

Thèse présentée pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université Louis Pasteur
Strasbourg I

Discipline : Sciences de l'ingénieur

Par Olivier Chesneau

Un outil d'aide à la maîtrise
des pertes dans les réseaux
d'eau potable : la modélisation
dynamique de différentes
composantes du débit de fuite

Soutenue publiquement le 27 novembre 2006 à Strasbourg

Membres du jury

Directeur de thèse : Bernard Brémond, Directeur de Recherche, Cemagref

Rapporteur interne : Robert Mosé, Professeur, ENGEES

Rapporteur externe : Pascal Le Gauffre, Maître de Conférence, INSA de Lyon

Rapporteur externe : Alain Mailhot, Professeur, INRS Québec

Examineur : Thierry Leviandier, Docteur, ENGEES

Membre invité : Frédéric Blanchet, Direction Technique Veolia Eau

Remerciements

Prix Bernard Brémond : Bernard Brémond himself, du sur-mesure, une phrase bien alambiquée pour remercier cet excellent orateur jamais à court de bonnes idées, fort agréable à côtoyer, phrase dont il ne pourra m'ôter la paternité et qu'il ne pourra cacher à la face du monde comme la plupart de celles qui s'étaient malencontreusement glissées au sein de cette thèse, merci Bernard d'avoir de votre œil avisé et en accord avec votre expérience simplifié ce texte, au point que même moi je l'ai compris.

Prix de la vista statistique et de l'explosivité neuronale : Yves, un grand merci pour toutes les bonnes idées.

Prix « oui elle/il est là, je vous la/le passe » des colocataires : Sandrine et Peng, entre Montauban et Chine, festival d'accents !

Prix Caméra Café : l'ancienne équipe ORH, de sacrés personnages !

Prix Sigmund Freud – Thierry Roland des meilleurs multilogues : Gilou de Lacanou, Kiki, Ludo le Grand, Ludo le Petit, Sined, Vince, merci pour les enflammades.

Prix Biba Rustica Midi Olympique des filles aux pieds nus : Anso, Béné, Grattou, Jeanne, Sandy, dites, vous me prêteriez vos sandales ?

Prix Goldeneye de la relecture éclairée : Cécé, merci d'y avoir consacré du temps, bon vent au pays où il pleut tout le temps !

Prix du remettage de pendule à l'heure : la famille, vous êtes dans le vrai, tous. Faut pas s'en faire, maintenant ça y est. Presque...

Et puis il y a des aides qui n'ont pas de prix. C'est injuste. C'est sans doute celles qui valent le plus. Des aides de tous les jours, sur tous les plans. Des aides sans qui il n'y aurait même pas de remerciements du tout. Des aides indispensables... Merci Soizic.

Il y a quelques années je t'annonçais mon bac, t'avais pas bien compris à l'époque, et c'était pas grave, je t'annonce une thèse aujourd'hui, comment t'expliquer, je sais pas, y en a qui disent que tu pourrais être fière...

(Attendez voir... C'est quoi exactement ces remerciements ? C'est juste pour la thèse ou pour la vie en général ? Non parce que si c'est pour en général faut que je rajoute mes grands parents, magnifiques, pis aussi MunoMinique, parce que waouh, ce sont des gens rudement bien. Ah, c'est que pour la thèse ? Bon, tant pis alors, je le ferai pas.)

Table des matières

Introduction générale	15
CHAPITRE 1.	
LA REDUCTION DES FUITES DANS LES RESEAUX D'EAU POTABLE : UN DES ENJEUX DE LA GESTION PATRIMONIALE	19
1. Enjeux techniques du bon état patrimonial	22
1.1. Notion de patrimoine dans les réseaux d'eau potable : définition et spécificités	22
1.1.1. Un bien commun à préserver	22
1.1.2. Le réseau d'eau potable parmi les réseaux techniques urbains	23
1.2. Minimisation du nombre de casses	24
1.2.1. Nature et facteurs principaux des casses	24
1.2.2. Gêne aux usagers	25
1.3. Réduction des pertes et des fuites	25
1.3.1. Nature et origine des fuites	25
1.3.2. Conséquences des fuites	28
1.4. Amélioration de la qualité de l'eau	29
1.4.1. Conduites dégradées et temps de séjour	29
1.4.2. Manifestations d'une eau altérée : risque sanitaire, désagréments gustatifs et olfactifs, eaux rouges	30
2. Qualification de l'état patrimonial d'un réseau	32
2.1. Connaître l'état du patrimoine par l'observation des défaillances	32
2.1.1. Difficulté à définir l'état technique global	32
2.1.2. Difficulté à prendre en compte l'influence de la gestion	32
2.2. La mesure de performance comme outil d'évaluation et de gestion	34
2.2.1. Portée de la mesure de performance pour les réseaux d'eau potable	34
2.2.2. Critères pour élaborer un indicateur de performance	36
2.2.3. Principaux indicateurs de performance techniques existant dans le domaine des casses, des fuites et de la qualité de l'eau	37
2.2.4. Limites associées à la mesure de performance	47
3. Evolution de l'état patrimonial	49
3.1. Gestion anticipée : planification des actions à partir des valeurs d'indicateurs attendues	49
3.2. Outils disponibles dans le domaine des casses : les modèles de prévision	50
4. Cas des fuites : une approche nouvelle pour lier patrimoine et gestion	53
4.1. Appréhender les fuites dans les réseaux : estimation quantitative et réduction	53
4.1.1. Sectorisation et débit de fuite	53
4.1.2. Recherche de fuites, réhabilitation et renouvellement des conduites	56
4.2. Limites et insuffisances de l'existant	60
4.2.1. Rendement et indices de pertes	60
4.2.2. Méthodologie Lambert	62
5. Objectifs de la thèse	64

CHAPITRE 2.

PRESENTATION DES DONNEES DE L'ETUDE : DESCRIPTION, VALIDITE, ANALYSE **65**

1. Nature des données de l'étude	68
1.1. Données initialement souhaitées	68
1.2. Données disponibles	69
1.2.1. Chroniques de débits	70
1.2.2. Chroniques de réparations	71
1.2.3. Données patrimoniales et d'exploitation	74
1.3. Fiabilité des données	76
1.3.1. Sources d'erreur sur la mesure du débit et élimination des secteurs non conformes	76
1.3.2. Incertitudes sur la bonne retranscription des données de réparations	78
1.3.3. Approximations sur les données patrimoniales et d'exploitation	79
1.3.4. Avantage d'exploiter des chroniques longues	79
1.4. Choix des secteurs d'étude à des fins de modélisation	80
1.5. Analyse visuelle des chroniques et politiques de gestion déduites en matière de recherche de fuites	81
1.5.1. Recherche de fuites initiée par un événement ponctuel	82
1.5.2. Recherche de fuites imposée par des contraintes extérieures	82
2. Pertinence de la distinction entre réparations sur détection visuelle ou sur recherche de fuites dans l'explication des débits observés	84
2.1. Modèle de différence relative	84
2.1.1. Formulation du modèle, fonctionnement et hypothèses associées	84
2.2. Procédure de calcul	86
2.3. Résultats	86
2.3.1. Valeur des paramètres et restitution graphique	86
2.3.2. Interprétation	89
2.4. Conclusion	95

CHAPITRE 3.

MODELES DYNAMIQUES BASES SUR UN TAUX D'APPARITION DES FUITES **97**

1. Objectifs	100
1.1. Formuler nouvellement les fuites diffuses	100
1.2. Séparer les fuites diffuses et les fuites non repérées	100
1.3. Proposer un outil de réduction des fuites au travers de la gestion du patrimoine	102
2. Hypothèse sur le processus d'apparition des fuites	103
3. Modèle d'apparition des fuites	106
3.1. Formulation	106
3.2. Procédure de résolution	107
3.3. Résultats	108

3.3.1.	Exemples de restitution graphique : améliorations par rapport au modèle de différence relative	108
3.3.2.	Etude de la valeur des paramètres du modèle d'apparition	111
3.4.	Extensions du modèle d'apparition des fuites	115
3.4.1.	Distinction des réparations sur conduite ou sur branchement	115
3.4.2.	Ajout des fuites diffuses selon la formulation de Lambert	116
3.5.	Conclusion et limites du modèle d'apparition des fuites	119
4.	Modélisation dynamique des différentes catégories de fuites : le modèle trois états	122
4.1.	Processus de transformation des fuites	122
4.2.	Schématisation des processus d'apparition et de transformation des fuites	124
4.3.	Mise en équations	125
4.3.1.	Ecriture du système différentiel	125
4.3.2.	Formulation de base du débit de fuite	132
4.3.3.	Formulation du débit de fuite avec distinction sur les organes hydrauliques réparés	134
4.4.	Résolution et estimation des paramètres	135
4.4.1.	Suppression de degrés de liberté pour les paramètres du modèle	136
4.4.2.	Calcul des paramètres α et q_1	137
4.4.3.	Bilan pour l'estimation des paramètres et contraintes associées	139
4.5.	Résultats directs du modèle trois états	141
4.5.1.	Sensibilité à q_0	142
4.5.2.	Comment choisir q_0 ?	146
4.5.3.	Valeurs des paramètres	150
4.5.4.	Restitution graphique	160
5.	Conclusion	168

CHAPITRE 4.

APPLICATIONS DU MODELE TROIS ETATS A LA GESTION DES FUTES SUR UN RESEAU D'EAU POTABLE 171

1.	Evolution naturelle du débit de fuite et simulation de différentes intensités de recherche de fuites	174
1.1.	Scénarios de passivité du gestionnaire	174
1.1.1.	Nécessité de prévoir l'évolution naturelle des débits de fuite	174
1.1.2.	Exemple d'évolution du débit de fuite à différents horizons pour le Secteur 2	175
1.1.3.	Evolution prévisible du débit de fuite des secteurs de l'étude	176
1.2.	Simulation d'une intensité efficace de recherche de fuites (IERF)	182
1.2.1.	Définition et exemple de calcul	182
1.2.2.	Formulation de l'IERF	182
1.2.3.	Modélisation de la recherche de fuites comme possible outil de gestion	185

2. Etude de l'impact du renouvellement des conduites et des branchements sur le débit de fuite	190
2.1. Mise en place pratique	191
2.1.1. Répercussions du renouvellement sur l'âge moyen du secteur	191
2.1.2. Renouvellement et élimination des fuites	192
2.1.3. Nouvelle formulation du débit de fuite et schéma bilan	194
2.2. Scénarios de renouvellement	196
2.2.1. Exemples	197
2.2.2. Influence du pourcentage de linéaire renouvelé	204
2.2.3. Influence de l'âge moyen renouvelé	205
2.2.4. Influence relative du linéaire et de l'âge moyen des conduites renouvelées	207
3. Une gestion optimale : recherche de fuites et renouvellement	209
3.1. Conditions d'application des scénarios	209
3.2. Scénarios de gestion raisonnée pour les Secteurs 5 et 6	210
3.2.1. Choix des secteurs et échéancier des objectifs	210
3.2.2. Evolution du Secteur 5	212
3.2.3. Evolution du Secteur 6	214
3.3. Bilan	216
Conclusion et perspectives	215
Références bibliographiques	219

Liste des figures

Figure 1. Action et rétroaction du patrimoine et de la gestion sur les désagréments du service de distribution.....	33
Figure 2. Méthodologie envisagée pour la décomposition du débit de nuit.....	68
Figure 3. Représentation graphique des différentes chroniques de débit.....	70
Figure 4. Distribution temporelle spécifique des réparations sur détection visuelle ou sur recherche de fuites.....	73
Figure 5. Principaux défauts des données de débit.	76
Figure 6. Précision défailante de la mesure de débit.....	77
Figure 7. Incertitude sur les données de réparations.	78
Figure 8. Evolution typique attendue pour le débit de fuite.....	80
Figure 9. Campagnes de recherche de fuites dictées par les événements sur le secteur.	82
Figure 10. Campagnes de recherche de fuites préméditées.....	83
Figure 11. Ecart possible entre les courbes mesurée et modélisée.....	87
Figure 12. Valeurs de β_0 en fonction de l'âge moyen.....	90
Figure 13. Valeurs de β_0 en fonction du nombre de branchements.	90
Figure 14. Restitution graphique du modèle de différence relative à trois paramètres pour le Secteur 2.....	92
Figure 15. Restitution graphique du modèle de différence relative à trois paramètres pour le Secteur 9.....	93
Figure 16. Décomposition du débit de fuite et comparaison modèle trois états – modèle formulé par Lambert <i>et al.</i> (1999).....	101
Figure 17. Restitution graphique du modèle d'apparition des fuites pour le Secteur 13.	109
Figure 18. Restitution graphique du modèle d'apparition des fuites pour le Secteur 2.	110
Figure 19. Restitution graphique du modèle d'apparition des fuites pour le Secteur 9.	111
Figure 20. Valeurs de μ en fonction de l'âge moyen du secteur pour le modèle d'apparition des fuites.....	112
Figure 21. Valeurs de Q_u en fonction de la densité de branchements pour le modèle d'apparition des fuites.	115
Figure 22. Processus d'apparition et de transformation des fuites.....	124
Figure 23. Représentation de la densité de probabilité d'une distribution exponentielle de paramètre $\lambda=0,1 \text{ an}^{-1}$	126
Figure 24. Représentation graphique de la fonction de répartition d'une distribution exponentielle de paramètre $\lambda=0,1 \text{ an}^{-1}$	126
Figure 25. Impact d'éventuelles opérations de recherche de fuites avant t_0 sur le système d'équations simplifiées.....	131
Figure 26. Variabilité de μ et d_0 en fonction de q_0	144

Figure 27. Variabilité de μ et d_1 en fonction de q_0 .	144
Figure 28. Représentation des débits modélisé et lié aux fuites diffuses pour $q_0=0,03\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ sur le Secteur 9.	147
Figure 29. Corrélation entre μ et l'âge moyen du secteur pour le modèle trois états.	151
Figure 30. Corrélation entre intensité de réparations et valeur initiale du débit de fuite.	152
Figure 31. Corrélation entre la valeur initiale du débit de fuite et l'âge moyen du secteur.	152
Figure 32. Représentation du produit μt_0 en fonction de l'âge moyen.	153
Figure 33. Corrélation entre d_0 et $N_0(t_0)$.	155
Figure 34. Corrélation entre d_1 et $N_1(t_0)$.	155
Figure 35. Corrélation entre $N_0(t_0)$ et μ .	155
Figure 36. Corrélation entre $N_1(t_0)$ et μ .	155
Figure 37. Corrélation entre q_1 et d_1 .	156
Figure 38. Représentation graphique du Secteur 2 pour le modèle trois états.	161
Figure 39. Représentation graphique du Secteur 9 pour le modèle trois états.	161
Figure 40. Représentation graphique du Secteur 18 pour le modèle trois états.	162
Figure 41. Représentation graphique du Secteur 3 pour le modèle trois états.	163
Figure 42. Représentation graphique du Secteur 10 pour le modèle trois états.	164
Figure 43. Représentation graphique du Secteur 8 pour le modèle trois états.	165
Figure 44. Représentation graphique du Secteur 11 pour le modèle trois états.	165
Figure 45. Représentation graphique du Secteur 6 pour le modèle trois états.	166
Figure 46. Evolution naturelle des fuites sur le Secteur 2 depuis la date de pose.	166
Figure 47. Evolution naturelle des fuites sur le Secteur 11 depuis la date de pose.	167
Figure 48. Evolution naturelle du débit de fuite à 10 ans pour le Secteur 2.	175
Figure 49. Evolution du classement de différents secteur au cours du temps, au regard du débit de fuite global.	178
Figure 50. Evolution naturelle du débit de fuite à dix ans pour le Secteur 9.	179
Figure 51. Evolution naturelle du débit de fuite à dix ans pour le Secteur 10.	179
Figure 52. Evolution naturelle du débit de fuite à dix ans pour le Secteur 16.	180
Figure 53. Simulation de différentes répartitions temporelles des opérations de recherche de fuites sur le Secteur 3.	184
Figure 54. Gestion de la recherche de fuites sur le Secteur 6.	186
Figure 55. Gestion de la recherche de fuites sur le Secteur 5.	186
Figure 56. Gestion de la recherche de fuites sur le Secteur 18.	187
Figure 57. Gestion de la recherche de fuites sur le Secteur 8.	188
Figure 58. Gestion de la recherche de fuites sur le Secteur 2.	189
Figure 59. Etapes de la mise en place du renouvellement au sein du modèle trois états : exemple du Secteur 9.	196

Figure 60. Scénario de renouvellement appliqué au Secteur 2, 10 % du linéaire, 60 ans d'âge.	197
Figure 61. Scénarios de renouvellement unique ou en plusieurs épisodes appliqués au Secteur 6.	198
Figure 62. Relation entre gain réalisé par le renouvellement et âge moyen des conduites à t_r	199
Figure 63. Scénario de renouvellement appliqué au Secteur 9, 50 % du linéaire, âge moyen.	201
Figure 64. Scénario de renouvellement appliqué au Secteur 16, 10 % du linéaire, 60 ans d'âge.	202
Figure 65. Scénario de renouvellement appliqué au Secteur 8, 10 % du linéaire, 60 ans d'âge.	202
Figure 66. Scénario de renouvellement appliqué au Secteur 17, 10 % du linéaire, 60 ans d'âge.	203
Figure 67. Diminution du débit global en fonction du linéaire renouvelé, à âge moyen renouvelé constant : exemple du Secteur 10.	204
Figure 68. Pourcentage de gain sur le débit de fuite en fonction du pourcentage de linéaire renouvelé (Secteur 10, âge moyen des conduites renouvelées : 50 ans).....	205
Figure 69. Diminution du débit global en fonction de l'âge moyen des conduites renouvelées, à linéaire renouvelé constant : exemple du Secteur 11.	205
Figure 70. Pourcentage de gain sur le débit de fuite en fonction de l'âge moyen des conduites renouvelées (Secteur 11, 10 % du linéaire renouvelé).	206
Figure 71. Représentation graphique de la fonction $y=x(I-x)$	208
Figure 72. Représentation graphique des effets du scénario de gestion complet appliqué au Secteur 5.....	212
Figure 73. Représentation graphique des effets du scénario de gestion complet appliqué au Secteur 6.....	214

Liste des tableaux

Tableau 1. Balance de l'eau selon la terminologie utilisée par l'IWA (Alegre <i>et al.</i> 2000)...	26
Tableau 2. Valeurs françaises de référence pour l'indice linéaire de pertes ($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$).	40
Tableau 3. Valeurs portugaises de référence pour l'indice linéaire de pertes ($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$)....	41
Tableau 4. Origines et types des fuites sur les réseaux d'eau potable.	44
Tableau 5. Valeurs unitaires associées à chaque type de fuite.....	44
Tableau 6. Pertes liées à chaque type de fuite, par mètre de colonne d'eau (mCE).	45
Tableau 7. Double distinction des réparations : exemple du Secteur 9.	72
Tableau 8. Caractéristiques patrimoniales disponibles : exemple du Secteur 5.	74
Tableau 9. Caractéristiques patrimoniales des 18 secteurs sélectionnés.....	81
Tableau 10. Valeurs des paramètres et gains pour le modèle de différence relative à trois paramètres.	89
Tableau 11. Valeurs des paramètres pour le modèle basé sur une théorie d'apparition des fuites.	112
Tableau 12. Valeurs des paramètres pour le modèle d'apparition des fuites avec rajout des fuites diffuses selon Lambert.	118
Tableau 13. Sensibilité des paramètres du modèle trois états à la valeur de q_0 : exemple du Secteur 9.....	143
Tableau 14. Calculs menant à un débit lié aux fuites diffuses supérieur au débit global modélisé (tous les débits sont en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$).....	148
Tableau 15. Comparaison des débits liés aux fuites diffuses selon la formulation Lambert ou le modèle trois états ($q_0=0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).....	149
Tableau 16. Valeurs des paramètres du modèle trois états pour $q_0=0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	150
Tableau 17. Valeurs des paramètres du modèle trois états pour $q_0=0,001 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	151
Tableau 18. Valeurs des paramètres du modèle trois états pour $q_0=0,005 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	151
Tableau 19. Comparaison des valeurs des paramètres entre le modèle dit d'apparition des fuites et le modèle trois états.	157
Tableau 20. Comparaison des valeurs des paramètres pour le modèle trois états avec ou sans distinction sur les organes réparés.....	158
Tableau 21. Poids relatif (exprimé en pourcentage) des branchements et des conduites dans les différents composantes du débit modélisées pour le Secteur 10.	159
Tableau 22. Evolution du débit de fuite global à différents horizons et hiérarchisation (les débits sont exprimés en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$).	177
Tableau 23. Evolution chiffrée du débit lié aux fuites diffuses à différents horizons et hiérarchisation (les débits sont exprimés en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$).	180
Tableau 24. Pourcentage de gain sur le débit de fuite associé au pourcentage renouvelé (Secteur 10, âge moyen des conduites renouvelées : 50 ans).....	205
Tableau 25. Pourcentage de gain sur le débit de fuite associé à l'âge moyen des conduites renouvelées (Secteur 11, 10 % du linéaire renouvelé).	206
Tableau 26. Objectifs et mise en place du scénario de gestion pour le Secteur 5.....	210
Tableau 27. Objectifs et mise en place du scénario de gestion pour le Secteur 6.....	211
Tableau 28. IERF appliquée et gains associés à cette recherche et au renouvellement pour le Secteur 5.....	213
Tableau 29. IERF appliquée et gains associés à cette recherche et au renouvellement pour le Secteur 6.....	215

Sigles et abréviations

AGHTM :	Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux
ASTEE :	Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement
BABE :	Bursts And Background Estimates
CARE-W :	Computer Aided REhabilitation of Water networks
CARL :	Current Annual Real Losses
CCTG :	Cahier des Clauses Techniques Générales
DMA :	District Metered Area
FNDAE :	Fonds National pour le Développement des Adductions d'Eau
IERF :	Intensité Efficace de Recherche de Fuites
ILI :	Infrastructure Leakage Index
IP :	Indicateur de Performance
InVS :	Institut de Veille Sanitaire
IWA :	International Water Association
IWSA :	International Water Services Association
NHPP :	Non-Homogeneous Poisson Process
Ofwat :	Office of Water Services
OIEAU :	Office International de l'EAU
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
PEHD :	Polyéthylène Haute Densité
PVC :	Polychlorure de vinyle
SAGE :	Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SMEGREG :	Syndicat Mixte d'Etudes pour la Gestion de la Ressource en Eau du département de la Gironde
SPDE :	Syndicat professionnel des entreprises de service d'eau et d'assainissement
UARL :	Unavoidable Annual Real Losses
UD :	Unité de Distribution

Introduction générale

Le cheminement de l'eau potable jusqu'au robinet se fait dans des réseaux enterrés hors du regard du consommateur. La plupart du temps, on ne les observe que lors d'opérations de réparation ou de remplacement conduisant à l'ouverture de la chaussée, liée à de nombreux désagréments. Les épisodes de casses, faisant apparaître une source d'eau anormale visible au niveau du sol, manifestent également la présence de conduites souterraines. Ainsi, l'étendue des réseaux est bien souvent insoupçonnée. En France, le linéaire de canalisations dédiées à la distribution d'eau potable atteint 850000 km. Il s'élève à plus de 300000 km pour les réseaux anglais et gallois. En ajoutant maintenant que la valeur à neuf des réseaux est supérieure à 1000 euros par habitant en France, il apparaît clairement que le réseau, au même titre que l'eau qu'il transporte, est un bien extrêmement précieux. La conscience des enjeux financiers que représente la bonne gestion des réseaux motive l'attention particulière qui leur est portée.

Les problématiques liées aux réseaux d'eau potable ont évolué au fil du temps. Les premiers réseaux sous pression sont apparus au milieu du XIX^{ème} siècle. Dans un premier temps, les efforts se sont portés sur le raccordement du plus grand nombre possible de personnes à l'eau courante, essentiellement dans les villes. Durant les années 1960-1970, le développement des réseaux en zone rurale était toujours considérable : on estime pour la France à environ 45 % du total le linéaire de conduites posé à cette époque. Actuellement, sur notre territoire, 99 % de la population est desservie et la distribution de l'eau au plus grand nombre, qui était un enjeu majeur il y a quelques décennies, ne l'est plus. La qualité de l'eau distribuée a ensuite focalisé les attentions. Les paramètres de potabilité se sont diversifiés dans le cadre du renforcement des contraintes sur l'hygiène alimentaire. La transformation des pratiques agricoles, marquée par un accroissement de l'usage des nitrates ou des pesticides, a créé de nouvelles sources de contamination : le traitement de l'eau a dû être adapté.

En France, le niveau de service atteint au terme d'un siècle et demi d'existence des réseaux est tout à fait performant : chaque usager peut disposer en quantité d'une eau de bonne qualité. La tâche actuelle des acteurs du domaine de l'eau est au minimum de maintenir cette performance, voire de l'améliorer encore. La problématique actuelle est donc de lutter contre la dégradation des réseaux liée au vieillissement des conduites, pour certaines en place depuis plus d'un siècle et dont les durées de vie ne sont pas infinies. Les manifestations de cette

détérioration sont diverses : casses, fuites, eaux rouges... Parallèlement à cette préoccupation qui s'inscrit dans la durée, une problématique nouvelle est liée à la disponibilité de la ressource. Déjà ancien dans certaines zones arides du globe comme le Moyen Orient, ce problème est maintenant présent sous nos latitudes. En Gironde, la surexploitation des nappes profondes a conduit à mettre en place une réglementation stricte des pompages, encadrée par le SAGE¹ Nappes Profondes.

L'objectif poursuivi pour cette étude vise à minimiser les manifestations et les effets de la dégradation des réseaux dans le domaine des fuites. Il est adapté à la réalité actuelle des réseaux mais contribue également à la préservation de la ressource. Il s'inscrit ainsi dans un cadre plus large de développement durable.

L'ampleur des fuites sur un réseau est largement relayée par les médias et donne souvent une mauvaise image de la gestion de la distribution de l'eau. Les quantités des pertes sont souvent comparées à des volumes connus, comme par exemple des piscines ou des lacs, et marquent fortement l'opinion publique. Ainsi, l'Ofwat² en Angleterre a accordé en 2004 à la compagnie Thames Water, un volume quotidien de pertes de 844 millions de litres, soit l'équivalent de 344 piscines olympiques. Le sujet est d'autant plus sensible qu'une part sans cesse croissante de la population, en France mais aussi en Angleterre, est soumise à des restrictions d'eau. Il existe donc une réelle pression extérieure pour réduire ces fuites.

Paradoxalement, malgré des pertes s'élevant fréquemment à plus de 30 % de la quantité d'eau prélevée dans le milieu naturel, le système fonctionne correctement. La fuite n'est pas un événement de nature à interrompre le service. Il est toujours possible d'en remettre l'élimination à plus tard. On voit ici la nécessité d'une politique volontariste dans le domaine, volonté souvent traduite contractuellement. Une prise de conscience a cependant vu le jour au sujet des fuites et diverses actions commencent à se mettre en place pour les réduire efficacement.

La gestion des fuites est un problème complexe car elle traite de phénomènes encore assez mal connus dans leurs origines. Deux questions sont notamment au cœur des enjeux évoqués. A qui attribuer les responsabilités d'un réseau très fuyard : le patrimoine, le gestionnaire ? Quels moyens mettre en œuvre pour réduire efficacement les fuites ? Notre objectif est de proposer un outil visant à établir un diagnostic sur la nature des fuites dans un réseau afin de

¹ SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux

² Ofwat : Office of Water services, autorité de régulation des services d'eau pour les réseaux anglais et gallois

proposer les meilleures solutions pour les réduire. L'amélioration de l'état des réseaux ainsi que la préservation de la ressource sont des effets bénéfiques associés escomptés.

Au chapitre 1, nous évoquons de manière générale, en nous appuyant sur une étude bibliographique, les défaillances des réseaux d'eau potable et les mesures de performance qui permettent d'en rendre compte. Nous abordons également l'utilisation de modèles prédictifs dans le domaine des casses et formulons les objectifs de la thèse dont, notamment, la possibilité de construire de tels modèles pour les fuites.

Le chapitre 2 est consacré à la présentation des données de l'étude : chroniques de débit de fuite et de réparations. Leur fiabilité et leur nécessaire sélection sont également détaillées. Une analyse de l'intérêt de considérer ou non par la suite certaines d'entre elles est menée par le biais d'une première modélisation.

La présentation du modèle dit « trois états » de décomposition et de reconstitution des débits de fuite est effectuée au chapitre 3. On s'y attarde sur les hypothèses relatives à sa construction, particulièrement la transposition aux fuites d'un modèle d'apparition de casses basé sur un processus de Yule et le passage des fuites à travers différents états au cours de leur existence. Les résultats directs du modèle, à savoir la valeur des paramètres ainsi que les restitutions graphiques des chroniques, sont inclus dans cette partie.

Le dernier chapitre, le chapitre 4, montre l'étendue des applications possibles du modèle trois états. Différents scénarios de gestion mêlant recherche de fuites et/ou renouvellement des conduites sont implémentés. Ils proposent différentes options de gestion en fonction des caractéristiques du débit de fuite et d'objectifs à atteindre. Ces simulations à des horizons différents indiquent l'intensité et la nature des travaux à mener.

CHAPITRE 1.

LA REDUCTION DES FUITES DANS LES RESEAUX D'EAU POTABLE : UN DES ENJEUX DE LA GESTION PATRIMONIALE

Préambule

Les investissements financiers ayant servi à mettre en place le linéaire de conduites des réseaux de distribution d'eau potable sont à l'image de celui-ci, extrêmement importants. Ils ont été réalisés en grande partie il y a quelques décennies et il convient donc à présent de gérer au mieux ce patrimoine. La ligne directrice et le but de la gestion patrimoniale ont été très clairement définis par l'OIEAU¹ (Berland *et al.* 2005) dans un rapport pour le compte du SPDE². Ils s'expriment comme suit : « *la politique de gestion du patrimoine contribue à atteindre, dans le respect des principes du développement durable, le niveau de performance du service d'eau voulu par la collectivité* ». L'Ofwat (2006), dans la page d'accueil de son site Internet, présente également sa vision du service de l'eau au travers de laquelle transparaît sa conception de la gestion patrimoniale : « *our vision is for a water industry that delivers a world class-service, representing best value to customers now and in the future* ». La différence entre les deux approches se situe dans la place donnée à l'usager, au centre des préoccupations selon les préconisations de l'Ofwat, alors qu'en France la collectivité a plus de liberté pour orienter ses choix selon des critères qu'elle définit. Cependant, nous voyons clairement, dans ces deux approches des services d'eau, la vision commune qui consiste à faire du futur une préoccupation majeure de toute action.

Dans un premier temps, après avoir défini et qualifié le patrimoine pour les réseaux d'eau potable, nous évoquerons les effets néfastes liés à la dégradation de celui-ci. Nous étudierons dans un second temps l'intérêt de la mesure de performance pour la gestion patrimoniale. Enfin, nous aborderons plus en détails les fuites, sujet au cœur de l'étude : nous traiterons de l'existant et des points particuliers où les pratiques peuvent être améliorées, ce qui nous conduira à énoncer les objectifs de la thèse.

¹ OIEAU : Office International de l'Eau

² SPDE : Syndicat professionnel des entreprises de service d'eau et d'assainissement

1. ENJEUX TECHNIQUES DU BON ETAT PATRIMONIAL

Les problématiques liées au service de distribution d'eau potable sont vastes. Nous nous intéressons ici à la partie réseau et nous limitons à certains aspects techniques que nous répartissons en trois catégories : les casses et interruptions de service liées, les fuites et la qualité de l'eau. Nous mettons en avant l'impact du patrimoine dans ces domaines et définissons auparavant le terme de patrimoine.

1.1. Notion de patrimoine dans les réseaux d'eau potable : définition et spécificités

1.1.1. Un bien commun à préserver

Quelle légitimité avons nous à parler de patrimoine lorsque nous évoquons le caractère physique et matériel des réseaux ? La définition du dictionnaire Le Trésor de la Langue Française Informatisé (ATILF 2006), pour le sens premier du terme, est la suivante : « *ensemble des biens hérités des ascendants ou réunis et conservés pour être transmis aux descendants* ». Ce terme s'emploie dans des domaines aussi variés que la finance, la culture ou bien encore l'environnement. Il est indissociable des notions de transmission et de valeur. Le patrimoine nous est légué, nous en faisons usage, puis le transmettons aux générations suivantes. Ce bien évolue entre deux générations en fonction de l'usage que nous en faisons et du temps qui passe.

Trois modalités de transfert peuvent être distinguées lorsqu'il s'agit de patrimoine : dégradation, préservation ou accumulation/amélioration. Un usage non raisonné et sans considération pour le futur conduit nécessairement à une dégradation du patrimoine.

Ainsi, la définition que l'on attribue généralement au mot patrimoine s'applique également aux réseaux d'eau potable. L'utilisation de ce terme, le plus juste et le plus approprié pour décrire la structure physique des réseaux, permet d'exprimer la nécessaire solidarité entre générations. Plus précisément, un lien est implicitement formulé entre les conduites ou les autres équipements du réseau et une contrainte de pérennité à long terme associée à la gestion pratiquée. Pour sa valeur, sa longévité, son altération naturelle avec le temps et sa transmission intergénération, le réseau d'eau potable s'apparente à un patrimoine. Nous parlerons donc par la suite de gestion patrimoniale.

1.1.2. Le réseau d'eau potable parmi les réseaux techniques urbains

Les caractéristiques technico-économiques communes avec les autres réseaux enterrés, notamment ceux de gaz et d'assainissement, sont nombreuses :

- valeur à neuf considérable ;
- durée de vie élevée ;
- extension permanente suivant les évolutions de l'espace urbain, intégration de nouveaux équipements ;
- progrès techniques lents (conception, pose, entretien).

On relève toutefois deux principaux aspects plus spécifiquement associés au réseau d'eau potable (Berland *et al.* 2005).

Tout d'abord, hormis les casses visibles dont les désagréments évidents conduisent à leur réparation dans de brefs délais, les actions pour pallier certaines défaillances moins gênantes sont parfois différées. Une fuite faible disparaissant dans le sol n'affecte ni la continuité ni la qualité du service aux yeux de l'utilisateur, à court terme du moins. Plus généralement, les actions à caractère préventif (recherche de fuites, réhabilitation, renouvellement) ne sont pas une nécessité immédiate. Certaines des performances du réseau sont amoindries si l'on néglige constamment ces opérations, mais les répercussions sur l'utilisateur peuvent s'avérer inexistantes. Au contraire, aucune fuite de gaz par exemple ne peut être négligée, la dangerosité du fluide transporté en est ici la cause.

Ensuite, le réseau est intégré au sein d'un système plus global qui comprend la ressource, le traitement de l'eau ainsi que la partie du réseau située en domaine privé. Malgré cet environnement plus large, le patrimoine constitue une richesse que l'on doit traiter et gérer localement. En effet, selon le milieu environnant les conduites ou bien encore les caractéristiques physico-chimiques de l'eau transportée, le patrimoine ne suit pas les mêmes évolutions.

Nous présentons maintenant les différents enjeux techniques liés au réseau d'eau potable.

1.2. Minimisation du nombre de casses

1.2.1. Nature et facteurs principaux des casses

Nous entendons par casse le phénomène qui, dès sa détection, conduit à la réparation de la conduite ou du branchement concerné. Il existe deux cas de figure :

- les casses manifestes : la casse est localisée sans le recours à une opération spécifique de recherche de fuites et donc par simple observation. La casse peut se différencier selon qu'elle provient par exemple d'un joint, d'une fissure longitudinale, transversale ou annulaire (Rajani et Kleiner 2001) ;
- les casses non repérées : la casse existe mais n'est pas détectée sans une campagne de recherche de fuites.

Des casses non repérées peuvent évoluer en casses manifestes sous l'effet de la dégradation progressive de la défaillance. Les casses manifestes peuvent également survenir brusquement sans aucun signe d'existence d'une fuite préalable (Kanakoudis 2004).

Les casses sont des phénomènes dont on cherche à prévoir le nombre (voir paragraphe 3.2) et la localisation, selon la nature et l'environnement extérieur des conduites. Ainsi, plusieurs paramètres peuvent favoriser les casses comme l'indique l'OIEAU (Berland *et al.* 2005) :

- présence de nappe phréatique ;
- mouvements de terrain ;
- charges du trafic et du poids des terres transmis aux conduites ;
- qualité des remblais et du compactage des sols ;
- mouvements de déstabilisation des sols causés par la pose, le remplacement ou les interventions d'entretien d'autres réseaux techniques, ou bien par des travaux de voirie ;
- présence de courants vagabonds générés par des installations électriques qui peuvent corroder l'extérieur des conduites et en faire diminuer l'épaisseur ;
- variations de températures extrêmes, dont l'influence a notamment été étudiée par Rajani et Zahn (1996);
- fortes pluies ou alternance de sol très humide ou sec, faisant notamment travailler les argiles ;
- agressivité naturelle de certains terrains ;
- présence dans le sol de produits corrosifs ou chimiques.

La qualité de l'eau transportée peut également favoriser des casses. Ses caractéristiques physico-chimiques la font interagir avec les matériaux des conduites qui peuvent dans certaines conditions se détériorer jusqu'à la casse.

Les variations brusques de débit engendrant des coups de bélier (ouverture/fermeture de vanne trop rapide ou mise en marche/arrêt de pompes) ou l'amplitude de variation de la pression, sont aussi des phénomènes potentiellement générateurs de casses.

1.2.2. Gêne aux usagers

Nous distinguons deux types de gêne aux usagers :

- les interruptions de service : lors d'épisodes de casses, si le réseau n'est pas suffisamment maillé et équipé de vannes, le seul tronçon incriminé ne peut être isolé et la coupure affecte d'autres parties du réseau. Selon la réactivité de l'exploitant, l'interruption de service sera de plus ou moins courte durée. Dans tous les cas, de l'eau est non distribuée à certains abonnés. Les conséquences d'une coupure d'eau peuvent être très dommageables si des bâtiments comme des hôpitaux ou certaines industries sont concernés. Lors de tels événements, la sécurité incendie peut être compromise ;

- les travaux sur la voirie et la détérioration du cadre urbain : les chantiers de réparation entraînent de nombreuses nuisances visuelles et sonores, parfois même des ralentissements dans les activités économiques des zones touchées par les travaux. Plus l'urbanisation est forte et le trafic dense dans les secteurs concernés, plus la gêne occasionnée est importante.

1.3. Réduction des pertes et des fuites

1.3.1. Nature et origine des fuites

L'état du patrimoine ne peut à lui seul être tenu pour responsable de toutes les pertes constatées sur un réseau d'eau potable. Il influe fortement cependant sur ce que nous appelons les fuites, quantité incluse dans les pertes, et dont la nature est détaillée dans le Tableau 1 établi à partir de la Water Balance diffusée par l'IWA¹ (Alegre *et al.* 2000). Cette nécessaire uniformisation des termes et grandeurs considérées en ce qui concerne les pertes avait été

¹ IWA : International Water Association

également entreprise précédemment en France par l'AGHTM¹ (1990), devenu récemment ASTEE².

Tableau 1. Balance de l'eau selon la terminologie utilisée par l'IWA (Alegre *et al.* 2000).

volume entrant dans le système	consommation autorisée	consommation facturée	consommation facturée mesurée (incluant l'eau exportée)	rentrée d'argent
			consommation facturée non mesurée	
		consommation non facturée	consommation non facturée mesurée	pertes pour l'exploitant
			consommation non facturée non mesurée	
	traitement/ adduction/ distribution	pertes apparentes	consommation non autorisée	
			erreurs de mesure	
		pertes réelles	pertes sur le transport d'eau brute ou à l'usine de traitement	
			<i>fuites sur les conduites d'adduction ou de distribution</i>	
			fuites et débordements au niveau des réservoirs	
			<i>fuites sur branchements jusqu'au compteur</i>	

Les pertes en eau sont divisées en deux catégories principales : les pertes apparentes et les pertes réelles. Dans les pertes apparentes, que nous n'évoquerons plus par la suite, seules les erreurs de comptage sont dépendantes du patrimoine. Plus le parc de compteurs vieillit, plus les risques de sous comptage sont importants (Pasanisi 2004). Il ne s'agit cependant que d'un manque à gagner pour le gestionnaire et pas de pertes réelles.

¹ AGHTM : Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux

² ASTEE : Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement

Ces dernières se décomposent en quatre quantités, dont seules les deux premières nous occuperont dans le reste de l'étude :

- les fuites sur les conduites d'adduction ou de distribution, incluant les casses, liées à l'état du patrimoine ;
- les fuites sur les branchements, incluant les casses, elles aussi à mettre en relation avec l'état du patrimoine ;
- les pertes lors du transport de l'eau brute et à l'usine de traitement, en dehors de toute considération patrimoniale en lien avec le réseau de distribution ;
- les débordements au niveau des réservoirs de stockage, liés à des dysfonctionnements de gestion des pompes par exemple.

Parmi toutes les sources potentielles de pertes, les fuites sur conduites ou sur branchements, casses exclues, sont très certainement les plus importantes en raison de leur persistance dans le temps. Kanakoudis (2004) affirme que pour la ville d'Athènes (Grèce), les fuites représentent 43 % des pertes totales sur le réseau (selon les termes du Tableau 1), contre seulement 9 % pour les casses. Les fuites apparaissent principalement aux joints entre conduites et au niveau des branchements, mais peuvent également s'observer sur les corps de conduites.

Par la suite, nous appellerons fuites l'ensemble des fuites aux joints, sur les conduites ou les branchements hors casses manifestes. L'état du patrimoine joue un rôle essentiel dans les quantités d'eau perdues sous forme de fuites.

Notons encore que les pertes dues à ces fuites dépendent de la pression dans la conduite. Des études ont montré que plus la pression augmente, plus le débit de fuite est important (Ogura 1979, Jowitt et Xu 1990, May 1994, Vairavamoorthy et Lumbers 1998, Martinez *et al.* 1999, Lambert 2001). La littérature indique que les fuites augmentent comme la pression à une puissance comprise entre 0,5 et 2,5. Cette variabilité importante s'explique par le fait que la pression agrandit parfois les orifices d'écoulement (matières plastiques), accroissant ainsi le débit plus intensément qu'avec la classique loi d'écoulement par un orifice en $P^{1/2}$. Une relation entre fuites et pression en $P^{1.15}$ est la plus largement utilisée ; elle correspond à la prise en compte des différents types de comportements des orifices vis-à-vis de la pression sur un réseau présentant plusieurs types de matériaux. A partir de ces relations, on peut envisager

la mise en place de réducteurs de pression judicieusement choisis (Reis et Chaudhry 1999), pour réduire au maximum les pertes dues à ces fuites.

A chaque fuite peuvent être associés un débit et une durée d'écoulement qui déterminent la quantité d'eau perdue. Ces grandeurs dépendent essentiellement de la forme de la fuite et de son stade (Kanakoudis 2004), mais aussi de la réactivité de l'exploitant.

1.3.2. Conséquences des fuites

Financièrement, les fuites constituent une perte puisque de l'eau traitée et pompée pour être acheminée vers le consommateur n'est jamais distribuée ni facturée. Cet aspect n'est pas abordé dans la suite de l'étude.

En outre, les fuites, en accroissant le débit transité, contribuent à l'augmentation des pertes de charge et donc de la consommation d'énergie. Cette problématique a particulièrement été étudiée par Colombo et Karney (2002), qui calculent les coûts énergétiques supplémentaires induits par une fuite, mais aussi par Pelli et Hitz (2000) qui proposent des indicateurs pour évaluer l'énergie consommée sur un réseau.

De plus, les réseaux très fuyards peuvent causer un déficit d'image du gestionnaire.

Les fuites contribuent également à accentuer les prélèvements dans les ressources naturelles. En effet, il n'est pas rare qu'elles soient à l'origine de pertes de 20 à 30% du volume total mis en distribution. Cette quantité d'eau, puisée dans des réserves souvent limitées, n'arrive jamais au consommateur.

La suppression des fuites représente autant d'économies qui pourraient être réalisées sur la ressource, parfois surexploitée :

- le rechargement des nappes n'est pas nécessairement aussi rapide que la baisse due aux prélèvements ; par exemple, la nappe de l'éocène en Gironde a baissé de 30 m environ en 30 ans. Le SAGE Nappes Profondes mis en place vise à proposer des solutions pour préserver cette ressource ;
- les eaux de surface atteignent dans certaines régions des niveaux bas qui ne permettent plus d'alimenter en eau les collectivités et de satisfaire les besoins liés à l'agriculture ou au tourisme.

Cet enjeu de préservation de la ressource risque encore de grandir dans les années à venir et de s'étendre géographiquement. La gestion patrimoniale pourrait s'avérer un outil efficace pour ne pas être confronté dans le pire des cas à un service d'eau au fonctionnement discontinu : pour de nombreuses villes à travers le monde cette situation est un état de fait, essentiellement dans les pays en voie de développement.

Afin de nuancer ce propos, il faut tout de même noter qu'en France, les prélèvements d'eau destinés à la consommation ne compte que pour 20% des volumes prélevés dans le milieu naturel (Berland *et al.* 2005). L'agriculture et la production d'énergie tiennent des places prépondérantes dans les 80% restants. La réduction des fuites n'est donc qu'un élément parmi d'autres pouvant participer à la préservation de la ressource.

1.4. Amélioration de la qualité de l'eau

1.4.1. Conduites dégradées et temps de séjour

Deux causes principales peuvent engendrer une mauvaise qualité de l'eau : la corrosion interne des conduites pour certains matériaux (fonte grise et acier non revêtu particulièrement) et le développement bactériologique. Selon l'OIEAU (Berland *et al.* 2005), un déséquilibre calco-carbonique ou un problème de corrosivité d'une eau à l'équilibre (chlorures, sulfates) peuvent amorcer la corrosion interne des conduites en détériorant les revêtements internes ou plus directement le matériau des parois.

Concernant le temps de séjour de l'eau dans les conduites, il dépend à la fois du dimensionnement du réseau et de son fonctionnement hydraulique. Plus ce temps est long, plus la qualité de l'eau peut se dégrader. La modification de la structure du réseau demande des investissements très lourds, c'est pourquoi la chloration de l'eau pour prévenir les développements bactériologiques s'avère nécessaire. Elle joue un important rôle de désinfection contre les agents pathogènes présents dans l'eau. De par les propriétés de rémanence du chlore, il s'agit d'un moyen efficace et peu coûteux, selon l'IWSA¹ (Braghetta *et al.* 1997), pour parvenir à obtenir une eau saine sur toute la longueur du réseau. En pratique, les gestionnaires font en sorte de maintenir une concentration résiduelle en chlore dans l'eau durant tout son temps de séjour dans le réseau.

¹ IWSA : International Water Services Association

Le chlore disparaît selon différents modes. En effet, celui-ci peut être consommé par réaction avec de la matière organique et inorganique dans la phase liquide ou bien suite à une réaction avec le biofilm fixé sur les parois. Il peut encore disparaître lors du processus de corrosion des conduites comme l'écrivent Vasconcelos et Rossman (1997). Ils notent également que les paramètres influençant la constante de décroissance du chlore sont notamment le matériau de la canalisation et la surface de contact de l'eau avec celle-ci.

Un dernier élément peut encore détériorer la qualité de l'eau, il s'agit des intrusions possibles d'éléments extérieurs (terre) lors d'épisodes de casses et de réparations.

1.4.2. Manifestations d'une eau altérée : risque sanitaire, désagréments gustatifs et olfactifs, eaux rouges

On estime que la contamination bactérienne de l'eau est actuellement à l'origine du décès de 3 à 10 millions de personnes par an dans le monde (Miquel et Revol 2003). La mise à disposition de la population d'une eau potable de bonne qualité est donc une préoccupation permanente pour les autorités sanitaires. En France, les risques encourus par le consommateur, s'il consomme une eau non conforme au décret 2003-461 du 21 mai 2003 qui réglemente la qualité des eaux destinées à la consommation humaine, sont de nature microbiologique ou chimique. Selon une estimation de l'InVS², sur les secteurs où l'eau n'est pas conforme à la réglementation, 10 à 30 % du total des gastro-entérites aiguës observées pourraient être imputables à cette cause (Miquel et Revol 2003).

La contamination des eaux par des microorganismes pathogènes (bactéries, virus, parasites) est ainsi susceptible de provoquer des cas de gastro-entérites isolés ou même épidémiques pour les situations les plus graves (contamination bactérienne des eaux distribuées à Strasbourg en 2000). Le risque chimique se situe à moyen ou long terme, il est lié à la présence de substances indésirables ou toxiques dans l'eau. Il est très difficile d'évaluer les pathologies directement imputables à la consommation d'eau potable puisque les substances les engendrant peuvent être assimilées sous d'autres formes. Les effets potentiels de nombreuses substances chimiques sont cependant connus : saturnisme engendré par le plomb, méthémoglobinémie pouvant être causée par l'ingestion de fortes quantités de nitrates, etc...

² InVS : Institut de Veille Sanitaire

Les désinfectants comme le chlore constitue une bonne protection contre les agents pathogènes de l'eau, mais celui-ci se caractérise par des odeurs aisément décelables. Ainsi, les niveaux de chlore trop élevés et leur variabilité sont la principale cause de plaintes et de désagréments des usagers (Hua *et al.* 1999). De plus, l'interaction du chlore avec certaines matières organiques peut conduire à la formation de trihalométhanes suspectés d'être des substances cancérigènes (Ozdemir et Ger 1998). L'action de l'exploitant visant à réduire certains risques, peut ainsi induire d'autres désagréments. Le choix d'une quantité de chlore adéquate, minimisant les risques et assurant une bonne qualité du service, est primordial. Il dépend, entre autres, de la nature du patrimoine constitutif du réseau.

Enfin, le problème de ce qu'on appelle communément les eaux rouges est également à prendre en considération dans une politique d'amélioration de la qualité de l'eau distribuée. Des dépôts de fer, contenu initialement dans l'eau ou bien issu de la corrosion des conduites, sont remis en suspension ou arrachés des parois corrodées lors de fortes variations de débit comme celles constatées à l'ouverture de poteaux incendie. Ils colorent alors l'eau d'une teinte rouille et la rendent difficilement consommable, lui donnant un aspect contraire à ce que l'on attend d'une eau de bonne qualité.

2. QUALIFICATION DE L'ETAT PATRIMONIAL D'UN RESEAU

2.1. Connaître l'état du patrimoine par l'observation des défaillances

2.1.1. Difficulté à définir l'état technique global

Les niveaux atteints de casses et de fuites, ainsi que la qualité de l'eau distribuée, dépendent de l'état des réseaux. Il semble cependant difficile, compte tenu des connaissances actuelles, de définir un état technique global des réseaux, en s'appuyant sur l'ensemble de ces paramètres. Le concept de bon ou de mauvais réseau n'existe pas de manière aussi simpliste ; il doit être précisé par la nature du domaine que l'on désire évaluer.

Il est de fait souhaitable de caractériser séparément l'état du patrimoine selon chaque type de dysfonctionnement et par une méthode adaptée, en ignorant pour l'instant les interactions possibles entre eux. Par exemple, un taux de casses élevé, synonyme de nombreuses réparations, peut avoir des conséquences sur la qualité de l'eau distribuée, mais nous ne cherchons pas à en estimer l'importance.

La nécessité de mesures dans chacun des domaines apparaît donc afin de pouvoir disposer de données objectives et cerner au mieux l'état patrimonial dans ses différentes composantes. Les actions préventives ou curatives envisagées doivent s'interpréter par rapport aux gains attendus sur chacun des types de défaillance.

2.1.2. Difficulté à prendre en compte l'influence de la gestion

Les dysfonctionnements rencontrés sur un réseau peuvent qualifier son état patrimonial dans des domaines particuliers. Cependant, la fréquence et l'intensité des défaillances ne sont pas exclusivement liées au patrimoine mais dépendent également des pratiques de gestion mises en œuvre sur le réseau : réactivité, optimisation de la pression de distribution, sectorisation, vannage. De plus, le gestionnaire, pris ici au sens large du maître d'ouvrage et de son délégataire, influe aussi sur le patrimoine en ce qu'il peut le modifier, le renouveler, le réparer. La Figure 1 montre la complexité des relations qui unissent le patrimoine, le gestionnaire et les observations de terrain. On ne se situe pas dans un rapport vertical et hiérarchisé entre les éléments mais plus dans des relations horizontales et bouclées, incluant

des actions et des rétroactions. Les flèches indiquent simplement qu'il existe un lien entre les deux objets décrits, leur sens donne une information sur la nature de ce lien.

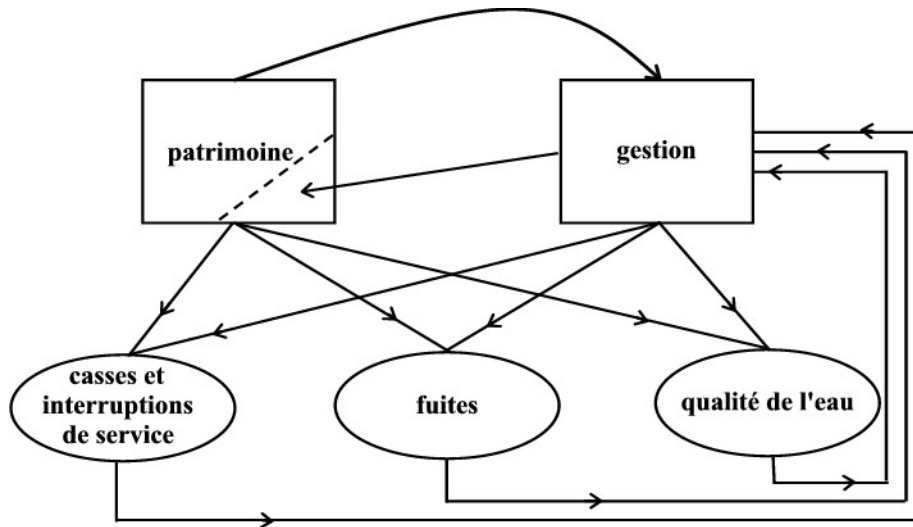


Figure 1. Action et rétroaction du patrimoine et de la gestion sur les désagréments du service de distribution.

Ces multiples interactions amènent à caractériser le couple patrimoine/gestionnaire, plutôt que l'un ou l'autre séparément. L'évolution dans le temps d'un débit de fuite par exemple, s'explique par l'effet du vieillissement sur les caractéristiques du réseau mais aussi par l'effort de recherche de fuites de l'exploitant.

La distinction effet du patrimoine/effet de la gestion est délicate à établir. C'est pourquoi la pratique actuelle est de travailler exclusivement sur les données de casses, de fuites ou de qualité de l'eau, sans chercher à remonter aux origines de ces défauts ni à en identifier précisément les responsabilités. Cela a pour effet de conduire bien souvent à des situations où l'entité délégante invoque la responsabilité de l'exploitant, celui-ci incriminant en retour l'état du patrimoine.

Les moyens à mettre en œuvre pour proposer des actions curatives ou préventives passent nécessairement par une quantification des effets sur les casses, les fuites ou bien la qualité de l'eau, d'une modification du patrimoine par une gestion appropriée. Ce point fait partie des objectifs de la thèse présentés au paragraphe 5, mais auparavant nous nous intéressons au type de mesures, ainsi qu'à leur interprétation, qui permettent de refléter l'état patrimonial.

2.2. La mesure de performance comme outil d'évaluation et de gestion

Les indicateurs de performance (IP) sont des outils de plus en plus utilisés pour évaluer la qualité d'un produit ou d'un service. Ils sont présents dans des domaines aussi variés que la santé publique, l'éducation, l'industrie ou les services et font partie dorénavant du langage courant. Leur champ d'application est tout aussi vaste. Par exemple, en proposant de présenter les taux de réussite au baccalauréat des établissements en fonction de l'âge et du niveau social des étudiants qui les fréquentent, le Ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche a pour objectif « *de rendre compte des résultats du service public national d'éducation et de donner aux responsables et aux enseignants de ces établissements des éléments de réflexion qui les aident à améliorer l'efficacité de leurs actions* » (Allain *et al.* 2006).

Le service lié aux réseaux d'eau potable peut lui aussi tirer pleinement profit de cette méthode de mesure de performance, dont les attentes, le cadre et les limites sont précisés dans ce paragraphe.

2.2.1. Portée de la mesure de performance pour les réseaux d'eau potable

L'idée de la mesure de performance pour les services d'eau n'est pas nouvelle puisqu'elle remonte aux années 30 comme l'indique Paralez (2001). Cependant, des bases solides pour sa mise en pratique n'ont été formulées que récemment. Différentes études de l'IWA (Alegre *et al.* 2000), de Marques et Monteiro (2001), ou bien encore de rapides retours d'expérience concernant l'utilisation des IP (Skarda 1997) montrent l'intérêt porté à ce domaine au début des années 2000. Cette recherche de performance est également à mettre en parallèle avec l'achèvement de la fourniture d'accès à l'eau potable pour la très grande majorité de la population européenne.

Guérin-Schneider (2001) présente dans sa thèse la justification, les possibilités et les attentes liées à cet outil : permettre aux autorités concédantes d'évaluer la prestation du gestionnaire, déceler une situation anormale, orienter les actions correctives pour améliorer la performance, favoriser une communication claire entre les différents acteurs du service de distribution.

Elle souligne que l'utilisation des IP pour juger de la performance peut prendre la forme d'une comparaison interannuelle (ne pas faire moins bien que l'année précédente) ou interservices (atteindre un niveau observé ailleurs).

La comparaison des performances entre services conduit à des pratiques de benchmarking (voir à ce sujet Kingdom 1998, Andrews *et al.* 1999, Paralez 1999, Huberts et Smeets 2000, Parena et Smeets 2001). Il s'agit d'une procédure intégrant différents aspects et qui vise à l'amélioration du service en prenant en compte la valeur d'IP. Elle est clairement définie par le site de Water Utility Partnership (WUP) : « *Le benchmarking est une méthode par laquelle, sur la base de la performance d'une entreprise, des outils sont conçus pour faciliter les réorientations des pratiques professionnelles en vue de réduire au strict minimum les insuffisances de la performance. L'opération de benchmarking passe par trois étapes. Premièrement, elle évalue un certain nombre d'indicateurs de performance et s'en sert pour établir une comparaison entre l'entreprise et les sociétés les plus performantes. Deuxièmement, elle identifie les causes des disparités et des faiblesses établies à partir de toutes les comparaisons utiles. Troisièmement, elle élabore un plan d'action approprié pour combler les lacunes. Dans l'ensemble, le benchmarking permet d'améliorer les services d'alimentation en eau du point de vue de la qualité, de la quantité, de la fiabilité et de la durabilité.* ».

Plus simplement, les IP permettent de mesurer l'écart entre une valeur cible de référence, que l'on peut appeler objectif de performance, et la valeur observée. Dans le cadre de la délégation du service d'eau, de tels objectifs peuvent être inscrits dans les contrats.

Une voie différente permettant d'évaluer les résultats potentiels consiste à contrôler les procédures mises en œuvre, par exemple dans les hôpitaux (de Kervasdoué et Arié 2002). Cette façon de procéder pourrait être envisagée pour qualifier le processus qui conduit à distribuer une eau de bonne qualité en prenant en compte par exemple les possibilités d'autocontrôle ou la qualité des plans de secours... La performance évoquée par la suite se rapporte aux résultats observés plutôt qu'aux moyens engagés pour améliorer ces résultats, selon une recommandation formulée par Guérin-Schneider. Les conséquences de ce choix impliquent que « *le suivi des résultats s'attache, quant à lui, non pas aux coûts, mais au respect des objectifs fixés. Il laisse l'opérateur libre de choisir les moyens à mettre en œuvre mais contrôle que la résultante de son action soit conforme aux attentes.* ».

2.2.2. Critères pour élaborer un indicateur de performance

Les indicateurs existent pour répondre à certaines attentes. Cependant, n'importe quelle mesure ne peut constituer un indicateur. Alegre (1997), pour le compte de l'IWA, énonce un certain nombre de règles à respecter pour que, d'une part, une mesure puisse être assimilée à un IP et que, d'autre part, un groupe d'IP puisse définir un service. Ainsi, les IP doivent répondre aux critères suivants :

- représenter tous les aspects pertinents du service afin d'avoir une image globale de celui-ci au travers d'un nombre limité d'IP ;
- être capables de fournir une interprétation non biaisée des différents aspects caractéristiques du système ;
- être clairement définis, en veillant à ce que leur sens soit concis et ne prête pas à plusieurs interprétations ;
- éviter d'être redondants entre eux ;
- ne nécessiter que des moyens de mesure accessibles au plus grand nombre des services (éviter l'usage d'équipements coûteux et trop sophistiqués) ;
- être vérifiables, surtout s'ils sont voués à être utilisés par des organismes de régulation à même de les contrôler ;
- être faciles à comprendre, même par des non spécialistes, particulièrement les usagers ;
- se rapporter à une période donnée, le plus souvent annuelle ;
- s'appuyer sur un périmètre géographique précis ;
- être applicables à des services dotés de caractéristiques et de degrés de développement différents ;
- être en nombre limité pour ne traduire que les aspects essentiels du service.

Guérin-Schneider (2001) note qu'il n'est pas toujours possible de concilier l'ensemble de ces critères.

Notons encore qu'un IP n'est pas nécessairement accessible directement à partir d'une mesure mais qu'il peut en inclure plusieurs ou être la résultante d'un calcul.

2.2.3. Principaux indicateurs de performance techniques existant dans le domaine des casses, des fuites et de la qualité de l'eau

2.2.3.1. Casses et interruptions de service

L'IP relatif aux casses le plus accessible est le taux de casses par kilomètre et par an. Lambert et al. (1999) proposent pour des réseaux avec des infrastructures en bonnes conditions un taux de 0.124 casse.km⁻¹.an⁻¹ pour les conduites et 2.25 casse.1000 branchements⁻¹.an⁻¹ pour les branchements. Ces valeurs peuvent être assimilées à une limite basse des taux de casses. Pelletier et al. (2003) indiquent qu'un taux annuel de 0,2 à 0,39 casse.km⁻¹.an⁻¹ pour les conduites peut être considéré comme acceptable. Des données portugaises pour la même grandeur (Lambert 2002) proposent des chiffres allant de 0,23 à 1,21 casse.km⁻¹.an⁻¹ selon les réseaux étudiés.

Cependant, le taux de casses, bien qu'immédiatement compréhensible, est trop global pour revêtir un intérêt opérationnel. Du point de vue du gestionnaire, il est préférable de connaître le taux de casses par type de matériau et par diamètre par exemple, avec une localisation précise des casses sur les tronçons.

Les casses, hormis les efforts de réparation qu'elles nécessitent et qui impliquent le gestionnaire, se manifestent surtout aux yeux de la collectivité et pour l'utilisateur par des interruptions de service. Evaluer la performance sur ce point précis semble donc pertinent. Le gestionnaire s'attachera à comprendre l'origine de ces interruptions de service, avec le taux de casses ou des outils améliorés. Deux indicateurs proposés par l'IWA (Alegre *et al.* 2000) et Guérin-Schneider (2001), respectivement T_1 et T_2 , aident à la mesure de performance dans le domaine des interruptions de service.

Le taux d'interruptions non programmées T_1 s'exprime de la sorte :

$$T_1 = \frac{\sum_{\text{interruptions non programmées}} \text{durée d'interruption en heures} * \text{population touchée}}{365 * 24 * \text{population totale desservie}}$$

- avantages :
 - facilité d'interprétation car il s'agit d'un pourcentage
 - prise en considération de l'importance de l'interruption : durée, population affectée

- inconvénients : - difficulté à connaître la population touchée
- chaque interruption doit être consignée précisément

Le taux d'interruptions non programmées T_2 s'écrit lui :

$$T_2 = \frac{\text{nombre total d'interruptions}}{\text{nombre d'abonnés}/1000}$$

- avantage : - accessible à tous les services
- inconvénients : - toutes les interruptions ont le même poids
- certaines interruptions jugées trop courtes ne seront peut-être pas comptées

Un autre indicateur, plus complexe parce que nécessitant une modélisation hydraulique du réseau, consiste à évaluer *a posteriori* sur une année le volume d'eau non distribué suite aux casses enregistrées. Un tel calcul peut être réalisé par Failnet (Delille 2002), programme développé par le Cemagref.

L'évaluation de la performance des réseaux relativement aux interruptions de service sous cette dernière forme reste encore assez peu pratiquée par les services d'eau français.

Les effets des interruptions de services potentielles peuvent être synthétisés grâce au concept de fiabilité hydraulique des réseaux d'eau potable. Elle se définit comme la probabilité de satisfaire sur le réseau et à n'importe quel moment la demande aux nœuds et les pressions requises pour des scénarios de casses variés (Shinstine *et al.* 2002). Elle s'apparente donc à un indicateur de moyens, comme la structure du réseau ou le nombre de ressources disponibles, insuffisant pour la mesure de performance telle que nous l'envisageons. Cependant, il s'agit d'une voie intéressante et grandement suivie dans des projets de recherche récents (Gupta et Bhave 1994, Kansal *et al.* 1995, Tanyimboh *et al.* 1999, Gargano et Pianese 2000, Ostfeld 2001, Ostfeld *et al.* 2002) qui a pour but d'estimer les impacts de casses localisées en différents endroits et de pointer les endroits sensibles du réseau. Brémond et Berthin (2001) ont élaboré dans ce sens un indicateur qui tient à la fois compte de la vulnérabilité des nœuds desservis et des tronçons où peut survenir la casse. Son utilisation nécessite au préalable de disposer d'un outil de prédiction des casses.

2.2.3.2. Pertes et fuites

2.2.3.2.1. Le rendement

C'est l'indicateur actuellement le plus utilisé en France pour quantifier les pertes. La formulation la plus simple du rendement R consiste à écrire :

$$R = \frac{V_c}{V_c + V_p}$$

où V_c est le volume consommé et V_p le volume des pertes.

Le terme de rendement peut être précisé en distinguant le rendement primaire R_p et le rendement net R_n comme proposé par l'AGHTM (1990).

$$R_p = \frac{\text{volume comptabilisé}}{\text{volume mis en distribution}}, \quad R_n = \frac{\text{volume comptabilisé} + \text{volume autorisé non compté}}{\text{volume mis en distribution}}$$

Cette précision permet de ne pas fausser le calcul par une surestimation cachée des volumes autorisés non comptabilisés, mais aussi de s'approcher au mieux des pertes réelles telles que définies dans le Tableau 1.

On relève plusieurs limites importantes quant à l'utilisation de cet indicateur.

Tout d'abord, les pertes ne traduisent pas nécessairement l'état technique du réseau, comme l'indique le Tableau 1. Cet indicateur revêt plus un caractère économique ou environnemental (traduisant éventuellement la pression exercée sur la ressource) qu'un aspect purement technique et patrimonial.

De plus, si le volume mis en distribution est généralement assez facilement estimé, il n'en va pas de même du volume comptabilisé. Au-delà des erreurs de comptage, les périodes de relève, changeantes d'un réseau à l'autre ou d'une année à l'autre, peuvent entraîner des variations considérables sur les calculs de rendement. Renaud (2004) a montré que selon les procédures, le rendement peut être modifié dans des proportions allant jusqu'à 10 points.

Enfin, le rendement dépend des volumes consommés, ce qui biaise la valeur observée. En effet, le volume des fuites est fonction de la pression (voir paragraphe 1.3.1) mais pas du

volume transitant dans les conduites : la vitesse de l'eau augmente en cas de hausse de la consommation, entraînant une hausse des pertes de charge dynamiques qui restent cependant négligeables devant la pression statique. Ainsi, pour deux réseaux dotés d'un même volume de pertes, celui sur lequel la consommation sera la plus élevée aura un meilleur rendement. Cette grandeur ne traduit donc pas correctement le niveau des pertes d'un réseau. La difficulté de comparer des rendements entre eux est ici mise en avant puisque deux réseaux avec la même quantité de pertes doivent *a priori* sur ce plan être qualifiés de la même manière.

La référence pour une bonne valeur de rendement primaire communément admise est de 80% (Guérin-Schneider 2001), sans différenciation des types de service, sans lien avec le patrimoine. Les limites d'interprétation du rendement ont conduit à proposer d'autres indicateurs comme les indices de pertes.

2.2.3.2.2. Les indices de pertes

Ils sont basés directement sur le volume des pertes V_p et ne font pas intervenir de rapport de volumes comme pour le rendement. Le calcul de l'indice s'effectue en ramenant V_p à une grandeur caractéristique du réseau, la longueur du linéaire ou le nombre de branchements. Ces indicateurs traduisent mieux l'état physique du réseau ainsi que la gestion pratiquée, donc la performance du couple gestionnaire/réseau. Sur un réseau urbain où la densité de branchements est forte, l'indice de pertes par branchement est préconisé, les fuites intervenant pour une grande part sur les branchements. Pour un réseau rural, l'indice linéaire de pertes primaires est plus adapté puisque les pertes s'observeront dans ce cas majoritairement sur les conduites. Cependant, l'indice linéaire de pertes est également utilisé pour des réseaux urbains comme le montre le Tableau 2 issu d'un rapport de l'Agence de l'Eau Loire Bretagne (A.E.L.B 1993). Ce tableau présente les références françaises pour l'indice linéaire de pertes.

Tableau 2. Valeurs françaises de référence pour l'indice linéaire de pertes ($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$).

	Rural	Intermédiaire	Urbain
Bon	<1,44	<3,12	<7,2
Acceptable	<2,4	<4,8	<9,6
Médiocre	<3,84	<7,92	<15,12
Mauvais	>3,84	>7,92	>15,12

On observe notamment sur ce tableau que les fuites dues aux branchements sont bien prises en compte dans le cadre des réseaux urbains pour lesquels le seuil du qualificatif « Bon » est beaucoup plus élevé que celui associé à un réseau rural.

Ces valeurs peuvent être comparées avec celles issues d'une analyse portugaise (Marques et Monteiro 2001) considérant le nombre d'abonnés (ab) par kilomètre de conduites, Tableau 3.

Tableau 3. Valeurs portugaises de référence pour l'indice linéaire de pertes ($m^3.km^{-1}.j^{-1}$).

	Zone rurale <50ab.km ⁻¹	Zone semi-urbaine 50ab.km ⁻¹ <densité <125ab.km ⁻¹	Zone urbaine >125ab.km ⁻¹
Excellent	<2,4	<4,8	<12
Acceptable	<7,2	<12	<24
Faible	>7,2	>12	>24

On remarque que ce qui est qualifié d'acceptable dans le cas d'un réseau urbain pour les références portugaises est simplement médiocre avec les données françaises. Ceci traduit bien toute la difficulté de trancher une situation observée et d'y apporter un jugement juste et motivé.

2.2.3.2.3. *L'Infrastructure Leakage Index (ILI)*

Lambert *et al.* (1999, 2000, 2000, 2001) et Lambert (2000) ont proposé un autre type d'indicateur, essentiellement utilisé dans les pays anglo-saxons actuellement, l'indicateur ILI ou Infrastructure Leakage Index.

Nous présentons en détail cet indicateur et ses fondements car ils ont inspiré en partie le travail que nous proposons par la suite. Inconnu des services d'eau français lors de la thèse de Guérin-Schneider (2001), il commence à être considéré par les gestionnaires qui voient en son application l'avantage de pouvoir rendre compte des améliorations possibles en matière de fuites.

La définition de l'indicateur ILI reprise par l'IWA (Alegre *et al.* 2000), dont nous définissons les termes à la suite, est :

$$ILI = \frac{CARL}{UARL}$$

La grandeur CARL (Current Annual Real Losses) correspond aux pertes réelles sur le réseau, telles que définies dans le Tableau 1. Elles sont exprimées en $\text{l.branchement}^{-1}.\text{jour}^{-1}$, lorsque le système est sous pression. Si la densité de branchements est inférieure à $20.\text{km}^{-1}$, alors on exprime les CARL en $\text{l.km}^{-1}.\text{jour}^{-1}$. Le terme UARL, pour Unavoidable Annual Real Losses, est aussi appelé fuites incompressibles. Les UARL sont exprimées en $\text{l.branchement}^{-1}.\text{jour}^{-1}$.

Ces quelques définitions suffisent à comprendre le fonctionnement de l'indicateur. Les UARL sont nécessairement incluses dans les CARL. Il s'agit des pertes réelles auxquelles on peut s'attendre dans un système avec des infrastructures en bonnes conditions, un contrôle actif et intensif des fuites, des réparations rapides et efficaces des casses et fuites (Lambert *et al.* 1999). Il résulte de la définition que l'indicateur prend des valeurs supérieures à 1. La valeur attendue du ILI pour des réseaux faisant l'objet d'une « bonne » gestion est proche de 1. Sur les réseaux présentant un ILI très éloigné de 1, la gestion, au contraire, peut être améliorée.

L'écart entre la valeur du ILI calculée et 1 indique l'intensité des efforts à fournir sur le réseau concerné pour faire tendre les pertes réelles vers le niveau incompressible. Ce niveau constitue d'ailleurs un objectif de performance en matière de fuites, le plus élevé selon la définition des termes.

Il ne s'agit cependant aucunement d'un indicateur économique et les efforts à consentir pour obtenir une certaine amélioration seront parfois démesurés par rapport aux gains envisageables.

L'essentiel des travaux de Lambert ne repose pas sur la définition du ILI mais plutôt sur la quantification et la formulation des UARL. Il distingue trois catégories de fuites composant les fuites incompressibles :

- les background (ou undetectable) leaks, que nous appellerons fuites diffuses. Elles sont définies dans le cadre du concept BABE (Burst And Background Estimates) développé par Lambert au milieu des années 90 (Lambert 1994), comme étant des événements individuels pour lesquels l'écoulement est inférieur à 500 l.h^{-1} à 5 bars^1 de pression. Cette

¹ 1 bar = 10^5 Pa

valeur limite s'appuie sur un niveau de débit de fuite détectable par des méthodes acoustiques généralement admis pour des conduites métalliques enterrées sous une couverture d'épaisseur minimale 1 m. Il est donc noté que ces fuites perdurent, même en cas de recherche active de fuites, jusqu'à ce qu'elles soient repérées par chance ou qu'elles s'aggravent jusqu'à un point à partir duquel elles deviennent détectables. Elles se situent souvent aux joints entre canalisations et au niveau des branchements ;

- les casses manifestes, définies au paragraphe 1.2.1, dont le débit est supérieur à 500 l.h^{-1} ;
- les casses ou fuites non repérées, définies au paragraphe 1.2.1, dont le débit est supérieur à 500 l.h^{-1} .

Tout comme Kanakoudis (2004), Lambert (1994) note que les pertes dues aux fuites diffuses et non repérées sont généralement significativement plus importantes que celles issues des casses manifestes, en raison de la durée de l'écoulement.

Chacun des types de fuite décrits précédemment peut se produire sur différentes composantes du réseau :

- conduites ;
- branchements, de la conduite à la limite de propriété ;
- branchements, après la limite de propriété.

La dernière distinction n'a pas lieu d'être sur des réseaux français équipés de compteurs généralement situés en limite de propriété. Elle résulte des travaux de Lambert relatifs à d'autres pays.

Le Tableau 4, traduit de Lambert *et al.* (1999), reprend les neuf différentes sources de fuites ainsi définies. Il indique également, pour chacune d'elles, les grandeurs à connaître pour effectuer le calcul des pertes correspondantes.

Tableau 4. Origines et types des fuites sur les réseaux d'eau potable.

Composante du réseau	Fuites diffuses	Casses manifestes	Casses non repérées
Conduites	longueur	nombre.an ⁻¹	nombre.an ⁻¹
	pression	pression	pression
	débit de fuite minimal	débit de fuite moyen	débit de fuite moyen
		durée moyenne	durée moyenne
Branchements, de la conduite à la limite de propriété	nombre	nombre.an ⁻¹	nombre.an ⁻¹
	pression	pression	pression
	débit de fuite minimal	débit de fuite moyen	débit de fuite moyen
		durée moyenne	durée moyenne
Branchements, après la limite de propriété	longueur	nombre.an ⁻¹	nombre.an ⁻¹
	pression	pression	pression
	débit de fuite minimal	débit de fuite moyen	débit de fuite moyen
		durée moyenne	durée moyenne

Certaines de ces grandeurs, comme la pression ou la longueur du linéaire sont propres à chaque réseau et relativement accessibles. En revanche, les débits de fuite moyens ou minimums sont très difficilement mesurables, tout comme les durées d'écoulement. Les attributs de chaque catégorie sont supposés, dans le cadre des UARL, égaux sur tous les réseaux. Les valeurs retenues sont issues d'une étude croisée entre des observations réalisées sur un panel de 27 réseaux différents, pris dans 20 pays, et des données bibliographiques relatives à d'autres sources elles aussi internationales. Ainsi, pour une pression de 5 bars, Lambert *et al.* (1999) fournit les valeurs regroupées dans le Tableau 5. Ces valeurs représentent les caractéristiques moyennes de chaque type de fuite.

Tableau 5. Valeurs unitaires associées à chaque type de fuite.

Composante du réseau	Fuites diffuses	Casses manifestes	Casses non repérées
Conduites	20 l.km ⁻¹ .h ⁻¹	0,124 casses.km ⁻¹ .an ⁻¹ à 12 m ³ .h ⁻¹ pendant 3 jours	0,006 casses.km ⁻¹ .an ⁻¹ à 6 m ³ .h ⁻¹ pendant 50 jours
Branchements, de la conduite à la limite de propriété	1,25 l.brcht ⁻¹ .h ⁻¹	2,25.1000 brchts ⁻¹ .an ⁻¹ à 1,6 m ³ .h ⁻¹ pendant 8 jours	0,75.1000 brchts ⁻¹ .an ⁻¹ à 1,6 m ³ .h ⁻¹ pendant 100 jours
Branchements, après la limite de propriété	0,5 l.brcht ⁻¹ .h ⁻¹	1,5.1000 brchts ⁻¹ .an ⁻¹ à 1,6 m ³ .h ⁻¹ pendant 9 jours	0,5.1000 brchts ⁻¹ .an ⁻¹ à 1,6 m ³ .h ⁻¹ pendant 101 jours

Puis, en exprimant ces valeurs de référence dans les unités adaptées, Lambert obtient l'importance relative de ces différentes catégories de fuites, Tableau 6.

Tableau 6. Pertes liées à chaque type de fuite, par mètre de colonne d'eau (mCE¹).

Composante du réseau	Fuites diffuses	Casses manifestes	Casses non repérées	Total	Unités
Conduites	9.6	5.8	2.6	18	1.km ⁻¹ .jour ⁻¹ .m ⁻¹
Branchements, de la conduite à la limite de propriété	0.6	0.04	0.16	0.8	1.brcht ⁻¹ .jour ⁻¹ .m ⁻¹
Branchements, après la limite de propriété	16	1.9	7.1	25	1.km ⁻¹ .jour ⁻¹ .m ⁻¹

Enfin, il obtient la formulation globale des UARL en l.jour⁻¹ :

$$UARL = (18L_m + 0.8N_c + 25L_p)P$$

où L_m représente la longueur totale des canalisations en km,

N_c est le nombre de branchements,

L_p prend en compte la longueur, en km, de canalisations entre la limite de propriété et le compteur,

P est la pression de service moyenne en mCE.

Ainsi, le ILI se calcule grâce à la relation suivante :

$$ILI = \frac{CARL}{(18L_m + 0.8N_c + 25L_p)P}$$

Il traduit bien les pertes sur un réseau, plus exactement toutes celles qu'il est possible d'éliminer, grâce à certaines actions non précisées. Il offre l'avantage par rapport aux autres indicateurs d'inclure dans sa formulation une valeur référence, les fuites incompressibles.

¹ 10⁵ Pa ≈ 10,2 mCE

Ceci permet de qualifier directement l'état du réseau au regard des fuites. Cependant, cette valeur sera discutée au paragraphe 4.2.2.

2.2.3.3. Qualité de l'eau

L'indicateur utilisé pour refléter la qualité de l'eau est le taux de conformité. Il correspond au rapport entre le nombre d'analyses conformes aux exigences de qualité réglementaires et le nombre total d'analyses réalisées. Comme l'indique le rapport du Ministère de la Santé et des Solidarités (2005) sur la qualité de l'eau potable en France, cet indicateur se décline fréquemment selon des axes principaux relatifs aux paramètres microbiologiques, aux nitrates ou aux pesticides.

La réglementation s'inscrit dans un cadre européen fixé par la directive 98/82/CE relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. Elle a ensuite été transposée en droit français par le décret 2003-461 du 21 mai 2003 puis inscrite dans le code de la Santé Publique. On y trouve notamment les exigences de qualité pour l'eau potable, traduites par 54 paramètres avec des valeurs limites à respecter ainsi que les modalités de suivi de cette qualité (paramètres à rechercher, fréquence des contrôles). En parallèle, les exploitants sont également tenus de surveiller la qualité de l'eau distribuée. Les exigences de qualité s'appuient essentiellement sur des valeurs guides proposées par l'OMS¹. Enfin, obligation est faite de communiquer à l'utilisateur les résultats des contrôles.

En 2002, le taux de conformité global (paramètres microbiologiques et physico-chimiques) atteignait 99% pour les unités de distribution (UD) de plus de 5000 habitants.

La qualité microbiologique des eaux s'évalue par des germes témoins de contamination fécale, faciles à détecter et non directement pathogènes : ces indicateurs sont *Escherichia coli* et les entérocoques. Leur présence peut indiquer l'existence de micro-organismes pathogènes pour l'homme. Le nombre de mesures correspondantes effectuées en 2002 se chiffre à 1281000. Les principaux résultats sont :

- 94.2 % de la population a reçu de l'eau dont la qualité a été conforme en permanence aux limites imposées ;
- 99.7 % des prélèvements étaient conformes pour les UD de plus de 50000 habitants ;

¹ OMS : Organisation Mondiale de la Santé

- 85.8 % des analyses se sont révélées conformes pour les UD de moins de 500 habitants.

Pour ce qui est des nitrates ou des pesticides, les taux de conformité atteignent des valeurs équivalentes. La norme est de 50 mg.l⁻¹ de teneur maximale en nitrate, et de 0,10 µg.l⁻¹ pour chaque pesticide (à l'exception de l'aldrine, la dieldrine, l'heptachlore et de l'heptachloroépoxyde à 0,03 µg.l⁻¹), avec une somme totale des substances mesurées ne dépassant pas 0,50 µg.l⁻¹.

Le taux de conformité est un indicateur qui présente toutefois un certain nombre d'inconvénients :

- la logique binaire du résultat, conforme/non conforme, ne permet pas de prendre en considération l'intensité du dépassement sur certains paramètres ;

- les analyses n'offrent pas la possibilité de connaître la distribution spatio-temporelle de la contamination. La mesure est ponctuelle et ne représente la qualité de l'eau qu'à l'endroit où elle est effectuée. On ne peut déterminer ni la part de la population exposée, ni la durée pendant laquelle elle l'a été ;

- la fréquence des analyses (proportionnelle aux débits des installations et aux populations desservies) et le choix des points de contrôle, généralement des bâtiments publics, ne garantissent pas un échantillonnage représentatif du réseau.

2.2.4. Limites associées à la mesure de performance

Une fois la valeur de l'IP déterminée, quel que soit le domaine, il faut encore pouvoir l'interpréter. L'utilisation très généralisée des indicateurs de performance ne doit ainsi pas masquer certaines précautions à observer quant à leur utilisation et les limites de leur application :

- le caractère nécessairement agrégé de l'information conduit à son appauvrissement. Par exemple, un taux de casse moyen doit être analysé en fonction des conduites concernées : linéaire, nature, diamètre ;

- il est difficile de disposer de valeurs de référence afin de fixer des objectifs ou de déclencher des actions correctives. Ces points de repères permettent de situer l'état patrimonial et la gestion pratiquée par rapport à une situation moyenne ou idéale de réseaux équivalents. L'IP n'est cependant généralement pas associé à une grille de lecture traduisant les valeurs observées en appréciations et jugements fondés ;

- la valeur de l'IP ne donne pas toujours d'indication sur les moyens à mettre en œuvre pour le faire évoluer dans le bon sens. L'IP permet la mise en évidence d'un problème particulier, mais il ne renseigne pas systématiquement sur la nature des actions correctives ;

- l'image donnée par l'IP est fixe et se rapporte à une période qui vient de s'écouler. L'action entreprise a donc toujours un temps de retard sur la réalité du réseau. Même si la série temporelle des IP est intéressante, le pilotage d'une gestion à long terme n'est pas envisageable au moyen d'une mesure de performance instantanée présente ni en s'appuyant sur une évolution passée.

Ces différents points montrent la prudence avec laquelle il faut considérer une valeur d'IP et sa relative insuffisance lorsqu'il s'agit d'entreprendre des actions pour améliorer la performance, tant sur les moyens à mettre en œuvre que sur son évolution future.

3. EVOLUTION DE L'ETAT PATRIMONIAL

Dans chaque domaine où l'état du réseau est influent (casses et interruptions de service, fuites, qualité de l'eau), des indicateurs existent pour qualifier la performance associée et en partie imputable à l'état du patrimoine. Ces indicateurs traduisent une situation à un moment donné.

Si les IP traditionnels demeurent l'outil privilégié d'appréciation de la performance et de communication entre les différents acteurs, ils ne sont pas suffisants pour définir une gestion à long terme du patrimoine. Les modèles prédictifs permettent d'évaluer leur évolution.

3.1. Gestion anticipée : planification des actions à partir des valeurs d'indicateurs attendues

Pour apporter des réponses satisfaisantes aux enjeux techniques évoqués au paragraphe 1, une gestion à long terme des réseaux est indispensable en raison des investissements très importants qu'ils représentent et du souci de transmettre ce patrimoine aux générations futures dans un état satisfaisant et maîtrisé.

Dès lors, il faut fixer un objectif à atteindre, par exemple sous forme d'IP, dans un domaine précis et à un horizon plus ou moins lointain. Afin de tester une politique de gestion patrimoniale destinée à atteindre l'objectif fixé, deux prérequis sont nécessaires :

- il faut disposer d'un modèle d'évolution du phénomène étudié qui précise son évolution naturelle en l'absence de toute intervention. Cette démarche nécessite l'acquisition de données spécifiques parfois sur de longues durées et une connaissance fine du patrimoine.
- le modèle doit permettre d'évaluer les conséquences sur l'objectif fixé des actions envisagées par le gestionnaire, par exemple pour distinguer les effets d'une campagne de recherche de fuites de ceux d'une opération de renouvellement sur le niveau de fuite d'un réseau.

3.2. Outils disponibles dans le domaine des casses : les modèles de prévision

L'indicateur le plus communément utilisé en ce qui concerne les casses est le taux de casses par kilomètre et par an. Depuis les travaux d'Eisenbeis (1994) notamment, les modèles prédictifs ont fait leur apparition dans ce domaine. Leur étude s'est poursuivie par exemple dans le cadre du projet européen CARE-W¹ (Eisenbeis *et al.* 2003). Les résultats de ces recherches commencent à être utilisés par les gestionnaires pour les choix des tronçons à renouveler. Nous présentons brièvement les fondements et caractéristiques de ces modèles.

Les canalisations d'eau potable forment un système sur lequel s'observent des événements récurrents, à savoir des casses. La façon de collecter et d'enregistrer les informations concernant ces défaillances, à des fins de modélisation, a été décrite par Eisenbeis *et al.* (2002). Les tronçons sont les individus de base considérés dans la démarche d'analyse statistique qui accompagne la mise en place de ces modèles.

Comme le souligne Le Gat (2007 (à paraître)), nombreux sont les systèmes subissant des défauts à répétition, dans des domaines variés dont la santé publique est un exemple (patients atteints de faiblesses cardio-vasculaires par exemple). La caractéristique commune de ces systèmes réside dans la double dépendance au temps du phénomène récurrent :

- la fréquence de répétition des événements affectant les éléments de base constitutifs du système (conduite, patient) augmente avec l'âge des individus ;
- elle croît également avec le nombre d'événements déjà subis par ces mêmes individus.

Le modèle proposé par Eisenbeis (1994) considère la distribution du temps écoulé entre deux événements. Les intervalles séparant les casses susceptibles d'être observées sont des variables aléatoires qui suivent des distributions de Weibull dont les paramètres d'échelle et de position dépendent du rang de la casse. Le paramètre de position est en outre écrit comme une combinaison linéaire de variables explicatives telles que le diamètre de la canalisation, la longueur du tronçon, la nature du sol ou bien encore le trafic routier... Conçu initialement pour être calé sur un historique de données de casses couvrant la période allant de la date de

¹ CARE-W : Computer Aided REhabilitation of Water networks

pose jusqu'aux casses les plus récentes, le modèle a été aménagé par Le Gat et Eisenbeis (2000) pour traiter le problème de la troncature à gauche : les réseaux ne disposent en effet généralement pas d'un historique complet des casses.

Pelletier *et al.* (2003) proposent également une méthode pour paramétrer le processus mis en place par Eisenbeis avec troncature à gauche.

Un autre type de modèle permet de prendre en compte uniquement l'augmentation des casses avec le vieillissement des conduites, en s'appuyant sur le Processus de Poisson Non Homogène aussi appelé NHPP¹. Il s'agit d'un processus de comptage défini par Ross (1983) et Lawless (1987) notamment, mis en pratique dans le cadre des réseaux d'eau potable par Rostum (2000). Le rang des casses n'intervient pas dans ce type de formulation et la troncature à gauche n'est donc pas problématique. En contrepartie, le modèle est peu performant pour détecter les tronçons à risque, mais prévoit correctement en moyenne le nombre de casses.

Malandain (1999) a étudié un modèle qui ne considère plus les tronçons comme individus mais qui les regroupe selon des classes homogènes. Pour y parvenir, on se fonde sur un avis d'expert et on recourt à une régression de Poisson sur les nombres de casses observées globalement chaque année.

Le Gauffre *et al.* (2001) envisage des processus enchaînant des distributions exponentielles (cas particulier de Weibull avec paramètre d'échelle fixé à 1). Le paramétrage des fonctions d'intensité de casse est comme chez Malandain effectué par catégories homogènes de tronçons. Il propose également des distributions exponentielles dont le paramètre est proportionnel au rang de la casse : ceci conduit au processus de Yule, aussi appelé Pure Birth Process (Ross 1983) sur lequel nous reviendrons au chapitre 3.

Enfin, une extension simple du processus de Yule conventionnel, décrite par Chang *et al.* (2002), permet d'inclure l'augmentation de la fréquence d'occurrence des événements avec l'âge et de proposer un modèle prédictif complet. Il allie le bon pouvoir de détection des objets les plus à risque à la simplicité de mise en œuvre du NHPP et l'absence de biais dans ses prédictions.

¹ NHPP : Non Homogeneous Poisson Process

Ces modèles ont pour but de classer les différents tronçons selon le risque de casse qu'ils représentent. Une analyse multicritère (voir notamment à ce sujet Le Gauffre *et al.* 2004), s'appuyant sur les différents impacts de défaillances, aide à la hiérarchisation des tronçons candidats au renouvellement. Le gestionnaire décide ensuite de répartir le budget alloué au renouvellement en fonction de ces informations et d'autres contraintes qu'il juge pertinentes.

La performance dans le domaine des casses peut ainsi être estimée dans le temps et les effets du renouvellement associés pris en compte en testant divers scénarios de renouvellement. Ceux-ci peuvent présenter des rythmes annuels de renouvellement différents et permettent de calculer l'évolution prévisible des taux de casses correspondants.

Un tel outil, à la fois prédictif et opérationnel, n'existe pas dans le domaine des fuites. Leur évolution dans le futur est inconnue et nous ne savons pas apprécier par avance l'efficacité des différents moyens à disposition pour les faire diminuer.

4. CAS DES FUTES : UNE APPROCHE NOUVELLE POUR LIER PATRIMOINE ET GESTION

Nous envisageons dans ce paragraphe la possibilité, comme pour les casses, de prévoir l'évolution des fuites dans le temps et d'établir le lien entre cette évolution et la gestion pratiquée durant la période considérée. Le lien doit permettre au gestionnaire, en fonction de l'évolution prévue, d'adapter sa réponse en termes de gestion patrimoniale ou opérationnelle, dans un souci de maîtrise du débit de fuite.

La qualité de l'eau, pour laquelle même les IP basiques prêtent à discussion, semble encore trop mal maîtrisée dans son interaction avec le patrimoine pour que nous en fassions un angle d'attaque de la gestion patrimoniale.

4.1. Appréhender les fuites dans les réseaux : estimation quantitative et réduction

Nous évoquons ici les fuites du point de vue opérationnel, en amont d'éventuels calculs de performance. L'exploitation des réseaux par un gestionnaire fait que le rendement, avec plus ou moins de justesse, est accessible à tous les services. Le calcul de l'indicateur ILI nécessite lui de connaître quelques grandeurs patrimoniales ou opérationnelles particulières. Nous présentons ici des outils pour mesurer ou détecter précisément les fuites qui ne sont pas, pour l'instant, présents ou accessibles sur tous les services mais qui sont nécessaires pour améliorer la connaissance dans ce domaine.

4.1.1. Sectorisation et débit de fuite

Les pertes s'expriment généralement en $m^3 \cdot an^{-1}$, alors que les fuites (diffuses et non repérées) sont évaluées en $m^3 \cdot h^{-1}$, éventuellement par kilomètre, c'est pourquoi l'on parle de débit de fuite. Comment avoir accès à cette grandeur ?

La sectorisation des réseaux est un préalable indispensable à l'obtention de cette donnée, mais elle offre également des possibilités plus vastes comme l'indique la définition proposée par le SMEGREG¹ (2006) : la sectorisation est un « *outil de diagnostic de l'état et du fonctionnement du réseau à un instant donné, mais surtout un outil de gestion du patrimoine au quotidien. La sectorisation consiste à décomposer un réseau en un ou plusieurs niveaux de*

¹ SMEGREG : Syndicat Mixte d'Etudes pour la Gestion de la Ressource en Eau de la Gironde

sous-réseaux pour lesquels les volumes mis en distribution sont mesurés de façon permanente ou temporaire ». L'ensemble des objectifs énoncés ici est ambitieux et tous dépendent de la mesure du débit de fuite. Prescott *et al.* (2003) proposent une définition plus technique pour caractériser les secteurs (ou DMA² en anglais), produits de la sectorisation : ce sont des zones de petite taille du réseau de distribution, de quelques milliers de branchements tout au plus alimentées par un unique point sur lequel est installé un dispositif de comptage (compteur ou débitmètre) mesurant la consommation totale du secteur.

En pratique, lorsqu'il s'agit de délimiter un secteur sur un réseau, on veillera à définir une unité géographique homogène et facilement isolable, prenant en compte les contraintes liées à la configuration hydraulique du réseau (découpage des unités de distribution, zone de dessertes des réservoirs, étages de pression, maillages...). On cherchera à connaître sur cette zone, dans le cas d'une sectorisation temporaire :

- la consommation moyenne, maximale et minimale pendant 24 heures ;
- la distribution géographique de cette consommation pendant les périodes de débit minimum ;
- les pressions moyenne, maximale et minimale ;
- la consommation industrielle moyenne pendant les heures de consommation minimale ;
- l'état des vannes les plus importantes (ouvertes ou fermées, manœuvrables ou non).

Une sectorisation est l'aboutissement d'un mode opératoire précis qui doit permettre d'isoler avec certitude le secteur, sans quoi les mesures obtenues n'ont pas de sens.

Le point entrant de débit unique est une notion valable uniquement pour une sectorisation ponctuelle où l'on peut envisager d'isoler temporairement complètement un secteur.

Pour des réseaux où la sectorisation est permanente et par exemple associée à un système de télégestion, les points d'entrée ou de sortie sur le secteur peuvent être plus nombreux. Il faut alors établir une formule de calcul qui donne la consommation, fuites comprises, sur le secteur. Il s'agit d'une étape parfois délicate, les sens d'écoulement n'étant pas toujours maîtrisés. Une erreur dans le calcul du débit rend toute interprétation impossible. De plus, ces secteurs permanents conduisent à la multiplication des appareils de mesure et donc à

² DMA : District Metered Area

l'augmentation de l'incertitude sur les débits mesurés. Renaud (2004) note d'ailleurs que le concepteur doit, au stade de la définition du zonage, prendre en considération la problématique du niveau d'incertitude qui dépend de :

- la précision de la mesure : il faut veiller à ce que le débit minimal de chaque compteur soit compatible avec les débits les plus faibles qu'il doit mesurer.
- le nombre de comptages sur le secteur
- la taille du secteur

Ainsi, la construction de secteurs nécessite de nombreuses étapes qu'il convient de respecter. Nous pouvons ajouter l'importance de connaître le maximum d'éléments sur le patrimoine du secteur, comme le linéaire de conduites, le nombre de branchements ou encore les principaux matériaux et diamètres.

Nous avons évoqué à plusieurs reprises dans ce paragraphe le débit minimum : il s'agit en fait du débit de nuit, grandeur qui va nous aider à déterminer le débit de fuite sur un réseau sectorisé.

La méthode la plus communément employée pour le mesurer est appelée méthode débitmétrique ou mesure de consommation nocturne minimale. Les activités domestiques sont fortement réduites durant les périodes nocturnes et la demande générale en eau diminue. Les courbes journalières de consommation indiquent un minimum compris entre 00 h et 05 h. La probabilité pour qu'un abonné consomme de l'eau durant cette période est faible et la consommation est fortement réduite dans des intervalles de temps plus ou moins longs. Cette consommation sur le secteur n'est cependant jamais totalement nulle, et ce pour plusieurs raisons :

- des abonnés, privés ou industriels, exercent une activité consommatrice ;
- des robinets fuient par exemple chez les usagers ;
- une certaine quantité d'eau s'échappe de fuites présentes sur les canalisations, les branchements ou les autres organes hydrauliques installés sur le réseau : cette quantité nous intéresse précisément.

Une fois l'estimation des deux premières catégories de consommation effectuée, de manière globale généralement, nous avons directement accès au débit de fuite. La sectorisation rend possible la mesure précise du débit total consommé sur le secteur, l'étude des débits de nuit réduit la part d'incertitude quant aux différents types de consommation rencontrés.

Nous pouvons citer également la méthode de mesure des débits diurnes par tronçons pour déterminer les fuites sur un secteur. Elle a pour avantage d'éviter de travailler la nuit mais aussi de réduire l'imprécision liée à l'estimation de la part consommée durant la période nocturne. Le principe consiste, comme précédemment, à isoler des secteurs, mais de plus petite taille dans ce cas. L'appareil de comptage est un débitmètre très sensible qui enregistre les variations instantanées de débit, ce qui permet d'opérer une distinction entre le débit lié aux fuites et celui imputable à la consommation. Le premier est par nature constant sur une courte période, tandis que le second est aléatoire en fonction des ouvertures et fermetures de robinets. Il s'agit d'un moyen moins répandu pour accéder au débit de fuite et dont le principal inconvénient est qu'il ne permet de traiter qu'une très faible partie du réseau par opération.

4.1.2. Recherche de fuites, réhabilitation et renouvellement des conduites

L'évolution du débit de fuite n'est pas connue précisément, mais il est pas contre indiscutable qu'il ne peut aller qu'en augmentant à mesure que le réseau vieillit. C'est pourquoi des actions sont tôt ou tard nécessaires. On distingue les réparations ciblées de fuites préexistantes, après localisation par opérations de recherche de fuites, et les travaux préventifs que sont la réhabilitation ou le renouvellement.

4.1.2.1. Opérations de recherche de fuites

La sectorisation des réseaux et l'étude des débits de nuit orientent préalablement le gestionnaire sur les endroits où des fuites semblent exister.

A partir de là, l'utilisation de techniques acoustiques permet de repérer avec précision l'endroit d'où s'écoule la fuite. Les appareils détectent les vibrations ou les bruits produits par l'eau qui s'échappe des canalisations sous pression. Ces bruits se propagent sur de longues distances le long de la conduite ainsi que dans le sol environnant. Les caractéristiques physiques de la canalisation (type de matériau, diamètre) déterminent l'intensité du phénomène de propagation.

La première étape pour isoler une fuite consiste à en déterminer grossièrement l'emplacement par auscultation des points aisément accessibles du réseau (poteaux incendie, vannes). Dans un second temps, un repérage plus fin est réalisé en auscultant la surface du sol, directement

au-dessus de la conduite et à intervalles rapprochés. Les appareils utilisés sont des tiges d'écoute, des microphones au sol ou encore des aquaphones ou géophones. Ils sont soit mécaniques, soit électroniques. Ces derniers sont maintenant munis d'amplificateurs de signaux et de filtres antiparasites pour mettre en relief le signal issu de la fuite.

Cette seconde étape, qui succède à la prélocalisation de la fuite, peut être avantageusement remplacée par une technique de corrélation des bruits de fuite, en théorie plus précise et surtout plus rapide que l'auscultation.

Les corrélateurs acoustiques sont des appareils portatifs à micro processeur qui mesurent le signal acoustique émis par la fuite au moyen de capteurs de vibrations ou d'hydrophones disposés sur deux points de contact avec la conduite (poteaux incendie, vannes). Les signaux produits par la fuite sont ensuite transmis des capteurs au corrélateur. La fuite ne se trouvant généralement pas à égale distance des capteurs, il en résulte un décalage dans la réception des signaux. La position de la fuite est ensuite déterminée grâce à une formule algébrique dans laquelle interviennent le décalage mesuré, la distance entre les capteurs et la vitesse de propagation des ondes sonores dans la conduite (Hunaidi 2000).

Nous pouvons également citer comme autres techniques de localisation l'utilisation d'un gaz traceur plus léger que l'air et insoluble dans l'eau. Une fois injecté dans la conduite, ce gaz parvient à s'échapper au niveau de la fuite et ressort sur le sol, plus ou moins verticalement par rapport à l'endroit de la défaillance. Il n'a plus alors qu'à être détecté par des moyens appropriés.

La thermographie peut aussi servir à la détection des fuites. En effet, l'eau coulant d'une conduite souterraine modifie les caractéristiques thermiques du sol environnant. Des caméras infrarouges, portatives ou embarquées à bord d'un véhicule, permettent de déceler ces anomalies thermiques.

Enfin, les radars sont aussi un moyen pour repérer, de deux façons, les fuites sur les conduites d'eau enfouies :

- ils détectent les vides créés dans le sol par l'eau qui fuit et s'écoule autour de la conduite ;
- ils repèrent les segments de canalisation qui semblent plus profonds qu'ils ne le sont réellement, à cause de la hausse de la valeur de constante diélectrique du sol gorgé d'eau autour de la conduite.

Toutefois, les méthodes acoustiques, plus simples d'utilisation et nécessitant peu d'investissements, demeurent les plus communément utilisées.

Ces méthodes ont cependant une efficacité atténuée dans certains cas. Si elles permettent de bien détecter les fuites dans les conduites en métal, elles sont peu efficaces dans le cas des tubes en plastique. La raison essentielle est que les signaux émis par les fuites dans des conduites en plastique ont des caractéristiques acoustiques différentes de ceux émis par des fuites sur conduites métalliques. Or, les différents appareils ont été conçus pour ce second type de détection et repèrent donc moins facilement les signaux, plus silencieux et moins bien transmis, émis par des conduites plastiques.

Un autre désagrément lié à cette technologie est l'enregistrement de signaux basse fréquence. En effet, la fréquence dominante du signal émis est directement influencée par le diamètre et le matériau de la conduite concernée. Cette fréquence est d'autant plus basse que le diamètre de la canalisation est grand et que le matériau qui la compose est peu rigide. A cause de ce phénomène les signaux caractéristiques des fuites peuvent être brouillés, avec risque de confusion, par des vibrations de basse fréquence (pompes, circulation routière). Il en résulte que les petites fuites bruyantes sont parfois plus aisément décelables que les plus importantes.

Les recherches récentes dans le domaine porte sur l'usage de méthodes inverses pour déterminer les fuites à partir de la réponse du réseau à une variation de pression oscillatoire (Ferrante et Brunone 2003a, 2003b, Lee *et al.* 2005a, 2005b) ou bien encore sur l'analyse statistique des débits (Buchberger et Nadimpalli 2004).

4.1.2.2. Réhabilitation et renouvellement des conduites

Outre les opérations de maintenance qui consistent à localiser et réparer les fuites présentes sur le réseau, la réhabilitation et le renouvellement sont également des moyens d'améliorer la performance du système dans le domaine des fuites. Ils nécessitent souvent de procéder à des excavations de conduites, coûteuses et perturbant fortement le trafic routier avec l'ensemble des conséquences liées.

Le choix entre ces deux types de travaux dépend de plusieurs facteurs selon le FNDAE¹ (Ajuste *et al.* 2004) :

- nature du dysfonctionnement constaté et état du tuyau ;
- opportunité : nuisance sonore, dérangement lié à la fouille ;

¹ FNDAE : Fonds National pour le Développement des Adductions d'Eau

- contraintes locales : densité de branchements, durée envisagée de la coupure, largeur et encombrement de la voie ;
- coûts financiers du projet.

La réhabilitation a pour but de maintenir à moindre frais les canalisations en bon état afin de prolonger leur durée de vie.

L'emploi d'un revêtement interne non structurant permet essentiellement d'améliorer la qualité de l'eau ainsi que de restaurer l'efficacité hydraulique des canalisations. Cette technique par projection, qui permet d'éviter la corrosion interne, n'est absolument pas adaptée pour résoudre des problèmes de détérioration structurale. Les revêtements internes utilisés sont essentiellement le mortier de béton et la résine époxy (Labruguière 2000).

Les procédés de tubage sont quant à eux structurants. Le tubage consiste à insérer dans l'ancienne conduite un tube partiellement ou entièrement structurant. La conduite en place sert de fourreau pour le passage de la nouvelle conduite, principalement du PEHD (Polyéthylène Haute Densité). Les dimensions extérieures de cette nouvelle conduite sont inférieures aux anciennes, ce qui peut s'avérer ennuyeux si l'on cherche à conserver des caractéristiques hydrauliques données, bénéfique dans d'autres cas où l'on vise à réduire le temps de séjour de l'eau dans certaines parties du réseau. Après tubage, l'espace annulaire entre l'ancienne et la nouvelle conduite peut être comblé par injection de ciment. Ainsi, les sollicitations extérieures sont transmises à la nouvelle conduite. Une autre technique consiste à enfiler un tube prédéformé en PEHD qui se plaque à l'intérieur de la canalisation en place.

Le renouvellement se définit par la pose d'une nouvelle conduite destinée à en remplacer une plus ancienne et dont les caractéristiques structurelles ne sont plus compatibles avec un bon fonctionnement. Le choix des conduites à renouveler peut s'appuyer sur des observations de terrain, des inspections visuelles de la conduite ou bien encore prendre en compte les résultats de modèles de prévision de casses tels que ceux présentés au paragraphe 3.2.

La technique de remplacement la plus utilisée est actuellement la pose en tranchée ouverte, dont la mise en œuvre est régie par le fascicule 71 du CCTG¹. Il s'agit notamment de la solution la plus adaptée aux petites collectivités, du double point de vue technique et économique.

¹ CCTG : Cahiers des Clauses Techniques Générales

Il existe également des procédés sans tranchée qui peuvent s'avérer utiles lors de chantiers particuliers (centre ville, traversée de voie ferrée).

Parmi ceux-ci, on peut évoquer le forage ou le forçage. Une machine, combinant foret et jet d'eau sous pression, creuse le terrain et entraîne derrière elle le nouveau tuyau, généralement en acier ou thermoplastique. Il existe également des techniques dites destructives. L'ancienne canalisation est remplacée par une nouvelle, en PVC (polychlorure de vinyle) ou PEHD, d'un diamètre supérieur ou égal. Pour cela, on introduit dans l'ancienne conduite un marteau éclateur tracté à son extrémité. Des ailerons articulés, situés en tête du marteau, sont actionnés par un circuit hydraulique et permettent de pulvériser la conduite. On peut aussi remplacer les conduites après extraction, par l'intermédiaire d'un câble passé à l'intérieur de l'ancienne conduite jusqu'à une tête de tirage sur laquelle est ancrée la nouvelle conduite. Enfin, le microtunnelier « mange tube » permet de pousser le nouveau tuyau derrière la machine assurant le creusement. Il s'agit d'une technique représentant un coût élevé.

Ainsi, de nombreuses technologies innovantes existent dans le domaine de la recherche de fuites, du renouvellement ou de la réhabilitation des conduites. Ces opérations ne sont pas toujours effectuées à un rythme suffisant sur certains services, ce qui peut expliquer des dérives du débit de fuite. Le fait de ne pas connaître préalablement la portée positive sur le débit de fuite de ces opérations peut constituer un frein logique à leur mise en application. Il s'agit d'une des motivations du présent travail dont les objectifs sont présentés dans le paragraphe 5.

4.2. Limites et insuffisances de l'existant

4.2.1. Rendement et indices de pertes

Ces deux indicateurs sont les plus communément utilisés en France, l'indice de perte précisant souvent le rendement dont la difficulté d'interprétation est admise de tous. Ils ne portent pas exclusivement sur les fuites au sens où nous les concevons, à savoir les fuites diffuses, les fuites non repérées et les casses manifestes, mais englobent d'autres termes comme les prélèvements illégaux et les erreurs de comptage. Ils ne sont donc pas pleinement adaptés aux fuites.

L'image que donnent ces grandeurs des pertes observées sur le réseau est fixe. Des comparaisons avec les valeurs annuelles précédentes peuvent éventuellement indiquer une tendance d'évolution, que l'on peut extrapoler, mais il est impossible de prévoir avec certitude le degré de cette évolution. La répétition des mêmes moyens engagés sur l'année écoulée n'assure pas les mêmes résultats sur l'année à venir. La prédiction nécessaire à une gestion pluriannuelle est encore moins envisageable dans le domaine restreint des fuites proprement dites avec de tels indicateurs.

De plus, dans ce cadre, la performance acceptable ou optimale est difficile à définir. Le rendement ne s'appuie sur aucune des caractéristiques du réseau et, en ce sens, certaines comparaisons entre réseaux n'ont parfois pas de signification. Ainsi, il semble inadapté de comparer deux valeurs de rendement sur deux réseaux dont la date de pose de l'un correspondrait au début du XX^{ème} siècle par exemple, celle de l'autre aux années 60. La performance technique doit dans ce cas être évaluée sous le double éclairage de l'état respectif des réseaux et de la gestion qui y est exercée. La comparaison du niveau des fuites entre deux services, pour juger des performances de l'exploitant, n'a de sens que si les caractéristiques patrimoniales et d'environnement des réseaux sont proches. La mise en place d'une valeur de référence unique est de même illusoire. Aucune règle établie ne permet de juger une valeur de rendement ; son appréciation demeure à la libre interprétation des parties prenantes, interprétation parfois contradictoire. Si sur certains réseaux un rendement de 90% est un objectif réaliste à atteindre à faible investissement et dans des délais relativement courts, il n'en va pas de même sur tous les réseaux. Les indices de perte introduisent toutefois cette notion de patrimoine puisqu'ils se réfèrent soit au linéaire de conduites, soit au nombre de branchements. Ils ne tiennent cependant pas compte de l'âge du réseau.

Enfin, et il s'agit d'une problématique spécifique aux fuites par rapport aux casses, rendement et indices de perte n'informent pas sur la nature des moyens à mettre en œuvre pour les améliorer. La réduction du taux de casses passe par des opérations de renouvellement, voire de réhabilitation, mais traiter des fuites nécessite de choisir entre opérations de recherche de fuites et de renouvellement. Les indicateurs évoqués ici ne permettent pas cette distinction, essentielle dans une optique de maîtrise des fuites.

4.2.2. Méthodologie Lambert

Les travaux de Lambert, notamment ceux concernant les fuites incompressibles, ont été présentés au paragraphe 2.2.3.2.3. Ils constituent dans le domaine des fuites un progrès par rapport aux indicateurs classiques de rendement ou de pertes, en ce sens qu'ils isolent et expriment les fuites. La quantité évaluée est dite incompressible et s'observe systématiquement sur tous les réseaux : seule une partie des fuites est donc formulée. La différence entre les pertes observées et les fuites incompressibles ne renseigne que peu sur les fuites (diffuses et non repérées) réellement présentes sur le réseau.

La décomposition proposée (voir Tableau 4), même si elle s'appuie à la fois sur des données observées et issues d'études bibliographiques, reste très subjective comme l'a souligné Renaud (2004). En effet, les valeurs associées à chaque type de fuite (taux de défaillance, durées, débits moyens) font implicitement référence à un niveau de service, tant sur le plan de l'exploitation que de la politique patrimoniale. Ce niveau est jugé excellent par Lambert sur les réseaux étudiés. Mais ce qui est vrai sur un réseau ne l'est pas nécessairement sur un autre, tant ils peuvent différer par leur nature ou leur configuration. L'ensemble de ces données n'est pas intégré à la formulation de Lambert et il n'est ainsi pas rare d'observer des pertes réelles en décalage avec le calcul des volumes incompressibles, c'est à dire des pertes totales inférieures aux fuites supposées incompressibles.

C'est par exemple le cas pour de nombreux réseaux girondins pour lesquels le calcul a été mené par Renaud (2004). Plus précisément, il constate que la valeur des fuites incompressibles est surestimée pour des réseaux avec de faibles densités d'abonnés. Une explication peut être avancée en observant les valeurs unitaires proposées. Par exemple, Lambert *et al.* (1999) donnent pour les casses manifestes une fréquence de $0,124 \text{ casse.km}^{-1}.\text{an}^{-1}$, à un débit de $12 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ et ce pendant trois jours (voir Tableau 5). Ce débit est dans certains cas de l'ordre de grandeur de la capacité de production du réseau. On comprend bien que le gestionnaire s'aperçoit nécessairement de l'existence de la casse (vidage des réservoirs, signalement des coupures d'eau) bien avant le délai de trois jours estimé. Ceci peut expliquer en partie les surestimations constatées.

Il résulte de ces observations que le modèle développé par Lambert semble assez peu adapté aux petites unités de distribution, majoritaires.

A cela s'ajoute encore le fait que la quantité incompressible est une simple constante. Par là, Lambert estime qu'une gestion appropriée à un moment donné, servant de fondement au

concept de fuites incompressibles, l'est tout autant quelle que soit la période de la vie du réseau considérée. C'est occulter le vieillissement et la dégradation des réseaux. Une réévaluation des grandeurs fournies, à 20 ans d'écart, sur les mêmes réseaux et en considérant les mêmes critères pour définir la bonne gestion, conduirait certainement Lambert à revoir les valeurs incompressibles proposées à la hausse. Le gestionnaire doit *a priori* intensifier ses efforts pour conserver un même niveau de performance à mesure que l'âge du réseau augmente, à moins de parvenir, par le biais du renouvellement, à le maintenir constant. Si l'objectif de l'indicateur ILI pour un réseau jeune peut raisonnablement être 1, demandant probablement peu d'aménagements et d'efforts supplémentaires à la gestion pratiquée, il n'en va pas de même pour un réseau très âgé ayant été peu ou pas du tout entretenu. Cet objectif de 1 peut être fixé à un horizon lointain, mais il nous semble plus judicieux de disposer d'une quantité incompressible qui tienne compte de l'âge du réseau et potentiellement atteignable à court terme.

Ainsi, le concept de fuites incompressibles est établi pour un niveau de gestion donné, sur des réseaux avec des infrastructures en bon état, initialement ou par le fait de la gestion. Il semble trop rigide, par l'absence de prise en compte des spécificités d'âge des réseaux, pour être applicable à tous les niveaux. Notamment, lorsque la situation initiale du réseau est très fortement dégradée, quelle que soit la gestion pratiquée il semble que la valeur de l'indicateur ILI doive nécessairement être éloignée de 1. La notion de fuites incompressibles doit être revue dans ce cas et adaptée à la réalité du réseau, de sorte que l'on puisse réellement juger de la prestation du gestionnaire. Ceci ne remet pas en cause la distinction établie entre fuites diffuses, fuites non repérées et casses manifestes. Elle constitue une voie d'étude intéressante puisque cette décomposition porte à la fois sur la nature des fuites et sur les moyens pour les faire diminuer.

Il n'existe donc pas actuellement dans le domaine des fuites un indicateur satisfaisant sur lequel fonder une gestion qui tienne compte des différentes formes de fuites.

5. OBJECTIFS DE LA THESE

Les fuites sont révélatrices de l'état du patrimoine constitutif des réseaux d'eau potable. La mesure de performance dans le domaine ne prend, à notre sens, pas assez en considération ledit patrimoine, et notamment l'âge des conduites. Il est en résulte qu'elle n'est pas suffisante pour établir des objectifs de performance, réalistes et motivés, à atteindre. Elle ne permet pas non plus de discerner les moyens d'action nécessaires à la réduction des fuites.

Le travail présenté par la suite vise donc à combler un manque d'outils décisionnels pour pratiquer une bonne gestion des pertes sous formes de fuites, tant sur le plan opérationnel que patrimonial. Il s'agit d'étudier la possibilité, à la manière des avancées récentes dans le domaine des casses et des modèles prédictifs associés, de prévoir l'évolution des fuites, dans le but d'accroître significativement les moyens d'action des gestionnaires.

Plus précisément, les axes principaux de cette étude sont de :

- reconstituer des chroniques de débit de fuite à partir de données de débit et de réparations de casses et de fuites ;
- décomposer le débit de fuite en des parts distinctes sur lesquelles opérer avec des moyens d'intervention ciblés ;
- introduire expressément la dimension temporelle, en tenant compte de l'âge des réseaux, dans la formulation des fuites ;
- élaborer un outil prédictif qui permette de simuler différents scénarios de gestion, incluant les diverses options à disposition, recherche de fuites ou renouvellement.

Un tel projet s'appuie nécessairement sur un panel de données relativement large, afin de construire un outil s'adaptant à des situations variées. Le chapitre 2 est consacré à la présentation des données disponibles, à l'analyse de leur fiabilité et de leur utilité pour atteindre les objectifs fixés.

CHAPITRE 2.

PRESENTATION DES DONNEES DE L'ETUDE : DESCRIPTION, VALIDITE, ANALYSE

Préambule

Le débit de fuite est le plus fréquemment déterminé à partir de la mesure des débits de nuit sur des réseaux sectorisés. L'unique opération à effectuer pour passer de l'une à l'autre de ces grandeurs consiste alors à soustraire aux valeurs mesurées une estimation de la consommation, domestique et industrielle, pendant la période correspondante.

Les données de débit de fuite dont nous disposons pour cette étude entrent pleinement dans ce cadre. Issues de réseaux sectorisés anglais, elles sont de plus accompagnées d'informations relatives au patrimoine et à la gestion opérationnelle pratiquée, indispensables à la réalisation des objectifs fixés.

La pression dans les conduites s'accroît à mesure que la consommation faiblit, ce qui entraîne une augmentation du débit de fuite. Ainsi, sa valeur calculée entre 03 h et 04 h par exemple n'est pas transposable à l'identique sur l'ensemble d'une journée. L'étude des relations qui permettent à partir d'un débit horaire de fuite d'avoir accès au volume de pertes journalières imputables à ces mêmes fuites n'est pas envisagée. Les raisonnements menés s'appuient cependant exclusivement sur le débit de fuite en faisant abstraction du lien qui unit la valeur de ce débit et la pression observée sur le secteur.

Dans un premier temps, nous proposons une présentation détaillée de l'ensemble des données à disposition. Nous insistons particulièrement sur leur fiabilité, indispensable pour les travaux ultérieurs. Dans un second temps, nous analysons le lien entre les réparations effectuées, qu'elles fassent suite à une détection visuelle ou à une opération de recherche de fuites, et la valeur du débit observée. Ces deux étapes nous conduiront à éliminer une partie des données initiales pour ne conserver que les plus appropriées.

1. NATURE DES DONNEES DE L'ETUDE

1.1. Données initialement souhaitées

Comme nous l'avons vu au premier chapitre, l'accès aux fuites diffuses est primordial pour évaluer correctement la performance d'un réseau et motiver une gestion patrimoniale. Nous avons également relevé dans le préambule que la mesure du débit de nuit menait au débit de fuite une fois les consommations estimées soustraites.

Le débit de fuite évoqué est supposé être composé uniquement des fuites diffuses et des casses non repérées. L'absence sous-entendue de prélèvements illégaux ou de casses manifestes s'observe en effet sur certains pas de temps restreints. Il faut pour cela travailler sur une période de données de débit assez longue, la semaine par exemple, et en extraire la valeur horaire minimum.

La Figure 2 représente les différentes composantes du débit de nuit mesuré, supposé inclure uniquement la consommation et les fuites, diffuses et non repérées. L'interruption dans la chronique correspond à la durée de la campagne de recherche de fuites.

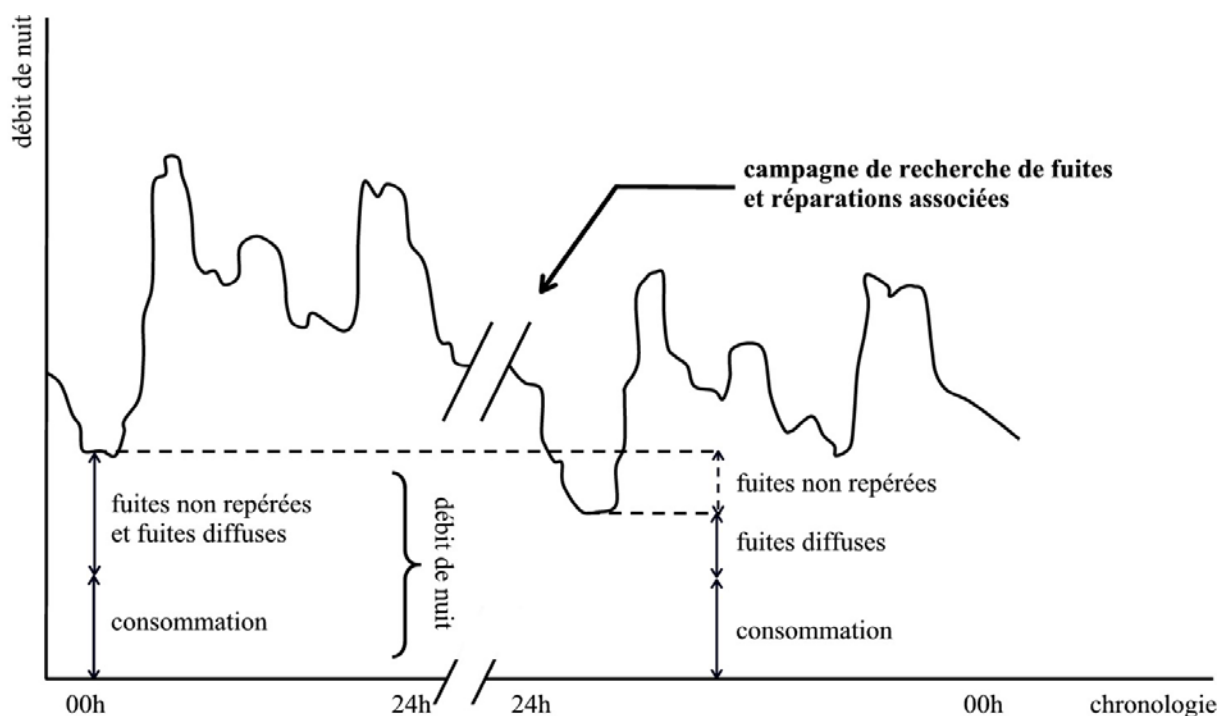


Figure 2. Méthodologie envisagée pour la décomposition du débit de nuit.

Lorsque l'on observe la partie gauche du graphique, on note que les pertes dues au débit lié aux fuites diffuses et celles dues aux fuites non repérées ne sont pas différenciables.

La solution envisagée pour établir cette distinction consiste à supprimer la part des fuites non repérées. Par définition, une fuite non repérée est détectable par une opération de recherche de fuites, dans les limites imposées par le seuil de détection de la technologie utilisée. Afin d'être certain d'éliminer la totalité de ces fuites non repérées, il faut alors soumettre l'intégralité du secteur à une opération de recherche de fuites. Immédiatement après avoir réparé toutes ces casses, et en supposant que l'opération ne se déroule pas sur une période trop longue, on peut affirmer que le débit mesuré n'est plus constitué que de la consommation nocturne et des fuites diffuses (partie droite de la Figure 2).

La distinction entre les deux types de fuites est ainsi rendue possible par ce procédé.

Malheureusement, il s'agit d'un processus lourd à mettre en œuvre, coûteux en temps et en moyens. Les secteurs ayant fait l'objet d'une telle action demeurent des cas exceptionnels.

Nous avons tenté de proposer cette méthodologie au département de la Gironde, dans le cadre du SAGE Nappes Profondes, mais les délais de mise en place des sectorisations, et surtout d'obtention de financements, se sont avérés être des obstacles trop importants.

C'est pourquoi nous avons dû abandonner l'idée de travailler à partir de secteurs débarrassés de toute fuite non repérée et nous limiter aux données disponibles. Ces données orientent et déterminent la suite de l'étude, nous les présentons de façon détaillée au cours du paragraphe suivant.

1.2. Données disponibles

Ces données nous ont été fournies sous la forme d'une base de données par Veolia Water¹ partenaire du Cemagref pour ce projet. Elles proviennent de la compagnie Three Valleys Water en Angleterre, sont de nature anonyme et représentent plus de 800 secteurs, soit un linéaire de plusieurs milliers de kilomètres de conduites.

¹ Veolia Water : filiale anglaise de Veolia Eau

1.2.1. Chroniques de débits

L'intérêt principal de ces données réside dans le fait que nous disposons de séries temporelles de débits pour chaque secteur. De façon générale, les données pour un secteur se représentent comme sur la Figure 3 (cas particulier du Secteur 7, dénomination selon la terminologie utilisée).

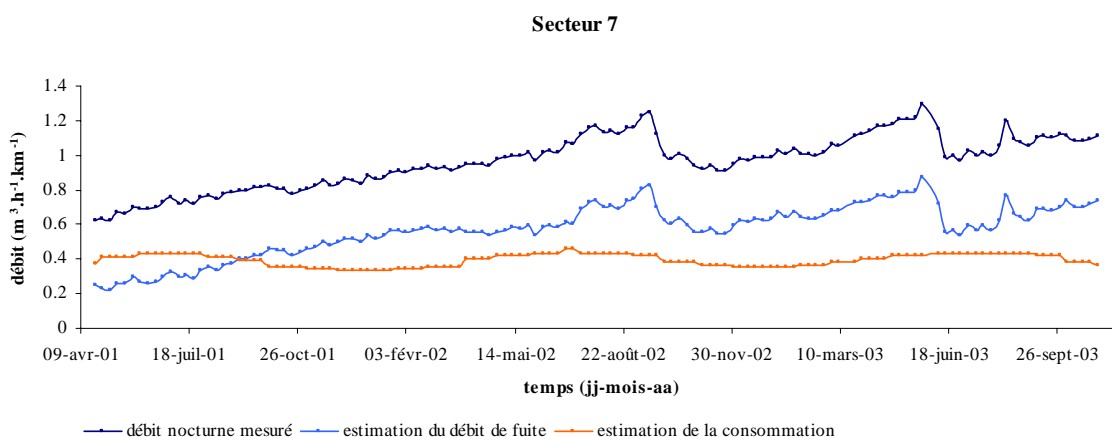


Figure 3. Représentation graphique des différentes chroniques de débit.

Sur une période de 135 semaines, soit deux ans et demi environ, nous disposons du débit minimum horaire hebdomadaire. Ce débit est issu de mesures quotidiennes entre 01h et 06h, là où il est systématiquement le plus faible. Ainsi, parmi les 35 débits horaires consignés chaque semaine, seule la valeur minimale est retenue et présentée ici. Ce travail est effectué en amont de notre étude, ce qui signifie que nous n'avons pas accès à la donnée brute mais à une donnée déjà traitée selon certains critères, ici le débit minimum.

Associée à cette valeur de débit mesuré, l'estimation de la consommation pour l'heure correspondante nous est également fournie. La simple observation de la courbe précédente en montre une périodicité assez marquée due à l'effet saisonnier, la consommation d'eau étant plus élevée en été. L'estimation des consommations, principalement domestiques, constitue toujours un point délicat, que ce soit lors de la modélisation de la demande pour des calculs hydrauliques ou bien pour l'interprétation d'une mesure de débit.

Veolia Water nous a fourni les informations suivantes sur la méthode d'estimation de la consommation utilisée :

- l'estimation est basée sur le croisement entre une certaine typologie des propriétés et un panel de consommateurs ;

- plusieurs abonnés peuvent être reliés au même branchement de propriété, aussi pour chaque branchement, il faut à la fois définir le ou les types de consommateurs associés ainsi que le type de propriété ou structure desservie ;
- pour chaque catégorie de consommateurs, une courbe type est produite et permet de reconstituer le débit total de consommation pour le secteur.

Nous disposons donc d'informations incomplètes sur la construction de la donnée de consommation, notamment les valeurs associées à chaque type de consommateurs ne sont pas connues. La fiabilité de cette donnée est ainsi mal définie.

Le débit global et la consommation étant connus sur un secteur, nous en tirons le débit de fuite correspondant, débit qui nous intéresse pour notre étude. Ce débit est bien entendu variable d'une semaine à l'autre mais n'est pas visiblement affecté par la périodicité de la consommation.

1.2.2. Chroniques de réparations

Aux chroniques de débits décrites précédemment sont associés des historiques de réparations qui permettent d'étudier les effets de celles-ci sur le débit de fuite. Le nombre de réparations par semaine sur le secteur est connu pour la même période de temps, c'est-à-dire deux ans et demi environ.

Deux distinctions importantes sont opérées au sein des données sur les réparations :

- les différents organes hydrauliques concernés (canalisations, branchements, vannes...). Ceci peut permettre de mieux repérer les points sensibles du réseau et d'éventuellement tenter de répartir le débit de fuite selon ces organes ;
- le facteur déclenchant, à savoir si la réparation fait suite à un appel téléphonique relayant une détection visuelle d'un particulier ou plus directement d'une équipe de surveillance, ou bien à une opération de recherche de fuites. Ce point traduit l'activité du gestionnaire en matière de recherche de fuites, à interpréter également en fonction de la nature du sol.

Ainsi, comme le montre le Tableau 7, les réparations sont réparties en 14 catégories selon la double distinction évoquée.

Tableau 7. Double distinction des réparations : exemple du Secteur 9.

Secteur 9 (nb de réparations)	détection visuelle	opération de recherche
fuite sur canalisation de distribution	0	3
fuite sur vanne	0	6
fuite sur compteur	2	0
fuite sur branchement	11	14
fuite sur joint de prise en charge	0	1
fuite en partie privée	4	4
intervention sur boîtier de branchement	12	0

Si l'on souhaite maintenant superposer les données sur les réparations aux chroniques de débit déjà tracées, pour établir un éventuel lien entre réparations et débit de fuite, il semble judicieux de ne plus considérer que la distinction sur le facteur déclenchant. Elle permet de tenir compte uniquement de deux catégories et, de plus, la nature différente de ces deux types de réparations se manifeste nettement graphiquement. Les réparations discriminées selon les organes sont en général trop peu nombreuses dans chaque catégorie pour que leurs effets respectifs soient visibles sur le débit de fuite.

Les réparations de casses manifestes, détectées visuellement, se font de manière continue dans le temps, au fur et à mesure de l'apparition des casses et sans réelle variabilité d'intensité, hormis peut-être lors de conditions météorologiques très marquées qui ont un impact sur le terrain où reposent les conduites (grand froid, forte pluie ou sécheresse). A l'opposé, les réparations sur recherche de fuites sont beaucoup plus ciblées dans le temps, ces opérations n'étant généralement pas déclenchées fréquemment. De plus, à une semaine t correspondant à une opération de recherche, plusieurs réparations, parfois en nombre important, peuvent avoir lieu, ce qui est plus rare pour les casses manifestes.

Le phénomène décrit s'observe bien sur la Figure 4 représentant, pour le Secteur 5, la superposition des chroniques de débits et de réparations. Les sauts visibles sur les courbes de réparations, correspondant au nombre de ces réparations, sont plus marqués pour les casses réparées suite à des opérations de recherche que pour les casses réparées sur signalement. De même, les plages de temps sans réparation sont plus longues dans le cas de la recherche de fuites. Le nombre total de casses réparées pour les deux catégories est au final quasi équivalent, mais nous voyons bien qu'elles ne sont pas du tout issues du même type d'action.

Il nous semble donc tout à fait pertinent pour la suite de l'étude de conserver cette distinction.

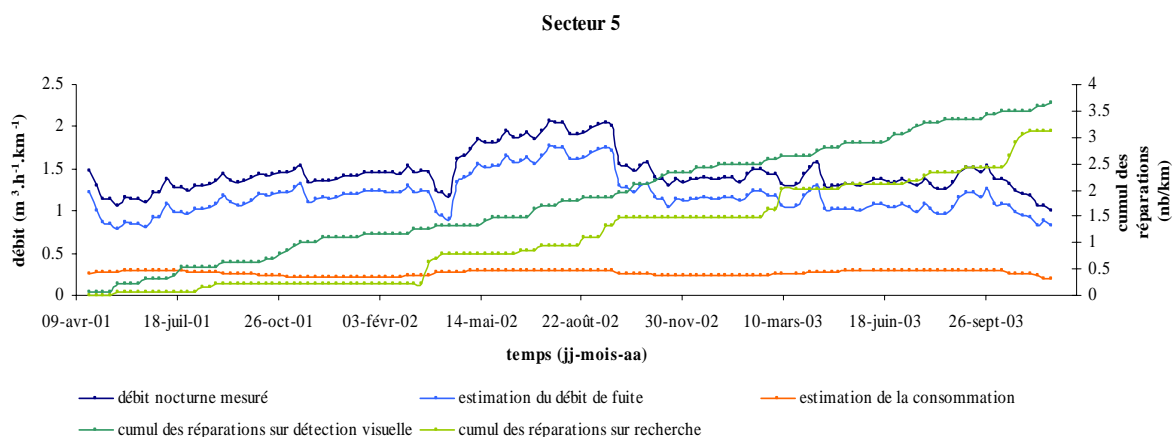


Figure 4. Distribution temporelle spécifique des réparations sur détection visuelle ou sur recherche de fuites.

Cette séparation entre recherche et détection visuelle reprend de manière concrète celle proposée par Lambert entre fuites non repérées et casses manifestes.

En effet, les opérations de recherche de fuites sont inopérantes sur les fuites diffuses et non nécessaires pour les casses manifestes. Elles concernent précisément les fuites non repérées. En complément, les casses manifestes sont les casses repérées visuellement. Cette équivalence sera conservée et utilisée indistinctement par la suite.

Enfin, l'observation de cette même Figure 4 permet d'analyser les conséquences sur le débit de fuite des réparations après recherche. Celles-ci se manifestent par des chutes marquées du débit à chaque opération. En revanche, il est beaucoup plus délicat de repérer l'effet des réparations sur appels téléphoniques.

Pour dépasser et interpréter cette simple constatation visuelle, il faut se souvenir que la courbe de débit est composée de valeurs minimales horaires hebdomadaires. En toute logique, une réparation de casse manifeste ne doit pas faire diminuer le débit de fuite. Le pas de temps d'observation d'une semaine est suffisamment grand pour qu'une casse manifeste soit éliminée durant cette période et qu'il n'en reste pas trace dans le débit minimum. En cela, nous supposons que la réactivité du gestionnaire est suffisante. Quand bien même certaines casses manifestes perdureraient plus d'une semaine, ce qui rendrait alors visibles et la hausse de débit correspondante, et la chute associée lors de la réparation, ce phénomène doit *a priori* être exceptionnel sur un secteur.

Au paragraphe 2 de ce même chapitre, nous mettrons en place un modèle qui aura pour principal objectif de déterminer si les réparations de casses manifestes contribuent ou non à expliquer le débit de fuite.

1.2.3. Données patrimoniales et d'exploitation

Chacun des secteurs sur lequel nous disposons de données est doté de caractéristiques patrimoniales propres. Ces différentes caractéristiques, telles l'âge du réseau, le nombre de branchements ou la nature des matériaux, tiennent très certainement une part dans l'explication du débit de fuite observé, d'où l'importance de disposer d'une information sur ces grandeurs.

A titre d'exemple, le Tableau 8 regroupe toutes ces données pour le Secteur 5. Le détail de ces caractéristiques et la façon dont elles sont établies, lorsque l'information nous a été fournie, sont présentés à la suite.

Tableau 8. Caractéristiques patrimoniales disponibles : exemple du Secteur 5.

grandeur observée	valeur pour le Secteur 5	
âge moyen (années)		35.5
linéaire de conduites (km)		12.82
% de matière plastique		36
diamètre moyen des conduites (mm)		113
pression moyenne dans le secteur (mCE)		34.7
nombre de branchements domestiques		1144
nombre de branchements industriels		49
% de renouvellement ou réhabilitation		0
	N	0
corrosivité du sol	Fa	1
	M	0
	Fo	0
	1	0
indice de mouvement du sol	2	0
	3	1
	4	0
	5	0

L'*âge moyen* du secteur correspond à la moyenne des âges des différents tronçons du secteur. Il varie de 4 à 91 ans sur l'ensemble des secteurs. Il aurait cependant été plus intéressant de disposer de classes d'âge associant un pourcentage du linéaire total à une certaine fourchette de dates de pose.

Le *linéaire de conduites* varie entre 145 m et 120 km, cependant nous ne savons pas si les plus petits diamètres constitutifs du secteur ont été ou non pris en compte.

Le *pourcentage de matière plastique* est choisi pour discriminer les secteurs selon les matériaux, mais nous disposons également des pourcentages de fonte ductile, de fonte grise, d'amiante ciment, etc... Sur l'ensemble des secteurs, les valeurs prises par le taux de matière plastique varient de 0 à 100 %.

L'information sur le *diamètre des conduites* est, comme pour l'âge du secteur, donnée sous forme de moyenne et non de classes. Ces valeurs vont de 73 mm à plus de 300 mm.

La *pression moyenne* est une valeur mesurée ou estimée sur certains secteurs. Nous ne connaissons ni l'heure de la mesure, ni le mode opératoire pour déterminer la pression moyenne sur un secteur. Pour ce qui concerne la modélisation à venir (essentiellement chapitre 3), les données de pression ne sont pas suffisamment précises et nombreuses pour pouvoir être prises en compte dans les différents modèles mis en œuvre.

La donnée sur le *nombre de branchements* distingue les consommations à usage domestique et les consommations industrielles. Les nombres de branchements domestiques et industriels varient respectivement de 12 à 8714 et de 0 à 864.

Le *pourcentage de renouvellement ou de réhabilitation* n'est pas disponible sur l'ensemble des secteurs. Une seule valeur caractérise l'ensemble de la période d'observation uniquement. Elle varie de 0 (valeur prise le plus souvent) à 67 %.

La *corrosivité du sol* est un facteur qualitatif qui permet d'en apprécier la nature. Quatre classes sont établies : corrosivité nulle (N), faible (Fa), moyenne (M) ou forte (Fo). L'information est renseignée sur la plupart des secteurs.

L'*indice de mouvement du sol* est une variable discrète pouvant prendre les valeurs entières de 1 à 5, 1 caractérisant un sol stable tandis que la valeur 5 représente un sol où les mouvements sont importants.

Nous pouvons noter que la variabilité de ces données entre secteurs semble *a priori* suffisante pour pouvoir discriminer des facteurs, ou groupes de facteurs, selon leur influence sur la valeur du débit observée.

1.3. Fiabilité des données

1.3.1. Sources d'erreur sur la mesure du débit et élimination des secteurs non conformes

La mesure du débit de fuite, que nous souhaitons modéliser, est altérée par des erreurs ou des imprécisions. La cause principale de rejet de certains secteurs réside dans le fait qu'une majorité d'entre eux présentent au cours de la chronique des valeurs de débit négatives. Seuls 372 secteurs sur un total initial supérieur à 800 affichent sur la période considérée des débits exclusivement positifs.

De nombreux secteurs présentent également des mesures aberrantes et inexploitable. La Figure 5 en montre un exemple avec une chronique incluant de plus des valeurs manquantes, autre défaut de mesure fréquemment rencontré.

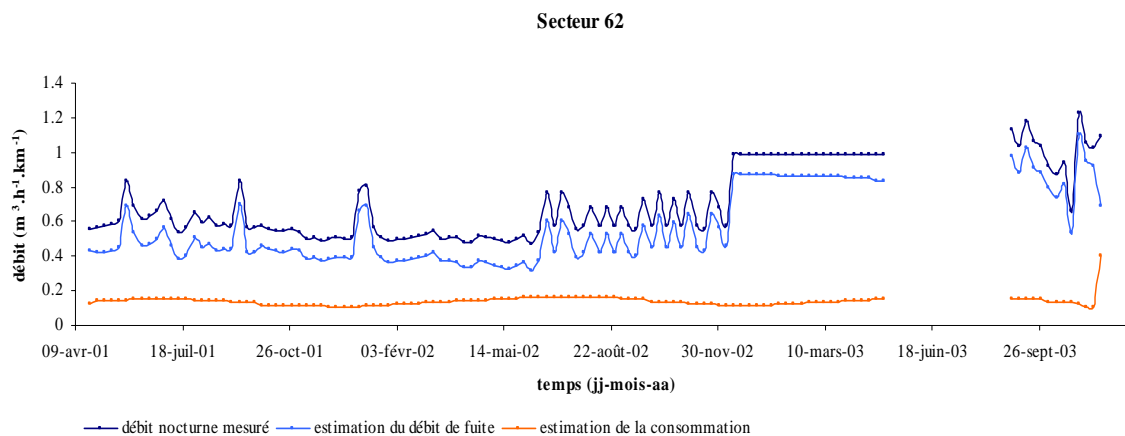


Figure 5. Principaux défauts des données de débit.

La succession de valeurs en dents de scie du milieu de chronique ne correspond certainement pas à un phénomène observé sur le secteur mais plus à un défaut de la mesure. En fin de chronique, la longue succession de valeurs mesurées constantes et la période d'absence de données qui suit constituent également des éléments conduisant au rejet d'une telle chronique dans l'optique d'une modélisation. Aucun processus physique ne peut expliquer son allure.

L'exploitation de telles chroniques est donc impossible. Nous pourrions cependant par des procédures statistiques (PROC EXPAND sous SAS par exemple) remplacer les valeurs aberrantes ou combler les manquantes par des valeurs calculées, mais nous avons préféré ne retenir que des chroniques plus fiables.

Plusieurs causes distinctes peuvent expliquer ces défaillances dans la qualité des données :

- les compteurs ou débitmètres utilisés peuvent dériver avec le temps, ou bien encore la télétransmission associée peut cesser suite à des épisodes orageux par exemple. Dans tous les cas, la donnée de débit s'en trouve altérée ;

- la formule de calcul du débit sur le secteur peut parfois être erronée, nous avons pu nous en rendre compte par nous-même sur des réseaux girondins. Les sens d'écoulement sur le réseau ne sont pas toujours maîtrisés ; la mesure ne représente alors plus le débit sur le secteur. Si la présence d'une valeur négative sur une chronique est due à cette méconnaissance du réseau, c'est toute la chronique qu'il faut supprimer ;

- la précision de la mesure ou de l'information conservée lors du transfert de données vers le poste de stockage s'avère dans certains cas handicapante. On remarque sur le Secteur 59 représenté sur la Figure 6, le nombre limité de valeurs que prend le débit mesuré, faute de précision des appareils de mesure (réglage ou capacité) ou d'une transmission de données altérée. Si nous souhaitons présenter un modèle prenant en compte une éventuelle croissance hebdomadaire continue du débit de fuite, un tel secteur ne peut nous être utile : son débit de fuite n'est pas rendu assez finement.

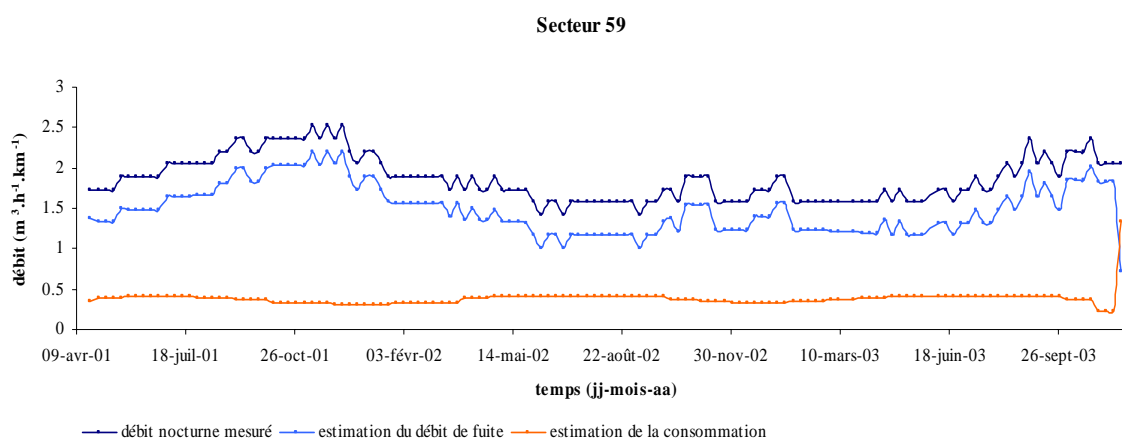


Figure 6. Précision défaillante de la mesure de débit.

L'incertitude concernant l'estimation de la consommation demeure, nous l'avons dit, mais sans moyen de la lever. Nous utiliserons donc la donnée telle quelle.

1.3.2. Incertitudes sur la bonne retranscription des données de réparations

L'observation de certaines chroniques nous amène légitimement à nous interroger sur la qualité des données relatives aux réparations fournies.

Nous présentons l'exemple du Secteur 1 sur la Figure 7. Il montre qu'une ou plusieurs casses ont été réparées immédiatement après le pic de débit apparaissant fin 2002 (chute facilement observable dans les valeurs du débit). Il n'en est cependant pas fait état dans les chroniques de réparations associées puisque aucune intervention n'est signalée dans cette période. Nous pensons que ce pic est bien dû à une casse, et pas à une valeur aberrante, puisque deux semaines après cet événement le débit croît à nouveau de façon régulière et cohérente à partir d'un niveau plus bas que celui qu'il présentait initialement. C'est donc que non seulement la casse responsable de la hausse soudaine a bien été réparée, mais que dans le même temps d'autres fuites adjacentes et probablement détectées par une opération de recherche ont elles aussi été réparées. Les traces de ces réparations devraient être visibles dans les chroniques correspondantes, mais il n'en est rien.

Une majorité de secteurs soulèvent de telles interrogations. Il n'est également pas toujours évident d'être parfaitement convaincu que la distinction entre fuite réparée sur détection visuelle ou sur recherche a été bien respectée.

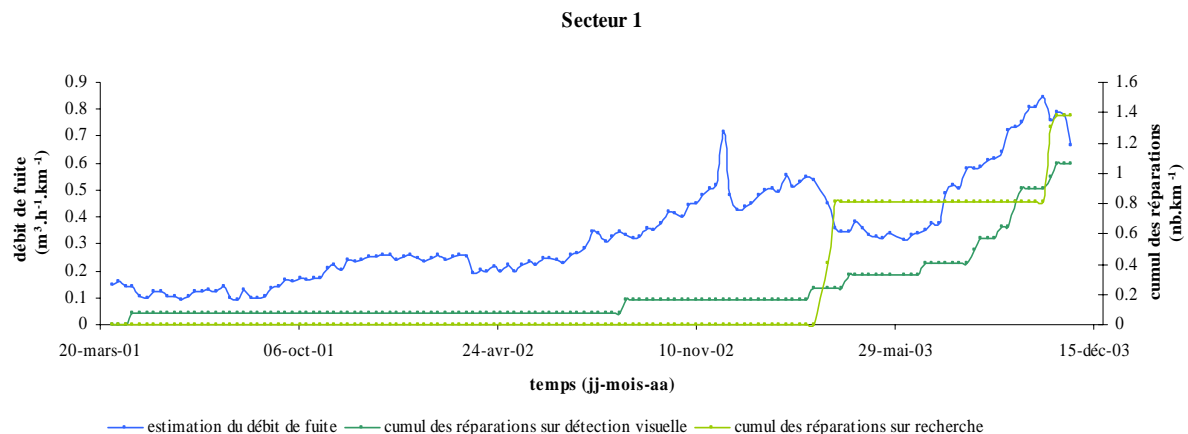


Figure 7. Incertitude sur les données de réparations.

1.3.3. Approximations sur les données patrimoniales et d'exploitation

Pour conclure cette partie sur la fiabilité des données, évoquons brièvement la qualité des données patrimoniales et d'exploitation, elle aussi discutable. Un certain nombre d'interrogations subsistent les concernant.

Nous ne savons par exemple pas si les âges ou les diamètres moyens fournis font l'objet d'une procédure de calcul normalisée sur chaque secteur. Si les conduites de faible diamètre sont écartées, le sont-elles toutes au même niveau sur l'ensemble des secteurs ? De plus, les informations sur les vieilles conduites ne sont bien souvent que des suppositions qu'il est difficile de vérifier.

En outre, certaines données, comme la corrosivité ou l'indice de mouvement du sol, relèvent de l'appréciation du gestionnaire, en fonction de son expérience et de ce qu'il observe sur le terrain, et ne sont pas mesurées. Dès lors, on comprend aisément que deux environnements de conduites semblables pourront être qualifiés différemment dans deux services distincts.

Enfin, le concept de pression moyenne du secteur reste imprécis. Lorsque la valeur est disponible, nous ne savons pas de quel type de mesure elle est issue et lorsque aucune mesure n'a été effectuée, elle est systématiquement estimée à 50 mCE.

1.3.4. Avantage d'exploiter des chroniques longues

Les causes d'incertitude et d'erreur sur les données sont fort nombreuses et à tous niveaux. Il s'avère délicat, voire impossible, de trouver des secteurs sur lesquels n'émettre aucun doute.

Toutefois, le fait de disposer de données qui s'étendent sur 135 semaines pour chaque chronique nous prémunit du poids trop important que pourrait prendre une valeur aberrante.

Ainsi, quelques valeurs erronées sur une chronique ne remettent pas en cause la possibilité de la traiter dans une optique de modélisation par exemple. La longueur des chroniques, en même temps qu'elle augmente les risques de présenter certaines mesures visiblement fausses, permet de fondre partiellement ces points aberrants dans un ensemble plus cohérent.

1.4. Choix des secteurs d'étude à des fins de modélisation

L'important ensemble de secteurs à notre disposition fait l'objet de nombreuses méfiances à l'égard des données qu'il présente. Malgré l'atout de travailler sur des chroniques relativement longues, la nécessité de choisir certains secteurs fiables s'impose pour espérer trouver un modèle exploitable : nous avons pour cela défini certains critères d'élimination.

N'ont tout d'abord été retenus que les secteurs avec des débits positifs sur l'ensemble de la fenêtre observée. A cette première contrainte, nous en avons imposé une supplémentaire sur le linéaire du secteur, dans le but d'avoir des données de réparations assez conséquentes et exploitables. Nous avons choisi 10 km de linéaire comme limite inférieure pour les secteurs retenus. Cette taille relativement grande nous permet également de ne pas être entièrement dépendants d'un événement particulier qui se déroulerait sur le secteur et qui prendrait une importance exagérée. Sans en supprimer les effets, cette contrainte de taille minimale lisse quelque peu les phénomènes, étant donné que nous travaillons avec des débits ou des nombres de réparations ramenés au kilomètre. La modélisation en sera facilitée, puisque s'appuyant sur des données plus « stables ». 124 secteurs répondent à ces deux critères.

Nous avons ensuite représenté graphiquement l'ensemble des débits de ces 124 secteurs en les superposant aux courbes de cumul de réparations. Nous avons ainsi repéré les secteurs dont le comportement visible, en termes de débit de fuite, est conforme à celui attendu.

La Figure 8, représentant le Secteur 9, en est un exemple typique.

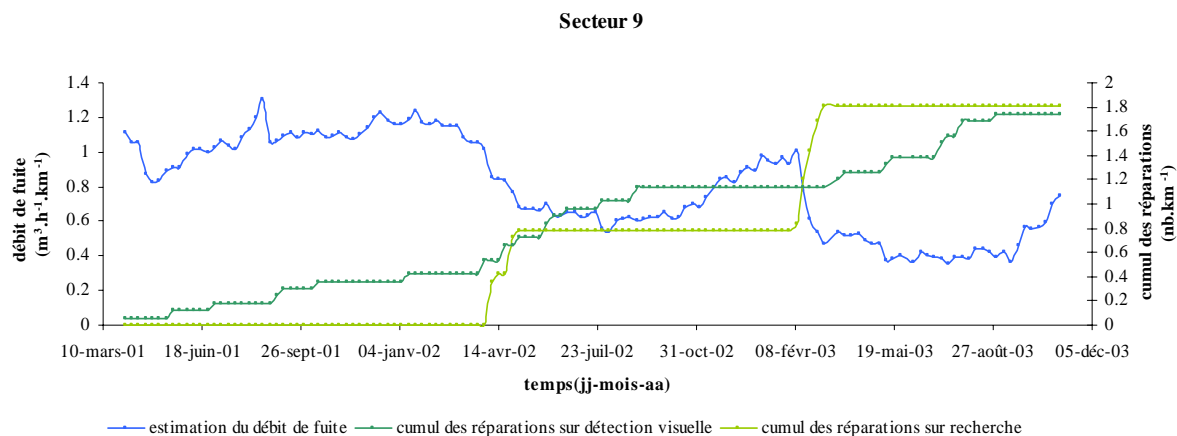


Figure 8. Evolution typique attendue pour le débit de fuite.

Les deux principaux points à remarquer sur cette figure sont :

- une augmentation faible et régulière du débit de fuite en dehors des périodes de recherche de fuites ;
- une chute nette du débit de fuite lors des épisodes de réparations suite à des campagnes de recherche de fuites, au nombre de deux pour ce secteur ;

Tel est *a priori* le fonctionnement que nous allons chercher à modéliser par la suite. 18 secteurs, numérotés de 1 à 18, ont ainsi été extraits du lot initial pour la qualité de leurs données et leur représentation graphique compréhensible et explicite. Les principales grandeurs physiques les caractérisant sont regroupées dans le Tableau 9.

Tableau 9. Caractéristiques patrimoniales des 18 secteurs sélectionnés.

Secteur	âge moyen (années)	linéaire de conduites (km)	diamètre moyen (mm)	% de matière plastique	branchements industriels	branchements domestiques	pression moyenne (mCE)
1	39	12	183	0	19	1312	32
2	45	11	103	13	25	1737	63
3	49	15	177	7	55	1258	38
4	54	17	241	19	219	1320	65
5	36	13	113	36	49	1144	35
6	51	15	118	44	24	1359	32
7	34	18	145	4	23	1921	31
8	37	13	116	4	105	1062	34
9	41	17	90	0	78	1889	32
10	41	17	109	1	35	1728	34
11	38	19	110	2	66	2471	32
12	34	11	276	1	45	523	61
13	40	14	89	0	22	1296	53
14	43	20	96	0	41	2104	40
15	42	11	104	2	223	873	46
16	45	14	106	1	99	1631	50
17	65	15	107	13	11	1850	50
18	52	13	128	6	53	1405	50

1.5. Analyse visuelle des chroniques et politiques de gestion déduites en matière de recherche de fuites

Une fois les chroniques tracées, il est intéressant d'observer la façon dont le gestionnaire agit sur le secteur. Ceci peut aider à la modélisation en y incluant des phénomènes concrètement observés. Nous pouvons ainsi distinguer deux types d'actions concernant les réparations sur recherche de fuites, chacune avec ses conséquences propres.

1.5.1. Recherche de fuites initiée par un événement ponctuel

Sur certains secteurs, les campagnes de recherche de fuites semblent être déclenchées par une augmentation brutale du débit de nuit.

Tel est le cas sur le Secteur 3, représenté en Figure 9. Il est caractérisé par l'apparition assez soudaine d'un pic de débit suivie d'un épisode de recherche de fuites. L'effet des réparations observé est le retour du niveau du débit de fuite aux alentours de sa valeur initiale. Ceci signifie que seules les fuites responsables de cette hausse subite sont réparées. Si le débit avait chuté en dessous de sa valeur préalable, nous en aurions déduit que, lors de la campagne déclenchée par la hausse soudaine, le gestionnaire avait trouvé en plus des fuites qui existaient depuis longtemps.

Par la suite, un effort régulier de recherche est toutefois maintenu, ce qui permet de contenir correctement la hausse naturelle du débit de fuite.

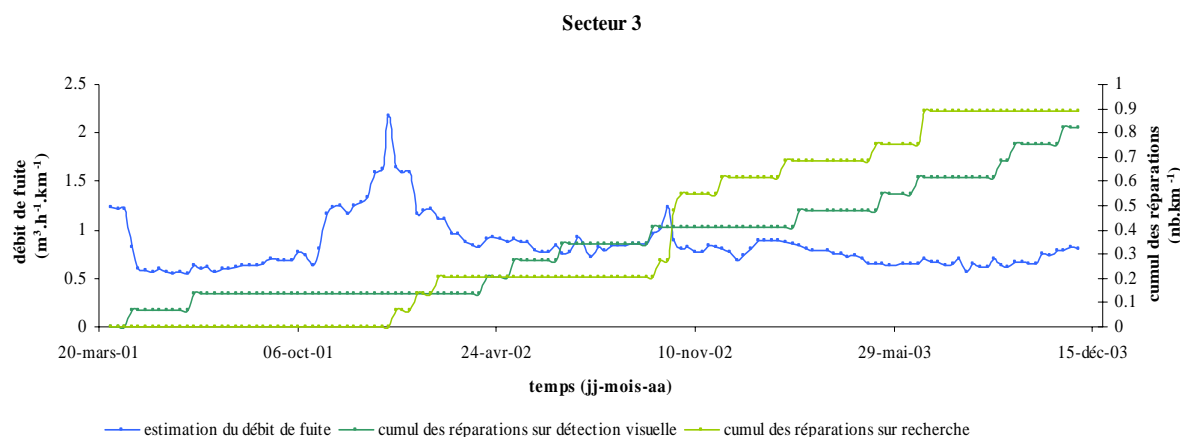


Figure 9. Campagnes de recherche de fuites dictées par les événements sur le secteur.

Dans cet exemple, tout du moins dans la première phase de la chronique, la conduite du gestionnaire est dictée par les événements : il déclenche une opération de recherche de fuites à l'issue d'une augmentation anormale des débits de nuit.

1.5.2. Recherche de fuites imposée par des contraintes extérieures

Dans certains autres cas, l'effort n'est pas motivé en réponse immédiate à l'apparition de casses non repérées importantes, mais plutôt consenti pour ramener un débit de fuite « élevé » vers une valeur plus faible. La Figure 10 est assez révélatrice de ce procédé. Elle montre un niveau initial de fuites élevé, de l'ordre de $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, soit le double du débit du Secteur 3. La pression de recherche de fuites continue et intense exercée par le gestionnaire

permet en l'espace d'un peu plus de deux ans de diviser le débit de fuite par cinq et de le ramener à une valeur de $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ comparable à celle du graphique précédent.

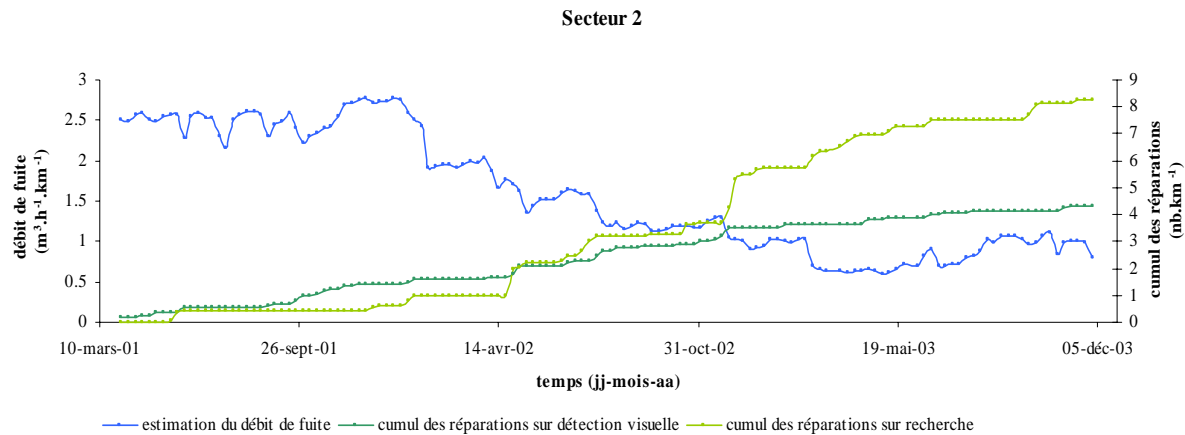


Figure 10. Campagnes de recherche de fuites préméditées.

Cette recherche très active a pu être incitée et même imposée par un organisme de contrôle, l'Ofwat en Angleterre par exemple. Des débits de fuite à ne pas dépasser étant fixés, le gestionnaire n'a eu d'autre choix que d'intensifier ses opérations de recherche de fuites. Il ne répond donc pas à un événement ponctuel présent mais plus au mauvais état général du secteur résultant d'une lente dégradation qui n'est plus tolérée.

Beaucoup de questions découlent de ce type de gestion. Jusqu'à quel niveau continuer à chercher les fuites ? La forte pression de recherche exercée sur le Secteur 2 n'aurait-elle pas pu aussi être menée sur le Secteur 3, et quelle en aurait été l'efficacité ? A partir de quel seuil commencer une telle campagne ? Existe-t-il d'autres leviers sur lesquels agir pour tirer le débit de fuite vers le bas ? Le gestionnaire du Secteur 3 ne se situait-il pas déjà au minimum de débit de fuite atteignable ?

Autant de questions sans réponses pour le moment et auxquelles nous nous proposons d'essayer d'en apporter par la suite, avec l'aide de la modélisation.

Auparavant, toujours dans le cadre de l'analyse des données, un premier modèle présenté ci-dessous nous renseigne sur la nécessité ou non de prendre en compte certaines des données pour l'élaboration de modèles plus complets.

2. PERTINENCE DE LA DISTINCTION ENTRE REPARATIONS SUR DETECTION VISUELLE OU SUR RECHERCHE DE FUITES DANS L'EXPLICATION DES DEBITS OBSERVES

A partir de certaines des données précédemment décrites, nous avons élaboré un modèle simple de reconstitution des chroniques dont l'objectif est d'apporter une réponse quant à la participation ou non des réparations sur détection visuelle aux baisses de débit de fuite. La nécessité de la modélisation tient au fait qu'il est impossible de parvenir à lever cette interrogation par la simple observation des données. Au-delà de cet objectif, le modèle fournit certains autres enseignements que nous présentons également.

Les calculs pour ce modèle et tous ceux présentés par la suite sont implémentés sous le logiciel SAS qui propose une large gamme de méthodes statistiques allant des méthodes d'analyse descriptive jusqu'aux méthodes de modélisation prédictive les plus avancées. La variable t représente, ici et par la suite, le temps discrétisé à l'échelle de la semaine pour s'adapter aux données dont nous disposons.

2.1. Modèle de différence relative

Ce modèle simple exprime le lien entre les valeurs de débit de fuite observées à une semaine d'intervalle. En effet, le débit de fuite de la semaine t dépend de celui de la ou des semaine(s) précédente(s). Nous avons choisi pour ce premier modèle d'exprimer cette dépendance sous la forme d'un taux de croissance que l'on peut qualifier de naturel, et des réparations effectuées dans la période considérée.

2.1.1. Formulation du modèle, fonctionnement et hypothèses associées

L'équation retenue pour ce modèle s'écrit simplement :

$$\frac{Q(t) - Q(t-1)}{Q(t-1)} = \beta_0 + \beta_1 r_1(t) + \beta_2 r_2(t) \quad (2.1)$$

où $Q(t)$ représente en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ le débit de fuite sur le secteur considéré en semaine t ,

$Q(t-1)$, toujours en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, est le débit de fuite sur le secteur considéré en semaine $t-1$,

β_0 est le taux d'accroissement du débit de fuite,

β_1 donne le poids des réparations sur recherche de fuites,

$r_1(t)$ correspond au nombre de réparations effectuées en semaine t suite des opérations de recherche de fuites,

β_2 donne le poids des réparations sur détection visuelle,

$r_2(t)$ correspond au nombre de réparations effectuées en semaine t suite à une détection visuelle.

2.1.1.1. Taux d'accroissement du débit de fuite

L'hypothèse ici retenue est de considérer un taux d'accroissement constant dans le temps, représenté par la grandeur β_0 . Deux aspects peuvent cependant contredire cette hypothèse :

- l'observation de certaines courbes, comme celle du Secteur 1 représenté en Figure 7, montre une augmentation plutôt régulière du débit de fuite au cours d'une première phase. Celle-ci est suivie d'une tendance à l'accentuation de cette hausse naturelle de débit dans les semaines précédant des casses, que l'on devine par un pic de débit. Une explication possible à ce phénomène est d'imaginer que le ou les orifices dont proviennent les fuites s'agrandissent nettement et rapidement avant la rupture plus franche de la conduite, conduisant à une casse repérée ou repérable. Nous avons choisi dans ce premier modèle de ne pas tenter de modéliser ces hausses ponctuelles imprévisibles, pour lesquelles nous n'avons aucun moyen de représentation ;

- à mesure que le réseau vieillit, qu'il se détériore, il paraît légitime de supposer que l'augmentation du débit de fuite entre deux instants s'accroît. Or, sur la courte période d'observation dont nous disposons, l'effet du vieillissement n'est pas immédiatement visible. Nous ne cherchons donc pas pour ce modèle simple à faire dépendre du temps le taux d'accroissement du débit de fuite.

2.1.1.2. Influence des réparations sur le débit de fuite

L'effet attendu des réparations est une diminution du débit sous forme de sauts. L'objectif du modèle est de déterminer dans quelle mesure les sauts observés sur les chroniques de débit sont liés aux réparations, qu'elles soient sur opérations de recherche avec la variable $r_1(t)$ ou sur détection visuelle avec $r_2(t)$.

Pour cela, nous considérons chaque semaine le nombre des réparations effectuées dans les deux catégories et leur associations des paramètres de quantification de la réponse en termes de débit, respectivement β_1 et β_2 . Pour un secteur donné, en fonction de la valeur de ces deux paramètres, nous saurons si, dans le cadre du modèle choisi, les deux types de réparations déterminent la valeur du débit de fuite et dans quelle proportion.

Les réparations sur détection visuelle n'ont *a priori* pas à intervenir dans le débit si l'on suppose que les casses manifestes apparaissent soudainement et que la réactivité de l'exploitant est inférieur au pas de temps considéré, à savoir la semaine.

2.2. Procédure de calcul

Nous avons appliqué le modèle de différence relative aux 18 secteurs préalablement sélectionnés ; le calcul des paramètres s'effectue secteur par secteur au moyen d'une procédure d'auto régression.

Des contraintes, assurant la négativité des paramètres β_1 et β_2 afin de respecter les phénomènes physiques décrits, peuvent être imposées, mais nous n'en présentons pas les résultats, peu différents de ceux du modèle sans contrainte.

2.3. Résultats

2.3.1. Valeur des paramètres et restitution graphique

Pour le modèle à trois paramètres présenté, nous observons une convergence pour l'intégralité des 18 secteurs de l'étude. Cette convergence, définie au sens mathématique du terme, signifie que des critères adaptés, prédéterminés sous SAS, sont remplis. Elle n'implique pas nécessairement une bonne adéquation entre les courbes observée et modélisée comme le montre la Figure 11. Cependant, ce cas reste peu fréquent sur les 18 secteurs où les courbes sont généralement plus proches l'une de l'autre.

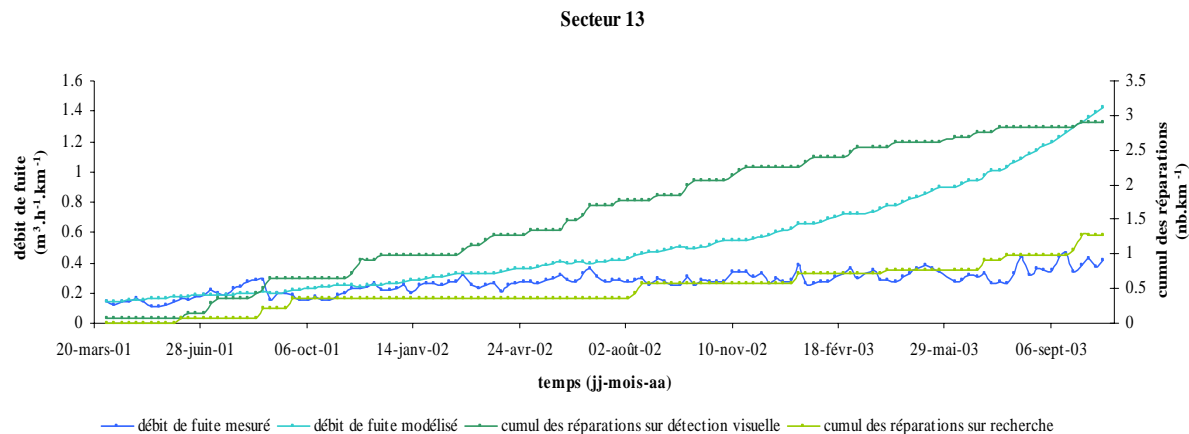


Figure 11. Ecart possible entre les courbes mesurée et modélisée.

La reconstitution s'effectue par une rapide transformation de l'équation (2.1) où l'on exprime le débit de fuite en semaine t de la façon suivante :

$$Q(t) = [1 + \beta_0 + \beta_1 r_1(t) + \beta_2 r_2(t)] Q(t-1) \quad (2.2)$$

Les valeurs des paramètres nécessaires à la construction des courbes modélisées sont regroupées dans le Tableau 10. Elles sont commentées séparément pour chacun d'eux dans les paragraphes suivants.

Les grandeurs $R_1(t)$ et $R_2(t)$, présentes dans ce tableau, correspondent au cumul des réparations $r_1(u)$ et $r_2(u)$, où u représente une semaine au sein de la fenêtre d'observations, depuis l'ouverture de la chronique à t_0 jusqu'à la semaine t .

Elles s'expriment par :

$$R_1(t) = \sum_{u=t_0}^t r_1(u) \quad (2.3)$$

$$R_2(t) = \sum_{u=t_0}^t r_2(u)$$

Nous présentons également l'influence des paramètres β_1 et β_2 sur le débit de fuite modélisé sous la forme du débit économisé, appelé gain, suite aux réparations sur opérations de recherche et sur détection visuelle. $R_1(t)$ et $R_2(t)$ nous servent dans un second temps à déterminer le débit unitaire moyen pour chaque type de fuite.

La formulation du modèle est telle que la variation relative de débit d'une semaine sur l'autre dépend de trois quantités indépendantes : croissance naturelle du débit avec le temps grâce à β_0 et double effet des réparations avec $\beta_1 r_1(t)$ et $\beta_2 r_2(t)$. Il en résulte que l'on peut apprécier séparément l'effet de chaque composante.

Par exemple, l'influence sur la variation de débit entre $t-1$ et t des seules réparations sur recherche de fuites (β_0 et β_2 sont pris nuls pour l'occasion), s'écrit :

$$\frac{Q'(t) - Q'(t-1)}{Q'(t-1)} = \beta_1 r_1(t) \quad (2.4)$$

On montre ensuite par récurrence que, sur l'ensemble des semaines de la chronique, l'impact de ces réparations, si elles sont les seules à intervenir dans la variation du débit de fuite, conduit à une valeur de débit à la date $t=t_f$ de fin de chronique égale à :

$$Q'(t_f) = \prod_{i=1}^f [1 + \beta_1 r_1(t_i)] Q(0) \quad (2.5)$$

Le calcul de cette expression s'effectue très simplement à partir des données de réparations, de $Q(0)$ et de la valeur du paramètre déterminée par le modèle.

Le raisonnement est identique pour les réparations sur détection visuelle et permet de compléter le Tableau 10.

Le débit unitaire de fuite moyen pour les catégories considérées, intitulé « total par réparation » dans le Tableau 10 est obtenu à partir du gain global associé à chaque type de réparation et ramené à l'unité de réparation. Il ne prend en compte que les secteurs où les paramètres β_1 et β_2 sont tous deux négatifs pour plus de sens physique.

Tableau 10. Valeurs des paramètres et gains pour le modèle de différence relative à trois paramètres.

Sect.	β_0	β_1	β_2	$R_1(t)$ (nb.km ⁻¹)	$R_2(t)$ (nb.km ⁻¹)	gain réparations sur recherche de fuites (m ³ .h ⁻¹ .km ⁻¹)	gain réparations sur détection visuelle (m ³ .h ⁻¹ .km ⁻¹)
1	0.022	-0.379 HS	0.011 NS	1.4	1.1	0.06	-0.00
2	0.007	-0.088 S	-0.201 S	8.2	4.3	1.31	1.48
3	0.010	-1.068 HS	-0.142 NS	0.9	0.8	0.79	0.14
4	0.020	-0.493 NS	-0.430 NS	0.4	2.7	0.05	0.21
5	0.017	-0.207 S	-0.448 HS	3.1	3.7	0.59	1.00
6	0.023	-0.313 THS	-0.631 THS	3.8	3.2	1.20	1.63
7	0.019	-0.588 S	-0.358 S	0.7	2.1	0.08	0.13
8	0.007	-0.277 NS	0.010 NS	0.6	2.0	0.10	-0.01
9	0.008	-0.485 THS	-0.295 NS	1.7	1.7	0.68	0.45
10	0.0003	-0.104 NS	0.080 NS	1.4	3.1	0.10	-0.19
11	0.005	0.122 NS	-0.261 NS	1.3	2.2	-0.24	0.67
12	0.015	0.201 NS	-0.312 NS	0.7	1.3	-0.06	0.12
13	0.025	0.100 NS	-0.356 NS	1.3	2.9	-0.02	0.09
14	0.017	-0.682 NS	0.034 NS	0.8	2.5	0.12	-0.03
15	0.014	-0.387 NS	-0.068 NS	1.1	2.8	0.15	0.08
16	0.011	-0.175 NS	-0.129 NS	0.9	2.6	0.07	0.13
17	0.014	-0.387 NS	-0.492 NS	1.4	1.4	0.37	0.44
18	0.031	-0.465 NS	-0.845 NS	1.0	1.4	0.32	0.62
	0.0146	-0.315	-0.268	30.6	41.7	5.7	7.0
	<i>moy.</i>	<i>moy.</i>		<i>total</i>	<i>total</i>	<i>total</i>	<i>total</i>
						0.27	0.23
						<i>total par réparation</i> (m ³ .h ⁻¹)	<i>total par réparation</i> (m ³ .h ⁻¹)

NS, S, HS et THS signifient respectivement Non Significatif, Significatif, Hautement Significatif et Très Hautement Significatif (S si $P < 0,05$, HS si $P < 0,01$, THS si $P < 0,001$ et NS si $P > 0,05$). Ces indications traduisent le risque d'erreur de rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est vraie. Les grandeurs suivies de NS ne sont en réalité pas significativement différentes de 0.

2.3.2. Interprétation

2.3.2.1. Etude du taux de croissance constant β_0

Le paramètre β_0 définit l'allure générale de la courbe, puisqu'il est le seul à intervenir dans les nombreuses semaines où aucune réparation n'est effectuée. Sur l'ensemble des secteurs, il prend des valeurs positives, ce qui traduit la tendance naturelle à l'accroissement du débit de fuite avec le temps. Il a une valeur moyenne de 0,0146 pour une variabilité assez forte

puisque ses valeurs sont comprises entre 0,005 pour le Secteur 11 et 0,031 pour le Secteur 18 (Secteur 10 exclu puisque présentant une valeur très éloignée par rapport aux autres secteurs (Tableau 10)).

On imagine que ce paramètre peut à lui seul caractériser en matière de fuites le secteur pour lequel il est déterminé. Il est dès lors intéressant d'essayer de l'expliquer par différentes grandeurs patrimoniales. Cependant, les nombreuses tentatives, que ce soit avec l'âge moyen, le nombre de branchements domestiques, ou d'autres caractéristiques encore, se sont révélées vaines. Les Figure 12 et Figure 13 illustrent bien cette difficulté à établir des liens entre les valeurs de paramètres observées et les caractéristiques patrimoniales des secteurs.

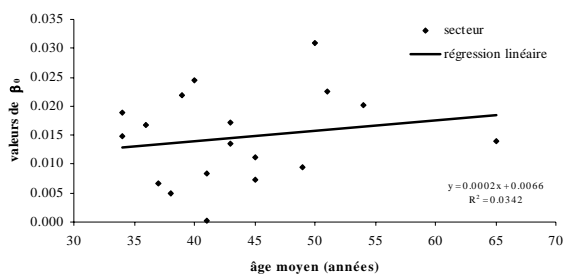


Figure 12. Valeurs de β_0 en fonction de l'âge moyen.

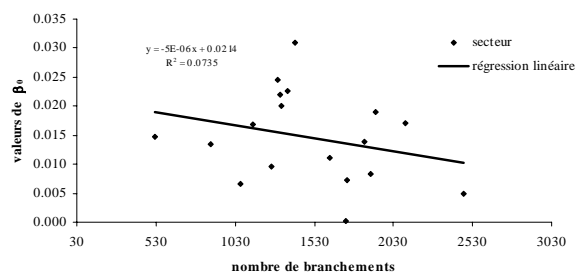


Figure 13. Valeurs de β_0 en fonction du nombre de branchements.

2.3.2.2. Analyse des valeurs de β_1 et β_2

Les paramètres β_1 et β_2 nous renseignent sur la réponse du secteur, en termes de débit, aux différents types de réparations.

Alors que nous pouvons nous attendre à des valeurs exclusivement négatives pour ces deux paramètres, nous observons quelques valeurs positives anormales (Secteurs 1, 8, 10, 11, 12, 13, 14) surtout concernant le paramètre β_1 . En effet, ceci signifie que les réparations sur recherche de fuites ne permettent pas de faire diminuer le débit de fuite, ce qui est pourtant l'effet escompté d'une telle action.

L'interprétation proposée pour expliquer ces valeurs positives consiste à supposer une mauvaise redistribution des effets des deux types de réparation par le modèle. Si, à chaque semaine où une ou plusieurs réparations sur recherche sont réalisées, des fuites sur détection

visuelle sont réparées dans le même temps, alors le modèle peine à distinguer les deux types de réparations et à en évaluer correctement les effets respectifs.

Cette confusion des effets s'observe sur le Tableau 10 où l'on voit que les valeurs fournies sont majoritairement non significatives : le modèle ne parvient pas à attribuer les variations de débit aux différents types de réparations.

Cette difficulté peut provenir du fait que certaines casses franches sont issues de fuites détectables qui se manifestent enfin en surface. Dans ce cas, la réparation de la casse manifeste fait chuter le débit puisque l'écoulement perdurait certainement depuis longtemps, mais sous forme de fuite non repérée. Si la casse manifeste est soudaine, alors l'hypothèse de réactivité suffisante de l'exploitant implique que sa réparation n'a pas d'impact sur le débit observé. La difficulté à distinguer β_1 et β_2 corrobore l'idée d'une dégradation progressive d'une partie des fuites au cours du temps. La proportion de casses manifestes soudaines par rapport à celles issues de fuites non repérées est cependant inconnue.

Notons encore que sur aucun secteur β_1 et β_2 ne sont positifs simultanément, ce qui laisse bien à penser à une confusion possible des deux types de réparations. De plus, les opérations de recherche sont parfois peu fréquentes et ne présentent généralement qu'un faible nombre de réparations, comme c'est le cas sur la Figure 11 du Secteur 13. Ceci peut aussi expliquer la positivité de β_1 positif et la mauvaise restitution graphique.

Les valeurs moyennes des paramètres β_1 et β_2 sont assez proches sur l'ensemble des secteurs, $-0,315$ pour β_1 et $-0,268$ pour β_2 . D'un secteur à l'autre cependant, le poids relatif de ces paramètres est variable et n'est pas toujours explicable.

Ainsi, sur le Secteur 2, β_2 est plus de deux fois supérieur à β_1 en valeur absolue. Si l'on observe la reconstitution graphique de la chronique (Figure 14), l'adéquation de forme entre les deux courbes est assez bonne. Plus particulièrement, les deux principales opérations de recherche (courant avril 2002 puis toute fin 2002), qui se soldent sur le débit observé par des chutes marquées, sont bien représentées dans le débit modélisé.

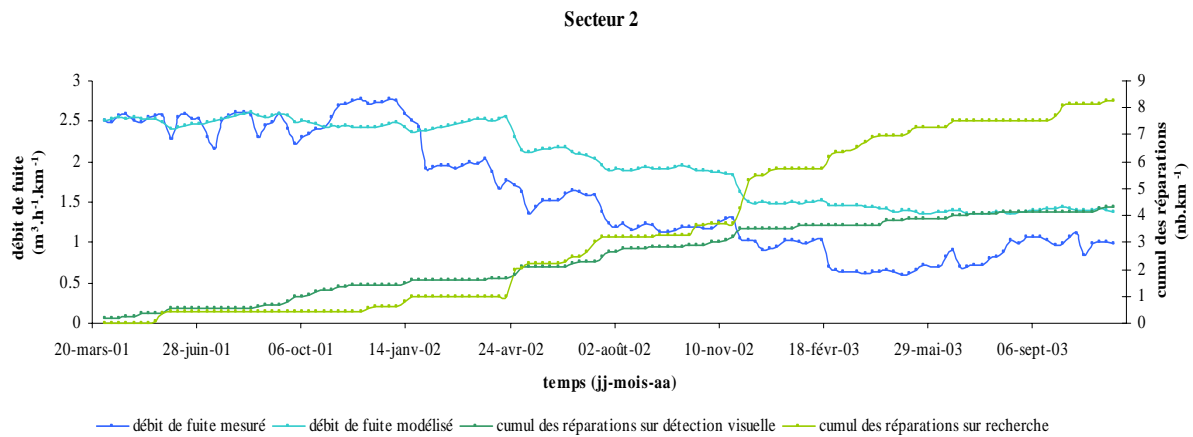


Figure 14. Restitution graphique du modèle de différence relative à trois paramètres pour le Secteur 2.

Ce secteur est caractérisé par de nombreuses opérations de recherche de fuites et les réparations associées semblent *a priori* à elles seules pouvoir expliquer le débit observé. Or, il s'avère, d'après le modèle, qu'elles n'ont pas plus de poids dans l'explication du débit modélisé que les réparations sur détection visuelle. Bien que deux fois plus nombreuses, les réparations sur recherche de fuites sont affectées d'un coefficient β_1 environ deux fois moins grand que β_2 . La décroissance du débit est donc expliquée, dans le cadre de ce modèle, autant par les réparations sur détection visuelle que par celles sur recherche.

Une explication complémentaire à la transformation de fuites non repérées en casses manifestes peut ici être avancée. On peut ainsi supposer que le modèle surestime le taux de croissance naturelle des fuites β_0 . L'effet des réparations sur détection visuelle vient alors contrebalancer de façon fictive ce taux. Un équilibre est trouvé mais il ne respecte certainement pas la réalité du secteur. Ainsi, les paramètres sont parfois délicats à interpréter.

Le Secteur 9, sur lequel de nombreuses réparations sur recherche de fuites ont été effectuées, est également intéressant à étudier (voir Figure 15).

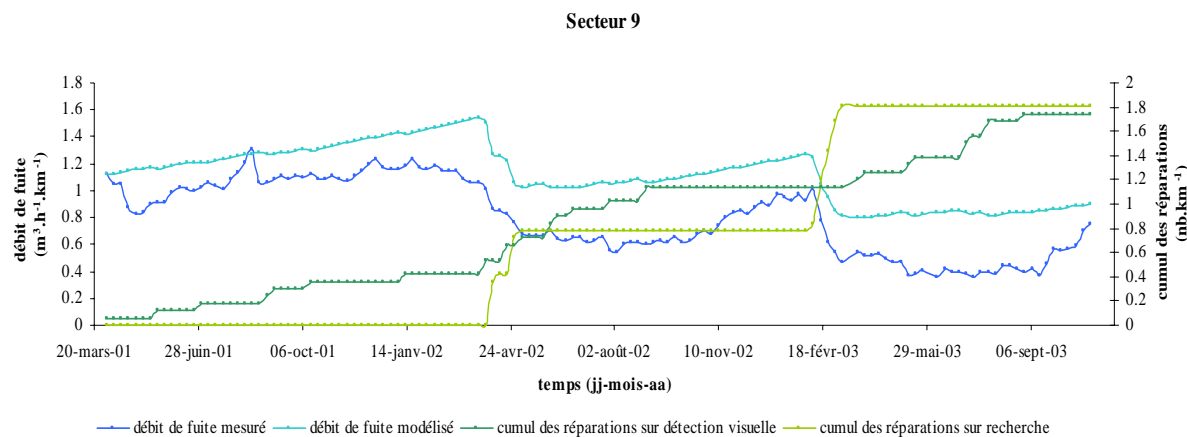


Figure 15. Restitution graphique du modèle de différence relative à trois paramètres pour le Secteur 9.

Deux aspects principaux sont à relever. Les chutes de débit modélisées consécutives à des opérations de recherche sont comme précédemment bien restituées. Ceci permet de valider la valeur $\beta_1 = -0,485$ obtenue. La pente de croissance du débit entre deux opérations de recherche est également rendue de manière satisfaisante.

Cette pente globale, comme nous l'avons évoqué pour le cas précédent, s'avère être non seulement liée à β_0 , mais aussi probablement indirectement à la valeur de β_2 qui intervient de manière assez diffuse tout au long de la chronique. Le nombre de réparations sur détection visuelle est égal dans ce cas à celui sur recherche pour un gain total provoqué non négligeable. Il atteint environ deux tiers du gain engendré par les réparations sur recherche de fuites.

Cette influence bénéfique des réparations sur détection visuelle ne se manifeste pourtant pas concrètement par des sauts nettement visibles sur la chronique modélisée. Elle est plutôt intégrée à la croissance du débit, la ralentissant fortement.

Il est dès lors possible d'envisager la même conclusion que pour le Secteur 2 : en plus du passage indéterminé entre fuites non repérées et casses manifestes, le modèle peine à distinguer croissance naturelle du débit et effet des réparations sur détection visuelle, compliquant ainsi l'interprétation des paramètres.

2.3.2.3. Discussion sur les gains engendrés par chaque type de réparation

Sur l'ensemble des secteurs, le débit sauvé grâce aux réparations est légèrement en faveur des réparations sur détection visuelle. Comme le montre le Tableau 10, il s'élève pour celles-ci, sur la période considérée, à $7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ alors qu'il n'est que de $5,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ pour les réparations issues d'opérations de recherche, soit une différence de 20 % environ.

Un autre résultat du modèle est la valeur du débit unitaire moyen s'écoulant d'une casse (voir Tableau 10). Le calcul de moyenne n'a porté que sur les secteurs où les paramètres β_1 et β_2 étaient tous deux négatifs. Ce débit est légèrement supérieur pour les fuites réparées sur opérations de recherche, les fuites non repérées, que pour celles détectées visuellement, les casses manifestes. Il s'élève respectivement pour chacune de ces catégories à $0,27 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et $0,23 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. La valeur très faible pour les casses manifestes, comparée aux valeurs de $12 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour les conduites et $1,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour les branchements qu'avance Lambert *et al.* (1999), montre encore la confusion entre les types de réparations. Elle conduit même dans ce cas à une mauvaise représentation des phénomènes physiques. La valeur du débit unitaire de fuite non repérée peut toutefois être considérée avec intérêt et retenue pour d'éventuelles comparaisons avec les résultats à venir.

L'observation seule des courbes ne permet pas d'estimer ces débits unitaires. La variation de débit sur une semaine est due aux effets mêlés de la croissance naturelle du débit dans le temps et des réparations. La décomposition, puis la quantification de ces effets, sont donc indispensables à l'évaluation des débits unitaires ; l'utilisation d'un modèle est nécessaire pour y parvenir.

Les valeurs de β_2 non nulles laissent supposer que les réparations de casses manifestes ont une part non négligeable dans l'explication des chroniques de débit de fuite. Deux causes simples peuvent tout d'abord être avancées pour justifier cette constatation :

- il est possible qu'aucun particulier ne signale une fuite pourtant visible dans un délai d'une semaine, auquel cas l'effet de la réparation est bien influent dans la chronique de débit ;
- la réactivité de l'exploitant peut également être mise en cause. Une fuite repérée doit normalement être réparée dans les jours suivant son signalement. Selon les priorités du

moment, les moyens disponibles et le débit perdu estimé, il se peut très bien que la réparation effective ait lieu dans un laps de temps supérieur à la semaine.

Sur un secteur, ces deux phénomènes se produisent nécessairement en l'espace de 2,5 ans, durée de la chronique des données. Il est cependant peu vraisemblable qu'ils représentent le cas général, les casses manifestes étant en pratique traitées avec rapidité. De plus, si une casse franche perdure plus d'une semaine, alors sa réparation fait certes chuter le débit de fuite, mais pas d'une manière que l'on peut qualifier d'efficace : la chute ramène simplement le débit au niveau antérieur à la casse franche mais pas en dessous, et les gains réels sont nuls. Ceci ne s'observe que très rarement sur les données fournies.

Les valeurs non nulles du paramètre β_2 , certes souvent non significatives, sont donc certainement plus dues à un biais du modèle ou à une distinction inappropriée des types de réparations. La relative continuité du phénomène de réparations sur détection visuelle peut ainsi interférer avec la croissance naturelle du débit de fuite. De plus, il semble primordial de savoir comment est apparue la casse manifeste afin de pouvoir apprécier les effets de sa réparation.

2.4. Conclusion

L'étude des données a montré que peu de secteurs parmi ceux disponibles étaient fiables. Un tri très sélectif a été opéré permettant de retenir 18 secteurs dont le fonctionnement semble garantir la possibilité d'une modélisation. Un premier modèle a été implémenté afin de déterminer les données de réparations qui seront à considérer pour la suite des travaux. Il n'a pas permis de distinguer précisément les effets des réparations sur détection visuelle ou sur opération de recherche de fuites. Il a montré par contre que pour modéliser les effets des réparations la distinction entre casses manifestes et fuites non repérées n'était pas suffisante et qu'il y avait une nécessité à comprendre la façon dont les fuites sont apparues.

Le chapitre 3 a pour objet la poursuite de la modélisation du débit de fuite initiée ici. Au-delà de la simple restitution des séries temporelles, nous chercherons à décomposer ce débit en une part liée aux fuites diffuses et une autre liée aux fuites non repérées.

CHAPITRE 3.

MODELES DYNAMIQUES BASES SUR UN TAUX D'APPARITION DES FUTES

Préambule

La modélisation du débit de fuite est un des objectifs majeurs de la thèse. Elle cherche à proposer une approche nouvelle dans le domaine de la gestion patrimoniale : ne plus se fonder uniquement sur les casses et les interruptions de service pour choisir les travaux à entreprendre mais intégrer le débit de fuite comme possible outil d'aide à la décision. Cette approche devra permettre, en outre, de mieux cibler le type d'actions à mener.

Un travail exploratoire sur diverses formes de modèles a été mené, guidé et encadré par la mise en place de procédés que nous imaginions pouvoir représenter le fonctionnement réel du secteur.

Dans un premier temps, et c'est un préalable à toute construction de modèle, nous évoquerons les objectifs recherchés : d'eux dépendront la forme du modèle. Ils seront définis en lien avec la problématique générale évoquée au premier chapitre. Puis, nous détaillerons les hypothèses sur lesquelles reposent les modèles avant de présenter successivement les équations et les résultats des modèles dits d'apparition des fuites et trois états.

1. OBJECTIFS

Le modèle de différence relative mis en place précédemment ne permet pas de distinguer les fuites diffuses et les fuites non repérées, pas plus que l'effet des réparations des fuites détectables et des casses manifestes. Il est ainsi impossible d'appliquer sur chacune de ces catégories des moyens d'action adaptés.

La distinction de ces composantes n'est possible que si elle est formulée dans le corps du modèle. Nous proposons de mettre en place un modèle qui permette de considérer et d'exprimer les différentes catégories de fuites, dont il évalue la part respective dans le débit global observé. Nous présentons ici les attentes relatives à ce modèle.

1.1. Formuler nouvellement les fuites diffuses

La formulation des fuites diffuses, telle que Lambert *et al.* (1999) l'ont écrite, aboutit au calcul d'une valeur constante dans le temps propre à chaque secteur mais établie sur des valeurs de référence communes discutables (Renaud 2004).

Autrement dit, l'augmentation naturelle du débit observée sur l'ensemble des secteurs de l'étude ne peut avoir pour origine que la hausse de la part des fuites non repérées. Or, la recherche de fuites ne permet pas de contenir systématiquement l'élévation du débit de fuite. On peut donc logiquement imaginer la croissance avec le temps du débit associé aux fuites diffuses. Le modèle repense donc l'expression des fuites diffuses et propose une nouvelle formulation incorporant leur dimension évolutive.

L'objectif du modèle est donc de connaître la quantité et l'évolution dans le temps des fuites diffuses en lien avec le secteur sur lequel elles s'observent pour mieux comprendre le phénomène et proposer des correctifs adaptés.

1.2. Séparer les fuites diffuses et les fuites non repérées

La donnée accessible, et la seule aisément mesurable à l'heure actuelle, est le débit de fuite. Plus exactement il s'agit d'une mesure du débit de nuit dont on a soustrait une estimation de la consommation. La valeur retenue est le minimum horaire hebdomadaire qui permet de se prémunir de phénomènes perturbateurs ponctuels comme l'ouverture de poteaux incendie ou l'effet des casses manifestes.

Bien que débarrassé de ces composantes ne s'apparentant pas à des fuites durables, ce débit reste global et le modèle développé se propose de le diviser en deux entités distinctes. Nous allons donc exprimer de façon générale pour n'importe quel réseau ou secteur disposant de chroniques de débit et de réparations, les fuites diffuses d'une part, les fuites non repérées d'autre part.

La Figure 16 compare notre approche à celle de Lambert. Elle montre bien la différence de portée des deux études.

Les secteurs que nous étudions dans le cadre de notre travail ne sont pas nécessairement dotés « d'infrastructures en bonnes conditions » et ne présentent donc pas pour seul débit de fuite le débit incompressible. Lambert, dans le cadre du panel de réseaux de la Figure 16, propose un calcul de débit de fuite incompressible uniquement pour le Réseau 4, avant d'étendre ces résultats restreints aux autres réseaux.

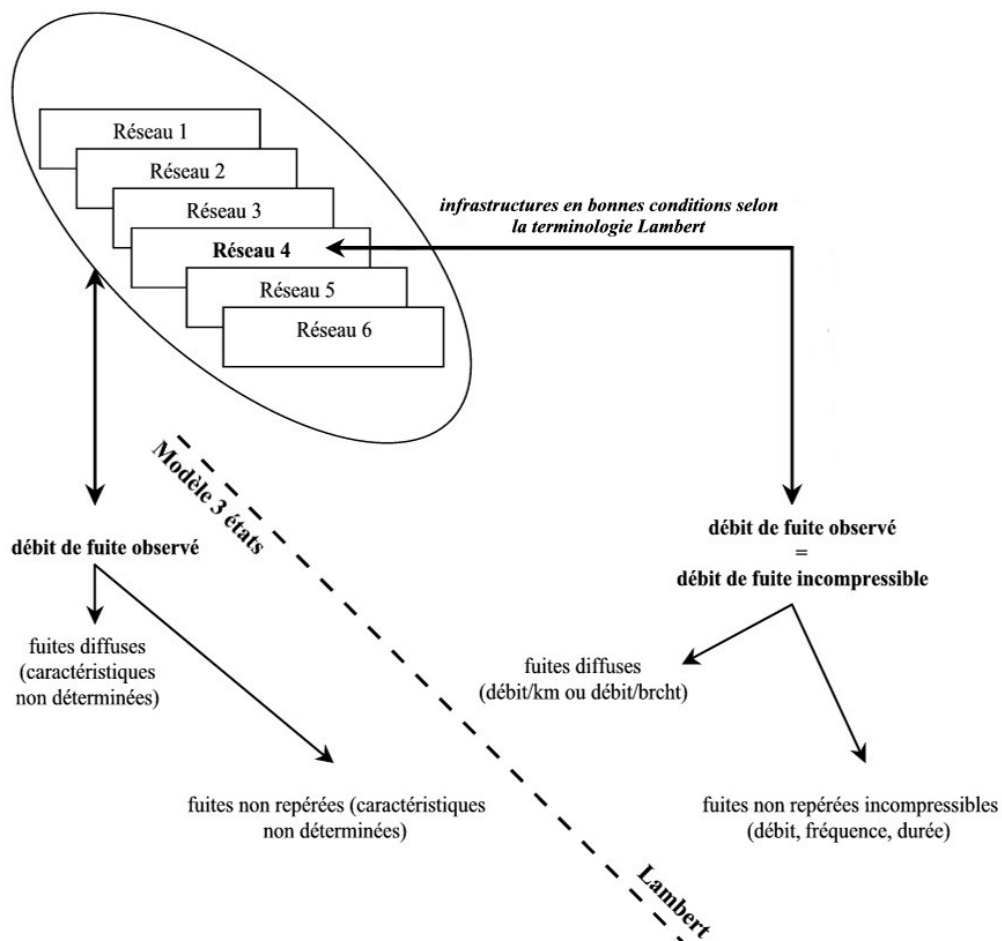


Figure 16. Décomposition du débit de fuite et comparaison modèle trois états – modèle formulé par Lambert *et al.* (1999).

La modélisation envisagée supprime cette double restriction : elle porte sur l'ensemble des réseaux ou secteurs et sur l'ensemble du débit de fuite. La forme de décomposition choisie par Lambert est maintenue, abstraction faite des casses manifestes qui ne sont pas ici modélisées.

Cette décomposition quantitative du débit de fuite est essentielle pour ne pas mobiliser et mettre en œuvre inutilement des moyens inadaptés à la nature des fuites présentes sur le réseau, et par conséquent inefficaces. Le modèle proposé vise à pallier ce manque actuel d'information et à formuler, pour les secteurs étudiés, la composante du débit de fuite due aux fuites diffuses et celle imputable aux fuites non repérées.

1.3. Proposer un outil de réduction des fuites au travers de la gestion du patrimoine

L'objectif du modèle n'est pas simplement de proposer une photographie du réseau à un instant donné. Au contraire, pour représenter au mieux le réseau, le modèle doit prendre en compte sa composante dynamique qui se manifeste par les variations du débit de fuite observées. S'il prend en compte cette dimension, alors il autorise des possibilités de gestion à moyen ou long terme, orientée par la connaissance de l'évolution future du réseau.

Différents scénarios de gestion pourront être implémentés grâce au modèle, et leurs effets quantifiés. Nous souhaitons pouvoir répondre à de nombreuses questions jusqu'ici non résolues. Comment va évoluer le réseau dans les prochaines années, en ce qui concerne les fuites, s'il est laissé à lui-même et suit son évolution naturelle ? Si des valeurs limites sont imposées sur la quantité de fuites, de quel laps de temps dispose le gestionnaire pour organiser sa réponse et éviter de franchir ces seuils ? A l'inverse si des valeurs cibles sont préconisées et doivent être atteintes dans les cinq années à venir par exemple, quelle politique mettre en œuvre pour y parvenir de façon optimale : recherche intensive, renouvellement ?

Tels sont les objectifs du modèle que nous souhaitons mettre en place.

2. HYPOTHESE SUR LE PROCESSUS D'APPARITION DES FUTITES

L'idée maîtresse des développements qui suivent est de considérer les fuites en tant qu'individus, au même titre que le sont les casses.

Le processus d'apparition des fuites choisi, pour en calculer le nombre, est dérivé des théories de Yule (Ross 1983) dont l'application au dénombrement des casses sur les réseaux d'eau potable a été précisée au chapitre 1. Les fuites diffuses et non repérées pouvant être assimilées à des événements de nature assez proche de celle des casses, nous formulons l'hypothèse que ce processus peut s'adapter à l'apparition des fuites. Son cadre théorique ainsi que sa formulation sont ici brièvement présentés.

Nous nous concentrons sur le processus de Yule classique, conçu comme un modèle simple de croissance dans le temps d'une population ne comptant initialement qu'un seul individu. Au sein de cette population, les individus ont un taux de mortalité nul, et un taux de reproduction $\lambda > 0$ constant dans le temps, c'est pourquoi on le trouve souvent sous le nom de Pure Birth Process dans la littérature anglophone. Son écriture se fait en pratique, pour reprendre la formulation de Ross (1983), sous la forme d'un processus de comptage $N(t)$ du nombre d'individus composant la population au temps t .

On écrit ainsi :

$$\begin{aligned} & \forall t \in \mathbb{R}^+, \forall h \in \mathbb{R}^{+*}, \forall j \in \mathbb{N}^*, \\ & \begin{cases} N(0) = 1 \\ P\{N(t+h) - N(t) = 1 \mid N(t) = j\} = j\lambda h + o(h) \\ P\{N(t+h) - N(t) \geq 2 \mid N(t) = j\} = o(h) \end{cases} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Cette définition implique deux propriétés importantes, caractéristiques du processus $N(t)$:

- la probabilité d'observer un événement à t ne dépend que du nombre d'événements déjà observés à t (propriété markovienne) ;
- un intervalle de temps infinitésimal ne peut voir naître qu'un seul événement tout au plus.

Une conséquence remarquable, mise en avant par Le Gat (2007 (à paraître)), est que la distribution de $N(t)$ sur \mathbb{N}^* est géométrique et permet d'écrire :

$$\forall t \in \mathbb{R}^+, \forall j \in \mathbb{N} : P\{N(t) = j + 1\} = e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^j \quad (3.2)$$

L'espérance de $N(t)$ est donnée par :

$$E(N(t)) = \sum_{j=0}^{+\infty} (j+1) e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^j = e^{-\lambda t} \sum_{j=0}^{+\infty} (j+1) (1 - e^{-\lambda t})^j \quad (3.3)$$

En développant ce calcul on reconnaît le développement en série de la fonction $\frac{1}{(1-x)^2}$ avec

$x = 1 - e^{-\lambda t}$ compris entre 0 et 1. Au final, on obtient pour $N(0) = 1$:

$$E(N(t)) = e^{\lambda t} \quad (3.4)$$

Le processus de Yule permet de mettre en place un modèle de croissance de la population des casses. Nous obtenons un nombre d'événements s'étant produits jusqu'à l'instant t du calcul, mais le calcul n'a pas pour but ni pour possibilité de préciser si l'effet de ces casses est encore observable sur le réseau. Nous décidons donc d'appliquer ce modèle aux fuites en les soumettant à cette même loi d'apparition à un paramètre. Le taux de reproduction λ à déterminer sera appelé par la suite le taux d'apparition μ afin de matérialiser le changement par rapport à son utilisation première dans le domaine des réseaux.

Pour $N(0) = 0$ (nombre de fuites nul à $t = 0$), le nombre de fuites $N(t)$ apparues sur un secteur donné entre 0 et t est ainsi donné par la relation suivante :

$$E(N(t)) = e^{\mu t} - 1 \quad (3.5)$$

Nous aurions aussi pu choisir un modèle de type NHPP à la place du processus de Yule :

$$E(N(t)) = t^\delta e^{\beta_0} \quad (3.6)$$

Il s'avère cependant que l'ajout d'un paramètre, comme le montre l'équation (3.6), occasionne des difficultés supplémentaires pour le calage des paramètres. Nous optons donc pour un modèle d'apparition à un paramètre plutôt qu'à deux.

L'hypothèse d'apparition des fuites selon un processus de Yule est testée dans le paragraphe suivant. Pour cela, nous proposons un modèle construit sur cette hypothèse, le modèle d'apparition des fuites. Nous présentons sa construction ainsi que les résultats auxquels il conduit.

3. MODELE D'APPARITION DES FUTITES

3.1. Formulation

Le principe du modèle est de considérer que le débit de fuite observé est composé d'un nombre de fuites variable dans le temps auquel est associé un débit unitaire de fuite moyen. Les types de fuites n'étant pas distingués à ce stade, le débit unitaire évoqué est unique.

Notre priorité dans ce paragraphe est d'étudier la possibilité d'appliquer un processus de Yule à l'apparition des fuites. Nous mettons entre parenthèses pour l'instant la problématique précédemment soulevée relative à la distinction des effets des types de réparations. Les résultats du modèle précédent ont montré que les effets des réparations de casses sur détection visuelle étaient rarement significativement différents de 0, c'est pourquoi dans le modèle présenté ici nous ne considérons que les réparations sur recherche de fuites.

L'équation ci-dessous est constituée de trois termes qui se complètent pour pouvoir expliquer et représenter le débit de fuite :

$$\forall t \geq t_0, \quad Q(t) = Q_u \left[\frac{e^{\mu t} - 1}{L} - c_0 \frac{e^{\mu t_0} - 1}{L} - R_1(t) \right] \quad (3.7)$$

où $Q(t)$ représente en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ le débit de fuite sur le secteur considéré en semaine t ,

Q_u est le débit unitaire moyen associé à une fuite, exprimé en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,

μ , exprimé en an^{-1} , caractérise le taux d'apparition des fuites sur le secteur,

c_0 est le taux de fuites résiduel à t_0 , ouverture de la fenêtre d'observation ; il est compris entre 0 et 1,

$R_1(t)$ correspond au cumul des réparations sur recherche de fuites par kilomètre de conduites depuis l'ouverture de la chronique jusqu'à la semaine t , soit sur $[t_0, t]$,

L est la longueur du linéaire du secteur en kilomètre.

Le nombre total de fuites présentes en semaine t sur le secteur est multiplié par le débit unitaire Q_u . La signification de chacun des termes est la suivante :

- le premier terme correspond au nombre de fuites, qu'elles soient diffuses ou repérées, qui sont apparues sur le secteur entre la pose des conduites et la semaine t . L'apparition des fuites suit la loi proposée en (3.5) ;

- le second terme est nécessaire pour connaître le nombre de fuites réellement présentes à l'ouverture de la chronique, c'est-à-dire en t_0 . Pour cette date précise nous savons que $e^{\mu t_0} - 1$ fuites sont apparues depuis la pose des conduites. Un certain nombre d'entre elles ont été réparées ou se sont peut-être transformées en casses manifestes. Le facteur multiplicatif c_0 permet de connaître le pourcentage de ces fuites qui ne participent plus au débit de fuite au moment t_0 . La grandeur $1 - c_0$ sera appelée le taux résiduel de fuites. Le second terme est donc une constante systématiquement retranchée au nombre des fuites apparues sur le secteur depuis sa pose. Une valeur de $c_0 = 1$ correspond à un secteur sur lequel ne subsiste aucune fuite au temps t_0 ;

- le troisième terme permet de tenir compte des réparations sur opération de recherche qui ont lieu durant la période comprise entre c_0 et t . En effet, le nombre de ces réparations en temps réel fait diminuer d'autant le nombre de fuites encore présentes sur le secteur.

Par ailleurs, le modèle a été complexifié en distinguant la localisation des réparations. Nous verrons brièvement que ceci n'a pas permis d'améliorer le modèle. Nous montrerons également qu'il est possible d'adjoindre à cette équation la formulation des fuites diffuses proposée par Lambert afin de les introduire dans le modèle.

3.2. Procédure de résolution

Nous appliquons sous SAS le modèle aux 18 secteurs préalablement sélectionnés et le calcul des paramètres s'effectue secteur par secteur au moyen de la PROC MODEL. Les paramètres sont évalués par une procédure non-linéaire de moindres carrés.

Des valeurs initiales, ainsi que certaines contraintes, sont associées aux paramètres pour faciliter la convergence et assurer le sens physique des résultats. Une première contrainte consiste à borner les valeurs de c_0 entre 0 et 1. La contrainte de positivité de μ et de Q_u est

évidente compte tenu du sens de ces paramètres : le premier est un taux d'apparition, le second un débit. Le choix des valeurs initiales à partir desquelles le modèle cherche à minimiser les écarts entre valeurs observées et modélisées n'est pas influent sur les valeurs des paramètres obtenues, ce qui laisse à penser qu'il n'existe pas de problèmes de minimums locaux.

3.3. Résultats

La convergence du modèle est observée pour 16 secteurs, les Secteurs 8 et 15 ne remplissant pas les critères de convergence imposés.

3.3.1. Exemples de restitution graphique : améliorations par rapport au modèle de différence relative

La reconstitution des chroniques se fait directement à partir de l'équation (3.7) dans laquelle nous introduisons la valeur des paramètres calculés par le modèle. Par rapport au modèle de différence relative, nous notons une nette amélioration de la restitution graphique.

Nous présentons trois exemples pour mettre en évidence de façon générale cette amélioration et plus précisément :

- l'adaptation du modèle aux caractéristiques initiales des données de débit (Figure 17)
- l'influence de la valeur initiale modélisée (Figure 18 et Figure 19)

Sur le Secteur 13, la courbe modélisée est proche de celle des débits mesurés, contrairement à ce que présentait la Figure 11 pour les résultats du modèle de différence relative. La Figure 17 montre une courbe plutôt lisse et retraçant la croissance globale du débit de fuite de manière correcte.

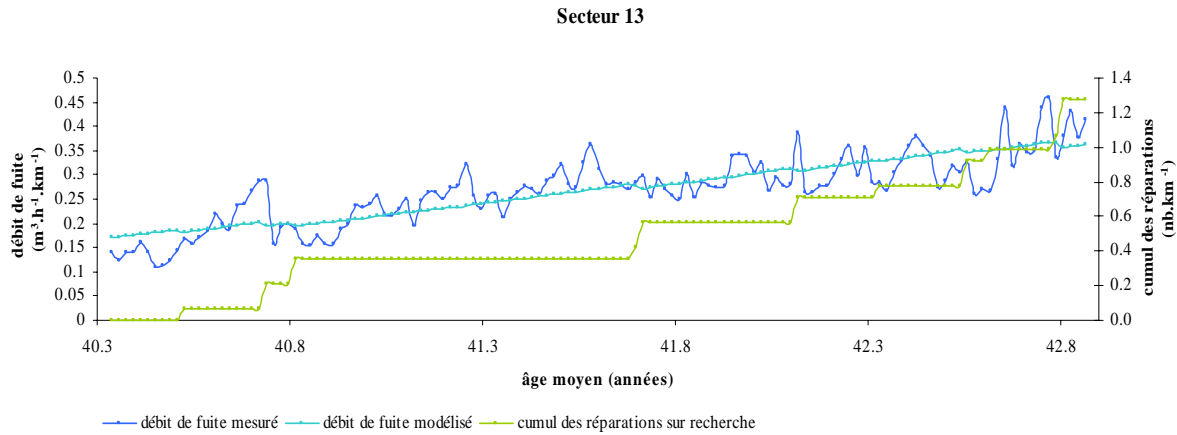


Figure 17. Restitution graphique du modèle d'apparition des fuites pour le Secteur 13.

Le gain sur l'allure générale se fait cependant au détriment d'un rendu de qualité de l'effet des réparations, très peu visible sur le débit restitué. L'explication tient au fait que la courbe initiale présente une assez forte variabilité de débit sur des périodes très courtes. Les réparations, pourtant nombreuses comparativement à d'autres secteurs, ne sont pas repérables sur cette courbe parmi l'ensemble des pics et creux observés. Le modèle ne parvient donc pas à attribuer correctement les sauts à des réparations plutôt qu'à des événements aléatoires dont il supprime quasiment l'existence. Ceci se traduit sur les paramètres par une valeur de Q_u très faible, voir Tableau 11, donnant ainsi peu de poids aux réparations.

Sur le Secteur 2, les différents sauts dus aux réparations ne sont pas mieux représentés que ne l'étaient ceux de la Figure 14, la croissance du débit entre deux opérations de recherche est également identique. Si cette nouvelle représentation (voir Figure 18) est plus proche de l'observation, c'est que l'origine de la courbe a changé. Alors que pour le modèle de différence relative la courbe modélisée prenait pour point de départ la première valeur de la chronique du débit mesuré avant de calculer les suivantes (voir l'équation (2.2), qui montre que $Q(1)$ est calculé en fonction de $Q(0)$), ce n'est plus le cas ici. Le modèle calcule entièrement la valeur initiale du débit modélisé de sorte que celui-ci s'approche globalement mieux du débit observé. Les courbes issues des deux modèles sont semblables dans leur allure, mais le fait de laisser au modèle d'apparition des fuites la liberté de calculer la valeur du débit pour t_0 assure dans ce cas une meilleure restitution.

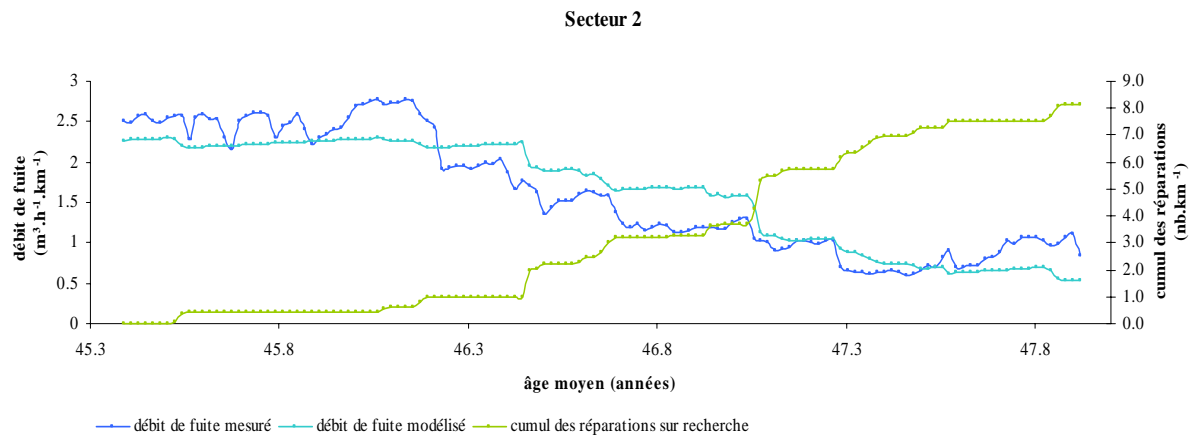


Figure 18. Restitution graphique du modèle d'apparition des fuites pour le Secteur 2.

Il est intéressant de noter pour ce secteur la cohérence du modèle au regard du paramètre tc_0 . En effet, le Secteur 2 se caractérise par un fort débit de fuite initial et de nombreuses campagnes de recherche de fuites s'avérant très efficace au cours de la période considérée. Il est alors logique d'imaginer que sur un tel secteur beaucoup de fuites non repérées sont présentes en début de chronique et restent alors à trouver et réparer. C'est le sens du $c_0 = 0$ fourni par le modèle (voir Tableau 11). La valeur 0 signifie que, pour le modèle, le Secteur 2 n'a jamais fait l'objet de campagnes de recherche avant le début de la fenêtre d'observation et que toutes les fuites y étant apparues ont perduré. Il ne nous a pas été possible de vérifier cette hypothèse mais cette valeur nulle indique probablement la gestion passive qui prévalait sur ce secteur avant la période d'observation.

Le Secteur 9, Figure 19, est également mieux représenté qu'il ne l'était en Figure 15, pour les raisons d'indépendance du débit initial modélisé vis-à-vis des mesures, comme évoqué pour le Secteur 2.

La valeur de Q_u , conséquente, assure que l'influence des réparations est bien prise en compte par le modèle, ce qui se vérifie par la qualité de la représentation des sauts de débit. La valeur de c_0 , parmi les plus faibles, montre quant à elle l'étendue du travail en matière de recherche de fuites qu'il restait à effectuer en début de chronique, comme pour le Secteur 2.

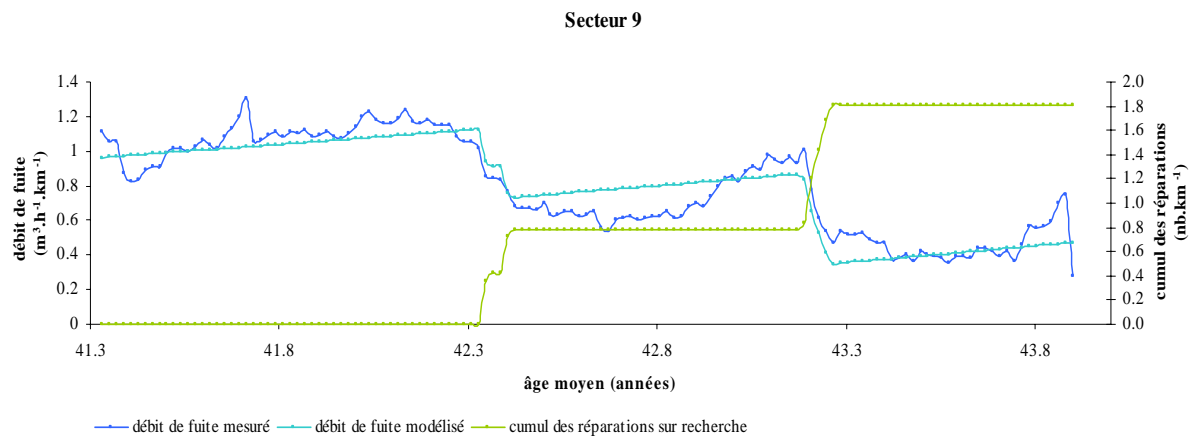


Figure 19. Restitution graphique du modèle d'apparition des fuites pour le Secteur 9.

Nous touchons ici un point essentiel de l'étude puisque nous ne savons pas dire pour le moment si le travail de recherche effectué a atteint son maximum d'efficacité ou bien s'il reste encore des fuites non repérées à réparer.

L'état initial en matière de fuites est connu, l'état final également. L'état initial peut être qualifié au regard de l'état final, ici nous le qualifierions de relativement mauvais, mais rien ne permet de qualifier l'état final. Reste-t-il des possibilités de réduire les fuites et les pertes engendrées ? Le modèle trois états aura, entre autres, pour but de répondre à cette question.

3.3.2. Etude de la valeur des paramètres du modèle d'apparition

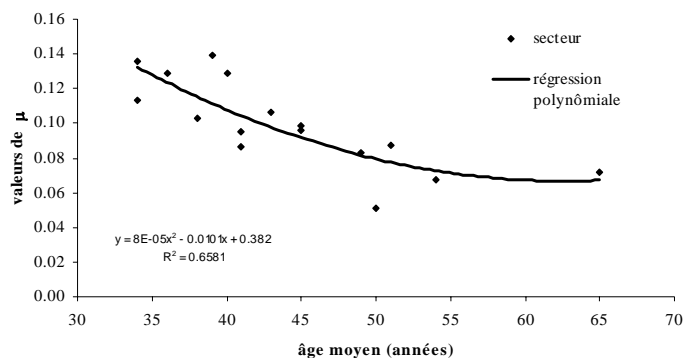
L'étude globale des paramètres, au nombre de trois, nous renseigne sur le comportement général des secteurs, comportement interprété dans le cadre de ce modèle. Le Tableau 11 récapitule les valeurs de ces paramètres pour l'ensemble des 16 secteurs où ils ont pu être calculés.

Tableau 11. Valeurs des paramètres pour le modèle basé sur une théorie d'apparition des fuites.

Sect.	μ (an ⁻¹)	Q_u (m ³ .km ⁻¹)	c_0	$R_1(t)$ (nb.km ⁻¹)
1	0.14	0.08	0.97	1.4
2	0.10	0.29	0	8.2
3	0.08	1.14	0.83	0.9
4	0.07	2.98	0.95	0.4
5	0.13	0.64	0.79	3.1
6	0.09	0.32	0	3.8
7	0.14	0.27	0.78	0.7
8		NON CONVERGENCE		
9	0.10	0.52	0.39	1.7
10	0.09	0.44	0	1.4
11	0.10	0.70	0.27	1.3
12	0.11	0.69	0.79	0.7
13	0.13	0.05	0.75	1.3
14	0.11	0.45	0.86	0.8
15		NON CONVERGENCE		
16	0.10	0.26	0.69	0.9
17	0.07	1.47	0.90	1.4
18	0.05	1.25	0	1.0
	0.095	0.76	0.55	
	<i>moyenne</i>	<i>moyenne</i>	<i>moyenne</i>	

3.3.2.1. Taux d'apparition des fuites

Le paramètre μ , caractéristique du taux d'apparition des fuites, a une variabilité réduite par rapport au paramètre β_0 , que l'on peut assimiler à son équivalent dans le modèle de différence relative. Ses valeurs, comprises entre 0,05 et 0,14, ont une moyenne de 0,095. Nous avons supposé que l'âge moyen du secteur devait pouvoir expliquer ce paramètre : un secteur ancien présenterait *a priori* un paramètre caractéristique du taux d'apparition des fuites plus élevé qu'un secteur récent. En fait, la Figure 20 montre une relation inverse.

**Figure 20.** Valeurs de μ en fonction de l'âge moyen du secteur pour le modèle d'apparition des fuites.

Plus le réseau est vieux, et moins les fuites ont tendance à apparaître. Ce résultat surprenant, au-delà du faible nombre de secteurs sur lequel il s'appuie, est également biaisé par la formulation du modèle. Une explication plus détaillée de cette observation est fournie dans l'analyse des résultats du modèle trois états, qui conduit à la même constatation 4.5.3.2. Disons simplement à ce stade, que le nombre de fuites est déterminé par une loi exponentielle (voir l'équation (3.5)), et que si μ augmente quand t_0 augmente, alors les calculs pourraient ne pas aboutir compte tenu de l'importance du produit $\mu . t$. C'est pourquoi nous constatons une diminution de μ qui assure la convergence du modèle. Une loi d'apparition de type NHPP comme formulée dans l'équation (3.6) aurait peut-être permis de mieux prendre en compte l'influence physique du temps sur l'apparition des fuites mais elle nécessitait le calcul d'un paramètre supplémentaire.

Nous comprenons donc que μ et t_0 ne peuvent être physiquement liés l'un à l'autre dans le cadre de ce modèle.

3.3.2.2. Taux résiduel de fuite

Le paramètre c_0 renseigne sur l'état du secteur au début de la chronique de mesures. Il indique le pourcentage de fuites ayant été réparées ou s'étant transformées en casses manifestes, depuis la date moyenne de pose du réseau. Toutefois, il faut garder à l'esprit que l'interprétation du phénomène doit porter prioritairement sur le débit récupéré.

L'observation du Tableau 11 permet de distinguer deux types de valeurs :

- les valeurs nulles, pour quatre secteurs, avec une signification forte ;
- les valeurs non nulles, pour 12 secteurs, avec une moyenne relativement prononcée vers 1.

➤ Les valeurs nulles :

Pour quatre secteurs le paramètre c_0 est nul, ce qui revient à dire que pour quatre secteurs il n'y a eu aucune réparation sur recherche de fuites ni même de transformation des fuites en casses manifestes. Ces secteurs n'étant pas particulièrement jeunes (respectivement 45, 51, 41 et 52 ans pour les Secteurs, 2, 6, 10 et 18, pour une moyenne de 44 ans sur l'ensemble des secteurs), leurs âges n'expliquent pas les valeurs calculées. Pour les Secteurs 2 et 6, le nombre de réparations sur recherche par kilomètre, donné dans la dernière colonne du tableau, est très

élevé pendant la période de l'étude, ce qui indique bien le potentiel existant en début de chronique et donc le manque d'action sur la période qui précède. Le débit de fuite de ces deux secteurs diminue fortement au cours des 2,5 années d'étude. Les Secteurs 10 et 18 ne connaissent par contre pas un nombre de réparations très élevé, mais la valeur nulle du paramètre montre que la situation initiale n'était pas bonne. Deux hypothèses sont possibles pour expliquer le nombre de réparations moyen :

- il reste encore une part importante du débit de fuite à récupérer par de la recherche ;
- ces secteurs ne présentaient pas un nombre important de fuites à réparer.

Le choix entre ces deux hypothèses ne pourra se faire qu'après séparation des types de fuites, fuites diffuses et fuites non repérées, et reste impossible actuellement.

➤ Les valeurs non nulles :

Sur les 12 secteurs restants, la valeur moyenne de c_0 est égale à 0,75. Le sens d'une telle valeur dans le cadre de ce modèle est qu'à l'ouverture de la chronique les trois quarts des fuites apparues avaient déjà été réparées ou s'étaient transformées en casses, et que seules 25 % d'entre elles restaient à récupérer.

Certaines valeurs dépassent même 0,90 et le modèle présente ici l'une de ses limites. Sur le Secteur 17 par exemple, 90 % du débit de fuite apparu depuis la pose du réseau a été récupéré. Comment a-t-il été récupéré ? Opérations de recherche de fuites, renouvellement, transformation en casses manifestes immédiatement réparées ? Mais surtout, comment récupérer les 10 % restants ? Sur le Secteur 11 où seulement 27 % de ce débit de fuite a été recouvré, il semble justifié d'espérer faire encore diminuer ce débit par des opérations de recherche de fuites. Mais sur le Secteur 17, les 10 % restants ne correspondent-ils pas tout simplement à la part des fuites diffuses, pour laquelle la recherche de fuites s'avérerait inopérante ? Rien pour le moment ne permet de répondre à ces interrogations.

3.3.2.3. Débit de fuite unitaire moyen

Sur l'ensemble des secteurs où les calculs ont été menés à leur terme, la valeur du débit unitaire moyen Q_u varie sur une plage importante, de $0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à $2,98 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Sa valeur moyenne est de $0,76 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Une fuite non repérée présente sur un branchement n'a certainement pas la même valeur qu'une fuite sur un corps de conduite. Lambert *et al.* (1999) proposent un rapport de 1 à 4

entre les débits des fuites sur branchement et des fuites sur conduite. Une telle variation pourrait expliquer les écarts observés sur la valeur de Q_u modélisée, puisque, selon les secteurs, la prépondérance de l'un ou l'autre des deux types de fuites influencerait sur le débit unitaire calculé. Cependant, il est difficile d'établir un lien entre la valeur de Q_u et la densité de branchements par exemple. La droite de régression (Figure 21) présente un coefficient de détermination R^2 très faible. Toutefois, nous pouvons noter que, si lien il y a, la valeur du débit unitaire Q_u semble diminuer effectivement avec la densité de branchements.

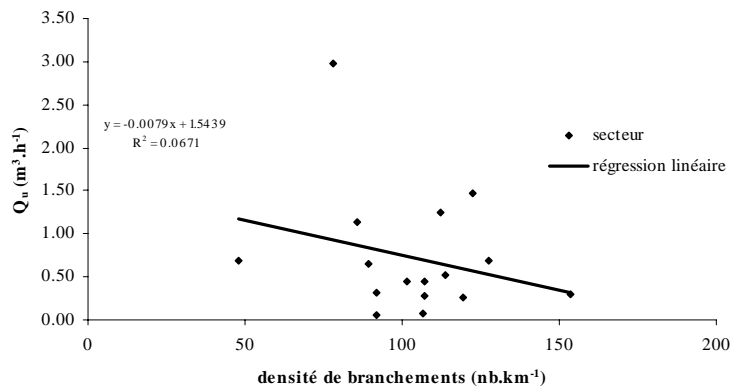


Figure 21. Valeurs de Q_u en fonction de la densité de branchements pour le modèle d'apparition des fuites.

3.4. Extensions du modèle d'apparition des fuites

Deux variantes du modèle de base sont présentées, la première tient compte de la localisation des réparations, la seconde intègre les fuites diffuses telles que les a formulées Lambert.

3.4.1. Distinction des réparations sur conduite ou sur branchement

La distinction entre les réparations sur conduite ou sur branchement peut être utile à l'interprétation des paramètres du modèle. C'est notamment le cas pour l'explication des débits de fuite unitaires. Or, il s'agit d'une donnée dont nous disposons. Nous avons bâti un nouveau modèle incluant la distinction branchement/conduite. Nous avons tout d'abord repris l'équation (3.7) appliquée aux deux éléments du réseau, ce qui conduit à doubler le nombre des paramètres à calculer.

$$Q(t) = Q_{u_c} \left[\frac{e^{\mu_c t} - 1}{L} - c_{0c} \frac{e^{\mu_c t_0} - 1}{L} - R_{1_c}(t) \right] + Q_{u_b} \left[\frac{e^{\mu_b t} - 1}{L} - c_{0b} \frac{e^{\mu_b t_0} - 1}{L} - R_{1_b}(t) \right] \quad (3.8)$$

Les deux membres de cette équation caractérisent respectivement les canalisations (grandeurs et paramètres avec l'indice c) et les branchements (indice b). La multiplication par deux du nombre des paramètres a eu pour effet de rendre impossible le calage du modèle.

La convergence a été rétablie sur une grande partie des secteurs en ne considérant plus qu'un seul paramètre μ pour les deux types de fuite et un seul paramètre c_0 .

Dans ce cas, l'hypothèse est faite que les fuites apparaissent selon une même loi sur les différents organes du réseau mais aussi qu'elles sont réparées ou se transforment dans des proportions égales. Ce dernier point, pour la partie réparation, se justifie en invoquant le fait que lors d'une opération de recherche de fuites on ne cible pas précisément les branchements ou les conduites. Elles sont donc repérées dans des proportions identiques à leur présence effective, d'où l'unicité de c_0 .

L'équation du modèle devient alors :

$$Q(t) = Q_{u_c} \left[\frac{e^{\mu t} - 1}{L} - c_0 \frac{e^{\mu_0} - 1}{L} - R_{l_c}(t) \right] + Q_{u_b} \left[\frac{e^{\mu t} - 1}{L} - c_0 \frac{e^{\mu_0} - 1}{L} - R_{l_b}(t) \right] \quad (3.9)$$

Malgré le calage possible, ce modèle ne donne pas satisfaction. En effet les valeurs des paramètres sont totalement aberrantes d'un point de vue physique, le modèle ne parvenant pas à répartir convenablement le débit de fuite sur ses deux origines possibles, conduites ou branchements.

3.4.2. Ajout des fuites diffuses selon la formulation de Lambert

L'accès aux fuites diffuses n'est pas le but de ce modèle simple. Une première approche présentée ici consiste simplement à inclure les fuites diffuses, sous la forme proposée par Lambert, dans le corps du modèle.

La loi d'apparition des fuites utilisée jusqu'alors est maintenue mais ne s'applique plus qu'aux fuites non repérées, les fuites diffuses étant prises en compte par le nouveau terme.

Les indices $_L$ sur les paramètres indiquent que l'on se trouve dans une nouvelle formulation et l'équation du modèle devient :

$$Q(t) = Q_{u_L} \left[\frac{e^{\mu_L t} - 1}{L} - c_{0L} \frac{e^{\mu_L t_0} - 1}{L} - R_1(t) \right] + P \frac{9.6L + 0.6N_b}{24000L} \quad (3.10)$$

La première partie de l'équation est identique au modèle de base défini par l'équation (3.7). La seconde exprime les fuites diffuses en fonction de la pression P en mCE, de la longueur de conduites L en km et du nombre de branchements N_b , en reprenant les coefficients proposés par Lambert.

L'avantage de cette formulation réside dans le fait que le premier terme ne représente plus que les fuites non repérées. La distinction recherchée est ainsi opérée sans pour autant lever les critiques formulées au chapitre 1 (paragraphe 4.2.2) à l'égard de la méthodologie Lambert.

Dans l'expression de $Q(t)$, les fuites diffuses sont une quantité non nulle. Nous observons logiquement un affaiblissement de la valeur du membre de l'équation lié aux fuites non repérées.

Plusieurs causes peuvent expliquer la diminution de cette valeur, notamment la réduction du débit unitaire moyen Q_{u_L} ou l'augmentation du taux initial de réparations c_{0L} .

Le Tableau 12 présente les valeurs des paramètres pour ce nouveau modèle.

Tableau 12. Valeurs des paramètres pour le modèle d'apparition des fuites avec rajout des fuites diffuses selon Lambert.

Sect.	μ_L (an ⁻¹)	Q_{uL} (m ³ .h ⁻¹)	c_{0L}	$R_1(t)$ (nb.km ⁻¹)
1		NON CONVERGENCE		
2		NON CONVERGENCE		
3		NON CONVERGENCE		
4		NON CONVERGENCE		
5	0.13	0.64	0.81	3.1
6	0.09	0.31	0	3.8
7	0.14	0.27	0.84	0.7
8		NON CONVERGENCE		
9	0.10	0.52	0.46	1.7
10	0.08	0.42	0	1.4
11	0.10	0.70	0.34	1.3
12	0.11	0.69	0.83	0.7
13	0.13	0.05	0.96	1.3
14	0.11	0.45	0.92	0.8
15		NON CONVERGENCE		
16	0.10	0.26	0.81	0.9
17	0.07	1.47	0.92	1.4
18	0.05	1.22	0	1.0
	0.100	0.58	+0.08	
	<i>moyenne</i>	<i>moyenne</i>	<i>gain moyen sur les 9 secteurs communs</i>	

Nous remarquons tout d'abord que la procédure de calage ne peut être menée à bien que sur 12 secteurs seulement, le modèle étant plus complexe. La valeur moyenne de μ reste presque inchangée (cf. Tableau 11) et un calcul de moyenne sur Q_{u_L} , comparé au calcul sur les mêmes secteurs pour Q_u , montre que ces deux grandeurs sont elles aussi semblables, atteignant 0,58 m³.h⁻¹.

Les modifications s'observent donc au niveau de c_0 . Sur les neuf secteurs pour lesquels sa valeur n'est pas nulle, il passe en moyenne de 0,75 à 0,83. Le traitement séparé des fuites diffuses implique que le taux de fuites réparées à l'ouverture de la chronique est supérieur à ce que donnait le modèle de base (équation (3.7)). Le complément de ce taux à 1 représente l'effort à réaliser en matière de recherche pour éliminer encore des fuites non repérées. Les fuites diffuses, sur lesquelles les opérations de recherche de fuites ne peuvent agir, étant traitées séparément, les efforts de recherche à consentir dans ce nouveau cadre sont donc logiquement moindres.

Ce modèle est certainement plus proche de la réalité que le précédent et permet en tout cas de progresser dans l'optique d'une gestion patrimoniale raisonnée. Cependant, alors que la quantité des fuites non repérées augmente dans le temps, la part des fuites diffuses telle que formulée par Lambert reste constante.

Du point de vue graphique, les courbes issues du modèle original et de cette variante se superposent presque parfaitement en tous points. Nous ne les présentons donc pas.

Les valeurs de débit modélisé identiques s'expliquent simplement. Les fuites diffuses sont tout au long de la chronique représentées par une constante. La seule variation significative dans la valeur des paramètres engendrée par le changement de modèle concerne le taux résiduel de fuites c_0 . Les deux autres paramètres étant inchangés, il en résulte simplement une valeur constante soustraite au débit précédent. Cette valeur vient donc compenser l'apparition de la constante due aux fuites diffuses et ainsi rééquilibrer le débit. Dès lors, il faut nuancer l'explication précédente sur le gain en matière de recherche de fuites. Nous voyons bien que, si seul le paramètre c_0 est modifié, c'est en premier lieu parce que cela représente le moyen le plus simple pour le modèle de prendre en compte l'ajout d'une constante.

3.5. Conclusion et limites du modèle d'apparition des fuites

Ce modèle devait permettre de tester l'hypothèse d'apparition des fuites selon un processus de Yule. Cet objectif semble validé, même si l'interprétation du paramètre validé μ pose problème, et ses résultats immédiats méritent d'être soulignés.

La restitution graphique des chroniques de débit de fuite issue de ce modèle est tout à fait satisfaisante, que ce soit au niveau de la croissance régulière et naturelle des pertes que de l'influence des réparations sur opérations de recherche de fuites.

Nous tirons également de ce modèle des indications concernant le débit unitaire moyen d'une fuite, son taux d'apparition, ou bien encore sur l'état du secteur en début de chronique. Les variantes proposées n'apportent pas réellement de progrès en matière d'interprétation des paramètres et d'appréciation du fonctionnement du secteur.

Il est également pour l'instant impossible d'établir un lien entre valeurs des paramètres calculés et données patrimoniales caractéristiques du secteur. Le nombre relativement faible de secteurs étudiés pourrait éventuellement expliquer cette absence de lien.

L'intérêt majeur de ce modèle réside cependant dans le fait qu'il nous aura servi à mettre en place certaines bases et à étudier la faisabilité de certaines formulations.

A la faveur d'une construction relativement simple qui assure une bonne convergence des procédures de calage sur l'ensemble des secteurs sélectionnés, nous avons mis en place une modélisation du débit de fuite bâtie autour de l'apparition des fuites au cours du temps. Le processus de Yule, dont nous extrapolons l'utilisation admise pour la prévision des casses manifestes à celles des fuites, nous donne accès à leur taux d'apparition μ . Dans le cadre de ce modèle précis, le processus de Yule donne naissance à des fuites dont nous ne précisons pas la nature.

La disparition de ces fuites n'est par contre pas prise en compte dans cette théorie. Nous avons donc élaboré un procédé qui permet de considérer un taux de fuite résiduel à l'ouverture de la chronique. Ce taux atteint en moyenne 25 % sur les secteurs où il n'est pas nul.

Les fuites qui participent au débit que nous souhaitons modéliser sont les fuites diffuses et les fuites non repérées. Il est difficile d'imaginer que 75 % d'entre elles aient été supprimées suite à l'action d'un gestionnaire dans un passé proche où la recherche active et le renouvellement n'étaient pas de mise.

Nous l'avons évoqué dans le cadre du modèle de différence relative, certaines de ces fuites présentes à un moment donné de la vie du réseau mais plus en début de chronique, se sont certainement transformées en casses manifestes. Elles ont alors dans ce cas disparu naturellement, ce qui pour la suite laisse entrevoir une nouvelle voie dans la façon de traiter l'élimination des fuites : considérer un taux d'apparition des fuites et leur évolution dans le temps.

Les apports de ce modèle d'apparition des fuites dans l'élaboration d'un modèle qui remplisse les objectifs fixés sont donc de deux ordres.

Tout d'abord, le processus d'apparition mis en place peut s'appliquer sans difficulté aux uniques fuites diffuses. Il suffit de considérer que μ est leur taux d'apparition. La principale limite de ce modèle, consistant à ne pas formuler les fuites diffuses, serait alors contournée. Mais ceci n'est pas suffisant. Nous connaîtrions la part du débit lié aux fuites diffuses, sans cesse croissante, mais elle ne reconstitue pas à elle seule la globalité du débit de fuite.

Ensuite, plutôt que de faire naître parallèlement des fuites non repérées, selon un procédé identique mais avec des paramètres différents, nous avons vu l'éventualité d'une transformation de ces fuites, et c'est le second apport de ce modèle préalable.

Ainsi, l'apparition des fuites diffuses, qui semble *a priori* pouvoir se faire selon le procédé déjà étudié, et l'éventualité d'une transformation de ces fuites dans le temps soulevée par ce modèle et le précédent, avec des modalités à définir, seront au cœur de la structure du modèle trois états. La construction de ce modèle ainsi que ses premiers résultats sont présentés dans le paragraphe suivant.

4. MODELISATION DYNAMIQUE DES DIFFERENTES CATEGORIES DE FUTES : LE MODELE TROIS ETATS

Deux hypothèses sous-tendent la construction du modèle trois états. La première concerne l'apparition des fuites diffuses. La description du processus de Yule, appliqué avec succès à l'apparition des fuites diffuses et non repérées, a été faite au paragraphe précédent. Nous utiliserons ici une formulation identique, mais avec pour seul objet les fuites diffuses, ainsi qu'une partie des résultats obtenus.

Nous nous concentrons donc uniquement dans un premier temps sur la seconde hypothèse, celle de transformation des fuites. Après l'avoir justifiée et décrite, nous présentons une schématisation du fonctionnement du modèle trois états, sa mise en équations, les procédures de résolution utilisées et enfin les résultats directement accessibles.

4.1. Processus de transformation des fuites

L'idée d'une transformation des fuites n'est pas déconnectée de toute réalité, l'état initial des secteurs assez bon fait que l'on peut supposer d'autres phénomènes que les réparations sur recherche pour l'expliquer. Il n'en demeure pas moins qu'il ne s'agit que d'une hypothèse que nous devons tenter de justifier, mettre en forme et valider.

L'hypothèse développée sur l'apparition des fuites diffuses s'inscrit elle dans un cadre théorique existant. Notre seconde hypothèse s'appuie sur la première, puisqu'elle traite du devenir des fuites diffuses apparues. Il nous semble important de nous maintenir le plus possible dans ce cadre initial pour donner un maximum de cohésion à notre modèle.

La mortalité des individus est nulle dans le processus de Yule. Un nombre de fuites diffuses croissant indéfiniment avec le temps ne permet pas à lui seul d'exprimer et d'expliquer le débit de fuite global du secteur. Il n'en modélise potentiellement qu'une partie.

Une loi d'apparition du même type, mais avec un taux d'apparition différent, appliquée aux fuites non repérées nous confronterait à un problème insoluble. Si les nombres d'événements dans chaque catégorie sont trop importants, ne mourant jamais de « mort naturelle », alors le débit unitaire leur étant associé sera nécessairement très faible, ce qui contredira la réalité. On peut alors supposer des valeurs de taux d'apparition faibles pour rester dans des domaines raisonnables et conserver des débits dotés de sens physique, mais ces valeurs faibles n'auraient à leur tour plus de signification.

Prenons l'exemple des fuites non repérées. Supposons qu'elles se dénombrent elles aussi selon le processus de Yule précédemment décrit. Quel que soit leur taux d'apparition, elles sont caractérisées par un débit unitaire moyen mesuré sur le terrain, qui ne peut varier dans une gamme de valeurs trop large. Si leur taux d'apparition est élevé, alors le nombre de ces fuites sera important. Perdurant dans le temps indéfiniment, le débit de fuite global augmente continuellement dans des proportions importantes. Or nous n'observons pas un tel phénomène. Evidemment, les réparations sur recherche de fuites viennent réduire et compenser l'effet de l'apparition des nouvelles fuites non repérées. Mais ces réparations ne sont pas systématiquement nombreuses et certains secteurs de l'étude (Secteur 8 notamment) n'en présentent que très peu dans la fenêtre d'observation. Le taux d'apparition ne peut donc être élevé. Nous supposons maintenant que ces fuites non repérées sont caractérisées par un faible taux d'apparition. Il devient alors normal d'avoir finalement assez peu de réparations. Les chroniques de débit montrent pourtant un accroissement visible assez soutenu du débit de fuite sur tous les secteurs entre deux opérations de recherche. Cette hausse ne peut pas à elle seule être imputée à l'augmentation des fuites diffuses. Celles-ci ne sont éliminées que par des opérations de renouvellement, la rareté de ces dernières ne peut en aucun cas expliquer que le débit se maintienne dans des valeurs raisonnables.

Il semble donc délicat de trouver des valeurs de taux d'apparition qui ne fassent pas basculer le processus dans l'un ou l'autre des scénarios extrêmes qui viennent d'être présentés. Les valeurs moyennes entraîneraient très certainement elles aussi le secteur dans un de ces comportements. Le système représenté par un tel modèle présenterait une forte instabilité en raison de la durée de vie infinie des défaillances. Ce problème ne se pose pas pour les casses manifestes puisque qu'elles sont réparées immédiatement et qu'elles n'influencent donc pas le débit de fuite sur lequel nous travaillons.

Notre objectif est toujours de distinguer au sein du débit de fuite les fuites diffuses et les fuites non repérées. Nous ne pouvons pas les traiter parallèlement en leur appliquant la même méthode. Le processus de Yule est choisi pour traiter les fuites diffuses, or les fuites qui apparaissent selon ce processus ne disparaissent pas. Cependant, rien ne nous empêche d'imaginer qu'elles se transforment dans le temps.

Nous pouvons ainsi supposer que les fuites diffuses se transforment en fuites non repérées selon une loi à déterminer. Celles-ci à leur tour se transforment en casses manifestes. Cette solution permet d'envisager une source unique d'apparition de fuites. Celles-ci ne sont pas

supprimées dans le temps mais évoluent simplement à travers différents états (fuites diffuses, fuites non repérées, casses manifestes) s’inscrivant ainsi dans le cadre théorique fixé. De plus, les risques de sur-représentation et de divergence du débit sont amoindris par le fait que ces fuites passent au travers des états dans des proportions à définir mais ne s’y accumulent pas de façon permanente. Un équilibre entre les différentes formes peut ainsi être trouvé.

4.2. Schématisation des processus d’apparition et de transformation des fuites

La Figure 22 résume les deux hypothèses formulées pour la construction du modèle trois états et montre bien comment la seconde, relative à la transformation des fuites, s’appuie sur la première qui caractérise l’apparition des fuites diffuses.

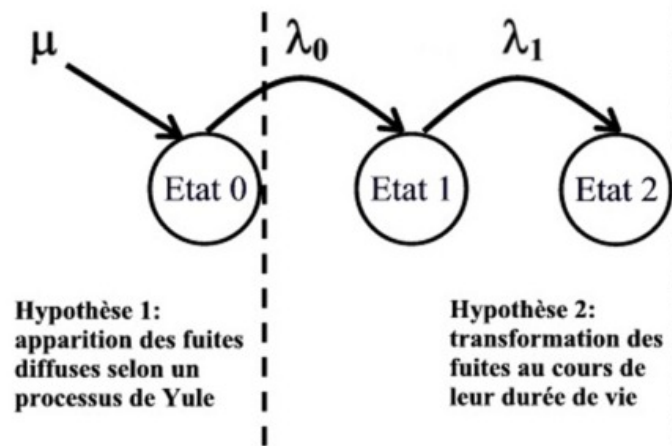


Figure 22. Processus d’apparition et de transformation des fuites.

Les trois états évoqués sur cette figure et par la suite sont les suivants :

- l’Etat 0 correspond aux fuites diffuses ;
- l’Etat 1 est celui des fuites non repérées ;
- l’Etat 2 regroupe les casses manifestes nécessitant une réparation immédiate.

Le taux d’apparition des fuites diffuses, paramètre caractéristique du processus de Yule, est donné par μ et est à déterminer.

$1/\lambda_{0,1}$ sont les durées de vie moyenne des fuites respectivement dans les Etats 0 et 1 tandis que $\lambda_{0,1}$ caractérisent l'intensité du passage des fuites d'un état à l'autre, nous y reviendrons par la suite. Ces durées de vie, à déterminer, sont supposées être des variables aléatoires distribuées exponentiellement.

Le modèle trois états, dont le nom prend ici son sens, peut maintenant être formalisé. Le paragraphe suivant traite en détail de sa mise en équations et revient sur la distribution des durées de vie des fuites.

4.3. Mise en équations

A partir du schéma présenté en Figure 22, il s'agit de calculer le nombre de fuites présentes dans chaque état au cours d'une semaine donnée. Ainsi, le modèle trois états permettra de décomposer le débit de fuite en une part liée aux fuites diffuses et une autre caractéristique des fuites non repérées, une fois les débits unitaires moyens déterminés pour chacune de ces deux catégories.

4.3.1. Ecriture du système différentiel

4.3.1.1. Distribution des durées de vie et conséquences

Nous faisons l'hypothèse que les distributions des durées de vie des fuites dans les Etats 0 ou 1 suivent des lois exponentielles de paramètres $\lambda_{0,1}$ dont les densités de probabilité sont :

$$f_{0,1}(t) = \lambda_{0,1} e^{-\lambda_{0,1} t} \tag{3.11}$$

La Figure 23 en donne la représentation graphique pour une valeur de $\lambda = 0,1 \text{ an}^{-1}$, figure sur laquelle on peut aussi observer la valeur de l'espérance (la durée de vie moyenne), égale à $1/\lambda = 10$ ans, et celle de la médiane. La médiane, c'est-à-dire le temps t tel que $P(X > t) = 0,5$, où X est la variable aléatoire des durées de vie, vaut dans ce cas $\ln(2)/\lambda = 6,9$.

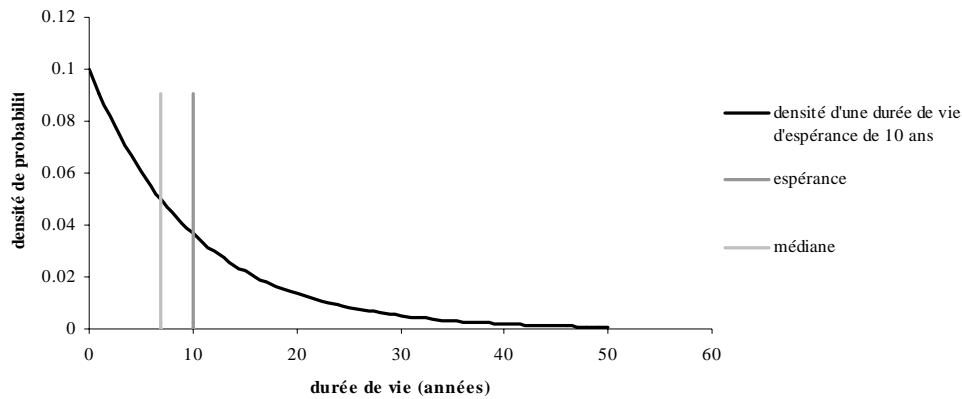


Figure 23. Représentation de la densité de probabilité d'une distribution exponentielle de paramètre $\lambda=0,1 \text{ an}^{-1}$.

La fonction de répartition des durées de vie qui s'y rapporte s'obtient très facilement :

$$F_{0,1}(t) = \int_0^t f(u)du = 1 - e^{-\lambda_{0,1}t} \tag{3.12}$$

Elle est représentée Figure 24 avec une valeur d'espérance identique.

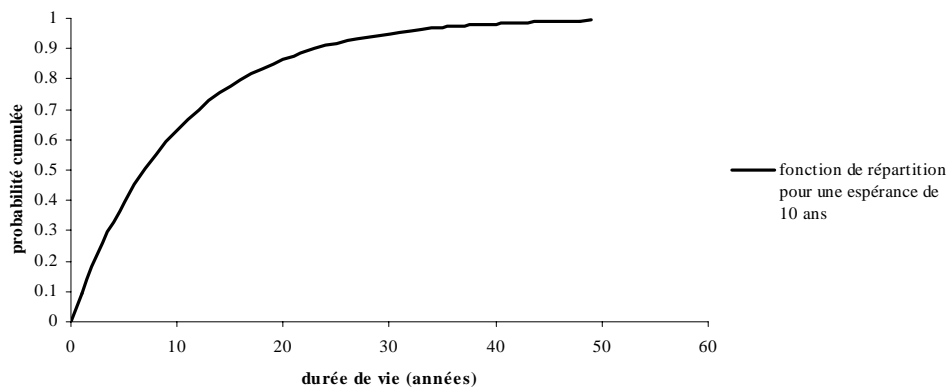


Figure 24. Représentation graphique de la fonction de répartition d'une distribution exponentielle de paramètre $\lambda=0,1 \text{ an}^{-1}$.

Il est communément admis que des casses manifestes peuvent apparaître soudainement et instantanément, si les conduites sont soumises à des conditions particulières comme une surcharge de poids importante ou un épisode météorologique extrême. Ces casses ne passent donc pas en réalité par différents états. Le modèle pourtant est tel qu'une fuite ne peut pas apparaître directement dans l'Etat 2.

La distribution des durées de vie autorise cependant à considérer ces casses franches, celles qui surviennent brusquement, dans leur vraie nature. En effet, une certaine proportion des fuites diffuses a une durée de vie extrêmement courte et passe quasi instantanément dans la catégorie des fuites non repérées. De même au sein de cet ensemble, la transformation peut aussi se réaliser rapidement vers la catégorie des casses manifestes. Ainsi, même si la fuite doit obligatoirement, dans le cadre de ce modèle, passer par les Etats 0 et 1 avant de devenir casse manifeste, ceci peut se faire de manière instantanée dans des proportions définies par λ_0 et λ_1 . Dans ce cas, une casse manifeste soudaine est bien représentée et modélisée.

Afin d'établir le système d'équations qui décrit le taux de passage d'un état à un autre, nous étudions dans un premier temps la fonction de risque instantané liée à la distribution exponentielle. Ce risque caractérise la proportion des fuites passant d'un état à un autre. Cette fonction peut se définir comme suit :

$$h_{0,1}(t) = \frac{f_{0,1}(t)}{S_{0,1}(t)} = -\frac{S_{0,1}'(t)}{S_{0,1}(t)} \quad (3.13)$$

où $h_{0,1}(t)$ est la fonction de risque instantané, $S_{0,1}(t)$ la fonction de survie simplement définie par $S_{0,1}(t) = 1 - F_{0,1}(t)$ et $S_{0,1}(t)'$ la dérivée de $S_{0,1}(t)$.

Dans le cas d'une distribution exponentielle, nous obtenons :

$$h_{0,1}(t) = -\frac{-\lambda_{0,1}e^{-\lambda_{0,1}t}}{e^{-\lambda_{0,1}t}} = \lambda_{0,1} \quad (3.14)$$

Le risque instantané est donc constant dans le temps, suite au choix initial de considérer une distribution exponentielle des durées de vie des fuites dans les Etats 0 ou 1. Autrement dit, la proportion des fuites passant à chaque instant d'un état à un autre reste constante dans le temps.

4.3.1.2. Bilan du nombre de fuites dans chaque état

A partir de ce qui précède, nous pouvons écrire pour chaque état, entre t et $t + dt$, la balance des fuites ou des casses qui rejoignent cet état ou qui le quittent.

➤ Etat 0 :

Le nombre de fuites diffuses $dN_{0e}(t)$ qui apparaissent dans l'Etat 0 entre t et $t + dt$, en accord avec le processus de Yule de paramètre μ choisi, est :

$$dN_{0e}(t) = \mu e^{\mu t} dt \quad (3.15)$$

Si $N_0(t)$ est le nombre de fuites diffuses réellement présentes à t dans l'Etat 0, alors l'application du risque instantané sur ce nombre nous donne celui des fuites diffuses $dN_{0s}(t)$ qui passent de l'Etat 0 à l'Etat 1 entre t et $t + dt$:

$$dN_{0s}(t) = \lambda_0 N_0(t) dt \quad (3.16)$$

Le bilan dans l'Etat 0 pour une période dt , traduisant la variation du nombre de fuites diffuses dans cette période, s'écrit alors :

$$dN_0(t) = \mu e^{\mu t} dt - \lambda_0 N_0(t) dt \quad (3.17)$$

➤ Etat 1 :

Le nombre de fuites non repérées $dN_{1e}(t)$ qui apparaissent dans l'Etat 1 entre t et $t + dt$ est égal au nombre des fuites diffuses qui quittent l'Etat 0 durant cette période :

$$dN_{1e}(t) = dN_{0s}(t) = \lambda_0 N_0(t) dt \quad (3.18)$$

Si $N_1(t)$ est le nombre de fuites non repérées réellement présentes à t dans l'Etat 1, alors le nombre de ces fuites $dN_{1s}(t)$ qui passent de l'Etat 1 à l'Etat 2 entre t et $t + dt$, selon le procédé proposé, est :

$$dN_{1s}(t) = \lambda_1 N_1(t) dt \quad (3.19)$$

A ce passage naturel de l'Etat 1 à l'Etat 2 s'ajoutent les réparations sur opérations de recherche de fuites $r_1(t)$, qui elles aussi contribuent à faire diminuer le nombre de fuites non repérées participant effectivement au débit de fuite.

Le bilan dans l'Etat 1 pour une période dt , traduisant la variation du nombre de fuites non repérées dans cette période, s'écrit alors:

$$dN_1(t) = \lambda_0 N_0(t) dt - \lambda_1 N_1(t) dt - r_1(t) dt \quad (3.20)$$

➤ **Etat 2 :**

Le nombre de casses manifestes $dN_{2e}(t)$ qui apparaissent dans l'Etat 2 entre t et $t + dt$ est égal au nombre des fuites non repérées qui quittent l'Etat 1 durant cette période :

$$dN_{2e}(t) = dN_{1s}(t) = \lambda_1 N_1(t) dt \quad (3.21)$$

Nous supposons toujours que la réactivité du gestionnaire est suffisamment bonne pour considérer que ces casses sont réparées pendant le même temps dt au cours duquel elles se produisent. Les nombres de casses nouvelles et réparées pendant cet intervalle sont donc égaux. Nous pouvons ainsi écrire, sur le pas de temps d'observation d'une semaine, que la variation de casses manifestes est égale au nombre de réparations suite à des détections visuelles :

$$dN_2(t) = \lambda_1 N_1(t) dt = r_2(t) dt \quad (3.22)$$

où $r_2(t)$ est le nombre de réparations sur détection visuelle au temps t comme défini au chapitre 2.

Il est ainsi proposé de formaliser la dynamique de l'ensemble du processus à travers le système d'équations différentielles ordinaires suivant :

$$\begin{cases} dN_0(t) = \mu e^{\mu t} dt - \lambda_0 N_0(t) dt \\ dN_1(t) = \lambda_0 N_0(t) dt - \lambda_1 N_1(t) dt - r_1(t) dt \\ dN_2(t) = \lambda_1 N_1(t) dt = r_2(t) dt \end{cases} \quad (3.23)$$

Ces équations représentent l'évolution des fuites dans le cadre des hypothèses formulées et du modèle proposé.

L'intégration entre 0 et t de ce système suppose que l'on connaisse $r_1(t)$ durant cette même période, ce qui n'est pas le cas au regard des données disponibles.

C'est la raison pour laquelle nous proposons l'approximation consistant à résoudre le système sans effet des réparations sur opérations de recherche de fuites. Ce système traduit alors l'évolution naturelle des fuites, sans intervention de l'exploitant. Les effets associés à ces actions seront directement pris en compte dans la formulation du débit présentée au paragraphe suivant.

Les équations à résoudre sont ainsi simplifiées :

$$\begin{cases} dN_0(t) = \mu e^{\mu t} dt - \lambda_0 N_0(t) dt \\ dN_1(t) = \lambda_0 N_0(t) dt - \lambda_1 N_1(t) dt \\ dN_2(t) = \lambda_1 N_1(t) dt = r_2(t) dt \end{cases} \quad (3.24)$$

Il nous semble important d'exposer l'hypothèse sous-tendue par cette simplification et de la justifier au mieux.

Considérer l'évolution naturelle des fuites entre 0 et t_0 , c'est supposer qu'aucune opération de recherche de fuites n'a été menée durant cette période. Bien entendu, cette affirmation est discutable mais on peut l'étayer tout d'abord en notant que la pratique des opérations de recherche de fuites est récente et pas généralisée.

Dans le cas cependant où des réparations consécutives à des opérations de recherche de fuites auraient été effectuées avant t_0 , date d'ouverture de la chronique d'observations, l'erreur engendrée porte sur une partie restreinte de la chronique complète, comme le montre la Figure 25.

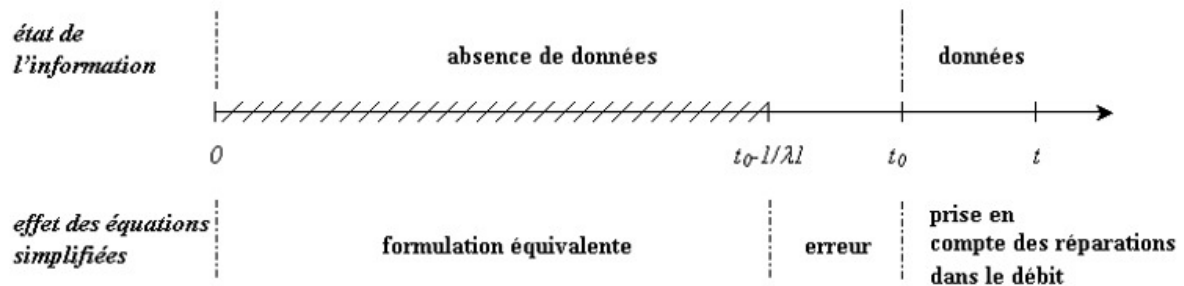


Figure 25. Impact d'éventuelles opérations de recherche de fuites avant t_0 sur le système d'équations simplifiées.

Nous pouvons distinguer trois périodes dans la durée de vie du réseau ou du secteur en fonction des effets associés au système d'équations simplifiées :

- entre 0 et $t_0 - 1/\lambda_1$: par hypothèse, une fuite dans l'Etat 1, c'est-à-dire celui des fuites non repérées, n'a qu'une durée de vie limitée dans cet état. Cette durée de vie moyenne, matérialisée par $1/\lambda_1$ dans le cadre du modèle trois états, est certainement faible devant l'âge moyen des secteurs au moment où nous en modélisons les débits de fuite. Il résulte de cette constatation qu'une fuite non repérée existant à un instant t assez éloigné dans le passé, entre 0 et $t_0 - 1/\lambda_1$, ne perdure plus, en moyenne, au moment présent de l'observation. Que le procédé d'élimination de ce débit de fuite soit lié à une recherche de fuites ou à une transformation naturelle en casse manifeste, immédiatement réparée, il résulte au final un nombre de fuites non repérées identique. Le second système d'équations, qui constitue une approximation de la réalité, se justifie sur cette plage dans le sens où les réparations sur recherche de fuites ne sont qu'une anticipation temporelle de la transformation des fuites non repérées en casses manifestes.

- entre t_0 et t : nous conservons le système simplifié et considérons directement le débit économisé qui se rapporte aux réparations effectuées sur opérations de recherche de fuites.

C'est pourquoi elles n'interviennent que dans la formulation du débit, telle que proposée dans le paragraphe suivant.

- entre $t_0 - 1/\lambda_1$ et t_0 : pour ces fuites repérées dans un laps de temps voisin de la chronique d'observations, que nous ne connaissons pas, nous sommes contraints de confirmer l'hypothèse d'inaction. L'erreur engendrée par le système d'équation approchées se cantonne donc à cette faible partie de la chronique.

4.3.2. Formulation de base du débit de fuite

4.3.2.1. Expression du nombre de fuites dans chaque état et comportement limite

Le nombre de fuites présentes en semaine t dans les Etats 0 et 1, respectivement associés aux fuites diffuses et aux fuites non repérées, et à partir du système (3.24), s'écrit ainsi :

$$\begin{cases} N_0(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda_0} (e^{\mu t} - e^{-\lambda_0 t}) \\ N_1(t) = \frac{\mu \lambda_0}{(\mu + \lambda_0)(\mu + \lambda_1)} (e^{\mu t} - e^{-\lambda_1 t}) - \frac{\mu \lambda_0}{(\mu + \lambda_0)(\lambda_1 - \lambda_0)} (e^{-\lambda_0 t} - e^{-\lambda_1 t}) \end{cases} \quad (3.25)$$

Le calcul de $N_2(t)$ n'a pas de sens, puisque aucune casse manifeste n'est réellement présente en semaine t . Sitôt apparue, elle est traitée et éliminée dans un délai inférieur à la semaine, c'est du moins l'hypothèse que nous avons émise depuis le chapitre 2. On peut considérer que l'Etat 2 est « absorbant ». $N_2(t)$ incrémente le nombre de casses manifestes apparues au total depuis $t = 0$; il suffit de leur affecter un débit nul qui traduit leur réparation instantanée pour qu'elles n'interviennent pas dans le débit global.

Ces équations, relativement lourdes, se simplifient si nous considérons des valeurs de t suffisamment grandes et donc un comportement asymptotique.

Nous obtenons des nouvelles formulations pour les nombres de fuites diffuses et non repérées exprimées comme suit :

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow +\infty} N_0(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda_0} e^{\mu t} \\ \lim_{t \rightarrow +\infty} N_1(t) = \frac{\mu \lambda_0}{(\mu + \lambda_0)(\mu + \lambda_1)} e^{\mu t} \end{cases} \quad (3.26)$$

Ce comportement ne s'observe que si la variable t est suffisamment grande devant $\frac{1}{\lambda_0}$ et $\frac{1}{\lambda_1}$. En effet, les exponentielles négatives de l'équation (3.25) tendent dans ce cas vers 0. Cette hypothèse supplémentaire implique concrètement, et en d'autres termes, que les âges moyens des fuites diffuses et des fuites non repérées, représentés par les paramètres $\frac{1}{\lambda_0}$ et $\frac{1}{\lambda_1}$, sont faibles devant l'âge moyen du réseau, point de départ temporel de notre chronique d'observations. L'âge moyen pour les secteurs étudiés est de plusieurs dizaines d'années. Pour les fuites non repérées, cette assertion ne semble pas poser de problème. Elles ne peuvent perdurer pendant des périodes trop longues et se transforment soit en casses manifestes, soit sont réparées suite à des opérations de recherche. Elle est plus discutable pour les fuites diffuses dont on ne connaît pas l'évolution. Nous pouvons toutefois imaginer qu'elles ont une durée de vie moyenne supérieure à celle des fuites non repérées, se transformant moins rapidement car partant d'un état initial moins dégradé ; il est en effet supposé que plus la défaillance initiale est d'ampleur, plus elle s'aggraverait vite. Rien toutefois ne nous permet de présager de la durée de vie moyenne d'une fuite diffuse. Nous faisons cependant le choix de considérer la prépondérance de l'âge moyen du secteur devant la durée de vie moyenne des fuites et travaillons à partir des équations simplifiées présentées.

4.3.2.2. Couplage du nombre de fuites et du débit unitaire moyen

Nous associons maintenant aux fuites diffuses regroupées sous le terme $N_0(t)$ un débit unitaire moyen q_0 et aux fuites non repérées $N_1(t)$ un débit unitaire moyen q_1 . Ce dernier est également celui que nous attribuons aux fuites repérées par recherche de fuites et réparées.

Ainsi, le débit de fuite à t se compose, dans le cadre du modèle trois états, d'une somme de trois termes :

- le nombre de fuites diffuses présentes multiplié par un débit unitaire moyen à déterminer, qui participe positivement au débit ;

- le nombre de fuites non repérées présentes multiplié par un débit unitaire moyen à déterminer, qui participe positivement au débit ;
- le nombre total de réparations sur opérations de recherche de fuites depuis l'ouverture de la chronique multiplié par le même débit que celui des fuites non repérées présentes, qui participe négativement au débit.

Sur une période $[t_0; t_1]$, le modèle trois états proposé pour expliquer le débit de fuite $Q(t)$ se formule donc ainsi :

$$\begin{aligned} \forall t \in [t_0; t_1], \quad Q(t) &= q_0 N_0(t) + q_1 N_1(t) - q_1 R_1(t) \\ &= q_0 \frac{\mu}{\mu + \lambda_0} e^{\mu t} + q_1 \frac{\mu \lambda_0}{(\mu + \lambda_0)(\mu + \lambda_1)} e^{\mu t} - q_1 R_1(t) \\ &= \left(q_0 \frac{\mu}{\mu + \lambda_0} + q_1 \frac{\mu \lambda_0}{(\mu + \lambda_0)(\mu + \lambda_1)} \right) e^{\mu t} - q_1 R_1(t) \end{aligned} \quad (3.27)$$

où, pour rappel, $R_1(t)$ correspond au cumul des réparations sur recherche de fuites en semaine t depuis l'ouverture de la chronique, les autres grandeurs intervenant dans ce groupe d'équations ont été définies dans ce chapitre.

La mise en œuvre concrète de cette équation et sa résolution sous SAS sont expliquées au paragraphe 4.4.

4.3.3. Formulation du débit de fuite avec distinction sur les organes hydrauliques réparés

La formulation précédente considère un débit unique q_0 pour les fuites diffuses et un débit unique q_1 pour les fuites non repérées, quel que soit le lieu de la réparation, sur canalisation ou sur branchement. Prise en compte par Lambert, cette distinction est importante pour affiner le modèle et ses applications. Il s'agit d'exprimer le débit de fuite sous la forme de deux composantes, correspondant respectivement aux canalisations et aux branchements, tout en conservant la distinction entre fuites diffuses et fuites non repérées. L'équation du modèle de

base est simplement dédoublée, les termes affectés respectivement de l'indice c ou b se rapportent maintenant aux conduites ou aux branchements.

L'équation est la suivante :

$$\begin{aligned}
 \forall t \in [t_0; t_1], \quad Q(t) &= Q_c(t) + Q_b(t) \\
 &= q_{0c}N_{0c}(t) + q_{1c}N_{1c}(t) - q_{1c}R_{1c}(t) + q_{0b}N_{0b}(t) + q_{1b}N_{1b}(t) - q_{1b}R_{1b}(t) \\
 &= \left(q_{0c} \frac{\mu_c}{\mu_c + \lambda_{0c}} + q_{1c} \frac{\mu_c \lambda_{0c}}{(\mu_c + \lambda_{0c})(\mu_c + \lambda_{1c})} \right) e^{\mu_c t} - q_{1c}R_{1c}(t) + \\
 &\quad \left(q_{0b} \frac{\mu_b}{\mu_b + \lambda_{0b}} + q_{1b} \frac{\mu_b \lambda_{0b}}{(\mu_b + \lambda_{0b})(\mu_b + \lambda_{1b})} \right) e^{\mu_b t} - q_{1b}R_{1b}(t)
 \end{aligned} \tag{3.28}$$

Nous n'avons pu explorer cette voie que succinctement car le nombre important des paramètres à déterminer constitue un obstacle majeur au bon fonctionnement de ce modèle. Les résultats pour un secteur de cette variante du modèle trois états sont présentés en toute fin de chapitre, au paragraphe 4.5.3.6.

4.4. Résolution et estimation des paramètres

L'équation de base du modèle trois états, en référence à (3.27), s'écrit aussi :

$$Q(t) = \alpha e^{\mu t} - q_1 R_1(t) \tag{3.29}$$

$$\text{avec : } \alpha = q_0 \frac{\mu}{\mu + \lambda_0} + q_1 \frac{\mu \lambda_0}{(\mu + \lambda_0)(\mu + \lambda_1)} \tag{3.30}$$

Il s'agit, à partir de cette équation et des données dont nous disposons, de déterminer pour chaque secteur de l'étude les paramètres μ , λ_0 et λ_1 ainsi que les grandeurs q_0 et q_1 indispensables à la reconstitution du débit. Le calcul de ces cinq paramètres peut s'appuyer

sur les valeurs de débit de fuite mesurées $Q(t)$ et sur les données de réparation cumulées $R_1(t)$ et $R_2(t)$.

Il s'avère impossible de déterminer directement par le calcul sous SAS ces cinq paramètres. Des problèmes de convergence importants sont à signaler, les procédures utilisées ne permettent en effet pas de distinguer correctement les différents paramètres composant le terme α . Sur certains secteurs le calage du modèle est impossible, sur d'autres les valeurs des paramètres calculées sont inexploitables.

4.4.1. Suppression de degrés de liberté pour les paramètres du modèle

4.4.1.1. Choix de q_0 à fixer hors du modèle

Pour contourner et dépasser l'obstacle évoqué, nous avons choisi de fixer *a priori* la valeur du débit unitaire associé aux fuites diffuses q_0 . Pourquoi ce paramètre plutôt qu'un autre ?

Les durées de vie moyennes des fuites diffuses et non repérées sont des grandeurs sur lesquelles nous ne disposons d'aucune information. Ce modèle novateur doit justement nous permettre de les déterminer, afin de mieux connaître la nature de ces fuites. Il ne semble donc pas judicieux de figer les paramètres λ_0 et λ_1 à des valeurs dont on ne sait si elles sont proches ou non de la réalité. Ce serait se priver d'une possibilité de connaissance issue du modèle.

Le paramètre μ détermine, au travers du processus de Yule, le nombre de fuites de chaque nature sur le secteur. C'est probablement la grandeur principale dans ce modèle. La fixer ne laisserait par la suite que peu de liberté aux autres paramètres qui en découlent nécessairement.

Il ne reste plus alors que les deux débits unitaires moyens q_0 et q_1 . Nous supposons que la part des fuites non repérées est prépondérante dans le débit de fuite par rapport à la part des fuites diffuses. Il nous semble dès lors qu'une erreur initiale sur q_1 aurait plus d'impact sur le débit global qu'une erreur sur q_0 , paramètre qui s'impose donc comme celui à fixer de préférence. Une étude de sensibilité sur ce paramètre nous confortera par la suite dans notre choix de fixer q_0 *a priori*.

Le fait de considérer q_0 comme une donnée n'est cependant encore pas suffisant pour assurer une convergence convenable du modèle et nous devons procéder à de nouvelles restrictions sur un autre paramètre.

4.4.1.2. Contraintes sur le taux d'apparition des fuites diffuses μ

Le taux d'apparition des fuites μ est un paramètre primordial dans ce modèle que nous ne voulons pas fixer arbitrairement. Cependant, nous disposons d'informations à son égard.

Ce paramètre a déjà été calculé lors de la mise en place du modèle d'apparition des fuites sur lequel s'appuie en partie le modèle trois états. Il caractérisait certes la naissance commune des fuites diffuses et des fuites non repérées, mais nous pouvons supposer que les valeurs de μ calculées alors sont proches de celles qui caractérisent le modèle trois états. Le nombre de fuites réellement présentes à t est forcément différent, de par les processus d'élimination ou de transformation, mais le taux d'apparition est certainement assez voisin. Nous proposons donc de choisir la valeur de μ dans l'intervalle $[0,01;0,25]$ qui englobe les variations de μ observées pour le modèle d'apparition des fuites. Il ne s'agit pas simplement de borner les variations de μ , mais d'explorer de manière discrète cet intervalle. Pour la programmation, la valeur de μ est incrémentée selon un pas à définir.

A chaque itération de calcul, les valeurs de q_0 et μ sont connues. Le choix final d'une valeur de μ , pour estimer le reste des paramètres, est expliqué par la suite.

4.4.2. Calcul des paramètres α et q_1

Les paramètres α (voir équation (3.30)) et q_1 peuvent maintenant être déterminés à partir de l'équation générale du modèle (3.29). Une procédure de régression programmée sous SAS, dont la qualité d'ajustement est caractérisée par le coefficient de détermination R_J^2 , est appliquée.

Comme le montre la relation qui les lie tous les trois, la simple connaissance de α ne permet pas de déterminer les paramètres λ_0 et λ_1 que nous cherchons à connaître.

Afin de pouvoir dissocier ces paramètres, nous utilisons la donnée disponible relative au nombre de réparations par semaine faisant suite à des détections visuelles.

Rappelons que la dernière équation du système différentiel traduisant l'équilibre dynamique entre les différentes catégories de fuites, équation (3.24), se présentait sous la forme :

$$dN_2(t) = \lambda_1 N_1(t) dt = r_2(t) dt$$

En combinant cette équation avec l'expression littérale de $N_1(t)$ (équation(3.26)), nous obtenons :

$$r_2(t) dt = \lambda_1 \frac{\mu \lambda_0}{(\mu + \lambda_0)(\mu + \lambda_1)} e^{\mu t} dt \quad (3.31)$$

Puis, en intégrant simplement cette équation entre t_0 et t , il vient :

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^t r_2(u) du = R_2(t) &= \lambda_1 \frac{\lambda_0}{(\mu + \lambda_0)(\mu + \lambda_1)} (e^{\mu t} - e^{\mu t_0}) \\ &= \beta (e^{\mu t} - e^{\mu t_0}) \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\text{avec } \beta = \lambda_0 \frac{\lambda_1}{(\mu + \lambda_0)(\mu + \lambda_1)} \quad (3.33)$$

La variable $R_2(t)$ et le paramètre μ étant connus pour chaque étape de calcul, le paramètre β est obtenu simplement par une procédure de régression prédéfinie sous SAS, dont le coefficient de détermination est R_2^2 .

Ainsi, nous disposons à présent de deux relations, la première exprimant α , la seconde β , qui permettent d'accéder aux paramètres λ_0 et λ_1 que nous recherchons. Il suffit pour cela de résoudre un système simple de deux équations à deux inconnues.

Les risques instantanés liés aux fuites diffuses et aux fuites non repérées, qui donnent également accès aux durées de vie moyennes de ces fuites par passage aux inverses, s'écrivent sous la forme :

$$\lambda_0 = \mu \frac{q_0 - \alpha - q_1 \beta}{\alpha - q_1 + q_1 \beta} \quad (3.34)$$

$$\lambda_1 = \mu \beta \frac{q_1 - q_0}{\alpha - q_0 + \beta q_1}$$

4.4.3. Bilan pour l'estimation des paramètres et contraintes associées

Les paramètres dans leur intégralité, pour la formulation de base, sont ainsi potentiellement déterminés à partir des relations précédentes. La convergence du modèle n'en est pas encore pour autant assurée. Nous savons juste qu'à partir des résultats que retournera le programme développé sous SAS, nous aurons accès aux paramètres physiques du modèle trois états.

Après avoir préalablement fixé une valeur de q_0 , sans quoi le modèle n'offre aucun résultat, les trois étapes distinctes résumées ci-dessous aboutissent au calcul de λ_0 et λ_1 :

- pour un μ donné, pris dans un intervalle issu du modèle d'apparition des fuites présenté dans le chapitre 2, nous calculons les paramètres q_1 et α , ce qui conduit au coefficient de détermination R_1^2 , puis le paramètre β , dont le calcul est caractérisé par le coefficient de détermination R_2^2 ;
- nous conservons la valeur de μ qui, au final, maximise le produit $R_1^2 R_2^2$ et conduit au respect de certaines contraintes physiques imposées, contraintes évoquées à la suite de ce bilan ;
- λ_0 et λ_1 résultent enfin de la combinaison des paramètres α et β associés au μ optimal.

Les contraintes évoquées en titre sont nécessaires pour imposer au modèle de fournir des résultats physiquement acceptables. Bien évidemment, le calage des paramètres est alors rendu impossible dans certains cas, mais rien ne sert d'avoir un modèle garantissant un jeu de paramètres sur tous les secteurs de l'étude s'il n'a aucune application fautive de sens.

Nous savons que les paramètres μ , λ_0 et λ_1 doivent nécessairement être positifs, caractérisant respectivement un taux d'apparition et des inverses de durées de vie moyennes.

De même, une contrainte évidente consiste à imposer une valeur de $q_1 > q_0$, pour que la nature des fuites soit respectée (par définition la fuite diffuse est indétectable alors que la fuite non repérée est détectable).

Nous voulons donc :

$$\lambda_0 = \mu \frac{q_0 - \alpha - q_1 \beta}{\alpha - q_1 + q_1 \beta} > 0 \text{ et } \lambda_1 = \mu \beta \frac{q_1 - q_0}{\alpha - q_0 + \beta q_1} > 0$$

Pour λ_0 , numérateur et dénominateur doivent nécessairement être de même signe.

Si nous supposons la positivité de ces deux membres, alors :

$$q_0 - q_1 \beta > \alpha > q_1 - q_1 \beta$$

La relation d'ordre entre q_0 et q_1 contredit l'hypothèse de positivité émise, nous devons donc considérer la négativité de chacun des membres. Celle-ci implique alors une contrainte réalisable :

$$q_1 - q_1 \beta > \alpha > q_0 - q_1 \beta$$

Une contrainte supplémentaire déduite de la relation précédente est d'imposer $\beta < \frac{q_0}{q_1}$ car α est nécessairement positif.

Concernant λ_1 maintenant, le numérateur est positif, par définition. Il faudra donc veiller à ce que $\frac{\alpha}{1 - \beta} > q_0$.

Les contraintes résultantes et appliquées par la suite dans la programmation du modèle sont :

$$\frac{\alpha}{1 - \beta} > q_0, \quad \frac{q_0}{q_1} > \beta, \quad q_1 - q_1 \beta > \alpha > q_0 - q_1 \beta$$

A celles-ci vient s'ajouter une contrainte sur la durée de vie moyenne des fuites diffuses, $d_0 = 1/\lambda_0$, qui ne doit pas dépasser l'âge moyen du secteur, pour que le comportement asymptotique utilisé soit valable, comme nous l'avons expliqué au paragraphe 4.3.2.1.

Enfin, et ceci est le résultat d'essais préalables, une hypothèse sur la relation d'ordre entre l'âge moyen d'une fuite diffuse et l'âge moyen d'une fuite non repérée doit être formulée. Nous avons évoqué, toujours au paragraphe 4.3.2.1, la prédisposition naturelle à imaginer qu'une fuite diffuse perdure plus longtemps qu'une fuite non repérée. C'est effectivement bien la condition que nous devons imposer.

La contrainte associée pour l'évaluation correcte des paramètres s'écrit :

$$d_0 = 1/\lambda_0 > d_1 = 1/\lambda_1.$$

La construction du modèle est achevée et toutes les précautions ont été prises pour lui donner du sens et en faciliter le calage. Nous en présentons maintenant les premiers résultats.

4.5. Résultats directs du modèle trois états

Cette partie a pour but de présenter les résultats immédiatement accessibles lorsque l'on applique le modèle trois états aux secteurs de l'étude. Ses applications et les perspectives offertes seront traitées dans le chapitre suivant.

Le choix a été fait de fixer *a priori* le paramètre q_0 , débit unitaire moyen de fuites diffuses. Si, d'un point de vue technique ce procédé résout les problèmes de programmation et en partie de convergence, il en soulève un nouveau relatif aux prédictions du modèle. En l'occurrence, quelle valeur de q_0 utiliser, et doit-on la prendre unique pour l'ensemble des secteurs ? Nous proposons donc de présenter tout d'abord une analyse de sensibilité à q_0 du modèle trois états sur un exemple concret. Dans un second temps, nous expliciterons la valeur retenue et introduirons pour cela certaines valeurs de paramètres calculées. Nous poursuivrons par une analyse de l'ensemble des paramètres du modèle et une comparaison de leurs valeurs avec les modèles précédents s'ils y trouvent leurs pendants, avant de commenter quelques exemples de restitutions graphiques.

4.5.1. Sensibilité à q_0

Les résultats fournis par le modèle dépendent de la valeur de q_0 . Le calcul des autres paramètres intègre effectivement cette valeur et elle modifie en retour leur estimation. L'analyse de sensibilité a pour objet la quantification du lien entre q_0 et les autres paramètres. Si une variation minimale de q_0 entraîne des changements conséquents dans les valeurs des autres paramètres, alors nous serons amenés à reconsidérer l'option choisie. Au contraire, si l'impact de cette variation est réduit ou inexistant, alors nous aurons moins à craindre une erreur initiale sur l'évaluation de q_0 . Une sensibilité faible garantirait un certain confort d'utilisation du modèle trois états.

Le principe de cette analyse consiste à faire varier q_0 dans une large gamme et à observer la réponse du modèle pour les autres paramètres.

L'étude a été menée sur l'ensemble des secteurs. Les enseignements généraux qui peuvent en être tirés sont présentés sur le Secteur 9.

La plage de valeurs explorée se situe entre $q_0=0,001 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ et $q_0=0,1 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, intervalle supposé suffisamment large pour comprendre le débit unitaire moyen réel des fuites diffuses. Le Tableau 13 regroupe les résultats obtenus pour ce secteur. Les valeurs de q_0 testées sont plus denses autour de $0,01 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, ordre de grandeur du débit unitaire moyen de fuite diffuse qui nous semble adapté *a priori*.

Le point principal à retenir ici concerne le taux d'apparition des fuites μ . Le modèle retient la valeur qui conduit au meilleur coefficient $R_1^2 R_2^2$, représentant la justesse des estimations de tous les paramètres. Les variations de μ s'effectuent sur de faibles amplitudes et par paliers, en raison du processus de résolution mis en place. En effet, afin de gagner en temps de calcul, le pas d'incrément pour les valeurs de μ est pris égal à 0,01, ce qui n'autorise qu'un certain nombre de valeurs possibles et explique pourquoi, pour des valeurs de q_0 différentes, μ est identique. Un incrément à 0,001, plus coûteux en temps de calcul, dissiperait cet effet palier, mais les valeurs initiale et finale seraient semblables.

L'essentiel est cependant de constater que, tandis que q_0 est multiplié par 100, la variation engendrée sur μ n'atteint pas 15 % de sa valeur initiale, laissant à apprécier la faible sensibilité de μ à q_0 .

Tableau 13. Sensibilité des paramètres du modèle trois états à la valeur de q_0 : exemple du Secteur 9.

Secteur 9						
q_0 ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	μ	d_0 (années)	d_1 (années)	$N_0(t_0)$	$N_1(t_0)$	q_1 ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
0.001	0.15	28.7	3.1	400	30	0.52
0.003	0.15	29.3	3.0	401	28	0.52
0.005	0.15	29.9	2.8	403	27	0.52
0.007	0.15	30.5	2.7	404	25	0.52
0.009	0.15	31.2	2.5	406	24	0.52
0.010	0.15	31.6	2.4	407	23	0.52
0.012	0.15	32.3	2.2	408	21	0.52
0.014	0.15	33.0	2.1	410	20	0.52
0.016	0.15	33.8	1.9	411	18	0.52
0.018	0.15	34.6	1.7	413	16	0.52
0.020	0.14	18.5	2.3	235	22	0.51
0.025	0.14	19.2	2.1	238	20	0.51
0.030	0.14	20.0	1.8	240	17	0.51
0.040	0.14	21.7	1.3	245	12	0.51
0.050	0.14	23.8	0.7	250	7	0.51
0.060	0.14	26.2	0.2	256	1	0.51
0.070	0.13	10.9	1.5	126	15	0.50
0.080	0.13	11.6	1.2	129	12	0.50
0.090	0.13	12.3	0.9	133	9	0.50
0.100	0.13	13.1	0.5	136	5	0.50

Le Tableau 13 montre également que μ diminue à mesure que q_0 augmente, ce qui d'un point de vue physique semble logique. Pour que la part dans le débit global du débit lié aux fuites diffuses reste constante, si q_0 augmente alors le nombre de ces fuites doit diminuer. Un taux d'apparition moins élevé amène effectivement à réduire ce nombre.

On peut ensuite observer que l'architecture du modèle est telle que le calcul de q_1 (dernière colonne) dépend de q_0 au travers de μ exclusivement. Les variations de q_1 et μ sont donc parallèles, et l'amplitude observée concernant q_1 est négligeable. De même, le produit $R_1^2 R_2^2$ n'évolue qu'en fonction de μ , dans des proportions infimes non représentées ici.

Les Figure 26 et Figure 27 indiquent une hiérarchisation de l'influence des paramètres. q_0 agit faiblement sur μ , qui engendre à son tour des modifications sur les autres paramètres. Au

sein des plages où μ est constant, les variations sur $d_0 = \frac{1}{\lambda_0}$ et $d_1 = \frac{1}{\lambda_1}$ restent raisonnables et peu élevées.

Les calculs de grandeurs induites comme $N_0(t_0)$ et $N_1(t_0)$ montrent la même tendance. Mais, lors des franchissements de seuil, synonymes de changement dans la valeur de μ , les modifications apportées sur les paramètres peuvent être importantes, comme nous le constatons graphiquement.

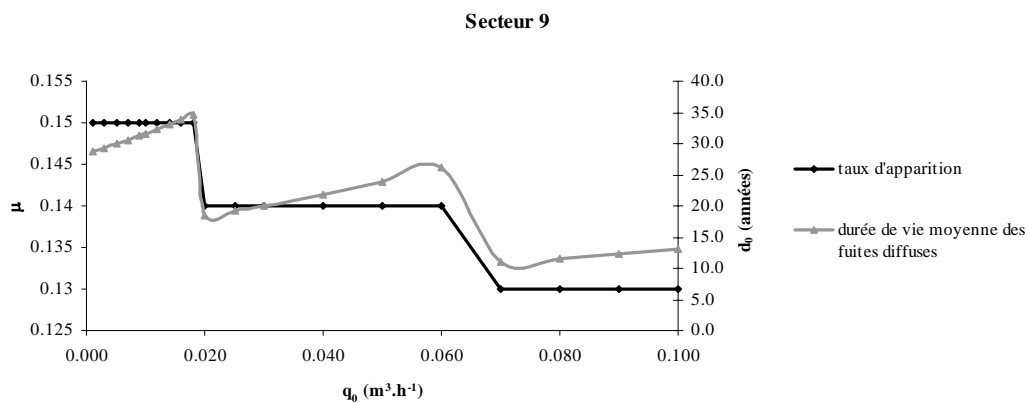


Figure 26. Variabilité de μ et d_0 en fonction de q_0 .

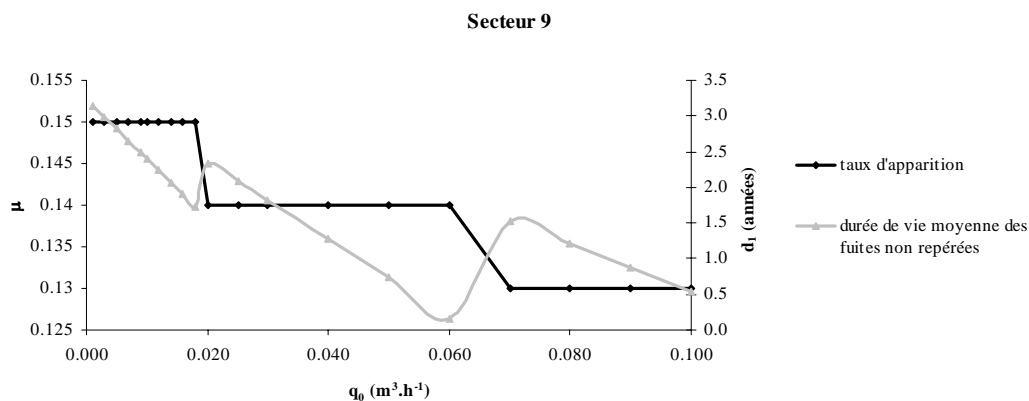


Figure 27. Variabilité de μ et d_1 en fonction de q_0 .

Sur les intervalles où μ est constant, d_0 augmente régulièrement et faiblement avec la hausse de q_0 . L'interprétation physique de ce processus est impossible dans le cadre fixé pour le modèle. En effet, si q_0 s'accroît, on peut supposer que les fuites diffuses qu'il caractérise sont en moyenne plus proches de se transformer en fuites non repérées, et donc qu'elles ont une durée de vie moyenne plus faible. Le modèle met en avant le processus inverse. Le biais du

pas d'incrémentation des valeurs de μ doit ici être souligné. En réalité, à mesure que q_0 augmente, μ diminue. Cette baisse n'est malheureusement visible dans le modèle que pour des fortes variations de q_0 . Physiquement donc, la hausse de q_0 est associée à une réduction de la valeur de μ , et c'est cette baisse que vient compenser la croissance de la durée de vie moyenne d_0 . Notons aussi que $N_0(t_0)$ augmente très légèrement (voir Tableau 13), de manière fort logique puisque la durée de vie moyenne de ces fuites s'accroît avec q_0 .

Dans le même temps, et toujours à μ constant, d_1 diminue. La hausse importante de q_0 , associée à celle moins marquée du nombre de fuites diffuses, a pour effet d'augmenter considérablement la part du débit de fuite lié aux fuites diffuses. Nous l'avons dit, q_1 restant constant à μ donné, la diminution conséquente et nécessaire de la part liée aux fuites non repérées est donc supportée entièrement par une diminution assez importante de $N_1(t_0)$, comme le prouve le Tableau 13. Cette baisse en nombre est ainsi due à une augmentation du risque instantané faisant passer de l'Etat 1 à l'Etat 2 et donc à la diminution de d_1 constatée.

Considérons maintenant l'effet d'un changement de valeur de μ . Il provoque une forte chute de d_0 et à l'opposé une hausse de d_1 . Cette zone d'instabilité du modèle est difficile à expliquer. Il y a alors une redistribution complète des parts de chaque type de fuite, la part des fuites diffuses décroissant au profit de celle des fuites non repérées. Lors du passage de $q_0=0,018 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ à $q_0=0,020 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, qui marque un changement dans la valeur de μ , il est intéressant de calculer les variations dans la part des fuites diffuses et non repérées. Un simple produit, ramené au kilomètre, entre le nombre de fuites de chaque type et la valeur associée du débit unitaire permet ce calcul. Le débit lié aux fuites diffuses passe de $0,45 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}.\text{km}^{-1}$ à $0,28 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}.\text{km}^{-1}$ et celui des fuites non repérées de $0,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}.\text{km}^{-1}$ à $0,67 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}.\text{km}^{-1}$, bouleversant ainsi les rapports entre ces deux catégories.

Au-delà de ce seuil, la hausse de q_0 a les mêmes effets décrits précédemment.

En conclusion, l'étude montre que la sensibilité des paramètres à q_0 est faible tant que la valeur de μ associée reste constante, en lien avec le pas d'incrémentation choisi. Le changement de valeur de μ provoque alors une forte variation de ces paramètres. Si la valeur

de q_0 choisie se situe dans une plage où le taux d'apparition μ retenu reste constant, alors le calcul des paramètres effectué par le modèle ne sera pas entièrement dépendant du choix initial de la valeur de q_0 , ce qui en assure la robustesse.

Toutefois, même si des grandeurs comme d_0 ou d_1 ne sont que très peu affectées par les variations de q_0 , le débit lié aux fuites diffuses en est dépendant. L'analyse de sensibilité montre que le choix de q_0 n'est pas capital pour l'estimation des paramètres. Il est cependant important pour la reconstruction des chroniques, plus précisément l'évaluation des parts des fuites diffuses et non repérées dans le débit de fuite global. Ce choix est également influent dans l'interprétation des résultats. Ce point fait l'objet du paragraphe suivant.

4.5.2. Comment choisir q_0 ?

4.5.2.1. Unicité sur l'ensemble des secteurs

La distinction entre fuites diffuses et fuites non repérées doit être quantitative pour avoir un caractère opérationnel. Ces quantités s'expriment comme le produit d'un débit unitaire moyen et d'un nombre de fuites. Si le calcul de q_1 est assuré par le modèle pour chaque secteur, la valeur de q_0 est quant à elle fixée *a priori*. Mais quelle valeur choisir ?

Faut-il d'ailleurs parler d'une seule valeur ou doit-on considérer une valeur propre à chaque secteur ? Il n'existe pas de lien connu entre les caractéristiques patrimoniales d'un secteur et la valeur du débit unitaire de fuite diffuse. Si nous envisageons la multiplicité des valeurs, alors le choix ne pourrait être qu'arbitraire pour chaque secteur et conduirait à augmenter les causes d'erreurs pour la suite du modèle. De plus, attribuer autant de valeurs que de secteurs empêcherait toute comparaison des débits liés aux fuites diffuses entre eux, puisque aucune grandeur ne serait alors commune. A partir du moment où q_0 est unique, la part du débit liée aux fuites diffuses devient un objet commun à tous les secteurs ne dépendant plus que du nombre de fuites calculé.

Une autre manière de justifier ce choix consiste à dire que la fuite diffuse est, dans le cadre du modèle trois états, l'entité élémentaire de base du débit de fuite. En cela, elle doit être identique pour chaque secteur. Elle ne se différencie que par l'intensité du processus de

transformation auquel elle est soumise. Qu'elle s'observe sur des joints entre conduites ou au niveau de branchements, elle est identique d'un secteur à l'autre.

Déterminons donc maintenant la valeur de q_0 la mieux adaptée.

4.5.2.2. Valeur de q_0 retenue

Les contraintes sur le choix de q_0 sont de plusieurs ordres.

Lambert (1994) fixe la frontière entre fuites diffuses et fuites non repérées à $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. La détection acoustique permet de localiser des fuites beaucoup moins importantes, le bruit émis n'étant pas proportionnel au débit de fuite. Il est par contre impossible de déterminer une limite de détection absolue, tant la nature de la fuite, sa localisation, la technique et le matériel employés, ainsi que l'expérience des personnes de terrain, peuvent influencer sur les résultats des opérations de recherche.

Du point de vue du sens du modèle, et comme première contrainte, nous devons cependant choisir q_0 tel que $q_0 < q_1$ pour tous les q_1 calculés.

Une contrainte de majoration encore plus forte vient de la formulation du modèle. En aucun cas, la part des fuites diffuses ne doit dépasser le débit global modélisé. Prenons l'exemple du Secteur 9 sur la Figure 28. La valeur de q_0 choisie est de $0,03 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Tous les autres paramètres sont calculés par application du modèle trois états et la chronique de débit peut être reconstituée.

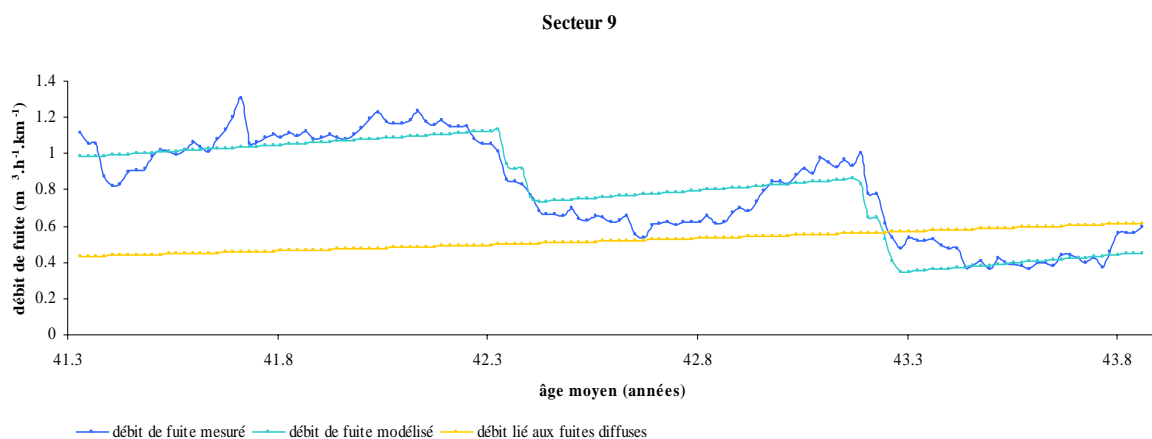


Figure 28. Représentation des débits modélisé et lié aux fuites diffuses pour $q_0=0,03 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ sur le Secteur 9.

Nous observons qu'au cours de la 43^{ème} année, le débit lié aux fuites diffuses devient plus élevé que le débit de fuite modélisé, ce qui n'est pas admissible. Le Tableau 14 détaille les calculs et montre que l'effet des réparations, matérialisé par les chutes de débit, fait diminuer le débit modélisé dans des proportions telles, qu'il devient inférieur au débit lié aux fuites diffuses (les caractères gras marquent la semaine où s'observe ce basculement). Ces réparations, cumulées depuis le début de la chronique pour le calcul du débit modélisé, affectent la part des fuites non repérées, celle des fuites diffuses demeurant inchangée. Comme les fuites diffuses sont incluses dans le débit global et ne peuvent donc le dépasser, nous en déduisons que nous surestimons leur importance et que le débit unitaire moyen choisi est trop élevé.

Tableau 14. Calculs menant à un débit lié aux fuites diffuses supérieur au débit global modélisé (tous les débits sont en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$).

t	$N_0(t)$	$N_1(t)$	$q_0 N_0(t)$	$q_1 N_1(t)$	$q_0 N_0(t) + q_1 N_1(t)$	réparations sur recherche	effet des réparations	débit global modélisé	débit global observé
43.19	311	23	0.56	0.71	1.27	1	0.03	0.83	1.01
43.21	312	23	0.56	0.71	1.28	6	0.19	0.65	0.77
43.23	313	23	0.56	0.72	1.28	0	0.00	0.65	0.77
43.25	314	23	0.57	0.72	1.28	4	0.13	0.53	0.61
43.27	315	23	0.57	0.72	1.29	4	0.13	0.40	0.54
43.29	316	23	0.57	0.72	1.29	2	0.06	0.35	0.47
43.30	316	23	0.57	0.72	1.29	0	0.00	0.35	0.54
43.32	317	23	0.57	0.73	1.30	0	0.00	0.35	0.52
43.34	318	23	0.57	0.73	1.30	0	0.00	0.36	0.52
43.36	319	23	0.58	0.73	1.30	0	0.00	0.36	0.53

Les débits unitaires maximaux, c'est-à-dire au-delà desquels le débit lié aux fuites diffuses n'est physiquement plus acceptable, ont été recherchés sur l'ensemble des secteurs. Le Secteur 9 présente la valeur minimale des débits unitaires maximaux à appliquer : $0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Pour minorer ce débit unitaire de fuite diffuse, nous avons procédé à de nombreux essais. Ils ont montré que le débit unitaire moyen devait être au moins égal à $0,001 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour pouvoir observer les fuites diffuses et leur évolution.

Nous nous situons donc à ce stade dans une fourchette de valeurs présentant un rapport de 1 à 10.

Nous cherchons toutefois à dépasser ce simple ordre de grandeur, puisque nous avons besoin d'une valeur précise pour le calcul du débit de fuite. Pour cela, nous considérons que le Secteur 9 est un secteur quasiment débarrassé de toutes fuites non repérées à l'instant où le débit global de fuite y atteint son minimum. Nous formulons cette hypothèse puisque ce secteur présente un débit de fuite global faible, ainsi que d'importants épisodes de recherche de fuites. A cet instant précis, il y a alors concordance entre le débit mesuré et le débit lié aux fuites diffuses. Nous l'avons vu, le débit est dans ce cas proche de $0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Nous optons donc pour la suite de l'étude pour cette valeur de débit unitaire de fuite diffuse, $q_0=0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, valeur de référence.

4.5.2.3. Comparaison des niveaux de fuite atteints dans le cadre du modèle trois états avec la méthodologie Lambert

Il est intéressant pour nous de comparer les quantités de fuites diffuses ainsi calculées avec celles proposées par Lambert. Comme le montre le Tableau 15 pour l'ouverture de la chronique, les résultats sont proches, avec des ordres de grandeur équivalents, bien qu'obtenus de manière totalement différente.

Tableau 15. Comparaison des débits liés aux fuites diffuses selon la formulation Lambert ou le modèle trois états ($q_0=0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

Sect.	fuites diffuses selon Lambert ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)	fuites diffuses selon modèle 3 états ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)
2	0.29	0.14
3	0.18	0.11
4	0.18	0.14
5	0.18	0.11
6	0.18	0.16
8	0.17	0.06
9	0.23	0.24
10	0.20	0.08
11	0.25	0.06
12	0.11	0.26
16	0.24	0.15
17	0.24	0.17
18	0.22	0.02
	0.21	0.13
	<i>moyenne</i>	<i>moyenne</i>

Pour les Secteurs 4, 6 et 9, les deux débits sont quasiment identiques. Le calcul de la moyenne montre que la méthode Lambert donne plus de poids aux fuites diffuses que le modèle trois

états. Cette constatation immédiate doit de plus être accentuée par le fait que les quantités mises en avant par Lambert se rapportent à des réseaux particuliers, avec des infrastructures en bonnes conditions. Un secteur « normal » devrait donc dépasser ses valeurs théoriques ; le débit lié aux fuites diffuses calculé par le modèle trois états se trouve presque toujours en dessous du niveau proposé par Lambert. Il n'est pas possible d'affirmer catégoriquement si la méthode Lambert surestime quelque peu les fuites diffuses ou bien si le modèle trois états les sous-estime. Cependant, certains secteurs gérés par Veolia Water, dont un exemple parmi les données sur lequel nous reviendrons, ont mis à mal la formulation de Lambert. Ils présentent en effet des débits de fuite inférieurs aux quantités incompressibles estimées.

4.5.3. Valeurs des paramètres

4.5.3.1. Présentation générale

Sur les 18 secteurs dont nous disposons pour appliquer le modèle trois états, seuls 13 remplissent les critères de convergence définis au paragraphe 4.4.3. Pour les Secteurs 1, 7, 13, 14 et 15, il a été impossible de trouver des valeurs de paramètres qui satisfassent les contraintes imposées. Le Tableau 16 regroupe les résultats obtenus en donnant la valeur des paramètres du modèle, μ , q_0 , q_1 , $d_0 = 1/\lambda_0$ et $d_1 = 1/\lambda_1$ et propose également le nombre de fuites par unité de longueur présentes dans chaque catégorie à t_0 , début de la chronique, pour lesquelles nous avons conservé les notations N_0 et N_1 afin de ne pas multiplier les symboles.

Tableau 16. Valeurs des paramètres du modèle trois états pour $q_0=0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Sect.	$q_0=0.01 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$						
	μ (an^{-1})	d_0 (années)	d_1 (années)	$N_0(t_0)$ (nb.km $^{-1}$)	$N_1(t_0)$ (nb.km $^{-1}$)	q_1 ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	R^2
2	0.13	5.5	4.2	13.5	6.6	0.31	0.96
3	0.11	27.3	6.6	10.8	1.5	0.51	0.91
4	0.11	16.4	0.8	14.2	0.6	0.86	0.91
5	0.16	5.6	3.9	10.8	4.7	0.23	0.97
6	0.12	9.9	3.8	16.1	4.3	0.38	0.97
8	0.14	5.2	3.1	5.5	2.3	0.18	0.96
9	0.15	31.6	2.4	24.5	1.4	0.52	0.98
10	0.14	5.8	1.3	7.8	1.5	0.48	0.91
11	0.15	4.5	1.5	5.9	1.6	0.73	0.95
12	0.17	29.4	5.5	25.9	2.6	0.21	0.91
16	0.13	10.1	8.4	14.8	5.9	0.05	0.94
17	0.09	26.6	8.8	16.8	3.1	0.31	0.92
18	0.09	3.1	1.9	1.6	0.8	1.46	0.80
	0.130	13.9	4.0	12.9	2.8	0.48	0.93
	<i>moyenne</i>						

Les Tableau 17 et Tableau 18 montrent, pour les mêmes secteurs et dans le même ordre, les valeurs des paramètres pour des valeurs de q_0 égales à $0,001 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ et $0,005 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. Ils viennent conforter les remarques formulées pour le Secteur 9 lors de l'étude de sensibilité menée précédemment. Ils ne seront pas commentés dans le détail, mais on peut se rapporter au paragraphe 4.5.1 pour les explications relatives aux faibles variations observées.

Tableau 17. Valeurs des paramètres du modèle trois états pour $q_0=0,001 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$.

$q_0=0,001\text{m}^3.\text{h}^{-1}$							
Sect.	μ (an^{-1})	d_0 (années)	d_1 (années)	$N_0(t_0)$ (nb.km 3)	$N_1(t_0)$ (nb.km 3)	q_1 ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)	R^2
2	0.13	5.3	4.5	13.2	7.1	0.31	0.96
3	0.11	25.5	7.4	10.6	1.7	0.51	0.91
4	0.11	16.0	1.0	14.0	0.8	0.86	0.91
5	0.16	5.2	4.3	10.5	5.1	0.23	0.97
6	0.12	9.4	4.1	15.8	4.6	0.38	0.97
8	0.14	4.8	3.4	5.2	2.6	0.18	0.96
9	0.15	28.7	3.1	24.0	1.8	0.52	0.98
10	0.14	5.6	1.5	7.7	1.6	0.48	0.91
11	0.15	4.4	1.6	5.9	1.7	0.73	0.95
12	0.17	23.2	8.0	24.8	3.7	0.21	0.91
16	0.14	18.9	9.1	29.8	6.4	0.07	0.94
17	0.09	24.1	10.2	16.3	3.6	0.31	0.92
18	0.09	3.1	1.9	1.6	0.9	1.46	0.80
0.131		13.4	4.6	13.8	3.2	0.48	0.93
<i>moyenne</i>							

Tableau 18. Valeurs des paramètres du modèle trois états pour $q_0=0,005 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$.

$q_0=0,005\text{m}^3.\text{h}^{-1}$							
Sect.	μ (an^{-1})	d_0 (années)	d_1 (années)	$N_0(t_0)$ (nb.km 3)	$N_1(t_0)$ (nb.km 3)	q_1 ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)	R^2
2	0.13	5.4	4.4	13.4	6.9	0.31	0.96
3	0.11	26.3	7.1	10.7	1.6	0.51	0.91
4	0.11	16.2	0.9	14.0	0.7	0.86	0.91
5	0.16	5.4	4.1	10.6	4.9	0.23	0.97
6	0.12	9.6	4.0	15.9	4.5	0.38	0.97
8	0.14	4.9	3.3	5.3	2.4	0.18	0.96
9	0.15	29.9	2.8	24.2	1.6	0.52	0.98
10	0.14	5.7	1.4	7.8	1.6	0.48	0.91
11	0.15	4.4	1.5	5.9	1.7	0.73	0.95
12	0.17	25.6	6.9	25.3	3.1	0.21	0.91
16	0.14	24.3	6.3	31.8	4.4	0.07	0.94
17	0.09	25.2	9.6	16.5	3.4	0.31	0.92
18	0.09	3.1	1.9	1.6	0.9	1.46	0.80
0.131		14.3	4.2	14.1	2.9	0.48	0.93
<i>moyenne</i>							

4.5.3.2. Analyse du taux d'apparition μ

Les valeurs de μ prises sur les différents secteurs s'étalent très peu autour de la moyenne de 0,13. Il existe un lien entre l'âge moyen du secteur et le taux d'apparition des fuites diffuses. La Figure 29 montre une corrélation négative entre ce paramètre, dont le calcul intègre le linéaire de conduites, et l'âge du réseau.

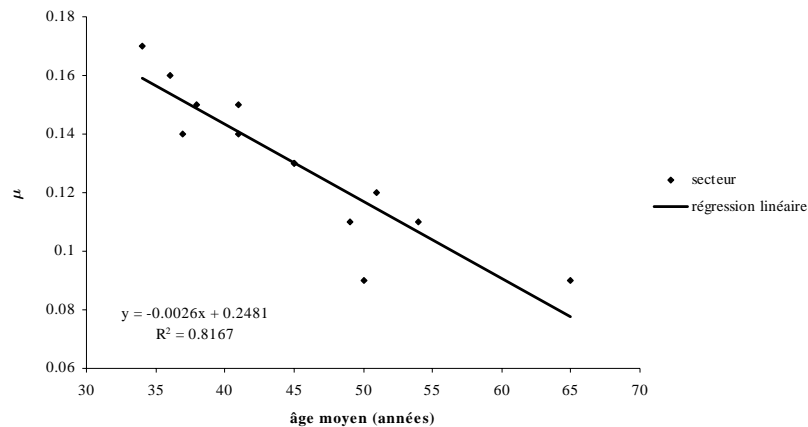


Figure 29. Corrélation entre μ et l'âge moyen du secteur pour le modèle trois états.

Alors qu'il nous semblait qu'un réseau vieillissant devait faire face à une augmentation accrue de l'apparition des fuites, le lien établi tend à prouver le contraire. Une explication peut être avancée, mais il faut auparavant rétablir les liens entre valeur du débit de fuite observé, réparations dénombrées et âge moyen du secteur.

De manière logique, l'intensité de réparation sur recherche au cours de la période considérée dépend fortement du débit de fuite initial mesuré (Figure 30). Ce débit initial n'est cependant pas relié à l'âge moyen du secteur (Figure 31). On comprend donc que sur ce groupe de secteurs, l'âge moyen n'est pas le facteur explicatif privilégié des valeurs de débit observées. Il semble donc délicat d'espérer mettre en avant un lien fort et positif entre âge moyen et taux d'apparition des fuites diffuses.

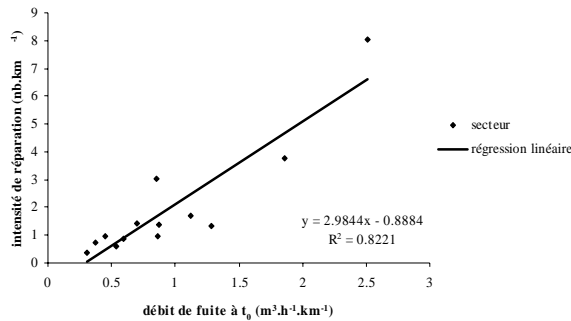


Figure 30. Corrélation entre intensité de réparations et valeur initiale du débit de fuite.

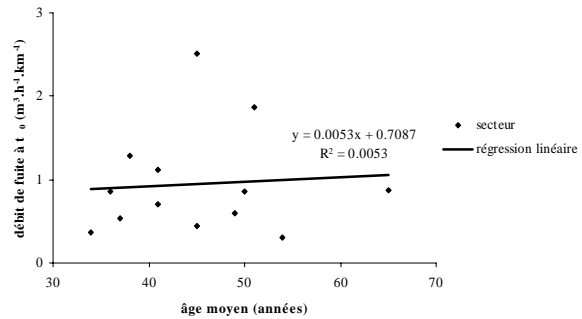


Figure 31. Corrélation entre la valeur initiale du débit de fuite et l'âge moyen du secteur.

Nous cherchons simplement à souligner ici que sur un faible nombre de secteurs il est délicat d'établir un lien sérieux entre valeurs des paramètres issus du modèle et caractéristiques patrimoniales et qu'il faut se méfier d'interprétations ou de conclusions hâtives. Ainsi, l'existence du lien constaté entre âge moyen et μ tient certainement plus du modèle lui-même que d'un processus physique. Le processus de Yule choisi, où l'augmentation du temps est prise en compte sous forme exponentielle, entraîne le phénomène observé. Comme nous l'avons signalé au paragraphe 3.3.2.1 de ce chapitre, un modèle de type NHPP, nécessitant un paramètre supplémentaire, aurait été très certainement moins contraignant quant au lien entre μ et l'âge moyen.

La formulation du modèle est telle que c'est essentiellement le terme $e^{\mu t}$ qui détermine le nombre de fuites (expression de $N_0(t)$ donnée par l'équation (3.26)). Le produit μt est donc

la grandeur prépondérante. Sa représentation en fonction de l'âge moyen des secteurs (Figure 32) est intéressante et souligne l'effet du modèle dans l'observation qui nous occupe. Ainsi, il faut noter la quasi constance du produit μt pour l'ensemble des secteurs. Le fait de prendre l'exponentielle de ce terme peu variable suffit toutefois à créer des écarts importants dans le calcul des nombres de fuites et à différencier les secteurs. Si μ et t_0 varient dans des sens opposés, il s'agit bien du fait du modèle et de l'utilisation d'un terme en exponentielle issu du processus de Yule appliqué. S'ils variaient dans le sens physique escompté, nous aboutirions à des divergences certaines.

De plus, ce produit de paramètres constant n'est nécessairement pas corrélé à l'âge moyen, âge qui n'explique donc pas le caractère plus fuyard d'un secteur par rapport à un autre.

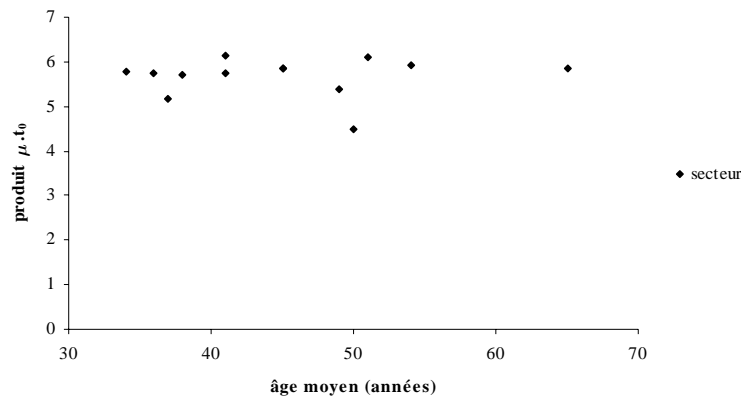


Figure 32. Représentation du produit μt_0 en fonction de l'âge moyen.

Le nombre de branchements ou bien encore le pourcentage de linéaire en matière plastique ont été testés comme variables explicatives du paramètre μ , sans succès, puisque c'est finalement bien l'âge du secteur, par un biais du modèle, qui le détermine.

4.5.3.3. Analyse des durées de vies moyennes d_0 et d_1

Par une contrainte imposée au sein du modèle, d_0 est supérieur à d_1 pour tous les secteurs. Les fuites diffuses durent 3,5 fois plus longtemps que les fuites non repérées, avec des valeurs moyennes de 13,9 et 4 ans respectivement. Les variabilités observées entre les secteurs sont équivalentes pour les durées associées aux fuites diffuses et non repérées.

La comparaison avec les grandeurs fournies par Lambert est très limitée. En effet, il n'associe pas de durée de vie aux fuites diffuses, qu'il estime devoir perdurer indéfiniment dans le

temps. Les fuites non repérées sont par contre affectées d'une durée de vie de 50 jours pour les canalisations et de 100 jours pour les branchements (voir Tableau 5). Ces durées sont faibles devant le résultat du modèle trois états concernant d_1 . Cependant, Lambert y associe des débits de fuite beaucoup plus élevés que ceux proposés ici, par exemple $6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour une fuite non repérée sur canalisation, soit 12 fois plus que le débit moyen q_1 établi par le modèle, qui ne différencie pas canalisations et branchements ; si la distinction était opérée, le débit d'une fuite sur conduite serait plus élevé. Ce rapport de 1 à 12 vient donc compenser leur faible durée de vie et permet de rapprocher ces résultats de ceux de Lambert.

La connaissance des paramètres d_0 et d_1 donne ensuite accès au nombre de fuites par kilomètre présentes dans chaque catégorie. Ces grandeurs sont calculées à $t = t_0$. Leur nombre exact pour les fuites diffuses n'a pas de réelle utilité, c'est plutôt le produit par le débit de fuite moyen qui revêt une importance. A titre informatif, on peut toutefois noter que pour le modèle choisi et la valeur de q_0 retenue, les fuites diffuses sont tout au plus quelques dizaines par kilomètre.

Ce chiffre est plus intéressant en ce qui concerne les fuites non repérées, sur lequel le gestionnaire peut agir plus rapidement et de manière ciblée. Il aura plus de facilités à trouver des fuites sur le Secteur 2, où elles sont plus de 6 par kilomètre à l'instant t_0 , ouverture de la chronique, que sur le Secteur 4 où il n'est pas certain d'en détecter une par kilomètre. Ce chiffre peut ainsi orienter l'exploitant dans la priorisation de ses actions et l'informer sur l'envergure des actions à mener.

Le lien marqué entre d_0 et $N_0(t_0)$ d'une part, et entre d_1 et $N_1(t_0)$ dans une moindre mesure, est représenté sur les Figure 33 et Figure 34. Il contraste avec la corrélation beaucoup plus faible entre μ et les nombres de fuites $N_0(t_0)$ et $N_1(t_0)$ (Figure 35 et Figure 36), fait qui montre ici encore que le paramètre μ n'a pas un fort pouvoir explicatif concernant le débit de fuite.

Alors que dans la formulation de $N_0(t_0)$, μ et $\lambda_0 = 1/d_0$ interviennent tous deux, ce dernier paramètre semble déterminer principalement le nombre de fuites. Il en va de même avec les fuites non repérées, leur nombre et le débit associé. Le paramètre μ n'est pas directement

influent sur le débit de fuite modélisé. Pour passer de μ au nombre de fuites réel, les paramètres d_0 et d_1 jouent un rôle essentiel et déterminent en grande partie ce débit.

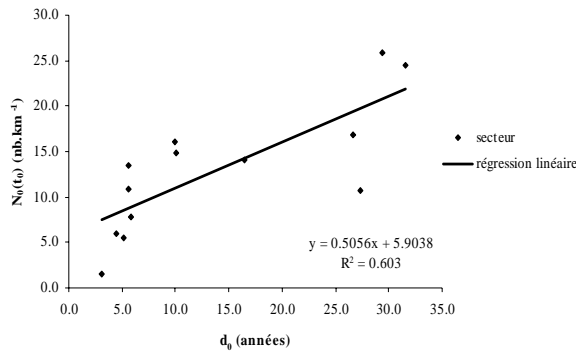


Figure 33. Corrélation entre d_0 et $N_0(t_0)$.

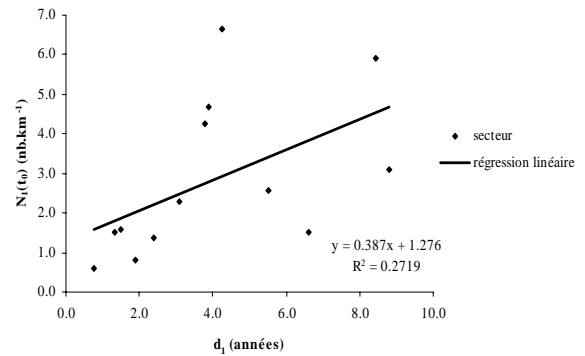


Figure 34. Corrélation entre d_1 et $N_1(t_0)$.

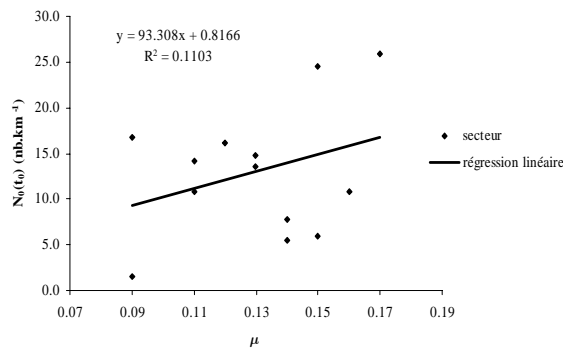


Figure 35. Corrélation entre $N_0(t_0)$ et μ .

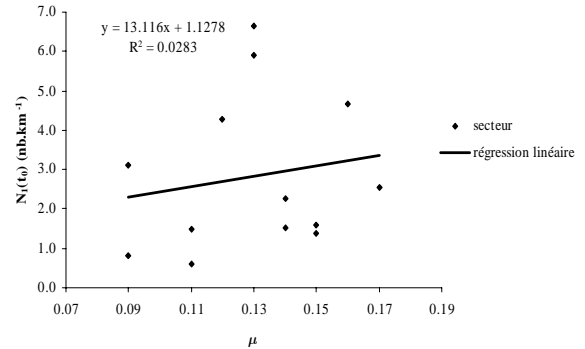


Figure 36. Corrélation entre $N_1(t_0)$ et μ .

4.5.3.4. Analyse du débit unitaire moyen de fuites non repérées q_1

Le calcul de q_1 , enfin, propose des valeurs comprises entre 0,05 et 1,46 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Ces deux valeurs extrêmes sont d'ailleurs à prendre avec précaution puisque assez éloignées de la valeur moyenne de 0,48 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. L'ordre de grandeur de ce débit semble en tout cas très réaliste.

La corrélation négative observée Figure 37 entre le débit unitaire de fuite non repérée et la durée de vie moyenne de ces fuites peut traduire deux aspects. Du point de vue de la modélisation, un équilibre entre les différentes parts est ainsi trouvé. Un fort débit unitaire associé à une longue durée de vie entraînerait une prépondérance écrasante des fuites non repérées au détriment des fuites diffuses. C'est d'ailleurs ce qui se produit pour le Secteur 18

(voir Tableau 16) : le débit unitaire élevé n'est pas compensé par une très faible durée de vie, il en résulte un très petit nombre de fuites diffuses, et donc une part du débit correspondant quasi inexistante.

Cependant, il est aussi possible que le modèle traduise ce qui se passe réellement sur le secteur. Ainsi, du point de vue physique maintenant, un débit unitaire moyen élevé peut être synonyme de détérioration importante de la conduite. Si le processus de dégradation est avancé, la casse ne tardera pas à devenir manifeste, telle est du moins la philosophie de ce modèle. Il est donc normal que les durées moyennes de vie les plus faibles soient associées aux débits unitaires les plus élevés.

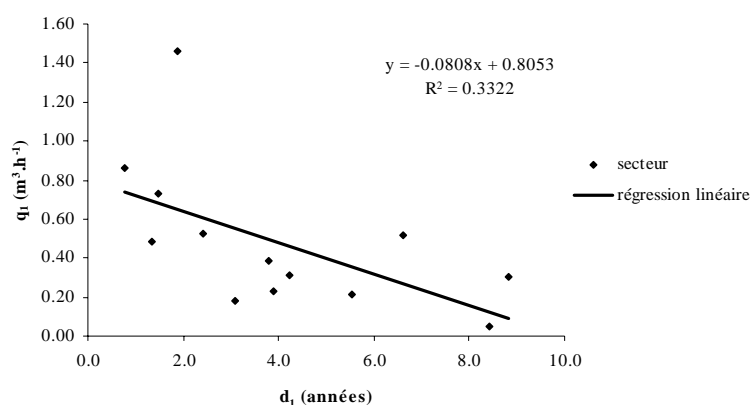


Figure 37. Corrélation entre q_1 et d_1 .

4.5.3.5. Bilan concernant les paramètres

La valeur de $R^2 = \max_{\mu} (R_1^2 R_2^2)$ est systématiquement élevée sur l'ensemble des secteurs, du fait des procédures utilisées relativement simples. Elle traduit la bonne adéquation entre les données disponibles et la formulation proposée.

Nous venons de le voir avec l'exemple de μ notamment, il est difficile de parvenir à mettre en évidence des relations privilégiées entre paramètres du modèle et grandeurs patrimoniales. Les explications possibles sont à la fois le faible nombre de secteurs dont nous disposons mais aussi la formulation du modèle. Il est plus aisé de relier ces paramètres entre eux ou d'en expliquer l'influence sur le calcul du débit.

Nous pouvons toutefois comparer brièvement certaines de ces valeurs avec le modèle plus simple d'apparition des fuites présenté au paragraphe 3.3 de ce chapitre. Ce modèle fonctionne avec un paramètre μ , taux d'apparition global des fuites diffuses et non repérées,

et avec un paramètre Q_u regroupant les deux types de fuites dans le cas de la formulation de base. La variante avec ajout des fuites diffuses selon la formulation de Lambert conduit à des paramètres peu différents. Le Tableau 19 récapitule les résultats obtenus en tenant compte de cette variante. Il donne les valeurs moyennes des paramètres pour les secteurs sur lesquels à la fois le modèle d'apparition des fuites et le modèle trois états ont fourni des résultats, c'est-à-dire 12 secteurs.

Tableau 19. Comparaison des valeurs des paramètres entre le modèle dit d'apparition des fuites et le modèle trois états.

	modèle apparition des fuites	modèle apparition des fuites avec fuites diffuses selon Lambert	modèle trois états
μ	0.093	0.092	0.133
Q_u ou q_1 ($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-1}$)	0.70	0.69	0.49

La séparation des deux types de fuites proposée dans le modèle trois états entraîne une hausse sensible de μ . La valeur du paramètre caractérisant le débit unitaire de fuite diminue quant à elle dans ce nouveau modèle.

Dans le modèle précédent, le paramètre μ ne pouvait pas être trop élevé, car de lui seul dépendait le nombre de fuites non repérées, fuites associées à un débit unitaire important. Il est plus grand pour le modèle trois états car il n'influence que très peu le nombre de fuites non repérées, nous l'avons vu dans le paragraphe 4.5.1. Ainsi, sa hausse permet de prendre en considération les fuites diffuses sans toutefois conférer trop de poids aux fuites non repérées. La diminution du débit unitaire moyen s'explique par la prise en charge d'une certaine part du débit global par les fuites diffuses, elles aussi associées à un débit unitaire moyen. Ceci a pour effet d'entraîner une répartition des débits.

Avant de présenter les restitutions graphiques du modèle trois états pour la valeur de q_0 retenue, nous traitons des résultats de la modélisation telle que formulée en (3.27) dont l'intérêt réside dans la distinction établie entre branchements et conduites.

4.5.3.6. Résultats de la variante du modèle trois états avec distinction des organes hydrauliques réparés

Au sein des données, les événements de réparations sont répartis selon sept catégories définies dans le Tableau 7. Les deux grands ensembles d'équipements hydrauliques qu'il nous semble important de conserver sont les branchements et les conduites, termes sous lesquels nous regroupons les autres organes. En effet, afin de ne pas perdre une part d'information concernant les réparations, nous agglomérons les réparations de fuites sur branchement, joint de prise en charge, en partie privée et les interventions sur boîtier de branchement. Elles sont indistinctement appelées réparations de fuites sur branchement. De même, les réparations de fuites sur canalisation de distribution, sur vanne et sur compteur sont considérées comme des réparations sur conduites.

Les contraintes imposées pour le calcul des paramètres à partir de l'équation (3.27) sont identiques à celles appliquées au modèle trois états général et exposées au paragraphe 4.4.3. Assurant le sens physique du modèle, elles en limitent aussi les résultats puisque seul le Secteur 10, parmi les 18 secteurs sélectionnés, permet aux calculs d'aller à leur terme. Le Tableau 20 met en parallèle les résultats ainsi obtenus avec ceux précédemment établis. Le débit unitaire moyen de fuites diffuses q_0 est toujours pris égal à $0.01 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, que ce soit pour les branchements ou pour les conduites.

Tableau 20. Comparaison des valeurs des paramètres pour le modèle trois états avec ou sans distinction sur les organes réparés.

Sect. 10	μ		d_0 (années)		d_1 (années)		$N_0(t_0)$ (nb/km)		$N_1(t_0)$ (nb/km)		q_1 ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	
	cond.	brcht.	cond.	brcht.	cond.	brcht.	cond.	brcht.	cond.	brcht.	cond.	brcht.
formulation de base	0.14		5.8		1.3		7.8		1.5		0.48	
formulation avec distinction conduites et branchements	0.07	0.14	10.73	7.25	3.66	0.70	0.4	8.7	0.1	0.8	4.39	0.26

Notons tout d'abord que cette modélisation plus fine et plus complète ne modifie pas les parts respectives des fuites diffuses et des fuites non repérées. De simples produits entre le nombre de fuites par kilomètre dans chaque état et les débits unitaires associés le montrent. Là où le modèle trois états dans sa formulation de base répartissait le débit en $0.08 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ pour les fuites diffuses et $0.7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ pour les fuites non repérées, la nouvelle formulation attribue

0.09 m³.h⁻¹.km⁻¹ pour les fuites diffuses et 0.71 m³.h⁻¹.km⁻¹ pour les fuites non repérées. Le rendu global des parts diffuse et non repérée est inchangé, les bénéfices liés à ce nouveau modèle résident dans la répartition, au sein des deux catégories citées, des fuites sur branchements ou sur conduites.

Cette répartition est intéressante puisqu'elle confirme que les fuites diffuses sont presque exclusivement concentrées sur les branchements, tandis que pour trois quarts environ, le débit lié aux fuites non repérées s'observe sur les conduites. De plus, sur ce secteur, le débit de fuite global modélisé est imputable pour 35 % aux branchements et pour 65 % aux conduites. Le Tableau 21 regroupe ces résultats calculés à t_0 .

Tableau 21. Poids relatif (exprimé en pourcentage) des branchements et des conduites dans les différents composantes du débit modélisées pour le Secteur 10.

	débit de fuite global	débit lié aux fuites diffuses	débit lié aux fuites non repérées
branchements (%)	35.5	95.3	27.8
conduites (%)	64.5	4.7	72.2

Si l'on s'attarde maintenant sur les valeurs des paramètres, on remarque que le débit unitaire moyen de fuite non repérée est bien différencié selon qu'il se rattache aux branchements ou aux conduites. Pour ces dernières, il est plus de 15 fois supérieur à celui des branchements, ce qui semble dans la logique des phénomènes observés sur le terrain.

Concernant les durées de vie, comme pour la formulation première, elles sont plus importantes dans l'Etat 0 des fuites diffuses que dans l'Etat 1 des fuites non repérées. La tendance observée grâce au nouveau modèle est qu'une fuite sur branchement change plus rapidement d'état qu'une fuite sur conduite.

Enfin, le paramètre μ , caractéristique du taux d'apparition des fuites diffuses, est deux fois supérieur dans le cas des branchements que pour les conduites : les fuites diffuses, et ceci explique le Tableau 21, apparaissent majoritairement sur les branchements. Ainsi, le paramètre μ du modèle trois états, que nous n'avons pas réussi à expliquer par l'âge moyen des secteurs, pourrait être corrélé à leur densité de branchements. Cependant, cette étude a été menée sur les 18 secteurs, sans résultat. Le faible nombre de secteurs peut en être la cause.

Nous voyons au travers de cet unique exemple tout l'intérêt d'établir la distinction entre branchements et conduites. La richesse des informations qui en ressortent, quant à la localisation privilégiée des types de fuites notamment, peut s'avérer être une aide précieuse dans l'optique de gestion des fuites envisagée. Malheureusement, dans le cadre de l'étude, les résultats de ce modèle amélioré, bien qu'encourageants, sont trop peu nombreux pour être significatifs.

4.5.4. Restitution graphique

Le modèle trois états sépare le débit de fuite en une part liée aux fuites diffuses et une autre propre aux fuites non repérées. Une condition nécessaire pour que ces deux parts prises séparément aient un sens et puissent être exploitées est que le débit global soit bien représenté. Pour cela, l'observation comparée des courbes des débits modélisé et mesuré est indispensable.

Ces courbes sont restituées pour un certain nombre de secteurs et présentent chacune, la plupart du temps, un trait particulier que nous soulignons. Les représentations comprennent dans ce paragraphe :

- le débit de fuite mesuré ;
- le débit de fuite global calculé par le modèle trois états ;
- le débit lié aux fuites diffuses selon le modèle développé ;
- le débit lié aux fuites diffuses selon la formulation de Lambert.

4.5.4.1. Evolution temporelle du débit lié aux fuites diffuses

La superposition des courbes de débit global, modélisé et observé, est très satisfaisante pour le Secteur 2 (Figure 38), tant par la qualité de restitution des sauts de débits liés aux réparations que par la croissance naturelle du débit bien rendue.

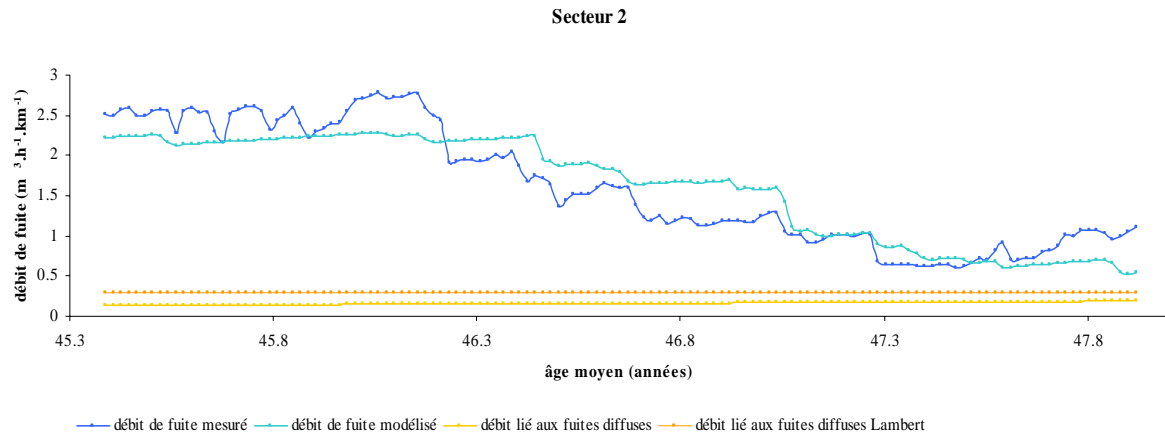


Figure 38. Représentation graphique du Secteur 2 pour le modèle trois états.

Au fil du temps, la quantité de fuites diffuses calculée par le modèle trois états tend à se rapprocher de celle établie par Lambert, tout en lui restant inférieure. On imagine aisément qu'à terme la tendance observée va s'inverser.

L'étude menée prend en considération l'évolution au cours du temps de la quantité de fuites diffuses et permet ainsi de mieux appréhender la nature du réseau. Cette évolution se fait plus ou moins rapidement comme le montre la Figure 39 où l'on observe une hausse de la part liée aux fuites diffuses visiblement plus marquée que sur la Figure 38. Les hausses sont respectivement de 39 et 46 % pour les Secteurs 2 et 9.

La différence peut s'expliquer au regard des paramètres associés à chacun des deux secteurs. Le Tableau 16 montre en effet qu'à la fois μ et d_0 sont plus élevés pour le Secteur 9 que pour le Secteur 2. Ceci implique une hausse plus importante du débit lié aux fuites diffuses, sous le double effet d'un taux d'apparition et d'une durée de vie moyenne plus élevés.

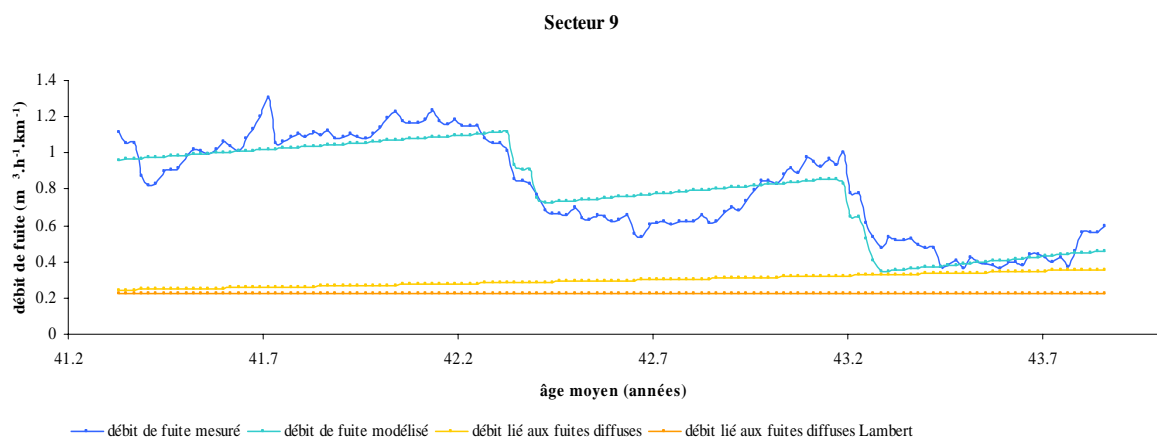


Figure 39. Représentation graphique du Secteur 9 pour le modèle trois états.

La représentation du niveau de fuites diffuses selon Lambert sur l'ensemble des secteurs étudiés nous propose un cas à part : le Secteur 18. Nous observons sur la Figure 40 qui s'y rapporte que cette quantité est supérieure au débit de fuite mesuré, ce qui n'est pas acceptable compte tenu de la définition des termes. Sachant que les fuites diffuses ne constituent qu'une partie des fuites incompressibles telles que les considère Lambert, on souligne ici encore une des limites de la formulation qu'il a proposée.

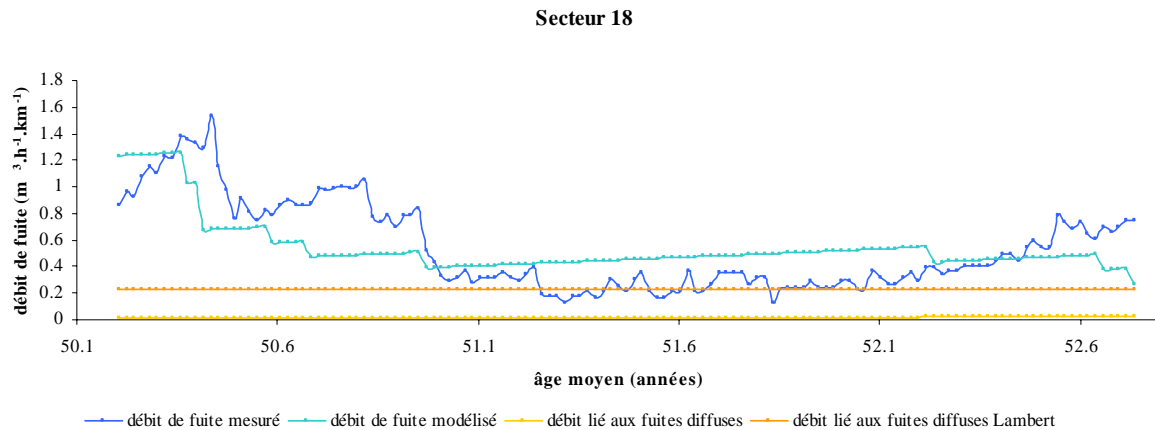


Figure 40. Représentation graphique du Secteur 18 pour le modèle trois états.

Notons encore que le débit global de fuite sur ce secteur est très faible et que la part des fuites diffuses l'est nécessairement aussi. Alors que la méthodologie développée par Lambert pour estimer cette part diffuse ne prend en compte comme spécificités que le nombre de branchements, la longueur du réseau et la pression moyenne, le modèle trois états calcule des paramètres adaptés au secteur et calés sur le débit observé. C'est pourquoi, afin de rendre compte de ce débit peu élevé, le modèle calcule une durée de vie moyenne des fuites diffuses faible. Elle est sur ce secteur la plus courte de toutes avec seulement 3,1 années. Le taux d'apparition des fuites diffuses est seulement égal à 0,09 et constitue la valeur minimum sur tous les secteurs. Il participe de même à limiter le nombre des fuites diffuses. Le modèle trois états semble donc bien s'adapter aux caractéristiques de ce type de secteur à faible débit de fuite.

4.5.4.2. Limite soulignée par les représentations graphiques

Le modèle ne permet pas de prendre en considération les hausses ponctuelles et élevées de débit de fuite. Il est construit pour simuler une croissance continue et régulière de ce débit dans le temps. Il ne tient pas compte des casses manifestes soudaines comme élément du débit

de fuite puisque nous avons supposé qu'elles ne doivent pas influencer dans le pas de temps d'observation d'une semaine considéré.

Les fuites non repérées n'apparaissent pas au sein du modèle de manière discrète. Si, en l'espace de deux mois par exemple, deux nouvelles fuites non repérées apparaissent sur un secteur, alors le modèle trois états reproduit globalement l'augmentation de débit induite mais en la répartissant sur la période de deux mois. Nous comprenons donc qu'aucun pic positif de débit ne peut être modélisé. Pour cette raison, le rendu global de la restitution du Secteur 3 (Figure 41) peut paraître éloigné de la réalité, mais hormis le pic très important dans la première partie de chronique, la modélisation semble correcte pour le reste de la période étudiée.

Cette hausse exceptionnelle est d'ailleurs probablement due à des fuites non repérées brusques ou des casses manifestes soudaines gérées dans des délais excédant les périodes d'intervention présumées. On peut observer sur la courbe modélisée quelques chutes de débit très réduites faisant immédiatement suite au pic. Elles correspondent à des réparations sur recherche de fuites. Comme le modèle n'a pu prévoir la hausse importante, il n'affecte pas à ces réparations un débit unitaire trop élevé ; il n'a en effet pas à faire décroître le débit de manière très marquée. Ce débit unitaire est pourtant dans la moyenne observée sur les autres secteurs, valant $0,51 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour une moyenne de $0,48 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. On peut alors penser que des réparations de casses manifestes sont venues se superposer à la recherche de fuites et ont participé beaucoup plus activement à ramener le débit aux environs de sa valeur avant le pic. La quantité de fuites diffuses, enfin, n'évolue que très faiblement et s'avère très proche de celle évaluée par Lambert.

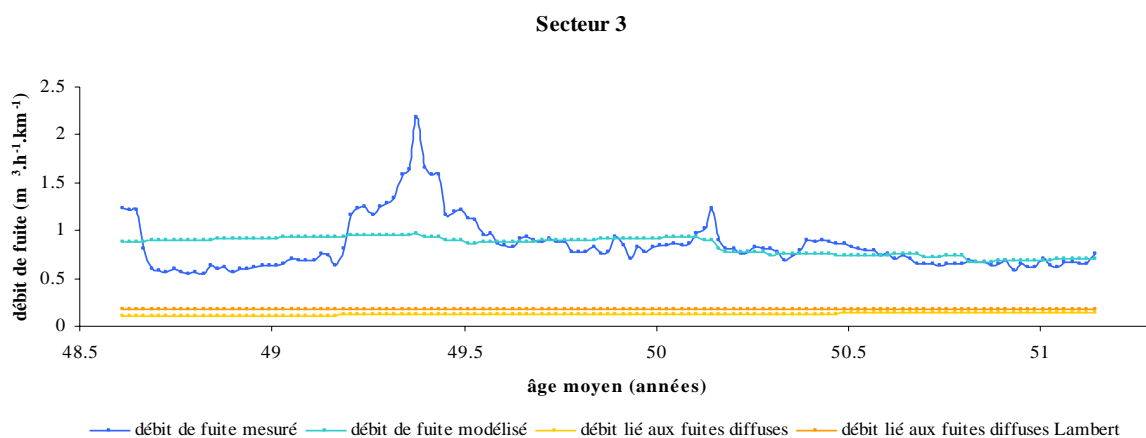


Figure 41. Représentation graphique du Secteur 3 pour le modèle trois états.

La Figure 42 est un nouvel exemple de cette difficulté du modèle trois états à restituer les épisodes de croissance accélérée et ponctuelle du débit. Sur le Secteur 10, le pic de tout début de chronique est ignoré par le modèle, qui, par l'équilibre entre les paramètres calculés, parvient tout de même dans l'ensemble à représenter correctement le débit de fuite.

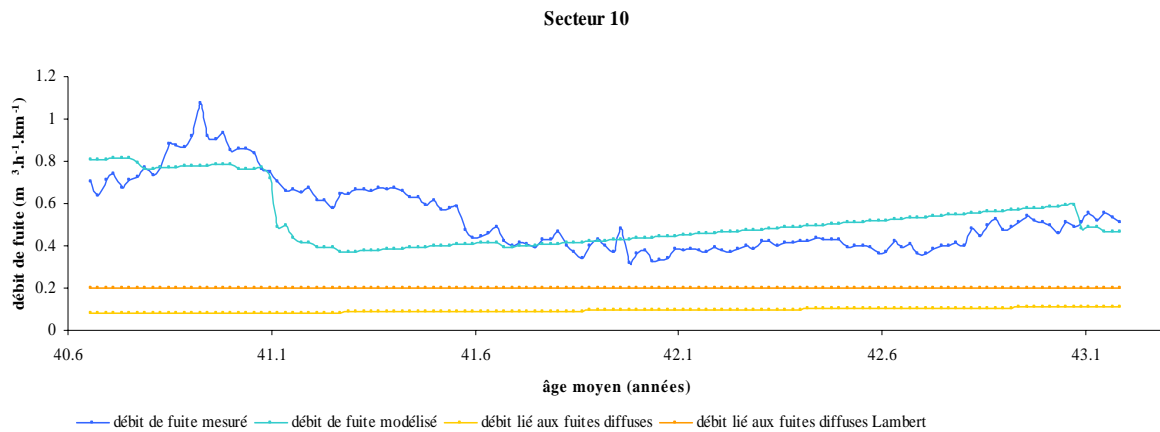


Figure 42. Représentation graphique du Secteur 10 pour le modèle trois états.

La vision d'ensemble qu'offre la représentation graphique du Secteur 8 (Figure 43) montre que le modèle a fonctionné très convenablement pour ce secteur. La courbe modélisée passe bien au milieu des points issus de la mesure mais son aspect extrêmement lisse par rapport à la courbe observée est à discuter. Les réparations sur opérations de recherche de fuites sont très peu nombreuses sur ce secteur et concentrées en début et en fin de chronique ; la partie centrale de la courbe modélisée ne présente donc pas d'aspérités contrairement à la courbe mesurée. Cette dernière varie pour des raisons qui ne sont pas prises en compte dans le modèle, raisons indéterminées comme des variations de consommation ou de pression par exemple. Des erreurs de mesure peuvent également constituer une explication.

Cependant, la formulation utilisée, bien qu'elle lisse certains phénomènes, retranscrit correctement le fonctionnement du secteur dans son ensemble.

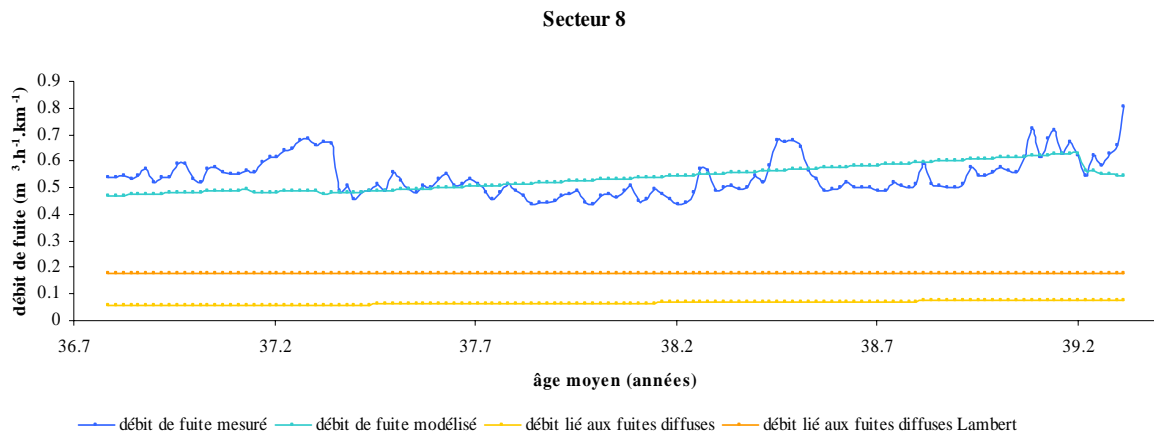


Figure 43. Représentation graphique du Secteur 8 pour le modèle trois états.

4.5.4.3. Autres exemples de restitution

Les deux dernières figures (Figure 44 et Figure 45) n'apportent pas d'information supplémentaire sur le fonctionnement du modèle mais montrent les résultats graphiques pour des secteurs jamais représentés jusqu'ici. La constatation principale issue de l'observation est la bonne superposition des courbes. Notons aussi que la plupart des remarques précédemment faites peuvent s'appliquer à ces deux secteurs.

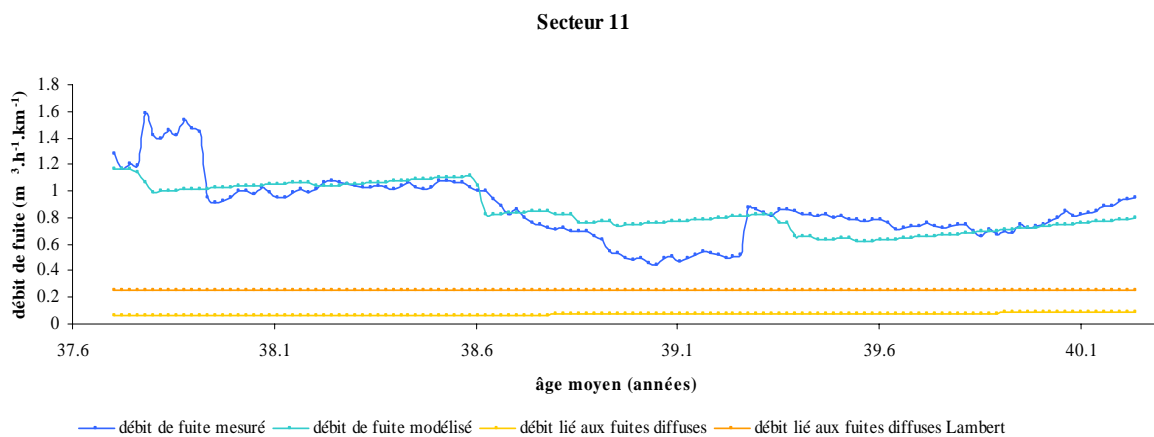


Figure 44. Représentation graphique du Secteur 11 pour le modèle trois états.



Figure 45. Représentation graphique du Secteur 6 pour le modèle trois états.

4.5.4.4. Modélisation des fuites depuis la date de pose

A partir du jeu de paramètres calculé, le modèle trois états permet de reconstituer l'évolution naturelle des débits de fuite depuis la date de pose moyenne des différents secteurs. L'hypothèse nécessaire est d'imaginer des secteurs sur lesquels, jusqu'au début de la chronique d'observations, aucune action proactive de type renouvellement ou recherche de fuites n'a été entreprise.

Le Secteur 2 semble avoir évolué sans action particulière du gestionnaire jusqu'à t_0 . Les réparations de casses manifestes ont été faites, mais les fuites non repérées n'ont certainement pas été recherchées, étant donnée la situation à t_0 en matières de fuites. La mise en place de la sectorisation et du réseau instrumenté de mesures peut coïncider avec les premières opérations de recherche.

Pour ce Secteur 2 donc, la courbe tracée Figure 46 représente avec une forte probabilité l'évolution supposée du débit de fuite au cours de la vie entière du secteur.

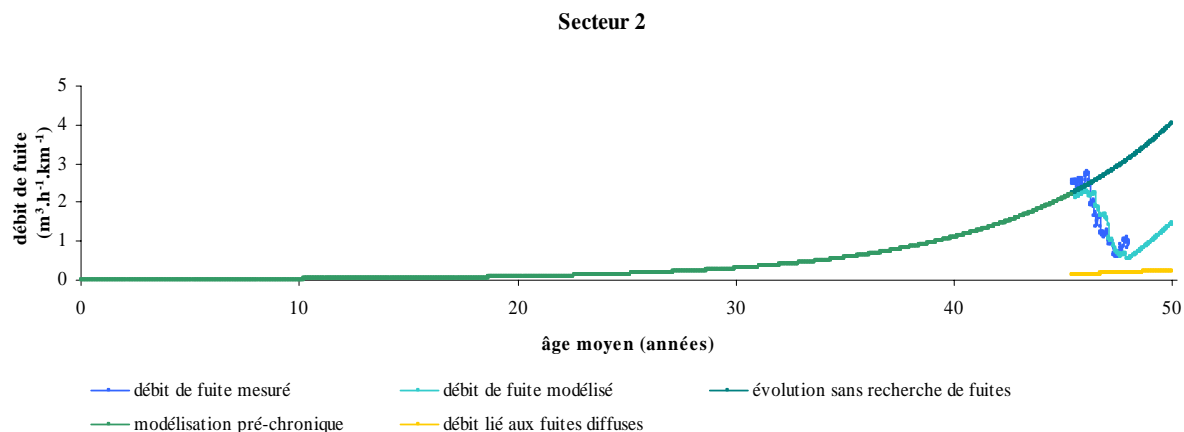


Figure 46. Evolution naturelle des fuites sur le Secteur 2 depuis la date de pose.

On remarque sur cette figure une très faible croissance du débit de fuite dans les 30 premières années qui suivent la pose du secteur. Par la suite, la croissance de ce débit est beaucoup plus marquée.

De façon générale, la restitution de tout l'historique de vie du secteur en ce qui concerne le débit de fuite est telle que pendant une très longue période à partir de la pose des conduites les fuites sont quasi inexistantes. La conséquence directe de cette observation est la croissance nécessairement rapide des fuites à partir d'un certain point. La nature exponentielle vis-à-vis du temps de cette croissance explique cette rapidité.

Sur le Secteur 11 par exemple, Figure 47, tout se passe comme si de 0 à 20 ans les pertes sont nulles ou presque. Aux alentours de cet âge, elles augmentent fortement pour atteindre le niveau qu'on leur connaît au moment de la mesure.

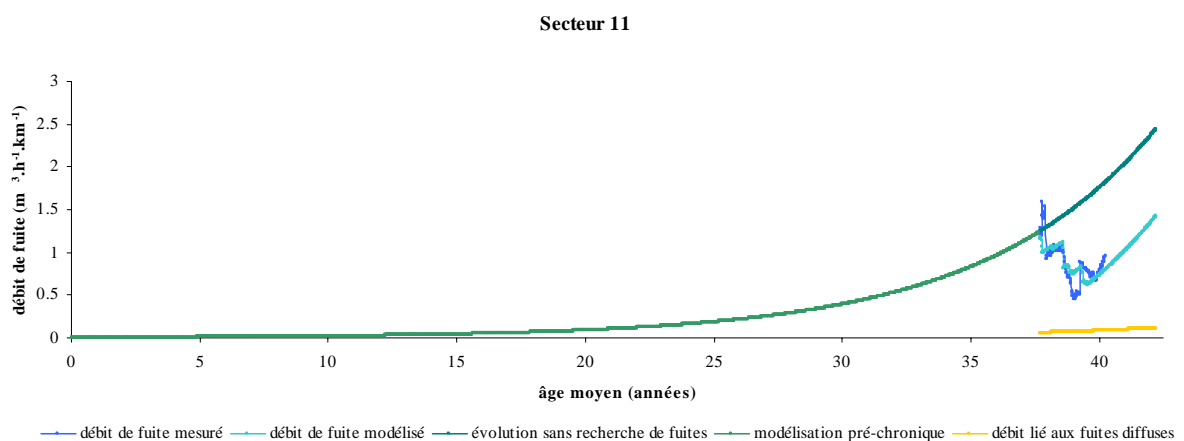


Figure 47. Evolution naturelle des fuites sur le Secteur 11 depuis la date de pose.

Bien que forte, la pente de croissance est calculée à partir de données, à savoir les chroniques d'observations dont nous disposons, et ne peut être que difficilement remise en cause.

Pour le Secteur 11 comme pour le Secteur 2, nous avons considéré une évolution naturelle dans le passé, c'est-à-dire sans recherche de fuites. Nous comprenons bien que si tel n'a pas été le cas, alors, pour que le débit de fuite soit à son niveau de début de chronique, sachant qu'il a pu diminuer grâce à des réparations, c'est peut-être qu'il a crû plus tôt dans le temps ou qu'il n'est pas parti d'une valeur nulle.

Alors que le modèle trois états propose une très longue période dans la vie du secteur durant laquelle les pertes dues à des fuites sont infimes, Lambert, lorsqu'il met en place le concept de fuites incompressibles, pose l'existence d'une certaine quantité de fuites indépendamment de l'âge du réseau.

Ainsi, si tant est que le réseau soit bien fuyard dès l'origine, l'ajout d'une constante de fuite, à déterminer, permettrait de reconstituer des chroniques ne partant pas d'une valeur nulle. La croissance naturelle au cours du temps s'en trouverait ainsi quelque peu réduite. Cependant, les bénéfices éventuels de l'ajout d'une certaine valeur constante ne sont pas déterminés. Si l'on se réfère aux modèles existants pour la prévision des casses, il n'y a pas lieu de vouloir considérer des fuites dans les premières périodes de vie du réseau. En effet, les casses sur les canalisations ne surviennent en général qu'au terme d'une certaine période et les courbes modélisant leur apparition ont une allure similaire. Le modèle sera donc utilisé dans la forme sous laquelle nous l'avons présenté.

Cette rapide étude de l'évolution passée des débits de fuite permet de montrer que les secteurs étudiés sont dans des périodes de leur vie où les fuites apparaissent de plus en plus fréquemment, aggravant très fortement le débit de fuite. La nécessité d'entreprendre certaines actions pour lutter contre la hausse de ce débit est donc évidente. Le chapitre 4 s'intéressera précisément aux différentes actions à mener pour y parvenir, mais auparavant nous effectuons un bref bilan sur le modèle trois états.

5. CONCLUSION

Le modèle trois états remplit une première partie des objectifs qui lui sont assignés : il restitue les chroniques de débit de fuite en décomposant ce dernier en une part liée aux fuites diffuses et une autre liée aux fuites non repérées. Ces deux parts sont évolutives dans le temps.

Sa construction s'appuie sur une double hypothèse. La première concerne l'apparition des fuites diffuses que l'on suppose se faire selon un processus de Yule utilisé dans certains modèles de prévision de casses. Ce choix facilite le calage des paramètres par rapport à un modèle de type NHPP par exemple, mais en contrepartie le taux d'apparition des fuites diffuses est entièrement lié à la variable temporelle. Ceci a pour effet de compliquer l'interprétation physique de ce paramètre. La seconde hypothèse considère la transformation des fuites diffuses au cours du temps, passant de l'Etat 0 des fuites diffuses à l'Etat 1 des

fuites non repérées puis finissant leur vie dans l'Etat 2 des casses manifestes. Le choix d'une distribution exponentielle des durées de vie dans les Etats 0 et 1 entraîne un taux de passage constant dans le temps d'un état à un autre. Il autorise également une partie des fuites naissantes à passer instantanément dans les Etats 1 ou 2 pour refléter au mieux les phénomènes observés en réalité. Une balance dynamique du nombre de fuites dans chaque état est établie. La résolution du système différentiel associé donne alors une expression explicite du nombre de fuites par catégorie. Le débit global de fuite est exprimé en associant à chaque type de fuite un débit unitaire moyen propre et en sommant les parts respectives. L'effet des réparations, qui participent négativement au débit, est pris en compte de la même façon, en multipliant leur nombre par le débit unitaire associé aux fuites non repérées.

Les paramètres du modèle trois états sont au nombre de cinq : μ le taux d'apparition des fuites diffuses issu du processus de Yule, $d_0 = 1/\lambda_0$ et $d_1 = 1/\lambda_1$ les durées de vie moyennes des fuites dans les Etats 0 et 1, caractéristiques des distributions exponentielles des durées de vie et du taux de passage d'un état à l'autre, q_0 et q_1 enfin, les débits unitaires moyens associés aux fuites diffuses et aux fuites non repérées.

La programmation de ce modèle sous SAS impose de fixer *a priori* la valeur d'un paramètre. Notre choix s'est porté sur q_0 ; une étude de sensibilité a montré que ce choix affecte très peu les autres paramètres. La valeur retenue pour la modélisation des secteurs de l'étude est $q_0 = 0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Celle-ci remplit certaines contraintes imposées et assure une représentation de la part des fuites diffuses cohérente, dont la valeur moyenne a pour propriété de ne pas être trop éloignée de ce qu'a proposé Lambert. Finalement, le débit global modélisé est voisin du débit mesuré, l'effet des réparations et la croissance naturelle du débit de fuite sont bien rendus. La limite principale de la formulation du modèle trois états est que les hausses de débit ponctuelles dues à des événements marqués ne sont pas prises en compte.

Le modèle trois états est donc maintenant opérationnel et suffisamment bien adapté aux chroniques de débit pour pouvoir constituer un outil potentiel de gestion des fuites au travers de la gestion du patrimoine. Cette seconde partie des objectifs fixés est au cœur du chapitre 4.

CHAPITRE 4.

APPLICATIONS DU MODELE TROIS ETATS A LA GESTION DES FUITES SUR UN RESEAU D'EAU POTABLE

Préambule

Nous considérons dans ce chapitre comme acquises les valeurs des paramètres du modèle trois états, obtenues pour un débit unitaire moyen de fuite diffuse préalablement fixé et égal à $0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Les courbes, tableaux ou illustrations présentés ici s'appuient tous par conséquent sur le Tableau 16 du chapitre 3.

La validité du modèle trois états a été établie sur la période de deux ans et demi correspondant à la chronique d'observations, à la fois au travers de la relativement bonne adéquation entre débits de fuite mesuré et modélisé, mais aussi par le sens physique que nous pouvons lui conférer. Ce chapitre est consacré à l'évolution dans le temps du débit de fuite modélisé ainsi qu'à celle de la part liée aux fuites diffuses. Différents scénarios de gestion, à base de recherche de fuites et/ou de renouvellement, sont mis en place et leurs effets sur les débits modélisés appréciés. Les résultats des simulations peuvent ensuite servir à orienter diverses actions à entreprendre en fonction d'objectifs fixés à atteindre ou de moyens à disposition par exemple.

Dans une première partie, nous nous intéressons à l'évolution naturelle du débit de fuite sur des secteurs laissés en l'état, sans intervention de l'exploitant. Dans cette même partie, nous mesurons l'impact sur le débit de la poursuite de la recherche des fuites. Ce processus de réduction des fuites est celui mis en œuvre par les exploitants sur l'ensemble des secteurs pendant la période de l'étude. Différentes intensités de recherche de fuites sont testées. Dans un second temps, nous prenons en compte le renouvellement des conduites au sein du modèle. Nous expliquons comment l'inclure de façon pratique dans la formulation du modèle, nous en estimons les effets sur les débits modélisés, notamment celui lié aux fuites diffuses, et mettons en avant les interrogations soulevées. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à l'étude de scénarios de gestion envisageables qui couplent recherche de fuites et renouvellement.

1. EVOLUTION NATURELLE DU DEBIT DE FUITE ET SIMULATION DE DIFFERENTES INTENSITES DE RECHERCHE DE FUITES

La caractéristique principale du débit de fuite réside dans sa croissance continue entre deux épisodes de réparation sur recherche de fuites. Sur un pas de temps dt , le débit supplémentaire résultant des occurrences de fuites dans chaque catégorie est supérieur au débit sauvé lors du passage des fuites non repérées à l'état de casses manifestes, immédiatement réparées. Il en résulte un accroissement du débit. Les débits unitaires, choisis ou calculés pour chaque type de fuites, les durées de vie moyennes et le taux d'apparition des fuites, estimés dans le cadre du modèle trois états, sont tels que ce phénomène s'observe sur l'ensemble des secteurs. Il nous semble donc judicieux d'analyser la poursuite de cette hausse sans intervention de l'exploitant sur des périodes de durée variable. Nous qualifions cette hausse d'évolution naturelle. Il est ainsi possible de prévoir l'évolution du débit sur un secteur et d'en déduire une éventuelle nécessité d'actions selon des critères à définir. La première de ces actions est la recherche de fuites. Dans cette partie, nous en montrons l'efficacité mais aussi les limites.

1.1. Scénarios de passivité du gestionnaire

1.1.1. Nécessité de prévoir l'évolution naturelle des débits de fuite

Des réparations sur recherche de fuites ont eu lieu sur tous les secteurs étudiés mais avec des résultats contrastés : sur certains secteurs le débit a globalement diminué au cours de la chronique d'observations, sur d'autres, moins nombreux, il a augmenté. Ainsi, le débit de fuite en fin de chronique peut être caractérisé à la fois par sa valeur absolue mais aussi par sa tendance d'évolution. Cependant, ces deux critères ne suffisent pas pour mener une action pleinement justifiée.

En effet, la priorité du gestionnaire ne doit pas nécessairement être le secteur le plus fuyard, ni celui dont le débit de fuite est croissant malgré la recherche entreprise. L'étude de l'évolution naturelle des débits de fuite à différents horizons, grâce au modèle proposé, peut orienter plus efficacement ces choix en fonction du comportement des secteurs dans le temps.

1.1.2. Exemple d'évolution du débit de fuite à différents horizons pour le Secteur 2

A partir de la fin de la chronique d'observations notée t_f , le débit modélisé ne se compose plus que des fuites diffuses et des fuites non repérées, les réparations sur recherche de fuites sont supposées nulles. Les paramètres précédemment obtenus nous permettent de calculer $N_0(t)$ et $N_1(t)$, puis $Q(t)$ en écrivant simplement :

$$\forall t > t_f, \quad Q(t) = q_0 N_0(t) + q_1 N_1(t) \quad (4.1)$$

où t_f correspond à la semaine clôturant la chronique de mesures.

Nous présentons pour le Secteur 2 la détérioration du débit de fuite post-chronique, dans le cadre d'un scénario passif, sur une période de 10 ans, Figure 48. Dans le même temps, nous avons tracé la courbe fictive d'évolution du débit de fuite sans aucune recherche sur toute la durée de la chronique. Elle matérialise bien l'importance des actions menées au cours de la période de deux ans et demi considérée.

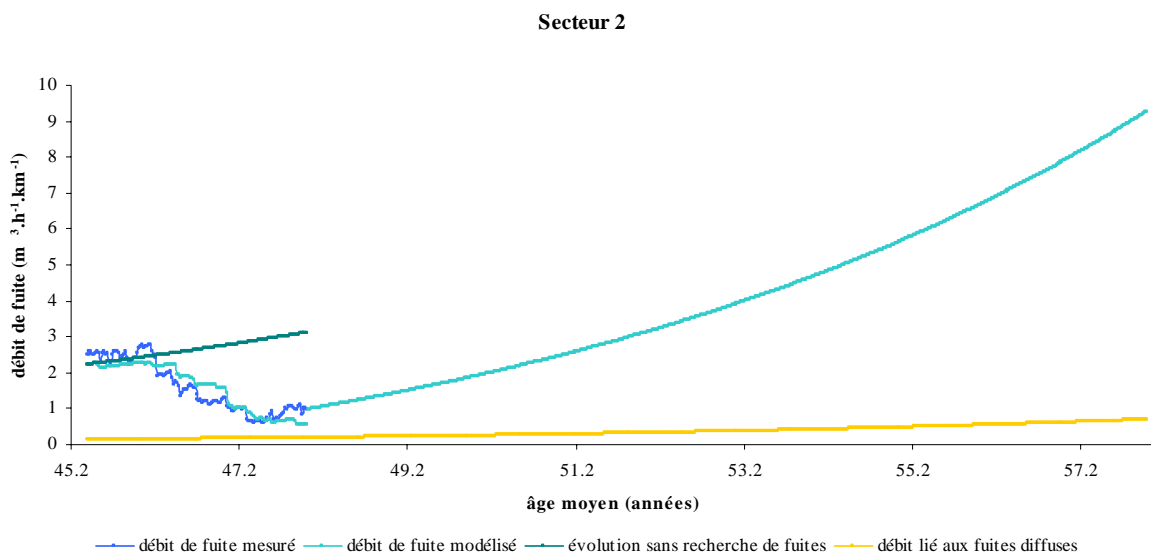


Figure 48. Evolution naturelle du débit de fuite à 10 ans pour le Secteur 2.

La Figure 48 montre qu'au terme de deux ans au-delà de la chronique, le débit de fuite est encore à un niveau relativement bas par rapport à ce qu'il était à l'ouverture de celle-ci. Ceci souligne simplement l'efficacité des réparations sur recherche durant cette période.

Au terme de cinq ans, les pertes dépassent ce qu'elles étaient sept ans et demi auparavant, à t_0 , et ce malgré les efforts de recherche entrepris durant la première partie de la période. Il est important de noter l'accentuation de la hausse du débit de fuite à mesure que le secteur vieillit.

A un horizon de 10 ans, le débit de fuite prend rapidement de l'ampleur avec une croissance très accélérée. Bien évidemment, cette courbe n'est que théorique et il semble inenvisageable qu'un secteur ou qu'un réseau tout entier ne fassent l'objet d'aucune action durant dix ans.

Le débit lié aux fuites diffuses croît, pour sa part, beaucoup plus lentement que le débit global, marquant ainsi la prépondérance des fuites non repérées par rapport aux fuites diffuses.

1.1.3. Evolution prévisible du débit de fuite des secteurs de l'étude

1.1.3.1. Etude du débit global

Le Tableau 22 chiffre les différentes croissances pour le débit de fuite global sur les périodes considérées. La modélisation de l'évolution des débits est entreprise depuis la valeur réellement observée en fin de chronique et non à partir de la valeur modélisée à cette même date.

Ce tableau fournit pour chaque secteur où le calcul des paramètres a été effectué et aux différentes dates t_f , t_f+2 , t_f+5 et t_f+10 ans, les grandeurs suivantes :

- les valeurs du débit de fuite ;
- le rapport de croissance par comparaison à la valeur prise en t_f ;
- le classement des secteurs par ordre croissant des débits de fuite.

Tableau 22. Evolution du débit de fuite global à différents horizons et hiérarchisation (les débits sont exprimés en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$).

débit de fuite global											
Sect.	valeur mesurée en fin de chronique	rang	<i>fin de chronique +2 ans</i>			<i>fin de chronique +5 ans</i>			<i>fin de chronique +10 ans</i>		
			valeur modélisée	rapport	rang	valeur modélisée	rapport	rang	valeur modélisée	rapport	rang
2	0.98	12	1.90	1.95	13	3.82	3.91	13	9.26	9.48	13
3	0.75	6	1.04	1.38	6	1.61	2.13	3	3.08	4.08	6
4	0.54	3	0.74	1.36	1	1.15	2.12	1	2.21	4.08	1
5	0.82	8	1.48	1.81	10	2.96	3.62	12	7.72	9.44	12
6	0.91	9	1.56	1.72	11	2.89	3.17	10	6.48	7.13	10
8	0.80	7	1.02	1.27	4	1.48	1.84	2	2.83	3.53	3
9	0.59	4	1.08	1.83	7	2.15	3.65	9	5.46	9.24	8
10	0.51	1	0.88	1.73	2	1.66	3.28	6	3.99	7.87	7
11	0.94	11	1.58	1.67	12	2.96	3.13	11	7.21	7.63	11
12	0.53	2	1.02	1.94	3	2.15	4.09	8	5.94	11.30	9
16	1.04	13	1.23	1.18	9	1.61	1.55	4	2.70	2.60	2
17	0.91	10	1.18	1.30	8	1.70	1.87	7	2.94	3.23	4
18	0.74	5	1.04	1.41	5	1.62	2.19	5	2.99	4.05	5

Notons tout d'abord que le rapport entre les débits s'étale en t_f de 1 à 2. Nous traduisons cette fourchette assez restreinte par une volonté du gestionnaire ou d'organismes de contrôle de contraindre le débit de fuite dans un certain intervalle. Preuve en est le Secteur 2 (Figure 48), dont le débit est ramené de 2,5 à $0,98 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Le rapport entre les débits en t_f+10 passe par contre de 1 à 4 environ, puisque les valeurs modélisées sont comprises entre 2,21 et $9,26 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Cette augmentation traduit bien la croissance du débit différente selon les secteurs.

De plus, et c'est là l'essentiel, les secteurs les plus distants entre eux en termes de débit ne sont plus les mêmes. Alors qu'en t_f le Secteur 10 était le moins fuyard et le Secteur 16 le plus, en t_f+10 il s'agit respectivement des Secteurs 4 et 2. Ceci prouve encore que d'un secteur à l'autre, l'évolution naturelle du débit de fuite n'est pas similaire.

Le tracé graphique des rangs des différents secteurs pour chaque borne temporelle considérée (t_f , t_f+2 , 5 et 10 ans) est un moyen de mettre l'accent sur l'importance de ce phénomène. La Figure 49 représente cette évolution pour les Secteurs 2, 4, 9, 10 et 16.

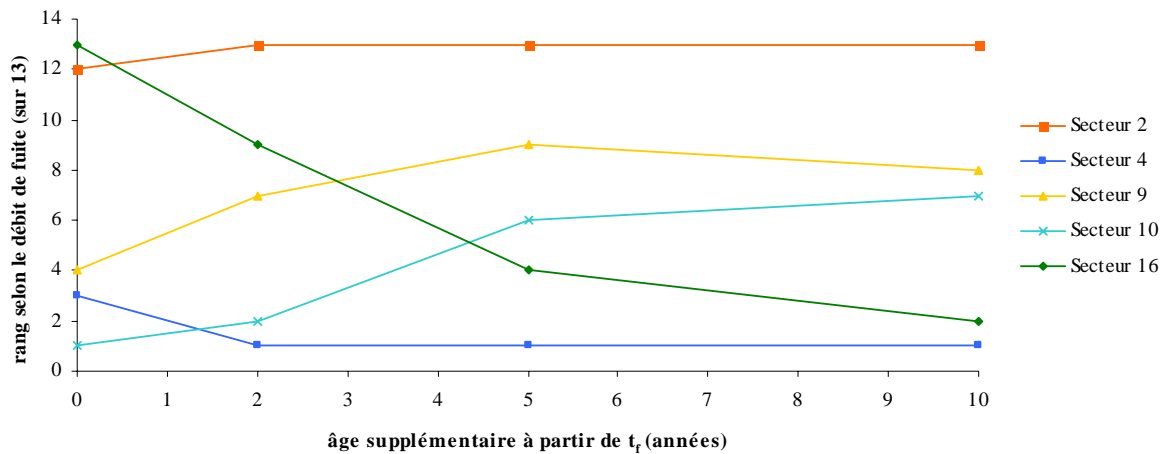


Figure 49. Evolution du classement de différents secteurs au cours du temps, au regard du débit de fuite global.

Les Secteurs 2 et 4 présentent les valeurs extrêmes de débit de fuite à t_f+10 . On peut noter qu'au cours de la période considérée et comparés aux autres secteurs, ils restent en permanence soit en bon état, soit en mauvais état. Ainsi, si les moyens à disposition, nécessairement limités, ne permettent pas d'agir sur tous les secteurs, on pourra négliger le Secteur 4. Au contraire, les premières investigations seront certainement à effectuer sur le Secteur 2 qui représente la source de perte la plus importante quel que soit l'horizon fixé.

Le Secteur 9 évolue dans ce classement de façon non linéaire. Doté d'un niveau de fuite bas en fin de chronique (quatrième rang), il atteint la neuvième place sur le moyen terme puis à l'échéance de dix ans il redescend au huitième rang. Cette augmentation du débit de fuite est bien visible sur la Figure 50.

Le fait que sa position ne croisse pas continûment est lié à la variabilité de la croissance des autres secteurs. Des périodes de simulation plus longues montreraient que l'on atteint tout de même pour tous les secteurs un point d'équilibre dans le classement. A partir du moment où toutes les valeurs de débit de fuite des secteurs sont classées semblablement aux taux d'évolution, alors chaque secteur conserve son rang dans le classement.

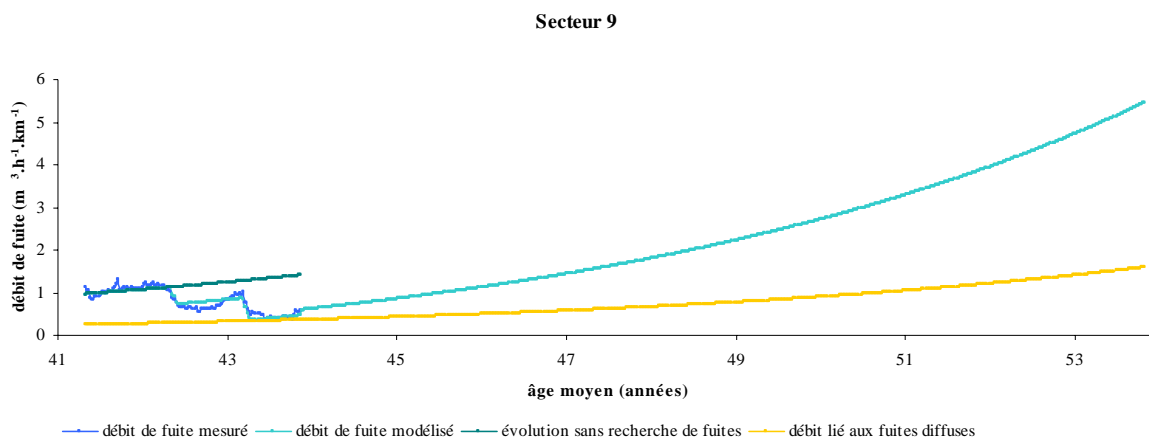


Figure 50. Evolution naturelle du débit de fuite à dix ans pour le Secteur 9.

Les Secteurs 10 et 16 enfin sont caractérisés par des évolutions opposées. Tandis que la situation du premier cité ne cesse de se dégrader au regard de celle des autres secteurs, celle du second s'améliore avec le temps. Ils passent respectivement de la 1^{ère} à la 7^{ème} position et du 13^{ème} et dernier rang au 2nd.

Les représentations de ces deux secteurs sont données Figure 51 et Figure 52. Elles sont construites avec une échelle de débit identique pour bien montrer que la croissance du débit de fuite pour le Secteur 10 est beaucoup plus forte que pour le Secteur 16.

Notons encore que cette observation n'est pas liée à l'âge moyen des secteurs puisqu'il est plus élevé sur le Secteur 16 que sur le Secteur 10.

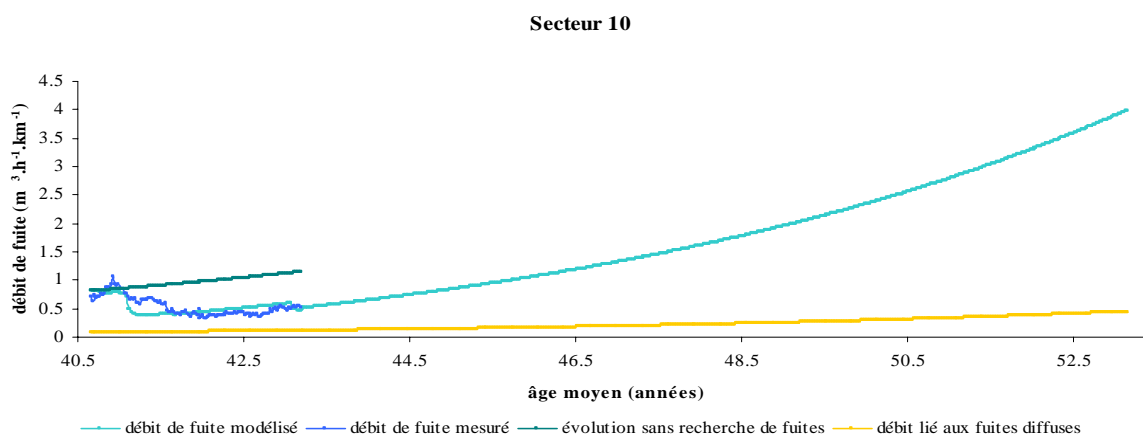


Figure 51. Evolution naturelle du débit de fuite à dix ans pour le Secteur 10.

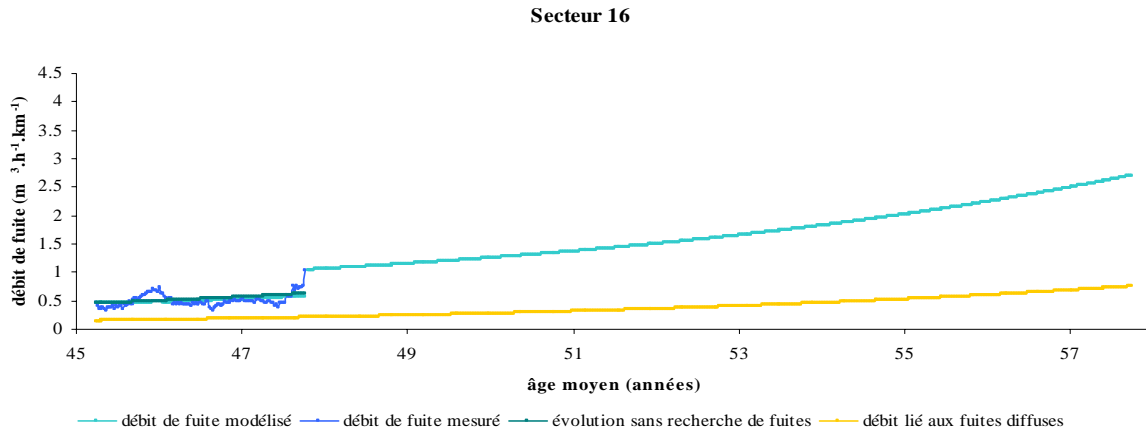


Figure 52. Evolution naturelle du débit de fuite à dix ans pour le Secteur 16.

1.1.3.2. Etude des fuites diffuses

L'évolution du débit lié aux fuites diffuses est également modélisée sur les figures précédentes. La participation de ces fuites au débit de fuite global constitue un phénomène d'assez faible ampleur. Le Tableau 23 montre que leur croissance est beaucoup plus homogène d'un secteur à l'autre que celle du débit global. La variabilité de celui-ci, présentée au Tableau 22, dépend donc essentiellement de celle des fuites non repérées.

Tableau 23. Evolution chiffrée du débit lié aux fuites diffuses à différents horizons et hiérarchisation (les débits sont exprimés en $m^3.h^{-1}.km^{-1}$).

Sect.	valeur modélisée en fin de chronique	rang	débit de fuite lié aux fuites diffuses								
			<i>fin de chronique +2 ans</i>			<i>fin de chronique +5 ans</i>			<i>fin de chronique +10 ans</i>		
			valeur modélisée	rapport	rang	valeur modélisée	rapport	rang	valeur modélisée	rapport	rang
2	0.19	8	0.25	1.30	9	0.36	1.91	9	0.70	3.65	8
3	0.14	5	0.18	1.24	5	0.25	1.73	5	0.43	2.99	4
4	0.19	7	0.23	1.23	7	0.32	1.71	6	0.56	2.96	7
5	0.16	6	0.23	1.38	6	0.36	2.22	8	0.81	4.93	11
6	0.22	11	0.28	1.27	11	0.40	1.82	11	0.72	3.31	9
8	0.08	2	0.10	1.32	2	0.16	2.01	2	0.32	4.04	2
9	0.36	12	0.48	1.35	12	0.75	2.11	12	1.59	4.46	12
10	0.11	4	0.15	1.32	4	0.22	2.01	4	0.45	4.04	5
11	0.09	3	0.12	1.35	3	0.18	2.11	3	0.39	4.46	3
12	0.40	13	0.56	1.40	13	0.93	2.33	13	2.17	5.44	13
16	0.21	9	0.27	1.30	10	0.39	1.91	10	0.75	3.65	10
17	0.21	10	0.25	1.20	8	0.33	1.57	7	0.52	2.45	6
18	0.02	1	0.02	1.20	1	0.03	1.57	1	0.05	2.45	1

Le débit associé à ces fuites diffuses est multiplié en moyenne par 3,75 en dix années sur l'ensemble des secteurs. A cette échéance, sa part dans le débit global n'est plus négligeable. Il dépasse fréquemment le taux de $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Sa valeur absolue devient telle que son élimination permettrait des gains conséquents.

Les Secteurs 12 et 17 présentent des valeurs de croissance respectivement maximale et minimale au terme des dix années sur lesquelles la simulation est menée. Sur le Secteur 12, le paramètre μ est très élevé, voir Tableau 16, tout comme la valeur de d_0 . Ces deux paramètres participent conjointement à la croissance du débit lié aux fuites diffuses. L'explication pour le Secteur 17 tient essentiellement au faible taux d'apparition des fuites diffuses, seulement 0,09, comparativement à la moyenne de 0,13, plus qu'à un passage rapide vers l'Etat 1. En effet, leur durée de vie moyenne sur ce secteur de 26,6 ans est parmi les plus élevées.

1.1.3.3. Conclusion

La croissance du débit lié aux fuites diffuses est un phénomène beaucoup plus lisse et régulier que la croissance du débit de fuite global. Cependant, les niveaux atteints à relativement court terme montrent qu'il ne faut pas négliger ce type de fuites comme source potentielle de réduction des pertes.

De manière globale, l'observation du débit de fuite à un instant donné ne doit pas constituer le seul critère pour guider les actions du gestionnaire. L'évolution de ce débit, très différente dans son amplitude d'un secteur à l'autre, doit être prise en compte pour prioriser à divers horizons les actions de réduction des fuites. Cette hiérarchisation des interventions peut constituer un outil d'aide à la décision important pour le gestionnaire.

Le but de l'exploitant sera de s'opposer à l'évolution naturelle du débit de fuite. Nous proposons donc tout d'abord de reproduire sur les secteurs de l'étude une intensité fictive de recherche de fuites et d'en estimer l'impact sur le débit.

1.2. Simulation d'une intensité efficace de recherche de fuites (IERF)

Dans le cadre de notre étude, nous disposons de données sur le nombre de réparations, sans connaître toute la procédure et la logistique amont dont elles sont issues. Ainsi, il nous est impossible de déterminer la forme du lien entre ces événements de réparations et l'effort consenti pour les obtenir. Nous ne pouvons donc pas parler de classique intensité de recherche de fuites. Afin de pouvoir néanmoins prendre en compte dans le modèle les effets des campagnes de recherche de fuites, nous introduisons le concept d'intensité efficace de recherche de fuites (IERF).

1.2.1. Définition et exemple de calcul

L'IERF se définit par la réduction de débit, exprimée en $\text{m}^3.\text{km}^{-1}.\text{semaine}^{-1}$, consécutive à des opérations de recherche de fuites. La façon dont cette baisse est obtenue n'importe pas. L'IERF sur les périodes modélisées sera systématiquement reliée à l'IERF appliquée durant la chronique d'observations afin de pouvoir donner une signification aux scénarios proposés, en rapport avec la gestion passée.

Sur une période de deux ans au-delà de la chronique, supposons pour le Secteur 3 que nous voulions doubler l'IERF par rapport à ce qu'elle a été au cours de la chronique d'observations de 135 semaines. Pendant celle-ci, 13 réparations, d'un débit de fuite moyen de $q_f=0,51 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, ont été réalisées. Le débit économisé, ramené au kilomètre et à la semaine vaut alors $0,0034 \text{ m}^3.\text{km}^{-1}.\text{semaine}^{-1}$. Nous souhaitons doubler cette intensité. C'est donc $0,0068 \text{ m}^3.\text{km}^{-1}.\text{semaine}^{-1}$ que nous enlèverons chaque semaine à l'augmentation naturelle du débit dans le cadre d'une représentation continue de la recherche.

1.2.2. Formulation de l'IERF

La formulation pratique de l'IERF au sein du modèle trois états peut se faire de deux manières globalement équivalentes, si l'on ne s'intéresse qu'aux valeurs en fin de simulation. Le débit économisé grâce aux réparations peut être réparti de façon continue tout au long de la période de simulation. On peut également affecter arbitrairement à des instants donnés un certain nombre de réparations, ce qui engendre des sauts nets de débit comme pour la reconstitution des chroniques. Quelle que soit la méthode choisie, la valeur finale de débit de fuite sera

identique. Par souci de lisibilité des courbes, nous avons opté le plus souvent pour une représentation continue de l'IERF au cours des semaines modélisées. Ceci permet également de moyenniser les actions et d'en montrer les effets dans le temps, semaine après semaine, parallèlement à la croissance naturelle du débit.

Nous expliquons ici dans le détail pour le Secteur 3 les différents procédés pour doubler l'IERF sur une période de deux ans.

Le principe utilisé pour la répartition en continue a été présenté dans la paragraphe précédent et correspond à celui mis en œuvre par la suite pour les scénarios proposés.

Si l'on souhaite procéder par épisodes de recherche, approche plus réaliste dans les faits, le raisonnement n'est pas plus compliqué. Dans ce cas, nous devons simplement retenir que doubler l'IERF revient à considérer de manière fictive que 26 réparations ont été effectuées durant les 135 semaines de la chronique. Si l'on ramène maintenant cette période à celle que l'on a retenue pour notre simulation, à savoir deux ans, alors c'est 20,3 réparations que nous devons prendre en compte (bien entendu, les réparations sont nécessairement entières : il faut bien voir que la grandeur qui compte réellement est le débit, produit du nombre de ces réparations et d'un débit unitaire). Le débit total économisé sur deux ans est de $0,71 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Si l'on impute, par exemple, la première moitié de cette valeur six mois après la fin de la chronique, l'autre moitié encore six mois après, alors à chacune de ces deux dates il faut soustraire au débit calculé pour le scénario passif une quantité de $0,35 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$.

L'évolution naturelle du débit se poursuit ensuite normalement, selon l'équation (4.1).

La Figure 53 montre les résultats de cette simulation et la différence entre les deux approches (« intensité*2 répartition continue » et « intensité*2 répartition 2 épisodes »), qui, bien qu'aboutissant au même point, présentent des situations intéressantes.

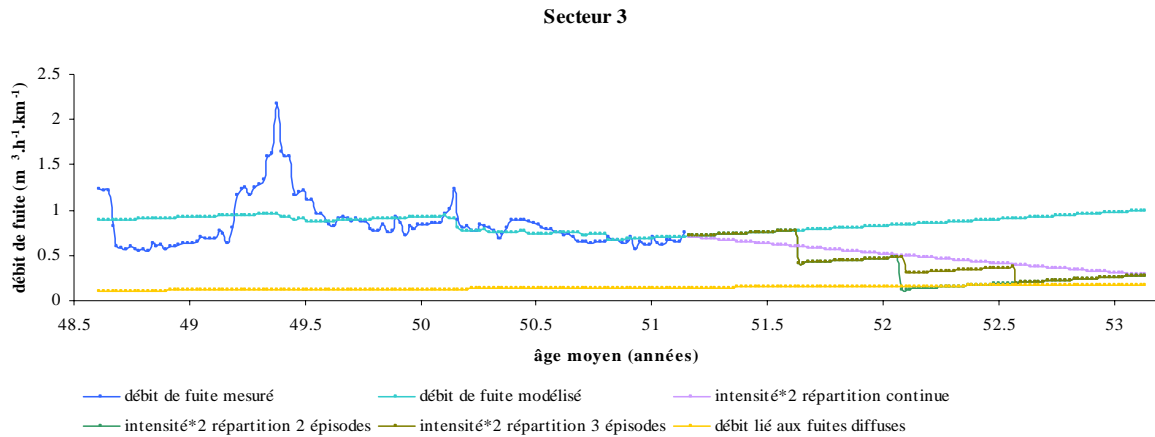


Figure 53. Simulation de différentes répartitions temporelles des opérations de recherche de fuites sur le Secteur 3.

Nous observons qu'au terme de deux ans, la multiplication par deux de l'IERF a permis de ramener le débit de fuite global à un niveau très proche de celui lié aux fuites diffuses.

Nous remarquons aussi que la courbe de débit global représentée par la série « intensité*2 répartition 2 épisodes » passe anormalement sous la courbe du débit lié aux fuites diffuses au début de la 52^{ème} année. Ceci s'explique par le trop grand nombre de réparations effectuées simultanément à un âge moyen du secteur pas assez élevé. En effet, à l'instant où la seconde vague de réparations est réalisée, soit un an après la chronique, nous avons $N_1(t_f + 52) = 32,44$. Le nombre de réparations modélisées dans le cas de l'étude atteint : 13 (pendant la chronique) + $20,3$ (sur la période de deux ans) = $33,3$. Nous comprenons donc pourquoi le débit global et celui lié aux fuites diffuses se croisent. Physiquement, il est impossible de réparer toutes ces fuites à cet instant précis, étant donné qu'elles ne sont pas encore apparues. Pour résoudre cette difficulté, nous proposons la courbe issue de la série « intensité*2 répartition 3 épisodes », toujours sur la Figure 53. Les réparations sont faites en trois fois : 50% du total après six mois, 25 % après un an et les 25 % restants après un an et demi. Les sauts sont moins importants et les courbes ne se croisent plus. Cette représentation constitue donc une approche plus réaliste.

Cette rapide discussion sur la difficulté de choisir une répartition adaptée des réparations lorsque l'on souhaite les distribuer aléatoirement dans le temps renforce notre idée de travailler avec des effets répartis continûment sur toute la période de simulation.

1.2.3. Modélisation de la recherche de fuites comme possible outil de gestion

L'intérêt de la modélisation réside ici dans le fait qu'elle nous permet de dire avec quels moyens, en termes d'IERF, obtenir un comportement souhaité du débit de fuite. Nous distinguons ici trois types d'évolution pouvant être envisagés comme objectifs de gestion :

- maintenir un niveau constant d'IERF, sous des contraintes financières imposées par exemple ;
- garder un niveau de fuite égal à ce qu'il était en fin de chronique ;
- faire décroître un débit de fuite qui augmentait.

Un ou plusieurs de ces scénarios ont été implémentés sur l'ensemble des secteurs. Nous présentons ici quelques résultats marquants pour certains d'entre eux.

1.2.3.1. Maintien d'un niveau constant d'IERF par rapport à une période passée

Nous supposons que le gestionnaire maintient une IERF identique à celle qu'elle était durant la chronique d'observations. Trois cas distincts sont alors envisageables :

- le débit de fuite chutait sur la période précédente, il continue à chuter sur la période simulée ;
- le débit de fuite chutait sur la période précédente, il subit une hausse sur la période simulée ;
- le débit de fuite s'accroissait sur la période précédente, il continue à s'accroître (cas trivial, non développé).

Dans le cas du Secteur 6 (Figure 54), l'IERF maintenue, sur un secteur où la tendance du débit était déjà à la diminution, permet en l'espace de deux années d'éliminer pratiquement toutes les fuites non repérées. Elle laisse le débit lié aux fuites diffuses comme seule composante du débit de fuite global.

La solution qui consiste à diviser l'IERF par deux, moins contraignante, assure tout au long de ces deux ans que le débit reste aux environs de la valeur qu'il avait atteinte en fin de chronique.

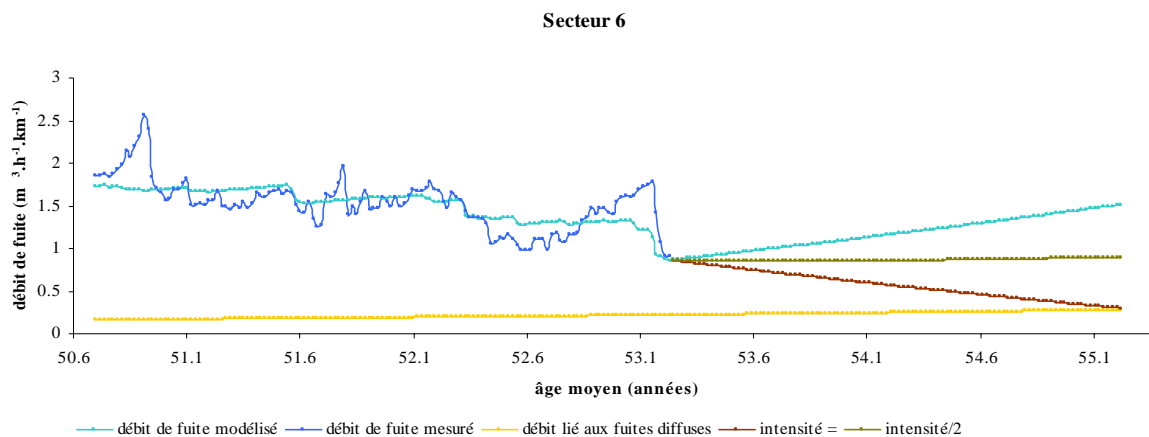


Figure 54. Gestion de la recherche de fuites sur le Secteur 6.

Le Secteur 5 est lui aussi caractérisé par une baisse globale du débit de fuite sur la période de données. Il passe de 1,16 à 1,05 m³.h⁻¹.km⁻¹. Cette chute est cependant moins marquée que pour le Secteur 6. L'observation de la Figure 55 montre que la pente de la courbe correspondant à l'IERF égale n'est plus négative, et le débit qui diminuait précédemment se caractérise maintenant par une tendance à l'augmentation.

Ceci traduit l'accentuation de la hausse naturelle du débit en raison du vieillissement du secteur. Alors que les réparations suffisaient à la contenir sur la période de 35,5 à 38 ans d'âge moyen, elles ne suffisent plus, à intensité équivalente, sur la période de 38 à 40 ans. Ainsi, un ensemble d'actions efficaces à un moment donné ne l'est pas nécessairement indéfiniment. Le scénario « intensité*2 », également tracé sur la Figure 55, permet par contre de poursuivre la diminution du débit amorcée.

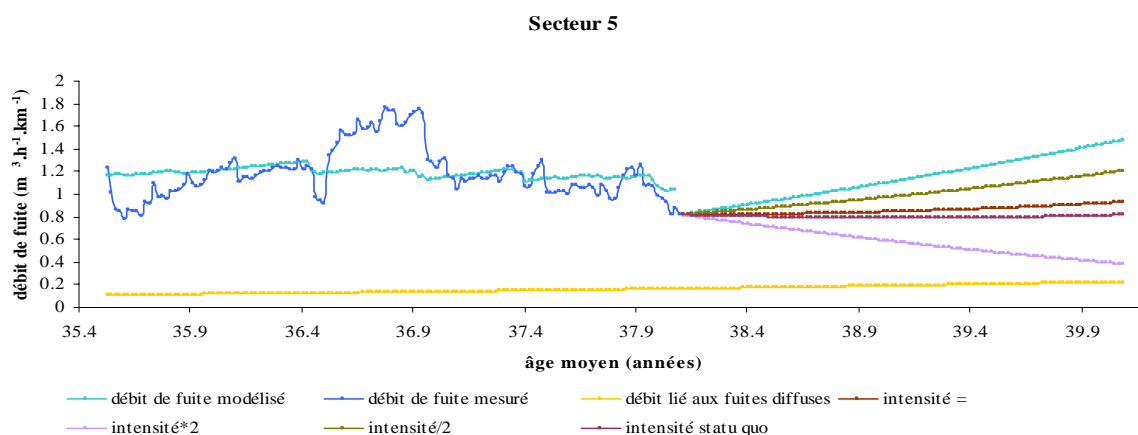


Figure 55. Gestion de la recherche de fuites sur le Secteur 5.

1.2.3.2. Maintien d'un niveau de fuite

Nous considérons maintenant que le gestionnaire a pour objectif de garder un niveau de fuite constant sur une période donnée.

Sur le Secteur 18 (Figure 56), la valeur du débit de fuite en fin de chronique peut être jugée satisfaisante, au moins comparativement à ce qu'elle était à t_0 . On peut imaginer que le gestionnaire veuille simplement maintenir cette valeur en appliquant une intensité dite de *statu quo*. Les calculs montrent que l'IERF à appliquer, pendant les deux années sur lesquelles a lieu la simulation et pour que la situation du secteur au regard des fuites globales ne se dégrade pas, peut être 3,3 fois inférieure à celle de la période précédente. Une intensité divisée par deux suffit même à continuer à faire décroître le débit de fuite, au moins pour les deux premières années simulées.

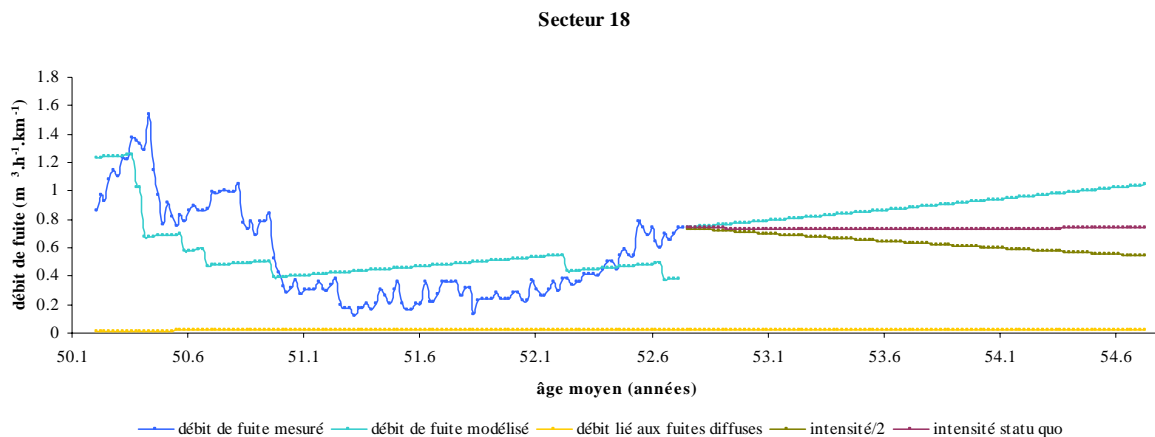


Figure 56. Gestion de la recherche de fuites sur le Secteur 18.

1.2.3.3. Inversion d'une croissance de débit

Il se peut que sur certains secteurs, bien que des opérations de recherche aient eu lieu, le débit de fuite ait augmenté durant la période d'observations. Le gestionnaire peut alors chercher à faire diminuer ce débit de fuite en intensifiant les campagnes de recherche de fuites.

Sur le Secteur 8 représenté en Figure 57, les opérations de recherche n'ont pas suffi à contrer la hausse naturelle du débit. Nous voyons que l'IERF doublée permet à peine de maîtriser le débit de fuite. Il faut noter qu'elle était de très faible ampleur sur la chronique, puisque seulement neuf réparations sur la quarantaine de fuites non repérées théoriquement présentes y ont été effectuées, et que le débit unitaire moyen associé est seulement de $0.18 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Ce n'est qu'en quadruplant l'IERF que l'effet sur le débit devient visiblement bénéfique.

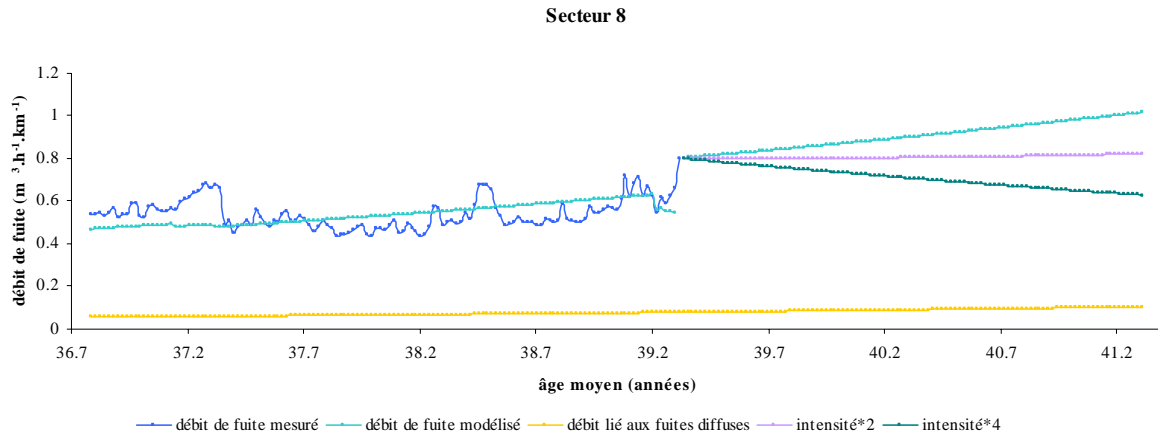


Figure 57. Gestion de la recherche de fuites sur le Secteur 8.

1.2.3.4. Difficultés d'interprétation et conclusion

Le modèle trois états, grâce au concept d'IERF, permet donc d'élaborer et de représenter différentes stratégies d'action dans le domaine de la recherche de fuites.

La situation du secteur à un moment donné, ainsi que l'évolution de son débit de fuite, calculée par le modèle, dicteront l'intensité avec laquelle mener les actions. Des contraintes de moyens (financiers, matériels) impacteront sur la répartition temporelle de la recherche de fuites, répartition temporelle qu'il n'est pas difficile d'inclure dans les scénarios proposés. Tous ces résultats doivent cependant être considérés avec précaution.

Une difficulté importante subsiste en effet dans l'application des scénarios : il faut veiller à ne jamais descendre sous le seuil constitué par le débit lié aux fuites diffuses, comme c'est le cas sur la Figure 58 représentant le Secteur 2. Elle montre clairement qu'à IERF équivalente, la recherche de fuites permet d'atteindre très vite, en moins de deux ans, la limite basse du débit de fuite global. La situation ne peut plus être améliorée par de la recherche de fuites : il convient d'essayer de la rendre pérenne ou d'abaisser ce seuil, nous verrons dans la partie 2 de ce chapitre que le renouvellement peut y aider.

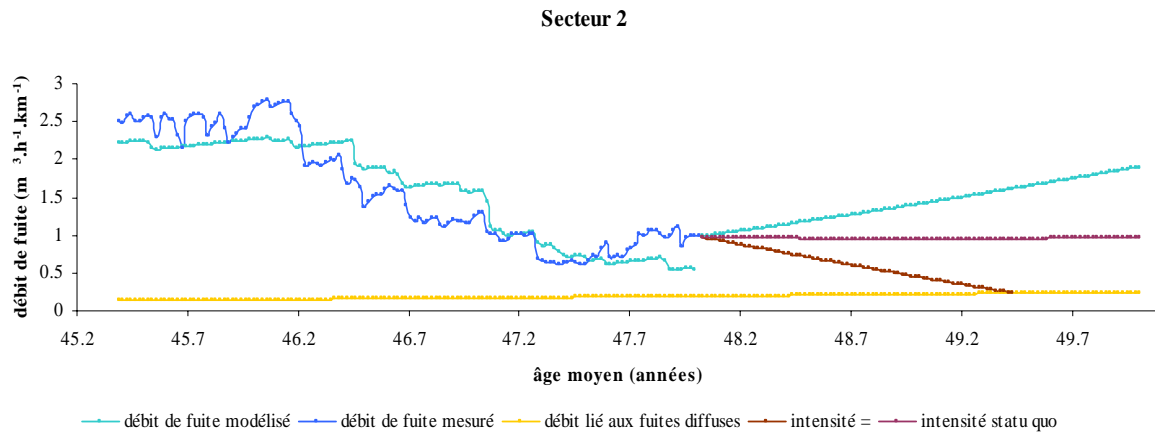


Figure 58. Gestion de la recherche de fuites sur le Secteur 2.

Le tracé du débit de fuite pour l’IERF constante pose problème. Cette possibilité d’atteindre avec facilité le seuil des fuites diffuses, et donc de modéliser une élimination totale des fuites non repérées, est liée à la formulation de l’IERF. En effet, elle est considérée par définition comme reproductible d’une période à l’autre. Si cette hypothèse est vraie lorsque les fuites non repérées sont nombreuses sur un secteur, elle ne l’est certainement plus lorsqu’elles sont rares et que le débit global de fuite est proche du débit de fuites diffuses. Les mêmes causes ne produisent plus les mêmes effets et il devient certainement très difficile d’éliminer les dernières fuites présentes sur le réseau.

Une étude du lien entre effort économique de recherche de fuites et effectivité des réparations pour un débit de fuite donné peut lever cette difficulté. La connaissance de ce lien est indispensable pour faire de ce modèle un outil de gestion opérationnel.

Dans le paragraphe suivant, nous abordons les conséquences des opérations de renouvellement sur le débit de fuite.

2. ETUDE DE L'IMPACT DU RENOUELEMENT DES CONDUITES ET DES BRANCHEMENTS SUR LE DEBIT DE FUITE

Par définition, les fuites diffuses ne peuvent pas être repérées par des opérations de recherche de fuites. La croissance de leur débit, bien que relativement lente devant celle du débit des fuites non repérées, tend à faire augmenter cette part si rien n'est fait pour l'en empêcher. Il arrive nécessairement un moment où le gain potentiel représenté par une chute du débit lié aux fuites diffuses n'est plus négligeable : soit parce que la valeur absolue de ce débit entraîne des volumes de perte conséquents, soit parce que la recherche de fuites a atteint ses limites. Cette recherche ne peut en effet à elle seule faire tendre le débit de fuite vers une valeur nulle. Le renouvellement des conduites et des branchements, unique action efficace pour la réduction des fuites diffuses, s'impose donc comme solution d'appoint à la recherche de fuites, notamment quand celle-ci ne permet plus de limiter les pertes. Nous allons voir dans cette partie que, bien plus qu'une solution d'appoint, le renouvellement constitue un levier majeur de réduction des fuites.

Le renouvellement modélisé ne porte pas uniquement sur les conduites, il s'applique également aux branchements. En effet, ceux-ci constituent très certainement une cause majeure dans l'explication du débit lié aux fuites diffuses, comme l'a montré l'exemple du paragraphe 4.5.3.6 au chapitre 3. Ainsi, quand par la suite nous évoquons un pourcentage de linéaire de conduites remplacé il faut considérer que ce terme regroupe deux éléments distincts. Tout d'abord, il comprend effectivement la longueur totale de corps de conduites renouvelée. Mais il prend aussi en compte le changement des branchements présents sur la canalisation. Le linéaire de conduites remplacé inclut donc tous les éléments de la conduite. On peut ainsi espérer un maximum d'efficacité pour l'opération entreprise et des gains importants associés au renouvellement.

Par facilité nous écrirons plus simplement « renouvellement du linéaire de conduites » pour caractériser l'ensemble de l'opération de renouvellement.

Après avoir explicité la mise en œuvre du processus et la façon dont le renouvellement se répercute sur l'ensemble du modèle, nous présentons quelques scénarios possibles et leurs conséquences, à la fois sur le débit lié aux fuites diffuses mais aussi sur le débit global.

2.1. Mise en place pratique

Dans le cadre de la gestion du patrimoine, le choix des tronçons à renouveler se fait principalement selon des critères liés aux casses, donc aux interruptions de service, et aux opportunités de voirie. L'approche présentée ici explore l'effet d'un nouveau critère, la réduction des fuites. En ce sens, le modèle peut contribuer à motiver certains choix de renouvellement.

2.1.1. Répercussions du renouvellement sur l'âge moyen du secteur

Si un certain pourcentage du linéaire des conduites du secteur est renouvelé, l'âge moyen de celui-ci en est évidemment affecté. Renouveler, c'est faire diminuer l'âge moyen du secteur, dans des proportions à définir. Il en résulte un impact sur le débit de fuite puisque les équations constitutives du modèle trois états prennent en compte l'évolution de l'âge moyen. Dès lors que l'âge moyen des conduites renouvelées est connu, on peut aisément calculer le nouvel âge moyen du reste du secteur.

Supposons un secteur d'âge moyen a_1 avant renouvellement. Supposons encore que le renouvellement porte sur un pourcentage x du linéaire de ce secteur, et que l'âge moyen des conduites concernées soit a_x . Bien que la distribution réelle des âges des conduites soit inconnue, nous supposons que le couple (x, a_x) existe. Tous les scénarios évoqués par la suite seront, en ce sens, considérés comme possibles.

Ces grandeurs liées au renouvellement connues, on peut en déduire très simplement le nouvel âge moyen a_2 du reste du secteur.

Nous savons que :

$$a_1 = (1-x)a_2 + xa_x \tag{4.2}$$

Nous en déduisons alors :

$$a_2 = \frac{a_1 - xa_x}{1-x} \tag{4.3}$$

Immédiatement après l'épisode de renouvellement, nous disposons d'un secteur composé d'un pourcentage $1-x$ de conduites d'âge moyen a_2 et d'un pourcentage x de conduites d'âge nul. Cet état n'est valable que pour une semaine puisque l'incrémentation des âges semaine par semaine est toujours de rigueur pour le calcul des différents débits et grandeurs du modèle.

Prenons l'exemple du Secteur 3 dont l'âge moyen en fin de chronique est de 51,14 ans. Imaginons renouveler instantanément 5 % du linéaire de ce secteur. L'âge moyen de ces 5 % renouvelés (branchements associés renouvelés comme expliqué en introduction) est de 80 ans. Alors, l'âge moyen des 95 % restants n'est plus 51,14 ans mais :

$$a_2 = \frac{51.14 - 0.05 \times 80}{1 - 0.05} = 49.62$$

Le Secteur 3 est, après le renouvellement, caractérisé par un âge moyen de 49,62 ans sur 95 % du linéaire et un âge nul sur les 5 % renouvelés.

La manifestation du renouvellement sur les variables participant au modèle est donc la réduction de l'âge moyen du secteur. Pour la calculer précisément, nous devons connaître le pourcentage et l'âge moyen des conduites renouvelées. Le modèle utilise ensuite le nouvel âge moyen pour simuler les effets du renouvellement.

2.1.2. Renouvellement et élimination des fuites

2.1.2.1. Effet sur les fuites diffuses

Toutes les fuites diffuses qui se situent sur la partie renouvelée sont éliminées. En revanche, celles qui se trouvent sur la partie du secteur non renouvelée ne sont physiquement pas affectées.

La distinction de deux catégories d'âge (à savoir a_2 pour la partie inchangée et 0 pour le linéaire renouvelé) entraîne cependant au sein du modèle un rééquilibrage du nombre de fuites diffuses. Celui-ci reflète en fait la réalité du secteur avant renouvellement où les fuites diffuses étaient plus nombreuses sur les parties les plus vieilles du secteur, en accord avec les équations du modèle trois états. Comme a_2 est généralement inférieur à a_1 , sauf éventuellement lors de travaux pour opportunité de voirie, il en résulte que le modèle calcule

un nombre de fuites diffuses inférieur à ce qu'il était précédemment sur la partie non renouvelée. Il s'agit d'un ajustement du nombre de fuites rendu possible par le gain de précision sur l'âge moyen. Il ne remet pas en cause la justesse des calculs de la partie précédente, fondés, eux, sur un âge moyen global et donc unique.

Afin de pouvoir calculer le nombre de fuites diffuses avec le nouvel âge moyen et en considérant toujours l'équation (3.25), nous formulons l'hypothèse que le nombre total de fuites diffuses présentes à $t = a_1$ est égal à la somme des fuites diffuses présentes sur les x % du secteur âgés de a_x et de celles présentes sur les $(1-x)$ % âgés de $a_2 = \frac{a_1 - xa_x}{1-x}$. Cette approximation s'écrit comme suit :

$$N_0(a_1) \approx xN_0(a_x) + (1-x)N_0\left(\frac{a_1 - xa_x}{1-x}\right) \quad (4.4)$$

La linéarité supposée, qui assimile l'exponentielle présente dans la formulation de $N_0(t)$ à un segment de droite, n'est valable que dans un domaine restreint. Nous devons alors considérer un faible taux de renouvellement x ainsi qu'un âge moyen renouvelé a_x proche de l'âge moyen global a_1 du secteur.

Dès lors, le nombre de fuites diffuses peut être calculé sur les différentes parties du secteur en utilisant l'ensemble des relations précédentes.

2.1.2.2. Effet sur les fuites non repérées

Un autre effet du renouvellement s'observe sur la part du débit liée aux fuites non repérées. La recherche de fuites n'agit que sur la catégorie précise des fuites non repérées. Le renouvellement, bien qu'en premier lieu adapté à l'élimination des fuites diffuses, agit également sur les fuites non repérées.

Le raisonnement est identique à celui tenu pour les fuites diffuses. Les fuites non repérées présentes sur la partie renouvelée sont éliminées. Le nouvel âge moyen entraîne, s'il est inférieur à l'ancien, une réduction du nombre des fuites non repérées sur le reste du secteur. Cette diminution est une conséquence de la nouvelle réalité du secteur induite par la redistribution des âges moyens.

Nous ne pouvons toutefois pas appliquer directement la réduction d'âge moyen pour le calcul de N_1 , nombre de fuites non repérées, comme nous le faisons pour N_0 , nombre de fuites diffuses.

En effet, le nombre de fuites non repérées présentes en fin de chronique n'est pas égal à $N_1(t_f)$ mais à $N_1(t_f) - R_1(t_f)$, l'ensemble des réparations effectuées durant la chronique d'observations devant être pris en compte. Si nous ne le faisons pas, alors la réduction sur $N_1(t)$ induite par la diminution d'âge moyen serait exagérée.

Par exemple, si $N_1(t_f)$ vaut 50, la chute d'âge moyen à partir de t_f peut ramener la valeur de N_1 à 40, en fonction du pourcentage et de l'âge moyen du linéaire renouvelé. Seulement, si durant la période d'observation considérée, 38 réparations ont été effectuées, le nombre de fuites réellement présentes au moment du renouvellement n'est plus que de 12. On comprend que la diminution d'âge moyen qui entraîne 10 suppressions de fuites non repérées supplémentaires, alors que vraisemblablement une partie mineure du linéaire a été renouvelée, n'est pas acceptable.

Il faut en fait considérer le nombre réel de fuites présentes à l'instant où l'on prévoit d'effectuer le renouvellement. Dans notre exemple, ce nombre est de 12. Pour connaître le nombre de fuites éliminées lors du renouvellement, il faut d'abord se placer à l'âge moyen correspondant à un nombre de fuites non repérées égal à 12. Ceci correspond à une importante translation vers $t = 0$. A partir de cet âge, on soustrait la durée gagnée lors du renouvellement et on obtient le nouveau nombre de fuites présentes, 11 par exemple. Ainsi, le gain sur le nombre de fuites non repérées n'est plus que de 1 dans le cadre de l'exemple fictif choisi, 1 sur le pourcentage non renouvelé auquel il ne faudra pas oublier d'ajouter les fuites éliminées sur la partie remplacée.

2.1.3. Nouvelle formulation du débit de fuite et schéma bilan

Les nombres de fuites diffuses et non repérées sont calculés comme expliqué précédemment. Pour avoir accès au débit global de fuite du secteur après renouvellement, il est nécessaire de les associer à leurs débits unitaires respectifs et de les distribuer selon les pourcentages du linéaire affectés des deux âges moyens différents.

Sachant qu'un pourcentage x du secteur a été renouvelé à l'instant t_r , que l'âge moyen avant renouvellement vaut a_1 et a_2 après pour la partie non renouvelée du secteur, le débit global de fuite s'écrit donc à t_r :

$$\begin{aligned}
 Q(t_r) &= xQ(0) + (1-x)Q(t_r - (a_1 - a_2)) & (4.5) \\
 &= x[q_0N_0(0) + q_1N_1(0)] + (1-x)[q_0N_0(t_r - (a_1 - a_2)) + q_1N_1(t' - (a_1 - a_2))]
 \end{aligned}$$

où t' est l'âge moyen du secteur pour lequel le nombre de fuites non repérées est égal à :

$$N_1(t') = N_1(t_r) - R_1(t_r) \quad (4.6)$$

Le débit de fuite à un instant donné s'écrit ensuite en ajoutant le nombre de semaines correspondant, soit à $t=0$ pour la partie neuve, soit à $t=t_r$ pour la partie non renouvelée. Les composantes du débit sur chaque partie du secteur évoluent sur deux échelles de temps différentes mais s'incrémentant simultanément du même pas. Ces deux échelles sont finalement regroupées pour les tracés graphiques qui reflètent l'évolution du débit au cours du temps.

Le schéma explicatif représenté en Figure 59 résume la démarche en traitant l'exemple du Secteur 9. 3 % du linéaire est remplacé, l'âge moyen des conduites renouvelées est de 60 ans. On peut suivre sur trois niveaux l'évolution au cours du temps du Secteur 9, matérialisé sur le schéma par S9, à tous les âges moyens marquants : avant renouvellement, au moment où il a lieu avec la séparation en deux de S9, mais aussi après. Le sens des flèches indique l'évolution temporelle des différentes composantes du débit.

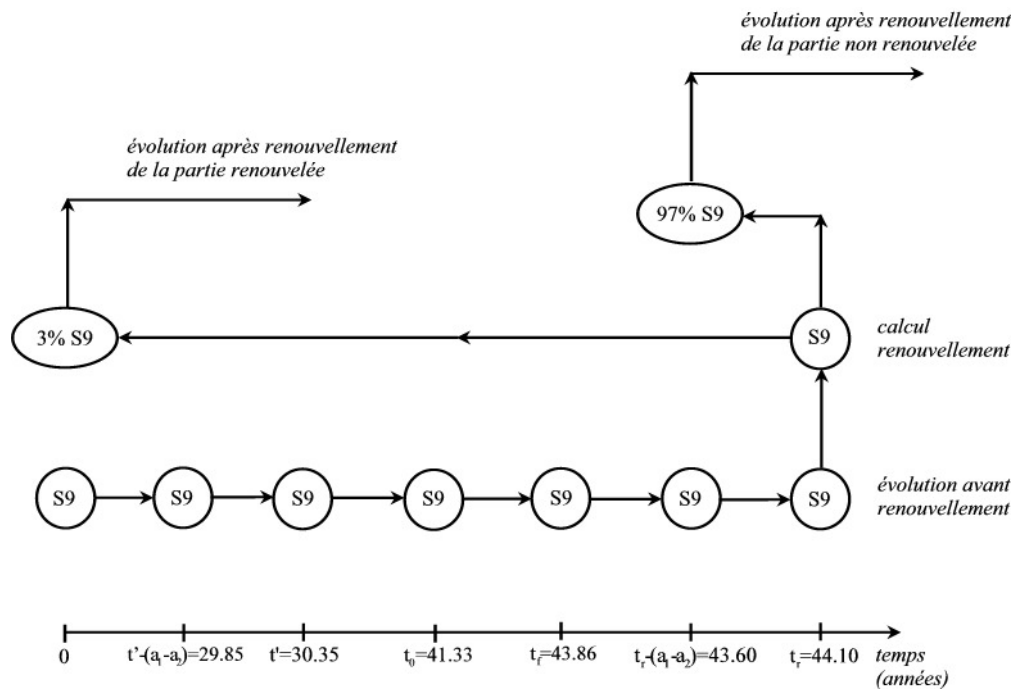


Figure 59. Etapes de la mise en place du renouvellement au sein du modèle trois états : exemple du Secteur 9.

2.2. Scénarios de renouvellement

Dans un premier temps, nous nous attachons à montrer graphiquement la variété des possibilités de renouvellement sur quelques exemples. Les effets sur les débits de fuite associés sont présentés. Nous étudions dans un second temps l'influence sur les débits de fuite du pourcentage de linéaire renouvelé et de l'âge des conduites remplacées.

Pour rendre bien visibles les effets du renouvellement et la façon dont il agit sur le débit de fuite, nous présentons souvent des scénarios que nous savons exagérés, rarement appliqués dans la réalité. Ils sont toutefois nécessaires pour valider et comprendre l'outil issu du modèle trois états. Alors que les opérations de renouvellement sont plus de l'ordre du pourcent voire moins (0,6 % par an en moyenne en France ces dernières années), nous avons raisonné pour notre part plus généralement sur la base d'un renouvellement de 10 % du linéaire qui permet de mieux apprécier les effets sur le débit lié aux fuites diffuses. Nous présenterons toutefois en fin de chapitre des cas beaucoup plus réalistes.

2.2.1. Exemples

2.2.1.1. Secteur 2 : double effet du renouvellement

- Scénario de renouvellement :
 - linéaire renouvelé en un épisode unique trois mois après t_f : 10 %
 - âge moyen des conduites renouvelées : 60 ans

La Figure 60 présente la reconstitution de la chronique de mesures et l'évolution des débits de fuite après renouvellement.

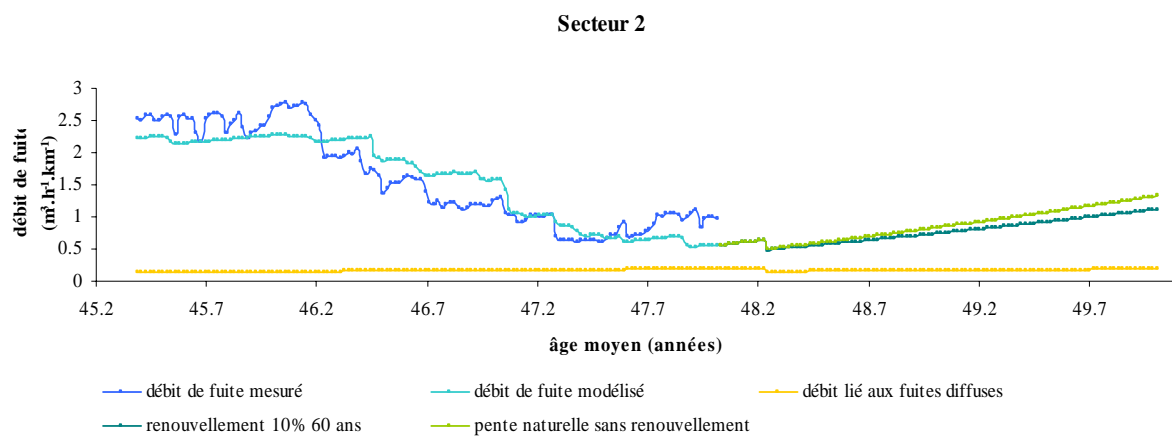


Figure 60. Scénario de renouvellement appliqué au Secteur 2, 10 % du linéaire, 60 ans d'âge.

Le rajeunissement du secteur pour les 90 % du linéaire non affectés atteint 1,3 ans environ, tandis que les 10 % renouvelés voient leur âge moyen devenir nul. Le renouvellement se matérialise sur les courbes de débit modélisé par un faible saut, comparable à ceux consécutifs à des opérations de recherche de fuites. La différence essentielle avec la recherche de fuites réside dans le fait que la part liée aux fuites diffuses subit elle aussi une chute, en raison du renouvellement. Certes, l'amplitude de cette baisse n'est pas très grande, mais il faut bien voir que sur ce secteur précis les fuites diffuses sont à un niveau relativement faible. Nous verrons d'autres exemples où la chute est plus marquée.

L'économie sur le débit global est de $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ et de $0,03 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ sur les fuites diffuses, soit respectivement des gains de 15,6 % et 15,4 % par rapport aux débits avant renouvellement. Si ce gain est supérieur au pourcentage du linéaire renouvelé, c'est simplement parce que les conduites remplacées ont un âge moyen supérieur à l'âge moyen global du secteur.

Il est important de noter que la diminution de l'âge moyen du secteur a pour effet une baisse de la croissance naturelle du débit de fuite. En effet, après renouvellement, le débit augmente moins vite, son taux d'accroissement étant lié à l'âge des conduites. Le tracé intitulé « pente naturelle sans renouvellement » sur la Figure 60 illustre bien cette remarque.

L'effet du renouvellement est donc double. Instantanément, il fait chuter le débit de fuite dans des proportions dépendant du linéaire et de l'âge des conduites renouvelées. Dans son prolongement, la hausse naturelle du débit est ralentie : les effets du renouvellement se répercutent à long terme.

2.2.1.2. Secteur 6 : balance entre gain sur l'âge moyen et date du renouvellement

➤ Scénario 1 de renouvellement :

- linéaire renouvelé en un épisode unique six mois après t_f : 6 %
- âge moyen des conduites renouvelées : 60 ans
- tracé « renouvellement 6 % 60 ans »

➤ Scénario 2 de renouvellement :

- linéaire renouvelé en trois épisodes égaux séparés de six mois chacun à partir de t_f+6 mois : 6 %
- âge moyen des conduites renouvelées : 60 ans
- tracé « renouvellement 3*2 % 60 ans »

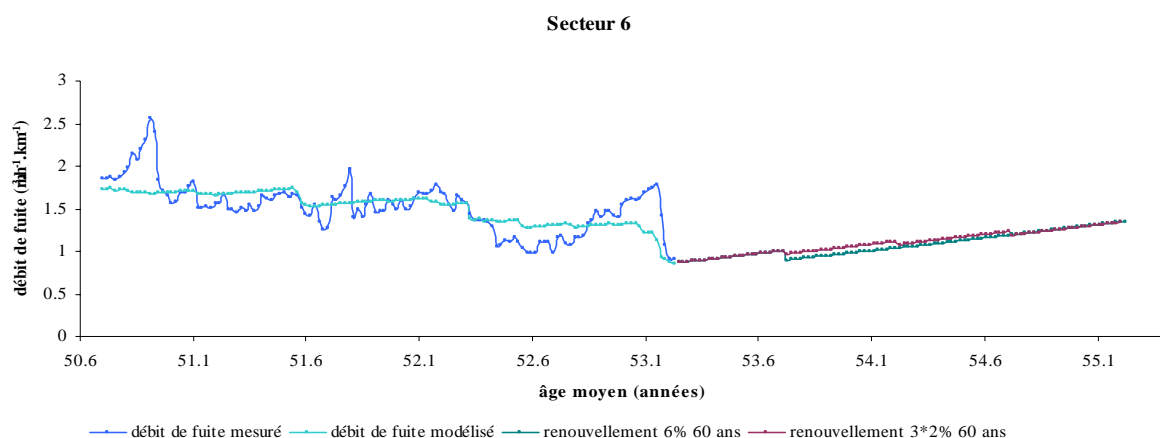


Figure 61. Scénarios de renouvellement unique ou en plusieurs épisodes appliqués au Secteur 6.

On remarque, Figure 61, que si les 6 % sont renouvelés en plusieurs fois, alors la situation finale du débit de fuite semble être identique à celle obtenue si l'on procède en une seule fois. Pourquoi cette constatation, et surtout est-elle justifiée d'un point de vue physique ?

Les trois épisodes de renouvellement sont identiques. En toute logique, plus on renouvelle tard dans la vie du réseau, à longueur et âge moyen des conduites renouvelées équivalents, moins les gains sont importants.

La formule (4.3) qui donne le nouvel âge moyen de la partie non renouvelée nous aide à comprendre le phénomène. Si on calcule $a_1 - a_2$, pour connaître l'âge « gagné » grâce au renouvellement, on obtient :

$$a_1 - a_2 = \frac{x(a_x - a_1)}{1 - x} \quad (4.7)$$

x et a_x étant constants, on voit clairement que si a_1 , l'âge moyen à t_r , augmente, alors l'âge gagné grâce au renouvellement diminue.

La courbe de la Figure 62 matérialise bien cette observation. Elle reprend le Scénario 1 présenté pour le Secteur 6. Si l'on met en place ce scénario de renouvellement 30 ans après la date de pose moyenne des conduites, il permet de réduire l'âge moyen du secteur de deux ans environ. Aux alentours de 45 ans, le gain n'est plus que d'une année, et il devient nul lorsque l'âge moyen atteint 60 ans, puisque l'on renouvelle des conduites dont l'âge est égal à 60 ans. Le gain peut ensuite devenir négatif si l'âge moyen des conduites renouvelées est inférieur à l'âge moyen du secteur, lors d'opportunités de voirie par exemple.

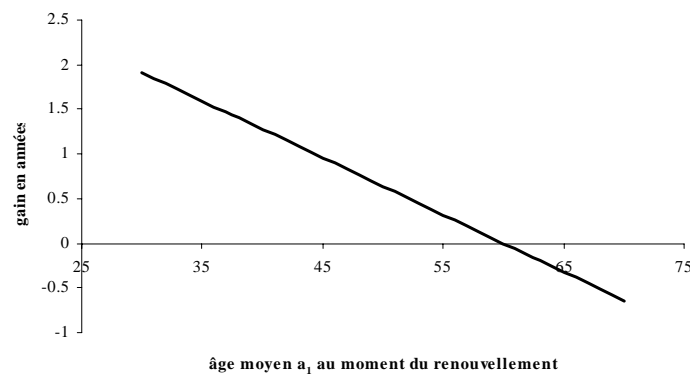


Figure 62. Relation entre gain réalisé par le renouvellement et âge moyen des conduites à t_r .

Ainsi, le fait de renouveler en trois fois distinctes implique qu'au fur et à mesure des opérations, le gain en terme d'âge est de plus en plus faible. Les réductions de débit associées à ces diminutions d'âge doivent *a priori* suivre cette tendance. La Figure 61 montre pourtant que les gains semblent identiques alors que les diminutions d'âge sont plus faibles pour les deux derniers épisodes de renouvellement que pour le premier.

Cependant, il ne faut pas oublier que, lorsque l'âge augmente, la croissance du débit s'accroît. Ainsi, parmi deux scénarios de renouvellement qui feraient gagner le même âge à la partie du secteur intacte, le plus efficace en termes de gains absolus serait celui effectué au moment où le réseau est le plus âgé. En termes de gains relatifs, c'est-à-dire en pourcentage de débit récupéré grâce au renouvellement, mieux vaut par contre situer le renouvellement le plus tôt possible dans le temps.

Pour notre exemple, la réduction d'âge moyen semble équivalente à la hausse de croissance du débit et les deux phénomènes se compensent. L'âge gagné à chaque épisode de renouvellement diminue, mais ce renouvellement permet d'éliminer plus de fuites puisque situé dans une période de croissance plus forte.

En conclusion, disons simplement qu'il existe une balance entre croissance naturelle du débit de fuite et âge moyen gagné lors du renouvellement. Les gains absolus en dépendent, tout comme la représentation graphique.

2.2.1.3. Secteur 9 : renouvellement de 50% du linéaire

- Scénario de renouvellement :
 - linéaire renouvelé en un épisode unique trois mois après t_f : 50 %
 - âge moyen des conduites renouvelées : 44.1 ans, soit l'âge moyen du secteur à t_r

Après le remplacement des conduites, le secteur se compose pour ce scénario d'un linéaire scindé en deux : pour moitié, les canalisations sont neuves, pour l'autre moitié elles ont conservé l'âge précédent. Le débit de fuite global ou le débit lié aux fuites diffuses sont donc logiquement divisés par deux. Les pertes sont en effet, dans le cadre du modèle trois états, nulles pour les conduites neuves, seule une moitié du secteur fuit au même niveau que précédemment. La Figure 63 montre bien l'effet de ce scénario et les gains associés.

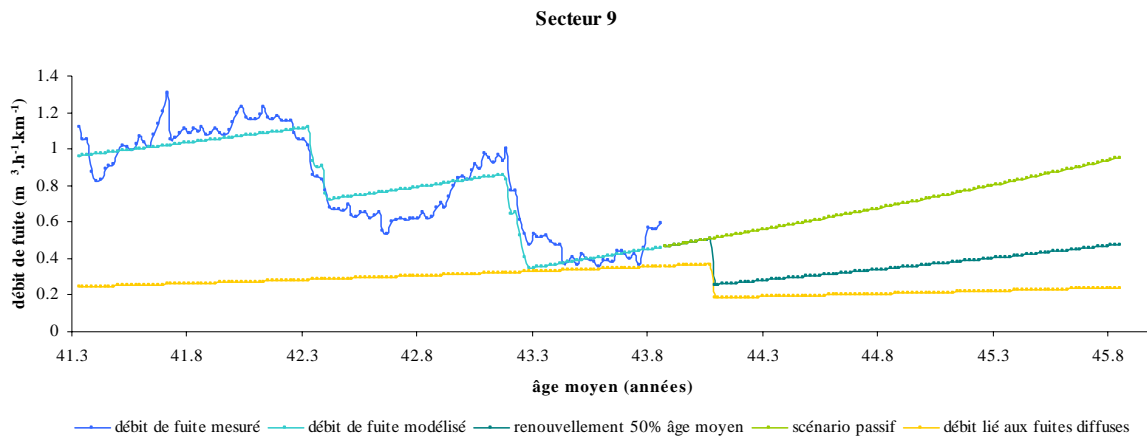


Figure 63. Scénario de renouvellement appliqué au Secteur 9, 50 % du linéaire, âge moyen.

Remarquons ici encore que l'écart grandissant entre le débit issu du scénario passif et celui résultant du scénario de renouvellement traduit bien le ralentissement de la croissance naturelle du débit de fuite dû au rajeunissement global du réseau.

Enfin nous pouvons noter la part prépondérante de la diminution des fuites diffuses dans la réduction globale du débit. La quasi totalité des fuites non repérées ayant été réparées en fin de chronique pour ce secteur, il est tout à fait logique que le renouvellement influe peu sur cette part et concentre ses effets sur les fuites diffuses.

2.2.1.4. Secteur 16 : gain sur les fuites diffuses

- Scénario de renouvellement :
 - linéaire renouvelé en un épisode unique trois mois après t_f : 10 %
 - âge moyen des conduites renouvelées : 60 ans

La Figure 64 montre, comme pour le Secteur 9, le rôle essentiel du renouvellement dans la réduction des fuites. Elle met en évidence un gain conséquent sur la part liée aux fuites diffuses, gain que les opérations de recherche de fuites ne permettent pas.

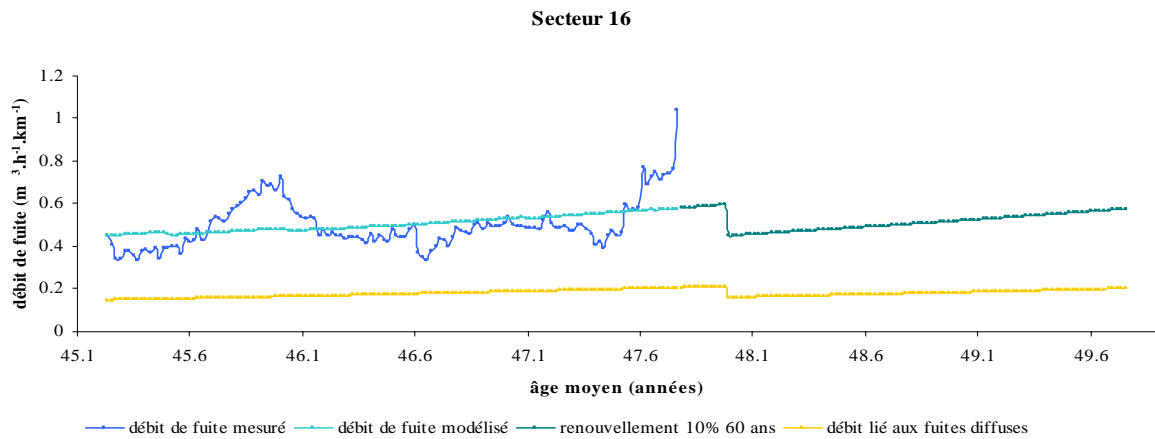


Figure 64. Scénario de renouvellement appliqué au Secteur 16, 10 % du linéaire, 60 ans d'âge.

2.2.1.5. Secteur 8 et Secteur 17 : importance de l'écart entre âge moyen du secteur et âge moyen des conduites renouvelées

- Scénario de renouvellement, identique pour les deux secteurs :
 - linéaire renouvelé en un épisode unique trois mois après t_f : 10 %
 - âge moyen des conduites renouvelées : 60 ans

Les deux exemples présentés ici soulignent la forte dépendance des gains par rapport à l'âge moyen des conduites remplacées comme le montrent les Figure 65 et Figure 66.

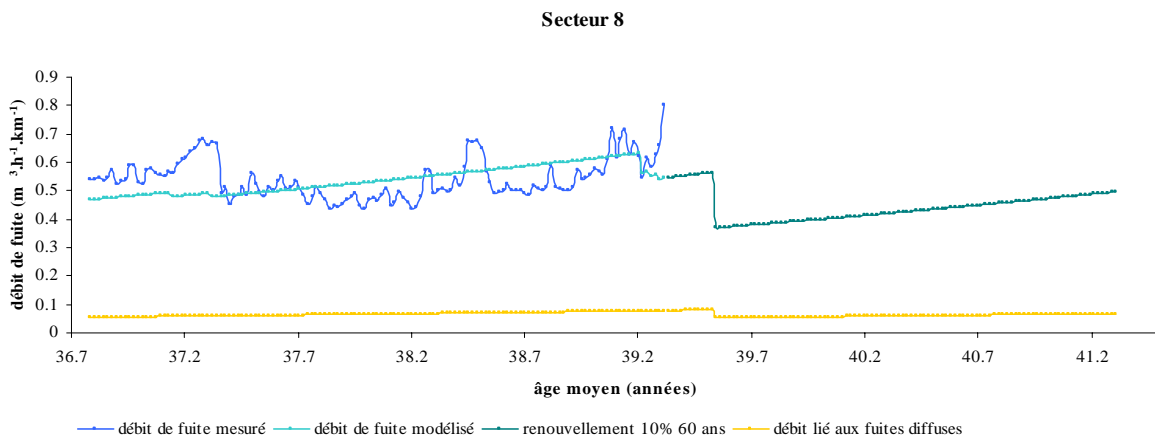


Figure 65. Scénario de renouvellement appliqué au Secteur 8, 10 % du linéaire, 60 ans d'âge.

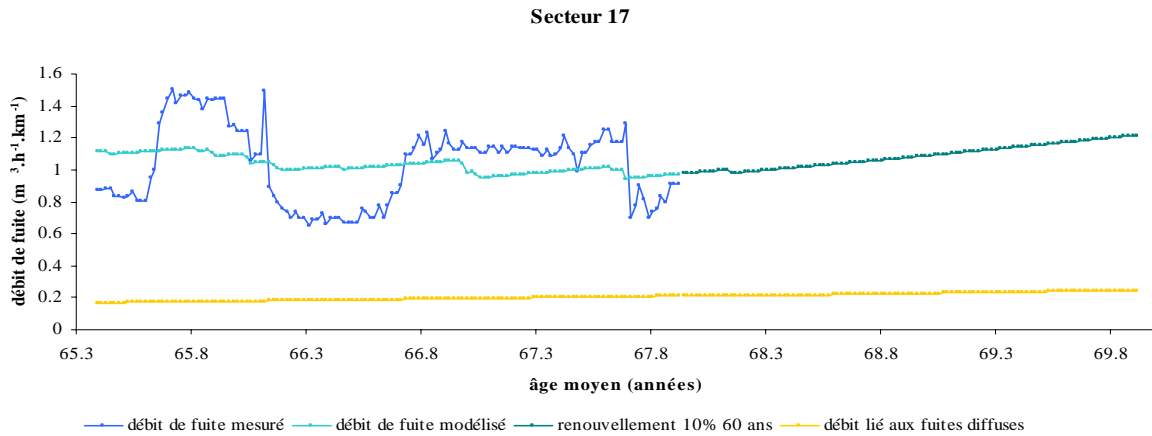


Figure 66. Scénario de renouvellement appliqué au Secteur 17, 10 % du linéaire, 60 ans d'âge.

Pour le Secteur 8, la réduction du débit de fuite global est très élevée. Il perd en effet 34,5 % de sa valeur entre les semaines consécutives séparées par le renouvellement. Pour le Secteur 17, alors que le même scénario est mis en œuvre, la chute de débit ne dépasse guère les 2 %.

L'âge moyen du Secteur 8, au moment du renouvellement, est de 39,5 ans. Il passe à 37,25 ans pour les 90 % non renouvelés. Pour le Secteur 17 il est de 68 ans au moment du renouvellement, puis passe après remplacement des conduites à 69 ans pour les 90 % non renouvelés.

Dans le premier cas, on renouvelle des conduites plus vieilles que l'âge moyen, alors que dans le second ce sont des conduites plus jeunes que l'âge moyen du secteur qui sont remplacées. Les fuites se concentrant majoritairement sur les parties âgées du réseau, par définition du modèle trois états, on comprend donc que très peu de débit de fuite peut être récupéré dans le cas du Secteur 17. Il n'est cependant pas surprenant d'observer une faible baisse du débit de fuite sur la Figure 66, même si l'âge moyen des 90 % du linéaire inchangé augmente. En effet, bien que ces 90 % soient devenus plus fuyards qu'ils ne l'étaient auparavant par un rééquilibrage des âges, 10 % du secteur ne fuient plus du tout.

Tout renouvellement de conduites mène nécessairement à une réduction du débit de fuite. Les deux paramètres qui en déterminent l'intensité sont la proportion du linéaire renouvelé mais aussi, et peut-être surtout, l'âge moyen des conduites remplacées. Les paragraphes suivants apportent des précisions à ce propos.

2.2.2. Influence du pourcentage de linéaire renouvelé

Les gains sur le débit de fuite sont d'autant plus importants que le pourcentage de linéaire renouvelé est grand. Le faisceau de courbes, présenté Figure 67, confirme ce point particulier avec l'exemple du Secteur 10. Toutes les courbes ont été tracées pour un âge moyen renouvelé de 50 ans.

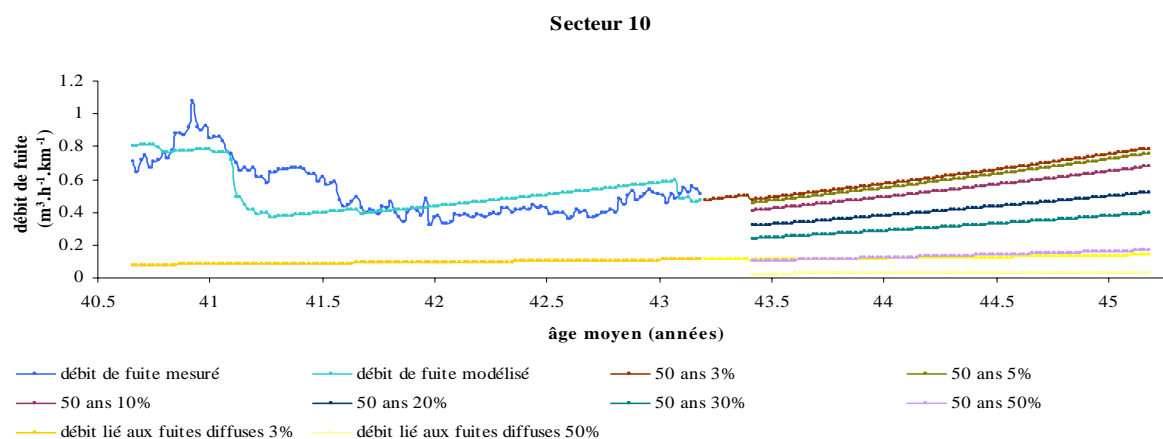


Figure 67. Diminution du débit global en fonction du linéaire renouvelé, à âge moyen renouvelé constant : exemple du Secteur 10.

Alors que pour 3 % et 5 % du linéaire remplacé, l'effet du renouvellement est modéré, il devient visiblement plus important à partir de 10 %. Dans ce type de scénario où l'âge moyen renouvelé n'est pas égal à l'âge moyen global, le rapport entre le taux renouvelé et le gain effectif en matière de fuites n'est pas de 1, contrairement à ce qui a été exposé dans l'exemple du Secteur 9 (Figure 63). Comme l'âge renouvelé (50 ans) est supérieur à t_r (43,5 ans ici), le pourcentage de gain est supérieur au pourcentage remplacé. Des conduites parmi les plus fuyardes sont en effet éliminées. Le Tableau 24 illustre bien cette remarque.

Notons encore qu'il existe un pourcentage de renouvellement, à âge renouvelé constant, au-delà duquel les gains deviennent négligeables. C'est le prolongement de l'amorce de tassement observée sur la Figure 68. Ce point reprend en fait les constatations relatives aux courbes tracées au paragraphe 4.5.4.4 du chapitre 4 : jusqu'à un certain âge moyen, le secteur est très peu fuyard. Cependant, pour atteindre ce seuil il faut renouveler des pourcentages de linéaire extrêmement importants, très largement supérieurs aux taux de renouvellement pratiqués habituellement. Il ne s'agit donc pas d'une problématique rencontrée lors de la gestion opérationnelle des réseaux.

Tableau 24. Pourcentage de gain sur le débit de fuite associé au pourcentage renouvelé (Secteur 10, âge moyen des conduites renouvelées : 50 ans).

pourcentage renouvelé	pourcentage de gain
3	6
5	9
10	20
20	37
30	53
50	80

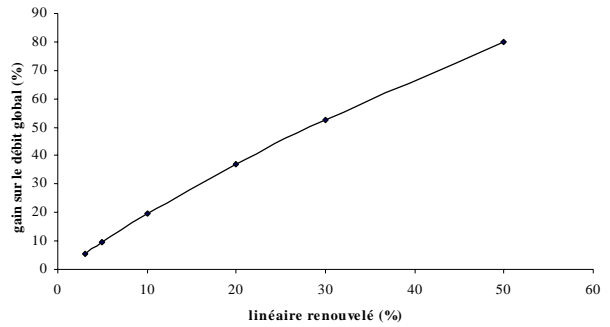


Figure 68. Pourcentage de gain sur le débit de fuite en fonction du pourcentage de linéaire renouvelé (Secteur 10, âge moyen des conduites renouvelées : 50 ans).

2.2.3. Influence de l'âge moyen renouvelé

L'étude a été menée sur l'ensemble des secteurs mais seul l'exemple du Secteur 11 est présenté. Comme pour l'impact du pourcentage de linéaire renouvelé, décrit précédemment, nous avons construit un faisceau de courbes qui mettent en évidence la très forte dépendance du débit de fuite vis-à-vis de l'âge moyen renouvelé. La Figure 69 matérialise sept scénarios différents, ayant toutefois pour point commun de considérer un renouvellement quantitatif unique de 10 % du linéaire total. La plage d'âges moyens balayée va de 40 à 100 ans, sachant que l'âge moyen du Secteur 11 avant renouvellement est de 40,25 ans.

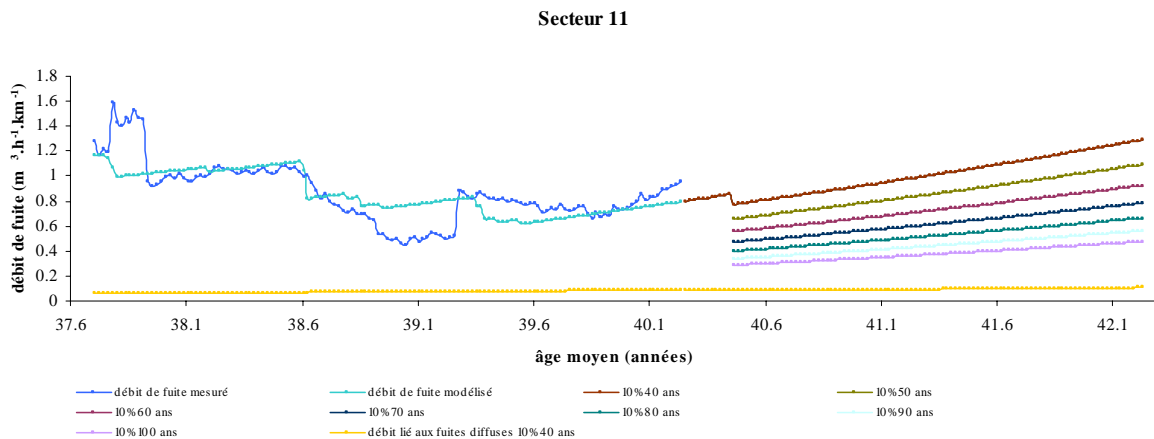


Figure 69. Diminution du débit global en fonction de l'âge moyen des conduites renouvelées, à linéaire renouvelé constant : exemple du Secteur 11.

Le premier tracé, intitulé « 10 % 40 ans », matérialise les effets simples d'un renouvellement conduisant à un nouveau secteur dont seuls 10 % du linéaire sont neufs, le reste du secteur

étant identique en termes d'âge moyen. Les gains représentent donc simplement 10 % du débit de fuite avant renouvellement.

Tous les autres tracés montrent qu'à mesure que l'on remplace des conduites de plus en plus vieilles, les gains deviennent de plus en plus conséquents.

Les cas étudiés incrémentent l'âge moyen renouvelé avec un pas de temps de 10 ans. L'observation des courbes montre que si la croissance des gains est très forte au départ, elle ralentit nettement pour les valeurs d'âge très élevées, l'espace entre les courbes du faisceau se rétrécissant. A partir d'un certain couple (pourcentage renouvelé ; âge des conduites renouvelées) caractéristique du renouvellement appliqué, le nouvel âge moyen des conduites restantes est tel que ces conduites fuient très peu.

Enfin, remarquons que le faisceau est beaucoup plus large au terme des deux ans de simulation au-delà de la chronique d'observations qu'au moment du renouvellement. Le ralentissement de la croissance du débit de fuite est un effet secondaire et bénéfique du renouvellement ici encore souligné.

Les chutes sur le débit de fuite global, celles sur le débit lié aux fuites diffuses n'étant pas représentées, sont très marquées. Les gains atteignent presque 70 % du débit de fuite initial comme le montre le Tableau 25. La Figure 70 met en évidence pour sa part le tassement déjà repéré sur la Figure 68.

Tableau 25. Pourcentage de gain sur le débit de fuite associé à l'âge moyen des conduites renouvelées (Secteur 11, 10 % du linéaire renouvelé).

âge moyen renouvelé (années)	pourcentage de gain
40	9
50	23
60	35
70	45
80	53
90	60
100	67

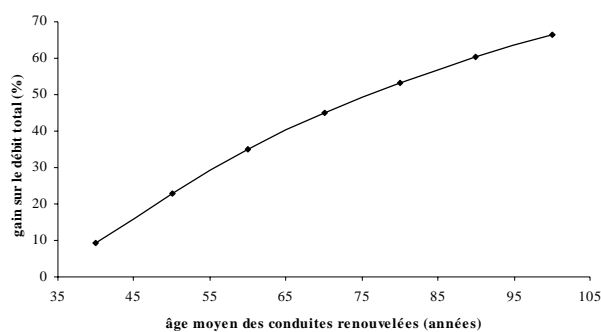


Figure 70. Pourcentage de gain sur le débit de fuite en fonction de l'âge moyen des conduites renouvelées (Secteur 11, 10 % du linéaire renouvelé).

Nous notons que comparativement au Tableau 24, relatif au pourcentage de linéaire renouvelé, le pourcentage de gain sur le débit augmente plus vite avec les variations de l'âge moyen renouvelé. En effet, doubler le pourcentage renouvelé revenait à peu près à doubler les gains, alors qu'ici doubler l'âge moyen renouvelé conduit à des effets bien plus grands sur le

débit. Si l'on passe de 40 à 80 ans, alors les gains sont multipliés par six environ, par trois si l'on considère les âges moyens 50 et 100 ans. L'âge moyen des conduites renouvelées semble donc être le facteur prépondérant des chutes de débit suite à des opérations de renouvellement.

2.2.4. Influence relative du linéaire et de l'âge moyen des conduites renouvelées

A partir de l'équation (4.3) et en posant :

$$a = \frac{a_2}{a_1} \text{ et } a_0 = \frac{a_x}{a_1} \tag{4.8}$$

où a et a_0 sont des grandeurs sans dimension, il vient :

$$a = \frac{1 - x \frac{a_x}{a_1}}{1 - x} = \frac{1 - xa_0}{1 - x} \tag{4.9}$$

Les dérivées partielles de a par rapport aux variables a_0 et x s'écrivent :

$$\frac{\partial a}{\partial a_0} = \frac{-x}{1 - x} \tag{4.10}$$

$$\frac{\partial a}{\partial x} = \frac{1 - a_0}{(1 - x)^2} \tag{4.11}$$

Nous cherchons à vérifier que la quantité $\frac{\partial a}{\partial a_0}$ est supérieure à $\frac{\partial a}{\partial x}$, ce que nous avons sous-entendu à la fin du paragraphe précédent. Si cette information est vraie, alors a , mais aussi et surtout a_2 qui nous intéresse ici, dépendront plus de l'âge moyen des conduites renouvelées que du pourcentage de linéaire remplacé. La condition requise est la suivante :

$$\frac{\partial a}{\partial a_0} > \frac{\partial a}{\partial x} \Rightarrow x(1 - x) < a_0 - 1 \tag{4.12}$$

Le tracé de la fonction $y = x(1-x)$ est représenté Figure 71 sur l'intervalle $[0;1]$ de variation de la variable x .

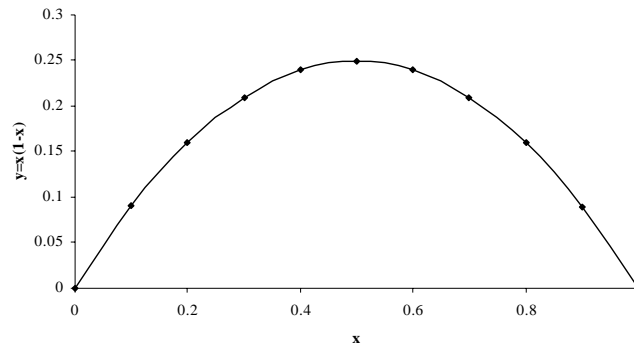


Figure 71. Représentation graphique de la fonction $y=x(1-x)$.

Ainsi, la valeur maximale prise par cette fonction est $y(0,5) = 0,25$. Nous obtenons donc dans le cas le plus défavorable $0,25 < a_0 - 1$, soit :

$$a_x > 1,25a_1 \tag{4.13}$$

Si l'on considère maintenant que le pourcentage de linéaire renouvelé, c'est à dire x , ne dépassera jamais 10% du linéaire total du secteur, alors la relation (4.13) devient :

$$a_{x\%} > (1 + y(0,1))a_1 = 1,09a_1 \tag{4.14}$$

Dans le cadre du modèle trois états, il est donc plus intéressant de concentrer les efforts sur la recherche des conduites les plus vieilles plutôt que de chercher à renouveler une grande partie du linéaire. C'est du moins le cas, d'après les calculs précédents, à partir du moment où l'on renouvelle des conduites plus vieilles d'environ 10 % au minimum que l'âge moyen du secteur.

Le paragraphe suivant, au travers de deux exemples, décrit une façon de composer renouvellement et recherche et montre les performances d'une telle gestion. Il met ainsi en évidence comment il est possible de maintenir le débit de fuite à un niveau fixé.

3. UNE GESTION OPTIMALE : RECHERCHE DE FUTITES ET RENOUVELLEMENT

Jusqu'ici, nous avons considéré séparément les deux types d'action pour mieux en apprécier les effets individuels sur le débit de fuite. La recherche exclusive comme moyen de réduire et de contenir les fuites demande une attention constante du gestionnaire, et n'empêche pas la croissance du débit de fuite. Le renouvellement seul, même ciblé sur les conduites les plus vieilles, nécessite trop d'efforts financiers pour qu'un linéaire suffisant soit remplacé. C'est pourquoi, la bonne gestion des fuites passe nécessairement par une utilisation conjointe de ces deux types d'action.

3.1. Conditions d'application des scénarios

Etablissons quelques règles préalables à la mise en place de scénarios couplant recherche de fuites et renouvellement. L'intérêt principal de la méthode est qu'elle ne nécessite pas un renouvellement quantitatif important. Nous choisissons donc de ne pas renouveler plus de 1 % du linéaire du secteur par an. Ce taux peut vraisemblablement convenir à certaines contraintes économiques imposées.

Nous procédons d'abord au renouvellement, puis à la recherche de fuites. Elle n'a plus, dans ce cas, qu'à être concentrée sur le linéaire non remplacé.

La gestion d'un réseau en matière de fuites doit nécessairement s'appuyer sur un objectif. La première question est alors de choisir à quel horizon imposer ce but. Un objectif à cinq ans nous semble être raisonnable, c'est donc sur cette durée que nous avons mené l'étude. Partant du principe de renouveler 1 % du secteur tous les ans, nous procédons donc à cinq épisodes de renouvellement. Au terme de chacun d'entre eux, nous simulons des opérations de recherche de fuites. La recherche, pour plus de réalisme, a été matérialisée par des événements ponctuels. Nous avons ici considéré trois campagnes annuelles. De plus, nous avons conservé le principe d'IERF, explicité au paragraphe 1.2.1 de ce chapitre.

Enfin, nous avons dû mettre en place des objectifs intermédiaires. En effet, le scénario de renouvellement étant choisi, avec quelle intensité conduire ensuite la recherche de fuites ? Il est possible de procéder « à l'aveugle » durant les quatre premières années. Au cours de la cinquième on peut alors accentuer ou diminuer la recherche pour atteindre l'objectif, mais cette solution n'est pas satisfaisante. Il semble plus approprié d'établir des objectifs intermédiaires afin d'être guidé chaque année dans les opérations de recherche de fuites à

entreprendre. Ainsi, à partir d'une stratégie de renouvellement donnée, l'IERF est facilement déterminée si elle est associée à des objectifs à atteindre.

3.2. Scénarios de gestion raisonnée pour les Secteurs 5 et 6

3.2.1. Choix des secteurs et échéancier des objectifs

Le Tableau 22 du paragraphe 1.1.3 de ce même chapitre met en évidence que cinq ans après la fin de la chronique, si aucune action n'est entreprise au cours de cette période, les Secteurs 5 et 6 sont parmi les secteurs les plus fuyards avec respectivement des pertes de $2,96 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}.\text{km}^{-1}$ et $2,89 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}.\text{km}^{-1}$. Il nous a donc semblé opportun de nous intéresser en priorité à ces secteurs.

Les Tableau 26 et Tableau 27 détaillent pour chaque année les scénarios mis en application respectivement pour le Secteur 5 et le Secteur 6, en particulier les objectifs de débit de fuite à atteindre et les renouvellements programmés. La grandeur t_f correspond toujours au temps à la fin de la chronique d'observations. Il est à noter que les valeurs de débit fournies ne coïncident pas exactement avec les valeurs fournies au Tableau 22. En effet, pour ces scénarios nous avons considéré la valeur modélisée et non la valeur mesurée en fin de chronique, ce qui explique les faibles écarts de débit observés.

Tableau 26. Objectifs et mise en place du scénario de gestion pour le Secteur 5.

horizon	objectif ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}.\text{km}^{-1}$)	valeur observée ou atteinte ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}.\text{km}^{-1}$)	renouvellement aux dates imposées	recherche de fuites dans l'intervalle
			<i>scénario</i>	<i>IERF</i>
t_f		1.05	1% 70 ans	
t_{f+1}	1		1% 70 ans	<i>à déterminer</i>
t_{f+2}	1		1% 70 ans	<i>à déterminer</i>
t_{f+3}	1		1% 70 ans	<i>à déterminer</i>
t_{f+4}	1		1% 70 ans	<i>à déterminer</i>
t_{f+5}	1	3.19		<i>à déterminer</i>

Tableau 27. Objectifs et mise en place du scénario de gestion pour le Secteur 6.

horizon	objectif ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}.\text{km}^{-1}$)	valeur observée ou atteinte ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}.\text{km}^{-1}$)	renouvellement aux dates imposées	recherche de fuites dans l'intervalle
			<i>scénario</i>	<i>IERF</i>
t_r		0.86	1% 80 ans	<i>à déterminer</i>
t_{r+1}	0.80		1% 75 ans	<i>à déterminer</i>
t_{r+2}	0.85		1% 70 ans	<i>à déterminer</i>
t_{r+3}	0.9		1% 65 ans	<i>à déterminer</i>
t_{r+4}	0.95		1% 60 ans	<i>à déterminer</i>
t_{r+5}	1	2.84		

Ces scénarios diffèrent sur deux points. Pour le Secteur 5, l'objectif de débit de fuite à atteindre est constant au cours du temps, ce n'est pas le cas pour le Secteur 6. Il est également supposé pour le Secteur 5 que la distribution des conduites est telle que chaque année 1 % du linéaire d'âge moyen 70 ans peut être renouvelé. Pour le Secteur 6, l'objectif de débit de fuite est atteint progressivement, en supposant que le renouvellement s'effectue sur des conduites de moins en moins vieilles.

Les opérations de recherche, au nombre de trois par an, sont effectuées aléatoirement dans la période d'un an qui encadre deux épisodes de renouvellement. Une fois les effets du renouvellement estimés, il est aisé de calculer les gains que doivent apporter les réparations sur recherche. Il suffit de soustraire la valeur cible à la valeur finale en fin d'année, obtenue par croissance naturelle après renouvellement. Cette quantité, divisée par trois pour des opérations d'égale ampleur, nous permet de construire les courbes présentées à la suite.

3.2.2. Evolution du Secteur 5

La Figure 72 représente tout d'abord les effets simulés du scénario appliqué au Secteur 5.

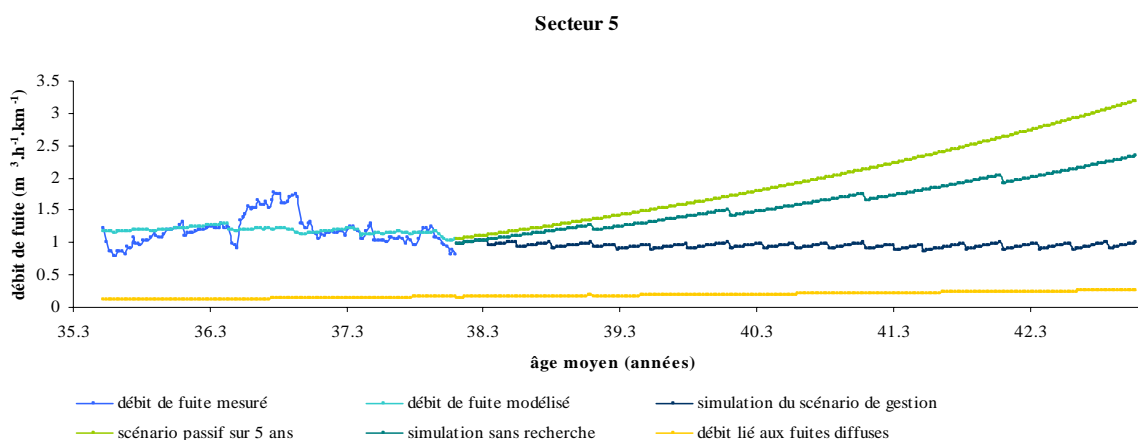


Figure 72. Représentation graphique des effets du scénario de gestion complet appliqué au Secteur 5.

L'allure en dents de scie de la courbe modélisée n'aide pas nécessairement à la distinction des effets des différentes actions, mais il est tout de même possible de bien les dissocier.

Notons en premier lieu que ce scénario permet de contrôler parfaitement le débit global de fuite, lequel au terme des cinq ans ne dépasse pas $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, valeur qui était la cible désirée. Il est aisé de repérer les épisodes de renouvellement en regardant la courbe dite de « simulation sans recherche ». En effet, ce tracé reconstitue le débit de fuite pour le scénario où la recherche de fuites est inexistante, laissant au seul renouvellement le soin de faire chuter le débit de fuite. Les quatre sauts facilement observables sur cette courbe, ainsi que le premier très peu visible juste en début de chronique, sont également présents au même instant sur la courbe qui modélise la globalité du scénario. Ils sont *a priori* d'amplitude équivalente entre eux (la baisse de la diminution d'âge moyen étant compensée par la hausse de croissance naturelle du débit). Ils ont également des caractéristiques très proches des sauts dus aux réparations sur recherche. Une analyse plus fine des valeurs de ces gains est nécessaire pour commenter plus en détail ce résultat graphique.

Auparavant, signalons que pour ce scénario les gains se répartissent pour un peu plus d'un tiers sur les effets du renouvellement et pour le reste sur ceux de la recherche de fuites.

En comparant les tracés du scénario passif et du scénario de renouvellement uniquement, on voit bien la décroissance de pente obtenue suite au rajeunissement du secteur : les deux courbes s'écartent de plus en plus entre deux épisodes de renouvellement.

L'évolution du débit lié aux fuites diffuses, uniquement affecté par les épisodes de renouvellement, est peu marquée devant celle du débit global. La part des fuites non repérées est prépondérante dans ce cas.

Le Tableau 28 chiffre les gains sur chacune des périodes considérées, pour le renouvellement et pour la recherche de fuites. La somme de ces gains est de l'ordre de $1,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Elle est inférieure à la différence entre la valeur du débit au terme de cinq ans sans action et $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, valeur cible fixée. Ceci s'explique par le ralentissement de croissance induit par le renouvellement. Les pertes à récupérer atteignent en effet, dans un scénario de passivité, $2,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ en cinq ans, et on se rend là bien compte à nouveau de l'impact du renouvellement sur la hausse du débit de fuite.

Tableau 28. IERF appliquée et gains associés à cette recherche et au renouvellement pour le Secteur 5.

horizon	renouvellement		recherche de fuites	
	scénario	gain ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)	gain ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)	IERF
t_r	1% 70 ans	0.063	0.27	0.97
t_{r+1}	1% 70 ans	0.075	0.24	0.86
t_{r+2}	1% 70 ans	0.087	0.26	0.93
t_{r+3}	1% 70 ans	0.099	0.28	1.02
t_{r+4}	1% 70 ans	0.113	0.31	1.12
t_{r+5}				

Le gain opéré grâce au renouvellement croît systématiquement lors des cinq épisodes considérés. L'objectif fixé étant identique et atteint d'une année sur l'autre, il en résulte que même le gain relatif augmente, puisqu'il est dans ce cas égal au gain global. A mesure que le secteur prend de l'âge, le renouvellement de 1 % des conduites vieilles de 70 ans réduit de moins en moins l'âge moyen du linéaire intact. Mais, la hausse naturelle du débit fait que globalement, l'élimination des fuites est accentuée dans le temps.

La recherche de fuites conduit à des réductions de pertes dont la tendance est également à la croissance dans le temps, hormis entre la première et la deuxième année. Bien qu'accentués, les effets bénéfiques du renouvellement ne contiennent pas à eux seuls la hausse du débit de fuite. Les recherches de fuites doivent augmenter si l'on veut maintenir le débit de fuite à $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Pour l'intervalle où ce gain diminue, la hausse des effets du renouvellement suffit à contrer la hausse naturelle du débit. Pour le reste, ce n'est pas le cas et le gestionnaire doit intensifier légèrement ses recherches.

Cette augmentation de la recherche de fuites reste faible, puisque entre t_f+4 et t_f+5 , l'IERF à appliquer est 1,12 fois supérieure à ce qu'elle était lors de la chronique de données.

L'étude de ce scénario réaliste montre que le gestionnaire peut maîtriser le débit de fuite et le maintenir à une valeur fixée. La nécessité de coupler renouvellement et recherche de fuites tient essentiellement au fait du coût du renouvellement. Nous pouvons cependant apprécier sur cet exemple l'efficacité et l'utilité de combiner ces deux types d'action.

3.2.3. Evolution du Secteur 6

La Figure 73 présente les résultats graphiques obtenus sur le Secteur 6 lorsque le plan de gestion établi au Tableau 27 est appliqué.

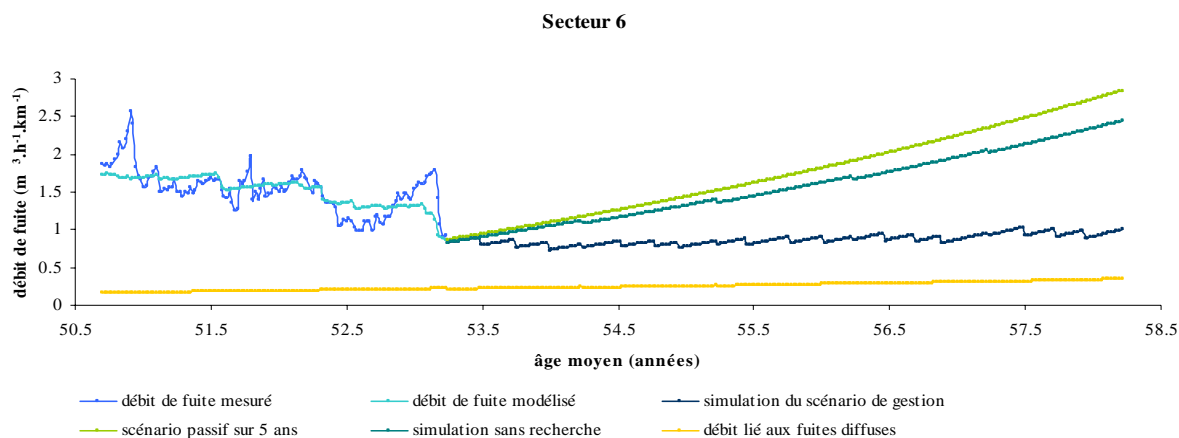


Figure 73. Représentation graphique des effets du scénario de gestion complet appliqué au Secteur 6.

On note, comme sur le Secteur 5, une courbe en dents de scie assez marquées. Cependant, les sauts dus au renouvellement sont d'amplitude plus faible semble-t-il. Le dernier saut, correspondant au cinquième épisode de renouvellement, est par exemple très peu visible. La

courbe du débit global modélisé sans recherche de fuites croît presque continûment malgré le remplacement des conduites. Cette remarque s'explique simplement par le fait que l'âge moyen initial du secteur est plus élevé que précédemment. Même si l'on renouvelle les deux premières fois des conduites d'âge moyen 80 et 75 ans, l'écart avec l'âge moyen global est plus faible que pour le Secteur 5. En outre, l'âge moyen renouvelé ne faisant que décroître, les gains associés diminuent, la hausse naturelle ne compensant pas suffisamment le phénomène. L'allure générale des courbes montre une prépondérance forte de la recherche de fuites par rapport au renouvellement. Ce dernier ne cible très certainement pas suffisamment les conduites les plus âgées, ce qui en limite les effets. Le choix de réduire l'âge moyen des conduites renouvelées, mis en œuvre sur ce scénario, n'est probablement pas celui que devra adopter le gestionnaire.

Le scénario de renouvellement permet cependant d'atteindre l'objectif fixé. Nous devons toutefois vérifier que ceci ne s'effectue pas au détriment d'une IERF à appliquer trop forte et contraignante. En effet, le scénario proposé n'aura de sens pour ce secteur que si la recherche de fuites qu'impose le choix du renouvellement ne dépasse pas les valeurs prises sur la chronique d'observations où durant cette période elle a été très intense. Le Tableau 29 fixe les idées sur ce qu'il en est dans le cadre de ce scénario.

Tableau 29. IERF appliquée et gains associés à cette recherche et au renouvellement pour le Secteur 6.

horizon	renouvellement		recherche de fuites	
	scénario	gain ($m^3 \cdot h^{-1} \cdot km^{-1}$)	gain ($m^3 \cdot h^{-1} \cdot km^{-1}$)	IERF
t_r	1% 80 ans	0.033	0.32	0.52
t_{r+1}	1% 75 ans	0.037	0.23	0.37
t_{r+2}	1% 70 ans	0.039	0.26	0.42
t_{r+3}	1% 65 ans	0.035	0.30	0.49
t_{r+4}	1% 60 ans	0.028	0.34	0.57
t_{r+5}				

Nous voyons tout d'abord, comme c'était le cas pour le Tableau 28, que les gains à réaliser par la recherche de fuites augmentent légèrement au cours du temps, excepté entre la première et la seconde année.

Les doutes émis sur la faiblesse éventuelle du renouvellement, qui aurait pour conséquence d'engendrer un effort considérable sur la recherche de fuites, ne sont finalement pas justifiés. En effet, les résultats montrent qu'avec une valeur autour de 0,5, l'IERF peut être divisée par deux par rapport à celle de la fenêtre de référence. Dans ce cas, les objectifs fixés seront tout de même atteints. Cette recherche de fuites, dépendante du renouvellement, ne constitue donc pas un obstacle à la mise en place d'un tel scénario.

Le gain proposé par les différents épisodes de renouvellement est quant à lui croissant pour le début de la période étudiée, puis décroissant sur toute la seconde partie. Il faut y voir l'inversion de l'équilibre entre diminution de la chute d'âge moyen provoquée par le renouvellement et hausse de la croissance naturelle du débit de fuite.

Pour ce scénario, un taux de renouvellement moyen, réparti dans le temps, et des opérations de recherche de fuites modérées menées en parallèle, parviennent tout à fait à contrôler l'évolution du débit de fuite et à le maintenir à un niveau souhaité.

3.3. Bilan

Lorsque renouvellement et recherche de fuites œuvrent en commun, les effets induits sur le débit de fuite sont très bénéfiques. L'utilisation de l'un et de l'autre permet de ne pas réaliser d'investissements trop lourds. L'amplitude du renouvellement n'est pas excessive dans ce cas, grâce à la complémentarité de la recherche de fuites. Le renouvellement permet également de ne pas être soumis à une multiplication dans le temps trop importante du nombre de fuites, qui imposerait des opérations de recherche permanentes. Il ralentit en effet durablement la croissance naturelle du débit de fuite.

Le modèle trois états peut ainsi constituer un outil de gestion intéressant. Ses possibilités de simulations, au travers de différents scénarios, prennent en compte plusieurs moyens d'action pour réduire les pertes, selon leur nature. Son caractère dynamique autorise quant à lui la prévision de l'évolution du débit de fuite à différents horizons. En cela, il s'avère pouvoir être une aide intéressante à la prise de décision pour la gestion du patrimoine.

Conclusion et perspectives

Le travail exploratoire effectué propose une voie nouvelle dans la manière d'appréhender la gestion des fuites sur les réseaux d'eau potable. La raréfaction de certaines ressources et les exigences de performance grandissantes en font une problématique d'actualité. La décomposition du débit de fuite en une part liée aux fuites diffuses, une autre relative aux fuites non repérées, permet d'adapter les moyens mis en œuvre pour les réduire. Seul le renouvellement des conduites peut agir sur les fuites diffuses, la recherche de fuites est l'outil principal d'élimination des fuites non repérées, même si le renouvellement y contribue également. L'aspect quantitatif de la décomposition permet de définir l'effort à consacrer à chacun des procédés. Notamment, lorsque le débit de fuite sur un réseau est dû principalement à des fuites diffuses, il n'est pas utile de continuer à y pratiquer des opérations de recherche de fuites.

La stratégie de renouvellement élaborée ici, permettant de réduire au mieux le débit de fuite, constitue un angle d'approche complémentaire pour la gestion patrimoniale actuelle, fondée principalement sur le remplacement des conduites les plus à risque vis-à-vis des casses.

La séparation entre les différentes catégories de fuites est opérée par le biais d'un modèle appelé modèle trois états.

Le calage des paramètres qui le constituent s'effectue sur 18 chroniques de débit de fuite minimal horaire hebdomadaire comprenant aussi les réparations effectuées faisant suite à des opérations de recherche de fuites.

Chacune des parts liée aux fuites diffuses ou aux fuites non repérées est expliquée par un nombre de fuites auquel est associé un débit unitaire de fuite moyen. Le calcul du nombre de ces fuites repose sur deux hypothèses. La première concerne l'apparition des fuites diffuses selon un processus de Yule dont l'application concluante aux prévisions de casses a été étendue à l'apparition des fuites. Elle a tout d'abord été testée sur un modèle plus simple pour assurer la possibilité de la transposition. La seconde hypothèse implique qu'au cours du temps, les fuites initialement diffuses (Etat 0) passent par différents états et se transforment en fuites non repérées (Etat 1) puis en casses manifestes (Etat 2). Les taux de passage d'un état à l'autre sont déterminés par les durées de vie moyennes dans chaque état, durées supposées distribuées exponentiellement. Pour les fuites diffuses, la moyenne des durées de vie estimée

atteint 14 ans tandis qu'elle n'est que de 4 ans pour les fuites non repérées. Le nombre de fuites dans les Etats 0 et 1, participant au débit de fuite, est ainsi calculé. Le débit unitaire moyen propre aux fuites non repérées est également déterminé au sein du modèle, où il prend une valeur moyenne de $0,48 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, tandis que celui associé aux fuites diffuses est choisi avec précaution hors du modèle pour assurer la convergence des paramètres. Il est pris égal à $0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Le modèle restitue convenablement la croissance naturelle du débit de fuite ainsi que les chutes de débit correspondant aux effets bénéfiques des réparations. La part du débit liée aux fuites diffuses, croissante dans le temps, est proche de celle estimée par Lambert.

Les applications du modèle trois états s'inscrivent dans une perspective de gestion anticipée. Elles permettent de simuler différents scénarios de gestion mêlant opérations de recherche de fuites et renouvellement. Le renouvellement, équivalent à un rajeunissement de l'âge moyen du secteur, doit porter, dans le cadre du modèle, sur les conduites les plus âgées pour un maximum d'efficacité. Les simulations montrent qu'avec un taux de renouvellement raisonnable, de l'ordre de 1 % par an, et des opérations de recherche de fuites soutenues mais supportables par le gestionnaire, le débit de fuite peut être parfaitement maîtrisé en deçà d'une valeur cible choisie.

Avant d'évoquer les perspectives liées à ce travail, nous soulignons qu'une condition préalable à la poursuite de travaux dans cette voie est l'effort à effectuer sur l'acquisition de données fiables. En effet, le modèle, pour être performant, nécessite des données sûres dont certaines spécifiques à sa mise en oeuvre. Nous pensons plus précisément à la pression, grandeur dont nous nous sommes passés mais qui influence fortement les fuites, au report des réparations de casses ou fuites dans les historiques associés ainsi qu'aux formules de calcul de débit sur chaque secteur. En lien avec les modèles de prévision de casses, une description précise des secteurs ou des tronçons (âge, matériau, diamètre) serait également appréciable.

Il s'agit de données essentielles au bon fonctionnement du modèle à partir desquelles nous pouvons espérer disposer d'un outil de gestion performant dont une ébauche avancée a été présentée dans cette thèse.

Les travaux réalisés ne constituent donc que l'amorce d'un nouveau modèle de gestion des fuites. Ils nécessitent et méritent d'être approfondis dans différents domaines afin de pouvoir proposer un outil opérationnel. Nous proposons ici certains axes de réflexions pouvant orienter des travaux futurs sur le sujet.

Dans un premier temps, il semble pertinent de parvenir à établir un modèle qui puisse inclure une distinction entre réparations sur branchements ou sur canalisations. Ce n'est pas le cas actuellement ; la tentative effectuée s'est révélée intéressante mais limitée, un seul secteur ayant pu être étudié. Cette avancée devrait permettre d'apporter des précisions sur la valeur des débits unitaires moyens de fuite mais également sur la localisation des fuites à repérer.

Un second point intéressant à étudier concerne la possibilité d'établir des liens entre les valeurs de paramètres obtenues et les caractéristiques patrimoniales des réseaux. Ainsi, les réseaux ne disposant pas de chroniques pourraient eux aussi bénéficier de la méthode par transposition et le gestionnaire disposerait de plus d'informations sur les facteurs responsables des débits de fuite.

Les simulations de recherche de fuites n'auront de réel sens qu'à partir du moment où, en fonction du potentiel de fuites à récupérer par ce procédé, on parviendra à exprimer les moyens matériels, et donc financiers, à mettre en œuvre pour parvenir à recouvrer une certaine part de ce débit potentiel. Les moyens nécessaires à la localisation des fuites sont d'autant plus importants qu'elles sont peu nombreuses. L'utilité en termes d'économies d'eau par rapport aux frais engagés pourrait ainsi être discutée.

Enfin, l'élaboration d'un ou de plusieurs indicateurs de performance nouveaux pourra être étudiée. Ils devront traduire le comportement du couple réseau/gestion dans les deux domaines que sont les fuites diffuses et les fuites non repérées. Un pourcentage du débit de fuite total à récupérer au moyen d'opérations de recherche de fuites, croisé avec un indicateur traduisant la pression de recherche sur l'année écoulée, pourrait être un exemple d'un tel indicateur. Ce domaine demeure à explorer, mais la possibilité de ces nouveaux outils pour l'analyse de la performance des réseaux est à considérer avec intérêt.

Références bibliographiques

- A.E.L.B. 1993. Diagnostic des réseaux - Lutte contre le gaspillage. 53pp.
- AGHTM. 1990. Rendement des réseaux d'eau potable - Définition des termes utilisés. *Techniques Sciences et Méthodes* - **4bis**: 1-22.
- Ajuste, C., Berland, J.-M. et Célerier, J.-L. 2004. Réhabilitation / Remplacement des réseaux d'eau potable en zone rurale. - FNDAE. 118pp.
- Alegre, H. 1997. A general framework of performance indicators in the scope of water supply. IWSA Workshop on Performance Indicators for Transmission and Distribution Systems, Lisboa.
- Alegre, H., Hirner, W., Baptista, J.M. et Parena, R. 2000. Performance indicators in water supply systems - IWA manual of best practice. - IWA Publishing.
- Allain, D., Pascal, C. et Thomas, F. 2006. Trois indicateurs de résultats des lycées. - <http://indicateurs.education.gouv.fr/>.
- Andrews, B.H., Schumann, P.D. et Gowen, T.L. 1999. Assessing performance benchmarking. *Journal of American Water Works Association* - **91**(11): 56-64.
- ATILF. 2006. Analyse et Traitement Informatique de la Langue Française. - <http://atilf.atilf.fr/tlf.htm>.
- Berland, J.-M., Faby, J.-A. et Juery, C. 2005. La gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable : enjeux et recommandations. - OIEAU. 41pp.
- Braghetta, A., Jacangelo, J., Rhodes Trussell, R., Meheus, J. et Watson, M. 1997. The practice of chlorination : application, efficacy, problems and alternatives. *International Water Supply Association Blue Pages* -.
- Brémond, B. et Berthin, S. 2001. Reliability of a drinking water supply system. IWA specialized conference : system approach to leakage control and water distribution systems management, 167-174, Brno.
- Buchberger, S.G. et Nadimpalli, G. 2004. Leak estimation in water distribution systems by statistical analysis of flow readings. *Journal of Water Resources Planning and Management* - **130**(4): 321-329.
- Chang, C.C.H., Chan, W. et Kapadia, A.S. 2002. The analysis of recurrent failure times : the time-dependent Yule process approach. Reliability and survival analysis. *Communications in Statistics : Theory and Methods* - **31**(7): 1203-1213.
- Colombo, A.F. et Karney, B.W. 2002. Energy and costs of leaky pipes : toward comprehensive picture. *Journal of Water Resources Planning and Management* - **128**(6): 441-450.

de Kervasdoué, J. et Arié, E. 2002. Peut-on juger la qualité d'un hôpital d'après ses résultats ? - <http://www.cardiologie-francophone.com/articles/arie3.html>.

Delille, M. 2002. Evaluation et pertinence des indicateurs d'interruptions de service pour les réseaux d'eau potable. - Cemagref Bordeaux. 58pp.

Eisenbeis, P. 1994. Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable. - Université Louis Pasteur. 190pp.

Eisenbeis, P., Laffréchine, K., Le Gauffre, P., Le Gat, Y., Rostum, J., Tuhovcak, L. et Valkovic, P. 2003. WP2 Description and validation of technical tools - D4 - Report on tests and validation of technical tools. 58pp.

Eisenbeis, P., Werey, C. et Laplaud, C. 2002. L'enregistrement des défaillances pour améliorer la connaissance des réseaux d'eau potable. *Techniques Sciences et Méthodes* - (6): 42-53.

Ferrante, M. et Brunone, B. 2003a. Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests. 1. Harmonic analysis. *Advances in Water Resources* - **26**(1): 95-105.

Ferrante, M. et Brunone, B. 2003b. Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests. 2. Wavelet analysis. *Advances in Water Resources* - **26**(1): 107-116.

Gargano, R. et Pianese, D. 2000. Reliability as tool for hydraulic network planning. *Journal of Hydraulic Engineering* - **126**(5): 354-364.

Guérin-Schneider, L. 2001. Introduire la mesure de performance dans la régulation des services d'eau et d'assainissement en France - Instrumentation et organisation. - ENGREF. 447pp.

Gupta, R. et Bhave, P.R. 1994. Reliability analysis of water-distribution systems. *Journal of Environmental Engineering* - **120**(2): 447-461.

Hua, F., West, J.R., Barker, R.A. et Forster, C.F. 1999. Modelling of chlorine decay in municipal water supplies. *Water Research* - **33**(12): 2735-2746.

Huberts, J. et Smeets, E. 2000. Performance indicators and benchmarking evaluation of company efficiency : the system employed by WML in the Netherlands. *Water Supply* - **18**(1): 646-651.

Hunaidi, O. 2000. La détection des fuites dans les conduites de distribution d'eau. *Solution constructive* - (40): 1-6.

Jowitt, P.W. et Xu, C. 1990. Optimal valve control in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* - **116**(4): 455-472.

Kanakoudis, V.K. 2004. A troubleshooting manual for handling operational problems in water pipe networks. *Journal of Water Supply : Research and Technology - AQUA* - **53**(2): 109-124.

Kansal, M.L., Kumar, A. et Sharma, P.B. 1995. Reliability analysis of water distribution systems under uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety* - **50**(1): 51-59.

Kingdom, B. 1998. Use of performance indicators and performance benchmarking in the North American water industry - Findings from studies recently completed for AWWA and WEF research foundations. *Journal of Water Supply : Research and Technology - Aqua* - **47**(6): 269-274.

Labruguière, J.C. 2000. Infrastructures souterraines : réhabilitation des conduites d'eau. - <http://www.infrastructures.com/0300/jclab6.htm>.

Lambert, A. 1994. Accounting for losses - the bursts and background concept. *Journal of the Institution of Water and Environmental Management* - **8**(2): 205-214.

Lambert, A.O. 2000. A realistic basis for an international comparison of real losses from public water-supply systems. *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management* - **14**(3): 186-192.

Lambert, A.O. 2001. What do we know about pressure : leakage relationships in distribution systems ? IWA Conference on System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management. - IWA, 89-96, Brno.

Lambert, A.O. 2002. International report : water losses management and techniques. *Water Supply* - **2**(4): 1-20.

Lambert, A.O., Brown, T.G., Takizawa, M. et Weimer, D. 1999. A review of performance indicators for real losses from water supply systems. *Journal of Water Services : Research and Technology - Aqua* - **48**(6): 227-237.

Lambert, A.O. et Hirner, W. 2000. Losses from Water Supply Systems : Standard Terminology and Recommended Performance Measures. *The Blue Pages* - (10): 1-13.

Lambert, A.O., Huntington, D. et Brown, T.G. 2001. Water loss management in North America - Just how good is it ? - IWA, 10.

Lawless, J.F. 1987. Regression methods for Poisson process data. *Journal of the American Statistical Association : Theory and Methods* - **82**(399): 808-815.

Le Gat, Y. 2007 (à paraître). Une extension du processus de Yule pour la modélisation stochastique des événements récurrents. - ENGREF. pp.

Le Gat, Y. et Eisenbeis, P. 2000. Using maintenance records to forecast failures in water networks. *Urban Water* - **2**(3): 173-181.

Le Gauffre, P., Laffrèchine, K., Baur, R., Poinard, D., Haidar, H. et Schiatti, M. 2004. Aide multicritère aux décisions de réhabilitation d'un réseau d'eau potable. XIIèmes Rencontres universitaires de Génie Civil - Ville et Génie Civil, Marne la Vallée.

Le Gauffre, P., Ruffier, J., Tanguy, C., Laffrèchine, K., Miramond, M., Perraudin, L. et Richard, L. 2001. Projet CAPTUR - Consolidation d'un cadre théorique d'analyse des

patrimoines techniques urbains de type réseau. Rapport final de recherche. - Ministère de l'Education nationale, de la Recherche et de la Technologie. 204pp.

Lee, P.J., Vitkovsky, J.P., Lambert, M.F., Simpson, A.R. et Liggett, J.A. 2005a. Frequency domain analysis for detecting pipeline leaks. *Journal of Hydraulic Engineering* - **131**(7): 596-604.

Lee, P.J., Vitkovsky, J.P., Lambert, M.F., Simpson, A.R. et Liggett, J.A. 2005b. Leak location using the pattern of the frequency response diagram in pipelines: A numerical study. *Journal of Sound and Vibration* - **284**(3-5): 1051-1073.

Malandain, J. 1999. Modélisation de l'état de santé des réseaux de distribution d'eau pour l'organisation de la maintenance. Etude du patrimoine de l'agglomération de Lyon. 206pp.

Marques, R.C. et Monteiro, A.J. 2001. Application of performance indicators in water utilities management - A case-study in Portugal. *Water Science and Technology* - **44**(2-3): 95-102.

Martinez, F., Conejos, P. et Vercher, J. 1999. Developing an integrated model for water distribution systems considering both distributed leakage and pressure-dependant demands. 26th ASCE Water Resources Planning and Management Division Conference, Tempe, Arizona.

May, J. 1994. Leakage, pressure and control. BICS Conference on Leakage Control Investigation in Underground Assets, London.

Ministère de la Santé et des Solidarités. 2005. La qualité de l'eau potable en France - Aspects sanitaires et réglementaires. 42pp.

Miquel, G. et Revol, H. 2003. La qualité de l'eau et de l'assainissement en France. - Sénat. 195pp.

Ofwat. 2006. The economic regulator for the water and sewerage industry in England and Wales. - <http://www.ofwat.gov.uk/>.

Ogura. 1979. *Japan Waterworks Journal* -: 38-45.

Ostfeld, A. 2001. Reliability analysis of regional water distribution systems. *Urban Water* - **3**(4): 253-260.

Ostfeld, A., Kogan, D. et Shamir, U. 2002. Reliability simulation of water distribution systems - single and multiquality. *Urban Water* - **4**(1): 53-61.

Ozdemir, O.N. et Ger, A.M. 1998. Realistic numerical simulation of chlorine decay in pipes. *Water Research* - **32**(11): 3307-3312.

Paralez, L.L. 1999. Utility benchmarking on the West Coast. *Journal of American Water Works Association* - **91**(11): 65-71.

Paralez, L.L. 2001. Performance assessment in US water and wastewater utilities. *Journal American Water Works Association* - **93**(10): 68-76.

Parena, R. et Smeets, E. 2001. Benchmarking initiatives in the water industry. *Water Science and Technology* - **44**(2-3): 103-110.

Pasanisi, A. 2004. Aide à la décision dans la gestion des parcs de compteurs d'eau potable - ENGREF. 244pp.

Pelletier, G., Mailhot, A. et Villeneuve, J.-P. 2003. Modeling water pipe breaks - three case studies. *Journal of Water Resources Planning and Management* - **129**(2): 115-123.

Pelli, T. et Hitz, H.U. 2000. Energy indicators and savings in water supply. *Journal American Water Works Association* - **92**(6): 55-62.

Prescott, S.L., Ulanicki, B. et Shipley, N. 2003. Analysis of district metered area (DMA) performance. - In: Maksimovic, Butler et Memon (eds.), Advances in Water Supply Management. - Balkema, A.A. Publishers, 772, London.

Rajani, B. et Kleiner, Y. 2001. Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models. *Urban Water* - **3**(3): 151-164.

Rajani, B. et Zahn, C. 1996. On the estimation of frost load. *Canadian Geotechnical Journal* - **33**(4): 629-641.

Reis, F.R. et Chaudhry, F.H. 1999. Hydraulic characteristics of pressure reducing valves for maximum reduction of leakage in water supply networks. - In: Savic, D.A. et Walters, G.A. (eds.), Water Industry Systems : Modelling and Optimization Applications. Research Studies Press Ltd., 259-267.

Renaud, E. 2004. Analyse des pertes dans les réseaux publics d'alimentation en eau potable - Rapport final. - Cemagref - SMEGREG. 48pp.

Ross, S. 1983. Stochastic processes. - John Willey and Sons.

Rostum, J. 2000. Statistical modelling of pipe failures in water networks. - Norwegian University of Science and Technology. 104pp.

Shinstine, D.S., Ahmed, I. et Lansley, K.E. 2002. Reliability/availability analysis of municipal water distribution networks: Case studies. *Journal of Water Resources Planning and Management* - **128**(2): 140-151.

Skarda, B.C. 1997. The Swiss experience with performance indicators and special viewpoints on water networks. IWSA Workshop on Performance Indicators for Transmission and Distribution Systems, Lisboa.

SMEGREG. 2006. Diagnostic des réseaux d'alimentation en eau potable. - <http://www.jeconomiseau.org/Plaqueette.pdf#search=%22smegreg%20sectorisation%22>.

Tanyimboh, T.T., Burd, R., Burrows, R. et Tabesh, M. 1999. Modelling and reliability analysis of water distribution systems. *Water Science and Technology* - **39**(4): 249-255.

Vairavamoorthy, K. et Lumbers, J. 1998. Leakage reduction in water distribution systems : optimal valve control. *Journal of Hydraulic Engineering* - **124**(11): 1146-1154.

Vasconcelos, J.J. et Rossman, L.A. 1997. Kinetics of chlorine decay. *Journal of American Water Works Association* - **89**(7): 54-65.

WUP. 2006. Water Utility Partnership. - <http://www.wupafrica.org/franc/indicateur.html>.

UN OUTIL D'AIDE A LA MAITRISE DES PERTES DANS LES RESEAUX D'EAU POTABLE : LA MODELISATION DYNAMIQUE DE DIFFERENTES COMPOSANTES DU DEBIT DE FUITE

Résumé : Le vieillissement des réseaux d'eau potable entraîne une dégradation de la qualité du service. L'importance des enjeux financiers impliqués dans son maintien impose une gestion patrimoniale motivée et maîtrisée. Les fuites, dont les effets sont particulièrement préjudiciables à la ressource, constituent un des indicateurs du niveau de détérioration des infrastructures. Ce travail présente un outil capable de prévoir l'évolution des fuites, intégrant leur croissance naturelle avec le temps et les différents types d'interventions de l'exploitant visant à les réduire. Pour cela, nous disposons de chroniques de débits de fuite et de réparations sur des réseaux sectorisés qui servent au calage du modèle dynamique élaboré, appelé modèle trois états. Il est basé sur la double hypothèse que les fuites apparaissent selon un processus de Yule et qu'elles se transforment avec le temps pour passer par trois états successifs (fuites diffuses, fuites non repérées et casses manifestes). S'appuyant sur l'âge moyen des secteurs, le modèle reconstitue dans un premier temps les différentes chroniques sélectionnées en décomposant le débit de fuite en une part liée aux fuites diffuses et une autre composée des fuites non repérées. Dans un second temps, il permet de suivre l'évolution de ce débit à différents horizons lorsque le secteur est soumis à divers scénarios de gestion. La simulation des effets d'opérations de recherche de fuites ou de renouvellement est rendue possible par la formulation du modèle et peut ainsi orienter les choix et la programmation des interventions du gestionnaire.

Mots-clés : Gestion des fuites – Patrimoine – Vieillissement – Modélisation dynamique – Renouvellement – Recherche de fuites

A TOOL TO HELP CONTROL LOSSES IN DRINKING WATER NETWORKS : DYNAMIC MODELLING OF DIFFERENT COMPONENTS OF THE LEAK FLOW

Abstract: The degradation of the performance of water networks due to ageing has to be fought. The high financial stakes involved in keeping the quality of service at an acceptable level impose the need for a controlled and motivated management of assets. Leaks, whose effects are particularly detrimental for the resource, are one of the key indicators of the infrastructures deterioration. This study presents a tool to foresee the evolution of leaks, considering both the natural growth in time and the interventions of the operator to reduce them. Leak flows and repair records on District Metered Areas are used to elaborate this tool and calibrate a dynamic model, named the "three states model". It is based on the double hypothesis that the leaks appear according to a Yule process and that they transform with time to pass through three successive states (background leaks, unreported leaks and manifest bursts). Considering the mean age of the DMAs, the model first restores the selected records by decomposing the leak flow into a part due to the background leaks and another part linked with the unreported leaks. Then, it allows the evolution of the leak flow at several time steps to be followed when various management scenarios are applied to the DMA. The simulation of the benefits of leak-finding or renewal operations is made possible by the model formulation and so can guide the choices and the programming of operator interventions.

Key words: Leak management – Asset- Ageing – Dynamic modelling – Renewal – Leak detection