processus de prise de décision en matière de renouvellement. L'outil d'aide à la décision doit pouvoir :

- décrire en fonction du temps, le phénomène de vieillissement des conduites à travers la définition de fréquence, probabilité de défaillance, taux de défaillance ou loi de vieillissement
- prendre en compte les contraintes externes et internes liées aux conduites (corrosion, nature du sol, qualité de l'eau).
- prendre en compte le fonctionnement hydraulique du réseau, pression des conduites, l'effet du renouvellement d'une ou de plusieurs conduites sur l'ensemble du réseau sur le fonctionnement du réseau.
- estimer les coûts en rapport avec les travaux de renouvellement, ces coûts peuvent être directs (maintenance, remplacement, réhabilitation, renouvellement) ou indirects (dédommagement, perte de profit, gêne occasionnée).
- proposer une ou un ensemble de politiques de renouvellement viables d'un point de vue technique et économique à l'échelle du réseau
- tenir compte de l'impact d'autres travaux sur l'environnement de la conduite : voirie, gaz, électricité.
- mesurer l'impact de la programmation pluriannuelle sur la performance du réseau.

Fonctionnement du réseau

AEP et fiabilité hydraulique

Le réseau d'Alimentation en Eau Potable (AEP) est un assemblage de conduites et d'organes sous pression, dont la mission est la desserte des usagers. La topologie du réseau dépend de la dispersion des abonnés, de la localisation des sources de captage et des zones de stockage.

La satisfaction des abonnés est mesurée par la qualité et la quantité de l'eau acheminée. La vulnérabilité du réseau face à la survenue de défaillance, dépend de la localisation des conduites, du moment de la survenue de la défaillance et la nature des abonnés desservis. Les conduites constituant un réseau n'ont pas le même rôle dans la desserte en eau. Certaines sont donc plus importantes que d'autre d'un point de vue hydraulique.

L'importance d'une conduite est décrite par la quantité d'eau qu'elle permet d'acheminer, la nature et le nombre d'abonnés qu'elle dessert. Après avoir défini la problématique du renouvellement, nous décrivons dans ce chapitre le fonctionnement hydraulique du réseau AEP et présentons des indices qui permettent de mesurer la vulnérabilité d'un réseau d'alimentation en eau potable. Ces indices définissent une hiérarchisation des conduites constituant le réseau. Par la suite nous proposons deux indices traduisant le rôle de chaque conduite dans la desserte en eau et l'impact de son indisponibilité, qui décrit une défaillance ou une casse sur le fonctionnement du réseau. Ce chapitre vise à décrire le fonctionnement d'un réseau AEP et renseigne sur la nécessité de la prise en compte de critère technique en matière de renouvellement .

Sommaire

1. Introduction	54
2. L'Alimentation en Eau Potable (AEP)	54
3. La distribution de l'eau potable en France	55
4. La distribution et les réseaux AEP	57
5. La modélisation hydraulique du réseau AEP	65
6. Etude de la fiabilité hydraulique des réseaux	67
7. Prise en compte de l'effet réseau et mesure de l'importance d'une conduite	74
8. Conclusion	81

1. Introduction

Il s'agit à travers ce chapitre de décrire le fonctionnement hydraulique du réseau. L'acheminement de l'eau vers les usagers doit se faire en qualité et quantité satisfaisante. L'alimentation en eau dépend de la nature de l'utilisateur : domestique, commerce, industriel, administration. La consommation est variable selon les jours de la semaine et les heures de la journée. Il existe des périodes de pointe dans la journée qui correspondent à une demande maximale en eau. Nous distinguons aussi le jour de pointe dans l'année qui correspond à une consommation maximale.

Il est clair qu'en fonction de la période considérée et du type de l'abonné desservi, l'impact d'une défaillance est différent.

Nous présentons dans un premier temps les différentes notions en rapport avec un réseau d'Alimentation en Eau Potable (AEP), ensuite nous présentons une revue de la littérature sur l'étude de la fiabilité hydraulique du réseau, en identifiant des indices de fiabilité hydraulique permettant de mesurer l'impact d'une indisponibilité d'une conduite donnée sur le fonctionnement hydraulique du réseau, qui s'accompagne d'une redistribution des flux et une variation des niveaux de pression aux nœuds de consommation. Le modèle d'aide à la décision doit intégrer l'analyse de la détérioration structurelle du réseau et une description de son fonctionnement.

2. L'Alimentation en Eau Potable (AEP)

L'Alimentation en Eau Potable comprend l'ensemble des opérations d'approvisionnement de la population en eau potable, depuis le prélèvement du milieu naturel jusqu'à l'utilisateur. Elle cherche à répondre à deux objectifs :

- Production d'une eau de qualité, à partir d'une eau brute qui nécessite généralement un traitement.
- La distribution de l'eau produite, à travers un ensemble d'installations et de réseaux afin de répondre à la demande des consommateurs de manière satisfaisante (taux de service).

2.1 Fonctions d'Alimentation en Eau Potable

Nous distinguons plusieurs étapes dans le processus de production et de d'acheminement de l'eau. La première étape est l'étape de *Captage*, qui consiste à recueillir les eaux souterraines ou de surfaces de la source. Vient ensuite l'étape d'*Adduction* qui permet de transférer l'eau de la zone de

captage jusqu'à proximité de la zone de distribution. Avant d'être distribuée l'eau doit subir des traitements ce qui permet de transformer l'eau brute en eau potable. L'eau est ensuite acheminée vers les zones de stockage afin de réguler le débit dans le réseau et prévenir une pénurie d'eau en cas de défaillance ou forte demande. L'eau est distribuée à travers le réseau d'Alimentation d'Eau Potable aux usagers.

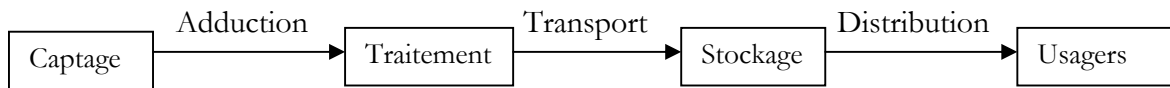


Figure 9. Le processus de production et distribution de l'eau.

3. La distribution de l'eau potable en France

La première loi traitant globalement du service de l'eau en France a été la loi cadre de 1964. La loi sur l'eau de 1992 est désormais le cadre général d'une gestion de l'eau, où l'eau est le patrimoine de tous¹. En France, l'alimentation en eau potable et l'assainissement des eaux usées sont gérés par des services publics locaux dont la gestion relève de la compétence des communes (ou de regroupements de communes).

Leur type d'organisation relève de la décision des élus, qui ont le choix entre deux grands modes de gestion : la gestion directe (la régie) ou la gestion déléguée sur la base d'appels d'offres ouverts à la concurrence (Voir Annexe 1). Chaque mode de gestion présente des particularités en terme de gestion de la maintenance du réseau et de ses équipements (Voir Annexe 2).

Selon (Tavernier, 2001) la France compte environ 15000 services d'eau et d'assainissement. Les régies concernent le plus souvent de petites communes, tandis que la délégation de service public (DSP) est préférée dans les grandes villes. Environ 52 % des communes délèguent la gestion du service d'eau. Le Tableau 2 décrit les modes de gestion des services de distribution d'eau et d'assainissement en France. Dans le cadre de la thèse, le mode de gestion n'est pas pris en compte car nous pensons qu'il n'influe pas directement sur les décisions en matière de renouvellement. Le modèle d'aide à la décision que nous proposons est valable quelque soit le mode de gestion du service d'eau.

¹. Un projet de loi sur l'eau et les milieux aquatiques encours de discussion au sénat.

Tableau 2. Modes de gestion des services de distribution et d'assainissement en France (Tavernier, 2001)

Mode de gestion	Parts des communes (en %)	Part de la population (en %)
Service de distribution d'eau		
- régie	48	21
- délégation de service public	52	79
<i>dont affermage</i>	88	(n.c)
<i>dont concession, régie intéressée, gérance ou autre</i>	12	(n.c)
Service de l'assainissement collectif		
- régie	62	47
- délégation	38	53
<i>dont affermage</i>	85	(n.c)
<i>dont concession, régie intéressée, gérance ou autre</i>	15	(n.c)

Trois grands groupes se partagent l'essentiel de la gestion déléguée de l'eau en France : Vivendi, Suez et Bouygues-SAUR. Le tableau renseigne sur la répartition des prestataires privés du marché de la distribution de l'eau et d'assainissement en France.

Tableau 3. Parts de marché des prestataires privés dans la distribution de l'eau (Tavernier 2001)

Nom de la société	Groupe	Part des abonnés desservis	Types de collectivités	Nombre de contrats
Générale de eaux	Véolia	51 %	Grandes villes, en particulier en Ile-de-france	4 800
Lyonnaise des eaux	Suez	24 %	Communes rurales, villes petites et moyennes	3 000
Société d'Aménagement Urbain et Rural (SAUR)	Bouygues	13 %	Communes rurales, villes petites et moyennes	7 000
Filiales communes	Générales et Lyonnaise (12 filiales) Lyonnais et SAUR (02 filiales)	10 %	Grandes villes et agglomérations	(n.c)
Une dizaine de sociétés indépendantes		2 %	Communes rurales, petites villes	(n.c)

4. La distribution et les réseaux AEP

Dans le cadre de la thèse, nous considérons la partie du réseau permettant d'acheminer l'eau des zones de stockage vers les abonnés. Nous distinguons plusieurs types d'abonnés en fonction de la raison sociale : domestique, commerce, industriel, administration.

La distribution de l'eau s'effectue à l'aide de réseaux enterrés constitués de conduites et de canalisations sous pression qui comprennent des :

- conduites et pièces spéciales
- appareils de robinetterie : vannes, clapets
- appareils de mesure : compteurs, débitmètres
- appareils de fontainerie : bouches d'incendie

Les zones de stockage comprennent généralement des réservoirs à grande capacité, la liaison entre les abonnés est assurée à l'aide des conduites. La jonction entre conduites constitue des nœuds. L'écoulement de l'eau s'accompagne d'une perte d'énergie en raison des frottements avec les parois internes des conduites et des organes hydrauliques que comporte le réseau. Cette dissipation d'énergie est traduite par le phénomène de perte de charge.

4.1 Structure du réseau AEP

La structure du réseau AEP dépend de la localisation des abonnés, de leur importance et du niveau de demande à assurer. La structure traduit les dimensions des conduites, la capacité des réservoirs, le nombre de pompes et la puissance fournie. La structure du réseau tient compte d'éléments géographiques tels que : la dispersion des abonnés, la présence d'obstacles naturels, la présence de routes, chemin de fer, jardins, d'autres réseaux enterrés.

Tous ces éléments vont permettre au service de l'eau de définir des caractéristiques propres à chaque composant du réseau afin d'assurer son bon fonctionnement. Ces caractéristiques sont détaillées dans ce qui suit :

4.1.1 Les conduites

Les conduites permettent l'acheminement l'eau d'un point à un autre point du réseau. Une conduite est un segment de tuyau ou canalisation délimitée par deux points de consommation d'eau appelés *nœuds*. Chaque conduite est caractérisée par :

- un nœud initial et un nœud final
- une longueur donnée L
- un diamètre d
- un coefficient de rugosité C traduisant la perte de charge
- un état : ouvert, fermé

L'écoulement de l'eau s'effectue du nœud disposant de la pression la plus élevée vers le nœud dont la pression est plus faible. La rugosité traduit la résistance de la conduite à l'écoulement de l'eau. Les parois internes des conduites au contact de l'eau créent un phénomène de friction qui s'accompagne de perte d'énergie due au frottement créant ainsi une perte de charge linéaire.

Dans le cadre de la thèse, nous utilisons la formule de Hazen-Williams pour le calcul de la perte de charge dans les conduites.

$$H_L = \frac{10.674.L.Q^{1.852}}{C^{1.852}.D^{4.871}} \quad (2.1)$$

Où :

H_L : perte de charge linéaire, en mètres

Q : débit, en m^3 / s

L : longueur de la conduite

D : diamètre de la conduite, en mètres

C : coefficient de rugosité de Hazen-Williams

Nous distinguons entre les conduites en fonction de leur rôle dans le réseau et la nature du matériau les constituant. Le transport de l'eau vers les zones de stockage nécessite des conduites de diamètre important (300-800 mm). Pour la distribution les conduites sont de diamètres inférieurs (80-250 mm) et enfin les branchements qui sont de plus faible diamètre (40-60 mm) qui permettent d'acheminer l'eau jusqu'au abonnés à partir des conduites de distribution. Une autre distinction peut être effectuée en se basant sur la nature du matériau constituant la conduite,

plusieurs conduites sont disponibles présentant des caractéristiques physiques et mécaniques distinctes. Le Tableau 4 présente certains types de conduite :

Tableau 4. Caractéristiques des conduites selon le matériau la constituant

Matériau	Résistance mécanique	Résistance à la corrosion
Béton	importante	importante
Fibres ciment	Interdit comporte de l'amiante	
Matières Plastiques ²	faible	importante
Acier	importante	faible
Fonte grise	faible	importante
Fonte ductile	importante	importante

La fonte (alliage de fer et de carbone) apparaît comme le matériau le plus utilisé dans la confection des canalisations. On distingue entre les fontes grises (dites fontes anciennes) et les fontes ductiles. Cette distinction est relative à la disposition du graphite (carbone) dans la matière, rendant la fonte ductile moins fragile. La fonte ductile est donc plus adaptée, car elle présente les propriétés suivantes :

- bonne résistance mécanique (traction, chocs) ;
- résistance aux attaques du sol, fluides, solides transportés, aux variations de pression et de température.

Certaines conduites de longueur fictive peuvent contenir des dispositifs hydrauliques spécifiques : pompes, vannes, coudes, stabilisateur de pression, autres appareils de mesure. Ils représentent des points singuliers :

4.1.1.1 Les pompes

Une pompe est un dispositif permettant de fournir de l'énergie au liquide. Le fonctionnement de la pompe est relié généralement à un réservoir. Le démarrage et l'arrêt de la pompe sont fonction du niveau du réservoir ou de plages horaires spécifiques. Une pompe peut être caractérisée soit par une puissance constante (énergie), fournie à l'eau au cours du temps indépendamment du débit et de la hauteur de refoulement, ou par une courbe caractéristique qui décrit la relation entre la hauteur de refoulement et le débit fournie à l'aide d'une fonction $H=f(Q)$.

² . PVC : Polychlorure de Vinyle
 . PEHD : Polyéthylène Haute Densité
 . PRV : Composite en Stratifié Verre-Resine

Une pompe est définie par :

- le nœud sur lequel elle est indexée (en général un réservoir)
- la puissance absorbée par l'eau ou sa courbe caractéristique
- les seuils d'arrêt et de démarrage du réservoir à partir desquels la pompe s'arrête ou démarre
- les plages horaires de fonctionnement et d'arrêt

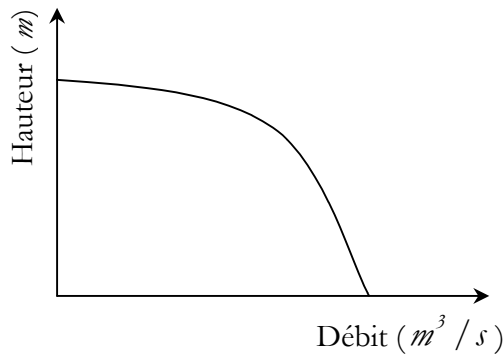


Figure 10. Exemple de courbe caractéristique d'une pompe

4.1.1.2 Les vannes

Certaines conduites de longueur fictive comporte des vannes qui permettent de limiter la pression ou le débit en des points précis du réseau. Les vannes sont caractérisées par :

- les nœuds d'entrée et de sortie,
- le diamètre
- la consigne de fonctionnement et l'état de la vanne
- coefficient de perte de charge singulière

Une vanne peut être ouverte ou fermée, le fonctionnement de la vanne est fonction de consignes relatives à un nœud indexé généralement en rapport avec la pression. L'écoulement de l'eau à travers la vanne s'accompagne d'une perte d'énergie exprimée par la perte de charge singulière.

$$H_s = c \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.2)$$

H_s : perte de charge singulière en mètres

c : coefficient de perte de charge singulière propre à la vanne

v : vitesse d'écoulement de l'eau dans la conduite supportant la vanne en m/s

g : gravité en m/s^2

4.1.2 Les nœuds

Les nœuds représentent des points de jonction entre les conduites. Ils correspondent à des points d'entrée ou de sortie d'eau. Il existe deux catégories de nœuds :

4.1.2.1 Les nœuds à débit fixe

Ces nœuds se caractérisent par une cote au sol connue et un débit connu (demande), l'inconnue est la pression au nœud qui doit être calculée. Ils correspondent à des points de consommation dans le réseau. Ces nœuds peuvent décrire la consommation d'un ou de plusieurs abonnés de même type. Nous distinguons entre les abonnés selon le type de consommation : domestique, industrielle, administration. La consommation au nœud exprimée par la demande peut être constante ou variable. Selon la nature des abonnés, la demande est décrite par une courbe de consommation.

4.1.2.1.1 La courbe de consommation ou de modulation

La courbe de consommation décrit pour un type d'abonné (domestique, industriel, commerce, administration) l'évolution de la demande en eau tout au long de la journée. La consommation journalière est tributaire des heures de la journée. Pour une consommation maximale on identifie le jour de pointe dans l'année et une heure de pointe dans la journée. Pour une journée donnée, nous calculons la consommation moyenne, pour chaque période t . Le multiplicateur de la demande μ_t à partir de la consommation Q_t est calculé tel que :

$$\mu_t = \frac{Q_t}{\bar{Q}} \quad (2.3)$$

et

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{t=1}^{24} Q_t}{24} \quad (2.4)$$

Tableau 5. La courbe de consommation ou courbe de modulation

Période	1	2	3	4	5	6	7	...	21	22	23	24
Multiplicateur	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	μ_7	...	μ_{21}	μ_{22}	μ_{23}	μ_{24}

La Figure 11 représente la courbe de consommation au jour de pointe, K_2 représente le coefficient de pointe horaire qui correspond au multiplicateur de la demande à l'heure de pointe.

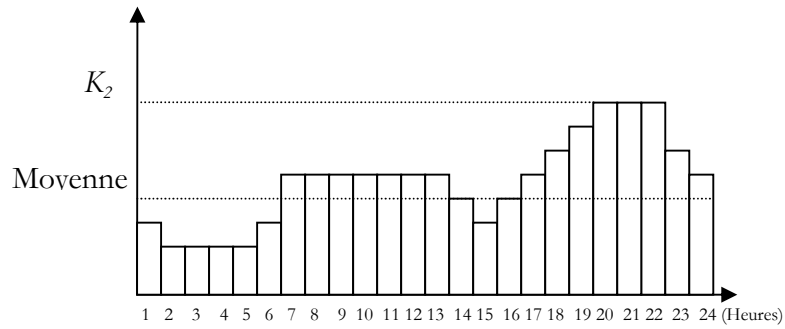


Figure 11. Exemple de Courbe de consommation Courbe de modulation au jour de pointe.

4.1.2.1.2 *Le coefficient de pointe journalier*

Le coefficient de pointe journalier K_1 représente le rapport entre le volume maximal consommé en une journée et le volume moyen journalier consommé sur l'année

$$K_1 = \frac{\text{Consommation du jour de pointe (m}^3\text{)}}{\text{Consommation du jour moyen (m}^3\text{)}} \tag{2.5}$$

4.1.2.1.3 *Le coefficient de pointe horaire*

Le coefficient de pointe horaire K_2 représente le rapport entre la consommation à l'heure de pointe et la consommation moyenne de la journée de pointe.

$$K_2 = \frac{\text{Consommation de l'heure de pointe (m}^3\text{)}}{\text{Consommation moyenne du jour de pointe (m}^3\text{)}} \tag{2.6}$$

4.1.2.1.4 *Le rendement d'un réseau*

Le rendement du réseau noté η exprime le rapport entre la quantité produite au cours d'une année donnée et la quantité facturée (vendue). Le rendement du réseau permet de déterminer le volume d'eau non facturé (arrosage, poteaux incendie, pertes).

$$\eta = \frac{\text{Volume facturé (m}^3\text{ / an)}}{\text{Volume produit (m}^3\text{ / an)}} \tag{2.7}$$

4.1.2.2 Les nœuds à charge fixe

Ce sont des nœuds où la charge est fixée ou dont la cote piézométrique³ de l'eau est connue. Il peut s'agir d'un réservoir dont le niveau d'eau varie en fonction du temps au sol ou sur tour, d'un poteau à incendie ou d'une bêche de pompage dont le niveau reste inchangé. Pour ces nœuds le débit doit être calculé.

4.1.2.2.1 Les réservoirs

Les réservoirs sont des nœuds avec une capacité de stockage, dont le volume d'eau peut varier au cours du temps. Cette variation est décrite par la courbe de volume, qui pour un point de stockage (Réservoir, château d'eau) définit la relation entre le niveau d'eau et le volume qu'il contient. Cette relation tient compte de la forme géométrique du point de stockage. Les caractéristiques d'un réservoir sont :

- L'altitude du radier qui correspond à un niveau zéro de l'eau.
- Le diamètre du réservoir ou sa courbe de volume
- Les niveaux : initial, minimal et maximal de l'eau

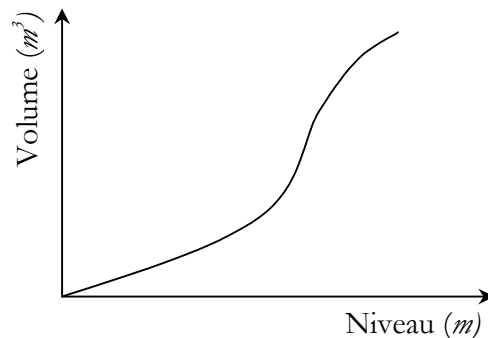


Figure 12. Exemple de courbe de volume d'un réservoir

4.1.2.2.2 Les bêches

Ces nœuds sont des points de stockage à capacité infinie, il représente des sources externes d'approvisionnement en eau (pompage, lac, fleuve). Les bêches sont caractérisées par un niveau d'eau fixe.

³ . Ligne idéale qui joint les points obtenus en portant verticalement vers le haut, à partir de la cote géodésique de chaque point de l'installation, une longueur égale à la hauteur de liquide due à la pression en ce point. La cote ainsi obtenue pour chaque point est appelée cote piézométrique

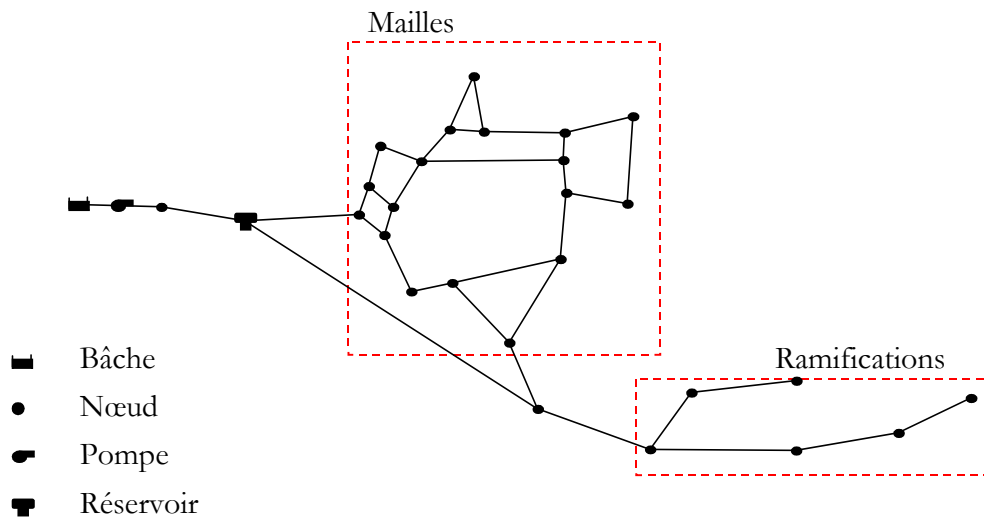


Figure 13. Représentation schématique d'un réseau d'alimentation en eau potable

4.1.3 Topologie du réseau AEP

La topologie du réseau est la représentation schématique des différents nœuds d'un réseau et de leurs liaisons physiques (conduites, pompes, vannes). La disposition des nœuds et des conduites dépend de la localisation des abonnés, présence de routes, obstacles naturels, présence d'autres réseaux. En terme de topologie, nous distinguons :

4.1.3.1 Les réseaux ramifiés

Ce type de réseau se présente selon une structure arborescente à partir du nœud à charge fixée assurant la mise sous pression. Cette configuration est justifiée par la dispersion des abonnés. Cependant, ce type de topologie réduit la fiabilité du réseau dans le cas d'une rupture d'une conduite, privant en eau les utilisateurs en aval du point de rupture. Elle caractérise généralement les réseaux de distribution d'eau en milieu rural.

4.1.3.2 Les réseaux maillés

Comportant un certain nombre d'antennes en boucle et pouvant assurer la distribution en eau, cette configuration caractérise les réseaux de distribution d'eau en milieu urbain où il existe une concentration des abonnés. La présence de boucle ou de maille réduit les risques de coupure en cas de rupture de conduites, car assurant une redondance dans l'acheminement de l'eau et limitant l'impact d'une rupture sur la desserte en eau. Dans la réalité les deux configurations coexistent dans un même réseau. En milieu rurale, le réseau sera formé par plus d'antenne et ramifications, alors qu'en milieu urbain on constatera plus de mailles.

5. La modélisation hydraulique du réseau AEP

La modélisation du fonctionnement du réseau cherche à décrire le comportement hydraulique des différents dispositifs du réseau. L'intérêt est de reproduire ce qui se déroule en réalité dans le réseau à l'aide d'un modèle hydraulique.

La représentation et la précision du modèle sont tributaire des objectifs du service de l'eau et des analyses escomptées, le niveau de détail conditionne donc les résultats de la modélisation. (Harrouz, 1996) distingue plusieurs types de modèles :

5.1 Modèle pour le dimensionnement du réseau

Le modèle permet de vérifier pour une configuration donnée du réseau, la satisfaction des exigences des abonnés en terme de pression et de débit. L'intérêt est de dimensionner les conduites et dispositifs hydrauliques. L'état des conduites et la demande sont supposés connus. Le niveau de détail est important, toutes les conduites sont représentées.

5.2 Modèle pour l'analyse du fonctionnement hydraulique et diagnostic

Dans ce cas, le modèle cherche à décrire le fonctionnement d'un réseau existant, par la détermination de l'état des conduites à travers la mesure de la rugosité des conduites et la demande des abonnés. Pour un réseau, des données liées à la topologie du réseau, les types des conduites, la typologie des consommateurs ainsi que des mesures de pression et débits en des points du réseau sont supposés connus. Un calage du modèle permet de déterminer certains paramètres inconnus : rugosité, consommation afin de s'approcher le plus possible du fonctionnement réel du réseau.

5.3 Modèle pour la gestion du réseau

Dans ce cas le modèle servira à décrire le comportement des sources d'approvisionnement, des zones de stockage et des stations de pompage. L'intérêt de ce type de modèle est d'optimiser l'exploitation des sources d'eau et de minimiser les coûts d'exploitation du réseau en régulant le pompage et le stockage de l'eau dans la journée. Ce modèle ne retient que les conduites de grand diamètre servant au transport et à la distribution de l'eau.

5.4 Modèle pour la mesure de la qualité de l'eau

Dans ce cas le modèle cherche à décrire les temps de séjour (stagnation de l'eau) de l'eau dans le réseau. En effet des temps de séjour important altèrent la qualité de l'eau dans le réseau. L'objet du modèle est de mesurer l'évolution d'un produit à titre d'exemple le chlore dans le réseau et d'en mesurer les concentrations à des points précis du réseau.

5.5 Précision du modèle et représentation du réseau AEP

La modélisation du fonctionnement du réseau doit décrire le comportement réel du réseau. En fonction de l'utilisation du modèle, un niveau de détail doit être défini. Le modèle ne considérera que certaines conduites du réseau et certains abonnés seront rassemblés sur des nœuds afin de simplifier la modélisation. Il n'existe pas de règles précises pour la simplification de réseau, mais certaines sont fréquemment utilisées :

- Suppression des conduites de petits diamètres ou de petites longueurs
- Suppression des conduites en antenne
- Suppression des nœuds intermédiaires
- Agglomération de plusieurs abonnés en un même nœud.
- Concaténation de conduites de même diamètre et même matériau
- Distinction entre abonnés de nature différente : domestique, industriel, autres.

L'autre aspect à prendre en compte est la définition des conduites. L'étude du fonctionnement du réseau et la détérioration hydraulique n'utilisent pas la même définition de la conduite.

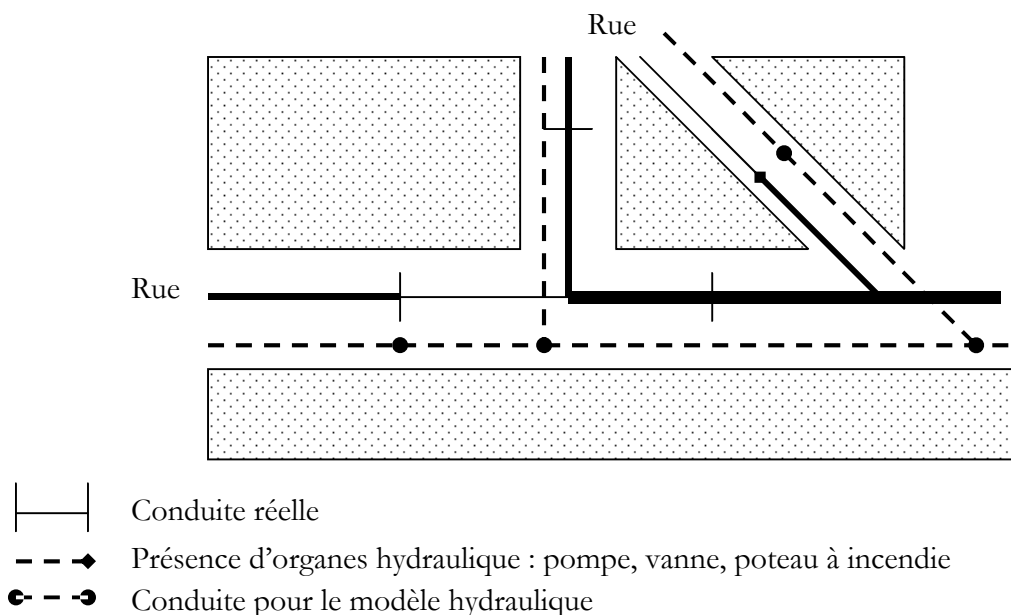


Figure 14. Modélisation du réseau AEP : prise en compte de l'aspect hydraulique et structurelle.

La Figure 14 illustre la distinction entre le réseau tel qu'il existe réellement et la modélisation hydraulique. Cette modélisation doit être attentive à l'étude de la détérioration structurelle des conduites qui s'articule sur une définition plus détaillée des conduites qui correspond plus au réseau réel. Nous devons trouver un niveau de description du réseau assurant un compromis entre l'étude de la détérioration structurelle et hydraulique. Cela nécessite l'adaptation des données disponibles et une définition appropriée des conduites du réseau.

6. Etude de la fiabilité hydraulique des réseaux

Les premiers travaux menés par (Shamir & Howard, 1979) (Walski & Pellicia, 1982) ce sont intéressés à l'impact de la détérioration structurelle sur les coûts de maintenance et la détermination d'un optimum économique définissant un seuil pour le renouvellement des conduites. (Todini, 2000) revient sur cette approche et identifie des insuffisances à une approche purement économique. Un réseau construit et géré en fonction d'un optimum économique peut ne pas répondre à des contraintes techniques. Des problèmes de dimensionnement des conduites ou de déficience de pression sont relevés. L'auteur revient sur l'importance de la topologie du réseau dans la prise de décision, en comparant la fiabilité d'un réseau se présentant en maille et un réseau ramifié. Cependant, la topologie du réseau n'est pas seulement dictée par le gestionnaire ou le concepteur du réseau d'eau mais respecte des contraintes liés à la disposition des usagers, les routes, la présence d'obstacles naturels, la présence d'autres réseaux : gaz, électricité. (Todini, 2000) introduit la notion de résilience qui traduit la capacité du réseau à pallier une défaillance ou une rupture et limite son impact sur le fonctionnement réseau. Pour l'auteur le réseau doit être en mesure de faire face à des incidents dont l'effet est temporaire dans le temps mais pouvant engendrer des dégradations importantes. Même si la notion de résilience n'est pas évoquée sous ce nom, on y fait souvent allusion. Il apparaît que la fiabilité du réseau dépend de sa capacité à limiter l'incidence d'un événement sur son fonctionnement. Pour (Ormsbee & Kessler, 1990) définissent la redondance comme mesure de la fiabilité. Ils définissent deux types : typologique et hydraulique. La redondance typologique assure l'existence d'un chemin (physique) de la source au nœud de consommation. La redondance hydraulique assure la capacité d'un chemin redondant (autre) qui fournit une pression adéquate pour les demandes au niveau des nœuds pour des conditions de charges spécifiques. Pour (Xu et al., 1999) la fiabilité du réseau est mesurée par sa capacité à assurer la demande aux nœuds à une pression minimale requise. La fiabilité dépend de la défaillance des organes hydrauliques (casses des conduites, arrêt des pompes, fuites dans le réseau), de la diminution de la capacité hydraulique du réseau en raison de la détérioration de

conduites (dépôts sur les parois, augmentation de la rugosité) et de la variation de la demande et son évolution dans temps qui peuvent remettre en cause le dimensionnement du réseau et donc sa performance. Pour (Walski & Gessler, 1999) la fiabilité du réseau dépend de la surpression disponible aux nœuds de consommation. Ils identifient une pression requise au niveau des nœuds $P_{requisse}$ et la pression disponible aux nœuds. Ils définissent « *Minimum Surplus Head Index* », I_m tel que pour $P_{mesurée(i)} \geq P_{requisse(i)}$ et $i=1, \dots, n$:

$$I_m = \text{minimum}(P_{mesurée(i)} - P_{requisse(i)}) \quad (2.1)$$

Les auteurs évaluent cette surpression sur l'ensemble des nœuds de consommation en définissant *Total surplus Head Index*, I_t tel que :

$$I_t = \sum_{i=1}^n (P_{mesurée(i)} - P_{requisse(i)}) \quad (2.2)$$

(Todini, 2000) établit un bilan de l'énergie contenue dans le réseau. Pour l'auteur plus il y'a d'énergie dans le réseau plus le réseau est fiable. L'énergie contenue dans le réseau $En_{réseau}$ s'exprime comme la somme de l'énergie dissipée $En_{dissipée}$ en raison des frictions internes dans les conduites et les pertes de charge, ainsi que l'énergie nécessaire aux nœuds de consommation $En_{delivrée}$.

$$En_{réseau} = En_{dissipée} + En_{delivrée} \quad (2.3)$$

L'auteur préconise d'augmenter l'énergie disponible dans le réseau en surestimant l'énergie dissipée tel que l'indice de résilience I_r est défini comme :

$$I_r = 1 - \frac{En_{dissipée}}{En_{dissipée}^{max}} \quad (2.4)$$

Où $En_{dissipée}$ exprime l'énergie dissipée pour une pression $P_{requisse}$ et une demande donnée à chaque nœud de consommation et $En_{dissipée}^{max}$ correspond à l'énergie dissipée correspondant à une pression supérieure à la pression requise pour satisfaire une même demande.

(Ivaltemir et al, 2004) proposent de mesurer la fiabilité du réseau à l'aide d'un indice calculant l'adéquation de la pression au nœud de consommation avec pression minimale requise, l'indice $\psi_{pb}(i, t)$ est calculé par :

$$\psi_{pb}(i,t) = \sqrt{\frac{P_{at}(i,t) - P_{min}}{P_{max}(i,t) - P_{min}}} \text{ si } P_{min}(i,t) \leq P_{at}(i,t) \leq P_{max}(i,t)$$

$$\psi_{pb}(i,t) = 0 \text{ si } P_{at}(i,t) < P_{min}(i,t) \text{ ou } P_{at}(i,t) > P_{max}(i,t) \quad (2.1)$$

Avec P_{min} correspond à la pression minimale à partir de laquelle une desserte en eau des nœuds de consommation est possible, $P_{at}(i,t)$ correspond à la pression disponible aux nœuds de consommation i à l'instant t mesurée par Epanet 2 et $P_{max}(i,t)$ traduit la pression maximale tolérée au nœud de consommation i à l'instant t . Ils définissent un indice traduisant la satisfaction de la demande aux nœuds de consommation tel que :

$$HB_{SD} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^n \psi_{pb}(i,t) \cdot \frac{Q_{dem}(i,t)}{\sum_{i=1}^n Q_{dem}(i,t)} \quad (2.2)$$

Où $Q_{dem}(i,t)$ exprime la demande au nœud i à l'instant t .

(Bertin, 1994) décrit la fiabilité du réseau à l'aide d'un indice, qui exprime l'impact de la survenue d'une défaillance sur la satisfaction de la demande au niveau des nœuds du réseau :

$$ft_j = \sum_{i=1}^n \frac{v_{ji}}{V_i} \quad (2.3)$$

Où v_{ji} correspond à la consommation au nœud i pour la défaillance de la conduite j , V_i correspond à la consommation au nœud i à l'heure de pointe du jour de pointe et n le nombre de nœuds dans le réseau.

Discussion

Il apparaît que la fiabilité hydraulique du réseau dépend de la capacité du réseau à assurer la desserte en eau des usagers en quantité suffisante et avec une pression minimale requise. Le système doit être en mesure de pallier les impacts liés à la défaillance des organes hydrauliques que comporte le réseau et la baisse de la capacité hydraulique liée à la détérioration des conduites. Afin d'augmenter la fiabilité, il est nécessaire d'assurer une pression suffisante dans le réseau supérieure à la pression minimale nécessaire à la desserte des abonnés. Les auteurs proposent des indices qui mesurent la surpression disponible dans le réseau, la quantité d'énergie disponible et le niveau de satisfaction de la demande aux nœuds de consommation.

Dans le cadre de la thèse nous considérons exclusivement la diminution de la capacité hydraulique due à la détérioration des conduites et leur défaillances. Nous proposons de construire des indices de fiabilité qui tiennent compte du niveau de pression dans le réseau et de la satisfaction des abonnés.

6.1 Modèles pour la fiabilité hydraulique des réseaux AEP

Nous étudions dans le cadre de la thèse, des modèles de mesure de la fiabilité hydraulique des réseaux AEP développés dans le cadre du projet Care-W, dans lequel le CEMAGREF a participé (voir chapitre 3). Trois modèles de fiabilité Hydrauliques (Hydraulic Reliability Models, HRM) ont été développés permettant de mesurer l'importance hydraulique de chaque conduite du réseau d'eau et l'impact sur son fonctionnement en cas de défaillance à l'aide d'indices de fiabilité. Ces modèles sont : Failnet-Reliab élaboré par le CEMAGREF (France), Relnet élaboré par Université de Technologie de Brno (République Tchèque), Aquarel : élaboré par SINTEF (Norvège). Ces modèles ont été testés sur des réseaux de taille réel.

Pour une pression satisfaisante aux nœuds de consommation, on compare l'eau réellement acheminée et celle demandée. En cas de déficience importante, la conduite sera considérée comme critique. Cependant, l'approche de calcul et les outils utilisés sont sensiblement différents. L'objectif est d'évaluer deux indicateurs importants exprimés à l'échelle du réseau :

- L'importance hydraulique de la conduite (liaison hydraulique), qui représente l'impact de la défaillance de la conduite sur l'ensemble du réseau (ou une partie) en terme d'interruption de la distribution d'eau, réduction de la pression ou de la consommation.

■ La vulnérabilité des consommateurs (au niveau de la conduite, du secteur ou la totalité du réseau) qui représente le risque de désagrément (gêne) occasionnée pour les consommateurs (interruption du service, inondation, déviation).

1.1.1 Failnet-Reliab (CEMAGREF)

L'indice proposé est le « Hydraulic Criticity Index » (HCI) qui s'appuie sur la simulation de casse sur le réseau et la comparaisons des consommations d'eau avant et après la survenue de la défaillance. Pas de casses simultanées sur le réseau, une défaillance est possible pendant l'analyse du réseau. Le calcul de cet indice s'inspire des travaux menés par (Bertin,1994). Il s'appuie sur une estimation du taux de défaillance de la conduite considérée, du temps d'indisponibilité de la conduite donnée par MTTR(Mean Time To Repair). Les consommations sont localisées au niveau des nœuds. Pour une conduite j , l'impact est donné par :

$$HCI_j = \sum_{\text{Noeuds } i} (Demande_i - consommation_i) \cdot Taux\ de\ casse_j \cdot MTTR_j \cdot \frac{\omega_i}{\sum_{\text{Noeuds } i} \omega_i} \quad (2.1)$$

Avec ω_i est l'importance du nœud i dans le réseau, qui permet d'identifier des consommateurs important dans le réseau. Les calculs sont effectués à l'aide d'un algorithme spécifique. L'outil utilise un modèle hydraulique spécifique basée sur le logiciel Porteau® (CEMAGREF) .

Discussion

Le modèle Failnet-Reliab propose un indice de fiabilité qui mesure l'impact d'une défaillance sur la desserte en eau. Il distingue les consommateurs par des pondération selon leur importance et intègre un taux de défaillance dans le calcul de l'indice. Nous avons testé le modèle et relevons certaines limites :

- Il n'existe pas de passerelle d'un modèle de simulation hydraulique vers Failnet-Reliab, un fichier spécifique doit renseigner le réseau.
- l'analyse hydraulique qu'effectue le modèle ne tient pas compte des organes hydrauliques du réseau : vannes, pompes. Le fonctionnement du réseau n'est pas pris en compte (courbes caractéristiques, courbes de consommation, etc). le demande prise en compte et la demande de pointe. Le calcul est ponctuel.
- le modèle est plus lent que les autres modèles de fiabilité.

1.1.1 Relnet (Université de Technologie de Brno)

Propose un modèle permettant de mesurer l'impact d'une indisponibilité d'une conduite donnée sur le fonctionnement du réseau en tenant compte des pressions et consommations aux nœuds. Le modèle utilise Epanet2®(Rossman,2000) pour effectuer les simulations hydrauliques. Il permet de calculer le *HCI* qui représente pour une conduite donnée le rapport entre l'eau qui est réellement consommée dans le réseau et l'eau devant être consommée :

$$HCI_j = \frac{\sum_{\text{Noeuds } i} (Demande_i - Consommation_i)}{\sum_{\text{Noeuds } i} Demande} \quad (2.16)$$

Le calcul des consommations au niveau des nœuds s'appuie sur les niveaux de pression aux nœuds. Deux niveaux sont identifiés : une pression minimale, à partir de laquelle une desserte en eau est possible mais en quantité proportionnelle à la demande et une pression désirée à partir de laquelle la desserte en eau correspond à la demande au nœud. Pour un niveau de pression inférieur à la pression désirée, la consommation est inférieure à la demande aux nœuds. La première étape consiste à analyser le fonctionnement hydraulique du réseau en calculant les pressions aux nœuds et en déterminant la demande totale sur l'ensemble du réseau. L'étape suivante est de rendre la conduite considérée indisponible (en la fermant). Une nouvelle simulation hydraulique est effectuée permettant de mesurer les niveaux de pression aux nœuds. La consommation au nœud sera fonction de la comparaison des niveaux des pressions avant et après l'indisponibilité de la conduite. La consommation à un nœud donné sera nulle si la pression à ce nœud est inférieure à la pression minimale initialement définie. Pour une pression comprise entre la pression minimale et la pression désirée, la consommation sera proportionnelle à la demande au nœud et aux pression avant et après l'indisponibilité de la conduite tel que :

$$Consommation_i = Demande_i \frac{\sqrt{Pression\ après_i}}{\sqrt{Pression\ avant_i}} \quad (2.17)$$

Pour une pression au nœud supérieure à la pression désirée, alors la consommation au nœud sera égale à la demande au nœud.

Discussion

Le modèle Relnet propose un indice de fiabilité qui mesure l'impact d'une défaillance sur la desserte des abonnés. Il permet de comparer la quantité d'eau fournie après la survenue d'une défaillance et celle devant être fournie. Nous avons testé le modèle et relevons certaines limites :

- ❑ dans la description du modèle, aucun travail théorique n'est évoqué pour le calcul de la demande aux nœuds après la survenue des défaillances
- ❑ les niveaux de pression permettant de paramétrer la demande aux nœuds sont fixes compris entre 25 m et 15 m, ce qui n'est pas toujours le cas. Le modèle n'est pas flexible.
- ❑ le modèle considère que l'indisponibilité de la conduite est par défaut égale à une heure, correspondant à l'heure de pointe. Le modèle ne permet pas de définir la plage horaire de survenue de défaillance et la durée d'indisponibilité des conduites.
- ❑ Le modèle effectue les calculs à l'heure de pointe

6.1.3 Aquarel (SINTEF)

Le modèle développé par le SINTEF utilise la même approche basée sur la simulation de défaillance et la mesure d'impact sur le fonctionnement du réseau. Aquarel considère l'impact de défaillance sur le niveau des réservoirs dans le réseau. Il peut considérer jusqu'à 2 défaillances simultanées sur le réseau. L'outil intègre la détérioration structurelle de la conduite à travers un taux de casse ou une probabilité de casse et un temps d'indisponibilité de la conduite. L'outil fait appel à Epanet ® pour les simulation hydraulique. Il n'existe pas de description précise de l'approche de calcul utilisée. Nous n'avons pas pu testé Aquarel car nous ne disposions pas d'une version du modèle.

Discussion

Nous constatons que la démarche de calcul des indices de fiabilité est similaire. En effet il s'agit de mesurer l'impact de l'indisponibilité d'une conduite donnée sur l'ensemble du réseau. Cela en comparant la quantité d'eau desservie avant et après. Nous avons identifié des limites qui paraissaient importantes et que nous proposons de prendre en compte dans la mise en place d'un outil de mesure de la fiabilité hydraulique. Cet outil s'inspire des travaux de (Wagner et al., 1988) et des approches de calcul des indices de fiabilité présentés. L'outil développé à pour but de :

- ❏ modifier plus facilement les paramètres de calcul de l'indice de fiabilité à savoir le niveau de pression pour le calcul de la demande, la durée de la défaillance et la palme horaire de sa survenue.
- ❏ tenir compte de l'ensemble des composants hydrauliques du réseau : courbe de consommation, courbe caractéristique, courbe de volume.

7. Prise en compte de l'effet réseau et mesure de l'importance d'une conduite

Le réseau d'alimentation en eau potable est un réseau connexe dont la fiabilité dépend de l'état des canalisations et la configuration même du réseau. Nous proposons d'utiliser deux indices qui traduisent l'incidence de la rupture d'une conduite sur la distribution de l'eau dans le réseau. La rupture est simulée par la fermeture de la conduite. L'impact est mesuré d'un point de vue hydraulique, tous les calculs hydrauliques sont effectués à l'aide de Epanet2®. Selon la position de la conduite dans le réseau, la nature et le nombre d'abonnés qu'elle dessert, son rôle dans l'acheminement de l'eau est différent. Ce rôle est obtenu à l'aide de la comparaison entre la quantité d'eau transportée avant et après l'occurrence de la défaillance. L'impact de la défaillance dépend des niveaux de pression aux nœuds de consommation. Ainsi l'occurrence de la défaillance engendrera une redistribution des pressions au niveau des nœuds de consommation ce qui provoquera une baisse de pression dans certains nœuds et une augmentation dans d'autres. En fonction de la variation du niveau de pression, la demande au niveau des nœuds de consommation change. D'un point de vue théorique, la mesure du changement de la demande au niveau des nœuds de consommation est cité dans (Wagner et al., 1988) et (Ivaltimir et al., 2004).

La mesure de l'importance s'obtient en comparant les mesures obtenues avant et après la suppression de la conduite. A l'état initial, chaque nœud de consommation regroupant un nombre d'abonnés donnés est caractérisé par une pression (P_{Init}) et une demande (Q_{Init}). Pour chaque conduite élaguée, nous mesurons les nouveaux niveaux de pression (P_{Nouv}), en fonction de ces niveaux la demande aux nœuds de consommation (Q_{Nouv}).

Pour chaque conduite élaguée, une simulation hydraulique du fonctionnement du réseau est effectuée, la démarche décrite ci-dessous est effectuée pour chaque conduite, afin de calculer l'indice de criticité des conduites constituant le réseau.

Nous exploitant les travaux de (Wagner et al., 1988) qui établissent une relation entre la quantité d'eau desservie et la pression à un nœud de consommation. Ils distinguent trois paliers pour les valeurs de pression, déterminer par deux seuils de pression, une pression inférieure (P_{Inf}) et une pression supérieure (P_{Sup}) :

Le premier palier concerne les nœuds où la pression est au-dessous de la pression inférieure requise, dans ce cas là, la desserte en eau ne peut être assurée, la demande au nœud est nulle.

$$Q_{Nouv} = 0 \quad (2.18)$$

Le deuxième palier concerne les nœuds où la pression (P_{Nouv}) est comprise entre la pression inférieure et la pression supérieure. Dans ce cas la desserte de l'eau est partiellement assurée, la demande au niveau des nœuds de consommation (Q_{Nouv}) est donnée par :

$$Q_{Nouv} = Q_{Init} \cdot \sqrt{\frac{P_{Nouv} - P_{Inf}}{P_{Sup} - P_{Inf}}} \quad (2.19)$$

Le troisième palier concerne les nœuds dont la pression dépasse la pression supérieure (P_{Sup}) assurant ainsi une desserte normale de l'eau vers les nœuds de consommation dans ce cas la demande est donnée par :

$$Q_{Nouv} = Q_{Init} \quad (2.20)$$

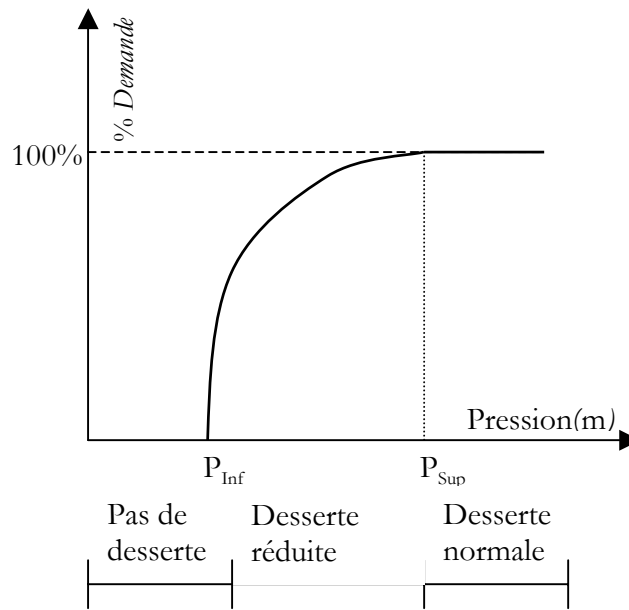


Figure 1. Niveau de desserte en fonction de la pression (Adapté de Wagner et al.,1988)

7.1 Indices de fiabilité hydrauliques

En s’inspirant des indices relevés dans la littérature, nous proposons deux indices permettant de mesurer le rôle d’une conduite donnée dans l’acheminement de l’eau.

7.1.1 Indice de Criticité Hydraulique

Cet indice permet de comparer la quantité d’eau desservie dans l’ensemble du réseau avant et après l’indisponibilité d’une conduite donnée. Afin de calculer l’Indice de criticité hydraulique (*ICH*) d’une conduite j , il est nécessaire de calculer les pressions et demande au niveaux de tous les nœuds de consommation en fonction des paliers susmentionnés. L’équation ci-dessous définit l’expression de calcul du *ICH* pour un réseau de n nœuds :

$$ICH_j = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Init} - Q_{Now})}{\sum_{i=1}^n Q_{Init}} \quad \text{avec } ICH \in]0,1] \quad (2.1)$$

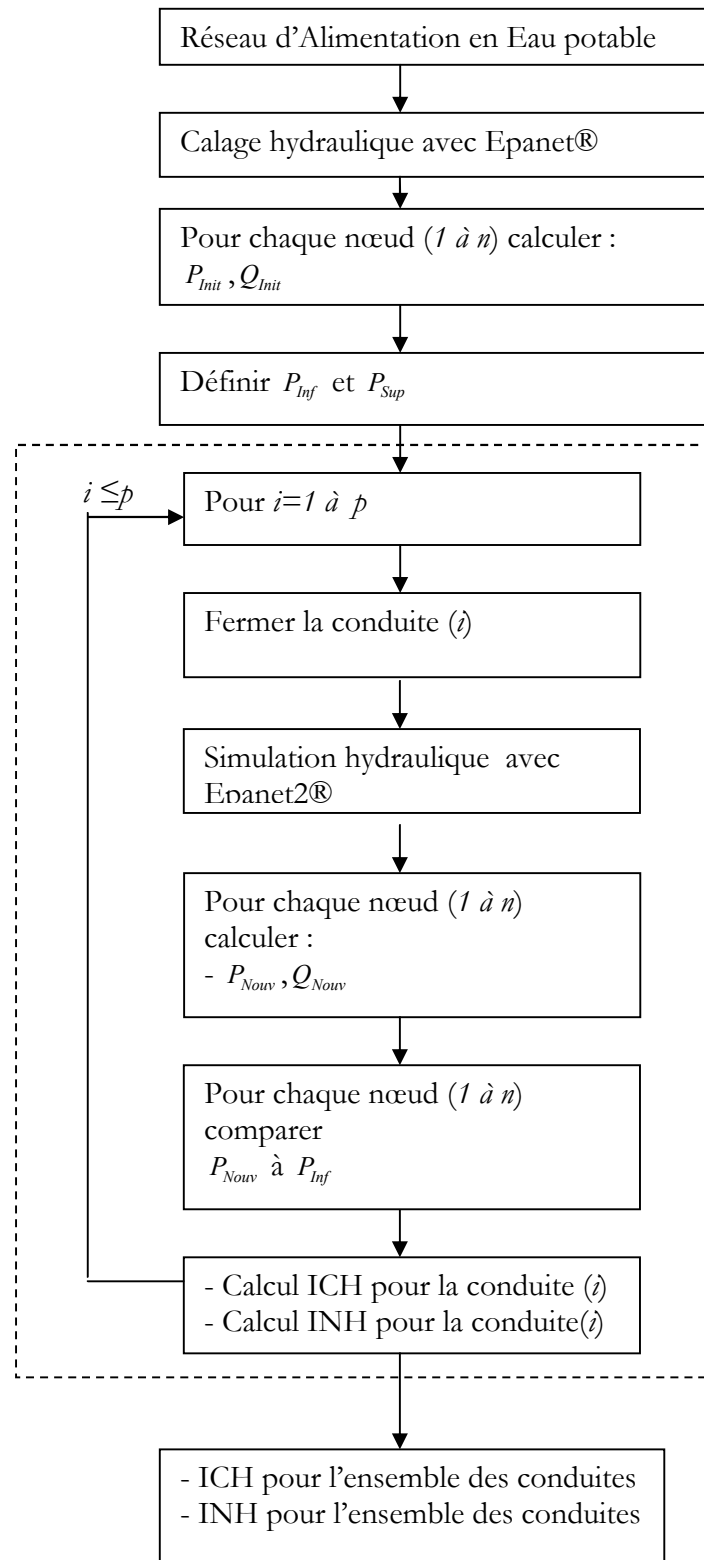


Figure 16. Calcul des Indices de fiabilité hydraulique

La Figure 16 présente la démarche de calcul des indices de fiabilité pour un réseau donné. L'indice *ICH* obtenu pour l'ensemble des conduites du réseau, traduit la quantité d'eau réellement desservie dans l'absence d'une conduite donnée. Il est compris entre 0 et 1, plus la valeur est proche de 1, plus la conduite est importante dans le réseau. Si la valeur de *ICH* est voisine de 0, cela signifie que l'eau est bien desservie même en l'absence de la conduite considérée, l'importance de la conduite est faible.

A partir d'un fichier de données décrivant le réseau à considérer, nous effectuons le calcul de l'*ICH* à l'aide d'une macro permettant de lancer plusieurs simulations à la fois et estimer les différents paramètres nécessaires au calcul. Nous considérons un réseau de n nœuds et p conduites.

7.1.2 Indice de déficience aux nœuds

Cet indice traduit l'impact de l'indisponibilité d'une conduite donnée sur la desserte en eau des abonnés. Il permet de recenser l'ensemble des nœuds de consommation où la desserte n'est pas assurée. (Wagner et al, 1988) suppose qu'au-dessous d'une certaine pression P_{inf} la desserte en eau n'est plus assurée. Pour chaque conduite élaguée, un calcul de pression est effectué à l'aide de Epanet2®, puis une comparaison avec la pression P_{inf} est effectuée. Si la pression mesurée au nœud de consommation est inférieure à la pression, alors le nœud considéré ne sera pas desservi tant que la conduite est indisponible. Cette procédure permet d'identifier l'ensemble des nœuds non desservis. Une fois ces nœuds identifiés, pour chaque conduite élaguée nous calculons le rapport entre le nombre de nœuds non desservis et le nombre de nœuds total constituant le réseau. La procédure de calcul est décrite dans la .

$$IDN_j = \frac{\text{Nombre de nœuds non desservis}}{\text{Nombre total de nœuds}} \quad (1)$$

7.2 Données nécessaires et calcul des indices de fiabilité

Le calcul des indices de fiabilité s'effectue selon la procédure décrite par la Figure 16. Le calcul est assuré à l'aide de la macro *Mesure_fiabilité* en VBA Excel, utilisant la boîte à outil *Entoolkit* développée par EPA⁴. La macro permet de simuler une casse pour chaque conduite du réseau en la rendant indisponible pendant une période donnée, l'indisponibilité est traduite par la fermeture de la conduite. Nous supposons que le temps d'indisponibilité correspond au temps nécessaire à

⁴ Environment Protection Agency

la remise en l'état de la conduite c'est le Temps moyen de réparation, $MTTR^5$. Nous supposons que seule une conduite est indisponible, écartant ainsi la possibilité que deux ou plusieurs défaillances surviennent au même moment. Le calcul des indices de fiabilités nécessite la disponibilité de données spécifiques liées au fonctionnement du réseau et à la durée de réparation des conduites. Les données devant être disponibles sont :

- topologie du réseau : cartographie
- longueur, diamètre, rugosité, cote au sol
- courbe caractéristique des pompes
- courbes de consommation par type d'abonnés et demande aux nœuds
- courbe volumétrique pour réservoir
- temps d'indisponibilité des conduites, $MTTR$

La macro proposée pour le calcul des indices de fiabilité utilise la simulation hydraulique obtenue à partir des données sus-mentionnées. Le modèle hydraulique est construit à l'aide d'Epanet2. L'impact de l'indisponibilité d'une conduite dépend de sa localisation de la nature des abonnés qu'elle dessert, de la période d'occurrence de la défaillance. La macro proposée permet de simuler l'indisponibilité de la conduite sur une période de temps donnée. Cette approche permet d'identifier les plages horaires où l'indisponibilité de la conduite est la plus critique. Pour un réseau donné, le modèle hydraulique peut être sauvegarder à l'aide d'un fichier d'extension **.net** ou **.inp**. Le calcul des indices de fiabilité nécessite le paramétrage de la macro, les paramètres d'entrée sont les suivant :

- Définir les pression P_{inf} et P_{sup} décrivant les états de fonctionnement du réseaux
- Choisir le fichier du modèle hydraulique à considérer
- Définir le début et la fin de la plage horaire pendant laquelle la simulation sera effectuée
- Définir le temps d'indisponibilité des conduites

5 Mean Time To Repair

Algorithme .1. Calcul des indices de fiabilité *ICH* et *IDN* à l'aide de *Mesure_fiabilité*.

```

n : nombre de nœuds dans le réseau    $P_{sup}$  : pression désirée pour un fonctionnement normal du réseau
 $Q_i$  : demande au nœud i                                $Q_{Init}$  : Demande totale sur l'ensemble du réseau
 $Q_{Now}$  : Consommation réelle au nœud                    T : temps d'indisponibilité de la conduite
p : nombre de conduites dans le réseau                 Période : plage horaire, début et fin de la simulation
 $P_i$  : pression au nœud i                                $P_{inf}$  : pression inférieure requise pour la desserte en eau

Initialisation
Lancer  $E_{panet}(P)$  {simulation hydraulique pour la plage horaire désignée}
 $\forall i = 1, n$  Calculer  $Q_i$  {détermination de la demande aux nœuds}

 $Q_{Init} \leftarrow \sum_{i=1}^n Q_i$  {détermination de la demande sur l'ensemble du réseau}
pour  $j = 1, \dots, p$ 
  Fermer la conduite j
  Lancer  $E_{panet}(Période, T)$  {simulation hydraulique pour la plage horaire désignée, avec une indisponibilité de j de T}
   $\forall i = 1, n$  Calculer  $P_i$ 

   $Q_{Totale} \leftarrow 0$ 
  noeud  $\leftarrow 0$ 

  pour  $i = 1, \dots, n$  faire
    si  $P_i < P_{inf}$  alors
       $Q_i \leftarrow 0$ 
      noeud  $\leftarrow$  noeud + 1
    sinon
      si  $P_{inf} \leq P_i < P_{sup}$  alors
         $Q_{Now} \leftarrow Q_i \cdot \sqrt{\frac{P_i - P_{inf}}{P_{sup} - P_i}}$ 
      sinon
        si  $P_i \geq P_{sup}$  alors
           $Q_{Now} \leftarrow Q_i$ 
        fin si
      fin si
    fin si
     $Q_{Totale} \leftarrow Q_{Now} + Q_{Totale}$ 
  fin pour

   $ICH_j \leftarrow \frac{Q_{Init} - Q_{Totale}}{Q_{Init}}$ 

   $IDN_j \leftarrow \frac{noeud}{n}$ 

fin pour
fin

```

8. Conclusion

Nous avons défini au cours de ce chapitre un ensemble de notions permettant de comprendre le fonctionnement du réseau. Un fonctionnement qui est décrit à l'aide d'un modèle hydraulique. Il est apparu que le modèle hydraulique doit tenir compte d'un ensemble de paramètres et critères pour traduire fidèlement les caractéristiques et le fonctionnement du réseau tel qu'il existe dans la réalité. Il est indispensable de trouver un niveau de détail adéquat permettant d'étudier la détérioration structurelle et hydraulique du réseau.

Nous avons introduit la notion de fiabilité hydraulique, qui traduit la capacité du réseau à pallier une déficience de pression due à la survenue de défaillance ou à la détérioration structurelle. L'analyse de la littérature montre que la fiabilité hydraulique dépend non seulement des niveaux de pression, mais aussi des caractéristiques des conduites (rugosité, diamètre) de la topologie du réseau et la satisfaction des abonnés. Ces critères déterminent la performance du réseau et doivent être pris en compte dans la prise de décision en matière de renouvellement.

Nous avons exploité les modèles et indices identifiés dans la littérature pour la mesure de la fiabilité hydraulique. Cela a permis de définir une approche plus flexible pour la mesure d'indices de fiabilité appropriés. Les indices proposés permettent d'identifier les conduites jouant un rôle important dans la desserte des abonnés. Ces conduites nécessitent une attention particulière lors de travaux de renouvellement, elle seront prioritaires par rapport aux autres conduites. Nous avons élaboré un outil informatique « *Mesure_fiabilité* » pour le calcul de ces indices.

Les développements effectués dans ce chapitre vont permettre de mesurer l'impact des travaux de renouvellement sur le fonctionnement du réseau et de hiérarchiser les conduites en fonction de leur rôle dans le réseau.

Modèles et approches pour le renouvellement des réseaux d'eau potable

Les approches pour le renouvellement des réseaux d'eau potable dépendent des critères pris en compte dans le processus de prise de décision. Nous décrivons dans ce chapitre un ensemble de modèles et d'approches dans le but d'identifier une démarche cohérente dans l'identification des travaux de renouvellement et leur programmation dans le temps. L'analyse que nous effectuons porte principalement sur les critères pris en compte, les méthodes et approches de hiérarchisation des conduites du réseau, l'étude de la détérioration structurelle et hydraulique et enfin les méthodes d'optimisation utilisées. Il s'agit au cours de ce chapitre de décrire les liens entre les points susmentionnés et leur coordination. L'intérêt est de comprendre comment ils sont pris en compte au sein des modèles d'aide à la décision que nous avons rencontrés.

Sommaire

1. Introduction	84
2. Les approches pour la hiérarchisation des conduites	84
3. Les approches d'optimisation de la date de renouvellement	89
4. Conclusion	100

1. Introduction

Les approches d'aide à la décision sont présentées en littérature en fonction de la nature des outils mathématiques utilisés, des données considérées et de la prise en compte du fonctionnement hydraulique du réseau. (Kleiner & Rajani, 2001) identifient des modèles probabilistes uni-varié et multi-variés. (EPA, 2002) identifie des modèles ne se basant pas sur des modèles hydrauliques pour le renouvellement, il présente des approches probabilistes ou statistiques qui s'intéressent au phénomène de vieillissement de la conduite sur la base d'un historique de défaillance et des données d'environnement, des approches déterministes qui cherche à définir des échéances de renouvellement, la recherche de politique de renouvellement à coût minimal et des approches se basant sur des heuristiques ou utilisant l'avis d'expert et des méthodes de pondération de critères afin de hiérarchiser les conduites et identifier des priorités.

Nous proposons d'établir une typologie en fonction de l'objet de chaque approche en faisant la distinction entre :

- les approches pour la hiérarchisation des conduites permettant d'identifier les prioritaires nécessitant un renouvellement
- les approches permettent de déterminer des échéances pour le renouvellement
- les modèles d'aide à la décision (prototypes ou opérationnels) qui permettent à l'aide de modules diverses de proposer des programmes de renouvellement.

Nous présentons les différentes approches en analysons les avantages et limites de chacune d'elle.

2. Les approches pour la hiérarchisation des conduites

2.1 Approches basées sur la prévision des défaillances

Ces approches décrivent le vieillissement du réseau par l'estimation des défaillances futures à partir de données liées à la conduite et à son environnement. Ces données sont prises en compte à l'aide de variables explicatives afin de mesurer leur influence sur le processus de détérioration des conduites. Les données sont collectées depuis la date de pose t_0 ou à partir d'une date de début observation t_d jusqu'à la date de fin d'observation t_f . Voir la Figure 17.

Ces approches identifient les conduites les plus vulnérables nécessitant un renouvellement en décrivant le phénomène de vieillissement des conduites.

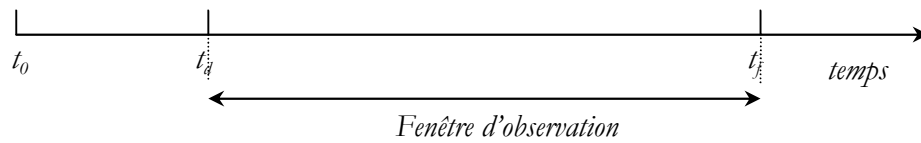


Figure 17. Collecte des données .

2.1.1 Approche par chaînes de Markov

L'approche utilise les *chaînes de Markov* pour décrire le phénomène de détérioration structurelle des conduites (Le Gaultre et al., 2000). Elle considère des groupes de conduites homogènes (même diamètre, matériaux, année de pose) pouvant être obtenues à l'aide d'une régression de *Poisson* qui permet d'identifier l'influence des variables explicatives (endogènes et exogène à la conduite) et la survenue de défaillance. Cette approche a été appliquée sur le réseau AEP de l'agglomération Lyonnaise par (Malandain, 1999). La détérioration de la conduite nécessite la description des états de dégradation ($k=1, \overline{K}$) qui seront caractérisés par une probabilité $P_k(t)$ de défaillance à un instant t . La transition entre états de dégradation est représentée par une fonction de risque $h_k(t)$ qui peut être représentée par le taux de défaillance d'une fonction exponentielle (λ) ou *Weibull* (λ, p). L'espérance du taux de défaillance $FR(t)$ est donnée par l'expression suivante :

$$FR(t) = \sum_{k=1}^K P_k(t) \cdot FR_k(t) \quad (3.1)$$

Discussion

Cette approche nécessite une description des états de détérioration des conduites par des inspections régulières et une définition des fonction de transition entre états. La caractérisation des états de détérioration est difficile à établir pour les réseaux enterrés non visitables (inaccessibles). Cette approche est plus utilisée dans la gestion du patrimoine visitable : conduites d'assainissement de diamètre important (Abraham et Wirahadikusumah, 1999) (Kleiner, 2001), gestion des ponts (Lounis & Vanier, 1998). autoroutes.

2.1.1.1 Approche par Processus de Poisson non Homogène (NHPP)

(Røstum, 2000) applique cette approche au réseau AEP de Trondheim (Norvège), en considérant que la survenue des défaillances suit un *Processus de Poisson Non Homogène*, le taux de défaillance λ est une fonction du temps (t) et d'un ensemble de variables explicatives prises en compte par des covariables (z_k) et paramètres de régression (β) pour décrire le phénomène de détérioration. L'expression du taux de défaillance est donnée comme suit avec (δ) est un paramètre de la loi:

$$\lambda(t, \beta, z) = \lambda \delta t^{\delta-1} \exp(z_k \beta) \quad (3.2)$$

L'espérance du nombre de défaillances entre deux dates t_a et t_b ($t \in [t_a, t_b]$)

$$E(N(t_b) - N(t_a)) = \int_{t_a}^{t_b} \lambda(u, \beta, z) du = \lambda(t_b^\delta - t_a^\delta) \exp(z_k \beta) \quad (3.3)$$

2.1.1.2 Approche par analyse de survie

L'occurrence d'une défaillance est caractérisée par la variable aléatoire T . La distribution de probabilité de T peut être définie par plusieurs fonctions dont : la fonction de survie $S(t)$ qui correspond à la probabilité d'avoir une durée de vie supérieure à un temps t :

$$\begin{cases} S(t) = P(T > t), \text{ avec } t \in [0, +\infty[\\ S(t) = 1 \text{ et } \lim_{t \rightarrow +\infty} S(t) = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

La fonction densité de probabilité

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{P(t < T < t + \Delta t)}{\Delta t} = - \frac{dS(t)}{dt} \quad (3.5)$$

La fonction de risque exprime la probabilité conditionnelle de survie jusqu'au temps T , et la survenue de défaillance dans l'intervalle $[t, t + \Delta t]$

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{P(t < T < t + \Delta t / T > t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{S(t)} \quad (3.6)$$

La prise en compte des variables explicatives qui peuvent être quantitatives ou qualitatives s'effectue par l'introduction de covariables (z_k) dans la fonction de risque qui s'exprime à l'aide d'une fonction de risque instantané $h_0(t)$ décrivant l'évolution au cours du temps et un terme de régression exponentielle qui traduit l'effet des variables explicatives. Nous présentons dans ce qui suit le modèle de risque proportionnels (*Proportional Hazard Model, PHM*) qui a été appliqué au réseau AEP par (Andreou, 1982) et utilisé par la suite par (Eisenbeis, 1996), (Arnoux, 1998) et (Wery, 2000).

L'application menée par (Andreou, 1982) à l'aide de données de défaillances et d'environnement des conduites a permis d'étudier le phénomène de dégradation des conduites d'eau et distinguer deux stades de dégradation, le premier qualifié de « Slow breaking stage » et le second par « Fast breaking stage ». L'auteur détermine un seuil d'accélération du processus de détérioration correspondant à 3 défaillances, à partir de ce seuil la durée de survie d'une conduite ne décroît plus, (Arnoux, 1998) propose de définir une durée de survie critique qui signifie qu'une conduite devient critique si sa durée de survie est inférieure à une durée critique =1000 jours.

La fonction de risque pour le modèle *PHM* s'exprime sous la forme d'une fonction de risques de base $h_0(t)$ et un terme exponentiel traduisant les variables explicatives :

$$h(t, x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) = h_0(t) \cdot \exp(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k) \quad (3.7)$$

Avec β_i représentent les paramètres de régression du modèle et $i=1, \overline{k}$ où k est le nombre de variables explicatives.

Discussion

Les modèles *NHPP* et *PHM* présentent l'avantage d'étudier la détérioration des conduites en se basant sur des données collectées sur une fenêtre d'observation. Les données concernent la conduite : longueur, année de pose, diamètre, nombre de défaillances, nature du matériau et l'environnement de la conduite : occupation du sol, nature du sol, niveau du trafic routier. Ces données sont prises en compte à l'aide des co-variables dans la fonction de risque. Les conduites peuvent ainsi être hiérarchisées selon l'espérance des défaillances futures. Cette approche nécessite la mise en place de seuil de défaillance critique pour le renouvellement et la disponibilité des données susmentionnées.

2.1.2 L'analyse multicritères

L'approche multicritères a été utilisée pour établir des priorités des besoins en renouvellement (Le Gauffre et al., 2002a). L'approche se base sur la notion de sur-classement (Roy, 1996) et utilise la méthode Electre-Tri (Mousseau et al., 2001). Cette méthode cherche à déterminer des classes en fonction de critères précis. Pour la problématique de renouvellement, ces classes vont représentées les conduites prioritaires pour des travaux de renouvellement, en se basant sur des critères et indicateurs de performance définis (Le Gauffre et al, 2002b). Ces critères sont liés :

- à la coordination entre les services intervenant sur la chaussée (gaz, électricité, voirie)
- au coût annuel de réparation
- aux Pertes en eau et les interruptions du service

- aux dommages et gêne occasionnée : déviation du trafic, dégât d'inondation
- à la qualité de l'eau
- à la fiabilité hydraulique
- aux coûts de renouvellement
- à la gêne correspondant aux alternatives de renouvellement choisies

Les auteurs définissent des classes traduisant le niveau de priorité. Une évaluation des critères est effectuée pour l'ensemble des conduites, plus la valeur du critère est importante, plus la déficience de la conduite est importante. Pour chaque critère la frontière entre les classes doit être définie par des seuils. Le profil de chaque conduite est obtenu comme suit :

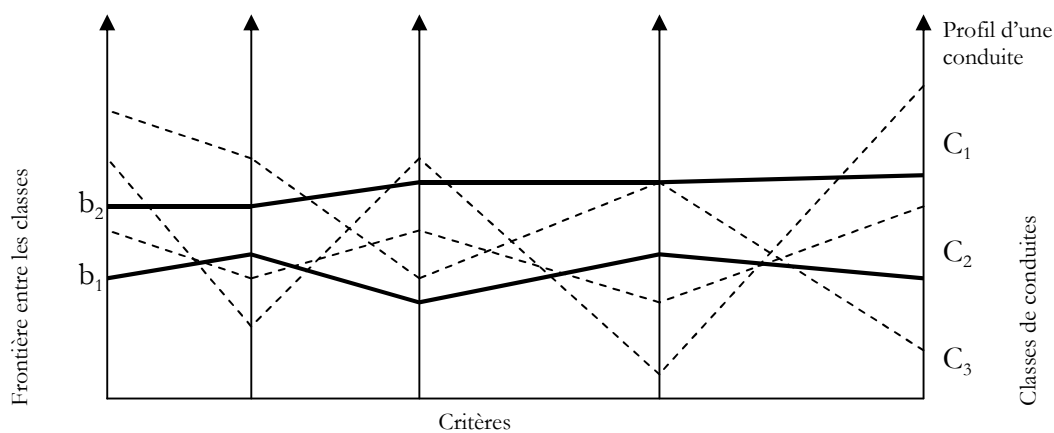


Figure 18. Profils de performance de 3 conduites en considérant 5 critères et 3 classes de conduites

Discussion

La hiérarchisation des conduites s'appuie sur la comparaison des profils. La difficulté d'utilisation de cette méthode réside dans la détermination des seuils délimitants chaque classe pour l'ensemble des critères et les seuils de comparaison des profils. L'agrégation des critères s'effectue à l'aide d'indices (indice de concordance, indice discordance) qui permettent de comparer les profils sur l'ensemble des critères pris en compte. Cette approche s'appuie sur la disponibilité de plusieurs indices de performance.

Les modèles présentés dans cette partie cherchent à définir des priorités pour les conduites devant faire l'objet de travaux de renouvellement, en se basant sur des un historique de défaillances et des données sur la conduite et son environnement. Ces modèles ne déterminent aucune échéance de renouvellement, aucune estimation budgétaire n'est effectuée. La prévision s'intéresse à la description de l'état des conduites et du réseau.

3. Les approches d'optimisation de la date de renouvellement

Ces modèles cherchent à déterminer la date optimale et l'alternative de renouvellement pour une conduite donnée ou des conduites homogènes susceptibles de se détériorer de la même façon. Ils s'appuient sur une analyse économique des coûts de maintenance, les coûts de renouvellement et les coûts sociaux liés aux impacts des défaillances et des travaux de renouvellement sur les abonnés et riverains sur un horizon de temps défini. La comparaison de ces coûts permet généralement de déterminer une date optimale de renouvellement. La résolution de ce type de problèmes nécessite le recours à des méthodes exactes ou des méthodes non-exactes : heuristiques.

3.1 Approche d'optimisation à l'aide de méthodes exactes

La recherche de la date optimale de renouvellement revient à résoudre le problème mathématique défini par la ou les fonctions objectifs et les contraintes (économique et technique). Dans ce qui suit, nous présentons des approches de résolution basées sur des méthodes exactes : recherche du minimum d'une fonction par dérivation, Programmation Dynamique et Branch & Bound.

3.1.1 Le modèle de référence

Le modèle proposé par (Samir & Howard, 1979) est considéré comme l'un des premiers modèles pour le renouvellement, il s'appuie sur une régression exponentielle qui décrit l'accroissement du taux de défaillance par km/an , $N(t)$ en fonction du temps t (en année). Dans ce cas, l'hypothèse sous-jacente est que le phénomène de survenue des défaillances suit un *processus de Poisson*.

$$N(t) = N(t_s) e^{A(t-t_s)} \quad (3.8)$$

Avec $N(t_s)$ est le nombre de défaillance à t_s , A est le coefficient d'accroissement des défaillances, $t = t_s + \Omega$ et $t_s = t_0 + g$, où t_0 représente la date de pose de la conduite et g est l'âge de la conduite à l'année t_s .

(Shamir & Howard, 1979) cherchent à déterminer la date optimale de remplacement à l'identique qui permet de minimiser les coûts de maintenance ($C_m(t)$) et le coût de remplacement (C_r) d'un km de conduite pour un ensemble de conduites homogènes (même date de pose, matériau) tel que :

$$C_m(t) = C_{rép} N(t_s) e^{A(t-t_s)} \cdot e^{-at} \quad (3.9)$$

Avec $C_{rép}$ exprime le coût de réparation d'une défaillance, a est le taux d'actualisation.

La fonction objectif s'écrit sous la forme :

$$\text{Minimum}_{t_s} \int_{t_s}^T [C_m(t) = C_{re} N(t_s) e^{-A(t-t_s)} \cdot e^{-at} + C_r \cdot e^{-at}] dt \quad (3.10)$$

La date de remplacement 'T' correspond à la dérivée de la fonction objectif donnée par l'équation (3). La nouvelle conduite est considérée comme identique à celle remplacée et son processus de vieillissement est similaire à la conduite remplacée. Le remplacement s'effectuera périodiquement au bout de T années. Ce modèle a été repris par (Walski & Pellicia, 1982) en présentant un calcul détaillé du coût de réparation, les auteurs identifient les coûts de main d'œuvre, les coûts d'équipement, matériau pour la réparation, le revêtement et des frais généraux liés à l'intervention et la gêne occasionnée par les travaux.

Discussion

Le modèle de (Shamir & Howard, 1979) s'avère intéressant dans le cas d'absence de données d'environnement de la conduite, il permet d'étudier le phénomène de vieillissement en se basant sur l'historique de défaillance. Cependant il suppose que l'âge est le seul facteur de vieillissement ce qui n'est pas toujours le cas. De plus l'évaluation économique ne permet pas de prendre en compte le fonctionnement du réseau. Le modèle ne peut s'appliquer que sur des conduites homogènes. Il suppose que le renouvellement s'effectue à intervalles réguliers (période fixe) considérant que les conduites remplacées subiront les mêmes détériorations que les précédentes et tient compte que du remplacement à l'identique. La minimisation de la fonction objectif nécessite la vérification de la continuité et la dérivabilité. Le modèle s'appuie donc sur des hypothèses restrictives qui présentent un avantage en l'absence de données mais qui ne sont plus vérifiées en présence de données sur la condition des conduites et leur environnement.

3.1.2 L'approche MNRAP

(Multistage Network Rehabilitation Analysis Procedure)

Le modèle développé dans (Kleiner, 1996) se base sur une approche de Programmation Dynamique (DP) combinée avec une énumération de scénarios. Pour (Kleiner, 1996) l'efficacité du réseau AEP dépend de sa fiabilité¹, de la qualité de l'eau et du service rendu aux usagers. Il considère que tout changement d'une conduite dans le réseau, engendre une redistribution des flux à travers son ensemble. La prévision des défaillances et l'estimation des coûts se basent sur le modèle de (Shamir & Howard, 1979). L'auteur tient compte des coûts de maintenance des

¹. La fiabilité concerne la fiabilité hydraulique des conduites et leur fiabilité physique qui concerne la détérioration structurelle.

conduites remplacées dans la fonction objectif. Il cherche à déterminer la date du premier remplacement et la périodicité des remplacements qui se feront à intervalles réguliers, en minimisant : le capital investi, les coûts opérationnels, les coûts de maintenance et les coûts de renouvellement.

(Kleiner, 1996) considère plusieurs alternatives de renouvellement et les discrimine en fonction de leur impact sur le fonctionnement hydraulique du réseau et leur coût. L'utilisation de la Programmation Dynamique permet d'évaluer des scénarios de politique de renouvellement qui sont estimés d'un point de vue économique à l'aide de la fonction objectif sus-mentionnée et d'un point de vue technique à l'aide du logiciel de simulation hydraulique Epanet®.

Discussion

Le *MNRAP* permet de pallier les insuffisances du modèle de (Shamir et Howard, 1979), il considère d'autres alternatives que le remplacement à l'identique mais préconise le remplacement périodique des conduites qui n'est pas justifié. L'utilisation de la Programmation Dynamique permet l'évaluation de différents scénarios de politiques de renouvellement, le risque est l'augmentation importante des sommets du graphe de représentation des scénarios pour des réseaux de taille importante. L'application a concerné un réseau de 12 conduites et 9 nœuds. Le modèle ne tient pas compte de variables

3.1.3 Approche d'optimisation par méthodes des cohortes

L'approche est utilisée depuis les années 60 dans l'étude de la démographie pour prévoir l'évolution naturelle de la population. (Herz, 1996) utilise le « *Cohort Survival Model* » qui estime à l'aide de taux de mortalité, le nombre de survivants par cohortes (classes) de même âge. Ce même principe est appliqué aux stocks d'infrastructures.

Le renouvellement des infrastructures ne peut être traité comme dans le modèle démographique. Il doit être modélisé de manière à ce que les éléments détériorés soient réparés, réhabilités ou remplacés par des éléments neufs. Pour les éléments neufs débute un nouveau processus de détérioration. Cette détérioration est décrite de la même manière que le modèle démographique par cohortes². L'auteur décrit le processus de vieillissement à travers des probabilités de transition d'un état à un autre (vivant ou mort, intact ou cassé, en fonctionnement ou en panne). Les taux de transition, taux de mortalité ou taux de défaillance différent avec l'âge, ces taux sont fonction de l'utilisation du matériel et à son fonctionnement. Le modèle s'appuie sur la définition d'une fonction de survie qui décrit le phénomène de vieillissement à l'aide de trois paramètres 'a' facteur

²² . Analyse des manifestations d'un phénomène démographique donnée au sein de générations et plus généralement des cohortes. Cohortes classes, ensemble d'individus ayant vécu un événement semblable au cours d'une même période de temps.

de vieillissement, 'b' : facteur de défaillance et 'c' période de résistance (pendant la période de résistance, il n'y a pas de renouvellement). La fonction de densité de probabilité de durée de vie est donnée par :

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < c \\ \frac{(t+a)be^{b(t-c)}}{(a+e^{b(t-c)})^2} & \text{si } t \geq c \end{cases} \quad (3.11)$$

D'où la fonction de survie :

$$S(t) = \frac{a+1}{a+e^{b(t-c)}} \quad \text{si } t \geq c \quad (3.12)$$

Discussion

L'estimation de ces paramètres est empirique et se base sur l'avis d'experts ce qui est discutable. Le modèle cherche à déterminer les durées de vie pour chaque groupe de conduites homogènes (Cohortes). Les échéances de renouvellement correspondent aux dates de fin de vie des conduites. L'approche ne tient pas compte du fonctionnement du réseau et des aspects économiques liés au renouvellement des conduites

3.1.4 Le modèle RENCANA

Le modèle *RENCANA* développé par (Werey, 2000) cherche à répondre à la question : renouveler ou attendre ?. En se basant sur une approche d'optimisation par Programmation Dynamique (DP) en avenir incertain et des arbres de décisions qui correspondent aux décisions (renouveler ou attendre) prises à chaque année de l'horizon de planification. A chaque date t intervient une décision, soit le renouvellement soit le maintien en place de la conduite. L'événement aléatoire sera l'occurrence d'une défaillance sur la conduite donnée. Le modèle *RENCANA* cherche à intégrer l'effet engendré par la rupture d'une conduite sur le fonctionnement du réseau, ainsi il intègre des indices de fiabilité du réseau (Bertin, 1994) qui traduisent la capacité d'un système à satisfaire la demande quand des casses surviennent sur les conduites. Des indices de non-satisfaction sont définis pour chaque tronçon, ces indices permettent de traduire la non-satisfaction du consommateur par rapport à la consommation fournie et celle initialement demandée. Ce modèle utilise le modèle *PHM* pour l'estimation des probabilités de défaillance des conduites. Ces probabilités sont utilisées dans la fonction de objectif permettant de minimiser les coûts de maintenance, les coûts de remplacement à l'identique et les coûts sociaux liés à l'indisponibilité d'eau en cas de défaillance.

Discussion

Le modèle n'intègre pas l'effet hydraulique du réseau et suppose un remplacement à l'identique, l'optimisation par Programmation Dynamique présente le risque d'explosion de l'arbre de décision en fonction du temps et les alternatives de renouvellement, ce qui rend les calculs de plus en plus difficiles. La recherche des solutions s'effectue à l'échelle de la conduite, la programmation dynamique permet l'évaluation de scénarios de remplacement en fonction du temps pour chaque conduite indépendamment des autres conduites constituant le réseau. Il permet de considérer des coûts sociaux traduisant l'impact des défaillances sur l'environnement de la conduite.

3.1.5 Approche d'optimisation par Branch & Bound

(Kim & Mays, 1994) proposent une démarche d'optimisation de type *Branch & Bound*. Le modèle permet de trouver un compromis entre trois décisions : réparer, remplacer ou réhabiliter. Les auteurs proposent une fonction de coût permettant d'évaluer une politique de renouvellement donnée en fonction des coûts : de remplacement, de réhabilitation, de réparation et le coût d'énergie lié au pompage. Ce modèle intègre aussi des contraintes hydrauliques et utilise un simulateur hydraulique (KYPIPE) pour valider les solutions. Pour chaque conduite, une génération de sommet est effectuée correspondant aux décisions possibles à l'échelle de la conduite. Au niveau de chaque sommet une évaluation de la fonction objectif est effectuée avec une vérification des contraintes hydrauliques. La solution optimale sera celle ayant un coût minimal sur l'ensemble des conduites, parcourant les sommets du graphe. La séquence décrite par les sommets du graphe correspond à des travaux de renouvellement pour l'ensemble des conduites du réseau.

Discussion

Le modèle permet de considérer une autre alternative de renouvellement que le remplacement à l'identique, il permet aussi de considérer des contraintes hydrauliques liés à la pression minimale et maximale disponible aux nœuds de consommation. Cependant, le modèle s'appuie sur une analyse économique pour le choix des renouvellements effectués, la performance du réseau n'est pas considérée, de plus l'état de détérioration physique n'est pas pris en compte, le modèle n'intègre pas de prévision de défaillance dans l'évaluation de la fonction objectif.

3.1.6 Approches d'optimisation par méthodes non-exactes

Nous remarquons que les approches exactes pour le renouvellement des réseaux AEP permettent de proposer des solutions uniques en fonction d'une modélisation précise. Ces méthodes cherchent pendant le processus de recherche de solution à évaluer des scénarios ou des politiques de renouvellement décrites par les sommets du graphe pour l'approche par la DP et l'approche Branch & Bound. L'inconvénient de ces méthodes et l'explosion du nombre de sommet du graphe qui cherche à proposer l'ensemble des scénarios possibles. Afin d'y remédier l'utilisation de méthodes non-exactes permet de réduire les temps de calcul et proposer des solutions approchées acceptables pour le gestionnaire du réseau, parmi ces méthodes les algorithmes génétiques qui ont déjà été utilisés pour l'optimisation des échéances de renouvellement. Ces approches permettent de générer des scénarios représentant des politiques de renouvellement de manière stochastique, identifiant ainsi une ou des solutions approchées. Nous reviendrons sur la problématique d'utilisation de méthodes exactes ou approchées dans le chapitre 4.

3.2 Les modèles d'aide à la décision

3.2.1 Le modèle KANEW

(Deb & al, 1998) ont mis en pratique cette approche à l'aide du logiciel « KANEW³ » qui utilise le modèle des cohortes pour estimer les durée de vie pour les conduites de même type (homogènes), le logiciel s'appuie sur plusieurs modules pour la programmation du renouvellement : un inventaire des conduites, critères de renouvellement, estimation des coûts, évaluation d'alternatives de renouvellement.

Le modèle KANEW est utilisé en Allemagne, il permet de proposer une programmation du renouvellement en considérant les durées de vie résiduelles des conduites et en comparant l'investissement de renouvellement au coût de maintenance et de perte d'eau évités. Cependant le modèle ne tien pas en compte du fonctionnement hydraulique du réseau, l'effet réseau et la topologie du réseau ne sont pas considérée. L'estimation empirique des paramètres qui décrivent la fonction de survie des conduites peut apporter un biais.

3.2.2 Le modèle UtilNets

Le modèle UtilNets (Hadzilacos et al., 2000) est un modèle d'aide à la décision pour le renouvellement des réseaux AEP. Développé initialement pour les conduites en fonte grise, le modèle s'appuie sur des données de défaillances et d'environnement de la conduite. Il suppose que la probabilité de défaillance est plus importante au début de la mise en service des conduites,

³. Logiciel pour la programmation du la renouvellement des conduites, qui se base sur le modèle d'optimisation par cohortes.

puis ce risque diminue et augmente de nouveau après une période de temps donnée. Le modèle prend en compte des modèles physiques mesurant l'impact de la charge et la corrosion sur les conduites. Ce modèle d'aide à la décision s'articule sur des modules qui tiennent compte de :

- Modèles décrivant la détérioration structurelle, hydraulique et de la qualité de l'eau du réseau AEP
- Evaluation des impacts qualitatifs et quantitatifs des défaillances et de la mise en place de travaux de renouvellement.
- Choix d'alternatives de renouvellement pour les conduites
- Estimation des enveloppes budgétaires
- Evaluation de la fiabilité du réseau en terme de satisfaction de la demande.

Ce modèle nécessite un nombre important de variables d'environnement de la conduite.

3.2.3 Le WLC (Whole Life Costing)

(Skipworth et al., 2002) reviennent sur les outils d'analyse économique utilisés dans le domaine de la gestion du patrimoine. Ils présentent le concept de « *Whole Life Costing* » (*WLC*) qui pour un patrimoine donné cherche à identifier tout au long de sa durée de vie l'ensemble des coûts d'acquisition, coûts de fonctionnement, coût de réparation et maintenance et les coûts de démolition ou de dépose. L'analyse de ces coûts s'intéresse aux coûts internes liés directement au patrimoine mais aussi aux coûts externes en rapport avec l'interaction avec son environnement. L'approche *WLC* utilisée dans le domaine de la construction a été adaptée à la problématique de renouvellement des réseaux enterrés à partir des années 90. Elle s'articule sur deux analyses :

« *Life Cycle Assessment* » (*LCA*) cette analyse a été développée dans le domaine de la production (secteur de la manufacture) afin de décrire l'interactions tout au long du cycle de vie d'un produit, d'un processus industriel ou d'une activité avec son environnement. Adaptée à la problématique de gestion du réseau AEP, *LCA* cherche à décrire la relation entre la performance du réseau, les usagers et l'environnement du réseau. Dans ce cas l'analyse économique porte sur les externalités. Elle cherche à mesurer les coûts indirectes que les services auront à supporter en cas de casse ou fuites, les coûts sociaux en cas de travaux ou de déviation créant un manque à gagner, ou engendrant une gêne aux usagers. L'autre analyse utilisée est « *Activity Based Costing* » (*ABC*) cette approche développée dans les années 1980 à Harvard cherche à décrire le coût de production d'un bien en fonction des activités et processus à mettre en œuvre. Pour le réseau AEP il s'agit d'analyser le processus de production de l'eau et s'intéresser aux différentes étapes tout en intégrant dans l'analyse économique les coûts liés au fonctionnement, au pompage et la maintenance. Le modèle s'appuie sur une approche globale de gestion du réseau à long terme, en intégrant le renouvellement des réseaux d'eau potable qui s'articule sur la génération de scénarios

représentant des programmes de renouvellement, à l'aide d'un algorithme génétique. L'évaluation des différents scénarios s'effectue d'un point de vue économique et technique. La détérioration structurelle des conduites est prise en compte à travers le modèle de (Shamir & Howard, 1979). Le modèle est utilisé en Angleterre.

3.2.4 Le modèle PARMs

(Pipeline Asset and Risk Management System)

Le modèle PARMs développé au CSIRO (Australie) par (Burn et al., 2003) a pour but la planification à long terme des besoins en renouvellement et l'estimation des enveloppes budgétaires requises. Le modèle utilise une approche de prévision des défaillances basée sur le Processus de Poisson Non Homogène (NHPP) et une estimation des coûts sur le cycle de vie des conduites prenant en compte les coûts liés à la défaillance et les externalités liées à l'interruption de service et gêne occasionnée en cas de défaillance ou de travaux de renouvellement. Le modèle a été complété par *PARMS-PRIORITY* (Mogolia et al., 2006) qui permet de hiérarchiser les conduites à renouveler et d'assurer une programmation budgétaire dans le temps en tenant compte de scénarios permettant de prendre en compte des risques liés à la gestion du réseau et son évolution futur dans le temps.

Le modèle PARMs sur les des modules de calcul qui considèrent :

- l'évaluation des risques
- la prévision des défaillances
- l'évaluation des coûts
- la génération et évaluation de scénarios
- la collecte et exploitation de données.

3.2.5 Le modèle CARE-W

(Computer Aided Rehabilitation of Water Networks)

Le modèle CARE-W (Torterotot et al., 2003) est le résultat d'un projet Européen dont l'objet est de construire un outil d'aide à la décision pour la réhabilitation des réseaux d'eau potable. L'outil cherche à aider les gestionnaires à engager les actions de réhabilitation d'une manière efficace en proposant des outils et méthodes pour :

- construire et évaluer une stratégie à long terme ;
- établir des programmes annuels ;
- contrôle et suivi de performance.

L'outil est construit autour d'une structure de bases de données et d'une interface utilisateur permettant de gérer des données en mettant en œuvre des outils de gestion et des modules spécifiques. Ces modules sont:

- CARE-W-PI : "Performance Indicators" Détermination d'indicateurs de performance pour le réseaux (ou une partie). La mise en œuvre de ces indicateurs s'appuie sur les travaux menés par l'IWA⁴.
- CARE-W-LTP : "Long Term Planning" mise en place d'une stratégie de réhabilitation à long terme à travers une génération de scénarios d'évaluation générale de contexte (population raccordée, consommation, prix de l'eau). Ce module utilise le modèle KANEW pour la programmation à long terme.
- CARE-ARP : "Annual Rehabilitation Program" programmation annuelle des projets de réhabilitation. Ce module s'appuie sur l'utilisation de l'analyse multicritères (Le Gauffre et al, 2002a)
- CARE-W-Fail : "Failure Forcast Models" Modèles statistiques de prédiction des défaillances de canalisations. Utilise les modèles *NHPP*, les *chaînes de Markov* et *PHM* pour la prévision de défaillance.
- CARE-W-REL : "Hydraulic Reliability Models" Modèles d'analyse de la fiabilité hydraulique des réseaux.

⁴. IWA pour International Water Association

Discussion

Les modèles d'aide à la décision pour le renouvellement sont des systèmes intégrés qui utilisent des bases de données et des modules de calculs pour l'évaluation de la décision de renouvellement sous différents angles à savoir :

- Evaluation économique en considérant les coûts directs la maintenance, au renouvellement des conduites, aux pertes d'eau, ainsi que les coûts indirects liés à la gêne occasionnée et dégâts en cas de défaillances ou travaux de renouvellement.
- Etude du phénomène de vieillissement des conduites à l'aide de modèles statistiques de défaillance
- Evaluation technique du fonctionnement hydraulique du réseau à l'aide de modèles hydrauliques
- Evaluation de scénarios de politiques de renouvellement à long terme et estimation des enveloppes budgétaires requises

Ces modèles requièrent la disponibilité d'un nombre important de données, la disponibilité de ces données détermine l'approche à utiliser, l'absence de certaines données peut contraindre à l'utilisation d'une approche au lieu d'une autre. Ces données doivent être collectées, actualisées et traitées régulièrement dans le cadre du système d'information du service de l'eau.

Nous proposons dans Le Tableau 6 une comparaison entre les approches et modèles pour le renouvellement. Il apparaît que la détérioration structurelle est prise en compte par la majorité des approches, indiquant que la décision de renouveler est souvent tributaire de la détérioration physique des conduites. D'un autre côté, la détérioration hydraulique est faiblement considérée dans la prise de décision de renouvellement qui se fait généralement à l'échelle de la conduite. Il s'avère que la décision en matière de renouvellement nécessite une approche globale considérant plusieurs critères de détérioration et de fonctionnement du réseau. La décision de renouveler revient à établir un compromis entre ces critères.

Tableau 6. Comparaison des approches et modèles pour le renouvellement

Approches\ modèles	objectifs	Alternatives de renouvellement	Détérioration structurelle	Détérioration hydraulique	Effet réseau	Génération de scénarios\ évaluation de politiques	Programmation du renouvellement
Shamir & Howard (1979)	Optimisation de la date de renouvellement	non	oui	non	non	non	oui
Modèle PHM (1982)	Hiérarchisation	non	oui	non	non	non	non
Branch & Bound (1996)	Optimisation de la date de renouvellement	oui	non	oui	oui	Oui	Oui
MNRAP(1996)	Optimisation de la date de renouvellement	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Modèles des Cohortes (1996)	Optimisation de la date de renouvellement	oui	oui	non	non	non	oui
KANEW (1998)	Modèles d'aide à la décision	oui	oui	oui	non	oui	oui
Modèle NHPP(2000)	Hiérarchisation	non	oui	non	non	non	non
Multicritères (2000)	Hiérarchisation	non	oui	oui	oui	non	non
RENCANA(2000)	Optimisation de la date de renouvellement	non	oui	non	non	non	oui
Markov (2000)	Hiérarchisation	non	oui	non	non	non	non
UtilNets(2000)	Modèles d'aide à la décision	oui	oui	oui	oui	oui	oui
WLC (2002)	Modèles d'aide à la décision	oui	oui	oui	oui	oui	oui
PARMS (2003)	Modèles d'aide à la décision	oui	oui	oui	oui	oui	oui
CARE-W(2003)	Modèles d'aide à la décision	oui	oui	oui	non	oui	oui

4. Conclusion

Les approches pour le renouvellement utilisent des données spécifiques pour la hiérarchisation, la détermination de date optimale et la programmation du renouvellement. La disponibilité de ces données détermine l'approche à utiliser, l'absence de certaines données peut contraindre à l'utilisation d'une approche au lieu d'une autre. Le Tableau 6 présente une synthèse de l'ensemble des approches et modèles traités dans ce chapitre, en évaluant chaque approche avec des critères spécifiques. Il s'avère que les modèles d'aide à la décision s'articule sur des modules distincts dont la fonction est l'évaluation du réseau sur plusieurs critères : liés au fonctionnement du réseau, la détérioration structurelle et hydraulique, la prise de décision sur l'ensemble du réseau, la génération de scénarios. La comparaison des ces approches nous a permis d'identifier les critères à considérer dans le processus de décision en matière de renouvellement et construire l'outil d'aide à la décision. Nous proposons de construire le modèle d'aide à la décision de la manière suivante :

- toutes les conduites constituant le réseau ne subissent pas de travaux de renouvellement en même temps, les conduites par leur localisation et dimension jouent un rôle différent dans la desserte en eau, nous devons identifier une approche pour la hiérarchisation des conduites.
- définir des objectifs à la fois économiques et techniques
- identifier une approche d'optimisation permettant de considérer des objectifs techniques et économiques sous contraintes.
- programmation du renouvellement dans le temps et évaluation de scénarios correspondant aux travaux de renouvellement sur le réseau. Les solutions proposées doivent être viables d'un point de vue économique et technique.

Le modèle d'aide à la décision doit tenir compte des critères liés à :

- La détérioration structurelle des conduites
- La détérioration hydraulique
- La prise de décision à l'échelle du réseau dans son ensemble
- L'évaluation de plusieurs programmes de renouvellement
- La prise en compte d'autres alternatives de renouvellement que le remplacement à l'identique.

Les algorithmes génétiques et l'optimisation multiobjectif

La décision en matière de renouvellement revêt un caractère multiobjectif, à cet effet nous présentons dans ce chapitre une approche d'optimisation utilisant des algorithmes non exactes, les algorithmes génétiques qui se basent sur le principe de dominance au sens de Pareto. Les algorithmes appartiennent à la famille des méta-heuristiques et se fondent sur les principes d'évolution et de sélection naturelle des espèces dérivés de la génétique. L'utilisation des ces algorithmes est plutôt récente, les premières applications dans le domaine de l'optimisation datent de la fin des années 1980. Ces algorithmes présentent l'avantage de n'utiliser que la fonction objectif définie, aucun calcul de gradient ou de dérivée n'est à faire. Ils partent d'un ensemble de points et non d'un point unique pour la recherche de solutions réalisables. L'intérêt réside dans le processus de recherche des solutions et le choix des directions d'exploration de l'espace des solutions.

Dans un premier temps, nous présentons les principes de ces algorithmes, puis nous identifions les approches d'optimisation multiobjectif traitées dans la littérature. Ceci à travers un éventail d'applications dans différents problèmes d'optimisation faisant apparaître la notion de réseau et la planification de tâches ou travaux. Nous déterminerons les similitudes pouvant exister dans ces problématiques. En s'inspirant ces diverses applications, nous choisirons une méthode d'optimisation applicable à la problématique de renouvellement des réseaux d'alimentation en eau potable afin de déterminer un ensemble de politiques de renouvellement viables d'un point de vue économique et technique.

Sommaire

1. Introduction	104
2. Principes : Définition et vocabulaire	104
4. Métaheuristiques, optimisation multiobjectif et algorithmes génétiques	110
5. Approche multiobjectif et Algorithme Génétique	115
6. Applications diverses des algorithmes génétiques et de l'optimisation multiobjectif	124
7. Conclusion	136

1. Introduction

En fonction des problèmes traités, les approches exactes d'optimisation peuvent être inadaptées, principalement pour des problèmes dont les fonctions objectifs ne sont pas continues et /ou dérivables. L'utilisation des approches non exactes ou de méta-heuristiques est requise. Pour des problèmes qui cherchent à satisfaire plusieurs objectifs pouvant être contradictoires et avec des variables de décisions discrètes ou continues, il est souvent difficile de trouver une ou plusieurs solutions réalisables. Les algorithmes génétiques présentent l'avantage d'explorer l'espace des solutions réalisables à partir d'un ensemble de solutions créées de manière aléatoire. A l'aide d'opérations spécifiques, l'algorithme génétique va générer de nouvelles solutions à partir de l'ensemble de solutions de départ, connu sous le nom de *population*. L'exploration de l'espace des solutions s'articule sur des mécanismes adaptés du domaine de la génétique. Ces algorithmes se base sur le principe d'évolution des espèces, d'adaptation et de sélection naturelle. Les solutions réalisables ou acceptables sont assimilées à des individus qui vont résister et s'adapter à leur environnement. Seuls les meilleurs individus survivront. Par analogie, les meilleures solutions seront celles ayant une plus forte probabilité d'être choisies tout au long du processus de recherche de solutions. Les premiers travaux ont été menés par (Holland, 1975) dans l'ouvrage « *Adaptation of Natural and Artificial System* » qui formalise les algorithmes génétiques dans le cadre de l'optimisation mathématique. L'indisponibilité d'ordinateurs puissants, empêche l'implémentation de ces algorithmes sur des problèmes de taille réelle. Il faut attendre les travaux de (Goldberg, 1994) permettent de vulgariser l'utilisation des algorithmes génétiques et leur utilisation dans des problèmes d'optimisation concrets¹.

2. Principes : Définition et vocabulaire

Par analogie à la génétique, ces algorithmes cherchent à partir d'une population initiale les meilleurs individus. Pour constituer les *parents* appropriés donnant naissance à une meilleure descendance *Enfants*, parmi laquelle sera tirée les solutions acceptables du problème traité.

Chaque problème d'optimisation est caractérisé par des variables de décision qui conditionnent les décisions à prendre, des objectifs à satisfaire et des contraintes à respecter. Contrairement aux méthodes d'optimisation classiques, les algorithmes génétiques n'utilisent pas les variables mais leur associe un codage particulier, les variables de décisions sont prises en compte à l'aide de caractères représentant une séquence de codes. Chaque variable de décisions est traduite sous

¹ . Goldberg utilise les algorithmes génétiques dans le cadre de sa thèse pour l'optimisation de débits de pipelines de gaz.

forme d'un gène qui peut contenir 1 ou plusieurs codes, pouvant exprimer des caractères différents. La séquence de code représente un individu, en d'autre terme une solution potentielle connue sous le nom de *chromosome*. Les objectifs du problème traité sont exprimés à l'aide d'une fonction qui permet d'évaluer les chances qu'un individu soit sélectionné ou pas, afin de reproduire de nouvelles solution. Cette fonction est la *fonction d'adaptation (fitness)*.

Tableau 7. Algorithmes génétiques et vocabulaire

Vocabulaire	Définition
Bit	Correspond à 1 code
Chromosome, individus, génotype	Chaîne de caractères ou de codes variables de décisions codées
Phénotype	Variation de décisions non codées
gène	Codage associé à chaque variable de décision
Fonction d'adaptation	Evaluation de la solution dans l'espace génotypique
Fonctions objectifs	Evaluation de la solution dans l'espace phénotypique

Les contraintes sont prises en compte dans la fonction d'adaptation en pénalisant les individus qui violent les contraintes du problème. Deux espaces sont définis :

- l'espace génotypique qui est constitué non pas par les variables de décisions, mais des chaînes de codes(solutions codées).
- l'espace phénotypique qui est constitué par les individus décodé, exprimé pas les valeurs des fonctions objectifs(espace formé par les variables de décision décodées).

L'exploration de l'espace des solutions possibles s'articule sur deux mécanismes qui cherchent à générer de manière aléatoire de nouvelles solutions à partir de la population de départ. Ces mécanismes sont les opérateurs génétiques : *le croisement et la mutation*. Le mécanisme de *sélection* cherche à diriger l'exploration en déterminant les individus ayant la plus grande probabilité d'être choisis.

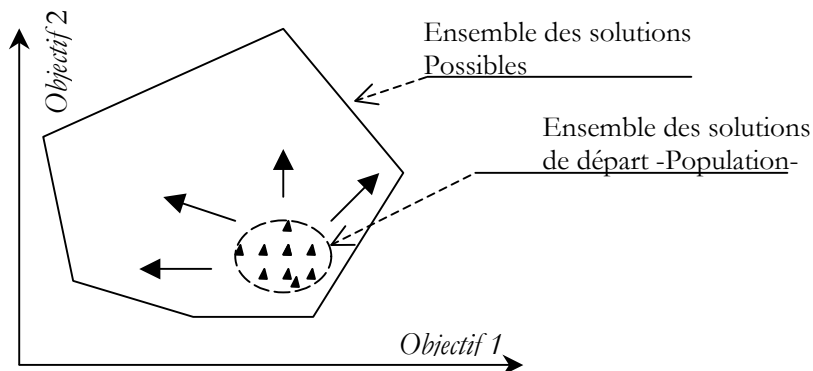


Figure 19. Principe de recherche de solutions dans les algorithmes génétiques.

3. L'Algorithme Génétique Simple (AGS)

Afin d'expliciter le fonctionnement des algorithmes génétiques, nous présentons les différentes étapes d'un algorithme génétique simple illustré par la Figure 24 . La définition du codage des variables de décision est une étape délicate, en fonction du problème étudié, les codes utilisés peuvent être binaires, entiers, réels, gray ou alphabétiques. En fonction du codage utilisé, les opérateurs génétiques assurant la reproduction de nouvelles solutions sont adaptés. La Figure 20 illustre différents codages possibles.

3.1 Génération de la population initiale et codage des individus

La génération de la population initiale que va utiliser l'algorithme génétique, pour explorer l'espace des solutions possibles dépend de la nature du codage utilisé et du nombre de solutions initiales. La taille de la population détermine la robustesse de l'algorithme, en effet plus la population est grande, les solutions sont distinctes et favorise donc l'exploration des solutions acceptables. En fonction des variables de décision considérées dans le problème, la génération de chromosome se base sur une fonction *Random* permettant de générer des variables de manière aléatoires, la génération doit respecter les domaines d'acceptabilité des décisions.

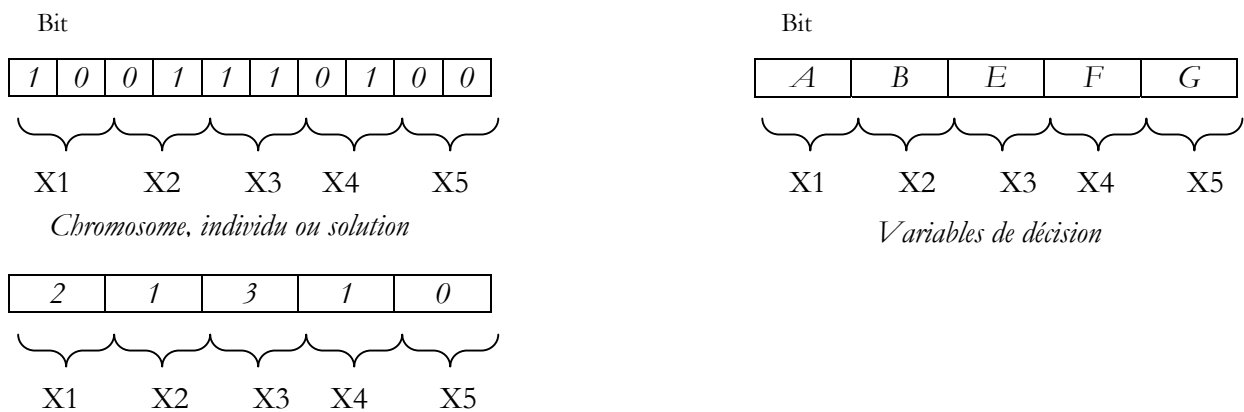


Figure 20. Codage d'une solution sous forme de chromosome

La concaténation des variables de décision codées à l'aide de caractères forme le chromosome ou l'individu et définit une solution. Le chromosome est la forme codée de la solution communément appelée génotype.

3.2 Evaluation de la population

Cette étape consiste à évaluer chaque solution contenue dans la population, la mesure de performance des solutions s'appuie sur la valeur des fonctions objectifs. Chaque solution se voit

attribuer une fonction d'adaptation qui traduit sa performance par rapport aux autres solutions, et qui dépend de l'estimation de chaque objectif du problème étudié. Cette étape permet de classer les solutions, afin de déterminer les solutions qui seront sélectionnées pour construire une nouvelle population de solutions.

3.3 La sélection des individus

Cette étape permet de déterminer les individus à reproduire pour former la nouvelle population de solution. Le choix des individus se base sur leur efficacité relative dans la population. La probabilité de sélectionner un individu donné est souvent traduite par le rapport entre la valeur de sa fonction d'adaptation et la somme de toutes les fonctions d'adaptation de la population. Il existe plusieurs techniques de sélection, nous en développons trois : La sélection par tournoi (*tournament*), la sélection par roulette (*wheel*) et la sélection par rang (*ranking*).

3.3.1 La sélection par tournoi

A partir de la population de taille m , un tournoi qui consiste à sélectionner m chromosomes de m pairs. Pour chaque pair, le vainqueur est déterminé par la valeur de la fonction d'adaptation. Ainsi m individus seront sélectionnés pour la reproduction.

3.3.2 La sélection par roulette

En fonction de la valeur d'adaptation, une proportion est calculée exprimant le rapport entre la valeur de la fonction d'adaptation d'un individu donné et la somme des valeurs sur l'ensemble de la population. On assimile le processus de sélection à une sorte de roulette de casino où chaque individu est représenté sur la roulette à l'aide de la proportion calculée. Ensuite, la bille est lancée et permet donc de choisir un chromosome. Plus la proportion est grande, plus le chromosome associé a de chance d'être tiré. L'expérience est reproduite selon la taille de la population.

3.3.3 La sélection par rang

Il s'agit de classer la population suivant la fonction d'adaptation, chaque individu de la population se voit accorder un rang. Plus l'individu est bon, plus son rang est élevé. Le principe de la sélection par rang est similaire que la sélection par roulette, la différence est que la proportion est calculée sur les rangs et non sur la valeur de la fonction d'adaptation. L'ensemble des individus est représenté sur un segment de droite dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1.

Un tirage aléatoire (en général selon une loi uniforme) de nombres compris entre 0 et 1. La valeur du nombre aléatoire détermine l'individu à sélectionner.

3.4 L'opération de croisement

La procédure de sélection permet d'identifier les individus à reproduire, *les parents*. Le mécanisme de reproduction est assuré par les opérations de croisement et de mutation. L'opération de croisement doit permettre d'améliorer la performance de la population considérée et de générer de meilleures solutions, *les enfants*. L'opération de croisement est tributaire de la nature du codage utilisé. Elle est effectuée sur une paire d'individus sélectionnés de la population, *les parents*.

Cette opération est caractérisée par une probabilité de croisement P_c et le nombre de points de croisement. Nous présentons certains opérateurs.

3.4.1 Opération de croisement simple

Le croisement entre deux individus est conditionné par la probabilité de croisement et le nombre de points de croisement. Le croisement permet de générer deux nouveaux individus dont la structure a été modifiée à partir d'individus de la population. Pour le codage binaire, il s'agit d'abord de déterminer le point de croisement. Chaque chromosome est caractérisé par une longueur déterminée par le nombre de code le constituant. En fonction du nombre de points de croisement voulu, on génère un ou plusieurs nombres aléatoires compris entre 1 et la longueur du chromosome considéré.

Les points de croisement seront les positions qui correspondent aux nombres générés aléatoirement. Le croisement simple peut être adapté au codage réel, entier ou alphabétique en utilisant la même procédure.

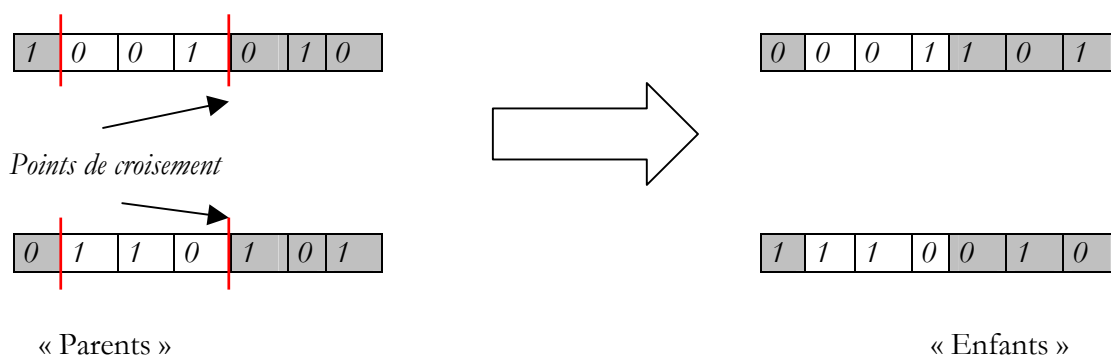


Figure 21. Procédure de croisement dans le cas d'un codage binaire.

3.4.2 Opération de croisement uniforme

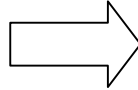
Cette opération consiste à considérer pour un chromosome donné un masque formé d'un vecteur aléatoire binaire. Le codage utilisé représente une variable de décision lui correspondant un nombre binaire, réel, entier ou alphabétique. En fonction de la valeur de la composante du

vecteur binaire associé à la position sur le chromosome, la valeur du code associé à cette position peut avoir l'une des deux valeurs des parents considérés. Le deuxième chromosome (enfant) généré sera constitué par symétrie par rapport au premier chromosome. En fonction de la position du code, si la valeur est associée au premier parent, alors la valeur de la même position pour le second enfant sera associée au deuxième parent.

[0 1 0 1 1 0 1]

1	2	4	5	3	1	2
---	---	---	---	---	---	---

1	1	4	8	4	1	2
---	---	---	---	---	---	---



4	1	3	8	4	7	2
---	---	---	---	---	---	---

4	2	3	5	3	7	1
---	---	---	---	---	---	---

« Parents »

« Enfant »

Figure 22. Procédure de croisement uniforme dans le cas d'un codage entier.

3.5 L'opération de mutation

Cette opération a pour but de créer du désordre dans la population afin de limiter les risques de convergence prématurée vers des optimums locaux. L'opération de mutation est tributaire du codage utilisé et de la probabilité de mutation P_m , qui conditionne la mutation ou non d'un individu. (Simpson et al., 1994) propose de choisir la probabilité de mutation avec $\frac{1}{m} \leq P_m \leq \frac{1}{l}$.

Pour un codage binaire, la mutation consiste à générer un nombre aléatoire compris entre 1 et la longueur du chromosome. La position du code à muter correspond à la valeur du nombre aléatoire généré.

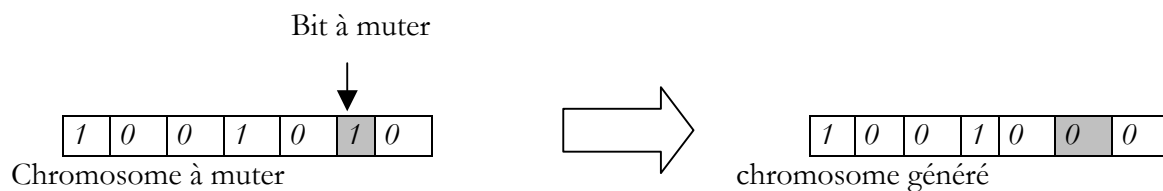


Figure 23. Opération de mutation

Dans le cas d'un codage réel ou entier, la mutation tient compte des limites inférieures et supérieures de la variable de décision considérée. Pour une position générée aléatoirement, un nombre aléatoire compris entre 0 et 1 est généré, si ce nombre est inférieur à 0.5 alors la valeur du code sera égale à la borne inférieure de la variable de décision, sinon elle sera égale à la borne supérieure.

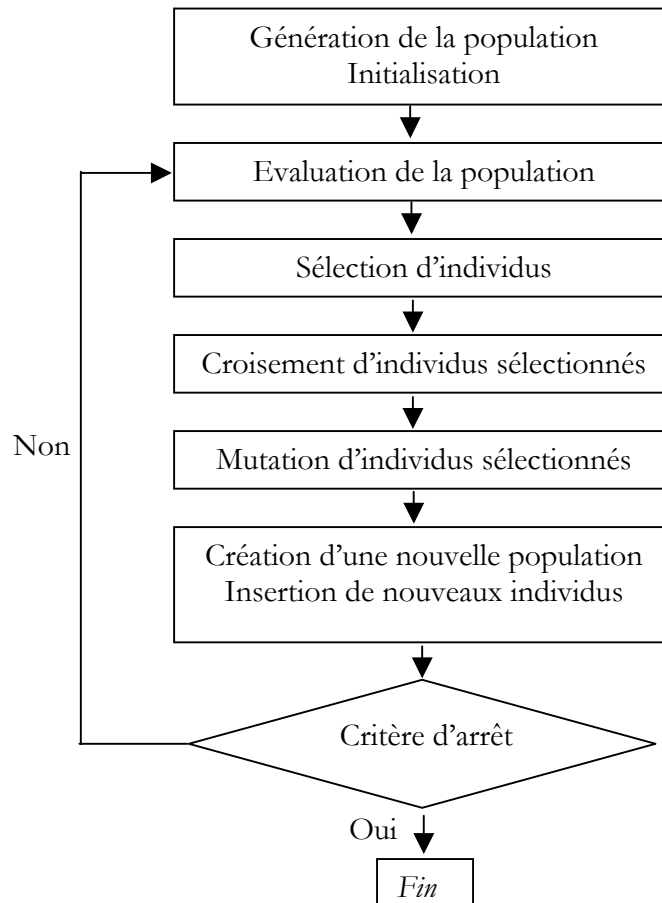


Figure 24. Les principales étapes d'un algorithme génétique

Le processus présenté par la Figure 24 décrit la procédure de génération de la population initiale, et d'exploration de l'ensemble des solutions possibles à l'aide des opérateurs de croisement et de mutation. La convergence de l'algorithme est définie par le nombre de génération à effectuer qui détermine le nombre de répétition des principales étapes de l'algorithme génétique.

4. Métaheuristiques, optimisation multiobjectif et algorithmes génétiques

Il existe dans plusieurs domaines (industrie, transports, environnement, réseaux, économie) des problèmes qui considèrent plusieurs critères ou objectifs qui ne sont pas toujours de la même nature. La résolution de ces problèmes nécessite une approche multiobjectif. Elle tient ses racines des travaux menés par (Pareto, 1896). Utilisée initialement en économie puis en sciences pour l'ingénieur, elle trouve une application plus large dans divers domaines. Contrairement au problème uni-objectif où il existe une seule solution possible, l'optimisation multiobjectif définit un ensemble de solutions acceptables qui assurent un compromis entre les objectifs considérés.

La notion d'optimalité est remplacée par l'existence d'un ensemble de solutions satisfaisantes ou acceptables pour un problème multiobjectif connu généralement sous le nom d'ensemble de solutions Pareto optimale. Le choix d'une solution parmi l'ensemble des solutions acceptables n'est pas évident et dépend du décideur. Selon la nature du problème étudié. (Talbi, 1999) et (Berro, 2001) décrivent la relation entre le décideur et le mécanisme de résolution d'un problème multiobjectif en fonction de l'implication du décideur dans le choix des solutions. Trois cas sont possibles :

Choix à priori : il s'agit de transformer un problème multiobjectif en un problème uni-objectif, en proposant une fonction unique qui traduit l'importance de chaque objectif à travers des pondérations. Cependant, cette approche nécessite une connaissance à priori des pondérations de chaque objectif dans le choix de la solution, mais dans la plupart des cas cette évaluation est difficile ou ne peut se faire en raison d'objectifs exprimés dans des unités de mesure différentes.

Choix à posteriori : dans ce cas précis, il s'agit de choisir une solution d'un ensemble de solutions satisfaisantes. Le choix de la solution sera guidé par les préférences du décideur en fonction des évaluations des solutions, les objectifs du problème et le nombre de solutions. La connaissance du problème et ses spécificités par le décideur peut permettre un choix rapide pour une cardinalité réduite de l'ensemble des solutions, dans le cas contraire il est nécessaire de décrire chaque solution en fonction des objectifs considérés dans le problème. Ce qui permet de mieux appréhender les solutions selon ses préférences.

Choix progressif ou interactif :

Le décideur intervient dans le processus de recherche de solutions, le processus de recherche est guidé par le décideur selon son appréciation des différents objectifs afin de trouver un compromis acceptable. Cette approche nécessite une connaissance approfondie de l'outil d'optimisation utilisé par le décideur .

4.1 Définition d'un problème multi-objectif

Un problème multiobjectif est défini par un ensemble de fonctions objectifs qui mesurent des critères différents, exprimés à l'aide de variables de décision communes. Un problème d'optimisation multiobjectif (*Multiobjective Optimization Problem – MOP*) peut être défini comme suit :

$$\text{(MOP)} \left\{ \begin{array}{l} F(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots, f_n(x)) \\ \text{s.t. } x \in C \end{array} \right. \quad (4.1)$$

avec $n \geq 2$ qui détermine le nombre de fonctions objectifs, $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$ représente les variables de décision du problème, C désigne l'ensemble des solutions réalisables et $F(x)$ correspond aux objectifs à optimiser.

4.2 Méthodes de résolution

Les méthodes de résolution des problèmes multiobjectif cherchent à proposer des solutions qui assurent un bon compromis entre les objectifs considérés. Les méthodes classiques d'optimisation : Programmation Linéaire, Branch & Bound, Programmation Dynamique ont été utilisés dans la résolution de problème multiobjectif à deux critères et pour un nombre de variables de décisions faible. Pour des problèmes de taille plus importante, les méthodes exactes sont inadaptées, d'où l'utilisation de Métaheuristiques. Selon l'approche utilisée, les méthodes de résolution des problèmes multiobjectif sont réparties en trois groupes :

4.2.1 Méthodes scalaires

Ces méthodes se basent sur la transformation du problème multiobjectif en un problème uni-objectif. Parmi les méthodes utilisées : les méthodes d'agrégation, les méthodes e-contrainte et les méthodes de programmation par but (*Goal Programming*). Une fois la formulation du problème effectuée, ces méthodes sont généralement associées à des Métaheuristiques pour la résolution dont : les Algorithmes génétiques, le Recuit simulé, Recherche Tabou.

4.2.1.1 Méthodes d'agrégation

Méthodes qui consistent à transformer le problème multiobjectif en un problème uni-objectif à l'aide d'une fonction objectif unique qui est exprimée comme la somme pondérée des objectifs à considérer. Un poids ω_i est associé à chaque objectif f_i qui représente son importance dans la décision à prendre. La fonction objectif du problème s'écrit sous la forme suivante :

$$F(x) = \sum_{k=1}^n \omega_k f_k(x) \quad (4.2)$$

Avec $\omega_i \in [0,1]$ et $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$. La solution obtenue reste sensible à la valeur des poids choisis.

Pour des problèmes d'optimisation où il existe plusieurs solutions possibles, seule une solution est proposée, qui ne représente pas nécessairement un optimum global. Pour obtenir plusieurs solutions admissibles, il est possible de résoudre le problème avec différentes valeurs de pondérations et comparer les solutions trouvées. L'approche est coûteuse en terme de calcul.

Dans le cas d'objectifs non-commensurables², la fonction objectif du problème dépend des solutions optimales pour chaque fonction objectif considérée dans le problème. Elle s'écrit sous la forme suivante avec x^* représente la solution optimale pour la fonction objectif $f_i(x)$. :

$$F(x) = \sum_{k=1}^n \omega_k \frac{f_k(x)}{f_k(x^*)} \quad (4.3)$$

4.2.1.2 Méthodes e-contraite

Pour ces méthodes, une seule fonction objectif est optimisée, les autres fonctions objectifs sont considérées à travers des contraintes. Le problème s'écrit sous la forme suivante :

$$(MOPe) \begin{cases} F(x) = f_k(x) \\ \text{t.q. } x \in C \\ f_i(x) \leq e_i, i = 1, \dots, n, i \neq k \end{cases} \quad (4.4)$$

Le problème est transformé en un problème uni-objectif sous les contraintes e_i . Afin d'obtenir un ensemble de solutions satisfaisantes, il est possible de résoudre le problème avec des valeurs différentes pour les contraintes.

4.2.1.3 Méthodes de programmation par but

Dans ce cas des buts z_i sont fixés pour les fonctions objectifs qui exprime une performance souhaitée par le décideur. Le problème s'écrit sous la forme :

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i |f_i(x) - z_i| \quad (4.5)$$

A travers les méthodes présentées, il apparaît qu'une connaissance préalable du problème et de l'importance de chaque objectif dans la prise de décision est nécessaire. La solution proposée est sensible aux valeurs des pondérations considérées. La convergence de ces méthodes vers des optimums globaux n'est pas assurée.

4.2.2 Méthode non-Pareto

Ces méthode ne transforment pas les problème multiobjectif en problème uni-objectif et n'utilisent pas non plus la notion de dominance au sens de Pareto. Elles s'appuient sur une approche qui permet d'évaluer séparément les fonctions objectifs d'un problème.

². Objectifs exprimés dans des unités différentes

4.2.2.1 Sélection parallèle

L'une des méthodes utilisée est la méthode VEGA (*Vector Evaluated Genetic Algorithm*). Proposé par (Schaffer,1985), elle s'articule sur la modification du mécanisme de sélection d'un algorithme génétique simple, afin de résoudre des problèmes multiobjectifs. Les solutions à sélectionner à chaque génération dépendent des objectifs à considérer et de la taille de la population. Pour une population de taille m , en considérant n objectifs, la méthode constitue m/n sous-populations pour chaque objectif dans lesquelles la recherche des solutions se fait sur la base d'un seul objectif. La population finale sera constituée des n sous-populations constituées de solutions optimales relatives au n objectifs du problème.

4.2.3 Méthodes Pareto

La notion de d'optimalité admise est celle figurant dans les travaux de Edgorth, généralisée plus tard par Pareto.(Goldeberg, 1989) propose d'utiliser cette approche pour les problèmes multiobjectif en utilisant un algorithme génétique. L'ensemble des solutions admissibles d'un problème multiobjectif est dit ensemble des solutions Pareto optimale. Chaque solution est au moins aussi bonne que les autres solutions sur l'ensemble des critères pris en compte. Il convient d'introduire la notion de dominance, qui permet d'identifier les solutions Pareto optimales formant la frontière de Pareto. Pour un problème de minimisation³, une solution x_i domine une solution x_j si et seulement si :

$$\forall m \in [1, n], f_m(x_i) \leq f_m(x_j) \text{ et } \exists m \in [1, n], f_m(x_i) < f_m(x_j)$$

La solution est dite Pareto optimale si elle n'est dominée par aucune autre solution. Pour un problème multiobjectif, l'ensemble des solution Pareto optimale est constitué de l'ensemble des solution non-dominées.

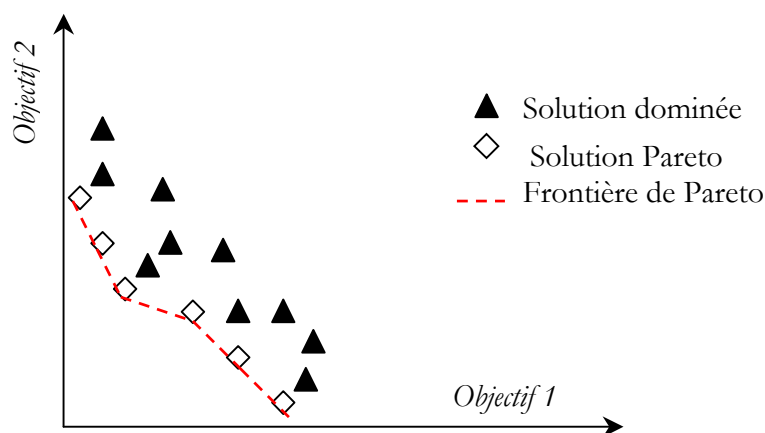


Figure 25. Dominance et solutions Pareto optimales pour un problème de minimisation

³. Pour un problème de maximisation, seul le sens de l'inégalité change, la démarche reste inchangée.

D'une manière générale, les approches Pareto identifiées dans la littérature sont implémentées à l'aide d'algorithmes génétiques (Basseur, 2005). Pour la résolution de Problèmes multiobjectif, deux aspects doivent être pris en compte (Talbi, 1999) et (Deb et al.,2000) :

- Converger vers la frontière de Pareto : l'utilisation des algorithmes génétiques pour la résolution des Problèmes multiobjectifs se traduit par l'intégration de l'approche Pareto dans la sélection même des solutions. A l'aide de méthode de classement des solution (Ranking), la notion de dominance est mise en œuvre et permet donc d'identifier des solutions non-dominées.
- Diversifiées les solutions Pareto optimales : il s'agit d'assurer une diversification des solutions sur la frontière de Pareto. A l'aide de classes ou de niches écologiques qui regroupent les solutions les plus voisines (soit dans l'espace phénotypique, ou dans l'espace génotypique). Cette procédure permet de stabiliser des sous-ensemble des solutions non-dominées.

5. Approche multiobjectif et Algorithme Génétique

5.1 Les méthodes non élitistes

5.1.1 Multiple Objective Genetic Algorithm (MOGA)

L'une des premières applications de la notion de dominance pour le calcul de la performance des solutions a été proposée par (Fonseca et Fleming,1993). Ils proposent de déterminer pour chaque solution i , le nombre n_i de solutions la dominant. Le rang r_i d'une solution x_i à une génération t est donné par $r_i(x_i, t) = n_i + 1$, ainsi le rang d'une solution non dominée est égal à 1. La fonction de fitness dépend du rang de chaque solution. Pour des solutions de même rang, la fonction Fitness est identique. Cependant, cette procédure ne permet pas d'avoir une diversité des solution de la frontière Pareto. (Fonseca et Fleming,1993) proposent l'introduction d'une fonction permettant de construire des niches ou des classes de solutions de même rang. Le remplissage de ces niches s'appuie sur la distance entre les solutions de même rang. Ainsi si la distance euclidienne entre deux solutions de même rang est inférieur à un valeur donnée notée σ_{share} , les deux solutions appartiendront à la même niche. Pour cette méthode la distance est définie dans l'espace phénotypique (Espace des objectifs). Soit deux solution de même rang i et j , la distance est donnée comme suit :

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^M \left(\frac{f_k^i - f_k^j}{f_k^{max} - f_k^{min}} \right)^2} \quad (4.6)$$

avec M représente le nombre d'objectifs considérés dans le problème, f_k la valeur de la fonction objectif k et f_k^{max}, f_k^{min} les valeurs maximale et minimale de la fonction objectif k pour la population considérée. Pour les solutions de même rang, la fonction de partage est définie par :

$$Sh(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{ij}}{\sigma_{share}}\right)^\beta & \text{si } d_{ij} \leq \sigma_{share} \\ \text{sinon.} & \end{cases} \quad (4.7)$$

Le compteur de niche m traduit le nombre de solutions de même rang dont la distance les séparant est inférieure à σ_{share} , avec $\beta = 1$, . Soit n_{r_i} le nombre de solutions de même rang.

$$m_i = \sum_{j=1}^{n_{r_i}} Sh(d_{ij}) \quad (4.8)$$

Afin d'assurer une distribution des solutions sur la frontière de Pareto, la valeur du Fitness F est corrigée à l'aide du compteur de niche. La nouvelle fonction de Fitness, F'_i tel que :

$$F'_i = \frac{F_i}{m_i} \quad (4.9)$$

Cette méthode permet d'obtenir des solutions Pareto optimale de bonne qualité. Cependant, les résultats dépendent de la valeur du paramètre de partage σ_{share} qui détermine la taille des niches et donc assure la diversité des solutions dans la population.

5.1.2 Non dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)

Cette méthode a été proposée par (Sirvinas & Deb, 1994) appliquée au problème multiobjectif. L'approche utilise la dominance au sens de Pareto pour déterminer les solutions non-dominées. NSGA vise à classer la population en différentes classes en fonction du niveau de dominance des solutions. Le tri de la solution est effectué par étape. Il s'agit d'abord de déterminer l'ensemble des solutions non-dominées dans le population, cet ensemble forme la première frontière de Pareto. Les solutions sont écartées de la population, et la même démarche est appliquée pour la recherche du second ensemble des solutions non-dominées. La procédure de tri est ainsi répétée jusqu'à ce que toute la population soit triée. La fonction de fitness F dépend de la taille de la

population. Pour la première frontière de Pareto, la valeur du fitness $F_i = N$, où N représente la taille de la population. Pour les solutions des frontières supérieures, la fonction Fitness est dégradée. Pour les solutions appartenant au même ensemble de solutions non-dominées, la valeur du Fitness est corrigée afin d'assurer la diversité des solutions non dominées. Les solutions voisines auront le même fitness. (Sirvinas et Deb,1994) utilisent la distance génotypique calculée dans l'espace des décisions pour corriger la valeur du fitness. Pour un ensemble de taille c de solutions de la même frontière de Pareto, la distance est définie entre deux solution i et j :

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^C \left(\frac{x_k^i - x_k^j}{x_k^{max} - x_k^{min}} \right)^2} \quad (4.10)$$

Cette distance est utilisée pour calculer la fonction de partage, l'expression de la fonction de partage est donnée par l'équation avec $\beta = 2$. Le calcul du compteur de niche permet de corriger la valeur du fitness donnée par l'équation

5.1.3 Niched Pareto Genetic Algorithm (NPGA)

(Horn et al.,1993) proposent une approche basée sur la dominance au sens de Pareto mais qui diffère des approches présentées ci-dessus dans la sélection des solutions. Les auteurs définissent une procédure de sélection par tournoi. Deux solutions i et j sont tirées aléatoirement de la population de taille N . une sous-population N' de taille $t \ll N$ est choisie aléatoirement. Chaque solution de la sous-population est comparée aux deux solutions i et j . Deux situations sont possibles :

- Si l'une des deux solutions domine le sous-ensemble de solutions, alors cette solution est retenue pour la sélection.
- Si les deux solutions dominent le sous-ensemble de solutions ou les deux solutions sont dominées par au moins une solution de N' , on calcule le compteur de niche pour chacune des deux solutions. La solution dont le compteur de niche est petit est sélectionnée pour la reproduction.

Cette étape permet de sélectionner les parents qui feront l'objet de reproduction pour générer une nouvelle population. La préservation de la diversité des solutions ainsi que la convergence de la méthode vers la frontière de Pareto est assurée par le principe de tournoi. La méthode nécessite la définition de deux paramètres : un paramètre de partage σ_{share} pour déterminer le

vainqueur entre deux solutions équivalentes, et un paramètre t relatif à la taille de la sous-population N' . Cette approche est plus sensible que les méthodes présentées précédemment.

5.2 Les méthodes élitistes

Les techniques élitistes cherchent à conserver les solutions non dominées tout au long de la procédure de recherche des solutions. Ces techniques définissent un ensemble dit archive qui résume les solutions non dominées d'une génération à l'autre. Elle cherchent aussi à assurer la diversité des solutions sur la frontière de Pareto.

5.2.1 Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)

Cette approche proposée par (Zitzler et Thiele, 1998) se base sur le maintien de l'élitisme dans la population, par la constitution d'un ensemble externe de solutions non-dominées appelé *Archive*. A chaque génération, l'ensemble est actualisé en fonction des nouvelles solutions non-dominées obtenues. L'algorithme démarre avec une population P_0 de taille N générée de manière aléatoire avec une population *Archive* P'_0 vide. A chaque génération t , l'ensemble P'_t est rempli et actualisé par les solutions non-dominées obtenues de la population courante. La performance S_i d'une solution i dans l'archive dépend du nombre de solutions n_i qu'elle domine dans la population courante :

$$S_i = \frac{n_i}{N + 1} \quad (4.11)$$

La fonction d'adaptation d'une solution j de la population courante dépend de la somme des S_i des solutions qui la domine :

$$F_j = 1 + \sum_{i \in P'} S_i \quad (4.12)$$

5.2.2 Pareto Archived Evolution Strategy (PAES)

Cette méthode a été développée pour la résolution de problèmes de conception des réseaux de télécommunication. Développée par (Knowles et Core, 1999) pour les problèmes uni-objectif, elle s'appuie sur une recherche locale basée sur un point (une solution) et non un ensemble de solutions, l'approche a été adoptée pour les problèmes multiobjectif qui utilisent un ensemble appelé Archive rassemblant les solutions non-dominées tout au long de la recherche de solutions. D'abord une solution est générée aléatoirement x_0 , qui subira une mutation permettant de générer un enfant x'_0 . La taille de l'ensemble Archive est définie a priori. Une comparaison des

deux solutions permet d'archiver une copie de la solution non dominée. La solution choisie sera muter pour générer une nouvelle solution. A chaque génération t une comparaison est effectuée entre le parent x_t et l'enfant x'_t . Une copie de la solution non dominées est archivée, et la solution choisie sera mutée à la prochaine itération. Si aucune des deux solutions n'est dominante alors la solution x'_t sera comparée avec les solutions contenues dans l'archive. Si la solution x'_t est dominée alors elle sera éliminée et la solution x_t sera mutée encore une fois, sinon une copie de la solution x'_t sera archivée et les solutions dominées par x'_t seront retirées de l'Archive. x'_t servira à générer une nouvelle solution à la prochaine génération. Une procédure de mise à jour est effectuée dès que l'archive est pleine. Dans le cas d'une solution non dominée, cette dernière sera comparée avec les solutions encombrées⁴ (voisines). Si la solution générée appartient au voisinage des ces solutions alors elle sera abandonnée, sinon elle sera choisie et une solution sera retirée de l'archive. Pour deux solutions voisines, on choisira la solutions se trouvant dans un espace non encombré. Soient trois solutions x_{i-1} , x_i et x_{i+1} . La distance d_i est donnée par : $d_i = \sum_{k=1}^M (f_{i+1}^k - f_{i-1}^k)$. La solution ayant la distance la plus importante sera choisie.

5.2.3 Pareto Envelope based Selection Algorithm (PESA)

Cette méthode a été développée par (Knowles et Core,2000) , elle s'appuie sur le principe sur la comparaison de solution voisine par l'utilisation du principe de crowding pour les solution voisines. PESA définit deux paramètres concernant la taille de la population de solution et de l'archive, la génération de la population de solution utilise un algorithme génétique.

5.2.4 Pareto Envelope based Selection Algorithm II (PESA II)

Cette méthode propose une nouvelle technique de sélection des solutions basée sur la décomposition de l'espace phénotypiques en hypercubes identiques (Corne, 2001). La sélection des solutions n'est plus mesurée par la fonction d'adaptation mais par les hypercubes contenant au moins une solution. Les hypercubes contenant le moins de solution sont privilégiées et le choix de la solution dans l'hypercube se fait de manière aléatoire. Les résultats de la méthode dépendent du découpage de l'espace des objectifs.

⁴ . La comparaison s'obtient par le calcul d'une distance de crowding correspondant à la somme des cotés perpendiculaires de l'hypercube formé par les deux solutions voisines.

5.2.5 Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA II)

(Zitzler et al., 2001) apporte des améliorations à SPEA. Ces améliorations porte essentiellement sur la définition d'une taille fixe de l'archive qui à l'état initial est constitué par les solution non-dominés et complété par celles dominées si les solutions non-dominées ne suffisent pas pour remplir l'archive. L'autre modification porte sur le calcul de la fonction d'adaptation. Pour une solution i un calcul de distance $\sigma_i^{(k)}$ avec ces voisins est effectué dans l'espace des objectifs. Les distances sont stockées dans une liste triée par ordre croissant. La position k de la distance est donnée par $k = \sqrt{N + N'}$. Chaque solution sera caractérisée par une densité $D(i)$ tel que :

$$D(i) = \frac{1}{\sigma_i^{(k)} + 2} \quad (4.13)$$

La fonction d'adaptation sera calculée par l'équation suivante :

$$F_j = D(i) + \sum_{i \in P'} S_i \quad (4.14)$$

La reproduction des solutions s'effectue seulement dans l'ensemble *Archive*.

5.2.6 Non sorting Genetic Algorithm II (NSGA II)

(Deb et al., 2000) présente une deuxième version de l'algorithme NSGA. L'auteur tient compte des insuffisances de NSGA qui concernent la complexité algorithmique, la non prise en compte de l'élitisme et la nécessité de déterminer un paramètre de partage. Contrairement à NSGA, la nouvelle version permet de réduire la complexité algorithmique et considère une approche élitiste dans la recherche des solutions. A la génération initiale une population de solution de taille m est constituée aléatoirement. Les procédures de croisement et de mutation sont appliquées, les solutions sont choisies en utilisant un tournoi basé sur la fonction d'adaptation calculée à partir du classement des solution à l'aide d'une procédure de classement « Ranking » qui détermine un rang pour chaque solution en fonction son appartenance à un ensemble non-dominés. Ainsi m enfants sont créés. A la prochaine génération, les enfants obtenus à la génération précédente sont mélangés avec la population initiale. On obtient $2m$ solutions qu'il faudra ranger. Le but de cette procédure est de garder les solutions non-dominées. Les m meilleures solutions constitueront la nouvelle population de solutions potentielles pour la génération encours. Cette procédure vise à assurer une convergence rapide de l'algorithme en sauvegardant les solutions non-dominées à chaque itération. Pour assurer la diversité des solutions, un calcul de distance basé sur une procédure de Crowding permettant de choisir entre des solutions de même rang..

5.3 Comparaison des approches multiobjectif

(Zitzler et al., 2001) comparent les approches d'optimisation multiobjectif et mettent en avant l'influence de l'introduction de l'élitisme sur la performance. Cependant la comparaison des la performance des méthodes élitistes dépendent des problèmes étudiés. Elle dépend de la méthode de comparaison de performance et la définition des paramètres pour chaque approche. (Roudenko, 2004) présente dans les comparaisons d' approches d'optimisation multiobjectif traitées dans la littérature.

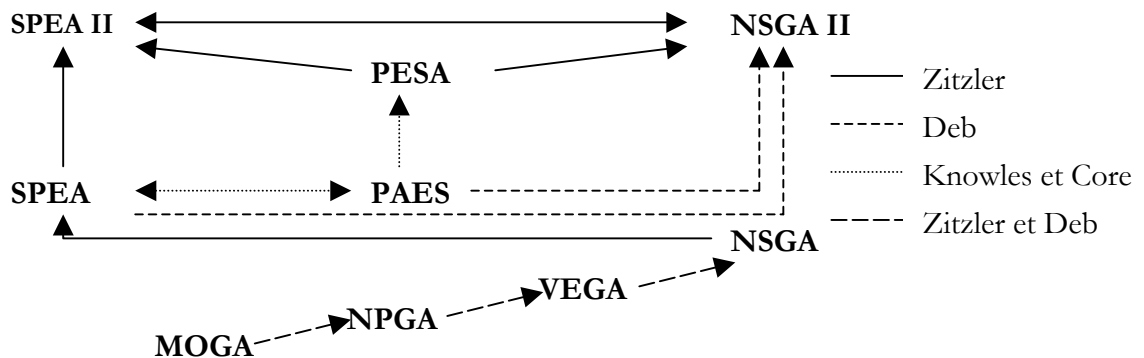


Figure 26. Comparaison des performances des approches d'optimisation multiobjectif (les flèches pointent vers les meilleurs). Adapté de (Roudenko, 2004).

Sur la base des développements présentés dans ce chapitre, nous avons établi une comparaison entre les différentes méthodes d'optimisation multiobjectif. Cette comparaison s'appuie sur des critères liés au principe de calcul, la performance de ces algorithmes de leurs avantages et inconvénients. Le Tableau 8. présente l'analyse que nous avons effectuée.

Tableau 8. comparaison des méthodes d'optimisation multiobjectif

Méthodes	Principe	Population opérateurs génétiques	Fonction de partage	Complexité	Archive	Elitisme	Avantages	Inconvénients	Dominance Au sens de Parto
VEGA	Sélection des solutions en fonction d'un seul objectif à la fois puis mélange des solutions	Oui	Non	Non défini	Non	Non	Implémentation facile sur un algorithme génétique simple	Ne permet pas d'atteindre des solutions compromis, favorise l'apparition de solutions optimales pour certains objectifs seulement.	non
MOGA	Classement des solutions par rang	Oui	Oui	Importante	Non	Non	Permet de définir un ensemble de solutions Pareto	Ne sauvegarde pas les solutions non-dominées à chaque génération, solutions dépendent de la fonction de partage	oui
NPGA	Tournoi appliquée à une sous-population choisie aléatoirement	Oui	Oui	Importante	Non	Non	Utilisation d'une procédure de sélection par tournoi	Solutions dépendent de la fonction de partage et de la taille de la population N^p	Oui
NSGA	Trier la population en classes	Oui	Oui	Importante	Non	Non	La fonction d'adaptation dépend de l'ensemble non-dominé à laquelle elle appartient	Solutions dépendent de la fonction de partage	Oui
SPEA	Utilisation de population externe	oui	non	importante	oui	oui	Calcul simple de la fonction d'adaptation Pas de fonction de partage	La performance dépend de la taille de l'archive	oui
PAES	Utilisation d'une solution	non	non	Moins importante	oui	oui	Temps de calcul moins important	La performance dépend de la taille de l'archive et de la solution de départ considérée et du paramètre d	oui

PESA	Utilisation de population externe	oui	non	importante	oui	oui	N'utilise pas de fonction de partage	La performance dépend de la taille de l'archive et du paramètre d	oui
NSGA II	Utilisation de sélection par tournoi	oui	non	importante	oui	Oui	N'utilise pas de fonction de partage	La performance dépend de la taille de l'archive et du paramètre d	oui
PESA II	Découpage de l'espace des objectifs	oui	non	Moins importante	oui	oui	Implémentation simple de la méthode	La performance dépend du découpage de l'espace des objectifs	oui
SPEA II	Utilisation de Population externe	oui	non	Non-défini	oui	oui	Amélioration du calcul de la fonction d'adaptation	La performance dépend de la distance $\sigma_i^{(k)}$ et de la taille de l'archive	oui

6. Applications diverses des algorithmes génétiques et de l'optimisation multiobjectif

D'une manière générale, l'algorithme génétique est caractérisé par une fonction d'adaptation, un codage spécifique et des opérateurs de sélection et de reproduction. Selon le problème étudié, ces caractéristiques sont adaptées en fonction des variables de décision et des objectifs qui sont considérés. Même si les domaines d'application des algorithmes génétiques restent variés, certaines similitudes sont à noter :

- Nombre important de variables de décision
- Problématiques faisant apparaître la notion de réseau : réseau d'eau potable, réseau de ponts, réseaux d'autoroute.
- Planification : problème de réhabilitation de réseau d'eau potable, réseau de ponts, réseau de routes, ordonnancement des tâches dans les projets ou dans les ateliers.
- Satisfaction de plusieurs objectifs incommensurables pouvant être contradictoires.

Nous présentons dans ce qui suit des applications d'algorithmes génétiques à des problèmes à caractère multiobjectif. L'intérêt est de comprendre comment sont utilisés ces algorithmes : prise en compte des objectifs, prises en compte des contraintes, prise en compte des variables de décision, algorithmes d'optimisation utilisés, afin de s'en inspirer pour la formulation de notre problème à l'aide d'un algorithme génétique. Nous distinguons les domaines d'application suivants :

- réhabilitation d'infrastructures routières : ponts et autoroutes.
- ordonnancement des tâches : gestion de projet, gestion des tâches en atelier, problème de transport.
- domaine de l'eau : dimensionnement et réhabilitation des réseaux d'Alimentation d'Eau Potable (AEP).

6.1 Algorithme génétique et infrastructures routières

(Fwa & al, 1996) présentent un modèle PAVENET-R basé sur l'utilisation des algorithmes génétiques. Les auteurs traitent de la problématique de réhabilitation et de maintien en service du revêtement d'un réseau d'autoroutes au Japon. La gestion du revêtement à l'échelle du réseau nécessite une programmation des travaux concernant la chaussée sur un horizon de temps important. L'outil développé cherche à identifier les tronçons nécessitant une réhabilitation et les alternatives adéquates à adopter. Le réseau de routes considéré est codé à l'aide d'un

chromosome dont la taille est égale au nombre de tronçon dans le réseau que multiplie la période de planification. Dans l'application étudiée, il s'agit d'une planification sur un horizon de 5 ans. Chaque gène correspond à un tronçon, chaque gène est constitué de 5 bits, chaque bit contient un nombre entier variant de 0 à 8 représentant les alternatives d'interventions sur les tronçons d'autoroute. L'objectif est de minimiser les coûts de réhabilitation, la gêne occasionnée aux usagers et d'améliorer l'état du revêtement pour l'ensemble du réseau.

(Liu et al.,1997) proposent une démarche d'optimisation des travaux de réhabilitation des revêtements d'une ensemble de ponts (notion de réseau) dont le degré de détérioration est distinct. Les auteurs introduisent les différentes techniques utilisées pour la réhabilitation en fonction de la détérioration de l'ouvrage évaluée lors d'inspections annuelles. La fonction objectif traduit les coûts de maintenance futurs pondérée par un indice qui mesure l'état de détérioration des ponts . Le codage est effectué à l'aide de codes en binaire. L'ensemble du réseau est représenté à l'aide d'un chromosome, chaque pont est représenté par un gène, sur le gène est défini une séquence de bits regroupés deux par deux représentant les alternatives à adopter. La séquence décrit l'évolution des interventions tout au long de l'horizon de planification. La fonction objectif considère le coût de l'intervention et un deuxième membre qui traduit la détérioration du revêtement à une date donnée et pondérée par une pénalité. L'optimisation est assurée par un algorithme génétique simple en transformant le problème en un problème uni-objectif à l'aide d'une seule fonction objectif.

(Liu & Frangopol, 2004) présentent une approche d'optimisation de la maintenance des ponts basée sur un ensemble d'indices et une optimisation multiobjectif utilisant la notion de dominance au sens de Pareto avec un algorithme génétique. Les auteurs considèrent trois objectifs :

- réduire l'usure des ponts traduite par un indice de sécurité, estimé lors d'inspections de l'état de la structure des ponts
- augmenter la fiabilité des pont traduite par un indice de fiabilité
- réduire les coûts de maintien en service à travers le temps.

L'algorithme génétique permet d'assurer une planification des travaux de maintenance sur les ponts. Les variables de décisions représentent le temps moyen entre interventions. Chaque variable de décision est codée sur 7 bits, avec un codage binaire. L'approche a été utilisée au Royaume-Uni. Nous proposons une synthèse des ces applications dans le Tableau 9.

Tableau 9. Algorithmes génétiques et infrastructures routières

Auteurs	Type d'utilisation	Nature de l'algorithme	Objectifs	Codage des individus	Gène	Longueur gène	Longueur chromosome	Variables de décision	Application
(Fwa et al,1996)	Modèle pour la réhabilitation des chaussées	Algorithme génétique simple	Minimiser le coût de réhabilitation, améliorer l'état des routes et	Entier	Représente un tronçon de chaussée donné	Horizon de planification	Nombre de tronçons de chaussée x Nombre d'années de planification	Alternatives de réhabilitation	Singapour tronçons
(Liu et al,1997)	Modèle pour la réhabilitation des ponts	Algorithme génétique simple	Minimiser le coût de maintien en service	Binaire	Alternatives De maintenance possible	2	Pour un pont donné le gène traduit la séquence de travaux à adopter sur le pont, chaque alternative(méthode) est codé sur 2 bits	Alternative de maintenance	Japon 30 ponts
(Liu & Frangopol,2004)	Modèle pour la maintenance des ponts	Algorithme génétique avec une approche multiobjectif (NSGA)	Minimiser l'usure des ponts à travers un indice de sécurité Maximiser la fiabilité à l'aide d'un indice de fiabilité Minimiser les coûts de maintenance sur le cycle de vie	Binaire	Représente une durée Entre interventions	7	Nombre de ponts à considérer x le nombre de gène	Temps moyen entre interventions	Angleterre

6.2 Algorithmes génétiques et problèmes d'ordonnancement

Les algorithmes génétiques ont été utilisés pour répondre à la problématique d'allocation de ressources, gestion des tâches en atelier, la gestion de projet et le problème de transport. L'utilisation de ces algorithmes permet de proposer des séquences d'exécution de tâches ou des itinéraires acceptables réduisant l'utilisation de ressources rares : le temps et le budget. (Tadahiko & al, 1996) proposent une approche multiobjectif utilisant un algorithme génétique appliqué à l'ordonnancement de tâches en atelier. Les fonctions objectifs sont pondérées dans une seule fonction et la recherche de solution s'appuie sur la démarche de Pareto pour la détermination d'un ensemble de solutions non dominées. Les auteurs présentent une application, permettant de tenir compte de deux objectifs : minimiser le temps de cycle d'un processus et de minimiser le temps de retard sur l'exécution des tâches. La séquence des tâches est codée sous forme d'un chromosome à l'aide de codes alphabétiques, chaque gène correspond à une tâche. L'application traite d'un problème d'ordonnancement de 20 tâches sur 10 machines. (Feng & al, 1997) traitent de la problématique de planification dans les projets, pour ce type de problème, il est nécessaire de trouver un compromis entre la ressource temps qui se traduit par le délai de réalisation d'un projet et le coût d'un projet. Ils dressent un éventail de méthodes classiques : Chemin critique CPM (*Critical Path Method*), Programmation Dynamique et leur insuffisances précisément pour les projets de taille importante (diversité des tâches et de ressources). Les auteurs proposent une approche utilisant une méta-heuristique, les algorithmes génétiques. Ils proposent de considérer les tâches d'un projet comme variables de décision codées sous forme de chaînes d'entiers, chaque case correspond à une tâche à un instant t . L'approche se base sur l'utilisation d'une optimisation multiobjectif pour trouver une solution permettant de réduire les coûts et délai de réalisation de projet. La longueur de la chaîne de caractère correspond au nombre de tâche dans le projet. (Osman & al., 2004) exposent les problèmes de transport qui cherche à trouver un compromis entre plusieurs objectifs à la fois : coût, temps, distance, flux. Les auteurs introduisent l'utilisation de méthodes classiques d'optimisation en particulier la Programmation Dynamique qui donne de bons résultats pour les problèmes de petite taille, mais reste inadéquat pour des problèmes de taille importante. Ils proposent une approche permettant de considérer plusieurs objectifs, compris dans une fonction objectif unique. La recherche de solution utilise un algorithme génétique et la méthode VEGA. L'approche est utilisée pour un problème de transport dont les objectifs sont la minimisation du coût de transport sur l'ensemble de l'itinéraire, la minimisation du délai d'approvisionnement et la maximisation du profit. La solution représente la séquence de passage sur les n sommets d'un graphe représentant des points d'approvisionnement. Nous effectuons une comparaison de ces travaux dans le Tableau 10.

Tableau 10. Algorithme génétique et problèmes d'ordonnancement.

Auteurs	Type d'utilisation	Nature de l'algorithme	Objectifs	Codage des individus	Gène	Longueur gène	Longueur chromosome	Variables de décision	Application
(Tadahiko & al, 1996)	Approche pour l'ordonnancement des tâches en atelier	Algorithme génétique avec une approche Pareto	Minimiser le temps de cycle et les retards sur chaque tâche, objectifs pondérés	Alphabétique	Représente la tâche à effectuée	1	Nombre de tâches à effectuer sur une machine	Désigne la tâche à effectuer	Problème Test 20 tâches
(Feng & al, 1997)	Planification dans les projets	Algorithmes génétique simple avec pondération des objectifs	Minimiser les coûts et délai de réalisation du projet, objectifs pondérés	Entier	Représente la tâche à effectuer à un instant donné	1	Nombre de tâches	Alternative pour la tâche considérée	Réseau test 18 tâches
(Osman & al, 2004)	Modèle pour l'optimisation de problèmes d'acheminement	Algorithme génétique VEGA Approche Pareto	Minimiser les coûts, temps, maximiser un profit, objectifs pondérés	Entier	Sommet du graphe : ville, aire de stockage, sources	1	Chaque gène correspond à une source, pour ces problématique	Identifie un lieu de passage, un poste de travail	Réseau test 10 villes
(Zheng et al, 2005)	Modèle pour la planification dans les projets	Algorithme génétique avec approche Pareto	Minimiser les coûts et délai de réalisation du projet, objectifs pondérés	Entier	Représente une activité du projet considéré	1	Correspond au nombre d'activités ou tâches dans le projet	Identifie une activité du projet	Projet test 18 tâches

(Zheng et al., 2005) présentent une approche d'optimisation multiobjectif utilisant un algorithme génétique appliqué au problème de planification des tâches dans les projets. Les objectifs sont de trouver un compromis entre le délai et le coût de réalisation du projet. Afin d'améliorer la robustesse du modèle, les auteurs comparent plusieurs mécanismes d'évaluation, de sélection et de mutation dans le processus de recherche des solutions de l'algorithme génétique. L'évaluation de la fonction objectif est assurée par des poids adaptés à chaque génération reflétant l'importance de chaque objectif : le délai du projet et le coût. Le mécanisme de sélection s'appuie sur une sélection par roulette et une sélection par rang. Les variables de décision représente les activités du projet, la solution traduit une séquence acceptable des activités réduisant les coûts et délais du projet. Le codage utilisé est un codage en nombres entiers. Les auteurs utilise un algorithme spécifique basé sur une approche Pareto.

6.3 Algorithmes génétiques dans le domaine de l'eau

Plusieurs travaux ont été menés en utilisant les algorithmes génétiques pour des problèmes d'optimisation dans le domaine de l'alimentation en eau potable (AEP). Ces travaux portent essentiellement sur le dimensionnement des installations et organes du réseau, ainsi que sur la gestion de la maintenance et la réhabilitation des réseaux AEP.

6.3.1 Les algorithmes génétiques et le dimensionnement des réseaux AEP

Le dimensionnement des conduites des réseaux d'alimentation en eau potable se traduit par la détermination des caractéristiques hydrauliques des conduites : diamètre et rugosité. D'autres application portent sur le dimensionnement des pompes de manière à réduire les coûts liés à l'énergie. (Dandy & al, 1996) présentent une approche d'optimisation pour la conception des réseaux AEP, basée sur les algorithmes génétiques. Ils présentent une application sur le problème du Tunnel de New York⁵. Le travail présenté propose des amélioration aux utilisations antérieurs d'algorithmes génétiques en apportant des modifications sur la définition des variables de décision, les opérateurs de mutation et le codage en Gray. L'approche proposée cherche à partir d'une topologie donnée du réseau et une demande de base connue, de proposer une combinaison adéquate des dimensions de conduites afin de minimiser les coûts de conception du réseau. Les contraintes considérées sont d'assurer la continuité du flux, le respect des consignes hydrauliques en terme de pression, respect de certaines dimensions pour des conduites spécifiques.

⁵ Problème connu dans le dimensionnement des réseau repris dans plusieurs travaux sur le dimensionnement des réseaux.

Le codage utilisé est un codage en Gray, chaque diamètre de conduite est codé sur un gène de 4 bits. L'exemple cité est un réseau de 21 conduites, le chromosome représentant tout le réseau sera de dimension 84 bits. La fonction objectif traduit le coût de conception, de maintenance et comprend une pénalité tenant compte de la violation de la contrainte de pression qui exprime la performance hydraulique des solutions testées. (Savic & Walters, 1997) présentent le développement d'un modèle GANET basé sur l'utilisation d'un algorithme génétique. Le modèle présenté permet d'assurer une conception dite optimale du réseau AEP. Le modèle considère un objectif économique qui exprime le coût d'acquisition de la conduite, ce coût est fonction du diamètre et de la longueur de la conduite. Des objectifs techniques sont considérés : la satisfaction de la demande aux nœuds de consommation et assurer une pression minimum de service. Les auteurs utilisent un algorithme génétique simple, la variable de décision représente le diamètre de conduite à utiliser, le codage utilisé permet de représenter sous forme de chromosome les dimensions de diamètre à appliquer pour chaque conduite. Chaque gène représente une conduite, le diamètre est codé sur 3 bits. (Abebe, 1998) propose une approche de dimensionnement des réseaux, permettant de déterminer les diamètres des conduites pour une structure donnée du réseau, avec des contraintes portant sur la pression de service et la demande au niveau des nœuds de consommation. L'auteur utilise un modèle permettant de coupler un outil d'optimisation GLOBE® et un simulateur hydraulique Epanet®. L'approche se base sur l'utilisation d'un algorithme génétique simple et d'une fonction objectif traduisant les coûts d'acquisition des conduites et des pénalités liées à la contrainte sur la pression de service. Le modèle a été appliqué au problème de dimensionnement du réseau de Hanoi³. (Lippai & al, 1999) proposent une approche d'optimisation pour la conception des réseaux AEP, utilisant les algorithmes génétiques à travers un logiciel d'optimisation commercial Evolver® combiné à un simulateur hydraulique EPANET®. Les auteurs comparent l'utilisation des méthodes d'optimisation classiques aux algorithmes génétiques. Le modèle est appliqué sur le problème de dimensionnement du tunnel de New York. (Devi & al, 2004) présentent un algorithme génétique basé sur une approche multiobjectif pour le dimensionnement des réseaux AEP. Les objectifs considérés sont la minimisation du coût de conception et l'accroissement de la fiabilité du réseau. Le travail présente un ensemble d'indices mesurant la fiabilité et la performance du réseau en se basant sur des calculs hydrauliques : variation de la pression, débit et énergie disponibles dans le réseau et fiabilité de la structure du réseau en particulier au niveau des nœuds (prise en compte des changements de diamètre). L'approche se base sur la définition d'un ensemble de solutions non dominées au sens de Pareto. Les auteurs traitent de deux phénomènes de défaillances : la défaillance mécanique due à la structure même des conduites qui se traduit par des casses ou des

ruptures, et la défaillance dite hydraulique qui se manifeste par une variation de pression ou débit. Le modèle permet de maximiser les coûts de conception et maximiser la fiabilité du réseau à travers un indice de fiabilité du réseau sous contrainte hydraulique. Le modèle est combiné à un simulateur hydraulique Epanet2®. L'auteur reprend des indices de fiabilité présentés par (Todini, 2000). Le modèle a été appliqué au problème de dimensionnement du réseau de Hanoi en utilisant l'algorithme NSGA.

6.3.2 Les algorithmes génétiques et le renouvellement des réseaux AEP

(Halhal & al.,1997) discutent de l'importance des travaux de maintien en service des réseaux AEP à travers des travaux de réhabilitation ou de remplacement de conduite. Le choix de la meilleure alternative assurant une amélioration du réseau tout en respectant une contrainte budgétaire ne peut être obtenu par les approches d'optimisation classique, ils adoptent une approche multiobjectif utilisant le concept d'optimalité au sens de Pareto qui cherche à trouver un compromis entre un ensemble d'objectifs : technique à travers la définition de fonctions bénéfiques et un objectif purement économique à travers une fonction coût. Les auteurs proposent un outil d'aide à la décision basée sur l'utilisation d'algorithme génétique : Structured Messy Genetic Algorithm(SMGA) qui permet de coder sous forme de chromosome la conduite et l'alternative à adopter sur un même gène, l'algorithme génétique est combiné à un simulateur hydraulique adapté de Epanet ®. L'approche proposée concerne exclusivement les conduites AEP. En fonction des ressources disponibles, les auteurs proposent d'améliorer la performance du réseau par : l'augmentation de la capacité hydraulique du réseau en effectuant des travaux de nettoyage, réhabilitation, remplacement ou maillage. Augmenter l'intégrité du réseau en réparant les défaillances sur les conduites et améliorer la qualité de l'eau en nettoyant ou réhabilitant les canalisations .

Les auteurs proposent deux fonctions objectif . Une fonction objectif bénéfique obtenue par la pondération d'un bénéfice hydraulique exprimant la déficience de pression avant et après la prise de décision sur les conduites, un bénéfice physique qui reflète la diminution des coûts de réparation futurs, bénéfice de flexibilité traduit l'existence ou non d'un maillage, par l'identification des connexions entre conduites traduite par la somme des diamètres, le bénéfice lié à la qualité est traduit par la somme totale(en linéaire) des conduites réhabilitées. Une fonction objectif qui traduit le coût des travaux de réhabilitation considérant l'accroissement du nombre de défaillances supposé linéaire. Nous présentons une synthèse bibliographique dans le Tableau 11.

Tableau 11. Algorithme génétique et réseaux d'eau potable

Auteurs	Type d'utilisation	Nature de l'algorithme	Objectifs	Codage des individus	Gène	Longueur gène	Longueur chromosome	Variables de décision	Application
(Dandy et al,1996)	Modèle pour la conception de réseau AEP	Algorithme génétique simple	Minimiser coût de conception, maintenance et coût opérationnel	Gray	Diamètre à adopter	4	4 x Nbre de conduites constituant le réseau	Diamètre de la conduite	New York (Etats-Unis)
(Savic & Walters, 1997)	Modèle GANET pour le dimensionnement des réseaux AEP	Algorithme génétique	Minimiser les coûts de conception, assurer une pression minimale de service et la demande au niveau des nœuds de consommation	Binaire	Conduite à mettre en place	3	3 x nombre de conduites composant le réseau	Désigne le diamètre à considérer pour une conduite donnée	
(Lippai & al,1999)	Modèle pour le dimensionnement des réseaux AEP	Algorithme génétique simple à travers un logiciel d'optimisation Evolver	Minimisation des coûts de conception satisfaction de la contrainte sur la pression minimale	Non défini	Non défini		Non défini	Non défini	New York (Etats-Unis)
(Devi et al,2004)	Modèle pour le dimensionnement des réseaux AEP	Algorithme génétique avec approche multi-objectifs NSGA	Minimisation du coût de conception et augmentation de la fiabilité et la performance du réseau sur la base d'indices	Réel	Diamètre de conduite	1	Nombre de conduites à considérer	Désigne le diamètre à considérer pour une conduite donnée	Réseau Hanoi (Vietnam)

(Dandy & Engelhardt, 2001) présentent un modèle d'optimisation basé sur les algorithmes génétiques, permettant de réduire les coûts du capital et de maintenance futurs du réseau AEP dans le but de planifier les travaux de réhabilitation du réseau. Les auteurs préconisent de bien connaître le système étudié, par une définition précise de ses composantes et paramètres ainsi que son évolution future. Pour les auteurs, toute stratégie de réhabilitation est tributaire de trois critères : économique, fiabilité et qualité de l'eau . Les auteurs se focalisent sur le premier aspect. Selon eux, le coût peut être scindé en 4 composantes : le coût du capital qui prend l'acquisition de la conduite et sa pose, le coût de maintenance qui comprend les coûts de réparation et de maintien en service, les coûts des dégâts et de perte d'eau et les coûts opérationnels liés à l'énergie et au fonctionnement du réseau AEP. Les auteurs considèrent deux approches, une approche qui considère un pas de temps d'un an, pour cette approche le codage est traduit par un chromosome dont les gènes représentent les variables de décision correspondant aux travaux sur le réseau, les auteurs utilisent deux codes « 0 » pour ne rien faire et « 1 » pour remplacer. Pour l'autre approche, elle consiste à considérer une planification des travaux sur 5 ans. Dans ce cas le codage se fait à l'aide d'un gène constitué de deux bits, l'un pour désigner l'alternative de réhabilitation et l'autre pour désigner l'année de l'intervention sur la conduite. Les auteurs considèrent les coûts de maintien en service futurs à travers l'estimation des casses futures à l'aide d'une régression linéaire. Les auteurs intègrent une autre alternative pour la planification sur 5 ans correspondant à un remplacement avec changement de diamètre (renforcement) dans ce cas les auteurs utilisent Epanet® pour vérifier la viabilité technique des solutions testées.

(Cheung & al, 2003) proposent une approche d'optimisation multiobjectif basée sur l'utilisation d'un algorithme génétique élitiste SPEA, permettant de générer un ensemble de solutions non-dominées au sens de Pareto. Les auteurs discutent de la problématique de réhabilitation du réseau AEP et des particularités du problème en terme de défaillance, satisfaction de la demande et déficience de débit et pression. Pour les auteurs 5 objectifs doivent être pris en compte dans le problème de réhabilitation des Réseaux AEP : la capacité hydraulique, l'intégrité physique, la flexibilité, la qualité de l'eau et l'aspect économique. Le modèle cherche à minimiser les coûts de réhabilitation, de remplacement et de maximiser le bénéfice hydraulique qui se traduit par la différence des niveaux de pression avant et après intervention sur le réseau. nous présentons une synthèse bibliographique dans la Tableau 12.

Tableau 12. Application des algorithmes génétiques et de l'optimisation multiobjectif pour la renouvellement des réseaux AEP

Auteurs	Type d'utilisation	Nature de l'algorithme	Objectifs	Codage des individus	gène	Longueur gène	Longueur chromosome	Variables de décision	Application	Epanet
Halhal & al,1997)	Modèle d'optimisation pour la réhabilitation des réseaux AEP	Algorithme génétique s'inspirant de NPGA	Maximiser : bénéfice hydraulique, bénéfice lié aux coûts de maintenance futurs, la longueur des conduites réhabilitées ou remplacées Minimiser les coûts de réhabilitation	Entiers	Identifiant du tronçons et variable de décision	2	2*Nbre de conduites	Alternative de réhabilitation à considérer	Marrakech (Maroc)	Oui
(Dandy & Engelhardt, 2001)	Modèle pour la réhabilitation des réseau AEP	algorithmes génétique simple	Minimiser les coûts de remplacement et de maintien en service, satisfaction de contraintes hydrauliques, pression et débit au nœuds	Binaire Et entier	Alternative à adopter + Année de mise en oeuvre	1 ou 2	Taille du gène* Nbre de conduite constituant le réseau	Diamètre de la conduite	Adélaïde(Australie)	Oui
(Devi & al, 2004)	Modèle pour le dimensionnement Des réseau AEP	Non Sorting Genetic Algorithm (NSGA)	Minimiser les coût de conception et maximiser la fiabilité du réseau, définition d'un indice de fiabilité, respect des contraintes hydraulique, approche multiobjectif	Entier	Diamètre des conduites	1	Taille du gène* Nbre de conduite constituant le réseau	Diamètre de la conduite	Hanoi(Vietnam)	oui

7. Conclusion

Vu la nature de la problématique de renouvellement des réseaux AEP où coexistent deux objectifs incommensurables liés à la performance du réseau et aux coûts des travaux de renouvellement, il convient de proposer une approche appropriée à ce type de problème. Après une revue des méthodes de résolution proposées dans la littérature, nous remarquons qu'il est difficile de trouver un compromis entre plusieurs objectifs pouvant être contradictoires. L'utilisation de méthodes exactes basées sur le calcul de gradient ou de pondération des objectifs présentent des limites. Ainsi nous nous sommes intéressés à des approches non exactes, plus particulièrement les algorithmes génétiques. L'avantage de ces algorithmes c'est qu'ils sont faciles à implémenter et offrent la possibilité d'adopter une approche multiobjectif utilisant le principe de dominance au sens de Pareto. La notion d'optimalité pour les problèmes multiobjectif est remplacée par la notion de dominance qui traduit un compromis entre les objectifs considérés. L'application des algorithmes génétiques dans le cadre d'une optimisation multiobjectif pour les problèmes présentés dans ce chapitre laisse apparaître des similitudes. Nous distinguons l'étape de formulation du problème qui tend à définir les objectifs du problème et la prise en compte des variables de décision par la définition d'un codage approprié, vient ensuite l'étape de résolution où un choix de méthode de résolution est effectué. La résolution propose non plus une solution mais un ensemble de solutions non-dominées. Le choix d'une solution est un choix à posteriori qui dépend de l'appréciation du décideur en fonction de l'évaluation des solutions non-dominées. Plusieurs approches d'optimisation multiobjectif sont présentées en identifiant les avantages et limites de chaque méthodes. Il apparaît qu'une amélioration de la performance de ces approches a été apporté par l'introduction de l'élitisme. Nous choisissons dans le cadre de la thèse d'utiliser un algorithme adoptant une approche multiobjectif élitiste. Les approches NSGA II et SPEA II apparaissent comme les plus performantes. L'approche SPEA a été utilisée par (Cheung et al., 2003) pour la résolution de problématique de réhabilitation des réseaux d'eau potable, les autres applications identifiées dans la littérature (Halhal et al., 1997), (Devi et al., 2004) s'appuient sur des algorithmes génétiques non-élitistes. Les approches développées dans ce chapitre ne renseignent pas précisément sur la manière de sélectionner les conduites sur lesquelles s'effectuera le renouvellement. Nous proposons donc d'utiliser une méthode d'optimisation qui s'inspire de l'approche NSGA II qui à notre connaissance n'a pas encore été utilisée pour la problématique de renouvellement des réseaux AEP.

Présentation du modèle d'aide à la décision

Nous identifions dans ce chapitre les données qui alimentent le processus de décision, en suite nous décrivons l'approche élaborée dans le cadre de la thèse pour le renouvellement des réseaux d'eau potable. Elle s'articule sur l'identification des conduites candidates au renouvellement, la définition des objectifs à optimiser et l'utilisation d'une méthode d'optimisation multiobjectif basée sur : un algorithme génétique et un algorithme de simulation hydraulique Epanet2. Enfin, nous formalisons l'approche pour le renouvellement en proposant un modèle d'aide à la décision qui décrit le flux d'informations, de données et de résultats entre l'ensemble des étapes du processus de prise de décision.

Sommaire

1. Introduction	139
2. Les hypothèses	139
3. Identification des données	141
4. Sélection des conduites candidates	145
5. Formulation du problème	149
6. Approche d'optimisation multiobjectif	153
7. Programmation pluriannuelle	162
8. Le modèle d'aide à la décision	166
9. Conclusion	168

1. Introduction

Nous proposons une approche pour le renouvellement des réseaux AEP qui s'inspire de la gestion du patrimoine appliquée à la gestion du réseau AEP. L'intérêt est que l'approche pour le renouvellement des réseaux d'eau potable s'intègre dans la politique de gestion du réseau et du service d'eau. L'approche que nous proposons permet l'intégration des critères économiques et techniques de la gestion du réseau dans son ensemble, traités dans le Chapitre 1. Nous exploitons également l'analyse des méthodes d'optimisation multiobjectif effectuée dans le chapitre 4 pour l'identification d'une méthode de résolution appropriée. L'intérêt par la suite est que l'approche pour le renouvellement des réseaux d'eau potable s'intègre dans une politique de gestion du réseau et du service d'eau dans son ensemble.

Toute prise de décision dépend d'un contexte particulier, d'hypothèses et d'un ensemble de données. Nous identifions dans un premier temps les variables et données sur lesquelles se basera la décision, ensuite nous décrivons le processus de décision en définissant les étapes principales du modèle d'aide à la décision. L'approche pour le renouvellement que nous proposons s'articule sur les étapes suivantes :

- identification des données nécessaires à la prise de décision
- sélection des conduites candidates pour le renouvellement en se basant sur l'analyse du fonctionnement hydraulique du réseau, la détérioration structurelle et hydraulique des conduites.
- formulation mathématique du problème par la définition des objectifs, l'identification des variables de décision et les contraintes
- choix d'un algorithme d'optimisation multiobjectif
- identification des travaux de renouvellement à effectuer
- programmation des travaux de renouvellement sur un horizon de planification donné.

2. Les hypothèses

Nous définissons un ensemble d'hypothèses qui conditionnent la formulation du problème de renouvellement et les résultats obtenus par la suite. Ces hypothèses concernent les restrictions et simplifications effectuées lors du passage de la réalité à la modélisation :

1. La première hypothèse concerne la validité des données disponibles au niveau du service d'eau. Nous supposons que la collecte et le stockage de ces données s'est effectué de manière à traduire fidèlement les caractéristiques des conduites du réseau.
2. Nous supposons que la modélisation hydraulique du réseau traduit de manière significative le fonctionnement réel du réseau. Nous supposons que les caractéristiques du réseau particulièrement : la rugosité, le diamètre et la consommation des abonnés restent valables tout au long de l'horizon de planification Ω qui ne peut dépasser 5 ans ($\Omega \leq 5$). Ce qui correspond à la pratique en matière de planification dans les services d'eau.
3. L'évaluation de la fiabilité hydraulique des conduites tient compte d'une seule rupture possible à la fois. Nous supposons que la probabilité de survenue de plus de deux défaillances simultanées sur le réseau est très faible.
4. Nous supposons que la survenue des défaillances est décrite par une fonction densité de probabilité suivant une loi de *Weibull*. Ce qui justifie l'utilisation du modèle *PHM* pour la description de la détérioration structurelle des conduites.
5. Nous définissons comme niveau de description des conduites du réseau la rue qui correspond au niveau de réalisation des travaux en pratique.
6. Nous supposons que chaque conduite candidate au renouvellement peut subir une seule défaillance tout au long de l'horizon de planification. Plusieurs conduites peuvent subir des défaillances dans la même année mais pas au même instant. La modélisation ne tient pas compte de la détérioration de la qualité de l'eau.
7. L'estimation des coûts ne tient pas compte de l'actualisation ou de l'inflation. Les coûts sont exprimés en monnaie constante correspondant à une année référence qui est l'année de début de planification.
8. Les coûts sociaux et ceux liées aux externalités sont traduits par une pénalité dans l'estimation du coût de réparation des conduites.
9. Nous supposons que les alternatives de renouvellement doivent être connues en début de planification, aucune modification des alternatives au cours de la planification n'est considérée.

3. Identification des données

Il s'agit dans cette partie d'effectuer une analyse économique et technique selon l'approche de gestion du patrimoine décrite dans le (Chapitre 1). L'identification des données porte sur l'utilisation des données collectées au niveau du service d'eau. Nous distinguons les données relatives à la conduite et à son environnement, des données concernant les coûts des travaux de réparation, remplacement et renforcement.

3.1 Données portant sur la conduite et le réseau

Ces données concernent la conduite et son environnement. Nous considérons : la date de pose, la localisation de la conduite, le matériau la constituant, la longueur, le diamètre, la nature du sol, l'occupation du sol, la date de début d'observation et la date de fin d'observation de la conduite¹, le niveau de trafic, le nombre de défaillances subies. Ces données sont collectées et stockées dans des bases de données formant le Système d'Information du service d'eau. Elles servent à décrire la détérioration structurelle de la conduite et présentent un inventaire de l'ensemble des conduites constituant le réseau.

Nous distinguons aussi des données liées au fonctionnement hydraulique du réseau. Elles traduisent des spécifications techniques du fonctionnement du réseau. Ces données concernent les conduites et les autres organes hydrauliques constituant le réseau. Nous devons définir un niveau de détail adéquat pour décrire son fonctionnement. Cela en trouvant un compromis entre une description précise du réseau en fonction de ces composants hydrauliques et l'agglomération de conduites homogènes entre elles pour décrire le fonctionnement du réseau. Il s'agit de donner une définition de la conduite permettant de décrire à la fois la détérioration structurelle et hydraulique du réseau. A partir des données sur les conduites, nous identifions les conduites qui présentent des caractéristiques similaires à savoir : la localisation, la date de pose, le type de matériau la constituant, le diamètre. La définition des conduites utilisées dans le cadre de la thèse tient compte de la rue et des caractéristiques susmentionnées. Cette définition correspond bien à la pratique. Les travaux de renouvellement s'effectuent généralement sur l'ensemble des conduites d'une rue. Certaines conduites ne seront pas prises en compte principalement, les conduites de faibles diamètres et se trouvant en antenne.

¹ . Ces dates correspondent à une fenêtre d'observation pendant laquelle l'on enregistre les défaillances survenues.

3.2 Données liées au coût des travaux

L'estimation des coûts des travaux sur le réseau dépend du service d'eau et des méthodes de calculs utilisées. Nous proposons d'utiliser la procédure de calcul élaborée dans le cadre de l'inventaire AEP du Bas-rhin (67) (Janel et al., 2001). Cette procédure prend en compte la réglementation en vigueur en référence au Cahier des Clauses Techniques Générales (CCTG) et les règles habituelles de maîtrise d'œuvre dans le département du Bas-Rhin. Elle permet d'estimer le coût de mise en service d'une conduite neuve. Nous utilisons cette procédure pour l'estimation des coûts de remplacement et renforcement. Les coûts de réparation sont plus difficile à estimer car dépendent de la nature de la défaillance subie et matériels requis. Nous proposons de calculer un coût moyen de réparation par défaillance, en utilisant les coûts de réparation disponibles au service d'eau. Nous proposons également de considérer des pénalités M_j dans l'estimation des coûts de réparation. Elles permettent de traduire l'impact de la survenue de défaillances d'une conduite donnée sur son environnement. L'impact est mesuré en fonction des désagréments induisant une baisse d'activité, des déviations, l'interruption du service. L'autre impact concerne les dégâts possibles en cas de défaillances : inondation, affaissement de la chaussée. Ces impacts sont mesurés de manière économique et correspondent à des coûts sociaux.

Le coût de renouvellement ($Coût_R$) d'une conduite concerne le remplacement à l'identique et le renforcement. La procédure de calcul est similaire, la différence réside dans les dimensions des conduites qui font varier les coûts de fourniture de la conduite et les coûts de terrassement. Le coût de renouvellement ($Coût_R$) d'une conduite ou la valeur à neuf d'une conduite se compose des coûts de terrassement ($Coût_{terr}$), du coût de fourniture et de pose de la conduite ($Coût_{conduite}$). Il est défini dans l'équation suivante :

$$Coût_R = Coeff_{mo} \cdot Coeff_{com} (Coût_{terr} + Coût_{conduite}) \quad (5.1)$$

Deux coefficients sont pris en compte, le coefficient ($Coeff_{mo}$) pour tenir compte des coûts de maîtrise d'œuvre et un coefficient multiplicateur ($Coeff_{com}$) afin de tenir compte de spécificités locales en matière de prix.

Le coût de fourniture de la conduite dépend de : la longueur L , du prix unitaire $P_{unitaire}$ de la conduite qui est fonction du diamètre de la conduite et du matériaux constituant la conduite et un coefficient ($Coeff_{accessoires}$) pour tenir compte des accessoires hydrauliques la composant et le remplacement des branchements existants exprimé par le coût de branchement ($Coût_{branchement}$) et le nombre de branchement $N_{branchement}$. Le coût de fourniture $Coût_{conduite}$ s'exprime par l'équation (5.2).

$$Coût_{conduite} = (Coeff_{accessoires} \cdot L \cdot P_{unitaire}(\text{diamètre}, \text{matériau}) + Coût_{branchement} \cdot N_{branchement}) \quad (5.2)$$

Les coûts de fourniture des conduites et travaux de terrassement sont regroupés dans un bordereau. Nous utilisons le bordereau des travaux de viabilité pour les réseaux d'Alimentation en Eau Potable et l'assainissement dans le département du Bas-Rhin (DDAF, 2003).

3.2.1 Les coûts liés à la conduite

Ces coûts correspondent au coût de fourniture de la conduite, des accessoires hydrauliques la constituant, du remplacement des branchements permettant de relier les usagers au réseau AEP et les coûts de maîtrise d'œuvre.

$$Coût_{conduite} = Coeff_{mo} \cdot Coeff_{com} (Coeff_{accessoires} \cdot L \cdot P_{unitaire}(diamètre, matériau) + Coût_{branchement} \cdot N_{branchement}) \quad (5.3)$$

3.2.2 Les coûts de terrassement

Les travaux de terrassement comportent les travaux nécessaires à l'excavation de la conduite et la pose de la nouvelle conduite. Le coût de terrassement comprend le coût d'exécution des fouilles, le coût relatif à l'enrobage, le coût de remblai, coût relatif à la fondation et le coût pour la réfection de la chaussée. La Figure 27 illustre une coupe type pour la pose d'une conduite, elle permet de décrire les différents niveaux des travaux de terrassement.

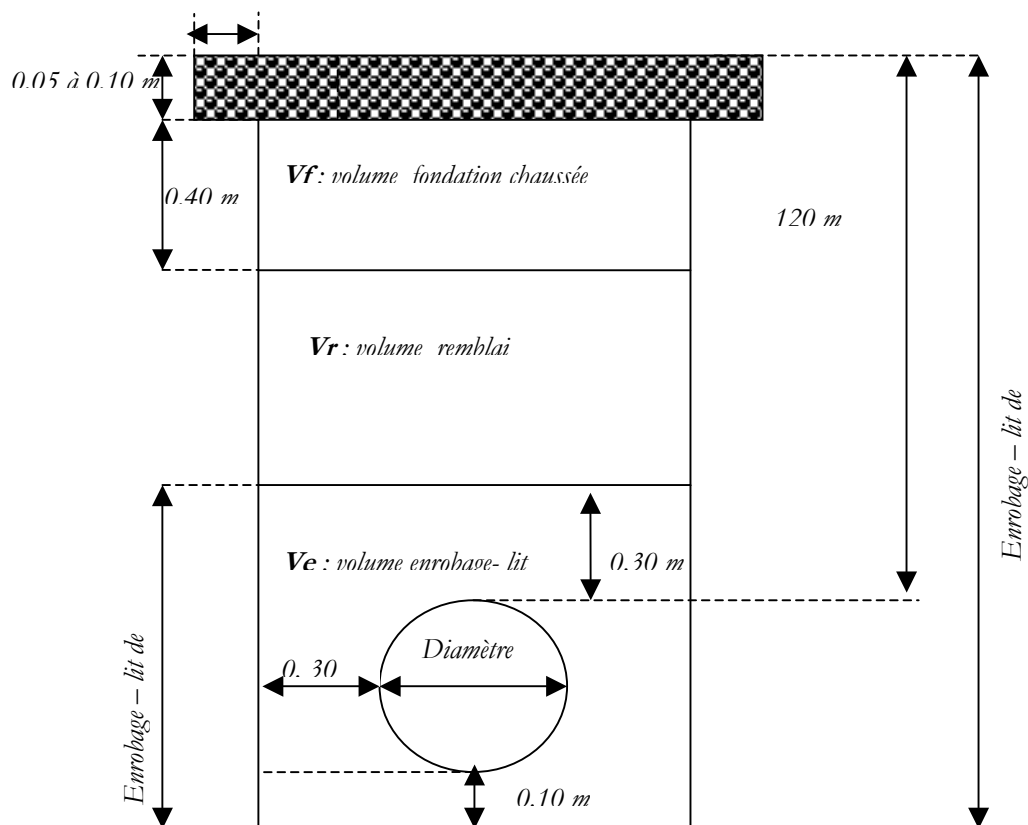


Figure 27. Coupe de fouille retenue pour les travaux de terrassement et pose d'une conduite neuve (Janel et al., 2001)

3.2.2.1 Les coûts liés aux travaux de fouilles

Ces coûts sont reconstitués à partir des données disponibles au service d'eau concernant l'occupation du sol de la conduite, la nature du terrain, la longueur et le diamètre de la conduite. La longueur de la fouille correspond à la longueur de la conduite. La largeur de la fouille ($L_{arg_{Fouille}}$) dépend du diamètre de la conduite en mètres.

$$L_{arg_{Fouille}} = \text{diamètre} + 2.(0.30) \quad (5.4)$$

La profondeur de fouille correspond à la couverture et le diamètre de la conduite en mètres

$$Long_{Fouille} = \text{diamètre} + 1.30 \quad (5.5)$$

Le volume de terrassement de la conduite est calculé à partir de la largeur, la profondeur et la longueur de la fouille.

$$V_T = (\text{diamètre} + 2.(0.30)).(\text{diamètre} + 1.30).Long_{Fouille} \quad (5.6)$$

3.2.2.2 Le coût lié au lit de pose

Ce coût correspond au volume du matériau formant le lit de pose de la conduite et son enrobage. Le calcul tient compte de l'épaisseur de l'enrobage et du diamètre de la conduite.

$$V_e = (0.30 + \text{diamètre} + \text{lit de pose}).(\text{diamètre} + 2.(0.30)).Long_{Fouille} \quad (5.7)$$

3.2.2.3 Le coût lié au remblai

Ce coût correspond au volume du matériau formant le niveau de remblai. Le calcul tient compte de l'épaisseur du niveau de remblai, la longueur et la largeur de la conduite.

$$V_r = (\text{épaisseur} - \text{remblai}).(\text{diamètre} + 2.(0.30)).Long_{Fouille} \quad (5.8)$$

3.2.2.4 Le coût lié à la fondation

Ce coût correspond au volume du matériau formant le niveau de fondation. Le calcul tient compte de l'épaisseur du niveau de fondation, la longueur et la largeur de la conduite.

$$V_f = (\text{épaisseur} - \text{fondation}).(\text{diamètre} + 2.(0.30)).Long_{Fouille} \quad (5.9)$$

3.2.2.5 Le coût lié à la réfection de la chaussée

Ce coût correspond aux travaux de réfection de la chaussée qui tient compte de la longueur de la conduite, la surface de réfection.

$$S_r = (L_{arg_{Fouille}} + 2.(0.30)).Long_{Fouille} \quad (5.10)$$

Nous proposons une base de données *Acces*® pour calculer les coûts de remplacement et de renforcement des conduites.

4. Sélection des conduites candidates

Il s'agit d'identifier les conduites critiques du réseau devant subir des travaux de renouvellement. Les conduites se différencient non seulement par leur dimensions, mais aussi par leur fonction dans le réseau et leur état de détérioration. Le renouvellement ne peut pas concerner l'ensemble du réseau, ce qui est impossible à réaliser. Il concerne des conduites que nous qualifions de prioritaires. Pour répondre au caractère multiobjectif du problème, la mesure de la priorité se base sur l'analyse de la fiabilité hydraulique et structurelle du réseau. Cela permet de hiérarchiser les conduites du réseau afin d'identifier un ensemble de conduites candidates au renouvellement.

4.1 Analyse de la fiabilité hydraulique

La modélisation hydraulique doit traduire efficacement le fonctionnement réel du réseau. Dans le cadre de la thèse, les conduites sont considérées au niveau de la rue en tenant compte de leur homogénéité et la présence d'organe hydraulique. Il est nécessaire d'identifier la relation entre la conduite existante dans la réalité et la conduite équivalente dans le modèle hydraulique qui peut représenter une ou plusieurs conduites concaténées .

L'analyse s'appuie sur le modèle hydraulique qui décrit le fonctionnement du réseau sur une plage horaire donnée. Il est important de décrire le réseau aux plages correspondantes à des périodes de demande de pointe. L'analyse peut révéler des déficiences en pression par rapport à un pression de service minimum précise. Cette déficience traduit une baisse de la capacité hydraulique du réseau et donc une détérioration hydraulique du réseau due au changement de rugosité et de diamètre des conduites .

La détermination des conduites critiques d'un point de vue hydraulique s'appuie sur la détermination de l'indice *ICH* calculé sur la plage horaire présentant une déficience hydraulique importante. Cette plage horaire correspond généralement à la période de pointe pendant le jour de pointe (Voir Chapitre 2). Pour la sélection des conduites candidates, nous définissons un seuil pour la valeur du *ICH* à partir duquel les conduites seront choisies. Le *ICH* traduit le rôle d'une conduite dans l'acheminement de l'eau. Ce rôle est tributaire des dimensions de la conduite, des abonnés desservis et de la localisation de la conduite. Des conduites récemment renouvelées peuvent avoir une valeur de *ICH* supérieure au seuil critique en raison de leur localisation. Nous proposons de rajouter une condition en rapport avec la notion de valeur résiduelle utilisée dans (Janel et al., 2001). Il s'agit de comparer la valeur résiduelle d'une conduite avec le montant amorti de manière linéaire considérant une durée de vie comptable E_c .

La valeur résiduelle $V_{résid}(t)$ d'une conduite correspond à la différence entre la valeur à neuf d'une conduite et la valeur de la dépréciation au cours de sa durée de vie comptable. La valeur de la dépréciation est traduite par la valeur de l'amortissement économique pratiqué. La valeur résiduelle d'une conduite j à la date t , posée à la date de pose t_0 est donnée par:

$$V_{résid}(t) = Coût_{Conduite} - \frac{Coût_{Conduite}(t-t_0)}{E_c} \Rightarrow V_{résid}(t) = Coût_{Conduite} \cdot \left(\frac{E_c - Age(t)}{E_c} \right) \quad (5.11)$$

La valeur de l'amortissement économique est donnée par:

$$V_{amortie}(t) = \frac{Coût_{conduite} \cdot Age(t)}{E_c} \quad (5.12)$$

La conduite est candidate pour le renouvellement si

$$V_{amortie}(t) \geq V_{résid}(t) \Rightarrow \frac{Coût_{conduite} \cdot Age(t)}{E_c} \geq Coût_{conduite} \cdot \left(\frac{E_c - Age(t)}{E_c} \right) \quad (5.13)$$

$$V_{amortie}(t) \geq V_{résid}(t) \Rightarrow \frac{Age(t)}{E_c} \geq \frac{E_c - Age(t)}{E_c} \quad (5.14)$$

$$V_{amortie}(t) \geq V_{résid}(t) \Rightarrow Age(t) \geq E_c - Age(t) \quad (5.15)$$

$$V_{amortie}(t) \geq V_{résid}(t) \Rightarrow 2 \cdot Age(t) \geq E_c \quad (5.16)$$

$$V_{amortie}(t) \geq V_{résid}(t) \Rightarrow Age(t) \geq \frac{E_c}{2} \quad (5.17)$$

Comme nous considérons un horizon de planification Ω en ajustant l'expression (5.18).

$$Age(t) \geq \frac{E_c}{2} - \Omega \quad (5.18)$$

Les conduites seront sélectionnées tel que:

$$\begin{cases} Age(t) \geq \frac{E_c}{2} - \Omega \\ ICH_j(t) \geq Seuil_{ICH} \end{cases} \quad (5.19)$$

4.2 Analyse de la détérioration structurelle

L'analyse de la détérioration structurelle doit permettre d'identifier des conduites dont l'état physique est critique. Nous supposons que des données spécifiques à la conduite (longueur, diamètre, nature du matériau, nature du terrain, occupation du sol, défaillance antérieures, date de pose) sont disponibles au niveau du service de l'eau depuis la date de pose ou sur une fenêtre d'observation $[t_a, t_b]$. Nous traitons ces données pour obtenir la même définition de la conduite utilisée dans la simulation hydraulique. Il s'agit de définir les caractéristiques et les variables d'environnement des conduites concaténées. Nous exploitons dans cette partie les modèles de renouvellement se basant sur la hiérarchisation des conduites (Voir Chapitre 3).

Parmi ces modèles, nous proposons d'utiliser le modèle de risques proportionnels (PHM) en considérant que le temps entre défaillance est décrit par une loi de Weibull. La fonction de risque instantané de base est donc décrite par:

$$h_0(t) = \lambda p (\lambda t)^{p-1} \tag{5.20}$$

Où λ, p sont des paramètres de la loi qui seront estimés par une régression sur données de survie. La fonction de survie $S(t)$ du modèle est définie par :

$$S(t) = \exp(-(\lambda t)^p \exp(\sum_{l=1}^k \beta_l z_l)) \tag{5.21}$$

Où z_l sont les covariables correspondantes aux variables d'environnement des conduites et

$l = \overline{1, k}$, où k est le nombre de variables explicatives. En posant $\sigma = \frac{1}{p}$ et $\lambda = \exp(\frac{-\beta_0}{p})$ où β_0 est

l'ordonnée à l'origine tel que l'expression de la fonction de survie devient:

$$S(t) = \exp(-\exp(\sum_{l=0}^k \beta_l z_l / \sigma) \cdot t^p) \tag{5.22}$$

Les paramètres de loi de survie sont obtenus à l'aide de l'outil CARE-W_PHM². L'estimation de ces paramètres permet de mesurer la signification³ de chaque variable considérée dans pour décrire le processus de détérioration.

Nous exploitons la démarche proposée par (Arnoux, 1998) expliquée dans le (Chapitre 3). La démarche préconise de renouveler une conduite si sa durée de survie est inférieure à une durée critique donnée. Nous proposons de prendre comme durée critique la durée de la période de planification Ω . Il s'agit d'évaluer la durée de vie technique moyenne $\overline{D_{vie}}$ d'une conduite à partir de la valeur moyenne de la fonction de survie $S(\Omega) = 0.5$ et de calculer l'âge qui constitue une covariable dans la fonction de survie. Le calcul de l'âge permet d'évaluer la durée de vie moyenne pour chaque conduite. Nous sélectionnons les conduites dont l'âge est supérieur ou égale à la durée de vie moyenne à la fin de la période de planification. Pour une conduite j , une conduite sera sélectionnée si l'expression (5.23) est vérifiée:

² Cette outil a été développé dans le cadre du projet CARE-W, il permet d'ajuster le modèle PHM et d'estimer les paramètres de la loi de survie par la méthode du maximum de vraisemblance suivant l'algorithme de Newton-Raphson. (Eisenbeis et al, 2002).

³ . La signification est évalué à l'aide de CARE-W_PHM à travers un Test de Wald pour une valeur limite de probabilité égale à 0.05.

$$Age(\Omega) \geq \overline{D_{vic}} \quad (5.23)$$

En cas de disponibilité de données de défaillances et d'absence de données d'environnement de la conduite, nous supposons que la survenue des défaillances se fait selon un processus de *Poisson*. Le temps entre défaillances est décrit par une *loi exponentielle*. Il s'agit dans ce cas d'utiliser le modèle de référence (Shamir & Howard, 1979) présenté dans le Chapitre 3 pour décrire la détérioration structurelle du réseau et identifier les conduites critiques. Une approche est décrite dans (Nafi et al., 2006).

La démarche de sélection des conduites permet de considérer des conduites dont l'état peut être critique d'un point de vue structurel et des conduites qui ne présentent pas de détérioration structurelle mais dont le rôle dans la desserte en eau est important. Les critères de sélection tiennent compte de la fiabilité structurelle et hydraulique des conduites.

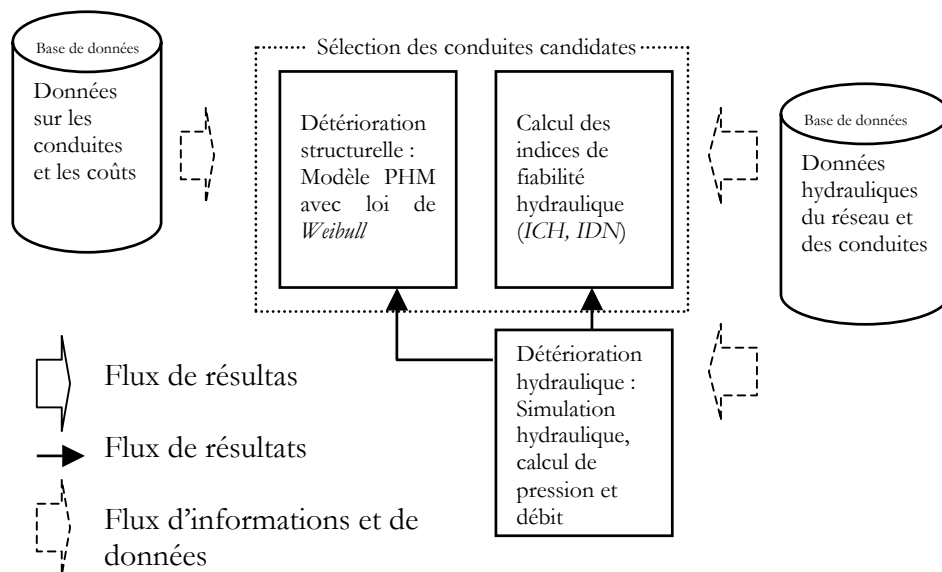


Figure 28. La sélection des conduites candidates au renouvellement

4.3 Prise en compte de l'état de la chaussée et travaux de voirie

Nous proposons de considérer dans le choix des conduites candidates pour le renouvellement les conduites dont l'état de la chaussée, trottoir, jardin est détériorée. La réalisation de travaux de revêtement ou d'embellissement récents peut retarder la réalisation de travaux de renouvellement. En pratique, il est interdit d'ouvrir une chaussée récemment refaite qu'après un délai de 5 ans environ. Pour ces conduites il est nécessaire de vérifier la date de réalisation des travaux (t_{trav}), les conduites seront candidates si :

$$t_{trav} + 5 \leq t_{sim} + \Omega \quad (5.24)$$

Avec $t_{simulation}$ correspond à la date de début de la programmation pluriannuelle du renouvellement.

Nous proposons tenir compte des travaux de voirie dans la programmation pluriannuelle des travaux. Si des travaux de voirie sont programmés pour certaines conduites, nous proposons d'effectuer ces travaux en même temps que les travaux de voirie afin d'éviter de retarder la réalisation des travaux au delà de 5 ans par exemple. La prise en compte des travaux de voirie n'est possible que dans le cas d'une coordination entre le service de l'eau et le service de la voirie. Ceci garanti la disponibilité des données qui concernent l'état des chaussées, les travaux réalisés et les travaux programmés.

5. Formulation du problème

La décision en matière de renouvellement consiste à déterminer les conduites devant faire l'objet de travaux, en identifiant la nature des travaux à réaliser. Cette décision revêt un caractère multiobjectif. Les décisions à prendre à l'échelle de la conduite doivent permettre l'augmentation de la capacité hydraulique du réseau à un coût minimum, en respectant des consignes techniques et l'enveloppe budgétaire disponible.

Les variables de décision pour le problème étudié représentent les alternatives d'interventions sur les conduites. Elles traduisent les travaux devant être effectués afin d'améliorer la fiabilité et la performance hydraulique du réseau AEP. Ces travaux définissent une politique de renouvellement. L'élaboration d'un programme de renouvellement s'effectue en deux étapes. La première permet de proposer une politique viable d'un point de vue technique et économique sur l'horizon de planification Ω en identifiant l'ensemble des travaux acceptables à réaliser. La seconde étape permet de programmer les travaux sur l'horizon de planification en déterminant l'année de réalisation des travaux au niveau de chaque conduite considérée.

La détermination d'une politique de renouvellement acceptable sur un horizon Ω et pour un ensemble de conduites candidates au renouvellement s'obtient par la résolution du problème suivant :

$$(MOP) \begin{cases} \text{Maximiser la capacité hydraulique} \\ \text{Minimiser le coût de renouvellement} \end{cases}$$

Sous contraintes

La pression aux nœuds de consommation doit être supérieure à une pression minimale requise et ne pas dépasser une pression maximale donnée.

La formulation du problème permet d'intégrer dans la prise de décision des critères techniques liés au fonctionnement du réseau et des critères économiques liés aux travaux de renouvellement à réaliser. Nous proposons d'utiliser une approche d'optimisation multiobjectif qui permet d'obtenir non pas une solution unique mais un ensemble de solutions. Nous suggérons l'implémentation d'une approche basée sur le principe de dominance au sens de *Pareto* à l'aide d'un algorithme génétique élitiste inspirée de NSGA II (Voir Chapitre 4). La résolution du problème propose un ensemble de politiques de renouvellement acceptables. Une politique est choisie par le gestionnaire du service qui traduit l'ensemble des travaux à effectuer sur Ω années. Cependant la réalisation de cette politique ne peut se faire sur une année, d'où la nécessité d'une procédure de programmation des travaux sur l'horizon de planification qui assure un nivellement du budget qui s'inspire des développements faits dans le Chapitre 1 .

La programmation pluriannuelle dépend d'une politique donnée, qui définit un ensemble de travaux à réaliser sur Ω années. Dans ce cas, les variables de décision traduisant la réalisation ou pas de travaux sur une conduite donnée. Le problème de programmation pluriannuelle est formulé comme suit :

$$(MOP) \begin{cases} \text{Maximiser la pression disponible dans le réseau} \\ \text{Maximiser le coût de renouvellement} \end{cases}$$

s.c

La contrainte porte sur le budget disponible à l'année de programmation des travaux.

Cette formulation du problème de programmation permet d'améliorer le niveau de pression dans le réseau et d'utiliser l'enveloppe budgétaire disponible à l'année t de manière adéquate.

5.1 Les variables de décision

La variable de décision x_j correspond à l'alternative de renouvellement à adopter pour la conduite j . Nous définissons la notion de politique de renouvellement, comme la séquence des décisions à adopter pour chaque conduite du réseau sur un horizon donné. Pour un réseau où p conduites sont candidates au renouvellement, avec $x \in [1, I]$ alternatives de renouvellement, le nombre de combinaisons possibles de politiques est de I^p . La politique $Y_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})$ représente la concaténation des variables de décision x_{ij} pour l'ensemble du réseau à réaliser sur l'horizon de temps Ω . L'évaluation de toutes ces possibilités est laborieuse, principalement pour des réseaux de taille importante.

Nous utilisons un algorithme génétique avec une approche multiobjectif basée sur l'optimum de Pareto pour l'exploration de l'espace de solutions (ensemble de toutes les politiques). A l'aide d'un ensemble de politiques de départ (sous-ensemble de l'espace des solutions). L'algorithme génétique permettra d'explorer un nombre important de solutions, en retenant la meilleure ou les meilleures solutions trouvées. En ce qui nous concerne, le chromosome représentera une politique de renouvellement. Chaque conduite sera représentée par un code, qui traduit l'alternative de renouvellement à mettre en oeuvre.

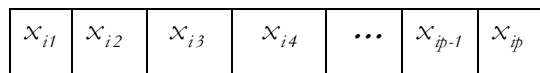


Figure 29. Exemple d'une politique de renouvellement concernant p conduites et I alternatives de renouvellement

La Figure 29 illustre un chromosome qui correspond à une chaîne de caractères compris entre 1 et I (entiers définissant les alternatives de renouvellement) et de longueur p (nombre de conduites candidates). Le Tableau 13 permet d'établir une analogie entre le problème de renouvellement et le vocabulaire qui caractérise un algorithme génétique.

Tableau 13. Adaptation du vocabulaire concernant l'algorithme génétique au renouvellement

Vocabulaire	Définition
Chromosome, individu, solution	Politique de renouvellement sur l'horizon de temps Ω
Longueur du chromosome	Correspond au nombre de conduites candidates au renouvellement
Variable de décision	Correspond à l'alternative de renouvellement à réaliser sur la conduite candidate au renouvellement
Politique de renouvellement	Séquence de travaux à réaliser sur les conduites candidates durant les Ω prochaines années.

5.2 Fonctions objectifs et contraintes

En ce qui concerne le problème étudié, nous définissons deux fonctions objectif. La première traduit la performance hydraulique du réseau par le calcul du surplus de pression disponible dans le réseau (surpression). Cette fonction permet d'améliorer la fiabilité hydraulique du réseau par l'accroissement de la pression dans le réseau se référant à la notion de résilience développée dans le chapitre 2. La fonction objectif technique est donnée par l'équation (5.25), pour une politique $Y_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})$, un réseau de n nœuds et une pression P_l au nœud l .

$$F_{i1}(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}, \Omega) = \frac{\sum_{l=1}^n (P_l - P_{min})}{n} \quad (5.25)$$

La contrainte technique est définie par une pression minimale P_{min} et une pression maximale à assurer sur l'ensemble des nœuds du réseau décrite par P_{max} afin d'éviter une surpression excessive pouvant endommager les conduites tel que : $\forall l \in [1, n], P_{min} \leq P_l \leq P_{max}$.

La seconde fonction objectif évalue le coût des travaux à mettre en oeuvre pour une solution donnée. L'estimation du coût est obtenue par la somme des coûts relatifs à chaque intervention pondérés par l'inverse de l'indice de criticité hydraulique ICH en cas de défaillance, afin de tenir compte de l'importance hydraulique de chaque conduite.

Pour une solution donnée, considérant p conduites dans le processus de décision, l'évaluation de la fonction objectif F_2 pour une politique i est donnée comme suit :

$$F_{i2}(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}, \Omega) = \sum_{j=1}^p \frac{1}{HIC_j} \cdot x_{ij} \cdot C(x_{ij}, \Omega) \quad (5.26)$$

Où $C(x_{ij}, \Omega)$ est le coût de l'alternative x_j sur l'horizon Ω .

La contrainte budgétaire porte exclusivement sur les travaux de remplacement et de renforcement, car considérés comme un investissement et donc imputés à la section investissement dans la comptabilité du service d'eau d'où la condition $x_{ij} \neq 1$.

$$B_i(\Omega) = \sum_{j=1}^p x_{ij} \cdot C(x_{ij}, \Omega) \quad (5.27)$$

L'état de la chaussée peut être pris en compte, en effet si le revêtement est récent la seule alternative possible est de réparer la conduite à l'occurrence d'une défaillance. Tout autre intervention sera retardée dans le temps.

Pour un horizon Ω et pour des variables de décision x_j , avec $j = \overline{1, p}$ décrivant le nombre conduites candidates au renouvellement dans le réseau et deux objectifs F_1 et F_2 , le problème est formulé comme suit:

$$\text{Maximum } F_1(x_1, x_2, \dots, x_p, \Omega) \quad (5.28)$$

$$\text{Minimum } F_2(x_1, x_2, \dots, x_p, \Omega) \quad (5.29)$$

Sous contraintes:

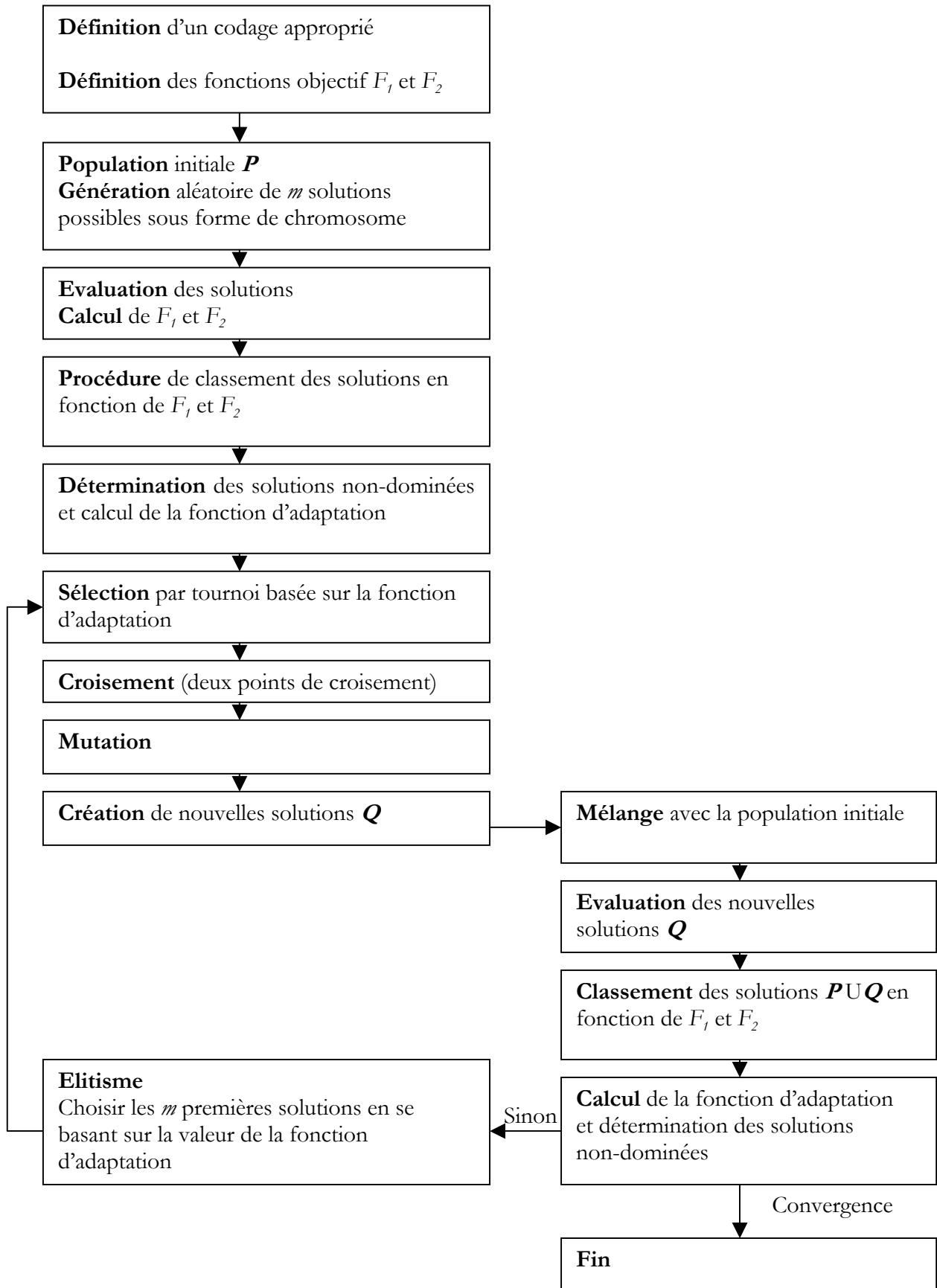
$$P_{\min} \leq P_l \leq P_{\max}$$

6. Approche d'optimisation multiobjectif

La formulation mathématique fait apparaître deux objectifs incommensurables qui évaluent la performance technique du réseau et le coût des travaux pour une politique de renouvellement donnée. Nous proposons pour la résolution de ce problème, l'utilisation d'un algorithme génétique *Politique_Ren* s'inspirant de l'algorithme *NSGA II* (Deb et al., 2000). L'algorithme proposé s'appuie sur une approche multiobjectif élitiste. Nous utilisons des procédures spécifiques que nous avons élaborée pour :

- le calcul des fonctions objectif technique et économique
- le calcul de la fonction d'adaptation et de classement dans la recherche de solutions non-dominées qui correspondent à des politiques de renouvellement acceptables.

L'algorithme de résolution *Politique_Ren* est décrit par la Figure 30

Figure 30. Algorithme d'optimisation multiobjectif *Politique_Ren*

6.1 Définition du codage et génération des solutions

La première étape nécessite la définition des fonctions objectif et du codage à utiliser. Ils permettent de traduire les variables de décision décrivant les travaux à entreprendre sur les conduites du réseau. Nous considérons un codage en nombre entiers facile à implémenter nécessitant des longueur de chromosome moins importante que pour un codage binaire par exemple. Il existe plusieurs alternatives de renouvellement, la pratique en France comprend généralement le remplacement à l'identique et le renforcement.

Nous considérons trois alternatives définies à l'aide d'entiers compris entre 1 et 3. Le code 1 correspond à l'alternative *ne rien faire*, qui se traduit par la réparation de la conduite dans le cas de la survenue d'une défaillance. Le code 2 concerne l'alternative *remplacer* qui consiste à remplacer la conduite par une conduite neuve de même diamètre et la dernière alternative *renforcer* est codée par le code 3 qui traduit le renforcement de la conduite par son remplacement avec une conduite de diamètre supérieur. La longueur de la séquence dépend du nombre de conduites considérées dans le processus de décision. La Figure 31 illustre le codage d'une politique de renouvellement en considérant trois alternatives de travaux sur le réseau.

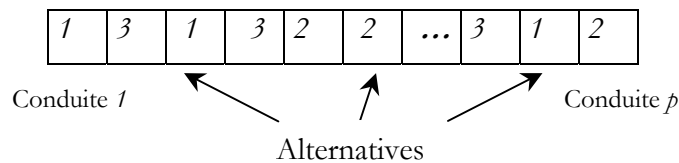


Figure 31 . Exemple d'une politique de renouvellement concernant p conduites et 3 alternatives de renouvellement.

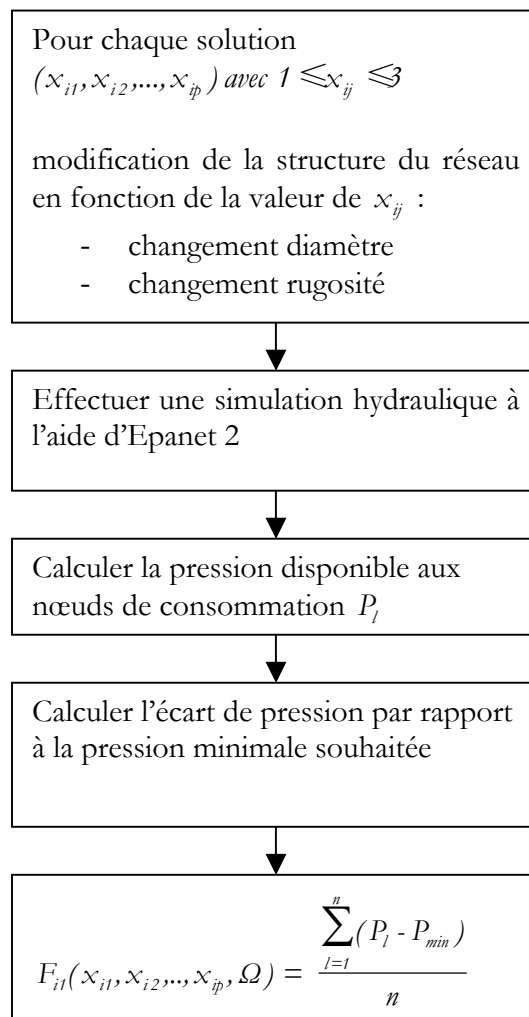
La recherche des solutions s'articule sur une génération aléatoire des solutions. A l'étape initiale, des solutions sont générées de manière aléatoire, formant la population de départ P . Pour p conduites considérées dans le processus de décision, p nombres aléatoires compris entre 1 et 3 sont générés pour chaque solution. La concaténation de ces p nombres forme une solution possible correspondant à une politique de renouvellement. La population initiale est formée par m politiques possibles générées de manière aléatoire. Pour chaque politique, une évaluation des objectifs est effectuée, une fois les solutions évaluées vient l'étape de classement et de calcul de la fonction d'adaptation.

6.2 Evaluation de la fonction objectif technique

L'algorithme génétique permet d'évaluer plusieurs politiques de renouvellement à une génération donnée. L'évaluation de la fonction objectif F_j mesure la surpression disponible dans le réseau pour une configuration du réseau correspondant à la politique évaluée. Pour une politique, les variables des décisions traduisent des spécifications hydrauliques bien définies. Si la valeur de $x_{ij} = 1$ aucune modification ne sera apportée à la conduite considérée en terme de diamètre ou de rugosité. Si la valeur de $x_{ij} = 2$, alors un remplacement de la conduite est à effectuer. Cela se traduit par une modification de la valeur du coefficient de rugosité de la conduite considérée et le diamètre d'une conduite neuve.

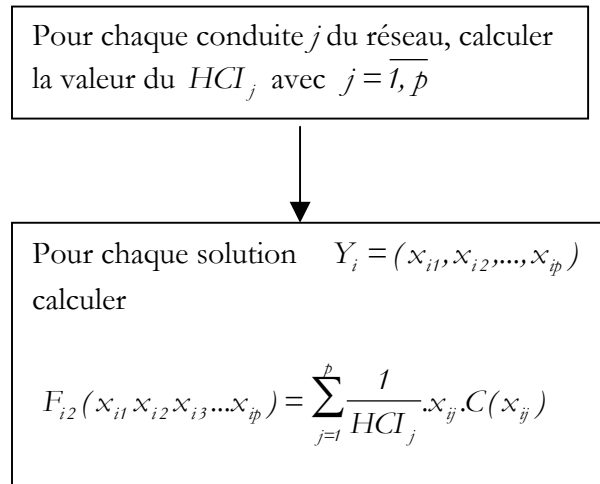
Dans le cas où $x_{ij} = 3$, alors un renforcement est prévu. Ceci nécessite le remplacement de la conduite considérée par une conduite de diamètre supérieur et une modification du coefficient de rugosité. Nous supposons que les caractéristiques hydrauliques du réseau restent les mêmes tout au long de l'horizon de programmation des travaux. Pour chaque politique, les modifications correspondant aux variables de décision sont effectuées. Par la suite une simulation hydraulique en utilisant *Epanet 2* permet de mesurer le niveau de pression aux nœuds de consommation. La valeur de la fonction objectif technique F_j est mesurée sur l'ensemble des nœuds.

La procédure de calcul est décrite dans la Figure 32. L'implémentation mathématique est assurée à l'aide d'une macro développée en VBA et faisant appel à la boîte à outil Entoolkit d'Epanet développée par l'EPA.

Figure 32. Procédure de calcul de la fonction objectif technique F_1

6.3 Evaluation de la fonction objectif économique

La fonction objectif F_2 exprime le coût total d'une politique donnée qui est évalué par la somme pondérée des coûts d'intervention au niveau de chaque conduite par l'inverse de l'indice de fiabilité hydraulique traduisant l'importance de la conduite dans le fonctionnement hydraulique du réseau. Nous disposons d'une estimation des coûts pour chaque alternative d'intervention sur le réseau. Pour le réseau considéré, nous calculons la valeur du *ICH* pour l'ensemble des conduites, puis pour chaque politique générée nous calculons le coût total. Nous supposons que chaque conduite candidate au renouvellement peut subir au plus une défaillance au cours de l'horizon de programmation. L'estimation des coûts d'intervention sur le réseau sont détaillés dans le § (3.2) page 142.

Figure 33. Procédure de calcul de la fonction objectif économique F_2

6.4 Détermination du rang et calcul de la fonction d'adaptation

L'algorithme permet de classer les solutions générées aléatoirement selon les deux fonctions objectifs du problème. La performance de chaque solution Y_i , est évaluée par les fonctions objectif $F_{1i}(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})$ et $F_{2i}(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})$ avec $1 \leq x_{ij} \leq 3$ qui traduit le codage utilisé et la nature des interventions sur le réseau. A chaque génération, $i = \overline{1, m}$ qui représente le nombre de solutions générées aléatoirement à chaque étape du processus d'optimisation et $j = \overline{1, p}$ traduit le nombre de conduites prises en compte dans le processus de décision.

La procédure mise en place vise à déterminer les solutions non-dominées pour un problème bi-objectifs sous contraintes. Les contraintes considérées sont la pression minimale devant être assurée à chaque nœud de consommation P_{min} et la contrainte sur la pression à chaque nœud qui ne doit pas dépasser P_{max} . Toutes les solutions qui violent les contraintes de pression seront de rang inférieur aux solutions qui la respectent. La procédure de classement considère pour chaque solution un couple de valeurs (F_{1i}, F_{2i}) sur lequel s'effectuera le classement des solutions à chaque génération. Le Tableau 14 permet de décrire à une génération donnée, la description de la population de solutions et l'évaluation des fonctions objectifs.

Tableau 14. Description de la population à chaque génération

Identifiant des solutions	Solutions proposées	Fonction objectif technique	Fonction objectif économique
Y_1	$x_{11} x_{12} x_{13} \dots x_{1p}$	F_{11}	F_{21}
Y_2	$x_{21} x_{22} x_{23} \dots x_{2p}$	F_{12}	F_{22}
Y_3	$x_{31} x_{32} x_{33} \dots x_{3p}$	F_{13}	F_{23}
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
Y_m	$x_{m1} x_{m2} x_{m3} \dots x_{mp}$	F_{1m}	F_{2m}

La procédure de détermination de rang sera répétée jusqu'à ce que toutes les solutions soient classées. A la première itération toutes les solutions sont considérées, par la suite seules les solutions non classées seront prises en compte. La procédure de détermination de rang s'appuie sur une procédure de marquage de toutes les solutions dominées. Les solutions non dominées à chaque itération seront celles non marquées.

Algorithme. 2. Calcul de rang et de la fonction d'adaptation

<p>D : ensemble des solutions dominées T : solution non classées m : nombre de solutions à classer r : rang Y_i (rang) : rang de la solution i Y_i(Fitness) : Fitness de la solution i</p> <p>$D = \emptyset$ $r \leftarrow 1$</p> <p>tant que $T \neq \emptyset$ pour $i = 1, \dots, m$ pour $k = 1, \dots, m$ faire si $(F_{1i} \leq F_{1k} \wedge F_{2i} > F_{2k}) \vee (F_{1i} < F_{1k} \wedge F_{2i} \geq F_{2k})$ alors $D \leftarrow Y_i$ (Y_i est dominée) fin si fin pour si $Y_i \notin D$ alors $r \leftarrow Y_i$ (rang) $\frac{1}{(m+1-r)} \leftarrow Y_i$ (Fitness) fin si fin pour $r \leftarrow r+1$ fin tant que</p>

L'algorithme décrit ci-dessus permet de calculer le rang et la fonction d'adaptation à une génération donnée pour chaque solution en se basant sur la valeur des fonctions objectif F_1 et F_2 . Pour une solution Y_i de rang r , la fonction d'adaptation ou Fitness est calculée par:

$$Y_i(\text{Fitness}) = \frac{1}{(m+1-r)} \quad (5.30)$$

6.5 Création de nouvelles solutions

Cette étape a pour but la création de nouvelles solutions formant un ensemble Q . Ces solutions sont obtenues à l'aide de la procédure de sélection et les opérateurs génétiques : le croisement et la mutation.

6.5.1 La procédure de sélection

L'algorithme que nous proposons utilise une procédure de sélection basée sur la sélection par tournoi. Il s'agit d'effectuer un tournoi de m paires de politiques acceptables. Pour chaque paire, la solution dont la fonction d'adaptation la plus élevée est sélectionnée.

6.5.2 Le croisement et la mutation

Nous utilisons une procédure de croisement simple avec deux points de croisement caractérisée par une probabilité P_c . La longueur l du chromosome est donnée par le nombre de conduites candidates au renouvellement p . Deux nombres aléatoires compris entre 1 et p sont générés, correspondant aux positions de croisement de deux politiques *Parents* choisie par la procédure de sélection. Le croisement de ces deux politiques permet de générer deux nouvelles politiques, représentant des solutions potentielles.

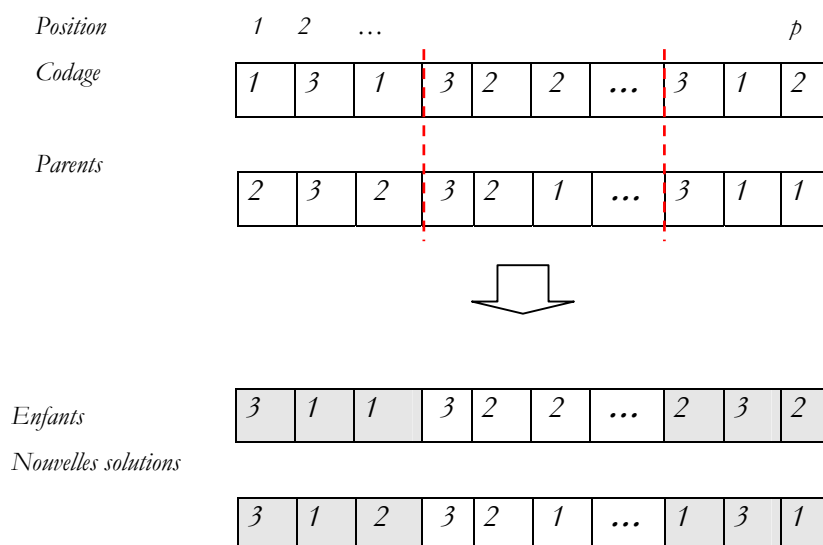


Figure 34. L'opération de croisement

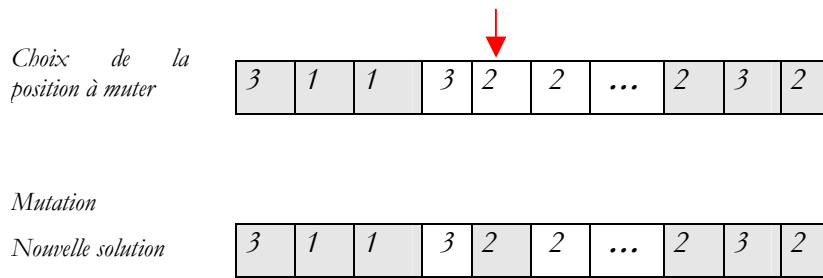


Figure 35. L'opération de mutation

La procédure de mutation caractérisée par une probabilité P_m concerne un seul bit sur l'ensemble du chromosome. Le bit peut rester inchangé ou prendre l'une des deux autres valeurs possibles du codage utilisé.

6.6 Mélange avec la solution initiale

Il s'agit de mélanger les solutions générées aléatoirement formant l'ensemble \mathbf{P} avec les solutions obtenues par la procédure de croisement et de mutation. Les nouvelles solutions sont évaluées à l'aide des fonctions objectifs F_1 et F_2 . Nous calculons par la suite la fonction d'adaptation des $2m$ solutions formant $\mathbf{P} \cup \mathbf{Q}$ à l'aide de l'Algorithme 1. Les solutions seront classées par rapport à la fonction d'adaptation. Les m premières solutions non-dominées qui constituent la population de départ pour la prochaine génération.

6.7 Convergence de l'algorithme

La sélection des solutions non-dominées d'une génération à l'autre assure la présence de solutions acceptables au cours du processus d'exploration de l'espace des solutions. La convergence de l'algorithme dépend du nombre de générations (gen) à effectuer défini comme paramètre initial de l'algorithme d'optimisation. La robustesse des solutions obtenues dépend de la taille de la population initiale (m), des probabilités de croisement et mutation. Nous préconisons de considérer une probabilité de mutation P_m comme proposé dans (Simpson et al., 1994) qui satisfait la condition : $\frac{1}{l} \leq P_m \leq \frac{1}{m}$. Pour la détermination de la taille de la population, de la probabilité de croisement P_c . Nous préconisons d'effectuer un ensemble de simulations avec différents paramètres. Les solutions non-dominées de chaque simulation sont ensuite comparées à l'aide la métrique \mathbf{C} définie dans (Zitzler et al., 2000). Pour deux ensembles de solutions non-dominées de simulations S_1 et S_2 la métrique \mathbf{C} est donnée par l'équation (5.31) :

$$C(S_1, S_2) = \frac{|S_2 \in S_2, \exists s_1 \in S_1 : s_1 \text{ domine } s_2|}{|S_2|} \quad (5.31)$$

Pour $C(S_1, S_2) = 1$ alors toutes les solutions de la simulation S_2 sont dominées par les solutions de la simulation S_1 . Si au contraire $C(S_1, S_2) = 0$ alors aucune solution de S_2 n'est dominée par une solution de S_1 . Le choix des paramètres de l'algorithme génétique dépendent de la performance des simulations effectuées en se basant sur la métrique C . Nous devons aussi identifier les similitudes pouvant exister entre les solutions non-dominées proposées dans le but de déterminer les conduites qui sont le plus souvent prises en compte sur les politiques proposées. La décision finale revient au gestionnaire du service d'eau. Dans cette partie nous proposons une démarche de sélection des conduites candidates au renouvellement. Par la suite, nous proposons une approche pour la génération et l'évaluation de politique de renouvellement sur un horizon donné. La Figure 36 illustre ce qui a été présenté jusqu'à maintenant, ce qui permet de construire le modèle d'aide à la décision par étape.

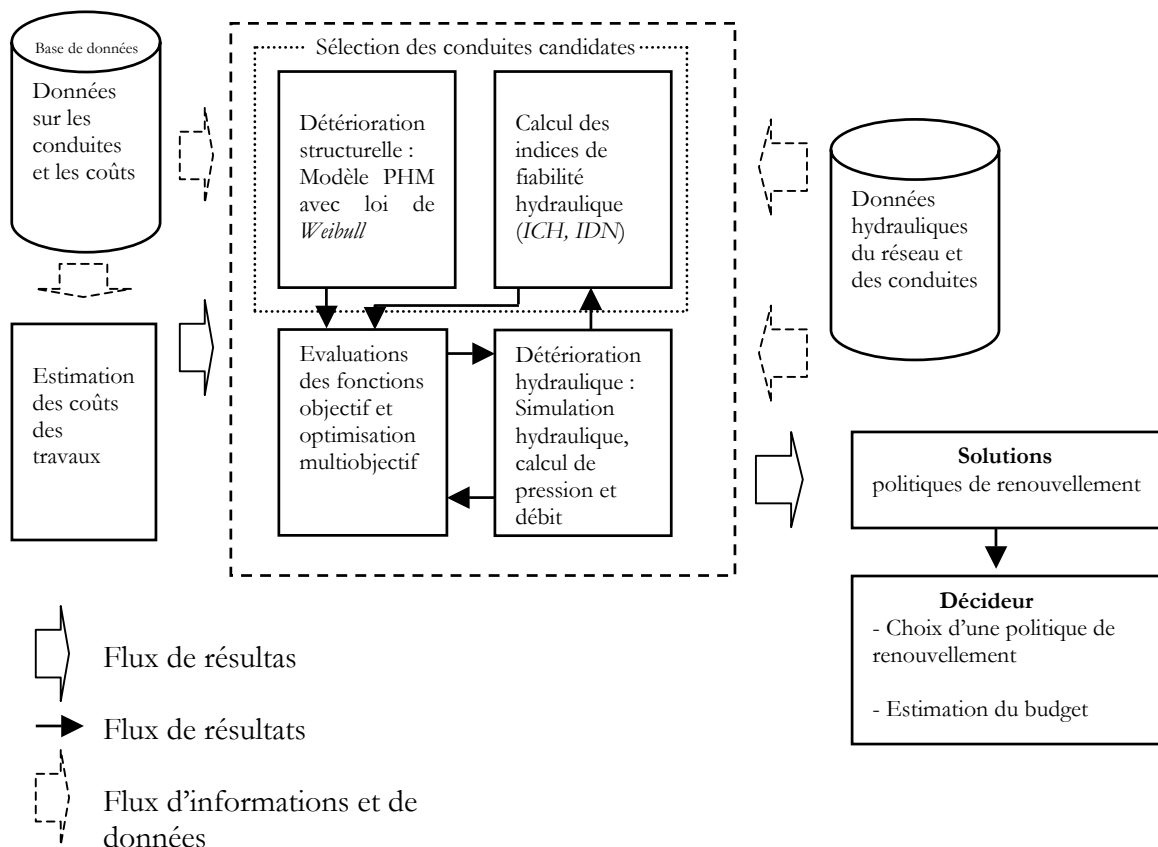


Figure 36. La détermination d'une politique de renouvellement acceptable

7. Programmation pluriannuelle

D'une manière générale l'enveloppe budgétaire disponible ne permet pas d'effectuer l'ensemble des travaux de renouvellement identifiés. La programmation des travaux de renouvellement doit permettre d'effectuer les travaux les plus urgents en premier de manière à accroître la performance du réseau de manière significative dès la première année.

L'approche d'optimisation permet de proposer un ensemble de politiques acceptables. Dans un premier temps il s'agira de choisir une politique acceptable. Chaque politique correspond à un programme de travaux à réaliser sur un horizon de programmation Ω et un budget $B_i(\Omega)$. La programmation pluriannuelle s'appuie sur la définition de l'horizon de programmation des travaux et la détermination de la contrainte budgétaire annuelle. Nous distinguons deux cas de figure, le premier est caractérisé par une enveloppe budgétaire annuelle connue *Budget*, l'horizon de programmation est donc calculé par :

$$\Omega = \frac{B_i(\Omega)}{B(t)} \quad (5.32)$$

Le deuxième est caractérisé par un horizon de programmation connu, en pratique il est souvent égal à 5 ans. Dans ce cas il s'agira de déterminer l'enveloppe budgétaire annuelle. Nous supposons que cette enveloppe soit constante dans le temps.

$$B(t) = \frac{B_i(\Omega)}{\Omega} \quad (5.33)$$

7.1 Programmation des travaux sur le réseau

Cette étape va permettre de proposer une programmation des travaux à effectuer sur le réseau, identifiés dans l'étape précédente. Pour chaque intervention sur le réseau nous devons identifier l'année de réalisation des travaux. Nous définissons la variable de décision y_j qui correspond à la réalisation de l'intervention à l'année t (remplacement ou renforcement). Pour une année t , la variable y_j peut être soit égale à 0 qui correspond au report de l'intervention sur la conduite j , ou égale à 1 qui correspond à la réalisation de l'alternative pour l'année t . La programmation des travaux pour une année t sera donnée par la séquence des variables de décision à une année donnée. Le Tableau 15 définit les variables de décision pour la programmation pluriannuelle .

Tableau 15. Les variables de décision pour la programmation des travaux

Codes	Variable de décision y_j correspondant à la conduite j
1	Effectuer l'intervention à l'année t
0	Reporter l'intervention

Pour les conduites ayant fait l'objet de travaux de renouvellement, le code leur correspondant pour les années suivantes et le code 1. Cela permet de tenir compte des modifications effectués sur le réseau dans les simulations hydrauliques. Pour que ces conduites ne soient pas considérées dans la contraintes budgétaires, les coûts de réparation, remplacement et renforcement sont réduits à 0.

Par analogie au codage utilisé pour les alternatives de réhabilitation des conduites, une programmation des travaux i à une année t sera représentée sous forme de chaîne de variable de décision y_{ij} . Un chromosome traduira une programmation des travaux possible pour une année donnée. La longueur du chromosome dépend du nombre de conduites à considérée.

Tableau 16. Vocabulaire liés à la programmation des travaux et l'algorithme génétique.

Vocabulaire	Définition
Chromosome, individu, solution	Un programme de travaux pour une année donnée
Longueur du chromosome	Correspond au nombre de conduites à considérer à l'année t
Variable de décision	Correspond à la décision de réaliser ou pas l'intervention sur la conduite considérée à l'année t
Programme de travaux	Séquence de décision sur l'ensemble des conduites considérée à l'année t

Nous utilisons un algorithme génétique suivant la même démarche que l'algorithme décrit précédemment (Voir Figure 30). Nous effectuons certaines modifications en ce qui concerne le codage et la représentation des chromosome. Cependant, les solutions représentent des programmes de travaux à réaliser pour une année donnée. Chaque solution sera évaluée à l'aide de deux fonctions objectifs. La fonction objectif F_3 , qui traduit la surpression moyenne disponible dans le réseau pour un programme de travaux à une année t :

$$F_3(y_1, y_2, \dots, y_p, t) = \frac{\sum_{l=1}^n (P - P_{min})}{n} \quad (5.34)$$

La fonction objectif F_4 qui correspond à la somme pondérée des coûts des travaux et l'indice de fiabilité hydraulique:

$$F_4(y_1, y_2, \dots, y_p, t) = \sum_{j=1}^p HCl_j(t) \cdot y_j \cdot C(y_j, t) \quad (5.35)$$

Le modèle d'optimisation est défini comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maximum } F_3(y_1, y_2, \dots, y_p, t) = \text{Suppression moyenne} \\ \text{Maximum } F_4(x_1, x_2, \dots, x_p, t) = \text{Coût maximum} \end{array} \right. \quad (5.36)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maximum } F_4(x_1, x_2, \dots, x_p, t) = \text{Coût maximum} \end{array} \right. \quad (5.37)$$

Sous contraintes :

$$\sum_{j=1}^p x_j \cdot C(y_j, t) \leq B(t) \quad (5.38)$$

Le but est d'utiliser au mieux l'enveloppe budgétaire disponible et d'améliorer la pression aux nœuds de consommation. Nous utilisons un algorithme similaire à l'algorithme génétique utilisé précédemment avec des modifications concernant le codage des variables de décision, les contraintes du problème, les fonctions objectif et la fonction de classement des solutions.

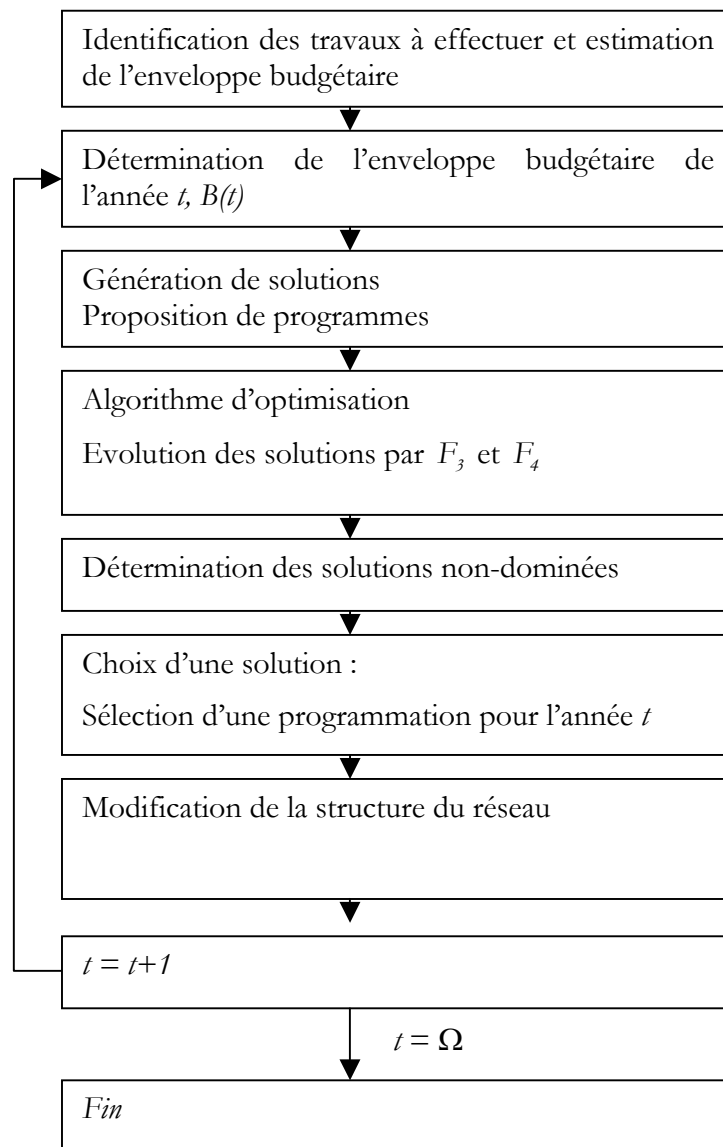


Figure 37. Programmation des travaux de renouvellement sur Ω années

La programmation des travaux peut tenir compte des travaux de voirie. En effet si des travaux de voirie doivent être réalisés à une année donnée sur des secteurs où sont localisées des conduites considérées dans la politique de renouvellement, la date de réalisation des travaux de renouvellement doit correspondre à la date de réalisation des travaux de voirie. L'algorithme d'optimisation utilisé pour la détermination des travaux de renouvellement est adapté pour la programmation des travaux. Pour chaque année l'algorithme permet d'identifier un ensemble de travaux à effectuer, il s'agit de choisir une programmation des travaux permettant d'améliorer sensiblement la performance du réseau tout en respectant la contrainte budgétaire. Une fois le programme des travaux identifié, une modification de la structure du réseau est effectuée permettant de tenir compte des travaux à réaliser pour la programmation des travaux des années ultérieures. La modification du réseau porte sur le changement de diamètres des conduites et la rugosité en fonction des alternatives de renouvellement pour les conduites retenues. Le nombre de variables de décision diminue d'une année à l'autre.

8. Le modèle d'aide à la décision

Le modèle d'aide à la décision que nous proposons décrit l'imbrication et l'enchaînement des étapes définissant l'approche pour le renouvellement présentée dans ce chapitre. Une ou plusieurs étapes sont regroupées dans des modules qui communiquent à travers un flux d'informations, de données et de résultats nécessaires à la prise de décision. Le modèle est alimenté par des données identifiées dans le (§.3, page141) disponibles au service d'eau. Ces données permettent de décrire l'état du réseau et de sélectionner les conduites sur lesquelles il est prioritaire d'intervenir. L'état du réseau est décrit par l'analyse de la détérioration structurelle et hydraulique. La détérioration hydraulique est traduite par la présence de déficience en pression lors de la simulation hydraulique. L'analyse de la détérioration structurelle décrite dans le (§4.2, page146) permet d'identifier les conduites dont l'état physique est critique.

L'étude de la fiabilité hydraulique décrite dans le (§4.1, page145) se traduit par la mesure de l'indice *ICH* qui traduit l'importance de chaque réseau dans la desserte en eau. Une fois la sélection des conduites candidates au renouvellement effectuée, nous définissons les critères à optimiser décrit dans le (§3). Dans notre cas, il s'agit d'accroître la capacité hydraulique du réseau et réduire les coûts de renouvellement. Ces coûts sont calculés à l'aide d'une base Accès *Calcul_coût*. Le principe de calcul est détaillé dans (le §3.2, page142). Vu le caractère multiobjectif du problème, nous proposons une optimisation multiobjectif utilisant un algorithme génétique décrit dans le (§6, page153).

La résolution propose un ensemble de politiques de renouvellement viables d'un point de vue économique et technique. Le modèle offre la possibilité de comparer les solutions afin d'établir d'éventuelles similitudes. La décision finale revient au décideur⁴, qui peut être le gestionnaire du réseau ou une assemblée délibérante dans le cas d'une gestion en régie. L'implication du décideur dans le choix de la solution est décrite dans le Chapitre 4. En ce qui nous concerne, cette participation est à posteriori car le décideur n'intervient pas dans les différentes étapes du calcul. Le choix du décideur porte sur une politique qui lui semble satisfaisante. A partir de cette politique, nous pouvons identifier les besoins en renouvellement sur l'horizon de planification Ω par la détermination des travaux à réaliser et le budget correspondant. Par la suite vient l'étape de programmation pluriannuelle qui est décrite dans le (§7, page162). Voir Figure 38.

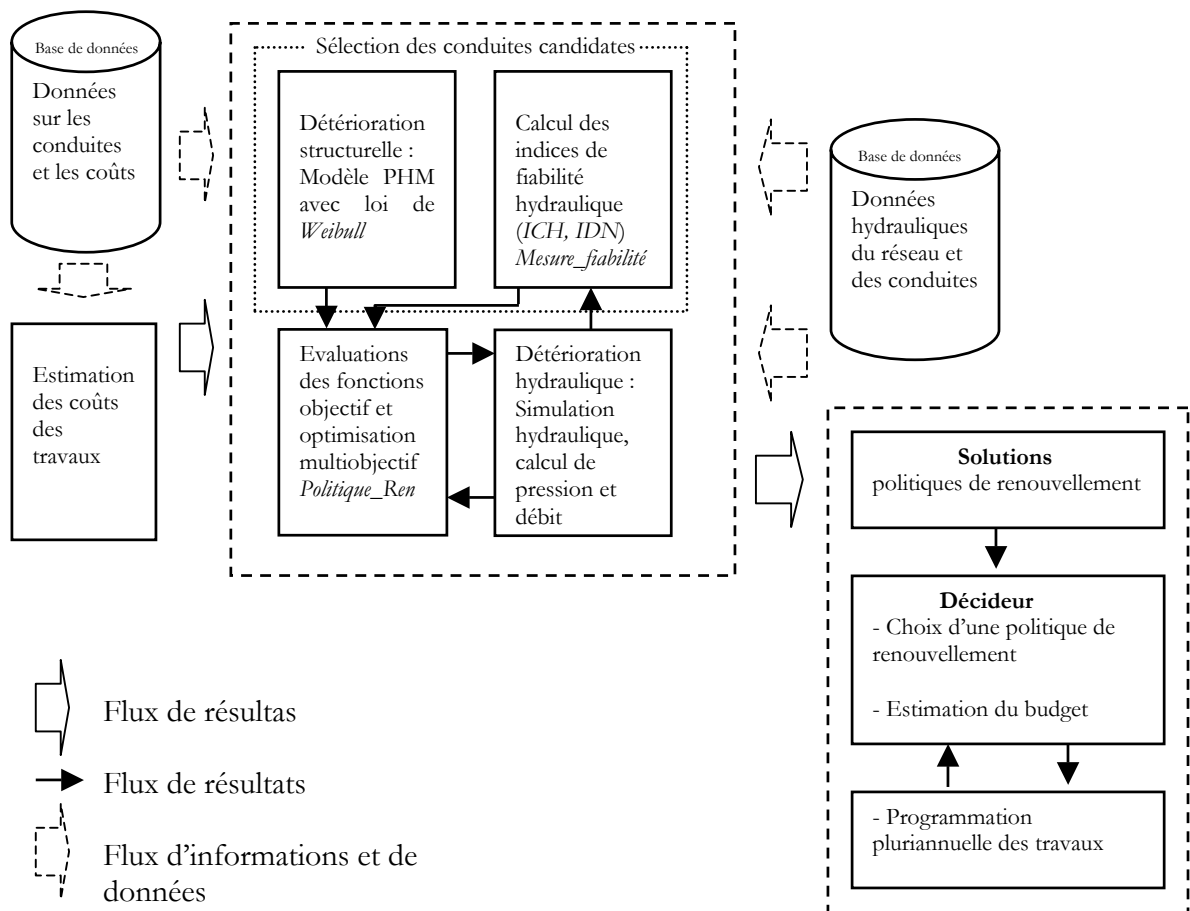


Figure 38. Le modèle d'aide à la décision.

La Figure 38 présente une formalisation du modèle d'aide à la décision. Elle résume les étapes principales que nous proposons dans la mise en place d'une démarche pour le renouvellement des réseaux AEP. Le modèle décrit la liaison entre les différents modules et la nature des flux : données, informations et résultats qui peuvent être intermédiaires ou finaux.

⁴. Le décideur peut être le gestionnaire du réseau ou une assemblée délibérante dans le cas d'une gestion en régie.

Les résultats obtenus par le modèle d'aide à la décision sont tributaires de l'ensemble des données disponibles et des hypothèses émises, présentées dans le (§2, page139). Le modèle permet une amélioration en continue du fonctionnement du réseau et de la fiabilité des conduites, les données et modélisation hydraulique sont jugées valables tout au long de l'horizon de planification, une actualisation de ces données et des mesures sur le terrain doivent être opérées pour enregistrer les modifications survenues sur le réseau au bout de Ω . Le modèle sera de nouveau applicable pour identifier une politique de renouvellement à partir des données et modèle hydraulique actualisés afin de traduire le plus fidèlement possible l'évolution de l'état du réseau.

9. Conclusion

Le modèle d'aide à la décision que nous proposons permet de réaliser un compromis entre les critères techniques liés au fonctionnement du réseau, des critères économiques liés à l'estimation des travaux de renouvellement et la disponibilité de ressources financières suffisantes. La démarche décrite dans ce chapitre préconise une pré-sélection des conduites prioritaires. La priorité dépend de l'état de détérioration structurelle, hydraulique du réseau et le rôle de chaque conduite dans le fonctionnement du réseau.

Vu le caractère multiobjectif du problème et la considération de critères incommensurables nous avons opté pour une approche d'optimisation spécifique qui propose un ensemble de solutions et non une solution unique. L'optimisation multiobjectif propose un ensemble de politiques de renouvellement acceptables, le décideur peut en effet choisir la solution qui convienne le mieux à la capacité du service d'eau à supporter les travaux de renouvellement y correspondants. La participation du décideur est limitée dans le modèle afin d'éviter de biaiser l'analyse multiobjectif qui caractérise la problématique de renouvellement. La présence de modules indépendants et qui communiquent entre eux permet d'adapter le modèle d'aide à la décision en fonction de l'appréciation de l'utilisateur. Le modèle est flexible, l'analyse de la détérioration structurelle et de la fiabilité hydraulique du réseau peuvent utiliser d'autres modèles propres au service d'eau par exemple.

Par rapport aux travaux que nous avons identifié dans la littérature utilisant des algorithmes génétiques, notre modèle présente une démarche claire de sélection des conduites en identifiant des critères précis de sélection. Les conduites sont généralement désignées sans que le choix ne soit justifié. L'autre amélioration significative est la proposition d'une programmation pluriannuelle. L'approche de programmation pluriannuelle que nous proposons est originale.

En effet, les approches identifiées dans la littérature se limitent à proposer une politique de renouvellement, ou un renouvellement périodique identique pour les conduites présentant les mêmes spécifications. L'impact des investissements consentis n'est pas mesuré. L'analyse que nous préconisons et que nous illustrons dans le Chapitre 1 n'est pas effectuée.

Nous identifions pour chaque conduite une date de réalisation des travaux, la nature des travaux à réaliser et le coût annuel des travaux. Le modèle que nous proposons permet d'aider le service d'eau à évaluer un nombre important de politiques de renouvellement, et d'en proposer des politiques viables d'un point de vue économique et technique. Il faut être vigilant au fait que le choix de la solution finale doit tenir compte de l'ensemble des hypothèses, des simplifications effectuées et à la réalité du terrain.

Implémentation du modèle d'aide à la décision

Nous avons décrit dans le chapitre 5 la démarche de programmation du renouvellement que nous avons élaborée.

Nous allons à présent l'appliquer sur un réseau de taille réelle. L'application comporte tout d'abord une présentation du réseau étudié par un diagnostic de son état et de son fonctionnement.

Trois grandes étapes sont décrites. La première concerne la sélection des conduites candidates au renouvellement, la seconde permet de générer des politiques de renouvellement et de les évaluer. La dernière étape permet de proposer une programmation pluriannuelle des travaux de renouvellement sous contrainte budgétaire.

A la fin de ce chapitre, nous analysons la sensibilité de la programmation pluriannuelle à la disponibilité des ressources financières et la séquence de réalisation des travaux.

Sommaire

1. Identification des données	173
2. Sélection des conduites candidates	176
3. Détermination de politiques de renouvellement acceptables	185
4. Programmation pluriannuelle	194
5. Conclusion	210

1. Identification des données

Nous appliquons le modèle d'aide à la décision sur un réseau d'alimentation en eau potable d'un syndicat de communes dans le Bas-Rhin (Région Alsace). Le réseau dessert environ 14 000 habitants correspondant à 5 000 abonnés¹. Le syndicat compte quatre consommateurs importants à savoir: 2 industriels, une piscine municipale et une maison de retraite. Le réseau comprend 120 km (linéaire) de conduites constituées principalement par de la fonte (60 %), du PVC (37%) et du Polyéthylène (3 %). Le rendement moyen du réseau est de $\eta=0.75$. La consommation domestique est d'environ 515 l/abonné/j.

1.1 Identification des données sur la conduite et le réseau

Le service d'eau dispose de données relatives aux conduites et à leur environnement. Les données que nous utilisons dans le cadre de la thèse ont été collectées sur une fenêtre d'observation allant de 1996 à 2004. Ces données comportent :

- l'identification de chaque conduite
- l'identification de la commune où est localisée la conduite
- l'identification de la rue où est localisée la conduite
- la date de pose de la conduite
- la nature du matériau constituant la conduite
- la longueur de la conduite
- le diamètre de la conduite
- la nature du sol entourant la conduite
- une caractérisation du trafic routier : faible, modéré, important
- l'occupation du sol: jardin, route, chemin de fer, trottoir.
- les dates de défaillances pour chaque conduite

Le service d'eau dispose d'un système d'information permettant de regrouper ces données et celles issues des cartes géographiques à l'aide du Système d'Information Géographique (SIG).

Le réseau est constitué de 1657 conduites dont le diamètre varie entre 40 et 315 mm, et de longueur comprise entre 1 et 2000 m.

¹ . Un abonné correspond à un foyer constitué de 3 personnes en moyenne.

Nous disposons de données de défaillances pour les conduites du réseau enregistrées entre 1996 et 2004. Pour les conduites de plus de 60 mm de diamètre, le nombre de conduites ayant subies au moins une défaillance est de 50 conduites. Parmi ces conduites, 38 ont subi au moins 1 défaillance, 9 ont subi au moins deux défaillances et une au moins 3 défaillances.

Nous disposons aussi de données concernant les organes et dispositifs hydrauliques constituant le réseau à savoir : les courbes caractéristiques pour les 3 pompes, les courbes de volume pour les 2 réservoirs ainsi que les courbes de consommation pour les consommateurs domestiques, 2 industriels, la piscine et la maison de retraite. Le réseau est alimenté par 3 sources d'approvisionnement (forages).

Une simulation hydraulique effectuée par le service de l'eau permet de décrire le fonctionnement du réseau. Une concaténation des conduites a été effectuée. Elle regroupe les conduites présentant des caractéristiques similaires : diamètre, date de pose, matériau, même rue. Les conduites dont le diamètre est inférieur à 60 mm (estimé à environ 5 km) ou en antennes ne sont pas prises en compte. Cependant le service d'eau ne disposait pas d'informations permettant de faire le lien entre le modèle hydraulique et les conduites du réseau tel qu'elles existent dans la réalité. Nous avons donc établi une correspondance entre ces conduites et les conduites du modèle hydraulique. Chaque conduite de la simulation hydraulique correspond à une concaténation de plusieurs conduites réelles. Ceci est illustré par le Tableau 17.

Tableau 17. Correspondance entre les conduites inventoriées et celles du modèle hydraulique

<i>Conduite du modèle hydraulique</i>	<i>Conduites inventoriées</i>
<i>Id_conduite I</i>	<i>Id_Conduite 1</i>
	<i>Id_Conduite 2</i>
	.
	<i>Id_Conduite j</i>

A partir des données d'environnement et des caractéristiques des conduites inventoriées, nous identifions les données qui correspondent à chaque conduite du modèle hydraulique à savoir : la longueur équivalente à la concaténation de plusieurs conduites, la rugosité, le diamètre, les variables d'environnement. Le nombre de conduites contenues dans le modèle hydraulique est de 450 conduites et de 320 nœuds. La longueur du réseau obtenu est de 82 km. Le modèle hydraulique représente environ 70% des conduites qui existent réellement. La Figure 39 illustre les conduites du modèle hydraulique.

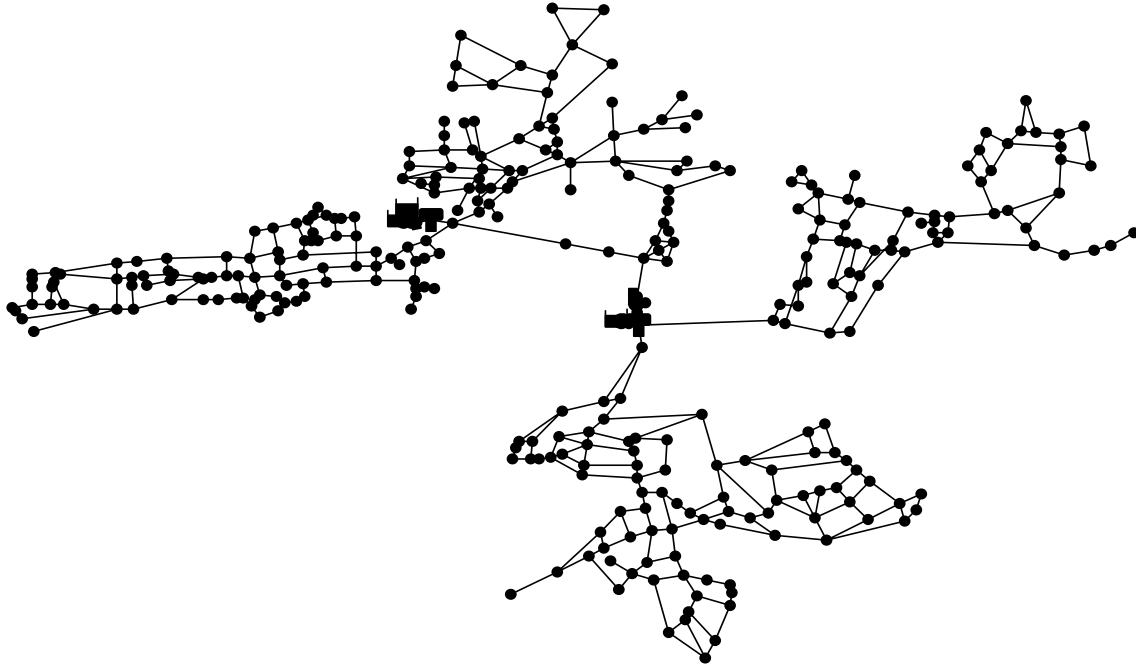


Figure 39. La modélisation hydraulique du réseau étudié

1.2 Identification des données de coûts 3

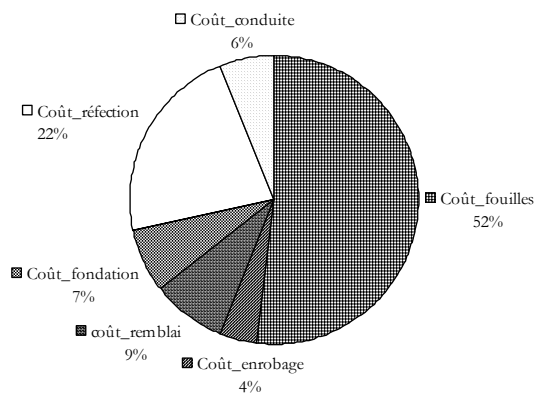
L'estimation des coûts de réparation (C_{rep}) s'appuie sur des données communiquées par le service d'eau regroupant un ensemble de 84 réparations. La moyenne calculée sur les données disponibles est égale à 1456 € avec une écart-type de 354 €. Nous considérons que le coût moyen de réparation d'une défaillance sur une conduite indépendamment de son diamètre et de sa longueur est de 1500 €. Nous supposons que les conduites en Polyéthylène sont renouvelées avec des conduites en PVC et les conduites en fonte grise ou en acier sont renouvelées avec des conduites en fonte ductile. Pour les autres cas, nous supposons que le matériau de la nouvelle conduite reste identique à celui de la conduite à renouveler. Nous identifions une correspondance entre le diamètre de remplacement (d_{rempl}) à l'identique et le diamètre de renforcement (d_{renf}). Le Tableau 18. en donne un exemple.

Tableau 18. Relation entre diamètre de remplacement, diamètre de renforcement et le matériau

d_{rempl} (mm)	d_{renf} (mm)	Matériau
60	80	Fonte
80	100	Fonte
100	125	Fonte
75	90	PVC
90	110	PVC
110	125	PVC

Nous utilisons la méthode de calcul de coûts détaillée dans le (Chapitre 5) pour le calcul du coût de remplacement à l'identique (C_{remf}) et le coût de renforcement (C_{renf}). Le calcul permet d'estimer les coûts relatifs à la fourniture de la conduite, les coûts du niveau de remblai, de fondation et de revêtement. La prise en compte du renforcement se fait par l'augmentation du diamètre de la conduite en se basant sur la correspondance illustrée par le Tableau 18. La répartition des coûts est présentée par la Figure 40.

Répartition de la valeur à neuf d'une conduite en PVC



Répartition de la valeur à neuf d'une conduite en Fonte

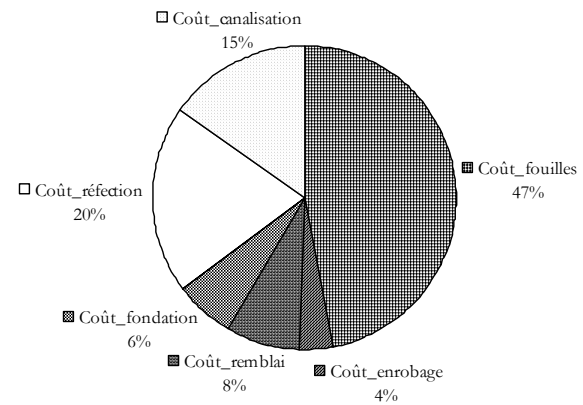


Figure 40. Répartition de la valeur à neuf d'une conduite

Il apparaît de la Figure 40 que le coût de terrassement représente plus de 80 % de la valeur à neuf d'une conduite, le coût de fourniture de la conduite représente 15 % de la valeur pour une conduite en Fonte et 6 % pour une conduite en PVC. En ce qui concerne la comparaison entre les travaux de remplacement à l'identique et le renforcement, le renforcement d'une conduite en Fonte coûte en moyenne 6% plus cher qu'un remplacement ($C_{renf} \geq C_{remf}$) et 3% plus cher pour une conduite en PVC.

2. Sélection des conduites candidates

Nous appliquons dans ce qui suit l'approche utilisée pour la sélection des conduites candidates au renouvellement. La sélection s'appuie sur la démarche détaillée dans le chapitre 5 et qui permet de sélectionner des conduites en fonction de leur importance dans le fonctionnement du réseau et de leur détérioration structurelle.

2.1 Analyse du fonctionnement du réseau

Le modèle hydraulique qui a été développé à l'aide du logiciel Porteau® a pour but l'analyse du fonctionnement et le diagnostic du réseau (Voir Chapitre 2). Un calage du modèle a été effectué à l'aide des données de consommation disponibles au service de l'eau. Des mesures de pression et débit sur le terrain permettent le calibrage du modèle et une estimation des valeurs de diamètres et rugosité des conduites. En raison de la détérioration structurelle et de la présence de dépôts dans les conduites, les diamètres et rugosité ne correspondent plus aux mêmes caractéristiques d'une conduite neuve. Ces paramètres sont alors ajustés à l'aide des mesures effectuées. Le modèle effectue une agglomération des abonnés aux nœuds de consommation. Pour la consommation domestique, le coefficient journalier de pointe $K_1=1.6$ et le coefficient de pointe horaire $K_2=2$. Nous analysons le fonctionnement du réseau en jour de pointe².

Afin d'utiliser les outils développés dans le cadre de la thèse, nous utilisons le logiciel Epanet 2® pour la simulation hydraulique à la place de Porteau®(Cemagerf, 2001). A l'aide de la boîte à outil développée par le Cemagref offrant une passerelle entre différents logiciels de simulation hydraulique et une macro spécifique que nous avons développée en VBA-Excel³, nous effectuons un passage entre Porteau® et Epanet 2®. L'ensemble des spécifications concernant les pompes, les réservoirs, la répartition des abonnés au niveau des nœuds, le fonctionnement de vannes et les courbes de consommation ont été ajustées. Un calibrage du modèle a été effectué grâce aux mesures effectuées sur le terrain à des points précis du réseau.

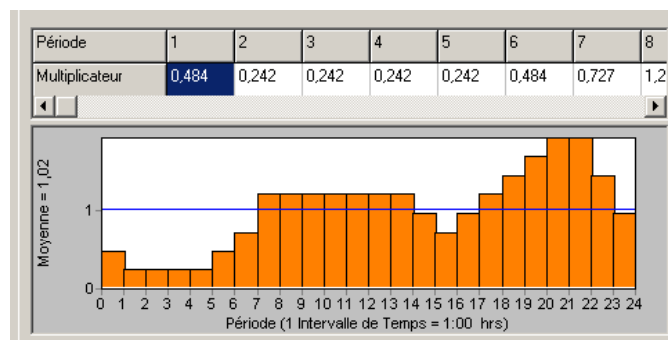


Figure 41. La courbe de consommation domestique au jour de pointe (Epanet2)

². Le jour de pointe considéré est le 23 juin 2003 pour la simulation hydraulique

³. La macro permet de tenir compte des consommateurs définis sur les conduites. Porteau permet une telle définition, alors qu'Epanet2 nécessite la définition des consommateurs au niveau des nœuds seulement.

La période de pointe au jour de pointe est située entre 20h00 et 22h00. La simulation hydraulique au jour de pointe et la période pointe fait apparaître une déficience en pression au niveau de 61 nœuds⁴ où la pression est inférieure à $P_{min} = 20 \text{ m}$. Cette pression correspondant à la pression minimale requise pour un fonctionnement adéquat du réseau. La pression la plus faible constatée est égale à 9.93 m . Le réseau présente une déficience en pression due à la détérioration de la capacité hydraulique du réseau principalement en heure de pointe. Ceci peut s'expliquer par une insuffisance dans le dimensionnement même du réseau à l'origine. Le réseau nécessite donc des travaux de renouvellement afin d'améliorer son fonctionnement.

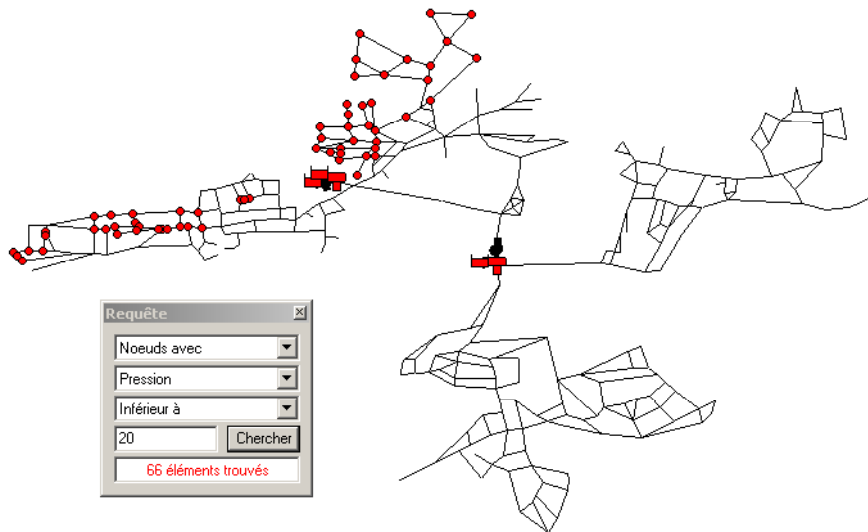


Figure 42. La détérioration de la capacité hydraulique du réseau à la période de pointe (Epanet 2).

2.2 Analyse de la fiabilité hydraulique en cas de défaillance

Nous utilisons la macro *Mesure_fiabilité* développée pour le calcul des indices de fiabilité hydraulique *ICH et IDN* présentée par la Figure 43. Comme nous ne disposons pas de données sur le temps d'indisponibilité des conduites et la mesure de la MTTR⁵ des conduites, nous considérons un temps d'indisponibilité identique pour toutes les conduites égal à 2 heures. Ce temps correspond à la durée de période de pointe. Nous considérons une pression $P_{inf}=10 \text{ m}$ et une pression $P_{sup}=15 \text{ m}$ qui permettent de mesurer la demande au niveau des nœuds de consommation lors de la survenue de défaillance (Voir Chapitre 2). Le calcul⁶ est effectué tout au long de la journée de pointe.

⁴. correspond aux (66 nœuds identifiés – 5 nœuds représentant les réservoirs et pompes)

⁵. Mean Time To Repair

⁶. Le temps de calcul est de 20 minutes.

Afin d'identifier les conduites critiques d'un point de vue hydraulique, nous utilisons la démarche détaillée dans le (Chapitre 5). Nous déterminons un seuil critique pour la valeur du *ICH* et de *IDN*.

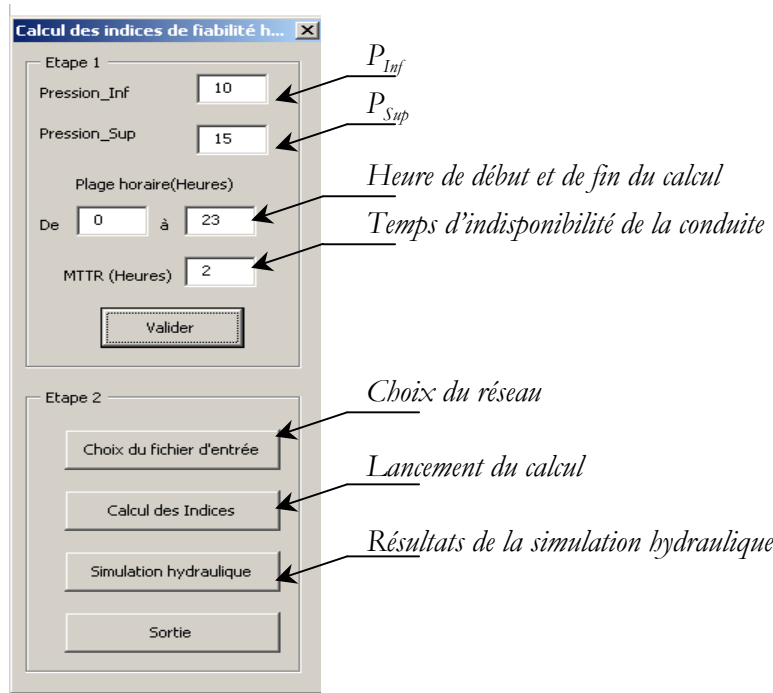


Figure 43. La macro *Mesure_fiabilité* qui calcule les indices de fiabilité hydraulique.

L'indice *ICH* mesure le rapport entre la quantité d'eau desservie dans le réseau et celle devant être desservie. Nous déterminons un seuil de 0.1 à partir duquel la conduite est considérée comme critique. Même si les quantités d'eau non acheminées peuvent être faibles, ce qui se traduit par un $ICH < 0.1$, l'impact de l'indisponibilité d'une conduite peut être mesurée par le nombre de nœuds non desservis et donc par le nombre d'abonnés pour lesquels la desserte en eau est perturbée. L'indice *IDN* mesure cette perturbation. Nous considérons une durée de vie comptable de $\overline{D_c} = 60 \text{ ans}$ (GSP,1999). Les conduites seront sélectionnées sur la base de la valeur de l'indice *ICH* vérifiant la condition (6.1) :

$$\left\{ \begin{array}{l} ICH \geq 0.1 \\ Age_j(t_{sim}) \geq \frac{\overline{D_c}}{2} \Rightarrow Age_j(t_{sim}) \geq 30 \text{ ans} \end{array} \right. \quad (6.1)$$

Avec t_{sim} correspondant à l'année de début de simulation qui la date de début de l'horizon de planification.

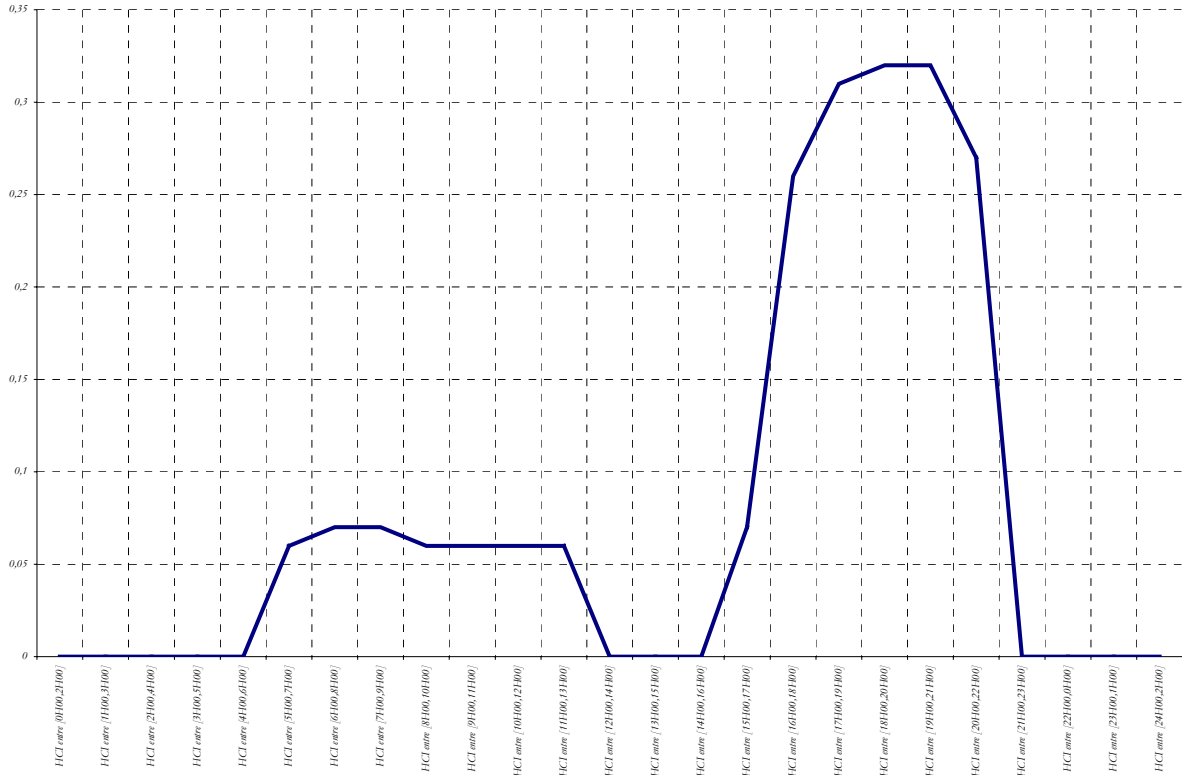


Figure 44. Evolution du ICH sur 24 h pour la conduite 184.

La Figure 44 décrit l'évolution de l'indice *ICH* pour la conduite 184 tout au long de la journée de pointe pour une indisponibilité en cas de défaillance égale à 2 h. L'impact de l'indisponibilité qui simule une défaillance de cette conduite est différent en fonction de l'instant de survenue de la défaillance. La quantité d'eau non acheminée augmente à partir de 16h00. Elle atteint son niveau maximum de 0.32 entre 19h00 et 20h00 qui correspond à la période de pointe et décroît par la suite.

L'indice *IDN* mesure le nombre de nœuds où la pression est inférieure à la pression P_{Inf} à partir de laquelle une desserte en eau est possible. Cet indice permet d'identifier le nombre d'abonnés non desservis dans le cas d'une défaillance ou l'indisponibilité d'une conduite donnée. Pour le réseau considéré, on compte environ 5 000 abonnés et 320 nœuds de consommation ce qui fait une moyenne de 15 abonnés par nœud. Nous considérons un seuil critique pour l'*IDN* égal à 5 nœuds correspondant à 75 abonnés. Les conduites seront sélectionnées sur la base de la valeur de l'indice *ICH* vérifiant la condition (6.2) :

$$\left\{ \begin{array}{l} IDN \geq 5 \\ Age_j(t_{sim}) \geq \frac{D_c}{2} \Rightarrow Age_j(t_{sim}) \geq 30ans \end{array} \right. \quad (6.2)$$

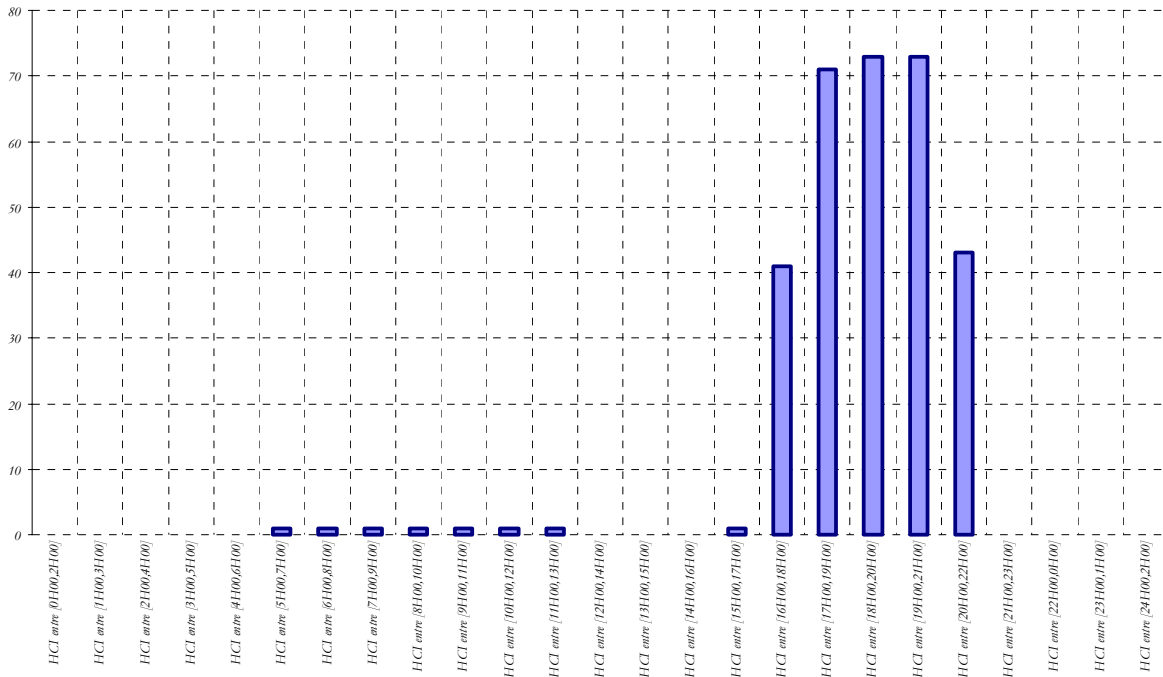


Figure 45. Evolution de l'IDN sur 24 h pour la conduite 184.

La Figure 45 décrit l'évolution du IDN tout au long de la journée de pointe. Le graphique mesure le nombre d'abonnés subissant une perturbation de l'alimentation en eau en cas de l'indisponibilité de la conduite 184. Ce nombre croit à partir de 16h00 pour atteindre son maximum qui est de 73 nœuds, correspondant à environ 1095⁷ abonnés à la période entre 19h00 et 20h00.

L'impact d'une défaillance est plus important à l'heure de pointe ce qui était prévisible. Les résultats obtenus permettent de mesurer l'impact d'une défaillance sur le réseau et détermine les plages horaires critiques dans la journée.

Le nombre de conduites candidates au renouvellement obtenues est égale à 26 dont 11 ont été sélectionnées sur la base du *ICH* et 15 sur la base du *IDN*.

2.3 Détérioration structurelle

Nous appliquons la démarche décrite dans le (Chapitre 5) pour la sélection des conduites critiques en terme de détérioration structurelle. Nous utilisons les données concernant les défaillances et les variables d'environnement des 1657 conduites du réseau pour effectuer le calage de la fonction de survie $S(t)$.

⁷ Correspond au produit du nombre de nœuds et le nombre moyen d'abonnés par nœud de consommation égal à 15.

Les données prises en compte sont : La longueur (L), le diamètre(d), le nombres de défaillances antérieures(PF), l'age (Age) de la conduite à la dernière défaillance observée, la nature du terrain (NT) et le niveau du trafic routier (NR).

Le calage des données s'appuie sur le logiciel *CARE-W_PHM* du Cemagref pour la détermination des paramètres de régression de la fonction de survie qui traduit la non survenue d'une défaillance au cours du temps pour toutes les conduites du réseau⁸. Le paramètre d'échelle de la loi de *Weibull* est donné par : $\sigma = \frac{1}{p}$ avec $\lambda = \exp\left(\frac{\beta_0}{\sigma}\right)$. Nous obtenons $\sigma = 0.932$, $p = 0.932$ et $\lambda = -26.10^{-5}$.

Le Tableau 19 résume les résultats de la régression sur l'échantillon de conduites dont nous disposons. La détérioration structurelle des conduites dépend de quatre variables significatives : la longueur (L), le diamètre(d), le nombre de défaillances passées($PF+1$) et l'age des conduites (Age).

Tableau 19. Résultats de la régression sur durée de survie à l'aide du modèle *PHM*

l	<i>Variables</i>	β_l	<i>Test de Wald</i> ($Prob > \chi_{0.95}$)	<i>Intervalle de confiance</i>
0	<i>Ordonnée à l'origine</i>	7.665	0.0001	[4.290,11.000]
1	$Ln(L)$	-0.669	0.0001	[-0.925,-0.413]
2	$Ln(D)$	0.717	0.0027	[0.292,1.390]
3	$Ln(PF+1)$	1.19	0.0002	[-1.69,-0.533]
4	$Ln(Age)$	1.167	0.0001	[-1.650,-0.526]

Nous avons considéré un seul échantillon de conduites. Nous obtenons une fonction de survie identique pour l'ensemble des conduites. Elle est exprimée par :

$$S(t) = \exp\left[-26.10^{-5} \cdot (PF+1)^{1.19} \cdot L^{0.717} \cdot d^{-0.902} \cdot Age^{1.167} \cdot t^{1.072}\right] \quad (6.3)$$

Nous utilisons la fonction de survie donnée par l'équation (6. 3) pour décrire la détérioration structurelle des 450 conduites de la simulation hydraulique. Nous appliquons la démarche présentée dans le (Chapitre 5) pour calculer la durée de survie critique à partir de laquelle les conduites sont

⁸. Un seul échantillon a été considéré dans le calage des données, le calage tient compte des conduites n'ayant pas eu de défaillance et celles ayant au moins une défaillance. Ainsi une seule fonction de survie est proposée pour l'ensemble des conduites.

candidates au renouvellement. Nous définissons comme durée de survie critique $\Omega=5ans$. La durée de vie moyenne est obtenue pour une valeur médiane de $S(t_{sim}+\Omega)=\frac{1}{2}$.

$$\text{De (6. 3)} \Rightarrow \exp\left[-26.10^{-5} \cdot (PF+1)^{1.19} \cdot L^{0.717} \cdot d^{-0.902} \cdot \overline{D}_{vie}^{1.167} \cdot (t_{sim}+\Omega)^{1.072}\right] = \frac{1}{2}$$

$$(6. 3) \Rightarrow -26.10^{-5} \cdot (PF+1)^{1.19} \cdot L^{0.717} \cdot d^{-0.902} \cdot \overline{D}_{vie}^{1.167} \cdot (t_{sim}+\Omega)^{1.072} = -Ln(2)$$

$$(6. 3) \Rightarrow \overline{D}_{vie}^{1.167} = \frac{-Ln(2)}{-26.10^{-5} \cdot (PF+1)^{1.19} \cdot L^{0.717} \cdot d^{-0.902} \cdot (t_{sim}+\Omega)^{1.072}}$$

$$(6. 3) \Rightarrow \overline{D}_{vie} = \sqrt[1.167]{\frac{Ln(2)}{26.10^{-5} \cdot (PF+1)^{1.19} \cdot L^{0.717} \cdot d^{-0.902} \cdot (t_{sim}+\Omega)^{1.072}}}$$

Nous sélectionnons les conduites dont l'âge $Age(t_{sim}+\Omega)$ à la fin de l'horizon de planification est supérieur ou égal à la durée de vie moyenne tel que :

$$Age(t_{sim}+\Omega) \geq \overline{D}_{vie} \tag{6.4}$$

Parmi les conduites du réseau, 14 conduites satisfont la condition donnée par (6.4).

Résultats

L'application de la démarche de sélection des conduites candidates en se basant sur la détérioration structurelle et hydraulique a permis de sélectionner 40 conduites dont :

- 11 qui ont été sélectionnées en raison de leur rôle dans la desserte en eau, selon la valeur de l'indice *ICH* soit (27.50%)
- 15 ont été sélectionnées en raison du nombre d'abonnés pour lesquels la desserte en eau est perturbée exprimé par la valeur de l'indice *IDN* (37.5 %)
- 14 conduites ont été sélectionnées en raison de leur détérioration structurelle soit (35 %)

Le Tableau 20 présentent les conduites candidates au renouvellement.

Tableau 20. Les conduites candidates au renouvellement.

Identifiant	Conduite j	Coût de réparation	Coût de remplacement	Coût de renforcement	$L(m)$	$d(mm)$	$d_{rem}(mm)$	$d_{renj}(mm)$	Critère
247	ST2-ST1	1500	19410	20662	130	85	100	125	PHM
129	SO14-SO24	1500	33600	34834	245	60	60	80	PHM
166	SO52-SO45	1500	54856	56872	400	50	60	80	ICH
287	D1-D3	1500	32801	36879	180	200	200	250	ICH
315	D4-D25	1500	91115	102441	500	200	200	250	ICH
391	PA80-SO55	1500	71106	74640	500	73	80	100	ICH
80	SC27-SC12	1500	44793	47681	300	85	100	125	ICH
112	SO10-SOU8	1500	14931	15894	100	90	100	125	ICH
133	SO11-SO25	1500	37328	39734	250	85	100	125	ICH
188	SO11-SOU5	1500	20571	21327	150	48	60	80	PHM
78	SC16-SC15	1500	67190	71521	450	85	100	125	PHM
117	SO18-SO20	1500	20903	22251	140	85	100	125	IDN
132	SO20-SO22	1500	60410	63325	380	105	125	150	IDN
141	SO26-SO30	1500	11945	12715	80	90	100	125	IDN
136	SO26-SOU4	1500	22397	23840	150	85	100	125	IDN
143	SO30-SO32	1500	45256	46920	330	60	60	80	IDN
159	SO30-SO45	1500	14221	14928	100	73	80	100	IDN
144	SO33-SO26	1500	29862	31787	200	85	100	125	IDN
273	ST13-ST14	1500	28800	29858	210	60	60	80	PHM
298	D13-D17	1500	16424	17483	110	85	100	125	PHM
313	D22-D21	1500	44793	47681	300	85	100	125	PHM
191	SO36-SO35	1500	19410	20662	130	85	100	125	ICH
318	D31-D57	1500	21650	23046	145	85	100	125	PHM
171	SO45-PA80	1500	24176	25378	170	73	80	100	PHM
383	D75-D74	1500	23314	24171	170	60	60	80	PHM
384	D71-D73	1500	35657	36967	260	60	60	80	PHM
161	SO46-SO47	1500	14931	15894	100	85	100	125	PHM
292	D10-D12	1500	35657	36967	260	60	60	80	PHM
293	D13-D14	1500	47779	50860	320	85	100	125	PHM
173	SO56-SO57	1500	31588	32536	230	90	93,8	125	IDN
177	SO57-SO58	1500	21868	24586	120	190	200	250	IDN
146	SO28-SO39	1500	24997	27335	150	140	150	200	ICH
184	SO61-N301	1500	63781	71708	350	155	200	250	ICH
111	SOU1-SO10	1500	16424	17483	110	90	100	125	PHM
103	SOU1-SOU2	1500	14931	15894	100	85	100	125	ICH
104	SOU2-SOU3	1500	32848	34966	220	85	100	125	ICH
105	SOU3-SO32	1500	8957	9536	60	85	100	125	IDN
106	SOU4-SOU5	1500	10971	11375	80	50	60	80	IDN
123	SOU6-SO11	1500	2986	3179	20	85	100	125	ICH
120	SOU6-SO18	1500	19200	19905	140	48	60	80	IDN

Le Tableau 20 présente les conduites candidates au renouvellement. Nous estimons que le renouvellement des conduites identifiées sur la base de leur importance dans le fonctionnement hydraulique du réseau est susceptible d'améliorer de manière significative la déficience en pression constatée dans l'analyse du fonctionnement du réseau dans le (§ 2.1).

3. Détermination de politiques de renouvellement acceptables

Une fois les conduites candidates au renouvellement identifiées (Voir Tableau 20). Nous utilisons l'algorithme génétique présenté dans le (chapitre 5) pour déterminer un ensemble de politiques de renouvellement viables d'un point de vue technique et économique. La longueur du chromosome servant à tenir compte de la politique de renouvellement aura une longueur $l=40$ qui correspond au nombre de conduites candidates au renouvellement. Nous utilisons des codes⁹ en nombres entiers pour traduire les alternatives de renouvellement tel expliqué dans le (chapitre 5) . Nous considérons le problème d'optimisation comme décrit dans le (chapitre 5). Nous considérons des consignes techniques qui traduisant des contraintes de pression tel que $P_{min}=20 m$ et $P_{max}= 50 m$. L'algorithme génétique *Politique_Ren* est implémenté à l'aide de *VBA-Excel*. Chaque politique est évaluée à l'aide des fonctions objectif techniques et économiques définies dans le Chapitre 5.

La sélection des conduites s'est basée sur un ensemble d'indices qui mesurent à la fois la détérioration structurelle et hydraulique du réseau. Nous allons dans un premier temps évaluer des politiques de renouvellement considérées comme des solutions triviales à notre problème. Nous considérons 8 solutions qui traduisent :

1. *Le remplacement de toutes les conduites sélectionnées*
2. *Le renforcement de toutes les conduites sélectionnées.*
3. *Le remplacement des conduites sélectionnées sur la base de la détérioration structurelle*
4. *Le renforcement des conduites sélectionnées sur la base de la détérioration structurelle.*
5. *Le remplacement des conduites sélectionnées sur la base de l'indice ICH*
6. *Le renforcement des conduites sélectionnées sur la base de l'indice ICH*
7. *Le remplacement des conduites sélectionnées sur la base de l'indice IDN*
8. *Le renforcement des conduites sélectionnées sur la base de l'indice IDN*

Ces solutions ont été évaluées à l'aide d'une macro spécifique *Eval_solution* qui nous permet d'évaluer la fonction objectif technique F_1 et la fonction économique F_2 . Les résultats sont présentés dans le Tableau 21.

⁹ . Les codes utilisés correspondent aux travaux à effectuer sur la conduite. Le code 1 correspond à la réparation de la conduite lors de la survenue de défaillance, le code 2 traduit le remplacement de la conduite pas une conduite identique et le code 3 traduit le remplacement de la conduite par une conduite de diamètre plus grand.

Tableau 21. Evaluations des politiques de renouvellement à l'aide de *Eval_solution*

<i>Politique (i)</i>	F_{1i}	F_{2i}	$B(\Omega)_I$ (€)	P_{min} (m)	P_{max} (m)
1	8,00	53 561 510	1 253 837	17,79	49,11
2	9,71	56 391 793	1 335 717	20,95	48,84
3	6,76	42 663 682	461 645	12,51	49,02
4	7,24	44 764 700	484 964	14,95	49,02
5	7,52	4 892 240	440 861	14,88	48,94
6	9,02	5 102 820	479 833	20,94	48,92
7	6,98	51 090 623	812 976	14,26	49,02
8	7,85	53 710 327	855 884	18,79	49,19

Il apparaît d'après les résultats du Tableau 21 qu'il existe deux solutions 2 et 6 viables d'un point de vue économique et technique. Elles respectent les consignes techniques et proposent des politiques de renouvellement réalisables. La solution 6 traduit le renforcement de toutes les conduites dont le rôle dans l'acheminement de l'eau est important sur la base de l'indice *ICH*. Nous pouvons dire a priori que le coût de renouvellement sera compris entre 479 833 € et 1 335 717 €. Ces coûts correspondent au coût de renouvellement des solutions 2 et 6 respectivement. Le renouvellement des conduites critiques d'un point de vue structurel qui correspond aux solutions 3 et 4 ne permet pas de satisfaire les consignes techniques. Il améliore néanmoins la capacité hydraulique du réseau. La pression la plus faible passe de 9.93 m à 14.95 m. Le renouvellement des conduites sélectionnées en se basant sur le *IDN*, qui correspond aux solutions 7 et 8 ne permet pas de satisfaire les consignes techniques définies, mais permet d'améliorer la capacité hydraulique de 9.93 m à 18.79 m.

Ces résultats montrent bien que la considération de la détérioration structurelle de manière exclusive n'améliore pas nécessairement le fonctionnement hydraulique du réseau. Nous retenons les solutions 2 et 6 que l'on comparera par la suite aux solutions proposées par l'algorithme génétique.

L'utilisation de l'algorithme génétique requiert la détermination de la taille de la population m de départ, le nombre de génération gen et la probabilité de croisement P_c et P_m de mutation. Nous déterminons dans ce qui suit la valeur de la probabilité de croisement P_c . Nous effectuons un ensemble de simulations en considérant une population de départ $m=100$. Nous considérons une probabilité de mutation comprise entre $\frac{1}{m}=0.01$ et $\frac{1}{\gamma}=0.025$ comme préconisé par (Simpson et al.1994), . Nous retenons la valeur $P_m=0.015$.

Tableau 22. Calcul de la métrique **C**

$C(S_{(k)}, S_{(l)})$	$S_{(0.80)}$	$S_{(0.85)}$	$S_{(0.90)}$	$S_{(0.95)}$	$S_{(1)}$
$S_{(0.80)}$		$\frac{5}{12}$	$\frac{4}{12}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{4}{8}$
$S_{(0.85)}$	$\frac{3}{14}$		$\frac{5}{12}$	$\frac{3}{9}$	$\frac{5}{8}$
$S_{(0.90)}$	$\frac{1}{14}$	$\frac{3}{12}$		$\frac{1}{9}$	$\frac{3}{8}$
$S_{(0.95)}$	0	$\frac{1}{12}$	$\frac{5}{12}$		$\frac{3}{8}$
$S_{(1)}$	0	0	$\frac{5}{12}$	0	

La métrique **C** (Zitzler et al., 2000) compare pour deux simulations, les solutions non dominées obtenues. Par exemple la simulation effectuée pour $P_c=0.90$ et $P_c=1$, la métrique $C(S_{(1)}, S_{(0.90)})=\frac{5}{12}$. Ceci signifie que 5 solutions sur les 12 solutions non dominées déterminées pour $P_c=0.90$ dominent au moins une solution non dominée déterminée pour $P_c=1$. Les résultats des simulations sont présentés dans Annexe 3.

A partir des résultats du Tableau 22 nous retenons la probabilité $P_c=0.90$ permettant d'obtenir de meilleurs résultats. Nous devons déterminer la probabilité de mutation, pour ce faire nous effectuons des simulation pour des valeurs de $P_m=0.10$ correspondant à $(1-P_c)$, $P_c=0.05$ et $P_m=0.025$. Nous calculons la métrique C pour ces simulations comme précédemment.

Tableau 23. Comparaison des simulations pour la détermination de la probabilité de mutation P_m

$C(S_{(k)}, S_{(l)})$	$S_{(0.015)}$	$S_{(0.025)}$	$S_{(0.05)}$	$S_{(0.10)}$
$S_{(0.015)}$		$\frac{3}{16}$	$\frac{8}{16}$	$\frac{0}{5}$
$S_{(0.025)}$	$\frac{1}{12}$		$\frac{5}{16}$	$\frac{0}{5}$
$S_{(0.05)}$	$\frac{7}{12}$	$\frac{13}{16}$		$\frac{0}{5}$
$S_{(0.10)}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{14}{16}$	$\frac{16}{16}$	

A partir des résultats contenus dans le Tableau 23, nous choisissons une probabilité de mutation $P_m=0.025$ qui offre de meilleures solutions. Voir les résultats des simulations en Annexe 3.

Nous présentons dans ce qui suit l'implémentation de l'algorithme génétique pour l'identification de politique de renouvellement acceptables sur l'horizon de planification $\Omega=5ans$. Nous considérons la période de pointe pour le calcul des pressions au niveau des nœuds de consommation. Nous définissons les paramètres de l'algorithme comme suit :

- une taille de population $m=250$
- un nombre d'itération $g=200$
- une probabilité de croisement $P_c=0.90$
- une probabilité de mutation $P_m=0.025$

Pour le problème considéré la longueur l du chromosome traduisant la politique de renouvellement est $l=40$. Le nombre de politiques possible est de 3^{40} soit $1,21.10^{19}$ politiques. L'algorithme génétique va permettre d'en évaluer $m.g=5.10^5$ politiques. Nous considérons deux situations. Dans la première, nous considérons que le coût de réparation ne tient pas compte des impacts des défaillances. Les coûts indirectes et les coûts sociaux engendrés par une défaillance. Nous ne disposons pas de données précises concernant ces coûts, nous proposons de pénaliser les conduites vulnérables d'un point de vue structurel afin de tenir compte des ces coûts. Pour chaque conduite j , nous considérons une pénalité M_j . Pour ce qui suit, nous considérons que $M_j=0$ pour l'ensemble des conduites.

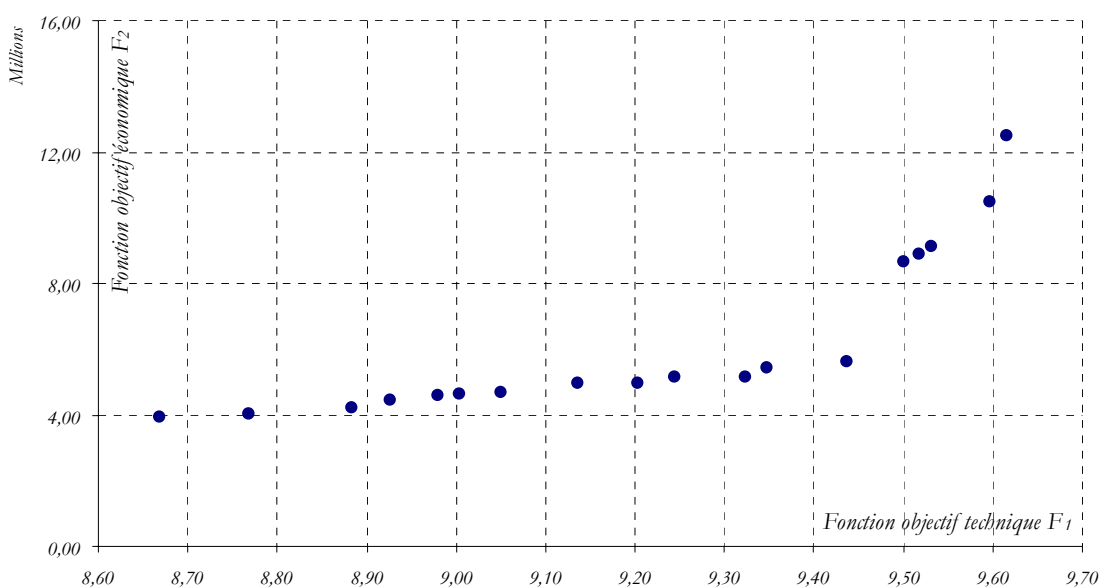


Figure 46. Les solutions non-dominées représentant des politiques de renouvellement acceptables

La simulation est effectuée à l'aide d'un ordinateur *Pentium 4* équipé d'un processeur de 2 GHz. Le temps de calcul est d'environ 5h30. Le Tableau 24 illustre les solutions non dominées proposées par l'algorithme génétique. Ces solutions représentent des politiques viables d'un point de vue technique et économiques. Toutes les solutions respectent les contraintes sur les pressions.

Tableau 24. Les politiques de renouvellement proposées par l'algorithme génétiques

<i>Solution i</i>	F_{1i}	F_{2i}	$Bi(\Omega)$	P_{min}	P_{max}	<i>Renouvellement</i>	<i>Renforcement</i>	<i>Remplacement</i>
1	9,62	12 472 082	789 660	20,94	48,84	25	17	8
2	9,60	10 475 886	780 103	20,94	48,84	26	19	7
3	9,53	9 124 784	708 154	20,94	48,85	23	17	6
4	9,52	8 886 738	685 758	20,94	48,84	22	17	5
5	9,50	8 647 391	673 421	20,94	48,84	21	15	6
6	9,44	5 604 416	530 132	20,94	48,84	16	13	3
7	9,14	4 946 413	434 423	20,94	48,84	13	9	4
8	9,25	5 165 281	436 657	20,94	48,84	14	8	6
9	8,98	4 592 756	361 770	20,94	48,84	12	8	4
10	9,00	4 615 958	390 951	20,94	48,84	13	5	8
11	8,67	3 942 105	248 795	20,04	48,84	9	6	3
12	9,05	4 681 800	375 391	20,94	48,84	13	8	5
13	9,20	4 963 716	424 514	20,94	48,84	14	11	3
14	8,77	4 021 171	278 058	20,50	48,88	10	6	4
15	8,93	4 453 932	329 241	20,50	48,88	12	6	6
16	8,88	4 197 269	310 714	20,50	48,88	11	5	6
17	9,32	5 157 209	445 469	20,94	48,84	14	12	2
18	9,35	5 409 594	466 351	20,94	48,84	15	13	2

L'algorithme génétique détermine 18 politiques acceptables. La performance hydraulique décrite par F_1 est comprise dans l'intervalle [8.67, 9.62]. Le coût des travaux de renouvellement exprimé par $Bi(\Omega)$ se situe dans [248795€, 789660€] et le nombre de conduites à renouveler est compris entre [9,26]. Le Tableau 25 décrit la répartition des travaux de renouvellement entre le remplacement à l'identique et le renforcement. Nous remarquons que sur l'ensemble des solutions identifiées, les travaux de renforcement représentent la majorité des interventions à effectuer. Ceci traduit certainement un mauvais dimensionnement du réseau, ce qui nécessite une augmentation du diamètre des conduites afin d'améliorer le fonctionnement du réseau. Nous avons comparé les solutions obtenues afin de savoir s'il existe des similitudes en terme des travaux proposés et les conduites concernées par ces travaux. L'analyse a permis d'identifier des travaux de renouvellement que nous retrouvons sur la majorité des solutions proposées et concernent des conduites spécifiques. La séquence de travaux correspond à la politique 6. Voir Tableau 26.

Tableau 26. Les conduites faisant l'objet de renouvellement dans la majorité des solutions proposées

<i>Identifiant des conduites</i>	<i>Travaux de renouvellement préconisés</i>	<i>Identifiant des conduites</i>	<i>Travaux de renouvellement préconisés</i>
171	Renforcement	80	Renforcement
173	Renforcement	391	Renforcement
184	Remplacement	315	Renforcement
111	Renforcement	287	Renforcement
103	Renforcement	159	Renforcement
104	Renforcement	141	Renforcement
112	Renforcement	136	Remplacement
123	Remplacement	105	Renforcement

Après avoir identifié les conduites qui sont considérées par les politiques proposées, nous analysons la répartition de ces conduites en fonction du critère de leur sélection à savoir la durée de vie moyenne déterminée par *PHM* pour chaque conduite, l'indice *ICH* et *IDN*. Pour chaque solution nous identifions le nombre de conduites considérées dans la politique proposée et le critère de sélection.

Tableau 27. Répartition des conduites faisant l'objet de renouvellement en fonction du critère de sélection

<i>Politique (i)</i>	<i>Nombre de conduites à renouveler par politique</i>	<i>Nombre de conduite en fonction du critère de sélection</i>			<i>Proportion de conduites en fonction du critère de sélection</i>		
		<i>PHM</i>	<i>IDN</i>	<i>ICH</i>	<i>PHM</i>	<i>IDN</i>	<i>ICH</i>
1	25	3	11	11	0,12	0,44	0,44
2	26	3	13	10	0,12	0,50	0,38
3	23	3	10	10	0,13	0,43	0,43
4	22	3	9	10	0,14	0,41	0,45
5	21	3	8	10	0,14	0,38	0,48
6	16	1	6	9	0,06	0,38	0,56
7	13	1	4	8	0,08	0,31	0,62
8	14	1	4	9	0,07	0,29	0,64
9	12	1	4	7	0,08	0,33	0,58
10	13	1	4	8	0,08	0,31	0,62
11	9	1	2	6	0,11	0,22	0,67
12	13	1	5	7	0,08	0,38	0,54
13	14	1	4	9	0,07	0,29	0,64
14	10	1	3	6	0,10	0,30	0,60
15	12	1	4	7	0,08	0,33	0,58
16	11	1	3	7	0,09	0,27	0,64
17	14	1	5	8	0,07	0,36	0,57
18	15	1	6	8	0,07	0,40	0,53

Le Tableau 27 présente pour chaque politique de renouvellement proposée, la répartition des conduites sur lesquelles il est proposé d'intervenir par rapport au critère pris en compte pour leur sélection.

Résultats

Les résultats obtenus indiquent que le modèle a tendance à favoriser les conduites sélectionnées sur des critères liés à la fiabilité hydraulique à savoir *IDN* et *ICH*. Ce résultat correspond à la détérioration hydraulique importante enregistrée à l'état initial où 61 nœuds présentaient une déficience en pression. L'état du réseau nécessite donc une augmentation de la capacité hydraulique avec un coût minimum. Comme les conduites faisant apparaître une détérioration structurelle ne sont pas forcément vulnérables d'un point de vue hydraulique, le modèle aura tendance à favoriser les conduites jouant un rôle important dans la desserte en eau des usagers. Même si les politiques proposées favorisent les conduites critiques d'un point de vue hydraulique, les résultats obtenus sont viables. Cependant ils diffèrent de la pratique, car ils discriminent la détérioration structurelle. Nous proposons d'y pallier par l'introduction de pénalités M_j pour tenir compte des coûts sociaux et des coûts indirects.

Nous tenons compte dans ce qui suit des coûts indirects et des coûts sociaux liés aux défaillances par l'introduction des pénalités M_j afin de mieux tenir compte des conduites vulnérables d'un point de vue structurelle. Nous utilisons les mêmes valeurs de paramètres pour l'algorithme génétique.

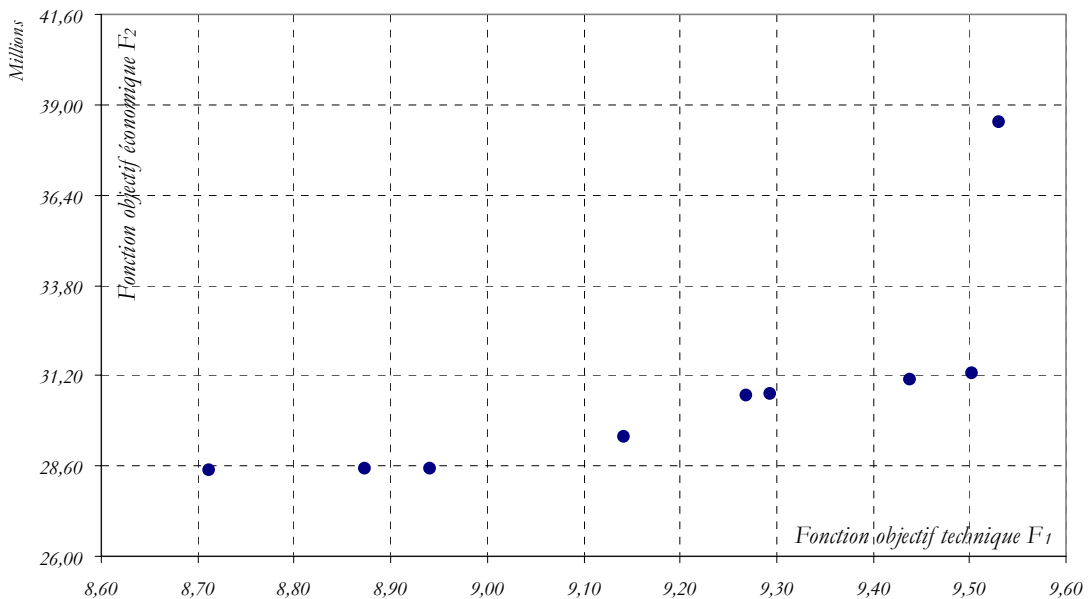


Figure 47. Les solutions non dominées représentant des politiques de renouvellement acceptables

La Figure 47 présente les solutions non-dominées obtenues pour une pénalisation des coûts de maintenance des conduites sélectionnées sur la base de la leur détérioration structurelle. L'amélioration de la performance hydraulique traduite par la fonction objectif technique s'accompagne d'une augmentation de la fonction objectif économique. Nous décrivons les solutions obtenues dans le Tableau 28.

Tableau 28. Les politiques de renouvellement proposées par l'algorithme génétique

<i>Solution i</i>	$F1_i$	$F2_i$	$B_i(\Omega)$	P_{min}	P_{max}	Renouvellement	Renforcement	Remplacement
1	9,53	38 510 511	1 039 840	20,94	48,84	31	16	15
2	9,14	29 440 471	647 781	20,94	48,84	20	12	8
3	8,71	28 451 855	543 661	20,24	48,84	17	6	11
4	8,87	28 497 657	582 040	20,30	48,84	18	6	12
5	8,94	28 509 542	562 858	20,94	48,84	19	9	10
6	9,50	31 259 317	803 539	20,94	48,84	24	18	6
7	9,44	31 075 722	826 357	20,94	48,84	25	18	7
8	9,27	30 640 182	816 516	20,94	48,84	25	9	16
9	9,29	30 645 577	817 479	20,94	48,84	25	10	15

L'algorithme génétique détermine 9 politiques acceptables. La performance hydraulique décrite par $F1$ se situe entre $[8.71, 9.53]$. Le coût des travaux de renouvellement exprimé par $B_i(\Omega)$ est compris entre $[543\ 661\text{€}, 1\ 039\ 841\text{€}]$ et le nombre de conduite à renouveler est compris entre $[17,31]$. Les politiques de renouvellement proposées coûtent plus chères que les politiques proposées dans la première partie. Cela s'explique par la considération d'un nombre de conduites plus important. Comme ces conduites n'apporte pas une amélioration significative au fonctionnement hydraulique, Il est nécessaire de considérer des conduites dans le rôle hydraulique est important. A titre d'exemple pour une même performance hydraulique de 9.44 le coût proposé à cette étape est de 826 357 € et correspond à 25 renouvellements. Pour la même performance, la solution proposée dans le premier cas coûte 530 132 € avec 16 conduites à renouveler. Cependant cette solution tient compte en grande partie du fonctionnement hydraulique du réseau et défavorise l'aspect lié à la détérioration structurelle, la différence de coût même si elle paraît conséquente est faible comparée aux conséquences de la rupture de conduites vulnérables d'un point de vue structurel. Nous avons comparé les solutions obtenues afin de savoir s'il existe des similitudes en terme des travaux proposés et les conduites concernées par ces travaux. L'analyse a permis d'identifier une séquence de travaux que nous retrouvons sur la majorité des solutions proposées et concernent des conduites spécifiques. La séquence de travaux correspond à la politique 8. Voir Tableau 29.

Tableau 29. Les conduites faisant l'objet de travaux dans la majorité des solutions proposées

<i>Identifiant des conduites</i>	<i>Travaux de renouvellement préconisés</i>	<i>Identifiant des conduites</i>	<i>Travaux de renouvellement préconisés</i>
171	Renforcement	80	Renforcement
173	Renforcement	391	Renforcement
184	Renforcement	315	Renforcement
111	Renforcement	287	Renforcement
103	Remplacement	159	Renforcement
104	Remplacement	112	Renforcement
298	Remplacement	188	Remplacement
123	Remplacement	105	Remplacement
117	Remplacement	293	Remplacement
273	Remplacement	292	Remplacement
384	Remplacement	101	Renforcement
318	Remplacement	383	Remplacement
313	Remplacement		

Nous analysons la répartition de ces conduites en fonction du critère de leur sélection à savoir : la durée de vie moyenne déterminée par *PHM* pour chaque conduite, l'indice *ICH* et *IDN*. Pour chaque solution, nous identifions le nombre de conduites considérées dans la politique proposée et le critère de sélection parmi les conduites candidates au renouvellement. Les résultats de l'analyse sont contenus dans le Tableau 30.

Tableau 30. Répartition des conduites faisant l'objet de travaux en fonction du critère de sélection

<i>Politique (i)</i>	<i>Nombre de conduites par politique</i>	<i>Nombre de conduite en fonction du critère de sélection</i>			<i>Proportion de conduites en fonction du critère de sélection</i>		
		<i>PHM</i>	<i>IDN</i>	<i>ICH</i>	<i>PHM</i>	<i>IDN</i>	<i>ICH</i>
1	31	10	11	10	0,32	0,35	0,32
2	20	8	4	8	0,40	0,20	0,40
3	17	9	3	5	0,53	0,18	0,29
4	18	9	2	7	0,50	0,11	0,39
5	19	9	3	7	0,47	0,16	0,37
6	24	9	5	10	0,38	0,21	0,42
7	25	10	5	10	0,40	0,20	0,40
8	25	10	5	10	0,40	0,20	0,40
9	25	10	5	10	0,40	0,20	0,40

Le Tableau 30 présente pour chaque politique de renouvellement proposée, la répartition des conduites à renouveler par rapport au critère pris en compte pour leur sélection.

Résultats

Les résultats obtenus indiquent que l'intégration des pénalités M_j a permis une homogénéité dans la considération des conduites à renouveler. La proportion des conduites sélectionnées en raison de leur détérioration structurelle est comprise entre 0.32 et 0.52. La proportion des conduites sélectionnées sur la base de l'indice IDN est comprise entre 0.11 et 0.35 et la proportion des conduites sélectionnées sur la base de l' ICH est comprise entre 0.29 et 0.42. Les politiques de renouvellement proposées offrent un compromis entre les critères liés à la détérioration structurelle et le rôle des conduites d'un point de vue hydraulique. Ce résultat est intéressant d'un point de vue pratique car il considère à la fois la structure du réseau et son fonctionnement. L'existence d'une politique compromise parmi les politiques de renouvellement proposée montre l'existence d'un ensemble de conduites sur lesquelles il est important d'intervenir

4. Programmation pluriannuelle

Afin de proposer une programmation pluriannuelle du renouvellement, nous devons choisir une politique de renouvellement à réaliser tout au long de l'horizon Ω . Nous sélectionnons la politique dont le coût est minimum. Cette politique correspond à la politique 3 (Voir Tableau 31). Elle correspond à 17 renouvellements dont 6 renforcements et 11 remplacements à l'identique. La politique 3 est détaillée dans le Tableau 31. Elle correspond au renouvellement de 3615 m de conduites.

Tableau 31 . La solution retenue pour la programmation pluriannuelle

<i>Conduite</i>	<i>Travaux</i>	<i>Critère pris en compte</i>	<i>Conduite</i>	<i>Travaux</i>	<i>Critère pris en compte</i>
391	Renforcement	ICH	161	Renforcement	PHM
80	Renforcement	ICH	292	Renforcement	PHM
273	Remplacement	PHM	293	Remplacement	PHM
298	Remplacement	PHM	173	Renforcement	IDN
313	Remplacement	IDN	184	Remplacement	ICH
318	Remplacement	PHM	111	Remplacement	PHM
171	Renforcement	ICH	105	Remplacement	IDN
383	Remplacement	PHM	123	Remplacement	ICH
384	Remplacement	PHM			

4.1 Identification d'une programmation des travaux de renouvellement

Nous utilisons l'approche de programmation pluriannuelle décrite dans le chapitre 5. Le coût estimé des travaux de renouvellement est de 543 661 €. Nous proposons de considérer une enveloppe budgétaire de 550 000 €. Dans un premier temps, nous supposons que l'enveloppe budgétaire sera utilisée de manière identique sur l'horizon de planification. Comme l'horizon de planification est de 5 ans, l'enveloppe budgétaire annuelle sera de 110 000 €. Cette enveloppe détermine la contrainte budgétaire à chaque année. Le service d'eau ne bénéficie pas de la totalité de l'enveloppe budgétaire au début de simulation, nous n'intégrant pas un taux d'intérêt ou un taux d'actualisation.

Nous adaptons l'algorithme d'optimisation que pour l'identification d'une politique de renouvellement. Des modifications concernant les fonctions objectif F_3 et F_4 à considérer et le codage sont apportées à l'algorithme. Pour la programmation pluriannuelle, les variables de décision traduisent la réalisation du renouvellement ou son report. Pour les fonctions objectif, il s'agit de maximiser le coût des travaux de manière à utiliser l'enveloppe allouée à une année donnée de manière optimale et d'améliorer la pression aux nœuds de consommation. L'algorithme a été implémenté à l'aide de la macro *Program_annuel* que nous avons élaborée.

La programmation des travaux pour une année donnée, correspond à un chromosome de longueur $l=17$ qui correspond au nombre de conduites prises en compte. Nous considérons les mêmes probabilités de croisement $P_c = 0,90$ et de mutation $P_m = 0,025$ que précédemment. La taille de la population $m = 150$ et $gen = 100$.

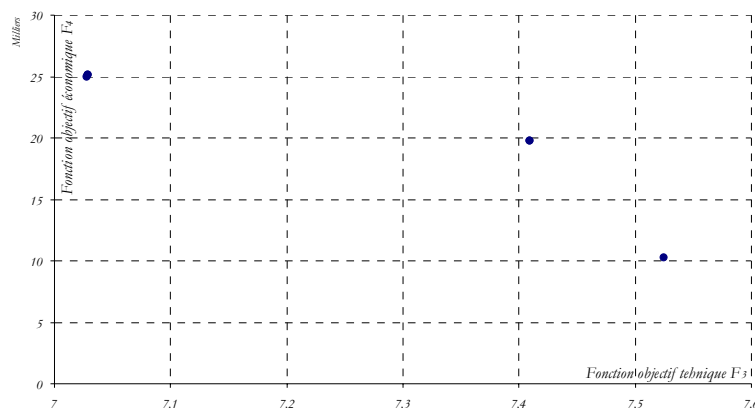


Figure 48. Les solutions non dominées pour la première année de programmation pluriannuelle

Le modèle propose 3 solutions non dominées présentées par la Figure 48 et qui correspondent aux travaux de renouvellement à réaliser à la première année de l'horizon de planification. La Figure 49 illustre ces solutions et la contrainte budgétaire annuelle. Nous proposons de choisir la solution qui assure une utilisation optimale de l'enveloppe allouée. Cette solution correspond au renforcement de la conduite 391, au remplacement de la conduite 298 et au remplacement de la conduite 111. Le coût de cette politique est de 107488 €. La fonction objectif technique $F_3 = 7,41$ et la pression minimale enregistrée dans le réseau est de 16,29 m.

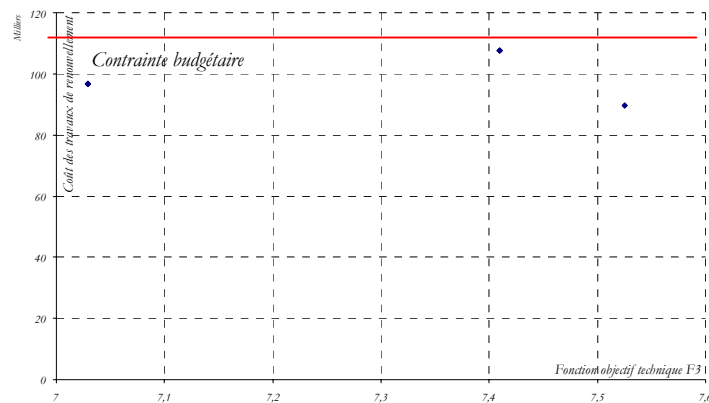


Figure 49. La programmation pluriannuelle et la contrainte budgétaire.

Nous procédons de la même manière pour déterminer les travaux à réaliser pour les années qui suivent. Pour les conduites qui doivent subir des travaux de renouvellement à la première année, les modifications de leurs caractéristiques hydrauliques sont effectuées. La longueur du chromosome $l=17$ reste inchangé, mais les codes des conduites déjà considérées est égal à 1. Ceci traduit la réalisation des travaux de renouvellement. Pour les conduites renouvelées, le coût est réduit à 0 pour les années suivantes. L'analyse des simulations sur l'ensemble de l'horizon de planification permet de proposer une programmation pluriannuelle qui respecte la contrainte budgétaire annuelle et améliore le fonctionnement du réseau par l'augmentation de la pression aux nœuds de consommation. Nous proposons une programmation pluriannuelle du renouvellement dans le Tableau 32.

Tableau 32. Programmation pluriannuelle des travaux de renouvellement, Programme1

Critère	ICH	ICH	PHM	PHM	IDN	PHM	ICH	PHM	PHM	PHM	PHM	PHM	IDN	ICH	PHM	IDN	ICH
Conduite	391	80	273	298	313	318	171	383	384	161	292	293	173	184	111	105	123
Année 1	■			■											■		
Année 2		■					■		■								
Année 3			■					■		■			■			■	
Année 4					■										■		
Année 5						■					■	■					■

Le Tableau 33 identifie pour chaque conduite l'année de réalisation des travaux de renouvellement. Nous remarquons que les travaux de renouvellement d'une année à l'autre sont effectués sur des conduites sélectionnées sur la base de critères liés à la détérioration structurelle et la fiabilité hydraulique. La longueur du réseau sélectionnée en raison de la détérioration structurelle est de 1685 m correspondant à 9 conduites sur les 17 à renouveler.

Pour la première année 2 des 3 conduites renouvelées ont été renouvelées en fonction de leur détérioration structurelle. Pour l'année 2, 1 conduite des 3 conduites renouvelées a été renouvelée en raison de sa détérioration structurelle. Pour l'année 3, 3 conduites des 5 renouvelées ont été choisies par rapport à leur détérioration structurelle. Pour l'année 4 aucune conduite n'a été renouvelée en fonction de sa détérioration structurelle. Pour l'année 5, 3 conduites des 4 renouvelées ont été renouvelées en raison de leur détérioration structurelle.

La répartition du coût des travaux de renouvellement à chaque année est décrite par la Figure 50.

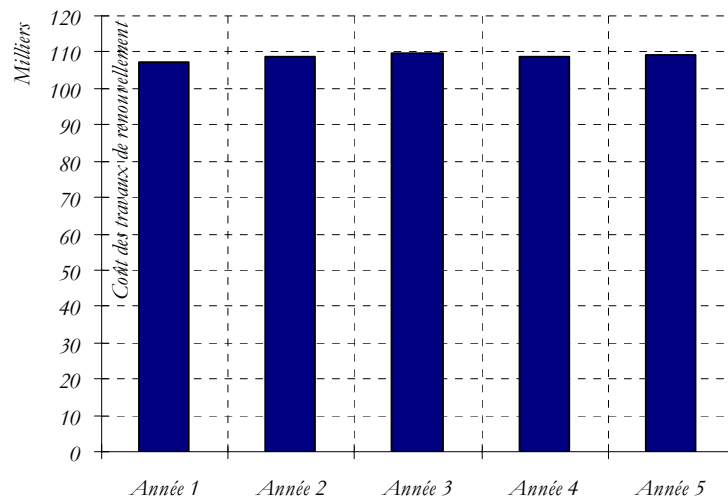


Figure 50. Répartition des coûts de travaux renouvellement.

La contrainte budgétaire annuelle de 110 000 € est bien respectée. Les coûts des travaux de renouvellement sont répartis de manière homogène sur l'ensemble de l'horizon de planification. Ils varient entre 107488 € et 109502 €. Nous allons maintenant mesurer l'impact de la programmation identifiée sur le fonctionnement du réseau. Nous proposons d'analyser l'évolution de la pression minimale et de la performance hydraulique du réseau exprimée par la fonction objectif F , illustrées par les Figure 51 et la Figure 52. Nous présentons l'évolution de la proportion de la longueur renouvelée chaque année par rapport à longueur des conduites sélectionnées sur la base de la détérioration structurelle égale à 1685 m. Le calcul de cette proportion permet de mesurer l'impact de la programmation du renouvellement sur la structure du réseau. En renouvelant les conduites vulnérables d'un point de vue structurel on évite la

survenue de nouvelles défaillances et donc les impacts de ces défaillances. Des impact qui sont traduit par les coûts de réparation, les coûts sociaux et les coûts indirects.

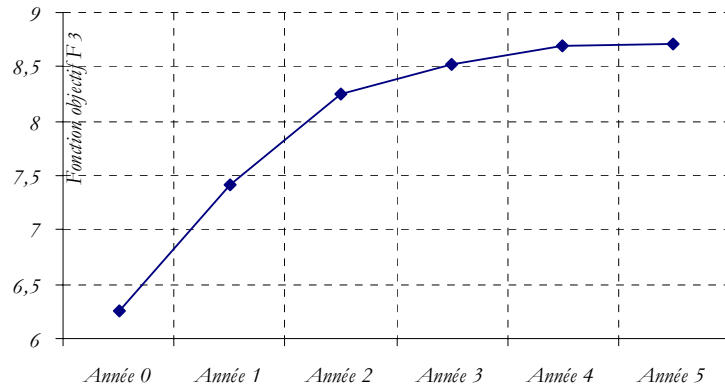


Figure 51. Evolution de la fonction F_3 .

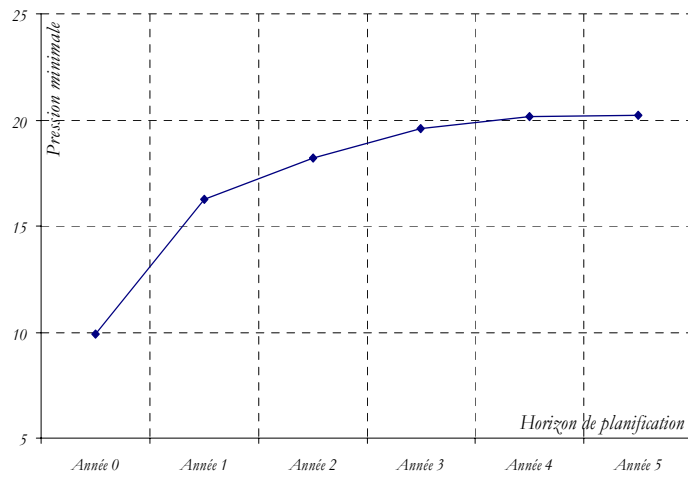


Figure 52. Evolution de la pression minimale dans le réseau

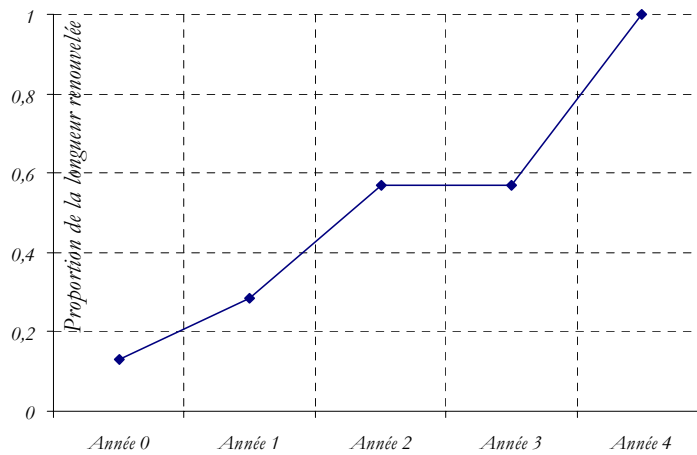


Figure 53. Evolution de la proportion de la longueur des conduites renouvelées en raison de leur détérioration structurelle.

Nous remarquons une amélioration significative de la performance hydraulique du réseau traduite par la fonction F3 et la pression minimale dans le réseau. Nous constatons également que la programmation pluriannuelle proposée tient compte de la détérioration structurelle. Elle offre un compromis entre ces critères sur l'ensemble de l'horizon de planification. Le niveau initial correspondant à l'Année 0 de début de programmation. La valeur de la fonction F3 est de 6.25, la valeur de la pression la plus faible est de 9.92 m. La mise en place des travaux de renouvellement permet d'améliorer la valeur de F3 à 7.41 avec une pression minimale de 16.29 m. Ceci permet aussi de renouveler 650 m de conduites dont 220 m sur la base la détérioration structurelle, ce qui représente 13 % de la longueur à renouvelée pendant 5 ans sur une longueur totale de 1685 m. Le coût des travaux est estimé à 107488 €. La contrainte sur la pression $P_{min}=20 \text{ m}$ est satisfaite à partir de la 4^{ème} année.

Résultats

D'un point de vue méthodologique, l'approche de programmation pluriannuelle que nous proposons est originale. Nous n'avons pas identifié de travaux similaires dans la littérature pour le problème de renouvellement des réseaux AEP. L'approche programme de manière satisfaisante les travaux de renouvellement sur le réseau en respectant une contrainte budgétaire qui correspond au budget disponible au service d'eau chaque année. Elle assure aussi le lissage des travaux afin de se caler au mieux à la contrainte budgétaire. La programmation pluriannuelle proposée tient compte des critères liés à la détérioration structurelle et la fiabilité hydraulique chaque année pour le choix des conduites à renouveler. Le programme 1 montre bien qu'à chaque année, le programme de renouvellement prend en compte ces critères pour la réalisation des travaux de renouvellement à l'exception de l'année 4.

Les travaux assurent une amélioration significative et continue du fonctionnement du réseau du réseau jusqu'à atteindre le niveau requis par la politique de renouvellement choisie au départ.

4.2 Impact de la programmation des travaux sur le fonctionnement du réseau AEP

Nous allons vérifier dans ce qui suit l'hypothèse émise dans le chapitre 1. Cette hypothèse concerne la séquence de réalisation de travaux et son impact sur le fonctionnement du réseau. Il ne suffit pas de trouver une programmation pluriannuelle acceptable, mais il est nécessaire de mesurer son impact sur le réseau. Pour chaque année, l'algorithme d'optimisation propose des solutions non-dominées qui correspondent aux travaux à réaliser. Pour une enveloppe budgétaire annuelle identique tout au long de l'horizon de planification répartie de manière égale, nous identifions 3 autres programmes de renouvellement. Chaque programme est défini par :

- les travaux de renouvellement annuels à réaliser
- l'évolution de la pression minimale et la performance hydraulique du réseau pour une année donnée
- l'évolution des coûts de renouvellement
- longueur du réseau renouvelé par an .
- l'évolution de la proportion de la longueur des conduites renouvelées en fonction de leur détérioration structurelle.

En se basant sur la simulation effectuée dans le §4.1 pour l'identification d'une programmation pluriannuelle et les résultats obtenus à l'aide de *Program_annuel* nous identifions 3 autres programmes de renouvellement qui proposent les mêmes travaux de renouvellement mais dont l'ordre de réalisation d'une année à l'autre est différent. Les programmes de renouvellement sont présentés dans le Tableau 33, le Tableau 34 et le Tableau 35.

Tableau 33. Programmation pluriannuelle des travaux de renouvellement, Programme 2

Critère	ICH	ICH	PHM	PHM	IDN	PHM	ICH	PHM	PHM	PHM	PHM	PHM	IDN	ICH	PHM	IDN	ICH
Conduite	391	80	273	298	313	318	171	383	384	161	292	293	173	184	111	105	123
Année 1	■			■											■		
Année 2			■					■		■			■			■	
Année 3		■					■		■								
Année 4				■										■			
Année 5					■					■							■

Tableau 34. Programmation pluriannuelle des travaux de renouvellement, Programme 3.

Critère	ICH	ICH	PHM	PHM	IDN	PHM	ICH	PHM	PHM	PHM	PHM	PHM	IDN	ICH	PHM	IDN	ICH
Conduite	391	80	273	298	313	318	171	383	384	161	292	293	173	184	111	105	123
Année 1	■			■											■		
Année 2			■					■		■			■			■	
Année 3		■					■		■								
Année 4				■		■					■	■					■
Année 5					■									■			

Tableau 35. Programmation pluriannuelle des travaux de renouvellement, Programme 4.

Critère	ICH	ICH	PHM	PHM	IDN	PHM	ICH	PHM	PHM	PHM	PHM	PHM	PHM	IDN	ICH	PHM	IDN	ICH
Conduite	391	80	273	298	313	318	171	383	384	161	292	293	173	184	111	105	123	
Année 1	■			■											■			
Année 2					■									■				
Année 3		■					■		■									
Année 4			■					■		■		■		■			■	
Année 5						■					■	■					■	

En se basant sur les travaux de renouvellement à réaliser et les conduites devant faire l'objet de travaux, nous remarquons la même programmation pour la première année. Cette dernière est la seule à permettre un respect de la contrainte budgétaire et une amélioration significative du fonctionnement du réseau en se référant aux Figure 48 et Figure 49. Pour les autres années, la programmation pluriannuelle est différente. Chaque programme propose des travaux à réaliser sur des conduites différentes pour la même année de programmation. La séquence et l'ordre de réalisation des travaux sont distincts. Nous allons comparer dans ce qui suit la répartition des coûts de renouvellement pour les 4 programmes proposés. L'évolution est présentée dans la Figure 54.

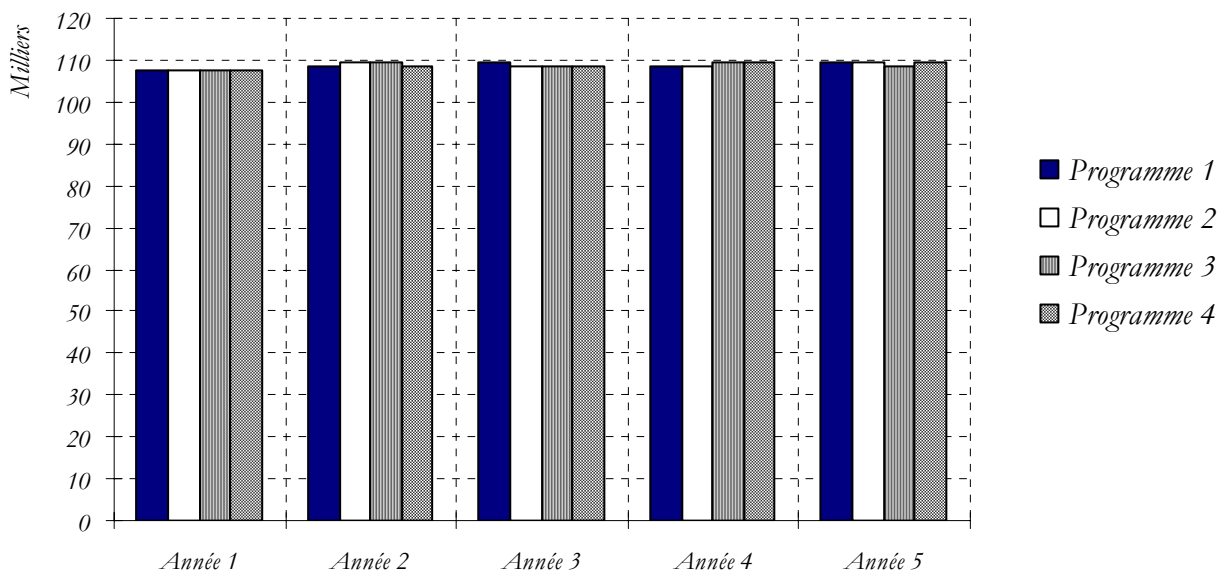


Figure 54. Répartition des coûts de renouvellement pour les 4 programmes identifiés

L'évolution des coûts de renouvellement est sensiblement la même pour les 4 programmes identifiés. D'une année à l'autre la différence du budget à allouer est faible. Nous allons maintenant comparer la longueur des conduites renouvelées à chaque année. La Figure 55 illustre la longueur du réseau renouvelée à chaque année.

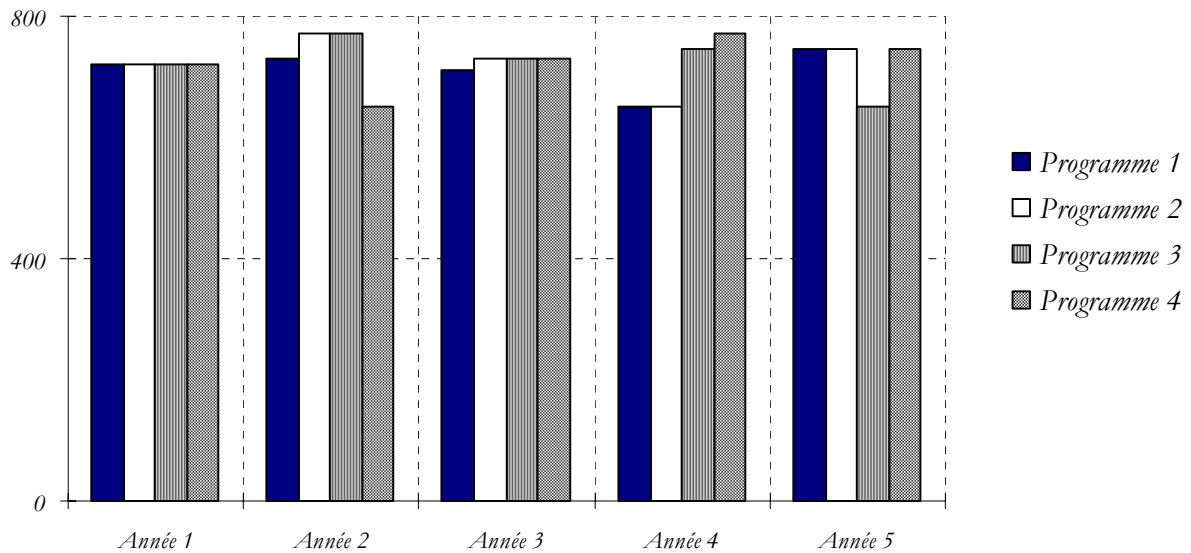


Figure 55. Longueur du réseau renouvelé à chaque à chaque année.

L'analyse de la Figure 55 fait apparaître une différence à partir de la deuxième année dans la longueur du réseau renouvelée à chaque année qui varie entre 650 m et 770 m. Malgré un coût de renouvellement sensiblement égal tout au long de l'horizon de planification, cette différence peut s'expliquer par la présence de travaux de nature différente qui sont le renouvellement et le renforcement. Comme les coûts de ces travaux ne sont pas identiques, pour une même enveloppe budgétaire il est possible de remplacer une longueur de réseau plus importante que de la renforcer. L'autre point concerne le choix des conduites à renouveler à chaque année qui n'est pas le même pour les programmes identifiées. Nous proposons de comparer l'évolution de la performance hydraulique du réseau dans le réseau pour les programmes identifiés et la proportion de la longueur des conduites renouvelées en réseau de leur détérioration structurelle. Les résultats sont présentés par la Figure 56 et la Figure 57.

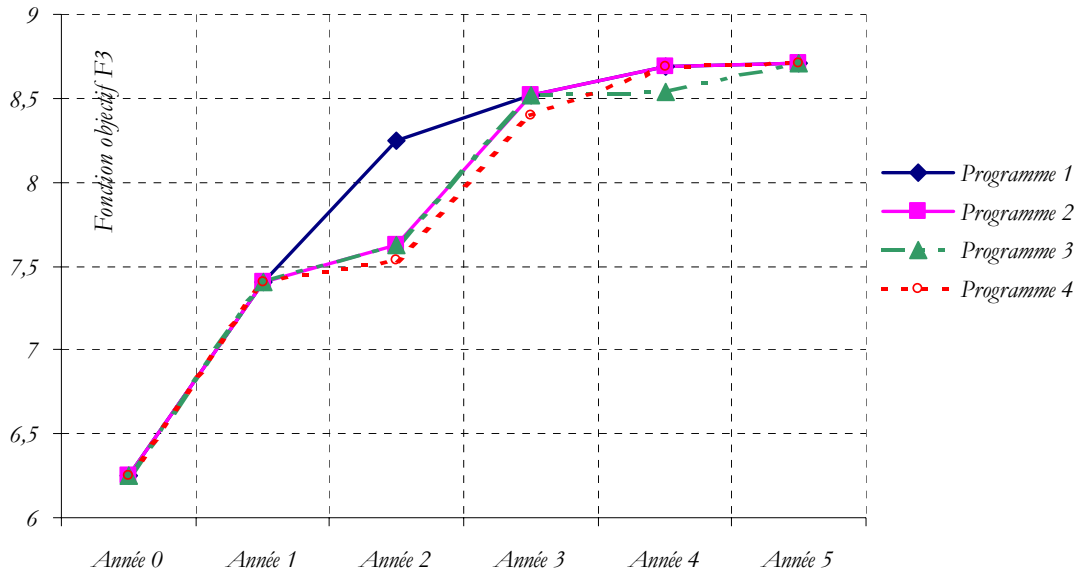


Figure 56. Comparaison de l'évolution de la fonction F_3

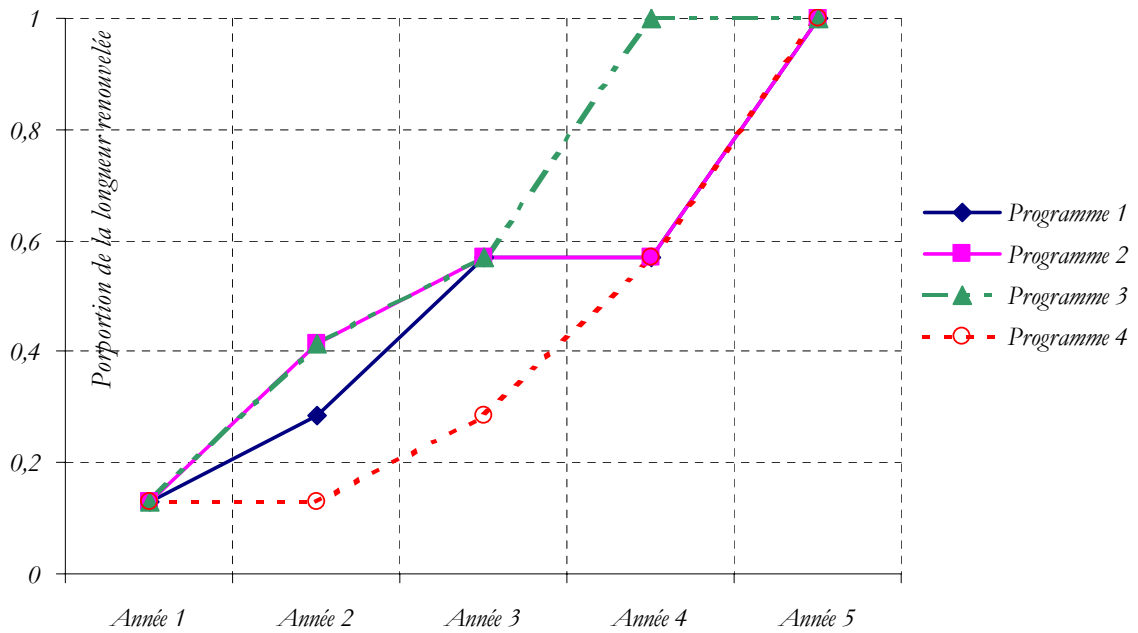


Figure 57. Comparaison de l'évolution de la proportion de conduites de la longueur des conduites renouvelées en fonction de la détérioration structurelle

L'analyse de l'évolution de la performance hydraulique et la proportion de la longueur des conduites renouvelées montre qu'il existe une différence significative entre les 4 programmes identifiés. L'impact de la réalisation des travaux de renouvellement sur la structure du réseau et son fonctionnement dépend de l'année de réalisation des travaux et des conduites à renouveler.

Nous remarquons que :

- le Programme 1 permet une amélioration plus rapide et plus importante de la performance hydraulique par rapport aux autres programmes. Cependant l'impact sur l'amélioration de la structure du réseau est moins important que le programme 3 par exemple .
- le Programme 2 et le Programme 3 présentent la même évolution de la performance hydraulique jusqu'à l'année 3. Celle-ci devient plus lente pour le programme 3. Le programme 3 assure une meilleure amélioration de la structure du réseau que les autres programmes. L'ensemble des conduites vulnérables d'un point de vue structurel sont renouvelées au bout de 4 années.
- le Programme 4 paraît moins performant que les autres programmes jusqu'à l'année 3. la performance hydraulique atteint son niveau maximum à l'année 4 .

Les résultats obtenus confirment bien l'hypothèse qui concerne l'impact de la programmation pluriannuelle du renouvellement. Pour une évolution sensiblement identique des coûts de renouvellement, l'impact sur le fonctionnement et la structure du réseau est différent. Nous proposons d'analyser le niveau de pression dans le réseau afin de connaître l'année à partir de laquelle la contrainte sur la pression minimum est respectée. Voir Figure 58.

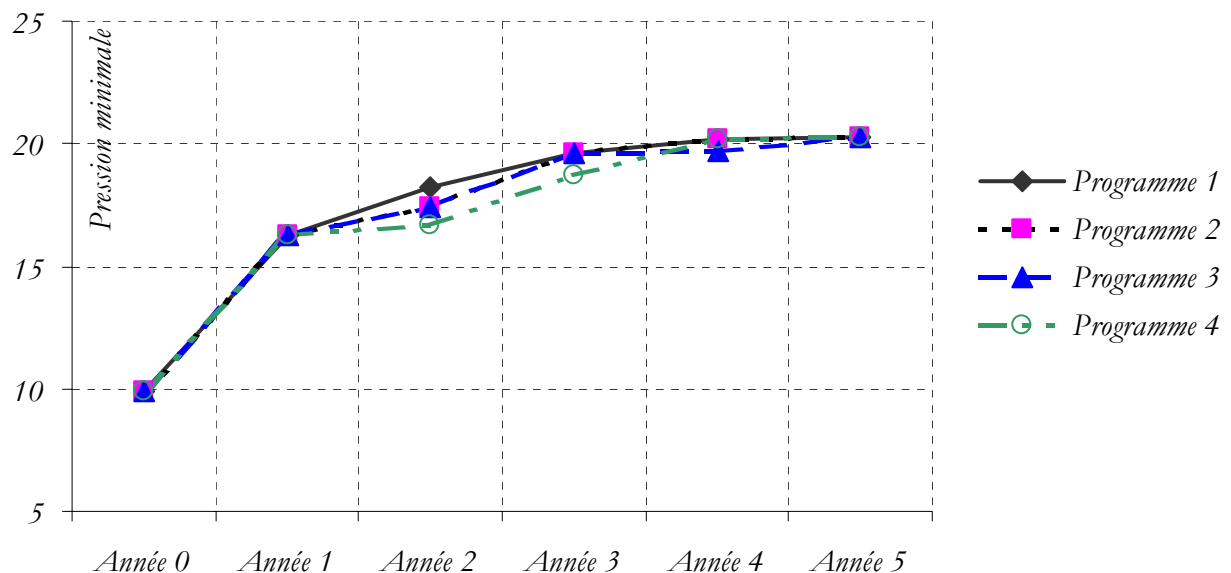


Figure 58. Evolution de la pression minimale

Le programme 1 permet une amélioration significative du niveau de pression dès la première année en passant de 9.92 m à 16.29 m. Le programme 1, le programme 2, le programme 4 permettent d'atteindre le niveau de pression minimum requis à partir de l'année 4. L'amélioration de la structure du réseau est différente de l'amélioration de son fonctionnement. Cependant le programme 4 semble le moins performants. Le programme 3 permet une amélioration significative de la structure du réseau, mais offre des performance moins bonnes en terme hydraulique.

Résultats

L'utilisation de l'algorithme génétique propose un ensemble de programmes de renouvellement. La comparaison des programmes proposés permet de vérifier l'hypothèse qui établit une relation entre la programmation pluriannuelle des travaux et l'impact sur le fonctionnement du réseau. En effet pour une répartition sensiblement identique du budget, l'analyse de l'évolution de la fonction F_3 et de la pression minimale disponible laisse apparaître une meilleure performance hydraulique pour certains programmes, mais dont l'impact sur la structure du réseau n'est pas très important. Il n'est pas suffisant de trouver une programmation pluriannuelle acceptable. Il est nécessaire de mesurer son impact sur le réseau, vérifier l'existence d'autres programmes réalisables et pouvoir les discriminer. Le choix d'une programmation dépendra de son impact sur la structure et le fonctionnement du réseau. Les résultats obtenus montrent que la performance d'une programmation pluriannuelle est tributaire des conduites à renouveler, de l'ordre et l'année de réalisation des travaux.

4.3 Etude de sensibilité de la programmation pluriannuelle à la politique budgétaire

La programmation pluriannuelle est sensible aux travaux de renouvellement et l'année de leur réalisation. La réalisation des travaux de renouvellement est tributaire de l'enveloppe budgétaire disponible. La politique budgétaire définit le budget annuel à utiliser. Nous avons considéré jusqu'à maintenant une répartition équivalente du budget sur l'horizon de planification qui représente le scénario 1. Pour ce scénario nous retenons le programme 1. Nous effectuons une variation du budget d'une année à l'autre. Nous supposons deux autres scénarios afin de mesurer l'impact de la disponibilité du budget la programmation budgétaire. Le scénario 2 est de considérer une augmentation du budget de 10 % d'une année à l'autre. La répartition du budget est donnée par le Tableau 36.

Nous remarquons que l'ordre de réalisation des travaux et l'année de réalisation sont différents d'un programme à l'autre. La répartition du budget influence le choix des conduites et la séquence de réalisation des travaux de renouvellement. Nous comparons les programmes de renouvellement proposés avec le programme 1, en se basant sur les mêmes critères utilisés précédemment. Le premier critère concerne la répartition des coûts de renouvellement. L'évolution des coûts de renouvellement est représentée par la Figure 59. Pour une répartition de coût différente, les programmes proposés sont réalisables. Nous pouvons considérer une alternative différente à une répartition homogène du budget sur l'horizon de planification.

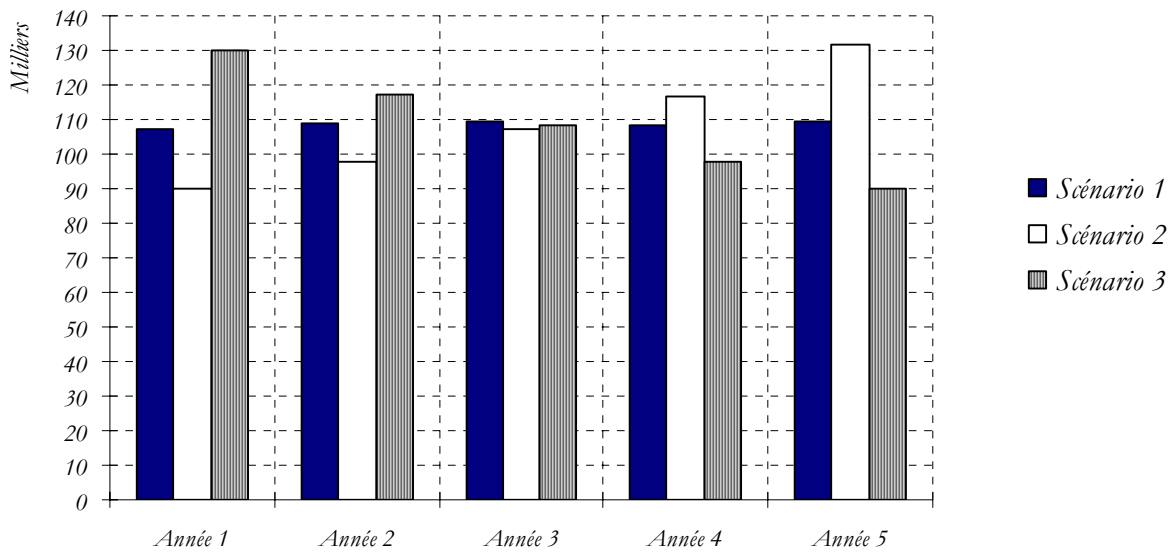


Figure 59. Evolution des coûts de renouvellement pour les 3 scénarios

Nous mesurons l'impact des programmes de renouvellement proposés sur la longueur du réseau renouvelée qui est présentée dans la Figure 60.

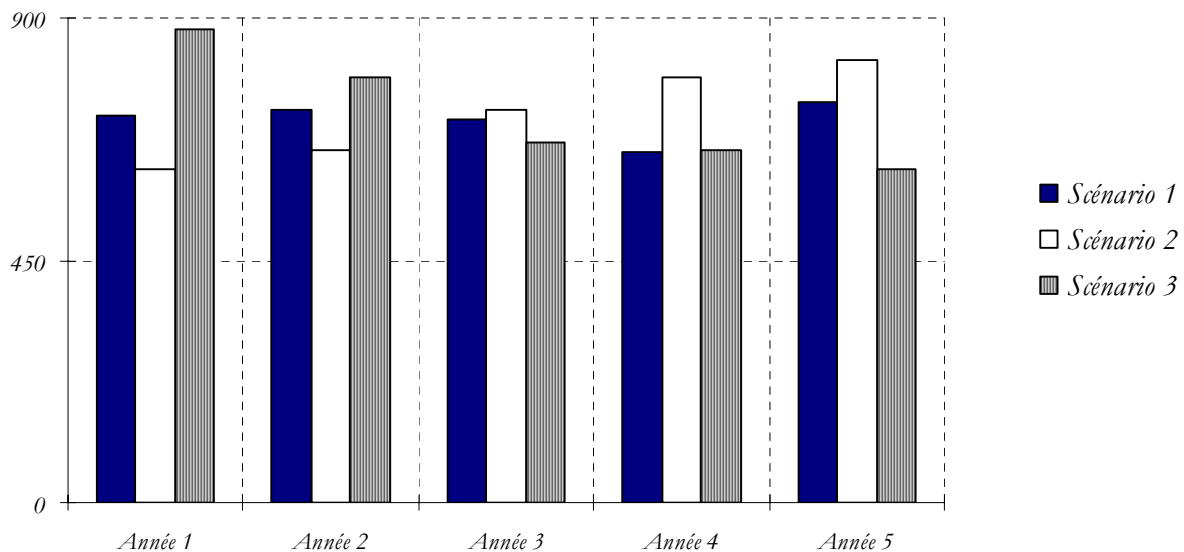


Figure 60. Evolution de la longueur du réseau renouvelée pour les 3 scénarios

La disponibilité d'une enveloppe budgétaire plus importante à la première année permet de renouveler plus de conduites et donc une longueur plus importante du réseau égale à 880 m pour le Scénario 2 comparé au scénario 1 qui est de 720 m alors que pour le scénario 3, elle est de 620 m. Nous analysons dans ce qui suit l'évolution de la performance hydraulique et l'impact sur la structure du réseau des programmes de renouvellement correspondant aux 3 scénarios étudiés illustrée par la Figure 61 et la Figure 62.

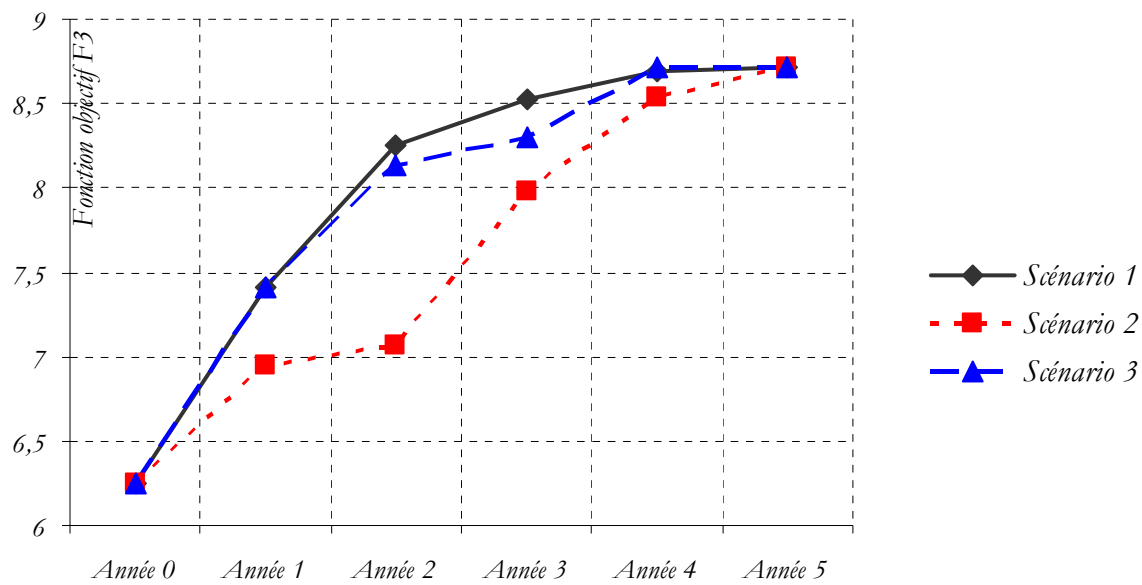


Figure 61. Evolution de la performance hydraulique dans le réseau pour les 3 scénarios

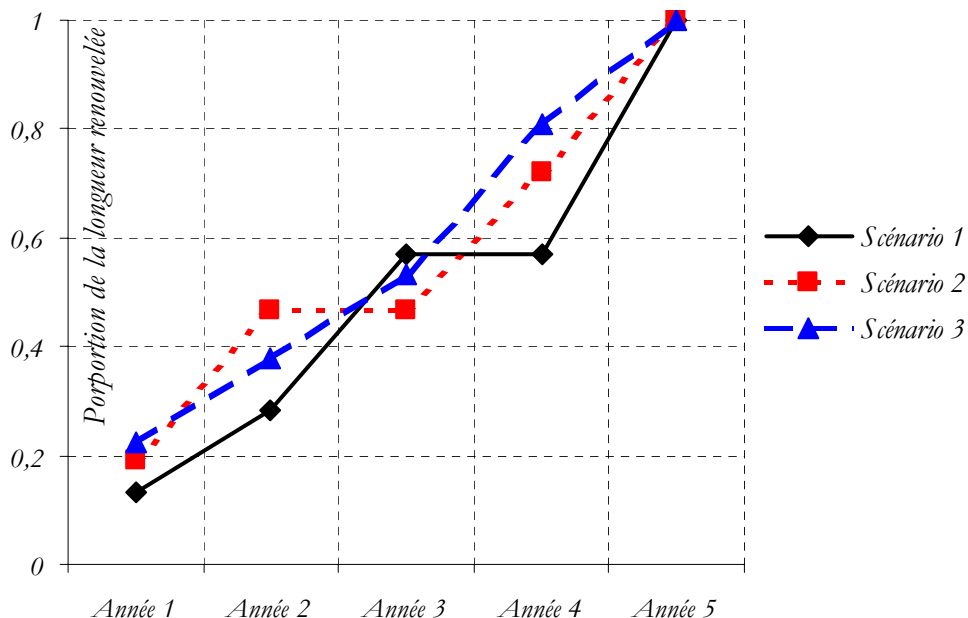


Figure 62. Comparaison de l'évolution de la proportion de conduites de la longueur des conduites renouvelées en fonction de la détérioration structurelle.

L'impact de la programmation pluriannuelle sur le réseau est différent d'un point de vue structurelle et hydraulique. En effet le scénario 1 permet une amélioration plus rapide et plus importante que les deux autres scénarios de la performance hydraulique du réseau. Le scénario 3 offre une amélioration plus importante de la structure du réseau par rapport aux autres scénarios. Le programme proposé par le scénario 2 permet d'utiliser une enveloppe budgétaire inférieure au départ et qui croît au fur et à mesure idéale en cas d'insuffisance de ressources financières en début de programmation. Cependant l'impact sur la performance et la structure du réseau est plus faible que pour les autres programmes. Le programme proposé par le scénario 2 semble le moins performant. A l'image des résultats obtenus nous ne pouvons pas discriminer le Scénario 1 et le Scénario 3 car il présentent des caractéristiques différentes. En effet le scénario 1 offre une meilleure performance hydraulique tout au long de l'horizon de planification, alors que le Scénario 3 assure une amélioration plus importante de la structure du réseau et permet de renouveler plus de conduites pendant l'année 1, l'année 2 et l'année 4.

Résultats

Les résultats obtenus montrent que la programmation pluriannuelle est sensible à la variation de l'enveloppe budgétaire annuelle. L'impact sur la performance du réseau dépend de la politique budgétaire adoptée. Pour l'étude de sensibilité effectuée, le scénario 1 semble donner la meilleure amélioration du fonctionnement hydraulique du réseau. Ce scénario correspond à une répartition égale de l'enveloppe budgétaire sur l'ensemble de l'horizon de planification. Le scénario 3 qui correspond à une diminution du budget de 10% offre une amélioration importante de la structure du réseau ce qui permet d'éviter l'impact de la survenue des défaillances. Des impacts qui sont évalués en terme de coûts directs et indirects. Grâce à la disponibilité d'une enveloppe budgétaire plus importante en début de simulation, il permet de renouveler un nombre plus important de conduite et une longueur plus grande du réseau. Il présente une alternative intéressante au scénario 1. La disponibilité d'une enveloppe budgétaire importante à la première année peut présenter un inconvénient pour le service de l'eau. Le scénario 2 qui correspond à une augmentation de l'enveloppe budgétaire de 10 % par an semble plus intéressant car il permet d'amorcer le programme de renouvellement avec un budget moins important et l'accroître d'une année à l'autre. Cependant les performances d'un point de vue hydraulique et structurel du programme issu du Scénario 2 sont moins bonnes que pour les autres Scénarios. La démarche de programmation pluriannuelle proposée permet de comparer un ensemble de programmes de renouvellement. Elle mesure l'impact de la disponibilité des ressources financières et leur répartition dans le temps sur la réalisation des travaux de renouvellement et la performance du réseau.

5. Conclusion

L'implémentation du modèle d'aide à la décision requiert un diagnostic du réseau permettant de mieux comprendre son fonctionnement. L'apparition de déficience en pression dépend de la plage horaire considérée. Il est important d'analyser le fonctionnement du réseau sur une période d'au moins 24 h, afin d'identifier les plages horaires présentant des déficiences importantes. Le modèle sera par la suite appliqué pendant une plage horaire critique, qui dans notre application correspond à la période de pointe. La sélection des conduites candidates au renouvellement assure une hétérogénéité dans le choix des conduites. Les conduites sont choisies sur des critères liés à la détérioration hydraulique et structurelle du réseau.

La démarche de sélection des conduites nécessite la définition de seuils critiques rendant les conduites prioritaires. L'utilisation de l'algorithme génétique pour la génération et l'évaluation de politiques de renouvellement a permis de proposer un ensemble de politiques acceptables. Nous détaillons dans ce chapitre une approche pour la détermination des paramètres de l'algorithme génétique en comparant plusieurs simulations avec des paramètres différents. Deux cas ont été considérés. Le premier ne tient pas compte de coûts sociaux et considère des coûts liés à la réparation de la conduite sans tenir compte des impacts des défaillances. Le deuxième cas tient compte des coûts sociaux par l'introduction d'une pénalité forte qui caractérise les coûts de réparation des conduites critiques d'un point de vue structurel. Ceci permet de mieux tenir compte des conduites vulnérables d'un point de vue hydraulique. Les politiques de renouvellement proposées avaient tendance à favoriser les conduites dont le rôle est important d'un point de vue hydraulique, négligeant ainsi les conduites faisant apparaître une détérioration physique importante. Cela s'explique par le fait que les conduites vulnérables d'un point de vue structurel ne jouent pas automatiquement un rôle important dans la desserte en eau et à la déficience importante en pression constatée qui peut traduire un sous dimensionnement du réseau. Il ressort de l'implémentation du modèle que l'on doit attacher une attention particulière à l'estimation des coûts indirects et les coûts sociaux. Nous préconisons d'apporter une évaluation plus fine et un développement particulier dans l'estimation de ces coûts.

Nous avons considéré une pénalité dans le calcul des coûts de réparation pour tenir compte des coûts indirects et les coûts sociaux liés aux défaillances. Plusieurs politiques de renouvellement ont été proposées. Une politique compromis identifie un ensemble spécifique de conduites sur lesquelles la plupart des politiques de renouvellement réalisent des travaux de renouvellement. Ce résultat montre que les politiques de renouvellement ne sont pas totalement différentes.

Dans le cadre de l'application présentée dans ce chapitre, nous avons opté pour la politique la moins coûteuse.

La démarche de programmation pluriannuelle que nous avons élaborée offre des solutions réalisables. Elle permettent d'améliorer la performance du réseau, un lissage des travaux de renouvellement et un respect de la contrainte budgétaire annuelle. Il apparaît de l'analyse des résultats, que la performance du réseau dépend du choix des conduites à considérer à une année donnée et des travaux programmés d'une année à l'autre. Les résultats montrent que plusieurs programmes sont possibles.

Nous proposons une comparaison de ces programmes à travers l'analyse de l'évolution des coûts des travaux de renouvellement, de la longueur du réseau renouvelée, de l'évolution de la performance hydraulique et de la pression disponible dans le réseau. L'impact des programmes évalués sur le réseau n'est pas similaire d'un point de vue hydraulique et structurel. Certains programmes favorisent un aspect par rapport à l'autre. L'intérêt de la programmation pluriannuelle que nous avons élaborée est de pouvoir décrire et évaluer chaque programme. Le choix d'un programme de renouvellement dépend de la pratique du service de l'eau et du contexte dans lequel il se trouve.

La programmation pluriannuelle est sensible à la disponibilité de la ressource financière. Les scénarios étudiés présentent une répartition différente du budget. La répartition de manière équivalente de l'enveloppe budgétaire améliore de manière significative le fonctionnement du réseau et sa structure. L'utilisation d'une enveloppe budgétaire importante au début de l'horizon de planification permet de renouveler plus de conduites, assurant une amélioration plus importante de la structure du réseau. Ceci permet de prévenir les défaillances et leur impacts. Cependant, cette solution offre une amélioration moins importante de la performance hydraulique. En fonction du choix de la politique de renouvellement, la programmation pluriannuelle permet de programmer dans le temps la réalisation des travaux de renouvellement et mesurer leur impact d'un point de vue structurelle. En se basant sur les résultats obtenus, nous pensons que la programmation pluriannuelle dépend de l'ordre de réalisation des travaux, de l'année de leur réalisation et de la répartition de l'enveloppe budgétaire d'une année à l'autre. Le choix d'une programmation appropriée s'appuie sur la démarche de comparaison et d'évaluation des programmes que nous proposons dans ce chapitre. La décision finale revient au gestionnaire du réseau AEP.

Conclusion générale

Résultats importants et perspectives

Le travail de thèse a permis de proposer une approche pour le renouvellement des réseaux d'Alimentation en Eau Potable (AEP) et sa programmation sous contraintes budgétaires. A travers l'analyse de la littérature effectuée, nous avons établi un lien important entre le renouvellement et la gestion du réseau AEP. Il ressort du travail de thèse que la problématique du renouvellement ne peut être dissociée de la gestion du réseau dans son ensemble à court, moyen et long terme. Le renouvellement s'inscrit dans une politique de gestion du patrimoine. Un patrimoine qui est constitué par les conduites, les organes et dispositifs hydrauliques constituant le réseau. En ce sens nous proposons une adaptation du processus de gestion du patrimoine, pour la gestion du réseau de manière globale.

Le renouvellement est un investissement de modernisation, qui ne génère pas de *Cash-Flow* au même titre qu'un équipement industriel. Nous constatons que les méthodes classiques de choix d'investissements ne sont pas appropriées pour la mise en œuvre du renouvellement.

L'autre résultat important est la proposition d'une typologie des modèles et approches pour le renouvellement différente de celles rencontrées dans la littérature. D'une manière générale, ils sont différenciés en fonction des outils et méthodes mathématiques qu'ils utilisent. Nous proposons une typologie qui se base sur l'objet de chaque approche à savoir :

- les approches pour la hiérarchisation des conduites candidates au renouvellement
- les approches pour la détermination d'échéances pour le renouvellement
- les modèles intégrés de prise de décision composés par plusieurs modules de calcul

La décision en matière de renouvellement s'appuie sur un ensemble de critères. Des critères techniques et économiques ont été pris en compte dans le cadre de la thèse à travers des fonctions objectif spécifiques. L'utilisation des approches classiques d'optimisation nous semble inadaptée. Nous avons utilisé une approche d'optimisation multiobjectif basée sur l'optimum de Pareto et une méta-heuristique : l'algorithme génétique.

L'approche élaborée identifie un ensemble de politiques de renouvellement acceptables. Ce qui assure une certaine flexibilité au gestionnaire du service d'eau dans le choix d'une politique de renouvellement appropriée.

L'approche que nous proposons pour le renouvellement se distingue par rapport aux travaux identifiés dans la littérature par :

- une procédure spécifique de sélection des conduites candidates au renouvellement, en se basant sur des critères liés à la détérioration hydraulique et structurelle des conduites.
- la prise en compte de manière simultanée de critères techniques et économiques dans l'évaluation des politiques de renouvellement à travers une approche d'optimisation multiobjectif.
- une programmation des travaux de renouvellement qui tient compte de la disponibilité de la ressource financière s'assurant d'une amélioration significative du fonctionnement du réseau.

La réalisation des travaux de renouvellement dépend de la disponibilité de la ressource financière ce qui peut conditionner la performance du réseau. Nous effectuons une analogie avec les problèmes de nivellement de ressources traités dans la littérature. Les travaux de renouvellement sont assimilés dans ce cas à des tâches d'un projet. Le travail de thèse a permis de mettre l'accent sur la nécessité de la prise en compte de la détérioration hydraulique et structurelle du réseau. Nous préconisons d'étudier la relation entre la description du réseau tel qu'il existe dans la réalité et la modélisation hydraulique qui permet de décrire son fonctionnement. Il est important que les données concernant l'état physique de la conduite : longueur réelle, diamètre, âge, nombre de défaillance, coïncident avec les données liées à son fonctionnement : longueur équivalente, diamètre, rugosité, consommation. Ce qui implique un traitement spécifique des données. La modélisation du réseau doit permettre de traduire efficacement le fonctionnement du réseau et correspondre à la disposition des conduites dans la réalité. Nous proposons de définir les conduites à l'échelle de la rue en tenant compte de leur homogénéité : même caractéristiques hydrauliques et données d'environnement.

La décision de renouvellement doit tenir compte du réseau dans son ensemble. Elle s'effectue à l'échelle du réseau et non pas à l'échelle de la conduite. Il est donc important d'évaluer l'impact de l'indisponibilité d'une conduite sur le fonctionnement du réseau. Nous avons proposé un *benchmarking* d'un ensemble de méthodes et d'outils pour la mesure de la fiabilité hydraulique des réseaux. Ceci nous a permis de proposer un outil informatique *Mesure_fiabilité* qui évalue l'importance hydraulique de chaque conduite dans un réseau en cas de défaillance. L'outil élaboré fonctionne sous Excel®.

Nous avons proposé une formalisation de l'approche pour le renouvellement à travers un modèle d'aide à la décision qui utilise des données liées aux conduites et au coûts de renouvellement. Trois alternatives de renouvellement ont été considérées qui traduisent la pratique du renouvellement en France à savoir : Ne rien faire et réparer en cas de défaillance, remplacer à l'identique et renforcer. L'approche d'optimisation multiobjectif est implémentée à l'aide d'un algorithme génétique que nous avons élaboré en nous inspirant de l'algorithme *NSGA II*. Le travail de thèse propose une modélisation de la problématique de renouvellement à l'aide de l'algorithme génétique en proposant un codage spécifique qui correspond au travaux de renouvellement, des procédures spécifiques pour le calcul des fonctions objectif, de classement et de prise en compte des contraintes.

L'application du modèle sur un réseau de taille réelle d'un syndicat de communes en Alsace, se trouvant en milieu rural montre que l'algorithme génétique est sensible à la valeur des probabilités de croisement et de mutation. Nous proposons une approche détaillée pour la détermination de ces paramètres. Il s'avère que le modèle est sensible à la définition des coûts de réparation des conduites. Les conduites vulnérables d'un point de vue structurel ne le sont pas nécessairement d'un point de vue hydraulique. Une pénalisation des coûts de réparation pour traduire les coûts sociaux liés aux défaillances a été nécessaire pour que le choix des conduites à renouveler soit homogène entre les conduites sélectionnées sur la base de leur importance hydraulique et leur détérioration structurelle. Le modèle propose un ensemble de politiques de renouvellement viables d'un point de vue technique et économique, qui doivent être réalisées sur un horizon de planification n'excédant pas 5 années. L'utilisation d'une approche d'optimisation multiobjectif a permis d'identifier plusieurs solutions et non une solution unique. Des solutions qui représentent un panel de politiques de renouvellement. Le choix d'une politique portera sur celle qui correspond le plus aux attentes du gestionnaire du service de l'eau et à l'état du réseau AEP.

Dans le cadre de la thèse, le choix de la politique a porté sur la politique la moins coûteuse. Le coût de cette politique a permis d'estimer le budget nécessaire pour sa mise en œuvre. L'utilisation de la macro *Program_annuel* que nous avons élaborée propose un ensemble de programmations pluriannuelles. Ceci en considérant une répartition égale du budget sur l'horizon de planification. Les programmes proposés sont réalisables mais offrent un impact différent sur la performance hydraulique et la structure du réseau. Il apparaît que la séquence de réalisation des travaux et le choix des conduites déterminent l'impact de la programmation pluriannuelle sur le fonctionnement du réseau.

Nous avons mesuré la sensibilité de la programmation pluriannuelle à la politique budgétaire adoptée. Les résultats des simulations effectuées montrent que la programmation pluriannuelle est tributaire de la politique budgétaire. Une répartition égale du budget offre une meilleure performance hydraulique du réseau qu'une augmentation ou une diminution progressive de l'enveloppe budgétaire annuelle.

L'approche pour le renouvellement et la programmation pluriannuelle se démarque par rapport à la littérature par :

- l'utilisation d'algorithmes spécifiques pour l'identification des politiques de renouvellement et la programmation pluriannuelle, en tenant compte de critères économiques et techniques dans la prise de décision.
- une démarche pour la comparaison des politiques de renouvellement et les programmes de renouvellement identifiés.

Les politiques de renouvellement traduisent des décisions à l'échelle des conduites mais qui tiennent compte du réseau dans son ensemble. Le modèle permet d'évaluer un nombre important de politiques et de sélectionner celles qui sont viables d'un point de vue technique et économique. Le modèle que nous proposons se présente comme un outil d'aide à la décision opérationnel, la décision finale revient au gestionnaire du service de l'eau.

Perspectives suscitées par la thèse

Le travail de thèse met l'accent sur un ensemble de problèmes relatifs à la décision de renouvellement à savoir : l'identification des critères à considérer, la définition des données et la sélection des conduites à renouveler. Les résultats obtenus semblent coïncider avec la réalité et propose des solutions viables d'un point de vue technique et économique. A cet effet le modèle doit être validé sur d'autres réseaux de taille plus importante, des réseaux en milieu urbain et des réseaux présentant une déficience hydraulique moins importante que le réseau que nous avons étudié.

La validation du modèle nécessite au préalable celle de la procédure de sélection de conduite et l'estimation des coûts principalement les coûts de réparation et la prise en compte des coûts sociaux.

Une des améliorations possibles concerne la complexité des algorithmes proposés afin de réduire le temps de calcul. Le modèle peut évoluer vers un logiciel pour le renouvellement des réseaux AEP. Pour assurer une utilisation adéquate du modèle, il est important de décrire la coordination entre les services (techniques, financiers) que comporte le service d'eau en terme d'échange de données et la mise en place du modèle d'aide à la décision proposé. Ceci permettra d'assurer la disponibilité des données nécessaires et une concertation dans la prise de décision en matière de renouvellement. Il est nécessaire de tenir compte aussi de la coordination entre le service de l'eau et les autres services qui peuvent intervenir sur la chaussée à savoir : le service de voirie, électricité, gaz, chauffage urbain.

Le modèle propose de considérer les travaux de voirie dans la sélection des conduites vulnérables et la programmation du renouvellement, en l'absence de données du service de voirie nous n'avons pas pu prendre en compte l'aspect lié à la voirie. Il serait intéressant de mesurer l'impact de l'exploitation des données concernant la chaussée sur la réalisation des travaux de renouvellement. Les solutions proposées par le modèle doivent être validées par le gestionnaire du service d'eau et les opérateurs sur le terrain. Il est important de vérifier leur faisabilité . Le modèle doit être compris et adapter à la pratique du service d'eau pour une utilisation adéquate.

Le modèle proposé s'intéresse considère le renouvellement des conduites d'eau potable. Nous pensons qu'il peut être amélioré par la prise en compte des défaillances des organes hydrauliques composant le réseau à savoir les pompes, vannes pour s'approcher le plus du fonctionnement réel du réseau. D'autres alternatives de renouvellement peuvent être introduites.

Nous pensons qu'il est possible d'adapter l'approche proposée pour le dimensionnement des réseaux, de manière à réduire les coûts de conception et assurer un niveau de performance adéquat du réseau.

L'autre perspective est de généraliser l'approche proposée pour des problématiques similaires faisant apparaître la notion de réseau. Il s'agit de pouvoir adapter l'approche pour le renouvellement développée dans le cadre de la thèse en fonction du problème étudié à titre d'exemple : la réhabilitation des ponts, la réhabilitation des autoroutes, maintenance des réseaux électriques, la maintenance des réseaux d'assainissement.

Bibliographie

- Abebe, A.J, Solomatine, D.P.(1998). Application of global optimization to the design of pipe networks. Proceedings of the 3rd International Conference on Hydroinformatics, Copenhagen. Sweden.
- Abraham, D.M., Wirahadikusumah, R., (1999). Development of prediction models for sewer deterioration', Proceedings of the 8th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Vancouver, National Research Council. pp1257-1267.
- Alexandre, O. (1993). Le financement du renouvellement des réseaux d'alimentation en eau potable - Document Technique FNDAE n° 15 . 56 p.
- American Water Works Association, AWWA(1998). Water Utility Capital Financing, Manual of Water supply Practices. AWWA M29. ISBN0-089867-957-5.
- Andreou, S.A.(1986). Predictive models for pipe failures and their implications on maintenance planning strategies for deteriorating water distribution systems. Phd Thesis, Department of civil engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA, USA. 191p.
- Arnoux, P. (1998). Modélisation du vieillissement d'un réseau d'eau potable en fonte et application aux stratégies de renouvellement. Thèse en Science de l'eau. Université Louis Pasteur. Strasbourg, France. 138p.
- Arrow K.J., Fischer, A.C.(1974). Environmental preservation, uncertainty and irreversibility, Quarterly Journal of Economics, Vol. n°98. pp 85-106.
- Bancel, F., Richard, A. (1995). Les choix d'investissement, Méthodes traditionnelles, flexibilité et analyse stratégique. Ed Economica. Paris. .
- Basseur,M. (2005). Conception d'algorithmes coopératifs pour l'optimisation multi-objectif : Application aux problèmes d'ordonnancement de type Flow-Shop. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille, UFR D'I.E.E.A. Lille, France.
- Berro,A.(2001). Optimisation multiobjectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique. Thèse de Doctorat. Université Toulouse I, Toulouse, France.
- Bertin, S. (1994). Indices de fiabilité d'un système de distribution d'eau potable. Strasbourg, Ecole Nationale du Génie en Eau et de l'Environnement de Strasbourg.
- Boctor.F.F (2005). Le problème d'allocation et de nivellement des ressources. Administrative Sciences Association of Canada (ASAC) Conference. Toronto, Canada.
- Bourdin,J.(1998). Les finances des services publics de l'eau et de l'assainissement. Ed Economica, Paris. 160 p.
- Burn L.S, Tucker S.N, Rahilly M, Davis P, Jarrett R and Po M (2003). Asset planning for water reticulation Systems - the PARMS model. Water Science & Technology: Water Supply, Vol.3. pp55-62.

- Cador, J.M. (2002). Le renouvellement du patrimoine en canalisations d'eau potable en France, synthèse des des études départementales d'inventaires des réseaux d'eau potable. Caen, Université de Caen.
- Cheung,P.B,Reis.L.F.R,Formiga,K.T.M,Chaudhry.F.H,Ticona,W.G.C.(2003).Multi-objective evolutionary algorithms applied to the rehabilitation of water distribution: A Comparative Study, Evolutionary Multi-Criterion Optimization-Lecture notes in Computer Science, Heidelberg: Springer-Verlag, V. 2632.
- Dafflon, B.(1998). La gestion des finances publiques locales. Ed Economica. ISBN :2-7178-3513. Paris. 284p.
- Dandy, G.C., Engelhardt,M.(2001). Optimal Scheduling of Water Pipe Replacement Using Genetic Algorithms. Journal of Water Resources Planning and Management. Vol.127,n°4. pp214-223.
- Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt du Bas Rhin, DDAF. (2003) Bordereau général pour travaux de viabilité dans le département du bas rhin. Alimentation en eau potable, assainissement , voirie. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.
- Deb, A.,Hasit, Y.J.,Grabultz,F.,Herz, R.(1998). Quantifying future rehabilitation and replacement needs of water mains, AWWA Research Foundation. Denver.
- Deb,K., S.Agrawal, A.Pratap and T.Meyarivian. (2000). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm NSGAI. Technical Report n°2000001,Indian Inst.of.Tech.,Kanpur, India.
- Devi Prasad, T., Park,N-S,(2004). Multiobjective Genetic Algorithm for Design of Water Distribution Networks. Journal of Water Resources Planning and Management. Vol.130, n°1. pp73-82.
- Eisenbeis, P. (1994). Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable. Thèse en Génie de l'environnement , Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 156 p.
- Eisenbeis, P., Le Gat, Y., Laffréchine, K., Le Gauffre, P., König, A.,Rostum, J., Tuhovcak, L., Valkovic, P., (2002) CARE-W: WP2 – description And validation of technical tools D3 – report on models description. Care-w, EU project Under the 5th framework programme, contract n°EVK1-CT-2000-00053.
- Environmental Protection Agency, US. EPA.(2002). Decision-Support tools for Predicting the Performance of Water Distribution and Wastewater Collection Systems, EPA/600/R-02/029. www.epa.gov/ORD/NRMRL/pubs. pp7-46.
- Environmental Protection Agency, US.EPA.(2003). Asset Management: A Handbook for Small Water Systems One of the Simple Tools for Effective Performance (STEP) Guide Series. EPA /816/R-03/016
- Federal Highway Administration, FHWA: Office of Asset Management (1999). Asset Management Primer. U.S. Department of Transportation.

- Feng, C-W, Liu, L, Burns, S.A.(1997). Using genetic algorithms to solve construction time-cost trade-off problems. *Journal of computing in civil engineering*. Vol.11, N°3. pp 184-189.
- Fonseca,C.M and Fleming,P.J.(1993). Genetic algorithms for multiobjective optimisation: Formulation, discussion and generalization. In *Genetic Algorithms: Proceedings of the 5th International Conference*,pp416-423. Morgan Kaufmann.
- Frondistou-Yannas S and Saegrov S (2000). *UtilNets: a water mains rehabilitation decision-support*
- Giard, V. (2004). *Gestion de projet* . Ed Economica. ISBN 2-7178-2168-6. Paris. France.
- Goldberg,D.E.(1994). *Algorithmes Génétiques: Exploration, Optimisation et Apprentissage Automatique*, ISBN 2-87908-0054-1, Editions Addison-Wesley, Paris, France.
- Hadzilacos T, Kalles D, Preston N, Melbourne P, Camarinopoulos L, Eimermacher M, Kallidromitis V, Frondistou-Yannas S and Saegrov S (2000). *UtilNets: a water mains rehabilitation decision-support system*. *Computers, Environment and Urban systems* n° 24, pp215-232.
- Halhal,D,G.A.Walters, D.Ouazar and D.A.Savic (1997). *Water Network Rehabilitation with Structured Messy Genetic Algorithm*. ASCE, *Journal of Water Resources Planning and Management* Vol.123, n°3,137-146.
- Hegazy,T.(1999). Optimization of Resource Allocation and Levelling Using Genetic Algorithms. *Journal of Construction Engineering and Management*. Vol n°125,pp167-175.
- Herz R.K. (1996). Ageing processes and rehabilitation needs of drinking water distribution works Exploring rehabilitation needs and strategies for water distribution networks. *Journal of Water SRT - Aqua*, Vol. 47,pp 275-283.
- Harrouz, O. (1995). *Conséquences de la squelettisation des réseaux d'alimentation en eau potable sur le diagnostic, modèle de simplification*. Thèse de doctorat en génie de l'environnement. Université Louis Pasteur. Strasbourg. France. 120 p.
- Holland, J.H. (1975). *Adaptation of Natural and Artificial System*. Univ.of Mich. Press, Ann Arbor, USA.
- Horn, J., Nafpliotis, N. and Goldberg, D.D (1994). A niched Pareto Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization. In *Proceedings of the first IEEE conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence*, pp82-87, Toronto, Canada.
- Hoskins, R.P., Brint., A.T. ,Strbac., G.(1998). A structured approach to asset management within the electricity industry, *Utilities Policy*, n° 7. pp 221-232.
- Hyassat, M.(2001). Applying Modified Minimum Moment Method to Multiple Resource Levelling, *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol n°127. pp192-198. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 120, n°5. pp. 674-692

- Kim, J.H., Mays, L.W.(1994) . Optimal Rehabilitation Model for Water-Distribution Systems.
- Kleiner, Y, Rajani, B.(2001). Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models. Urban water Vol n°3, pp131-150.
- Kleiner, B. R. Y. (2001). Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models. Urban Water Vol n° 3. pp 151-164.
- Kleiner, Y. (1996). Water distribution network rehabilitation: selection and scheduling of pipe rehabilitation alternatives. Departement of Civil Engineering. Toronto, University of Toronto.
- Knowles, J and Corne, D.(1999). The Pareto archived evolution strategy: A new baseline algorithm for multiobjective optimisation. In Proceedings of the Congress on Evolutionary computation, pp98-105, IEEE Service Center.
- Koehl, J. (2003). Les choix d'investissement. Ed Dunod. ISBN : 2100069268. Paris. p128.
- Kolisch, R., Padman, R.(2001). An Integrated Survey of Project Deterministic Scheduling, OMEGA. International Journal of Management Science, n° 29. pp249–272.
- Le Gauffre, P., Baur, R, Laffrèchine. K., Schiatti, M., Volta, M., Cintoli, S. (2002b). Survey of multi-criteria techniques and selection of relevant procedures. D7 report. CARE-W (Computer Aided Rehabilitation of Water networks), EU project under the 5th Framework Program, contract n°EVK1-CT-2000-00053, 31 p.
- Le Gauffre, P., Laffrèchine, K., Baur, r., Di Federico, V., Eisenbeis, P., Kønig, A., Kowalski, M, Sægrov, S., Torterotot, J.P., Tuhovcak, L., Wery, C.(2002a). Criteria for the prioritisation of rehabilitation projects. D6 report. CARE-W (Computer Aided Rehabilitation of Water networks), EU project under the 5th Framework Program, contract n°EVK1-CT-2000-00053. 70 p.
- Lippai, I., Heaney, J.P., and Laguna, M. (1999). Robust water system design with commercial intelligent search optimizers. Journal of Computing in Civil Engineering, pp. 135-143.
- Lounis. Z .and VANIER.D.J, (1998). Optimization of bridge maintenance management using markovian models. Proceedings of the International Conference on Short and Medium Span Bridges, Proceedings CALGARY, Canda.
- Malandain J., (1999) Modélisation de l'état de santé des réseaux de distribution d'eau pour l'organisation de la maintenance. Étude du patrimoine de l'agglomération de Lyon. Thèse de Doctorat n° 99 ISAL 0040 de l'INSA de Lyon, URGC / Hydrologie Urbaine, 206 p.
- Moglia, M., Burn, L.S., Meddings, S.(2006). Decision support system for water pipeline renewal prioritisation. www.itcon.org/2006. pp 237-256
- Mousseau, V, F., Naux, J-Ph (2001). "Using assignment examples to infer weights for ELECTRE TRI method: Some experimental results." European Journal of Operational Research N° 130: pp.263-275.

- Ormsbee, L, Kessler, A (1990). Optimal Upgrading of Hydraulic-Network Reliability. *Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE)*. Vol. 116, n°. 6. pp. 784-802.
- Osman,M.,S.,Abo-Sinna,M.A., Mousa,A.A.(2004). An effective genetic algorithm approach to multiobjective reouting problems (MORPs). *Applied Mathematics and Computation*. Available online at www.sciencedirect.com.
- Rajani, B., Kleiner, Y. (2001). Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physicallybased models. *Urban water* n° 3. pp177-190.
- Rajani, B., Kleiner., Y .(2001). Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models. *Urban water* Vol n°3, pp177-190.
- Rossman, L.A.(2000). *Epanet2 Users Manual*. US. Environmental Protection Agency, EPA. USA.
- Røstum, J. (2000). Statistical modelling of pipe failures in water networks. PhD thesis, 2000:12, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. ISBN 82-7984-033-8.
- Roudenko,O.(2004). *Application des Algorithmes Evolutionnaires aux Problèmes d'Optimisation Multi-objectif avec Contraintes*.Thèse de Doctorat. Ecole Polytechnique, Paris,France.
- Schaffer,J.D.(1985). Multiple objective optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms. InJ.J.Grefenstette, Editor, *Proceedings of the 1st International conference on Genetic Algorithms*,pp93-100.
- Shamir, U. and Charles.D.D.Howard (1979). An analytic approach to scheduling pipe replacement. *AWWA* Vol 71 n°3: pp248-258.
- Simpson, A. R., Dandy, G. C., and Murphy, L. J. (1994). "Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol 120, n°4,pp 423–443.
- Tadahiko,M., Hisao, I., Hideo, T. (1996). Multi-objective genetic algorithm and its applications to flow shop scheduling. *Computers industrial engineering*. Vol 30, n°4. pp 957-968.
- Savic, D., Walters,G.(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.
- Sirvinas,N.and Deb,K. (1994).Multi-objective function optimization using non-dominated sorting genetic algorithms. *Evol. Comput.*,2(3),221-248.
- Skipworth P.,Engelhardt M., Cashman A., Savic D.,Saul A., Walters G. (2002). *Whole life costing water distribution network management*. Thomas Telford Publishing Edition. ISBN 072773032 0. London 203 p.
- Son,J, Skibniewski,M.J,1999. (1999). Multiheuristic Approach for Resource Levelling Problem in Construction Engineering :Hybrid Approach. *Journal of construction Engineering and Management*.Vol125, pp 23-31.
- system. *Computers, Environment and Urban systems* n° 24, pp215-232.

- Talbi,E-G. (2005). Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire multi-objectif: Etat de l'art, lifl.fr/~talbi/optim_x.ps .
- Tavernier, Y.(2001). Rapport d'information sur le financement et la gestion de l'eau. Assemblée Nationale, n°3081.
- Todini, E. (2000). Looped water distribution network design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water* n°2. pp115-122.
- Torterotot J.P., Rebelo, M., Werey ,C., Craveiro, J., Guerra, R. (2003). Rehabilitation of water networks: decision-making processes and socio-economic issues. CARE-W Project (Computer Aided Rehabilitation of Water Networks) - Projet du 5ème Programme Communautaire de Recherche et Développement - contrat n°EVK1-CT-2000-00053 - 77 p.
- Vizzavona, P. (1990). Gestion financière, analyse financière, analyse prévisionnelle. Tome 1. Ed Atol. ISBN:2-7111-0585-7. 692 p.
- Wagner, J. M., Shamir, U., Marks, D. H. (1988). Water Distribution Reliability: Simulations Methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol n° 114 n°3, pp 276-294.
- Walski, T.M., Pellicia, A. (1982). Economic analysis of water main breaks, *Journal AWWA*, Vol n° 74,n°3. pp.140-147.
- Walski, T. M., and Gessler, J. (1999). Discussion of Improved design of Anytown distribution network using structured messy genetic algorithms, by G. A. Walters, D. Halhal, D. A. Savic, and D. Ouzar. *Urban Water*, Vol 1 n°2, pp 265–268.
- Werey, C. (2000). Politiques de renouvellement des réseaux d'eau potable. Thèse en génie de l'environnement. Université Louis Pasteur. Strasbourg. France. 162p.
www.epa.gov/safewater. p50.
- Xu,C.,Goulter, C.(1999). Reliability-Based Optimal Design of Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management.*, Volume 125, n° 6. pp. 352-362.
- Zheng, D.X.M, Thomas Ng, .S, Kumaraswamy, M.M. (2005). Applying Pareto Ranking and Niche formation to Genetic Algorithm-Based Multiobjective Time-Cost Optimization. *Journal of construction engineering and management*. Vol. 131, n°1. pp81-91.
- Zitzler,E and Thiele,L.(1998). Tournament selection, niching and the preservation of diversity. Technical report 43,Computer Engineering and Networks Laboratory, ETH, Zurich, Switzerland.
- Zitzler,E, Deb,K.E and Thiele,L.(2000). Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. *Evolutionary Computation Journal*,8(2),125-148.
- Zitzler,E, Laumanns.M and Thiele,L.(2001). SPEA 2: Improving the Strength Pareto Evolutionary algorithm. Technical report 103, Computer Engineering and Networks Laboratory, ETH, Zurich, Switzerland.

COLLOQUES, CONFERENCES ET PUBLICATIONS

POSTER

NAFI A. , WEREY C., LLERENA P. (2006). Decision Support Model for Water Pipes Renewal, Augustin Cournot Doctoral Days, Economics, Management, Finance and Science & Technologies Studies, May 02 - 04, 2006. Strasbourg, France.

COMMUNICATIONS

NAFI A. (2005). La Programmation Budgétaire du Renouvellement des Réseaux d'eau Potable, Proposition d'un modèle d'optimisation basé sur les algorithmes génétiques. Journée de la modélisation au Cemagref- du 03 au 05 Octobre 2005. Clermont-Ferrand, France. 2 p.

NAFI A. (2006). Evaluation de la fiabilité hydraulique sur les réseau d'eau potable. Journée Scientifique et Technique, La gestion patrimoniale des équipements d'eau potable et d'assainissement Décideurs, gestionnaires et chercheurs travaillant en réseau. 17 Janvier 2006. Strasbourg, France. 2 p.

NAFI A. , WEREY C., LLERENA P. (2006). Specific Model for Rehabilitation Scheduling of Water Distribution Systems, Applied Mathematical Programming and Modelling, APMOD'06, June 18-21, 2006. Madrid, Spain, 1 p.

ARTICLES DANS ACTES DE COLLOQUES ET CONFERENCES

NAFI A. , WEREY C., LLERENA P. (2006). La Programmation Budgétaire du Renouvellement des Réseaux d'eau Potable en Utilisant Un Algorithme Génétique Simple, 6^{ème} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation - MOSIM'06 - du 3 au 5 avril 2006 - Rabat – Maroc, 10 p.

NAFI A. , WEREY C., LLERENA P. (2006). Scheduling of Water Distribution Systems Using a Multiobjective Approach, 7th International Conference on MultiObjective and Goal Programming- MOPGP'06, June 12-14,2006- Old city Hall of tours, France, 4 p.

NAFI A. , WEREY C., LLERENA P. (2006). Scheduling Water Networks Renewal Using Hybrid Optimization Model, Joint International conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, June 14-16 ,2006, Montreal, Canada, 10 p.

ARTICLES SOUMIS DANS REVUES, JOURNAUX

NAFI A. , WEREY C., LLERENA P. (2006). Approche d'optimisation multi-objectif pour le renouvellement des réseaux d'eau potable, RAIRO-Operations Research, (Soumis juin 2006), 16 p.

NAFI A. , WEREY C., LLERENA P. (2006). A Multi-Objective Optimization Approach for Water Pipes Renewal Planning , Canadian Journal of Civil Engineering, CNRC, (Submitted June 2006), 15 p.

NAFI A. , WEREY C., LLERENA P. (2006). Scheduling Renewal of Water Distribution Systems Using a Multiobjective Approach. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems (LNEMS) series, Springer. (Submitted August 2006), 10 p.

Annexes

1. Le financement du renouvellement des réseaux AEP

L'investissement de renouvellement met en jeu la responsabilité de la collectivité propriétaire. L'intérêt est de rechercher un équilibre entre solidarité financière et responsabilité des collectivités distributrices. Le recours à la solidarité constitue une solution pour traiter le problème de renouvellement en milieu rural. Le regroupement au sein de syndicats de taille plus au moins importante et parfois départementale est utilisé par les collectivités pour remédier aux contraintes financières.

Une étude menée par (Debi & Risser, 1994)(Alexandre, 1993)(Paulet & Savrot, 1999) présente quatre systèmes départementaux spécifiques de financement du renouvellement qui sont ceux de la Vendée, de la Charente-Maritime, de l'Aube et du Rhône. Elle identifie la problématique liée au financement du renouvellement des réseaux potables :

- situation financière contraignante pour les collectivités :
- coût élevé de l'endettement ;
- absence ou mauvaise utilisation de l'autofinancement ;
- recours limité aux placements rémunérés.

Nous distinguons plusieurs sources de financement du renouvellement pour les services d'eau et d'assainissement à savoir :

- l'autofinancement
- les subventions
- l'emprunt

2.1 L'autofinancement

Il permet de générer un financement de façon collective ou individuelle par différents mécanismes (prélèvements sur excédents, surtaxe du prix de l'eau, cotisation). Pour (AWWA 1998) l'autofinancement passe par la réduction des coûts d'exploitation du service de l'eau par l'économie d'énergie et l'amélioration du rendement du réseau. Ainsi les économies effectuées peuvent être utilisées pour le renouvellement des réseaux. L'avantage de l'autofinancement est qu'il représente :

- une source de financement à long terme pour un besoin de renouvellement non prévu ;

- un gain pour les services distributeurs liés au non recours à l'emprunt, aux économies d'échelle (globalisation des travaux, globalisation des emprunts) ;
- un moyen de limiter l'incidence du renouvellement sur le prix de l'eau.

Deux cas de figure sont possibles , l'amortissement (dit technique) et le placement.

2.1.1 L'amortissement

Il représente une source importante d'autofinancement. Amortir consiste à étaler une charge irréversible sur une période de temps déterminée. L'amortissement est lié à un investissement pour chaque immobilisation, l'entreprise doit s'interroger sur son amortissement selon que cet investissement est financier ou considéré comme un bien.

On définit alors la notion **d'amortissement financier** qui est la valeur du remboursement en capital des emprunts contractés.

L'amortissement de caducité qui exprime la valeur étalée sur la durée du contrat de gestion déléguée restant à couvrir des immobilisations mises dans le domaine public par le gestionnaire délégué.

L'amortissement « technique » définit comme la valeur de la dépréciation irréversible subie par un bien durable au cours du temps du fait de son utilisation (s'applique à l'ensemble des bien corporels et incorporels) immobilisés(exception faite pour les terrains). L'amortissement technique décrit la dépréciation économique : il représente le coût d'usage des immobilisations.

Après la loi sur la décentralisation, les collectivités locales disposent d'une large autonomie pour gérer leur service de distribution d'eau potable. L'état conserve une responsabilité de contrôle en matière d'administration et finance.

En l'absence de la pratique de l'amortissement technique(1992) l'instruction M49¹ réitère l'obligation de pratiquer l'amortissement technique sans prévoir une dérogation à cette obligation.

La comptabilité du service de distribution d'eau potable doit être tenue selon :

- un plan comptable spécifique permettant de gérer le service selon son statut de SPIC.
- l'amortissement représente un coût dont le SPIC doit tenir compte.
- un budget individualisé permettant de distinguer au service ses recettes et dépenses de celle de la collectivité. Le patrimoine immobilisé du service devant être amorti.

1 . Instruction M49 applicable au 1er janvier 1992 par les services d'eau de plus de 5000 habitants qui prévoit la comptabilisation de l'amortissement technique quelle que soit la taille et le statut des régies.

2.1.1.1 Inscription de l'amortissement technique au budget

L'amortissement est inscrit à la fois en dépense à la section d'exploitation (compte 68, dotations aux amortissements et provisions) et en recette à la section investissement (compte 28, amortissement). Une charge non décaissable implique investissement.

2.1.1.2 Méthode de calcul

La dotation d'amortissement résulte de l'étalement de la base de calcul sur la durée d'utilisation de l'immobilisation. Cette durée doit être fixée les gestionnaires du service pour chaque type d'immobilisation, les taux d'amortissement doivent être déclarés et inscrits dans un tableau d'amortissement.

La dotation d'amortissement technique peut être constante : amortissement linéaire, décroissante : amortissement dégressif ou croissant : amortissement variable : amortissement proportionnel.

2.1.1.3 Pratique de l'amortissement (cas d'une gestion directe)

L'amortissement doit pouvoir servir pour couvrir l'amortissement financier, il est donc conseillé d'ajuster le rythme de l'amortissement technique à l'amortissement financier. Cela revient à adopter un rythme progressif d'amortissement. L'amortissement est un mécanisme systématique.

2.1.1.4 Pratique de l'amortissement (cas de gestion déléguée)

Selon le contrat de délégation :

- si c'est une concession, le concessionnaire doit assurer l'intégralité des charges d'investissement (nouveau ou renouvellement) ;
- si le contrat est un affermage répartition des charges d'amortissement peut être complexe collectivité-fermier, la charge de renouvellement doit être supportée soit par la collectivité, soit par le fermier (selon contrat).

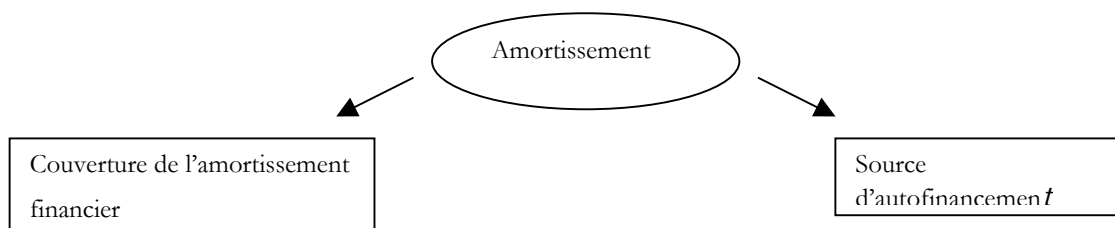


Figure .1. la pratique de l'amortissement

2.1.2 Le placement

La pratique des placements rémunérés est réglementée. Possibilités de placement :

Placement budgétaire des fonds provenant de la cession d'un élément soit par émission de titres ou valeurs du trésor ;

excédent de trésorerie peut faire l'objet d'un placement budgétaire.

Ces placements sont possibles qu'après accord du Trésor Public, les SPIC exploités sous forme d'une régie dotée d'une autonomie financière ou de la personnalité morale qui ont le droit de placer leurs valeurs obligatoires ou facultatives en valeurs du trésor.

2.2 L'emprunt

Il présente l'avantage de mettre à la disposition des collectivités de liquidités pour palier à d'éventuelles dépenses imprévues. Cependant en raison des taux d'intérêts pratiqués, l'emprunt ne se révèle pas un bon moyen de financement du renouvellement à cause de l'amortissement financier qu'il peut engendrer. Avec la décentralisation, plus de taux privilégiés pratiqués. Les collectivités se retrouvent avec des annuités de remboursements des emprunts qui représente plus de 30 % du prix de l'eau (Debi & Risser,1994).

2.3 Les subventions

Souvent possible si le renouvellement n'est pas à l'identique. Possibilité d'avoir des subventions d'organismes : des Agences de l'eau, Départements, la Communauté Européenne.

1. Les modes de gestion des services d'eau

Il existe plusieurs modes de gestion (Bourdin, 1998) des services d'eau, régie, délégation, affermage, concession. Chaque mode de gestion présente des particularités en terme de gestion de la maintenance du réseau et de ses équipements. Le renouvellement des conduites est généralement à la charge de la commune propriétaire du réseau AEP sauf dans le cas d'une concession où le délégataire assure le renouvellement du réseau. Indépendamment du mode de gestion du service d'eau, l'article 2224-1 du CGCT est précis en matière de financement des services : « Les budgets des Services Publics à caractère Industriel ou Commercial exploités en régie, affermés ou concédés par les communes doivent être équilibrés en recettes et en dépenses.

1.1 La gestion directe

La gestion est dite directe quand le service est exploité dans le cadre d'une régie où la gestion du service public est assurée par le conseil municipal ou un conseil de communauté de communes ou groupement.

La gestion directe s'effectue dans le cadre d'une structure juridique : régie. Celle ci peut se faire selon trois catégories : régie directe, régie avec autonomie financière et régie disposant de la personnalité morale. La gestion en régie s'effectue sous contrôle direct du conseil municipal. Une régie est un service public à caractère industriel et commercial (SPIC) dont la mission est l'exploitation du réseau AEP et l'approvisionnement des abonnés en eau potable en respectant un ensemble de conditions liées à l'équité dans l'accès à la ressource en eau, la transparence et la continuité du service. C'est donc la commune ou le syndicat de communes qui assument la responsabilité complète en matière d'investissement et de fonctionnement du service d'eau.

1.1.1 La gestion en régie directe

Mode le plus courant, fonctionnement et contrôle sous la responsabilité de l'assemblée délibérante (conseil municipal, comité syndical). Sur le plan juridique pas de personnalité morale, ni d'autonomie financière, c'est l'assemblée délibérante qui fixe les redevances et les prix à la charge des usagers.

1.1.2 La gestion en régie autonome

Régie dotée de l'autonomie financière, la gestion directe est assurée par l'assemblée délibérante, décision en matière : d'approbation du budget, fixation des tarifs, passation de marchés.

Nomination d'un directeur (par le maire après consultation du conseil d'exploitation, rôle consultatif) qui veille au bon fonctionnement du service.

1.1.3 La gestion en régie dite personnalisée

Autonomie sur le plan financier et doté de la personnalité morale qui assure une gestion complétée du service d'eau d'un point de vue économique, administrative, financier et juridique. Disposant d'organes de gestion propre, constituant un établissement public à part entière, administré par un conseil d'administration et un directeur. C'est l'assemblée institutive qui fixe le tarif de l'eau et/ou la redevance d'assainissement.

1.2 La gestion déléguée

La gestion déléguée assure la gestion du service d'eau et d'assainissement par un opérateur privée à travers un contrat dont la durée est variable en fonction des prestations demandées et qui stipule la responsabilité du délégataire en matière d'exploitation et d'investissement. La loi sapin du 29 Janvier 1993 soumet les délégataires à des contraintes et obligations spécifiques.

1.3 La concession

Mode absolu de délégation, par cette convention on délègue la gestion du service à une personne publique, physique ou morale de droit public ou privé pendant une période contractuellement déterminée moyennant le droit de percevoir des redevances payées par les usagers.

Avec la concession, le délégataire est responsable de la gestion du service public à ses risques et périls. Ainsi, il est responsable de la prestation fournie aux usagers et vis à vis des tiers (notamment en cas d'accident).

1.4 L'Affermage

Forme la plus utilisée dans le secteur de l'eau et de l'assainissement. Le délégant confie à un tiers (le fermier) à ces risques et périls l'exploitation d'un service public. Les investissements relèvent de la compétence de l'autorité délégante. Le Fermier est l'interlocuteur de l'utilisateur, il assure la facturation, perçoit les redevances et assume la responsabilité juridique du fonctionnement du service.

1.5 La régie intéressée et la gérance

1.5.1 La régie intéressée

C'est la collectivité qui finance elle-même le service et confie son exploitation et l'entretien à une personne physique et morale, de droit privé ou public moyennant une rémunération, non supportée par les usagers mais proportionnelle au chiffre d'affaire réalisé.

1.5.2 La gérance

La rémunération n'est pas fonction de l'évolution de l'activité du service (chiffre d'affaire). ce mode de gestion est fondé sur les mêmes bases que le contrat de régie intéressée, le contrat de régie se distingue dans la mesure où la collectivité décide seule de la fixation des tarifs :

1. la collectivité assume à ses risques et périls le fonctionnement du service, conserve les bénéfices mais doit prendre en charge les déficits et le financement du service,
2. La rémunération du gérant est forfaitaire,
3. C'est le gérant qui perçoit les recettes et assure la facturation.

Tableau 1. Les modes de gestion des services publics

Mode de gestion	Exploitation	Financement	Equipements	Investissement/renouvellement
Régie	Commune ou syndicat de commune	Prix de l'eau, redevance prélevée sur l'utilisateur	Propriété de la commune	Financé par la commune ou syndicat de communes
Concession	Par le délégataire	Prix de l'eau, redevance prélevée sur l'utilisateur	Propriété de la commune	Financé par le délégataire
Affermage	Par le délégataire	Une partie de la redevance prélevée sur l'utilisateur, l'autre partie revient à la commune	Propriété de la commune	Financé par la commune sauf pour les équipements électromagnétiques qui sont à la charge du délégataire.
Gérance	Par le délégataire	Redevance prélevée par la commune et rémunération forfaitaire du délégataire	Propriété de la commune	Financé par la commune
Régie intéressée	Par le délégataire	Redevance prélevée par la commune et rémunération du délégataire par intéressement à l'exploitation	Propriété de la commune	Financé par la commune

Dans le cadre de la thèse nous nous intéressons aux régies. Nous présentons l'instruction comptable M49 obligatoire depuis 1992 pour les services d'eau de plus de 5000 abonnés et les

différents modes de gestion des services de l'eau en mettant l'accent sur la gestion budgétaire et la pratique de l'amortissement.

Les conduites d'alimentation représentent des immobilisations, qui sont amorties ainsi que les autres organes du réseau sur une durée de vie comptable qui est d'environ 70 ans pour les conduites d'eau. La pratique de l'amortissement génère une ressource financière qui peut contribuer au financement des travaux de renouvellement, le reste est généralement assuré à l'aide d'emprunts ou de crédits.

1. Détermination de la probabilité de croisement

Nous avons effectué plusieurs simulation pour la détermination de la probabilité de croisement P_c . Les autres paramètres de l'algorithme génétiques restent inchangés avec une taille de la population $m=200$, un nombre de génération $gen=100$ et une probabilité de mutation $P_m=0.015$.

Les résultats obtenus sont illustrés par les figures ci-dessous.

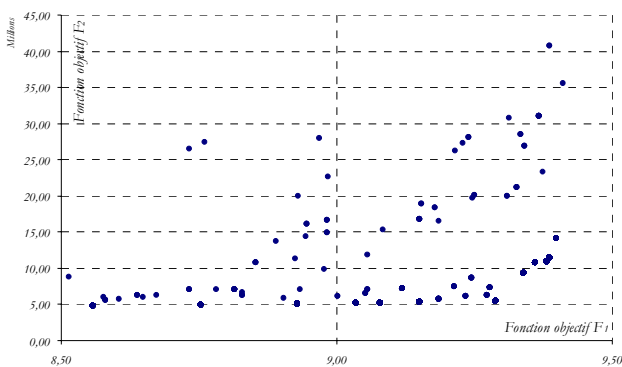


Figure 1. Solutions obtenues pour $P_c=0.90$
 $P_m=0.015$, $m=200$ et $gen=10$

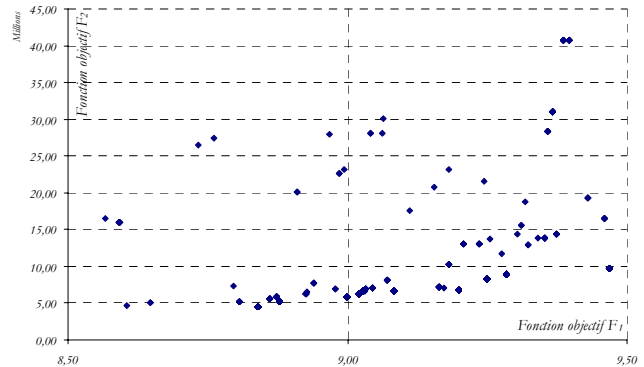


Figure 2. Solutions obtenues pour $P_c=0.95$
 $P_m=0.015$, $m=200$ et $gen=100$.

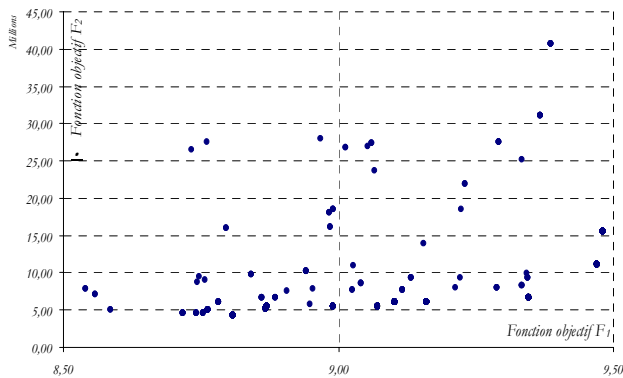


Figure 3. Solutions obtenues pour $P_c=1.00$
 $P_m=0.015$, $m=200$ et $gen=100$.

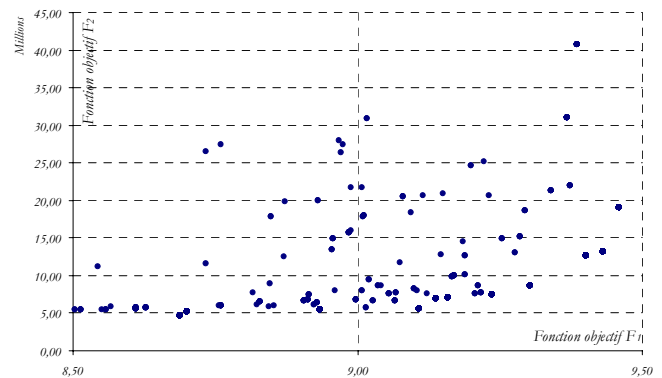


Figure 4. Solutions obtenues pour $P_c=0.85$
 $P_m=0.015$, $m=200$ et $gen=100$.

2. Détermination de la probabilité de mutation

Les simulations illustrées ci-dessus ont permis de calculer la métrique C présentées dans le Chapitre 5. Cette métrique permet de comparer les résultats des simulations. La probabilité $P_c=0.90$ semble donner les meilleurs résultats. Nous fixons la probabilité de croisement et modifions la probabilité de mutation. Les résultats des simulations effectuées sont les suivants :

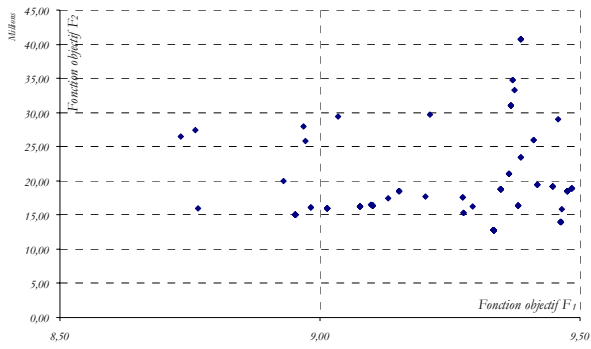


Figure 5. Solutions obtenues pour $P_c=0.90$
 $P_m=0.10$, $m=200$ et $gen=100$.

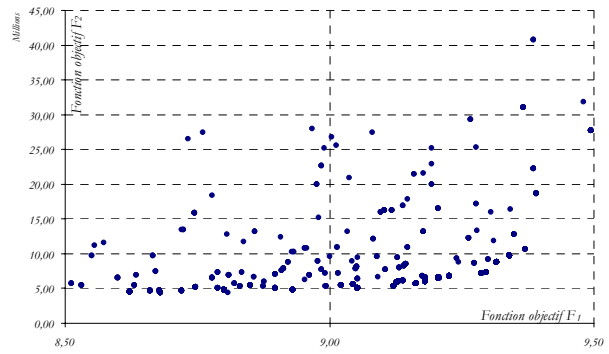


Figure 6. Solutions obtenues pour $P_c=0.90$
 $P_m=0.025$, $m=200$ et $gen=100$.

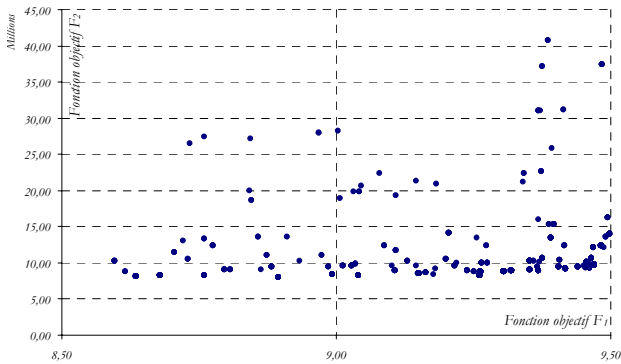


Figure 7. Solutions obtenues pour $P_c=0.90$
 $P_m=0.05$, $m=200$ et $gen=100$.

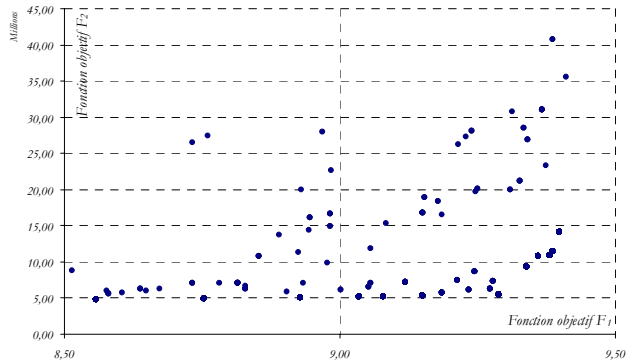


Figure 8. Solutions obtenues pour $P_c=0.90$
 $P_m=0.015$, $m=200$ et $gen=100$.

Résumé

Le travail de thèse porte sur la problématique de programmation du renouvellement d'infrastructures publiques faisant apparaître la notion de **réseau physique** : les réseaux d'autoroutes, réseaux de ponts, réseaux électriques, réseaux de transport et plus particulièrement les réseaux d'Alimentation en Eau Potable. En effet l'exploitation de ces infrastructures qui subissent l'usure physique et l'obsolescence technique nécessite la remise à niveau de leur performance dans une démarche d'amélioration continue, ce qui rend la réalisation de travaux de renouvellement indispensables pour pérenniser l'accès à un service donné. Ils représentent des investissements de modernisation dont le but est de réduire les coûts d'exploitation et de maintenance des infrastructures existantes en améliorant leur fonctionnement. Ces investissements ne génèrent pas nécessairement de nouveaux flux financiers « *Cash-Flow* », d'où la difficulté pour les services publics à les supporter. Ils représentent des immobilisations et un patrimoine dont la durée de vie est importante. La gestion du patrimoine ou « *Asset Management* » est une approche qui permet de suivre l'évolution d'un patrimoine et d'anticiper les travaux à réaliser pour son maintien en service tout au long de sa durée de vie. La mise en place d'une telle approche nécessite la prise en compte dans le processus de décision de critères à la fois économiques, techniques et sociaux. Ce travail propose un modèle d'aide à la décision qui s'inspire de cette approche permettant d'évaluer les besoins en renouvellement, de déterminer les priorités et de programmer dans le temps la réalisation des travaux sur un horizon donné de manière pluriannuelle. Nous considérons des sources d'incertitude liées à l'état du patrimoine et la disponibilité des ressources financières requises. Dans le cadre de la thèse, ce patrimoine est constitué par les conduites formant les réseaux d'Alimentation en Eau Potable (AEP). Le modèle élaboré propose une séquence acceptable d'interventions sur le réseau en identifiant les conduites devant faire l'objet de travaux, ainsi que la nature des interventions à effectuer. Ceci, en tenant compte de contraintes liées à la disponibilité des ressources financières et aux prescriptions techniques de fonctionnement du réseau sur un horizon de planification donné, ce qui nécessite un lissage des ressources financières dans le temps. Le modèle utilise une optimisation multi-objectif basée sur l'optimum de Pareto, faisant appel à un algorithme génétique spécifique couplé avec un logiciel de simulation hydraulique pour la recherche de politiques de renouvellement acceptables. Il propose une démarche adaptée à la réalité du terrain pour la détermination d'un ensemble de solutions viables, parmi lesquelles le gestionnaire du réseau d'eau peut choisir une politique de renouvellement traduisant une programmation pluriannuelle des travaux de renouvellement.

Mots-clés : algorithme génétique, aide à la décision, estimation budgétaire, fiabilité, gestion du patrimoine, réseau AEP, renouvellement, programmation pluriannuelle, optimisation multi-objectif, simulation hydraulique.

Abstract

The thesis deals with the problematic of the renewal programming of public infrastructures built in the within a network structure: Highway networks, bridges networks, electrical supply networks, transport networks and in particular the water networks. A sustainable management of infrastructure assets is required in order to improve continuously their performance. Renewal works are needed to ensure the continuity of the service access, to reduce operations costs, maintenance costs and enhance the performance of the infrastructures. This investment do not generate necessarily a cash flow that cause a difficulty for the public utilities to support them. It represent also an asset and a patrimony with important service life. The asset management allows monitoring of infrastructures and programming the required works to be implemented to ensure a right operation of infrastructure over their service life. This approach need to take into the decision making process economic, technical and social criteria. This work propose a decision making tool inspired from asset management approach that allows to assess the required renewals , to select and program over a given time step the required annual works. We consider uncertainty sources linked with the state of the asset and the availability of financial resources. The asset considered in the thesis is consisted of the pipes forming the water networks. The developed tool propose an acceptable sequence of interventions on the water network by the identification of pipes which need renewal work and allows to identify the nature of the required intervention according to constrained related to available financial resources and technical conditions of water network operation over a given time step. The model uses a multiobjective optimisation using the Pareto optimality with the help of a specific genetic algorithm and hydraulic simulation software for the search of feasible renewal policies, the selection of the right policy among proposed one remains to water utility manager.

Key-words : genetic algorithm, decision making, budgeting, reliability, asset management, water networks, renewal, annual programming, multiobjective optimisation, hydraulique simulation.