

Études expérimentales en laboratoire et in situ de la relation
entre la pression et le débit de fuite dans les réseaux d'eau
potable

par

Mathieu LANEUVILLE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE CONCENTRATION PERSONNALISÉE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 21 DÉCEMBRE 2016

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Mathieu Laneuville, 2016



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Saad Bennis, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Gabriel Assaf, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Hubert Demard, membre du jury
Réseau Environnement

M. Pascal Caron, membre du jury
Ville de Montréal – Service de sécurité incendie de Montréal

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 5 DÉCEMBRE 2016

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier le Docteur Saad Bennis, directeur de cette recherche. Son expérience en recherche appliquée, la confiance qu'il m'a accordée et son soutien ont contribué significativement à la réalisation de ce travail.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance à Monsieur Mohamed Amine Yattara, ingénieur junior, pour sa collaboration sur le développement théorique et pratique de l'étude expérimentale en laboratoire.

Je veux remercier également Monsieur Sébastien Ménard, technicien au département de génie de la construction à l'École technologie supérieure, pour le montage et la réalisation des essais expérimentaux en laboratoire.

J'aimerais remercier le professeur émérite Bernard Bobée du Centre Eau Terre Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique pour son support dans l'analyse statistique de l'étude.

Je remercie aussi Monsieur Éric Desbiens, chef de la division eau potable de la Ville de Saint-Jean-sur-Richelieu, ainsi que son équipe pour la réalisation de l'étude expérimentale in situ pendant la nuit et pour les nombreux échanges entourant l'essai.

Mes remerciements à Monsieur Allan Lambert, auteur du site Web LEAKSSuite, ainsi qu'aux membres du comité d'eau potable de Réseau Environnement, aux membres du Water Loss Control Committee de l'American Water Works Association et aux membres du Water Loss Specialist Group de l'International Water Association pour leur collaboration à l'analyse de l'étude expérimentale in situ qui a été publiée dans la revue Vecteur Environnement de mai 2015. Merci aux membres de la revue Vecteur Environnement pour avoir été nommé à la Distinction Fernand Séguin 2016 suite à la publication de l'article technique. Merci à Monsieur

VI

Ushanthan Murughananthan, étudiant en génie civil, pour sa collaboration à la traduction anglaise de l'article pour le site Web LEAKSSuite.

Je remercie les membres du Conseil Saint-Laurent de la Society of Fire Protection Engineers ainsi que ceux du Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU) pour leur invitation à présenter une conférence sur la gestion de la pression. Le contact privilégié avec leurs membres permet d'ajuster et de bonifier les travaux. Je remercie d'ailleurs le CERIU de m'avoir décerné le premier Prix Relève 2016 en infrastructures municipales – niveau maîtrise.

J'adresse mes remerciements au Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire pour avoir financé et m'avoir libéré périodiquement du travail pour réaliser ces études reliées au cheminement de carrière.

Je veux finalement remercier mon mentor professionnel Monsieur Hubert Demard ainsi que mon mentor personnel feu Monsieur Titano Rosco qui m'inspirent à l'excellence.

ÉTUDES EXPÉRIMENTALES EN LABORATOIRE ET IN SITU DE LA RELATION ENTRE LA PRESSION ET LE DÉBIT DE FUITE DANS LES RÉSEAUX D'EAU POTABLE

Mathieu LANEUVILLE

RÉSUMÉ

Les pertes d'eau par les fuites sont pratiquement inévitables dans les réseaux de distribution d'eau potable. Pour les municipalités, réduire ces pertes à un niveau optimal devient donc une priorité pour contribuer à la gestion durable et intégrée des ressources en eau et pour fournir l'eau à un coût abordable. La majorité des solutions qui peuvent être mises en place pour réduire les pertes d'eau par les fuites à un niveau optimal sont généralement connues et appliquées à un certain niveau au sein des municipalités québécoises. Cependant, la gestion proactive de la pression demeure une solution peu développée à l'heure actuelle étant donné son évolution récente à l'international et sa diffusion limitée au Québec, notamment en ce qui a trait à la relation entre la pression et le débit de fuite. L'objectif de ce mémoire est donc d'analyser et de valider la relation entre la pression et le débit de fuite dans le cadre d'études expérimentales en laboratoire et in situ. Le montage en laboratoire a permis de réaliser les essais et l'analyse des incertitudes dans un environnement contrôlé tandis que le réseau de distribution d'eau potable municipal a permis de valider les résultats obtenus sur le terrain. Les études expérimentales en laboratoire et in situ présentent des résultats près de ceux reconnus à l'international. Cependant, l'analyse des incertitudes démontre des erreurs acceptables pour l'étude expérimentale en laboratoire, mais très significatives pour l'étude expérimentale in situ étant donné l'absence de compteurs d'eau à la consommation.

Mots clés : pression, fuite, réseau, eau

LABORATORY AND IN SITU EXPERIMENTAL STUDIES ON THE PRESSURE AND LEAK FLOW RELATIONSHIP IN WATER DISTRIBUTION SYSTEMS

Mathieu LANEUVILLE

ABSTRACT

Water loss through leaks are practically inevitable in drinking water distribution systems. For municipalities, reducing water losses at an optimum level thus becomes a priority to contribute for sustainable and integrated water resources management and to provide water at affordable cost. Most solutions that can be implemented to reduce water losses through leaks at an optimum level are generally known and applied through a certain level within Québec municipalities. However, proactive pressure management remains an underdeveloped solution at the present time since its recent international expansion and its limited broadcast in Québec, particularly for the relationship between pressure and leak flow. The objective of this master thesis is to analyze and validate, with laboratory and in situ experimental studies, the relationship between pressure and the leak flow. The laboratory setup allowed carrying out tests and uncertainty analysis in a controlled environment while the municipal water distribution system was allowed to validate the results in situ. Laboratory and in situ experimental studies results are near those recognized internationally. However, uncertainty analysis demonstrates acceptable errors for the laboratory experimental study, but very significant ones for the in situ experimental study given the lack of water consumption metering.

Keywords : pressure, leakage, water, system

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE.....	3
1.1 Comprendre et réduire les pertes d'eau réelles	3
1.1.1 Bilan d'eau	3
1.1.2 Pertes d'eau par les fuites	5
1.1.3 Méthodes d'intervention pour réduire les pertes d'eau réelles	6
1.1.4 Secteur de suivi de la distribution.....	8
1.1.5 Gestion de la pression	11
1.2 Gestion proactive de la pression	13
1.2.1 Objectifs visés.....	13
1.2.2 Secteur de régulation de pression	15
1.2.3 Vanne de régulation de pression	16
1.2.4 Contrôle à sortie constante.....	17
1.2.5 Contrôle modulé selon le temps.....	18
1.2.6 Contrôle modulé selon le débit	18
1.2.7 Contrôle modulé à partir d'un point éloigné.....	19
1.2.8 Protection incendie.....	20
1.2.9 Remplissage des réservoirs	20
1.2.10 Rentabilité.....	21
1.2.11 Démarche de mise en œuvre.....	23
CHAPITRE 2 CADRE THÉORIQUE.....	25
2.1 Relation entre la pression et le débit de fuite.....	25
2.2 Relation entre la pression et la fréquence d'apparition de nouveaux bris	27
2.3 Relation entre la pression et la consommation	29
2.4 Analyse des incertitudes sur l'exposant N1	30
2.4.1 Incertitude des paramètres de N1.....	30
2.4.2 Démarche de calcul de l'incertitude sur N1.....	32
2.4.3 Estimation de l'intervalle de confiance de l'incertitude sur N1	36
CHAPITRE 3 ÉTUDES EXPÉRIMENTALES EN LABORATOIRE ET IN SITU	39
3.1 Étude expérimentale en laboratoire	39
3.1.1 Méthodologie utilisée.....	39
3.1.2 Résultats et discussion	47
3.2 Étude expérimentale in situ.....	55
3.2.1 Méthodologie utilisée.....	56
3.2.2 Résultats et discussion	61
CONCLUSION.....	68
RECOMMANDATIONS	70

ANNEXE I	Fiches techniques des instruments de mesure de l'étude expérimentale en laboratoire	72
ANNEXE II	Fiches techniques des instruments de mesure de l'étude expérimentale in situ.....	76
ANNEXE III	Tableaux de calcul des $N1_{pré}$ des conduites en PEHD.....	78
ANNEXE IV	Tableaux de calcul des incertitudes sur $N1$ pour les conduites en PEHD	82
ANNEXE V	Tableaux de calcul des $N1_{pré}$ des conduites en PVC	87
ANNEXE VI	Tableaux de calcul des incertitudes sur $N1$ pour les conduites en PVC.....	91
BIBLIOGRAPHIE.....		95

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Bénéfices multiples de la gestion de la pression14
Tableau 3.1	Valeurs de $N1_{\text{pré}}$47
Tableau 3.2	Intervalle de confiance des incertitudes $\Delta N1$ pour les conduites en PEHD49
Tableau 3.3	Valeurs admissibles de $N1$ pour les conduites en PEHD.....50
Tableau 3.4	Valeurs de $N1_{\text{pré}}$51
Tableau 3.5	Intervalle de confiance53
Tableau 3.6	Valeurs admissibles de $N1$ pour les conduites en PVC54
Tableau 3.7	Pressions et débits mesurés ou estimés61
Tableau 3.8	Incertitude sur la pression moyenne.....62
Tableau 3.9	Incertitude des débits mesurés ou estimés sans régulation de pression62
Tableau 3.10	Incertitude des débits mesurés ou estimés avec régulation de pression....62
Tableau 3.11	Incertitude totale des pressions et débits sans et avec régulation de pression63
Tableau 3.12	Économies estimées en fonction de la situation de la municipalité en considérant une réduction du débit de fuite de l'ordre de $120\ 000\ \text{m}^3/\text{an}$65

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Bilan d'eau IWA/AWWA de l'approche descendante4
Figure 1.2	Types de pertes d'eau par les fuites et outils d'intervention associés5
Figure 1.3	Quatre principales méthodes d'intervention pour réduire les pertes d'eau réelles7
Figure 1.4	Réseau de distribution divisé en secteurs de suivi de la distribution9
Figure 1.5	Variation de la pression en fonction du débit sans gestion proactive de la pression.....13
Figure 1.6	Mode de contrôle à sortie constante17
Figure 1.7	Contrôle modulé selon le débit19
Figure 2.1	Exemples d'ouverture fixe et variable26
Figure 2.2	Relation entre la pression et le taux de bris des conduites28
Figure 3.1	Pompe, débitmètre, conduite d'amenée et système d'acquisition de données du banc d'essais au laboratoire de l'ÉTS40
Figure 3.2	Manomètre, vannes, conduite avec orifice à l'étude, réservoir pour recueillir le débit de fuite et balance du banc d'essai au laboratoire de l'ÉTS40
Figure 3.3	Vanne et grand réservoir d'eau relié à la pompe du banc d'essai au laboratoire de l'ÉTS41
Figure 3.4	Débitmètre Arkon MAGX242
Figure 3.5	Capture d'écran du programme Termite 3.142
Figure 3.6	Manomètre numérique Beta Gauge P.I.-Pro43
Figure 3.7	Pompe Weg LR 3832444
Figure 3.8	Panneau de contrôle de la pompe44
Figure 3.9	Balance GFK 7545
Figure 3.10	Conduite en PEHD de 20 mm45

Figure 3.11	Conduite en PVC de 50 mm.....	46
Figure 3.12	Courbe des valeurs de $N_{1\text{pré}}$ en fonction de la longueur de la fissure sur les conduites en PEHD.....	48
Figure 3.13	Courbes des valeurs admissibles de N_1 pour les conduites en PEHD.....	51
Figure 3.14	Courbes des valeurs de $N_{1\text{pré}}$ en fonction de la longueur de la fissure sur les conduites en PEHD et PVC	52
Figure 3.15	Courbes des valeurs admissibles de N_1 pour les conduites en PVC.....	55
Figure 3.16	Schéma du réseau de distribution étudié à Saint-Jean-sur-Richelieu.....	58
Figure 3.17	Manomètre et enregistreur de données installés sur le poteau d'incendie situé le plus près du point représentatif de zone du secteur résidentiel étudié de Saint-Jean-sur-Richelieu	59
Figure 3.18	Fermeture de l'une des trois vannes pour isoler le secteur à l'étude.....	60

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AWWA	American Water Works Association
DSOV	Débit selon la surface des ouvertures fixes et variables
ÉTS	École de technologie supérieure
IFI	Indice de fuite des infrastructures
IWA	International Water Association
MAMOT	Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation de territoire
MFV	Moteur à fréquence variable
ONU	Organisation des Nations unies
PEHD	Polyéthylène haute densité
PVC	Polychlorure de vinyle
RSI	Retour sur investissement
USB	Bus Universel en Série
VDF	Variateur de fréquence

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

ΔM	Incertitude totale du poids
ΔM_{ins}	Incertitude de la balance
ΔM_{lec}	Incertitude sur la lecture de la masse
ΔP	Incertitude totale de la pression
ΔP_{ins}	Incertitude du manomètre
ΔP_{moy}	Incertitude sur la moyenne des pressions mesurées
ΔT	Incertitude totale du temps
ΔT_{ins}	Incertitude du chronomètre
ΔT_{ins}	Incertitude sur la moyenne des temps mesurés
ΔT_{syn}	Incertitude sur la synchronisation
ΔQ	Incertitude totale du débit
ΔQ_{ins}	Incertitude du débitmètre
ΔQ_{moy}	Incertitude sur la moyenne des débits mesurées
%CE	Pourcentage de consommation à l'extérieur
d	Jour
FFB	Facteur de fréquence de bris
g	Force de gravité
Hz	Hertz
IC($\Delta N1$)	Intervalle de confiance des incertitudes sur N1
km	Kilomètre
kPa	Kilopascal

XX

m^3	mètre cube
mm	Millimètre
N1	Exposant qui relie la pression et le débit de fuite
N3	Exposant pondéré qui relie la pression et la consommation
N3 _e	Exposant qui relie la pression et la consommation à l'extérieur
N3 _i	Exposant qui relie la pression et la consommation à l'intérieur
ρ	Masse volumique de l'eau
P ₀	Pression avant la variation de pression
P ₁	Pression après la variation de pression
P _{max}	Pression maximale
P _{min}	Pression minimale
P _{moy}	Pression moyenne
psi	Livre-force par pouce carré
Q	Débit
Q ₀	Débit avant la variation de pression
Q ₁	Débit après la variation de pression
Q _{exp}	Débit d'exportation
Q _{fuites}	Débit de fuite
Q _{max}	Débit maximal
Q _{min}	Débit minimal
Q _{moy}	Débit moyen
Q _{prod}	Débit de production
Q _{rés}	Débit de la consommation résidentielle

T	Temps
T_0	Temps avant la variation de pression
T_1	Temps après la variation de pression
V	Volume
V_0	Volume avant la variation de pression
V_1	Volume après la variation de pression

INTRODUCTION

Par la Déclaration du Millénaire, la communauté internationale s'est engagée à « mettre fin à l'exploitation irrationnelle des ressources en eau, en formulant des stratégies de gestion de l'eau aux niveaux régional, national et local, permettant notamment d'assurer aussi bien un accès équitable qu'un approvisionnement adéquat » (ONU, 2000).

Dans le cadre de la Stratégie québécoise d'économie d'eau potable (la Stratégie), les municipalités sont amenées à réduire les pertes d'eau dans les réseaux de distribution à un maximum de 20 % de la quantité d'eau distribuée et de 15 mètres cubes par jour par kilomètre de conduite ($\text{m}^3/\text{d}/\text{km}$). Cependant, le bilan 2014 de la Stratégie indique qu'il est nécessaire de poursuivre les efforts, car les pertes potentielles sont évaluées à 26 % de la quantité d'eau potable distribuée et à $27 \text{ m}^3/\text{d}/\text{km}$ (MAMOT, 2016).

Par ailleurs, les pertes d'eau par les fuites sont pratiquement inévitables dans les réseaux de distribution d'eau potable. Pour les municipalités, réduire ces pertes à un niveau optimal devient donc une priorité pour contribuer à la gestion durable et intégrée des ressources en eau et pour fournir l'eau à un coût abordable. Dans un contexte de croissance démographique, limiter le stress sur les ressources en eau, par l'optimisation plutôt que par le surdimensionnement et la construction de nouveaux ouvrages, est d'autant plus nécessaire.

La majorité des solutions qui peuvent être mises en place pour réduire les pertes d'eau par les fuites à un niveau optimal sont généralement connues et appliquées à un certain niveau au sein des municipalités québécoises. Cependant, la gestion proactive de la pression demeure une solution peu développée à l'heure actuelle étant donné son évolution récente à l'international et sa diffusion limitée au Québec, notamment en ce qui a trait à la relation entre la pression et le débit de fuite.

En fait, la première étude expérimentale québécoise en laboratoire qui traite de cette relation en fonction du diamètre de fuite et du matériau de conduite a été réalisée en 2010 (Fares, 2010).

En s'inscrivant en continuité avec ces travaux, le présent mémoire a pour objectifs :

- d'analyser et de valider, dans le cadre d'une étude expérimentale en laboratoire, la relation entre la pression et le débit de fuite pour des conduites flexibles;
- d'analyser et de valider, dans le cadre d'une première étude terrain québécoise, la relation entre la pression et le débit de fuite pour des conduites mixtes;
- de réaliser une analyse des incertitudes de l'exposant N1 pour les études expérimentales en laboratoire et in situ.

Ainsi, le premier chapitre décrit la problématique de l'étude. L'objectif de ce chapitre est d'évaluer, organiser et synthétiser l'avancement des recherches et des études de cas réalisées à l'international sur la gestion proactive de la pression dans une optique de réduction des pertes d'eau par les fuites.

Le deuxième chapitre développe le cadre théorique de la relation entre d'une part, la pression et d'autre part, le débit de fuite, la fréquence d'apparition de nouveaux bris et la consommation. Une démarche de calcul de l'analyse des incertitudes de l'exposant N1 est aussi développée.

Le troisième chapitre présente la méthodologie utilisée, les résultats et la discussion sur les résultats obtenus de l'étude expérimentale en laboratoire réalisée au laboratoire de l'École de technologie supérieure (ÉTS) et de l'étude expérimentale in situ réalisée dans un secteur résidentiel de la Ville de Saint-Jean-sur-Richelieu.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE

1.1 Comprendre et réduire les pertes d'eau réelles

La section 1.1 met l'emphase sur la compréhension et la réduction des pertes d'eau réelles de façon à comprendre comment la gestion proactive de la pression s'inscrit dans ce contexte.

1.1.1 Bilan d'eau

Compléter un bilan d'eau de qualité permet de savoir où va l'eau. En d'autres termes, le bilan d'eau permet de départager le volume d'eau occasionné par la consommation de celui occasionné par les pertes d'eau. En fonction des résultats, les actions appropriées pourront être mises en place pour une saine gestion de l'eau. D'ailleurs, les méthodes pour réduire les pertes d'eau réelles sont détaillées à la section 1.1.3.

La méthodologie proposée par l'International Water Association (IWA) et l'American Water Works Association (AWWA) permet d'outiller efficacement les Services des eaux en normalisant le bilan d'eau et les indicateurs de performance qui s'y rattachent. Cette méthodologie a été développée en tenant compte des différentes conditions de réseaux possibles et en synthétisant les meilleures pratiques internationales.

Eau du Service (corrigée pour les erreurs connues)	Volume entrant dans le système	Eau exportée	Consommation autorisée	Consommation autorisée facturée	Eau exportée facturée		Eau facturée
		Eau distribuée			Consommation mesurée facturée		
					Consommation non mesurée facturée		
				Consommation autorisée non facturée	Consommation mesurée non facturée		
					Consommation non mesurée non facturée		
					Pertes d'eau	Consommation non autorisée	
			Pertes d'eau apparentes	Imprécision des compteurs des usagers			
		Erreurs systématiques de manipulation des données					
		Eau importée	Pertes d'eau réelles	Fuites sur les conduites de transport et de distribution	Eau non facturée		
				Fuites et débordements aux réservoirs			
Fuites sur les branchements de service jusqu'au compteur de l'utilisateur							

Figure 1.1 Bilan d'eau IWA/AWWA de l'approche descendante
Alegre et al. (2000) citée dans AWWA (2009)

Le bilan d'eau IWA/AWWA de l'approche descendante est présenté à la Figure 1.1. En lisant ce bilan de la gauche vers la droite, on remarque que les pertes d'eau représentent la différence entre le volume d'eau entrant dans le réseau et la consommation autorisée. Elles sont constituées de pertes d'eau apparentes et de pertes d'eau réelles. Les pertes d'eau apparentes regroupent la consommation non autorisée (ex. : utilisation illégale), l'imprécision des compteurs des usagers et les erreurs systématiques de manipulation des données. Contrairement aux pertes d'eau apparentes, les pertes d'eau réelles se perdent dans le réseau sans atteindre les usagers. Les pertes d'eau réelles sont calculées en soustrayant les pertes d'eau apparentes et la consommation autorisée du volume entrant dans le réseau. Elles regroupent les fuites sur les conduites et les branchements de service dont le Service des eaux est propriétaire ainsi que les débordements aux réservoirs. Les pertes d'eau par les fuites, qui représentent généralement le volume le plus important des pertes d'eau réelles, sont détaillées à la section 1.1.2.

Le bilan d'eau IWA/AWWA de l'approche descendante, qui évalue les pertes d'eau réelles sur une base annuelle, est généralement le point de départ des Services des eaux. Pour une estimation plus précise des pertes d'eau réelles, notamment lorsque peu d'éléments du bilan

sont mesurés, la méthodologie IWA/AWWA recommande de combiner l'approche descendante avec l'analyse des éléments et l'approche ascendante. L'analyse des éléments consiste à modéliser les pertes d'eau par les fuites selon leur nature et leur durée. L'approche ascendante consiste à estimer les pertes d'eau réelles en analysant le débit de nuit minimum d'un secteur de suivi de la distribution. D'ailleurs, les secteurs de suivi de la distribution, qui offrent des avantages supplémentaires, sont détaillés à la section 1.1.4.

1.1.2 Pertes d'eau par les fuites

Les pertes d'eau par les fuites se divisent en trois types, soit les fuites indétectables, les fuites non signalées et les fuites signalées (bris). La définition et les méthodes d'interventions recommandées pour chaque type de fuite sont présentées à la Figure 1.2.

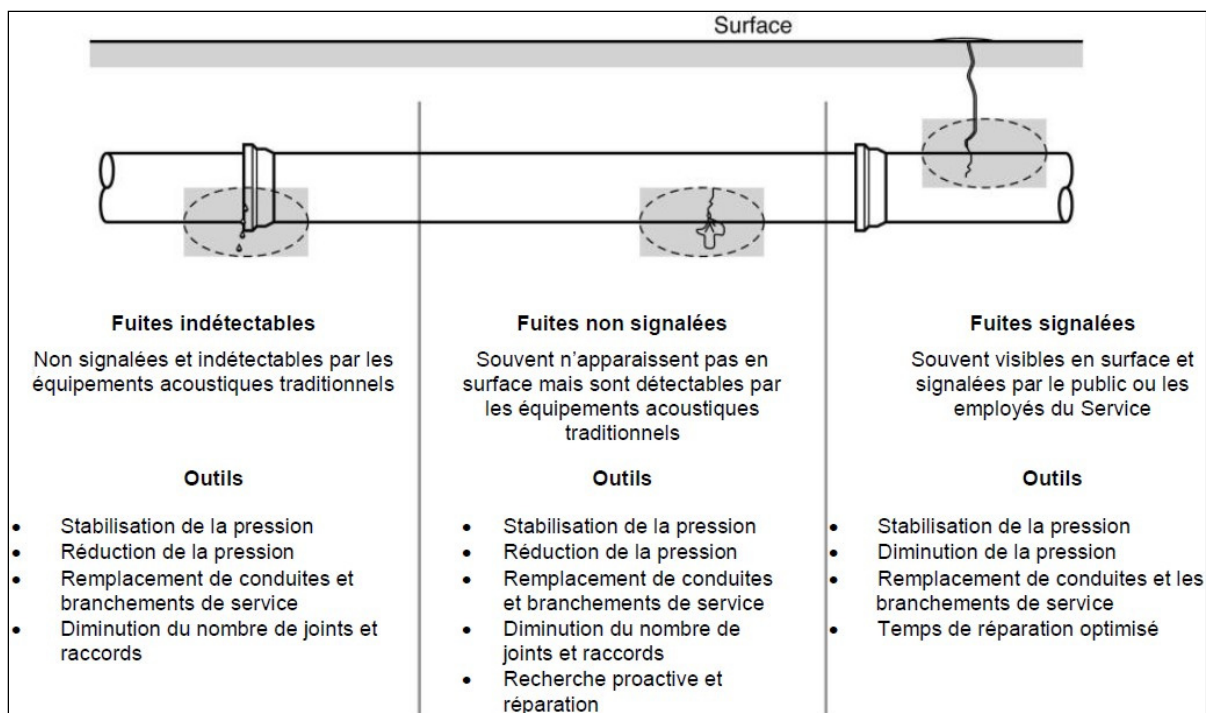


Figure 1.2 Types de pertes d'eau par les fuites et outils d'intervention associés
Tardelli Filho (2006) citée dans AWWA (2009)

De façon générale, plus la fuite est difficile à détecter, plus son débit sera faible et plus sa durée sera longue. Au fil du temps, il est probable que son débit augmente et qu'elle soit plus facile

à détecter. De plus, la durée d'une fuite sur un branchement de service dont le Service des eaux n'est pas propriétaire est généralement plus longue. Par ailleurs, les fuites importantes sur les conduites de grand diamètre sont difficiles à détecter étant donné que le son se propage moins sur les conduites de grand diamètre. Comme indiqué à la Figure 1.2, les seules solutions, complémentaires au remplacement (ou réhabilitation) de conduites et de branchement de service, pour réduire tous les types de pertes d'eau par les fuites sont la stabilisation et la réduction de la pression. Le cadre théorique de l'influence de la pression est d'ailleurs détaillé au CHAPITRE 2. En effet, la pression d'un réseau de distribution d'eau potable influe sur le débit de fuite (section 2.1), sur la fréquence d'apparition de nouvelles fuites (section 2.2) et sur la consommation (section 2.3).

1.1.3 Méthodes d'intervention pour réduire les pertes d'eau réelles

En fonction des indicateurs de performance du bilan d'eau, le Service des eaux est en mesure d'évaluer si des interventions sont nécessaires pour réduire les pertes d'eau réelles. Si c'est le cas, l'IWA Water Loss Task Force et l'AWWA Water Loss Control Committee recommandent l'utilisation d'une ou plusieurs des quatre principales méthodes d'intervention présentées dans les flèches de la Figure 1.3. Ces méthodes sont la gestion de la pression, le contrôle actif des fuites, la gestion des actifs du réseau ainsi que la rapidité et qualité des réparations.

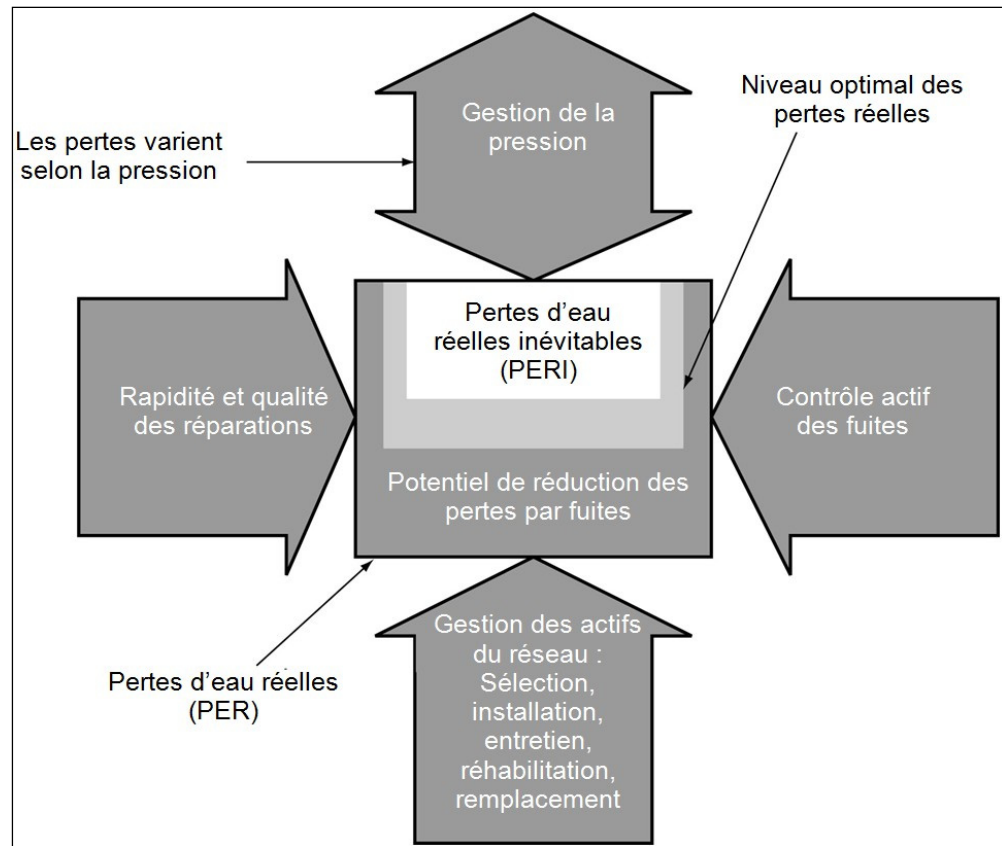


Figure 1.3 Quatre principales méthodes d'intervention pour réduire les pertes d'eau réelles
Lambert et al. (1999) citée dans AWWA (2009)

Comme l'indique la Figure 1.3, tout en sachant qu'il y a des pertes d'eau réelles inévitables (rectangle blanc), l'objectif des méthodes d'intervention (quatre flèches) est de réduire les pertes d'eau réelles (rectangle gris foncé) à un niveau optimal (rectangle gris pâle).

Le contrôle actif des fuites a pour objectif de localiser les fuites non signalées. Cette méthode d'intervention comprend deux solutions. La première est l'auscultation acoustique qui permet de localiser une fuite par le bruit qu'elle produit. Pour ce faire, des équipements tels qu'un amplificateur, un corrélateur, des enregistreurs de bruits et des hydrophones sont utilisés. La seconde est la mise en place de secteurs de suivi de la distribution. Cette solution, expliquée à la section 1.1.4, permet notamment de cibler les endroits sur le réseau où les pertes d'eau réelles sont élevées. Ainsi l'équipe de recherche de fuites peut être déployée rapidement et aux bons endroits.

La rapidité et la qualité des réparations ont pour objectif de minimiser la durée des fuites signalées et non signalées ainsi que de réaliser des réparations durables. La durée d'une fuite se départage en trois périodes : le temps pour prendre connaissance qu'elle existe, le temps pour la localiser et le temps pour la réparer (Fanner et al., 2007), p. 63). La première période peut être relativement longue pour une fuite non signalée si le réseau n'est pas ausculté périodiquement. Heureusement, les secteurs de suivi de la distribution, discutés à la section 1.1.4, ne permettent pas seulement de rechercher les fuites aux bons endroits, mais aussi de les rechercher au bon moment. En effet, en analysant le débit de nuit minimum d'un secteur donné, il est possible de repérer rapidement une nouvelle fuite ou une consommation anormale.

La gestion des actifs du réseau a pour objectif de réduire les pertes d'eau par les fuites, mais aussi d'assurer la fiabilité du service et la pérennité des infrastructures. Cette méthode d'intervention inclut la sélection, l'installation, l'entretien, la réhabilitation et le remplacement des infrastructures. L'optimisation de la durée de vie des actifs est recherchée afin de limiter les coûts économiques, sociaux et environnementaux.

La gestion de la pression a notamment pour objectif de réduire les pressions excessives inutiles qui causent des pertes d'eau par les fuites et d'éviter les débordements aux réservoirs. Cette méthode d'intervention est présentée à la section 1.1.5.

1.1.4 Secteur de suivi de la distribution

Un secteur de suivi de la distribution (aussi connu sous les termes de sectorisation ou District Metered Area en anglais) est une zone du réseau de distribution d'eau potable où le suivi du débit distribué est effectué en continu, tel qu'illustré à la Figure 1.4. Il est possible de réaliser des secteurs de suivi de la distribution temporaires, mais nous nous attardons aux secteurs de suivi de la distribution permanents qui offrent un potentiel de réduction des pertes d'eau réelles plus intéressant.

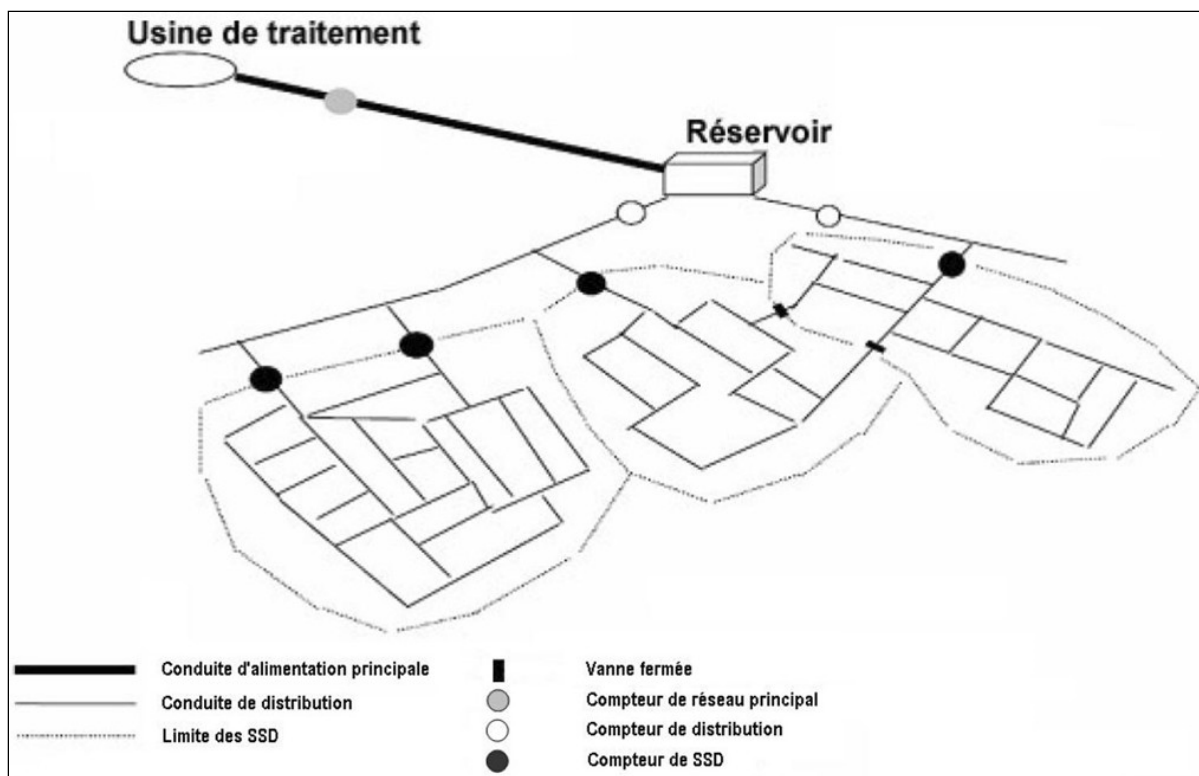


Figure 1.4 Réseau de distribution divisé en secteurs de suivi de la distribution IWA (2007) citée dans Fares (2010)

Un secteur de suivi de la distribution peut avoir un ou plusieurs points d'entrée et de sortie et il peut parfois être nécessaire d'isoler le secteur à l'aide de vannes. Le cas échéant, ces vannes doivent d'ailleurs être testées pour s'assurer de leur étanchéité. À chaque point d'entrée et de sortie, un débitmètre et un enregistreur de données sont installés pour faire le suivi en continu du débit distribué dans le secteur. Ces points se retrouvent normalement à un point d'importation/exportation vers un autre secteur ou un autre Service des eaux, à l'installation de production d'eau potable, à un réservoir ou à une station de pompage. Dans certains cas, il est possible que le débit soit bidirectionnel. Si un réservoir d'eau est situé dans le secteur de suivi de la distribution, la variation du niveau d'eau doit être considérée.

L'analyse du débit de nuit minimum d'un secteur de suivi de la distribution est particulièrement intéressante pour estimer les pertes d'eau réelles, car c'est généralement entre 2 h et 4 h que la consommation est à son plus bas et que la proportion du débit des pertes d'eau réelles par rapport au débit distribué est la plus élevée. Les pertes d'eau réelles peuvent être

estimées par la différence entre le débit de nuit minimum et la consommation de nuit légitime (WRC, 1994, p. 1). La consommation de nuit légitime inclut les utilisations de nuit exceptionnelles (ex. : industries et hôpitaux), les utilisations de nuit non résidentielles (ex. : commerces) et les utilisations de nuit résidentielles. L'analyse du débit de nuit minimum doit aussi tenir compte de la possibilité d'arrosage automatique pendant l'été et des purges pour contrer le gel en hiver qui peuvent influencer considérablement le débit de nuit minimum.

La mise en place de secteurs de suivi de la distribution permet d'abord de diriger la recherche de fuite vers les secteurs où les pertes d'eau réelles sont les plus élevées, ce qui améliore l'efficacité du contrôle actif des fuites. Le secteur de suivi de la distribution permet aussi d'identifier les possibilités de consommation nocturne illégitime qu'il faudra distinguer des fuites. Ensuite, lorsque le niveau optimal des pertes d'eau réelles est atteint dans un secteur de suivi de la distribution, l'analyse du débit de nuit minimum permet de prendre connaissance plus rapidement de l'existence de nouvelles fuites, ce qui aide à réduire la durée des fuites. De plus, l'analyse du débit de nuit minimum permet d'estimer les pertes d'eau réelles selon l'approche ascendante et de valider ainsi l'estimation obtenue selon l'approche descendante. Enfin, un secteur de suivi de la distribution peut être bonifié en un secteur de régulation de la pression pour optimiser la pression du secteur. Cette bonification est d'ailleurs expliquée à la section 1.2.6.

Afin de pouvoir identifier l'apparition de nouvelles fuites, notamment les plus petites, un secteur de suivi de la distribution devrait desservir au plus environ 5 000 branchements de service (IWA, 2007, p. 18) et 45 kilomètres de conduites de distribution (AWWA, 2009, p. 183). Toutefois, en fonction des besoins, il est possible de dépasser ces limites en atteignant les objectifs souhaités. Aussi, s'il y a un point de sorties dans le secteur de suivi de la distribution, le volume sortant devrait être limité, car lorsque ce volume se rapproche du volume entrant, cela affecte considérablement l'erreur relative du débit de fuite estimé.

Lors de la conception de secteurs de suivi de la distribution, il importe de localiser, mesurer et enregistrer la pression au point critique et au point représentatif de la zone pour assurer les

pressions requises et faire un suivi des conditions de pression. Étant donné que la demande peut varier en fonction des saisons, il peut être pertinent de recueillir les données de pression au point critique et au point représentatif de la zone sur une année. Le point critique est situé à l'endroit où la pression est la plus faible et sa position peut varier avec le temps. Son emplacement dépend de la topographie, des diamètres et de l'état des conduites, des habitudes de consommation et des besoins spécifiques de certains usagers (ex. : hôpital). En assurant la pression requise au point critique, la pression sera adéquate à tous les autres points du secteur. Le point représentatif de la zone est l'endroit où la pression est la plus près de la pression moyenne de la zone. La pression moyenne de la zone peut être obtenue à l'aide d'un modèle hydraulique étalonné ou par un calcul de l'élévation moyenne de la zone, suivi d'une mesure en continu au point représentatif de la zone (AWWA, 2009, pp. 56-57).

La configuration du secteur de suivi de la distribution devrait permettre de continuer à répondre aux normes de qualité de l'eau et aux fortes demandes (incendie et bris). Par exemple, isoler le réseau en laissant plus d'une entrée d'eau permet d'éviter les points morts et de répondre aux fortes demandes. Étant donné l'importance de bien répondre aux normes de qualité de l'eau et aux fortes demandes, il importe de vérifier ces deux aspects avant de mettre le secteur de suivi de la distribution en opération.

1.1.5 Gestion de la pression

Dans son sens le plus large, la gestion de la pression pour contrôler les pertes d'eau réelles consiste en « la pratique de gérer les pressions dans le réseau à un niveau optimal de service afin d'assurer un approvisionnement suffisant et efficace pour les utilisations et consommations légitimes, tout en réduisant les pressions inutiles ou excessives et en éliminant les transitoires sur le réseau et les contrôles de niveau défectueux aux réservoirs qui causent des fuites inutiles dans le réseau » (Notre traduction de (Thornton et Lambert, 2005, p. 2).

Ainsi, plusieurs solutions permettent de gérer la pression, telles que :

1. Le contrôle des transitoires pour diminuer l'apparition de nouvelles fuites. L'installation de dispositifs de protection anti-bélier permet de diminuer l'effet d'ondes transitoires (coups de bélier) qui sont dues à des changements rapides des conditions du système, comme des manipulations trop rapides de poteaux d'incendie ou de vannes (Thornton, Sturm et Kunkel, 2008, p. 305);
2. Le contrôle des pompes pour diminuer l'apparition de nouvelles fuites et améliorer l'efficacité énergétique des pompes. L'installation de systèmes de pompage avec un élément moteur à fréquence variable (MFV) permet d'effectuer des démarrages et mises à l'arrêt des pompes progressifs (AWWA, 2009, pp. 173-174). De plus, dans le cas d'un système de pompage avec un élément MFV qui alimente directement un réseau, l'ajout d'un contrôleur peut être utilisé pour la gestion proactive de la pression;
3. Le contrôle des niveaux d'eau dans les réservoirs pour éliminer les débordements des réservoirs. L'installation d'une sonde de niveau permet de connaître le niveau d'eau du réservoir pour le contrôler adéquatement (Thornton, Sturm et Kunkel, 2008, p. 314);
4. La mise en place de zones de pression isolées pour fournir la pression minimale requises à différentes altitudes. L'installation de vannes permet de créer des zones de pression (ex. : en fonction de la topographie), ce qui permet de diminuer la pression dans les zones où elle est excessive (AWWA, 2009, pp. 174-175);
5. La gestion proactive de la pression pour stabiliser et réduire la pression. L'installation de vannes de régulation de pression permet de créer des secteurs de régulation de la pression pour contrôler la pression selon différents modes (AWWA, 2009, p. 175).

La plupart des municipalités ont déjà mis en place, à un certain degré, les quatre premières solutions. Cependant, la gestion proactive de la pression, qui est présentée à la section 1.2, demeure une solution peu connue et peu appliquée par les Services des eaux.

1.2 Gestion proactive de la pression

La section 1.2 présente l'utilité, la faisabilité technique et la rentabilité de la gestion proactive de la pression.

1.2.1 Objectifs visés

Les réseaux de distribution sont habituellement conçus de façon à pouvoir fournir une pression minimale adéquate à toute heure et en tout point du réseau. Concrètement, la pression est ajustée selon le scénario le plus défavorable ; c'est-à-dire de façon à ce que la pression minimale adéquate soit assurée au point critique (point où la pression est la plus faible) lorsque la demande en eau est maximale (moment où la pression est la plus faible). Comme le montre la Figure 1.5, sans gestion proactive de la pression, les périodes de demande hors pointes (où le débit est faible) introduisent une augmentation excessive de la pression.

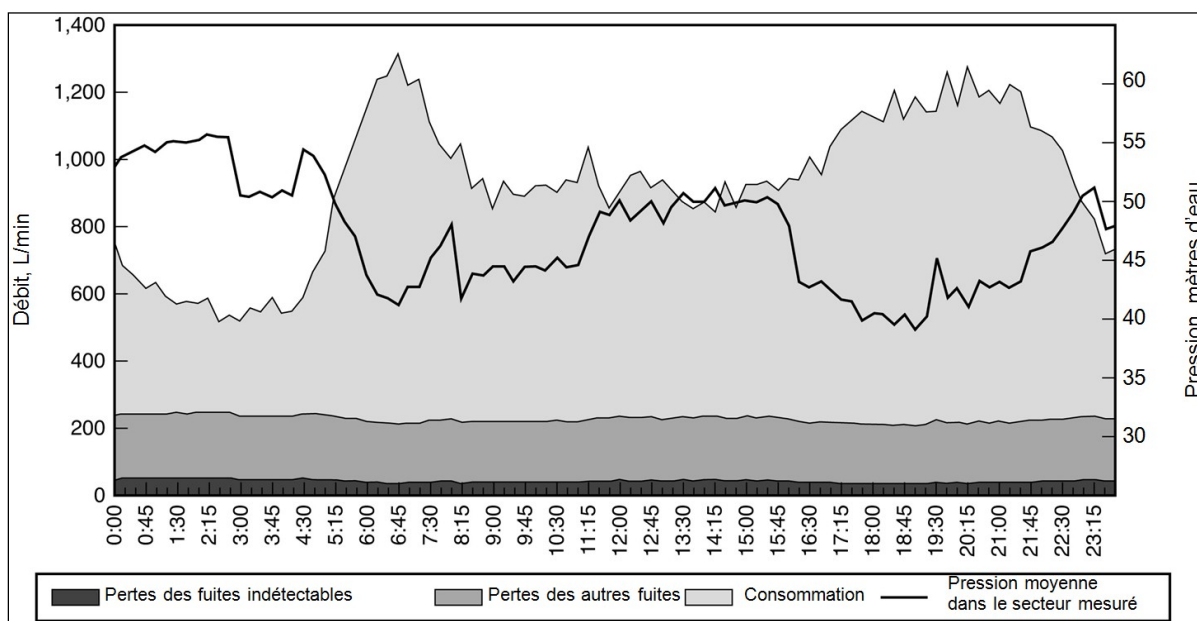


Figure 1.5 Variation de la pression en fonction du débit sans gestion proactive de la pression Thornton (2005) citée dans AWWA (2009)

Cette augmentation inutile de la pression augmente le volume de pertes d'eau par les fuites et la fréquence d'apparition de nouveaux bris. D'ailleurs, les bris apparaissent souvent la nuit,

lorsque la demande en eau est minimale et que la pression est maximale. L'objectif de la gestion proactive de la pression est donc de stabiliser la pression lorsque la demande en eau est faible, de la réduire si des pressions élevées ne sont pas justifiées et de corriger, au besoin, les problèmes de faible pression. À titre indicatif, l'amélioration des connaissances des niveaux de pression en Angleterre et au Pays de Galles a permis de corriger des problèmes de faible pression d'eau sur le réseau en passant de 1,85 % d'immeubles à risque de faible pression en 1990-1991 (Ofwat, 2003, p. 5) à 0,01 % en 2009-2010 (Ofwat, 2010, p. 21).

Évidemment, la gestion proactive n'est pas applicable ou rentable pour toutes les situations. Par exemple, lorsque la topographie est variable, l'installation de vannes de régulation de pression peut s'avérer difficile dû aux basses et hautes pressions (AWWA, 2009, p. 175).

Tel qu'indiqué au Tableau 1.1, les bénéfices d'une gestion proactive de la pression sont intéressants autant pour la conservation de la ressource, que pour le Service des eaux et que pour l'utilisateur.

Tableau 1.1 Bénéfices multiples de la gestion de la pression
Notre traduction de Lambert et Fantozzi (2010)

Gestion de la pression: réduction des pressions moyennes et maximales excessives						
Bénéfices pour la conservation		Bénéfices pour le Service des eaux			Bénéfices pour l'utilisateur	
Réduction des débits		Réduction de la fréquence d'apparition des bris et fuites				
Réduction de la consommation	Réduction des débits de fuites	Réduction des coûts de réparation sur les conduites et branchements de service	Report du renouvellement et prolongement de la durée de vie des actifs	Réduction des coûts du contrôle actif des fuites	Moins de plaintes des usagers	Moins de problèmes sur la plomberie et appareils des usagers

En conciliant la performance environnementale, économique et sociale, la gestion proactive de la pression s'inscrit dans une démarche de développement durable. Par exemple, en reportant ou en évitant la construction d'installation de production d'eau potable, en prolongeant la durée de vie des conduites d'eau potable et de leurs accessoires ainsi qu'en diminuant le nombre d'interventions pour réparer ou remplacer des conduites et accessoires, des économies

monétaires sont engendrées et l'impact environnemental est diminué. De plus, la société s'en porte mieux : moins d'interruptions de service pour les usagers, moins de risques d'accident, moins de risques de contamination, moins de nuisance pour le transport et à un certain degré une meilleure perception du Service des eaux, ce qui pourrait inciter les citoyens à être plus enclins à participer aux efforts pour une saine gestion de l'eau. Un autre exemple est la réduction des débits de fuite engendrée par cette solution qui permet de préserver la ressource et d'engendrer des économies telles que celles liées à la diminution des frais variables de production (ex. : produits chimiques et pompage).

Les bénéfices de la gestion proactive de la pression amoindrissent les impacts des pertes d'eau par les fuites, mais ne les éliminent pas. Il importe donc de concilier cette solution avec les méthodes d'intervention présentées à la section 1.1.3.

1.2.2 Secteur de régulation de pression

Un secteur de régulation de la pression est une zone du réseau de distribution d'eau potable où la pression d'eau est contrôlée, ce qui permet la gestion proactive de la pression. Comme pour une zone de pression ou un secteur de suivi de la distribution, un secteur de régulation de la pression peut avoir un ou plusieurs points d'entrée et de sortie et il peut parfois être nécessaire d'isoler le secteur à l'aide de vannes. L'emplacement des points d'entrée et de sortie se retrouvent aux mêmes endroits que pour une zone de pression et un secteur de suivi de la distribution. Cependant, à chaque point d'entrée et de sortie, une vanne de régulation de pression est installée pour contrôler la pression et un capteur de pression en amont et en aval de la vanne de régulation de pression sont installés pour mesurer la pression d'eau. Les vannes de régulation de pression et les quatre principaux modes de contrôle de la pression sont d'ailleurs abordés aux sections 1.2.3 à 1.2.7. Comme pour un secteur de suivi de la distribution, il est nécessaire de localiser, mesurer et enregistrer la pression au point critique et au point représentatif de la zone pour assurer les pressions requises et faire un suivi des conditions de pression.

1.2.3 Vanne de régulation de pression

Les vannes de régulation de pression permettent de contrôler la pression aux points d'entrées et de sorties des secteurs de régulation de la pression. Elles peuvent être actionnées de différentes façons, telles que par diaphragme ou par piston. La sélection du type de vannes de régulation de pression se fait généralement en fonction des pressions et débits mesurés sur le terrain ainsi que des besoins du Service des eaux. Ainsi, des critères comme les plages d'opération, les pertes de charge engendrées, la précision et la stabilité offerte pour le contrôle, l'entretien nécessaire et le besoin en alimentation électrique devraient être analysés lors de la sélection du type de vannes de régulation de pression. De plus, plusieurs options comme un débitmètre, une génératrice ou des panneaux solaires peuvent être annexées à la vanne de régulation de pression. Étant donné les besoins en entretien d'une vanne de régulation de pression et de ses accessoires, le coût total sur le cycle de vie devrait être considéré plutôt qu'uniquement le coût initial d'investissement. La sélection d'un même type de vannes de régulation de pression pour les différents sites peut faciliter la maintenance et réduire les coûts. Par ailleurs, l'installation de vannes de régulation de pression est propice à la cavitation si la réduction de pression est considérable. La cavitation se produit lorsque de petites bulles se forment (suite à une réduction importante de la pression qui devient inférieure à la pression de vapeur) et implosent (lorsque la pression augmente en aval de la vanne de régulation de pression), ce qui crée des ondes de choc qui peuvent être dommageables. Il peut donc être nécessaire d'installer une vanne de régulation de pression avec une cage anti-cavitation intégrée qui permet aux bulles d'imploser dans la cage pour ne pas engendrer de dommages externes ou d'installer deux vannes de régulation de pression en série de façon à créer deux petites variations de pression plutôt qu'une seule grande variation de pression.

Une vanne de régulation de pression fonctionne généralement selon l'un des quatre modes de contrôle présentés dans les sous-sections 1.2.4 à 1.2.7 (Farley, 2001, p. 105). Les modes de contrôle sont présentés en ordre croissant autant pour l'efficacité à optimiser la pression, la difficulté de mise en œuvre, les besoins de maintenance que les coûts engendrés. La plupart des vannes de régulation de pression permettent la modification du mode de contrôle.

1.2.4 Contrôle à sortie constante

Ce mode de contrôle traditionnel, aussi appelé régulation en mode de pression aval fixe, est utilisé pour maintenir la pression à l'entrée du secteur de régulation de la pression à un niveau fixe préétabli, tel qu'illustré à la Figure 1.6.

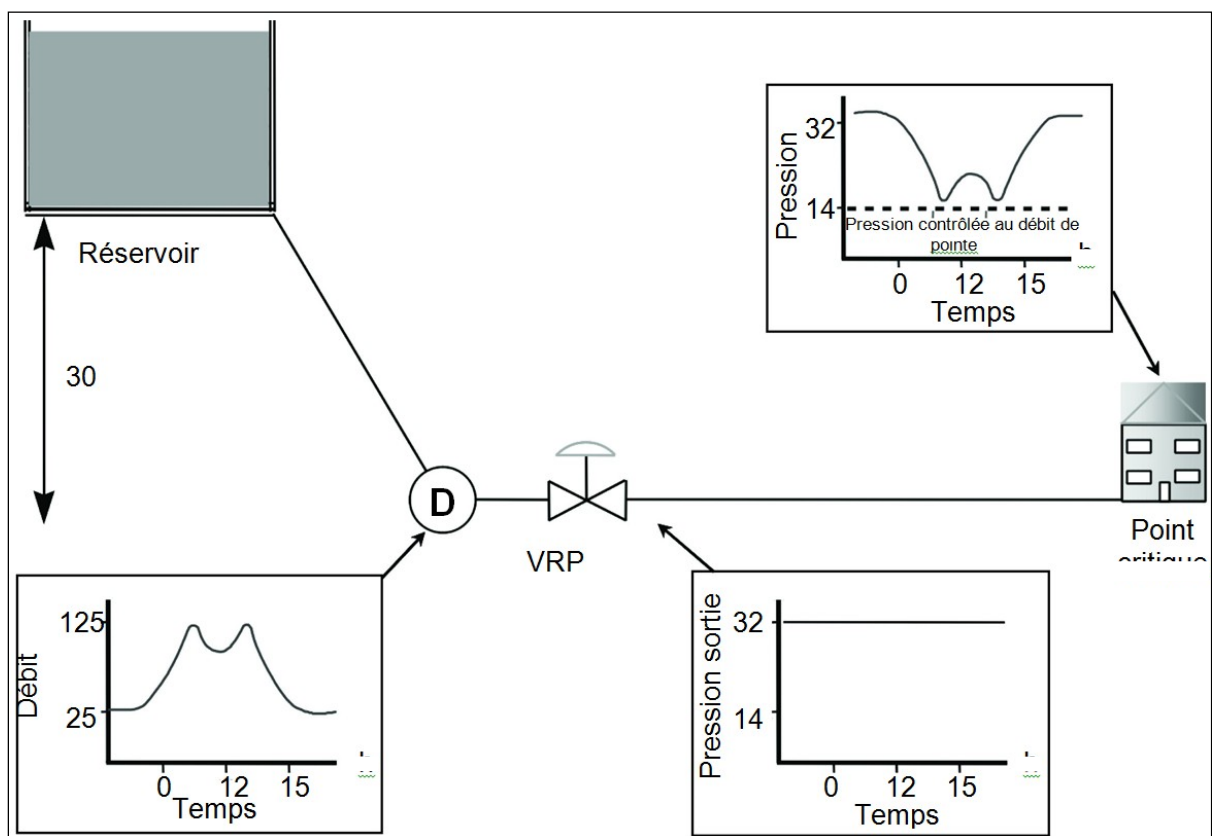


Figure 1.6 Mode de contrôle à sortie constante
Thornton et al. (2005) citée dans AWWA (2009)

Ce mode de contrôle de base est avantageux lorsque la demande en eau est relativement stable en tout temps (de façon horaire, journalière et saisonnière) et qu'il n'y a pas de pertes de charge significatives. Par contre, si la demande en eau varie, la pression ne sera pas optimale la majorité du temps comme le montre la Figure 1.6. L'installation d'un régulateur électronique

pourrait donc s'avérer utile pour contrôler la pression selon l'un des trois modes de contrôle suivants.

1.2.5 Contrôle modulé selon le temps

Ce mode de contrôle est utilisé pour ajuster la pression à l'entrée du secteur de régulation de la pression à un niveau préétabli en fonction de la plage horaire. L'ajout d'un régulateur électronique séparé d'une minuterie interne permet d'ajuster la pression selon deux (ex. : jour et nuit) ou plusieurs plages horaires. Ce mode de contrôle est avantageux lorsque la demande en eau est relativement stable de façon saisonnière et journalière et que les pertes de charge sont modérées. Par contre, si la demande en eau varie, la pression ne sera pas optimale lors des journées et des saisons ayant de faibles demandes. Dans ce cas, l'un des deux modes de contrôle suivants pourrait s'avérer utile.

1.2.6 Contrôle modulé selon le débit

Ce mode de contrôle permet d'ajuster la pression à l'entrée du secteur de régulation de la pression à un niveau préétabli en fonction du débit à l'entrée de ce secteur, tel qu'illustré à la Figure 1.7. Dans les cas où un secteur de suivi de la distribution est déjà en place, ce mode de contrôle peut s'avérer très efficient (Thornton, Sturm et Kunkel, 2008, p. 310).

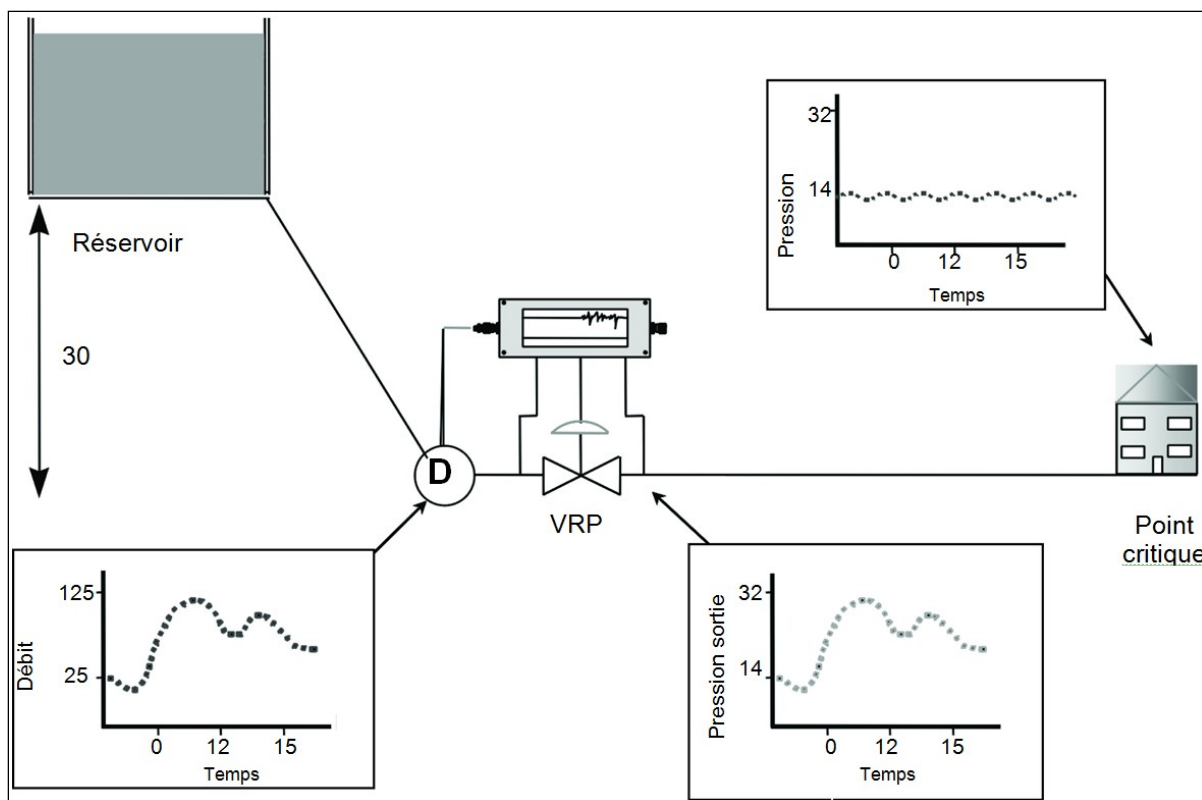


Figure 1.7 Contrôle modulé selon le débit
Thornton et al. (2005) citée dans AWWA (2009)

L'ajout d'un régulateur électronique connecté à un débitmètre permet d'ajuster la pression selon la demande en eau du secteur de régulation de la pression. Ce mode de contrôle est avantageux lorsque la demande en eau est variable et que les pertes de charge sont importantes. Pour un contrôle encore plus sécuritaire et efficace de la vanne de régulation de pression, le mode de contrôle suivant peut être intéressant.

1.2.7 Contrôle modulé à partir d'un point éloigné

Ce mode de contrôle offre un ajustement en temps réel de la pression à l'entrée du secteur de régulation de la pression en fonction de la pression au point éloigné, soit au point critique ou au point représentatif de la zone du secteur de régulation de la pression. Pour ce faire, l'ajout d'un régulateur électronique communiquant par télémétrie (ex. : téléphonie mobile) à un capteur de pression situé au point éloigné du secteur de régulation de la pression est nécessaire.

1.2.8 Protection incendie

La mise en place de secteurs de régulation de la pression peut générer des modifications sur le fonctionnement du réseau de distribution, ce qui amène à se pencher sur certaines préoccupations pratiques, telles que la protection incendie, présentée ci-dessous, et le remplissage des réservoirs, présentée à la section 1.2.9.

Dans les réseaux de distribution d'eau potable qui assurent une protection incendie, une collaboration entre le Service de sécurité incendie et le Service des eaux est essentielle pour concilier la protection incendie et la réduction des pertes d'eau par les fuites (Lamarre et Caron, 2014). Pour assurer la protection incendie, le Service des eaux doit fournir les débits et pressions nécessaires pour combattre les incendies, autant aux poteaux d'incendie sur le réseau de distribution qu'aux systèmes de gicleurs à l'intérieur des bâtiments (Réseau Environnement, 2016, p. 72). D'ailleurs, la protection incendie est encadrée dans la plupart des états par des orientations, codes, normes, directives et organismes.

Pour répondre aux besoins de protection incendie et de réduction des pertes d'eau par les fuites, il est recommandé d'avoir recours au contrôle de la vanne de régulation de pression modulé en fonction du débit ou à partir d'un point éloigné (Thornton, Sturm et Kunkel, 2008, pp. 333-334). De plus, il est possible d'installer une conduite de contournement au point d'entrée ou d'avoir plusieurs points d'entrées dans le secteur de régulation de la pression pour fournir, au besoin, l'eau nécessaire pour combattre les incendies (Thornton, Sturm et Kunkel, 2008, pp. 330-331). D'ailleurs, plus d'un point d'entrée permet normalement d'assurer la qualité de l'eau et de faciliter l'entretien. Avant la mise en service du secteur de régulation de la pression, il est primordial d'effectuer une mise à l'essai pour vérifier que la protection incendie est maintenue en cas d'urgence.

1.2.9 Remplissage des réservoirs

Lorsqu'un réseau de distribution d'eau potable a un ou plusieurs réservoirs, une attention particulière devrait être portée sur les réservoirs pour qu'ils puissent se remplir même si les

consignes de pression ont été modifiées (ex. : la nuit). Comme le montre la Figure 1.4 pour les secteurs de suivi de la distribution, en créant des secteurs de régulation de la pression sur les conduites secondaires, la pression sur les conduites primaires n'est pas affectée et les réservoirs peuvent donc être remplis convenablement. En plus, concentrer la gestion proactive de la pression sur les conduites secondaires est généralement plus rentable. En effet, la plupart des fuites indétectables et des fuites sur les branchements de services sont contrôlées, les instruments de mesure sont généralement plus précis pour de petits diamètres et la mise en œuvre est moins dispendieuse (chambres et équipements plus petits).

1.2.10 Rentabilité

Pour calculer la rentabilité selon la période de retour sur investissement (RSI), l'AWWA recommande de diviser le coût total du programme de gestion proactive de la pression par la valeur des pertes d'eau par les fuites indétectables récupérées sur une année (AWWA, 2009, p. 222). Toutefois, étant donné que la gestion proactive de la pression a des impacts tant qu'elle est en place, il pourrait être pertinent de bonifier le calcul en tenant compte de la valeur actuelle nette des coûts et de la valeur des pertes d'eau par les fuites indétectables récupérées sur plusieurs années (ex. : 20 ans). Cette façon de faire constituerait un bon point de départ pour évaluer la rentabilité du projet, car les valeurs nécessaires pour ce calcul sont relativement faciles à obtenir.

Par ailleurs, même s'il demeure difficile d'évaluer les économies liées à l'ensemble des autres bénéfiques présentés au Tableau 1.1, il serait adéquat d'en faire mention et si possible d'estimer leur impact. Par exemple, en diminuant la fréquence de bris et en prolongeant la durée de vie des infrastructures de seulement quelques années, les économies engendrées à long terme seront généralement plus importants que celles engendrées à court terme par la réduction des coûts de réparations (Thornton et Lambert, 2006, p. 2). C'est notamment le cas lorsque le remplacement des conduites et branchements de services est réalisé en fonction du nombre de bris par rapport à une longueur de conduite et un intervalle de temps (Thornton et Lambert, 2005, p. 2). D'ailleurs, des travaux sont présentement en cours pour développer une

méthodologie permettant de chiffrer la valeur actuelle nette des économies dues au prolongement de la durée de vie des infrastructures. Ainsi, des calculs effectués, pour des conduites en ciment-amiante de durées de vie résiduelles variables dans un secteur de régulation de la pression en Australie, montrent qu'un report du remplacement de trois ans de ces conduites, suite à une réduction de 20 mètres d'eau de la pression maximale, permet des économies de 157 000 \$ sur 10 ans (Thornton et Lambert, 2012, pp. 9-10).

De plus en plus d'études de cas à l'international démontrent la rentabilité de la gestion proactive de la pression. Étant donné leur impact considérable sur les pertes d'eau par les fuites et leur simplicité d'installation, il n'est pas rare de retrouver des RSI de moins de 12 mois (Thornton, Sturm et Kunkel, 2008, p. 318). D'ailleurs, au Pays de Galles et en Angleterre, où l'Ofwat (The Water Services Regulation Authority) fixe aux Services des eaux des cibles de performance basées sur le niveau optimal des pertes d'eau réelles, des milliers de secteurs de régulation de la pression rentables ont été mis en place (Lambert et Lalonde, 2005, p. 9). À Waitekere en Nouvelle-Zélande, un simple calcul conservateur a donné un RSI de 3,3 ans pour leur programme de gestion proactive de la pression (Pilipovic et Taylor, 2003, p. 140). En Afrique du Sud, les coûts totaux de construction et les économies annuelles actualisés de quatre installations mises en place entre 2000 et 2010 sont respectivement de l'ordre 1,5 millions et de 5 millions de dollars canadiens (McKenzie et Wegelin, 2010, p. 7). À Toronto, le programme de réduction des pertes d'eau réelles de la ville, qui inclut la gestion proactive de la pression, prévoit un rapport coût-bénéfice de 6,3 sur une période de 10 ans (Lalonde et al., 2008, p. 4). Naturellement, la gestion proactive de la pression n'est pas toujours rentable. D'ailleurs, il est recommandé que deux des six critères suivants s'appliquent au réseau pour que la solution puisse être rentable : pertes d'eau réelles de plus de 15 %, pertes d'eau réelles de plus de 200 litres par branchement de service par jour, amplitude de la pression de plus de 10 mètres d'eau, ruptures fréquentes des conduites, âge moyen des conduites de plus de 15 ans et plus de 200 branchements de service (GIZ, 2011, p. 6). Toutefois, concernant le critère selon l'âge moyen des conduites, il pourrait être plus adéquat de prendre un critère selon la durée de vie restante qui tient compte de l'état réel des conduites ou du moins de leur durée de vie théorique en fonction du matériau.

1.2.11 Démarche de mise en œuvre

La mise en œuvre d'un secteur de régulation de la pression requiert plusieurs étapes. La démarche proposée se base sur certains documents de l'AWWA (AWWA, 2009, pp. 172-173) et de l'IWA (Thornton, 2003, p. 44) sur le sujet.

1. Identifier les zones potentielles de haute pression du réseau de distribution en utilisant les plans disponibles. Les zones de pressions et les secteurs de suivi de la distribution existants peuvent constituer un point de départ intéressant. Si le secteur choisi n'est pas déjà isolé, il doit pouvoir l'être en installant des vannes aux endroits stratégiques. Pour les Services des eaux desservant moins de 5 000 propriétés, il est possible que le réseau au complet puisse devenir un secteur de régulation de la pression. La collaboration du personnel de terrain est pertinente pour connaître leurs préoccupations et l'état réel du réseau;
2. Pour chaque secteur, identifier les types d'utilisateurs et leur demande en eau en incluant, si c'est le cas, leur besoin pour leur système de gicleur. Il est recommandé de mesurer la consommation des utilisateurs majeurs et sensibles sur une période annuelle afin de détecter les changements saisonniers;
3. Pour chaque secteur sélectionné, effectuer un calcul préliminaire de la rentabilité à partir d'estimations et poursuivre la démarche pour les secteurs retenus;
4. Pour chaque secteur retenu, il est nécessaire de mesurer le débit et la pression à l'entrée du secteur de régulation de la pression ainsi que la pression au point critique et au point représentatif de zone. Une fois sur le terrain, en profiter pour vérifier qu'il n'y a pas de contraintes à l'emplacement des sites sélectionnés. Les données recueillies permettront de sélectionner le mode de contrôle approprié et de calculer la rentabilité;

5. Pour chaque secteur retenu, choisir le mode de contrôle approprié. Pour optimiser le nombre, l'emplacement et les paramètres des vannes de régulation de pression, il est recommandé d'avoir recours à des modèles hydrauliques et des logiciels spécialisés;
6. Pour chaque secteur retenu, il est pertinent d'effectuer un calcul final de la rentabilité en fonction du mode de contrôle choisi et de poursuivre la mise en œuvre pour les secteurs retenus;
7. Pour ces secteurs, procéder à l'installation des équipements et des chambres de mesures. Effectuer la mise en opération du secteur de régulation de la pression avec un opérateur expérimenté qui pourra démarrer la vanne de régulation de pression selon les règles de l'art pour un fonctionnement adéquat;
8. Pour un rendement durable, il est nécessaire de faire un suivi des équipements et d'effectuer les exigences d'entretien par un opérateur qualifié.

CHAPITRE 2

CADRE THÉORIQUE

2.1 Relation entre la pression et le débit de fuite

Pour connaître l'influence de la pression sur le débit de fuite, l'utilisation de l'équation du débit selon la surface des ouvertures fixes et variables (DSOV), qui a été introduite par May (1994), est recommandée par l'IWA Water Loss Task Force (Thornton, 2003, p. 43) :

$$Q_1/Q_0 = (P_1/P_0)^{N1} \quad (2.1)$$

Selon cette équation, si la pression varie de P_0 à P_1 , le débit de fuite varie de Q_0 à Q_1 selon la valeur de l'exposant $N1$. Ainsi, plus la valeur de $N1$ est élevée, plus la pression influence le débit de fuite.

Parmi les facteurs qui influencent la valeur de l'exposant $N1$, on retrouve le matériau et la condition de la conduite, la forme et la dimension de la fuite, la pression initiale et le sol environnant. Par exemple, la valeur de $N1$ peut être de l'ordre de 0,5 pour une fuite avec ouverture fixe sur une conduite métallique épaisse, de l'ordre de 1,5 pour une fuite avec une ouverture longitudinale variable sur une conduite non métallique et de l'ordre de 2,5 pour une fuite avec une ouverture longitudinale et transversale variable sur une conduite non métallique (Thornton, Sturm et Kunkel, 2008, p. 142). D'ailleurs, la Figure 2.1 illustre un exemple d'ouverture fixe sur une conduite métallique à gauche et un exemple d'ouverture variable longitudinale sur une conduite non métallique.

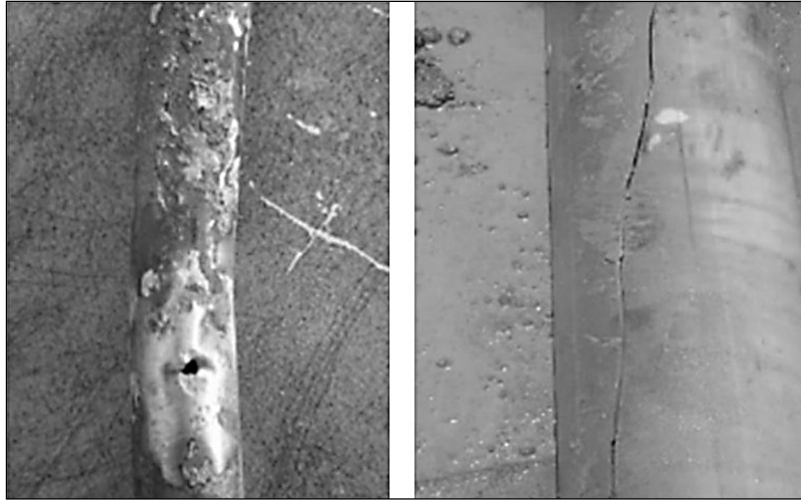


Figure 2.1 Exemples d'ouverture fixe et variable
Tirée de Thornton (2015)

Des valeurs de $N1$ peuvent être estimées sur le terrain en réduisant par palier la pression à l'entrée d'une zone de distribution durant la nuit. En effet, en calculant le taux de fuite par l'analyse du débit de nuit minimum et en mesurant la pression moyenne de la zone, tel qu'expliqué à la section 1.1.4, il est possible d'estimer les valeurs de $N1$. Les résultats de 157 estimations sur le terrain à l'international ont confirmé que l'exposant $N1$ varie généralement entre 0,5 et 1,5, qu'il atteint parfois des valeurs de 2,5 ou plus et que sa valeur moyenne est de 1,14 (Lambert et al., 1999). En considérant une valeur moyenne du $N1$ de 1,14, une réduction de la pression de 10% permettrait de diminuer les pertes d'eau par les fuites de l'ordre de 11%. Enfin, lorsque les fuites signalées et non signalées ont été réparées et qu'il ne reste que des fuites indétectables, qui sont souvent de nombreuses petites fuites, l'estimation sur le terrain de la valeur de $N1$ est de l'ordre de 1,5 (Thornton, Sturm et Kunkel, 2008, p. 142).

Par ailleurs, il est intéressant de noter que l'élasticité d'une conduite flexible peut influencer les valeurs des pressions et des débits. En effet, lorsqu'il y a une fuite dans un réseau de distribution, la pression vis-à-vis la fuite diminue (pertes de charge par frottement dû au débit de fuite), ce qui amène à augmenter la consigne de pression à l'installation de production pour assurer la pression minimale requise. Cependant, l'augmentation de la pression créera une infime augmentation du diamètre de la conduite entre la pompe et la fuite (surtout vers la

pompe). Lorsque la conduite se dilate, la pression à l'intérieur diminue et une quantité d'eau supplémentaire doit alors être pompée pour maintenir une pression constante. D'ailleurs, l'annexe N du devis normalisé *BNQ 1809-300 Travaux de construction - Clauses techniques générales - Conduites d'eau potable et d'égout* présente des équations et des abaques pour connaître le volume d'expansion des conduites en thermoplastiques lorsqu'elles sont soumises à la pression hydrostatique. Ainsi, lorsqu'il y a une fuite, la pression doit être ajustée pour non seulement compenser les pertes de charge associées au débit de fuite, mais aussi pour compenser la dilatation de la conduite. Dans la présente étude, nous nous intéressons seulement à l'impact de la fuite d'eau sur la pression de référence.

2.2 Relation entre la pression et la fréquence d'apparition de nouveaux bris

Pour connaître l'influence de la pression sur la fréquence d'apparition de nouveaux bris sur les conduites et branchements de service d'une zone de gestion de la pression, l'équation suivante peut être utilisée (Thornton et Lambert, 2012, p. 1) :

$$\% \text{ de réduction de nouveaux bris} = \text{FFB} \times \% \text{ de réduction de } P_{\max} \quad (2.2)$$

Dans cette équation, FFB est le facteur de fréquence de bris et P_{\max} représente la pression maximale au point représentatif de zone. Le point représentatif de zone est l'endroit où la pression est la plus près de la pression moyenne de la zone.

Des valeurs de FFB peuvent être estimées sur le terrain en comparant le nombre de réparations de bris, sur une période recommandée de trois ans, avant et après qu'il y ait eu une réduction de la pression maximale au point représentatif de zone. Les résultats de 112 estimations du FFB sur le terrain à l'international, qui ont été confirmés depuis au Brésil et en Australie dans respectivement 180 et 60 zones de gestion de la pression avec un taux de bris initial élevé, montrent que le FFB se situe entre 0 et 3,0 et que sa valeur moyenne est de 1,4 (Thornton et Lambert, 2012, p. 1). En considérant une valeur moyenne du FFB de 1,4, une réduction de 10

déplace vers la gauche du graphique de la Figure 2.2. Enfin, il peut être bénéfique de stabiliser la pression avant de réparer les fuites, car les fuites constituent une forme de soulagement aux pressions excessives. En effet, sans gestion de la pression, la réparation de fuites peut amener une augmentation progressive de la pression, ce qui peut provoquer l'apparition de nouvelles fuites. Toutefois, la stabilisation de la pression ne devrait pas être considérée comme un facteur retardant la réparation des fuites.

2.3 Relation entre la pression et la consommation

Pour connaître l'influence de la pression sur la consommation, l'utilisation de l'équation du DSOV avec un exposant $N3$ peut être utilisée (Lambert et Fantozzi, 2010, pp. 6-7) :

$$Q_1/Q_0 = (P_1/P_0)^{N3} \quad \text{où } N3 = N3_i + (N3_e - N3_i) \times \%CE \quad (2.3)$$

Selon cette équation, si la pression varie de P_0 à P_1 , la consommation varie de Q_0 à Q_1 selon la valeur de l'exposant $N3$. Ainsi, plus la valeur de $N3$ est élevée, plus la pression influence la consommation. Étant donné que la valeur de $N3$ n'est pas la même à l'intérieur ($N3_i$) qu'à l'extérieur ($N3_e$), l'exposant $N3$ est pondéré en fonction du pourcentage de consommation à l'extérieur ($\%CE$).

Des valeurs de $N3_i$ et $N3_e$ peuvent être estimées sur le terrain en comparant la consommation à l'aide de compteurs qui enregistrent les données avant et après une variation de pression. Des données limitées d'Australie indiquent que $N3_i$ est de l'ordre de 0,04 et que $N3_e$ est de l'ordre de 0,45 (Lambert et Fantozzi, 2010, pp. 6-7). Cette différence s'explique par le fait que la majorité de la consommation intérieure (ex. : toilettes et machines à laver) n'est peu ou pas influencée par la pression tandis que la majorité de la consommation extérieure (ex. : arrosage extérieur, notamment les systèmes de goutte-à-goutte) est sensible à la pression. En considérant une valeur moyenne du $N3_i$ de 0,04, du $N3_e$ de 0,45 et du $\%Ce$ de 0,15 pour une région au climat tempéré, une réduction de 10 % de la pression diminuerait la consommation de 1 %.

2.4 Analyse des incertitudes sur l'exposant N1

Étant donné que les études expérimentales en laboratoire et in situ portent sur la relation entre la pression et le débit de fuite, une analyse des incertitudes sur l'exposant N1 s'avère pertinente. La détermination des incertitudes sur les valeurs de N1 s'obtient par un calcul de plusieurs incertitudes reliées aux différents paramètres que sont :

- la pression et le débit mesurés par les instruments lors des études expérimentales en laboratoire et in situ;
- la pression, le poids et le temps mesurés à faible débit par les instruments lors de l'étude expérimentale en laboratoire. Étant donné que la mesure par débitmètre n'est pas possible pour de faibles débits, ces derniers sont calculés à l'aide de la méthode volumétrique.

Afin de calculer l'incertitude sur les différentes valeurs de N1, nous devons d'abord déterminer les différentes incertitudes liées à la pression, au débit, au poids et au temps.

2.4.1 Incertitude des paramètres de N1

Les incertitudes absolues de pression et des débits sont déterminés sur les valeurs moyennes provenant d'une série de n mesures de pressions $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$ et de débits $Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_n$ relevées pour un essai à l'aide d'enregistreurs de données ou de lecture manuelle sur les instruments de mesure. La formule de calcul de la moyenne nous permet de calculer une pression moyenne (P_{moy}) et un débit moyen (Q_{moy}) :

$$P_{moy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2.4)$$

$$Q_{moy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2.5)$$

Vu que les pressions et les débits fluctuent entre plusieurs valeurs autour de la moyenne arithmétique, l'on considère la moyenne des mesures comme la valeur de l'essai. Le calcul de l'incertitude liée à cette valeur moyenne est obtenu par l'utilisation de « la méthode des extrêmes ». Cette méthode de calcul donne une incertitude absolue qui est égale au maximum de l'écart entre la valeur maximale (P_{max} et Q_{max}) et la valeur moyenne (P_{moy} et Q_{moy}), et de l'écart entre la valeur moyenne (P_{moy} et Q_{moy}) et la valeur minimale (P_{min} et Q_{min}) pour une série de données obtenues pour un essai. L'incertitude absolue sur la pression et le débit moyen (ΔP_{moy} et ΔQ_{moy}) s'écrit par conséquent comme suit :

$$\Delta P_{moy} = \text{Maximum entre } (P_{max} - P_{moy}) \text{ et } (P_{moy} - P_{min}) \quad (2.6)$$

$$\Delta Q_{moy} = \text{Maximum entre } (Q_{max} - Q_{moy}) \text{ et } (Q_{moy} - Q_{min}) \quad (2.7)$$

En plus de l'incertitude sur la moyenne des mesures (ΔP_{moy} et ΔQ_{moy}), il existe une deuxième incertitude liée à l'instrument de mesure (ΔP_{ins} et ΔQ_{ins}). Cette dernière se trouve généralement sur la fiche technique de l'instrument qui est fournie par le fabricant. D'ailleurs, la précision des instruments utilisés pour cette expérience est connue et donnée dans le CHAPITRE 3. Nous pouvons donc calculer l'incertitude globale pour chaque paramètre de N1 à chaque essai. Pour une mesure des pressions ou débits, l'incertitude absolue pour ce paramètre est égale à la moyenne quadratique, soit la racine carrée de la somme des carrés des deux incertitudes. L'incertitude totale pour la pression et le débit (ΔP et ΔQ) est alors donnée par les formules suivantes :

$$\Delta P = \sqrt{\Delta P_{moy}^2 + \Delta P_{ins}^2} \quad (2.8)$$

$$\Delta Q = \sqrt{\Delta Q_{moy}^2 + \Delta Q_{ins}^2} \quad (2.9)$$

L'incertitude totale pour le poids et le temps se calcule de façon similaire au calcul de l'incertitude totale de la pression et du débit. La seule différence est que l'incertitude sur la moyenne des mesures est remplacée par l'incertitude de lecture du poids (ΔM_{lec}) et

l'incertitude de synchronisation (ΔT_{syn}). L'incertitude de lecture du poids (ΔM_{lec}) est liée aux valeurs instables affichées à l'écran de la balance étant donné le remplissage constant du réservoir sur la balance par le débit de fuite. L'incertitude de synchronisation (ΔT_{syn}) est liée au temps de décalage entre, d'une part le début du test et le démarrage du chronomètre et d'autre part la fin du test et l'arrêt du chronomètre. Ainsi, l'incertitude totale pour le poids mesuré et le temps est donnée par les formules suivantes :

$$\Delta M = \sqrt{\Delta M_{lec}^2 + \Delta M_{app}^2} \quad (2.10)$$

$$\Delta T = \sqrt{\Delta T_{syn}^2 + \Delta T_{app}^2} \quad (2.11)$$

2.4.2 Démarche de calcul de l'incertitude sur N1

La valeur N1 est fonction, selon l'équation (2.1), des pressions P_0 , P_1 et des débits de fuite Q_0 et Q_1 . Les incertitudes sur N1 sont donc aussi dépendantes des incertitudes sur les pressions et les débits de fuites. Rappelons la formule de calcul de N1 :

$$N1 = \frac{\ln(Q_0/Q_1)}{\ln(P_0/P_1)} = f(Q_0, Q_1, P_0, P_1) \quad (2.12)$$

En utilisant les propriétés de logarithme népérien, nous pouvons écrire l'équation (2.12) de la manière suivante :

$$N1 = \frac{\ln Q_0 - \ln Q_1}{\ln P_0 - \ln P_1} = \frac{\ln Q_0}{\ln P_0 - \ln P_1} - \frac{\ln Q_1}{\ln P_0 - \ln P_1} \quad (2.13)$$

Supposons que N1 dépend de plusieurs grandeurs Q_0 , Q_1 , P_0 et P_1 mesurées avec les incertitudes totales ΔQ_0 , ΔQ_1 , ΔP_0 et ΔP_1 . On considère aussi que le couple de variables Q_1 et P_1 est indépendant du couple de variables P_0 et Q_0 . Nous pouvons donc écrire que l'erreur maximale possible ou l'incertitude relative maximale de N1 s'obtient par la relation suivante :

$$\Delta N1 = \left| \frac{\partial N1}{\partial Q_0} \right| * \Delta Q_0 + \left| \frac{\partial N1}{\partial Q_1} \right| * \Delta Q_1 + \left| \frac{\partial N1}{\partial P_0} \right| * \Delta P_0 + \left| \frac{\partial N1}{\partial P_1} \right| * \Delta P_1 \quad (2.14)$$

Les dérivées partielles sont les dérivées de la fonction N1 par rapport à une variable, les autres variables étant considérées comme constantes. Avec ΔQ_0 , ΔQ_1 , ΔP_0 et ΔP_1 , les incertitudes totales sur les valeurs de Q_0 , Q_1 , P_0 et P_1 s'obtiennent par la méthode de détermination des incertitudes totales expliquée ci-dessus (section 2.4.1). Cette équation est valable pour des valeurs de pressions et débits provenant d'un débitmètre et d'un manomètre. Déterminons les dérivées de N1 par rapport aux quatre variables :

$$\left| \frac{\partial N1}{\partial Q_0} \right| = \left| \frac{\ln Q_0}{\ln P_0 - \ln P_1} \right|' = \frac{1}{Q_0 * \ln(P_0/P_1)} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial N1}{\partial Q_1} \right| &= \left| -\frac{\ln Q_1}{\ln P_0 - \ln P_1} \right|' = \left| -\frac{1}{Q_1 * \ln(P_0/P_1)} \right| \\ &= \left| \frac{1}{Q_1 * \ln(P_1/P_0)} \right| \\ &= -\frac{1}{Q_1 * \ln(P_1/P_0)}, \text{ car } P_1 \text{ est inférieur à } P_0 \\ &= \frac{1}{Q_1 * \ln(P_0/P_1)} \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\left| \frac{\partial N1}{\partial P_0} \right| = \left| \frac{\ln Q_0 - \ln Q_1}{\ln P_0 - \ln P_1} \right|' = \frac{\ln(Q_0/Q_1)}{P_0 * \ln(P_0/P_1)^2} \quad (2.17)$$

$$\left| \frac{\partial N_1}{\partial P_1} \right| = \left| \frac{\ln Q_0 - \ln Q_1}{\ln P_0 - \ln P_1} \right|' = \frac{\ln(Q_0/Q_1)}{P_1 * \ln(P_0/P_1)^2} \quad (2.18)$$

Étant donné que la pression décroît au fur et à mesure que les essais progressent et que le logarithme népérien d'une valeur inférieure à 1 est négatif, il est possible d'effectuer la simplification effectuée à l'équation (2.16). Remplaçons ensuite les dérivées partielles dans l'équation (2.14) et nous obtenons :

$$\Delta N_1 = \frac{\Delta Q_0}{Q_0 \ln(P_0/P_1)} + \frac{\Delta Q_1}{Q_1 \ln(P_0/P_1)} + \frac{\Delta P_0 \ln(Q_0/Q_1)}{P_0 * \ln(P_0/P_1)^2} + \frac{\Delta P_1 \ln(Q_0/Q_1)}{P_1 * \ln(P_0/P_1)^2} \quad (2.19)$$

Remplaçons dans l'équation précédente le rapport $\frac{\ln(Q_0/Q_1)}{\ln(P_0/P_1)}$ par N1, l'incertitude maximale

pour chaque N1 peut être calculée par la relation suivante :

$$\Delta N_1 = \frac{\Delta Q_0}{Q_0 \ln(P_0/P_1)} + \frac{\Delta Q_1}{Q_1 \ln(P_0/P_1)} + \frac{\Delta P_0 * N_1}{P_0 * \ln(P_0/P_1)} + \frac{\Delta P_1 * N_1}{P_1 * \ln(P_0/P_1)} \quad (2.20)$$

Pour les petites fuites, les débits de fuite ne proviennent pas du débitmètre, mais de la méthode volumétrique. Les valeurs des débits (Q) sont obtenues en divisant le volume écoulé à travers la fuite (V) par le temps compté entre le début et la fin de l'essai (T) :

$$Q = \frac{V}{T} \quad (2.21)$$

En remplaçant le volume (V) par le produit de la masse de l'eau mesurée (M), de la force de gravité (g) et de la masse volumique de l'eau (ρ), le débit d'eau qui circule dans la conduite peut s'écrire de la manière suivante :

$$Q = \frac{M \rho g}{T} \quad (2.22)$$

En remplaçant Q_0 et Q_1 par $Q_0 = \frac{M_0 \rho g}{T_0}$ et $Q_1 = \frac{M_1 \rho g}{T_1}$ avec le poids et le temps au début de l'essai (M_0 et T_0) et le poids et le temps à la fin de l'essai (M_1 et T_1), l'incertitude absolue sur N_1 de l'équation (2.14) s'écrit alors en fonction des paramètres M_0 , M_1 , T_0 , T_1 , P_0 et P_1 par la formule suivante :

$$\begin{aligned} \Delta N_1 = & \left| \frac{\partial N_1}{\partial M_0} \right| * \Delta M_0 + \left| \frac{\partial N_1}{\partial T_0} \right| * \Delta T_0 + \left| \frac{\partial N_1}{\partial M_1} \right| * \Delta M_1 + \left| \frac{\partial N_1}{\partial T_1} \right| * \Delta T_1 \\ & + \left| \frac{\partial N_1}{\partial P_0} \right| * \Delta P_0 + \left| \frac{\partial N_1}{\partial P_1} \right| * \Delta P_1 \end{aligned} \quad (2.23)$$

Les dérivés de N_1 par rapport à la force de gravité (g) et à la masse volumique de l'eau (ρ) valent zéro, car la masse volumique de l'eau et la force de gravité demeurent constantes pour toutes les opérations de mesure et tous les calculs effectués. À partir des équations (2.12) et (2.22), N_1 devient alors :

$$N_1 = \frac{\ln Q_0 - \ln Q_1}{\ln(P_0/P_1)} = \frac{\ln(M_0 * \rho * g/T_0) - \ln(M_1 * \rho * g/T_1)}{\ln(P_0/P_1)} \quad (2.24)$$

En développant le numérateur de cette opération et en utilisant les propriétés de logarithme népérien, nous obtenons l'équation suivante :

$$N_1 = \frac{\ln M_0 + \ln \rho + \ln g - \ln T_0 - \ln M_1 - \ln \rho - \ln g + \ln T_1}{\ln(P_0/P_1)} \quad (2.25)$$

Après simplifications des opérations, l'équation de N_1 en fonction des poids mesurés, des temps comptés et des pressions s'écrit comme suit :

$$N_1 = \frac{\ln M_0 - \ln T_0 - \ln M_1 + \ln T_1}{\ln(P_0/P_1)} \quad (2.26)$$

À partir des équations (2.23) et (2.26), calculons les dérivés de N1 par rapport aux variables M₀, M₁, T₀ et T₁ :

$$\left| \frac{\partial N_1}{\partial M_0} \right| = \left| \frac{\ln M_0}{\ln(P_0/P_1)} \right|' = \frac{1}{M_0 * \ln(P_0/P_1)} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial N_1}{\partial M_1} \right| &= \left| \frac{-\ln M_1}{\ln(P_0/P_1)} \right|', \\ &= \frac{1}{M_1 * \ln(P_0/P_1)}, \text{ car } P_1 \text{ est inférieur à } P_0 \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\left| \frac{\partial N_1}{\partial T_0} \right| = \left| \frac{-\ln T_0}{\ln(P_0/P_1)} \right|' = \frac{1}{T_0 * \ln(P_0/P_1)}, \text{ car } P_1 \text{ est inférieur à } P_0 \quad (2.29)$$

$$\left| \frac{\partial N_1}{\partial T_1} \right| = \left| \frac{\ln T_1}{\ln(P_0/P_1)} \right|' = \frac{1}{T_1 * \ln(P_0/P_1)} \quad (2.30)$$

Les incertitudes sur N1 par rapport à P₀ et P₁ restent les mêmes que celles obtenues à l'équation (2.20). Par une substitution des équations des différentes dérivées partielles de N1 des équations (2.27) à (2.30), l'équation (2.23) devient simplement :

$$\begin{aligned} \Delta N_1 &= \frac{\Delta M_0}{M_0 \ln(P_0/P_1)} + \frac{\Delta M_1}{M_1 \ln(P_0/P_1)} + \frac{\Delta T_0}{T_0 \ln(P_0/P_1)} + \frac{\Delta T_1}{T_1 \ln(P_0/P_1)} \\ &\quad + \frac{\Delta P_0 * N_1}{P_0 * \ln(P_0/P_1)} + \frac{\Delta P_1 * N_1}{P_1 * \ln(P_0/P_1)} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Ainsi, l'équation (2.20) pour les mesures de débits de fuites avec un débitmètre ainsi que l'équation (2.31) pour les mesures de débits de fuites avec méthode volumétrique nous permettent de calculer les incertitudes absolues pour les dix N1 obtenues pour chaque type de fissures.

2.4.3 Estimation de l'intervalle de confiance de l'incertitude sur N1

Afin de connaître l'incertitude maximale de chaque N1 moyen calculé, nous élaborons dans cette partie la démarche de l'estimation de l'intervalle de confiance des incertitudes sur N1

($IC(\Delta N1)$) afin de connaître les valeurs admissibles de $N1$ pour chaque cas d'étude. Ainsi, l'intervalle de confiance nous donnera les valeurs extrêmes de l'incertitude liée au $N1$ ($\Delta N1$) pour une probabilité de risque donnée α , où α représente la probabilité pour que l'intervalle de confiance ne contienne pas la vraie valeur de l'incertitude($\Delta N1$) .

Cette démarche commence d'abord par les calculs des moyennes des incertitudes $N1$ ($\Delta N1_{moy}$) et des écarts-types ($\sigma_{\Delta N1}$) pour chaque type de fissure associée à une conduite (Huit couples de valeurs pour les deux types de conduites étudiées). Les formules suivantes donnent les équations de calcul de la moyenne des incertitudes et de son écart-type :

$$\Delta N1_{moy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta N1_i \quad (2.32)$$

$$\sigma_{\Delta N1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n |(\Delta N1_i - \Delta N1_{moy})^2} \quad (2.33)$$

Nous supposons que les valeurs sur les incertitudes $\Delta N1$ sont toutes indépendantes et suivent une distribution normale (loi normale) de moyenne $\Delta N1_{moy}$ et de variance $\sigma_{\Delta N1}^2/n$. La variance est égale au carré de l'écart-type. Après centrage et réduction de la moyenne empirique de l'incertitude par la relation $\sqrt{n} * \frac{\Delta N1_{moy} - \Delta N1}{\sigma_{\Delta N1}}$, la loi normale de $\Delta N1$ devient une loi normale centrée réduite $N\sim(0,1)$.

Si on considère P la loi de probabilité de la variable de $\Delta N1$ et d'un échantillon $\Delta N1_i$, où $i = 1, \dots, n$, avec n le nombre de valeurs des incertitudes par type de fissure, alors la probabilité d'avoir la valeur de l'incertitude sur les $N1$ ($\Delta N1$) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P\left(-\mu \leq \sqrt{n} * \frac{\Delta N1_{moy} - \Delta N1}{\sigma_{\Delta N1}} \leq \mu\right) = 1 - \alpha \quad (2.34)$$

où μ étant la fractile d'ordre $1 - \alpha/2$ de la loi normale (0,1). Le niveau de confiance $1 - \alpha$, noté aussi $(100 - \alpha) \%$, est la probabilité d'un événement que l'on considère comme très probable. Le choix de cette probabilité doit se faire sur une base raisonnée en fonction du contexte dans lequel les estimations ont été effectuées. Afin d'isoler l'incertitude $\Delta N1$, la relation (2.34) peut s'écrire de la façon suivante :

$$P\left(\Delta N1moy - \mu * \frac{\sigma_{\Delta N1}}{\sqrt{n}} \leq \Delta N1 \leq \Delta N1moy + \mu * \frac{\sigma_{\Delta N1}}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha \quad (2.35)$$

Nous pouvons écrire l'équation de l'intervalle de confiance de $\Delta N1$ à partir de l'équation (2.35) par la formule suivante :

$$IC(\Delta N1) = [\Delta N1moy - \mu * \frac{\sigma_{\Delta N1}}{\sqrt{n}}, \Delta N1moy + \mu * \frac{\sigma_{\Delta N1}}{\sqrt{n}}] \quad (2.36)$$

La valeur de l'incertitude de $N1$ ($\Delta N1$) est comprise dans cet intervalle de confiance. Dans notre cas, par exemple, pour un $\alpha = 5\%$, le fractile μ d'ordre 0,975 de la loi normale centrée réduite correspond à 1,96. En considérant aussi les dix valeurs de $N1$ pour chaque type de fissures, les équations (2.35) et (2.36) deviennent alors :

$$P\left(\Delta N1moy - 1,96 * \frac{\sigma_{\Delta N1}}{\sqrt{10}} \leq \Delta N1 \leq \Delta N1moy + 1,96 * \frac{\sigma_{\Delta N1}}{\sqrt{10}}\right) = 0,95 \quad (2.37)$$

$$IC(\Delta N1) = [\Delta N1moy - 1,96 * \frac{\sigma_{\Delta N1}}{\sqrt{10}}, \Delta N1moy + 1,96 * \frac{\sigma_{\Delta N1}}{\sqrt{10}}] \quad (2.38)$$

CHAPITRE 3

ÉTUDES EXPÉRIMENTALES EN LABORATOIRE ET IN SITU

3.1 Étude expérimentale en laboratoire

L'étude expérimentale en laboratoire de la détermination de valeurs N_1 pour des conduites flexibles s'est déroulée dans le laboratoire Hydraulique de l'ÉTS. Idéalement, les tests auraient dû être effectués sur des conduites provenant de vrais réseaux de distribution et ayant subi une certaine dégradation concernant l'âge et le coefficient Hazen Williams. Cependant, afin de réaliser des tests adéquats en fonction des contraintes d'échelle du banc d'essai, les tests se sont déroulés sur des conduites neuves de plus petits diamètres.

3.1.1 Méthodologie utilisée

Le banc d'essais est un circuit fermé, composé d'un grand réservoir d'eau qui est relié à une pompe. La pompe est commandée par un coffret qui permet de choisir le régime de fonctionnement de celle-ci (fréquence de rotation). Une conduite flexible sert de conduite d'amenée d'eau jusqu'au tronçon de la conduite à étudier. Sur ce circuit, des instruments de mesure tels que le débitmètre électromagnétique, un manomètre et des vannes de fermeture sont installés entre la pompe et la conduite étudiée pour relever les débits et la pression. L'eau provenant de la fuite est recueillie dans un réservoir de 75 x 75 x 75 cm. Ce réservoir est déposé sur une balance électromagnétique servant à mesurer le poids de l'eau recueillie pour un instant donné en faisant la différence entre le poids final et le poids initial. Il est utilisé lorsque les faibles débits ne peuvent être mesurés avec le débitmètre. Entre les tests, le réservoir est généralement vidé pour que le marnage soit suffisant pour le test subséquent. Le manomètre placé en amont de la conduite étudiée affiche les valeurs de pressions qui varient en fonction du temps. Pour obtenir une pression représentative réelle pendant le test, un système d'acquisition de données a été installé. Ainsi, le manomètre est relié à l'ordinateur par un câble Bus Universel en Série (USB) et l'ensemble des pressions est relevé sur l'ordinateur à l'aide

du programme Termite 3.1. Les trois figures suivantes représentent l'ensemble des composantes du banc d'essais pour la détermination de N_1 des conduites flexibles étudiées.

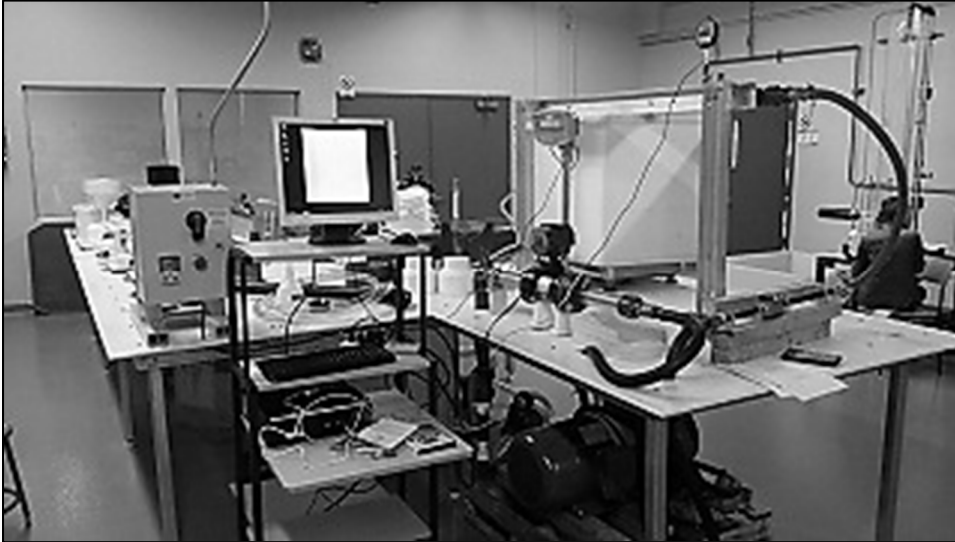


Figure 3.1 Pompe, débitmètre, conduite d'amenée et système d'acquisition de données du banc d'essais au laboratoire de l'ÉTS

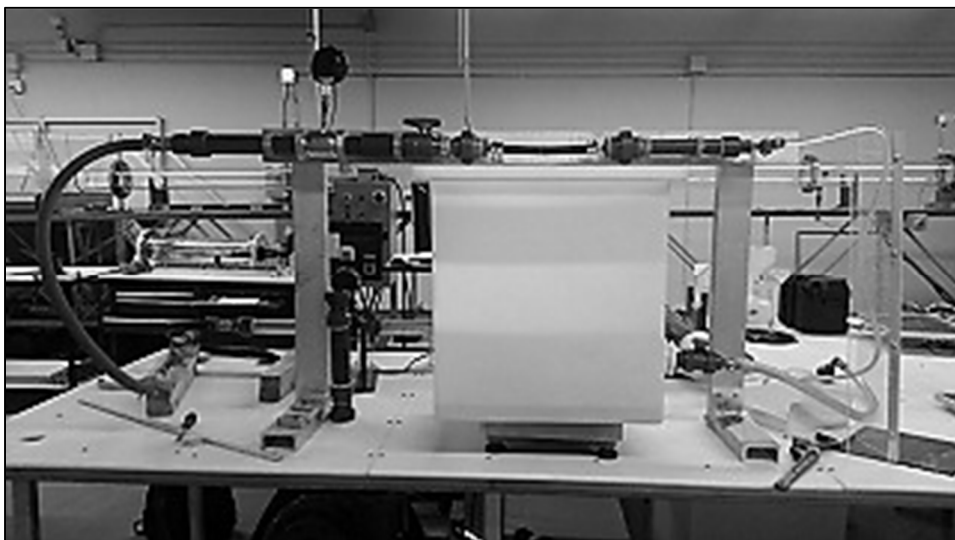


Figure 3.2 Manomètre, vannes, conduite avec orifice à l'étude, réservoir pour recueillir le débit de fuite et balance du banc d'essai au laboratoire de l'ÉTS

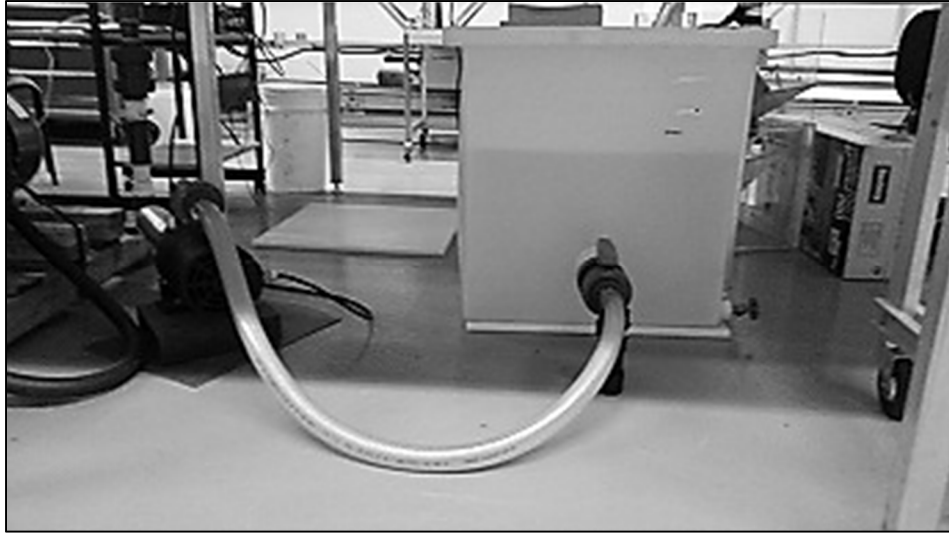


Figure 3.3 Vanne et grand réservoir d'eau relié à la pompe du banc d'essai au laboratoire de l'ÉTS

Le débitmètre Arkon MAGX2, illustré à la Figure 3.4, est de type électromagnétique. Il a été placé à la sortie de la pompe et mesure le débit d'un liquide à l'aide de la charge ionique. Sur la tête du débitmètre, les mesures des débits sont affichées en gallon US/min à partir de 1,85 gallon US/min. La précision de l'instrument est de 0,2 %, comme indiqué à la Figure-A I-1. Par ailleurs, les petits débits, soit ceux provenant des fissures longitudinales de 5 et 10 millimètres (mm) sur la conduite flexible, n'ont pas été mesurés avec le débitmètre, mais plutôt par la méthode volumétrique. Ce sont les débits provenant de la fissure longitudinale de 20 mm et de la fissure longitudinale et transversale de 20 mm x 5 mm qui ont été mesurés par le débitmètre.

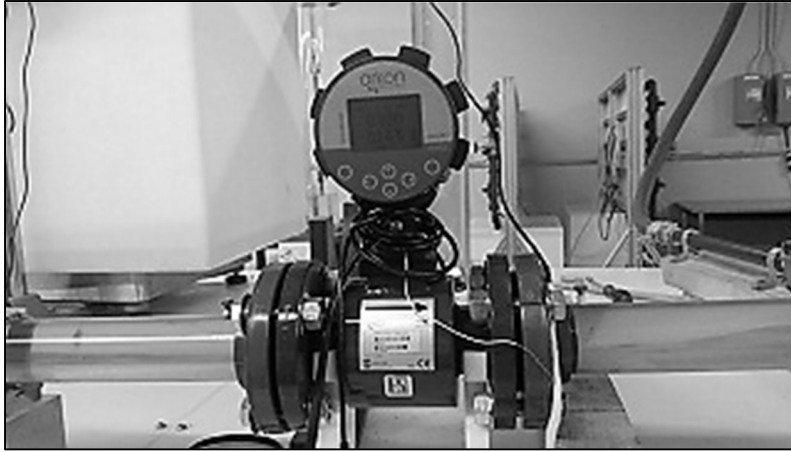


Figure 3.4 Débitmètre Arkon MAGX2

Le programme Termite 3.1, présenté à la Figure 3.5, est un logiciel capable d'enregistrer les pressions du manomètre qui sont transmises via un câble adaptateur USB vers série RS232. Le programme se concentre sur les données de texte, et plus précisément le texte qui est envoyé et reçu sous forme de chaînes terminées par des caractères. Une fois que le test est arrêté, les données de pression recueillies par le logiciel Termite 3.1 sont copiées et collées dans un fichier Excel pour exploitation.

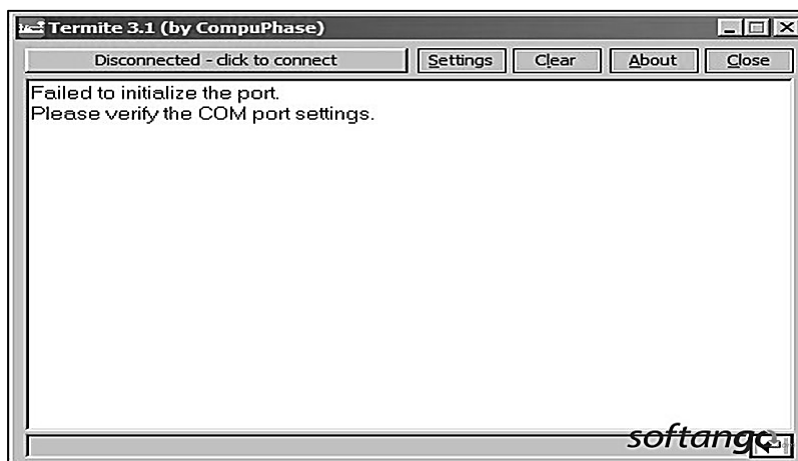


Figure 3.5 Capture d'écran du programme Termite 3.1

Le manomètre numérique, de modèle Beta Gauge P.I.-Pro, a une capacité de mesure maximale de 700 kPa. Le manomètre a été placé juste en amont de la fuite afin de minimiser l'effet des pertes de charge linéaires. Dans le cadre de notre étude, les pressions mesurées ont varié de 210 à 660 kPa. La précision de l'instrument est de $\pm 0,05\%$, comme spécifié à la Figure-A I-2. De plus, un écran affiche les valeurs de pression en kPa tel qu'illustré à la Figure 3.6.



Figure 3.6 Manomètre numérique Beta Gauge P.I.-Pro

La pompe Weg LR 38324, illustrée à la Figure 3.7, est utilisée pour pomper l'eau dans le système. Comme spécifié à la Figure-A I-3, c'est une pompe de 50 hertz (Hz) et de 0,75 HP. Pour faire varier la pression dans le système de 650 à 210 kPa, la fréquence de la pompe a été réglée de 56 à 26 Hz à partir du panneau de contrôle illustré à la Figure 3.8.



Figure 3.7 Pompe Weg LR 38324

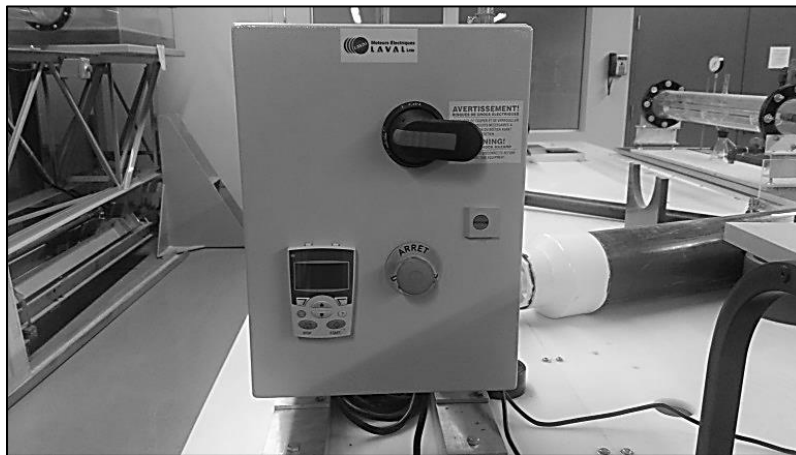


Figure 3.8 Panneau de contrôle de la pompe

La balance GFK 75, illustrée à la Figure 3.9, est utilisée pour calculer le débit des petites fuites (fissures longitudinales de 5 et 10 mm sur la conduite flexible). Elle a une capacité maximale de pesage de 75 kilogrammes avec une précision de ± 5 g, tel que spécifié à la Figure-A I-4. C'est un instrument performant adapté pour les mesures de poids en laboratoire. Il fonctionne avec l'électricité ou la batterie interne rechargeable incluse. Dans le cadre des tests, il fonctionnait à l'électricité. L'écran rétroéclairé avec indicateur de capacité affiche l'étendue de pesage restante lorsque la fonction tare est utilisée, ce qui permet de ne pas surcharger la balance. Son clavier numérique complet permet les fonctions de tare pré-réglée et de choisir

librement l'unité de mesure. Dans le cadre des tests, l'unité choisie était en gramme et la prise de données a été effectuée de façon manuelle par la lecture directe sur l'écran du manomètre.



Figure 3.9 Balance GFK 75

Les conduites flexibles utilisées pour simuler les fuites sont en polyéthylène haute densité (PEHD) et en polychlorure de vinyle (PVC). Les conduites en PEHD utilisées sont de 20 mm (3/4 pouce) de diamètre nominal et celles en PVC sont de 50 mm (2 pouces) de diamètre nominal, tel qu'illustré aux deux figures suivantes :

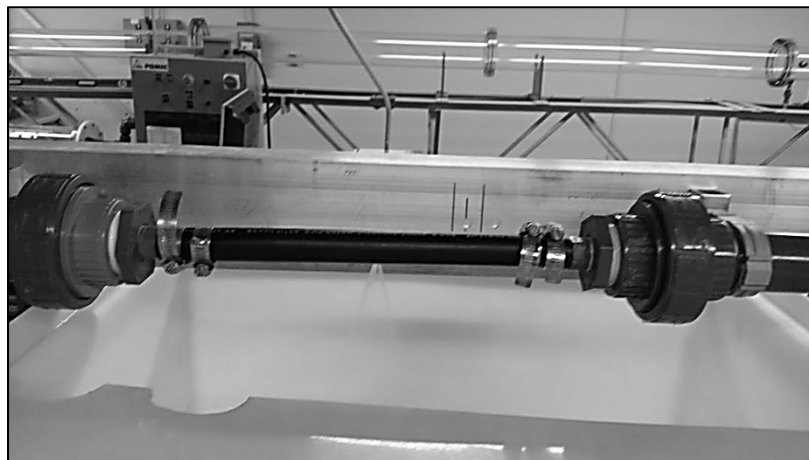


Figure 3.10 Conduite en PEHD de 20 mm

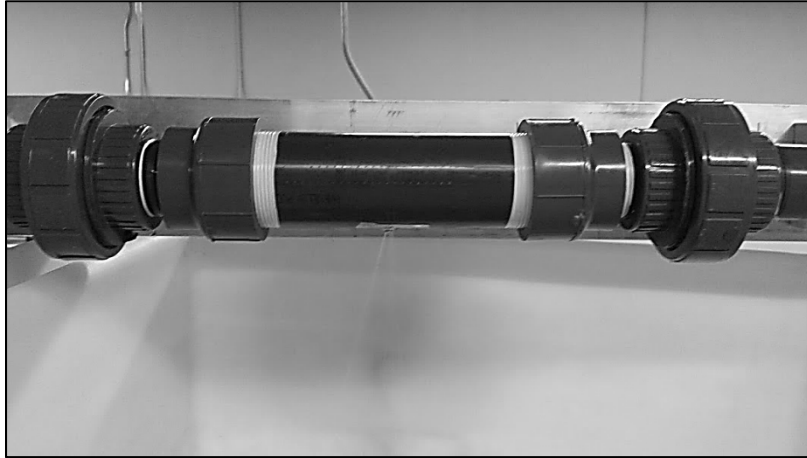


Figure 3.11 Conduite en PVC de 50 mm

Afin de pouvoir reproduire les essais, nous avons préparé quatre conduites en PEHD et quatre conduites en PVC pour les quatre types de fissures à analyser. Ainsi, il y avait trois fissures longitudinales de 5 mm, 10 mm et 20 mm ainsi qu'une fissure longitudinale et transversale de 20 mm x 5 mm. Nous avons commencé par réaliser les quatre essais sur les conduites en PEHD. Ensuite, nous avons réalisé les quatre essais sur les conduites en PVC. Enfin, une deuxième série d'essais a été réalisée pour s'assurer de la reproductibilité de l'étude. Pour les 16 essais, cinq mesures consécutives ont été réalisées en variant la pression à cinq paliers de pression. Cette variation s'obtient par une diminution contrôlée de la fréquence de rotation de la pompe. Pour les petits débits (fissures longitudinales de 5 et 10 mm sur la conduite flexible), la méthode volumétrique est utilisée pour connaître les débits de fuite. Ainsi, une fois que le seuil de pression souhaité dans le système est établi, on relève le poids initial affiché sur la balance et on démarre la collecte de données de pressions avec le logiciel Termite 3.1 pour une durée de deux minutes. Une fois le temps écoulé, le poids final est relevé par une lecture directe sur la balance. La différence entre le poids final et l'initial nous donne le poids de l'eau écoulé à travers la fissure durant le temps compté. Le débit de la fuite quant à lui est obtenu en faisant le rapport entre le poids mesuré et le temps compté. Pour les débits plus élevés (fissure longitudinale de 20 mm et fissure longitudinale et transversale de 20 mm x 5 mm), les débits sont notés de façon manuelle par une lecture directe de l'écran du débitmètre placé en amont

de la conduite. Les paliers de pression ont été choisis pour être représentatif des pressions généralement présentes sur un réseau de distribution d'eau potable municipal. Ainsi, les paliers retenus sont 660 kPa, 525 kPa, 420 kPa, 315 kPa et 210 kPa. Chaque essai consistait donc à mesurer et recueillir cinq séries de données de pression et de débit de fuite pour une fissure donnée. Il était ensuite possible de calculer, à l'aide de l'équation (2.12), dix $N1$ pour chaque fissure, soit avec les paliers 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 1-3, 1-4, 1-5, 2-4, 2-5 et 3-5. Le $N1$ préliminaire ($N1_{\text{pré}}$) est calculé avec la moyenne des cinq pressions et débits mesurées sur un essai. $N1_{\text{pré}}$ représente la valeur de $N1$ pour une fissure donnée sans les incertitudes des différents paramètres. Enfin, l'écart-type de la série de données de pression permet d'interpréter l'homogénéité de la série de pressions afin de savoir si les données de pression sont uniformes pour chaque palier.

3.1.2 Résultats et discussion

Tout d'abord, on a noté que les résultats de la deuxième série d'essai étaient identiques ou très similaires à ceux de la première série d'essais. D'ailleurs, un élargissement des fissures suite à la première série d'essais peut expliquer la très faible augmentation de débit lors de la deuxième série d'essais. Étant donné que l'objectif de reproductibilité sur le banc d'essais de l'ÉTS est atteint, seulement les résultats de la première série d'essais sont présentés. Les résultats des quatre essais sur les conduites en PEHD sont présentés dans un premier temps et les résultats des quatre essais sur les conduites en PVC sont ensuite présentés.

Les résultats des $N1_{\text{pré}}$ pour les quatre fissures sur la conduite en PEHD sont détaillés à l'ANNEXE III et résumés au Tableau 3.1. Afin de simplifier la présentation des résultats, la fissure longitudinale et transversale de 20 mm x 5 mm est notée 25 mm.

Tableau 3.1 Valeurs de $N1_{\text{pré}}$
pour les quatre fissures sur les conduites en PEHD

Longueur de la fissure (mm)	$N1_{\text{pré}}$
5	0,70

10	0,87
20	0,78
25	0,79

La Figure 3.12 illustre la répartition des valeurs de $N1_{pré}$ en fonction de la longueur de la fissure pour les conduites en PEHD :

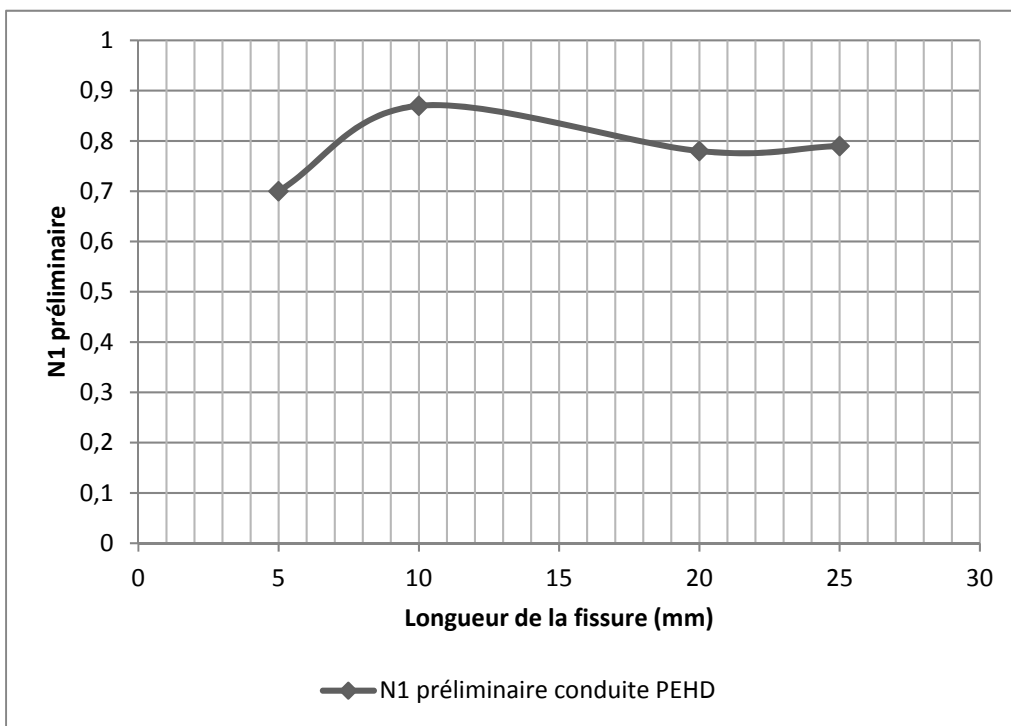


Figure 3.12 Courbe des valeurs de $N1_{pré}$ en fonction de la longueur de la fissure sur les conduites en PEHD

Nous observons premièrement du Tableau 3.1 que les valeurs de $N1_{pré}$ pour cet essai sont comprises entre 0,70 et 0,87. De la Figure 3.12, nous constatons que la valeur $N1_{pré}$ est croissante de 0,70 à 0,87 et généralement décroissante pour les grandes fissures (supérieures à 10 mm). La fissure longitudinale de 5 mm reste rigide pour l'ensemble des paliers de pression. Pour ce cas, la fissure ne s'ouvre pas totalement et cela ne permet pas un écoulement uniforme le long de la fissure. Ceci pourrait expliquer la valeur faible du débit et de $N1_{pré}$. Dans l'ensemble, les valeurs de $N1_{pré}$ obtenues répondent bien à logique qui veut que plus la fissure

est grande, plus la valeur de $N1_{pré}$ est petite. De plus, les valeurs de $N1_{pré}$ obtenues pour ce test sont largement supérieures à 0,5 qui est considéré comme la valeur standard de $N1$ lorsque la fissure ne s'agrandit pas avec une augmentation de la pression.

Pour analyser la fiabilité des données de pressions recueillies pour chaque essai, les écarts-types des séries de données de pression nous permettent d'apprécier l'homogénéité de la série de la pression. Les tableaux de l'ANNEXE III nous donnent les résultats de calculs des paramètres de pressions moyennes, des écarts-types des pressions, des débits moyens relevés ainsi que les détails de calcul des débits obtenus par la méthode volumétrique. Les valeurs de pressions recueillies pour les deux premiers essais (fissures longitudinales de 5 mm et 10 mm) sont homogènes. En effet, les écarts-types sont inférieurs à 0,5 kPa, donc la valeur moyenne de la pression est représentative pour ces pressions. Quant aux séries des données de pressions des fissures longitudinales de 20 mm et longitudinales et transversales de 20 mm x 5 mm, nous avons observé une diminution progressive de la pression lors de la prise de données sur deux minutes à la pression maximale de 660 kPa. Ainsi, leurs écarts-types de pression respectifs sont de 3,11 kPa et 2,24 kPa. Cette diminution progressive de la pression s'explique par la fissure qui s'agrandissait lors de la prise de données puisqu'en même temps une augmentation du débit était notée.

Afin d'ajuster les valeurs de $N1$ pour les conduites en PEHD, les incertitudes totales pour l'ensemble des paramètres ont été calculées. Les tableaux de l'ANNEXE IV présentent le détail de calcul des différentes incertitudes que sont l'incertitude totale de la pression, du débit, de la masse et du temps. En considérant l'équation (2.38), les calculs des incertitudes sur les valeurs de $N1$ pour les conduites en PEHD sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 3.2 Intervalle de confiance des incertitudes $\Delta N1$ pour les conduites en PEHD

Longueur de la fissure (mm)	Intervalle de confiance de $\Delta N1$	
	$\Delta N1_{moy} - 1.96 * \sigma \Delta N1 / \sqrt{10}$	$\Delta N1_{moy} + 1.96 * \sigma \Delta N1 / \sqrt{10}$
5	0,08	0,18

10	0,07	0,15
20	0,05	0,09
25	0,06	0,10

On remarque que les valeurs des intervalles obtenues sont toutes positives. Cette analyse indique que la valeur de N_1 sera probablement supérieure au $N_{1\text{pré}}$. Par ailleurs, les incertitudes obtenues par la méthode volumétrique (fissures de 5 et 10 mm) sont supérieures à celles obtenues par l'utilisation du débitmètre. Ceci s'explique notamment par la prise de données manuelle (sans enregistreur de données) qui implique une incertitude sur le poids et sur le temps. De plus, étant donné que le poids maximal admissible par la balance est de 75 kg, la durée des tests ne pouvait pas être longue, ce qui a pour effet d'augmenter l'erreur relative. Ainsi, l'écart entre les valeurs admissibles de N_1 pour les conduites en PEHD, présenté au Tableau 3.3 et illustré à la Figure 3.13, est plus élevé pour les fissures de 5 et 10 mm.

Tableau 3.3 Valeurs admissibles de N_1 pour les conduites en PEHD

Longueur de la fissure (mm)	Intervalle de confiance de N_1	
	$N_{1\text{moy}} + \Delta N_{1\text{moy}} - 1.96 * \sigma \Delta N_1 / \sqrt{10}$	$N_{1\text{moy}} + \Delta N_{1\text{moy}} + 1.96 * \sigma \Delta N_1 / \sqrt{10}$
5	0,78	0,88
10	0,94	1,02
20	0,83	0,87
25	0,85	0,89

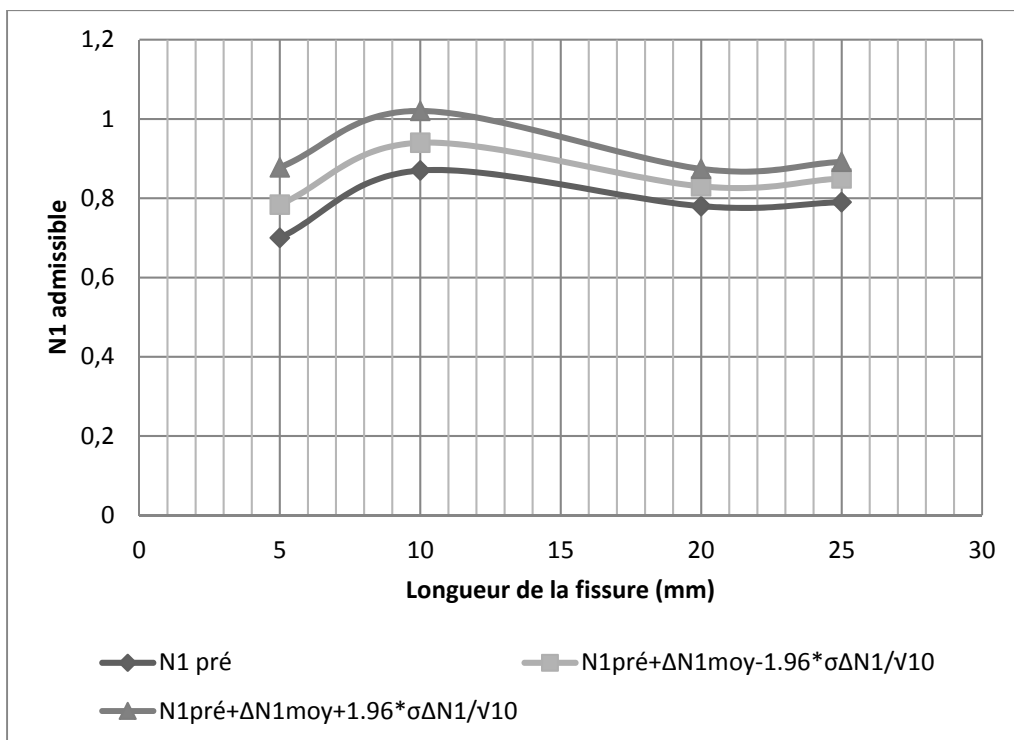


Figure 3.13 Courbes des valeurs admissibles de N1 pour les conduites en PEHD

De la même manière que pour les conduites en PEHD, un essai a été réalisé sur les quatre conduites en PVC ayant chacune une fissure de longueur différente. Comme indiqué à l'ANNEXE V, les valeurs de pressions moyennes sont homogènes et les écarts-types de pression pour tous les types de fissures sont inférieurs à 0,7 kPa. Le Tableau 3.4 résume les résultats des $N1_{pré}$ obtenus.

Tableau 3.4 Valeurs de $N1_{pré}$
pour les quatre fissures sur les conduites en PVC

Longueur de la fissure (mm)	$N1_{pré}$
5	0,58
10	0,63
20	0,65
25	0,62

Nous remarquons que les valeurs de $N1_{pré}$ varient entre 0,58 et 0,65. Nous constatons, à la Figure 3.14, que la valeur du paramètre $N1_{pré}$ croît légèrement avec la longueur de la fuite, mais reste toutefois voisine de la valeur standard théorique de 0.5. Par ailleurs, conformément à nos attentes, les valeurs de $N1_{pré}$ pour la conduite flexible en PVC sont inférieures à celles obtenues pour la conduite flexible en PEHD.

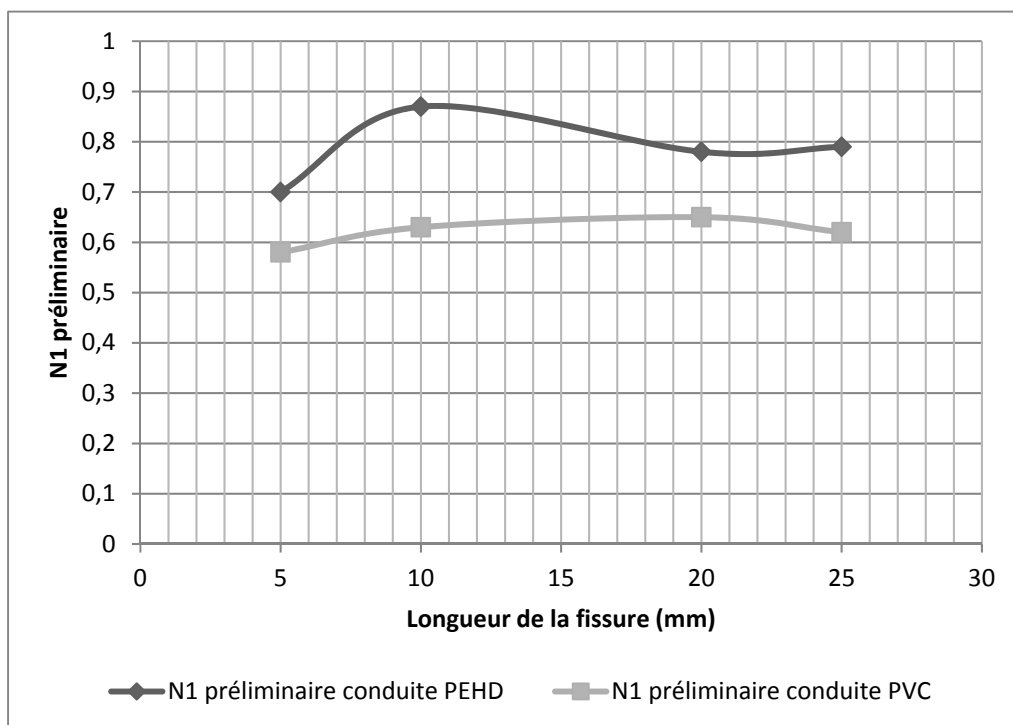


Figure 3.14 Courbes des valeurs de $N1_{pré}$ en fonction de la longueur de la fissure sur les conduites en PEHD et PVC

Le calcul des incertitudes liées aux valeurs de $N1_{\text{pré}}$ obtenues pour les conduites en PVC est détaillé à l'ANNEXE VI. En considérant l'équation (2.38), les calculs des incertitudes sur les valeurs de $N1$ pour les conduites en PVC sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 3.5 Intervalle de confiance des incertitudes $\Delta N1$ pour les conduites en PVC

Longueur de la fissure (mm)	Intervalle de confiance de $\Delta N1$	
	$\Delta N1_{\text{moy}} - 1.96 * \sigma \Delta N1 / \sqrt{10}$	$\Delta N1_{\text{moy}} + 1.96 * \sigma \Delta N1 / \sqrt{10}$
5	0,07	0,14
10	0,06	0,06
20	0,02	0,06
25	0,02	0,04

Comme pour les conduites en PEHD, on remarque que les valeurs des intervalles obtenues pour les conduites en PVC sont toutes positives. Cette analyse indique que la valeur de $N1$ sera probablement supérieure au $N1_{\text{pré}}$. Par ailleurs, on observe que l'écart entre les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance pour les conduites en PVC est généralement plus petit que l'écart noté pour les conduites en PEHD. Cela indique que les

données pour les conduites en PVC sont plus fiables que celles en PEHD. En effet, les débits et les pressions des essais effectués avec les conduites en PVC étaient plus stables, car le matériau est plus rigide. On remarque même que l'écart est nul entre les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance pour la fissure longitudinale de 10 mm. La rigidité du PVC s'est aussi remarquée lors des essais à la pression maximale de 660 kPa. En effet, il n'y avait pas de diminution de la pression due à l'agrandissement de fissure comme c'était le cas avec la conduite en PEHD.

Enfin, l'écart entre les valeurs admissibles de N1 pour les conduites en PVC est présenté au tableau ci-dessous et illustré à la Figure 3.15.

Tableau 3.6 Valeurs admissibles de N1 pour les conduites en PVC

Longueur de la fissure (mm)	Intervalle de confiance de N1	
	$N1_{moy} + \Delta N1_{moy} - 1.96 * \sigma \Delta N1 / \sqrt{10}$	$N1_{moy} + \Delta N1_{moy} + 1.96 * \sigma \Delta N1 / \sqrt{10}$
5	0,65	0,72
10	0,69	0,69
20	0,67	0,71
25	0,64	0,66

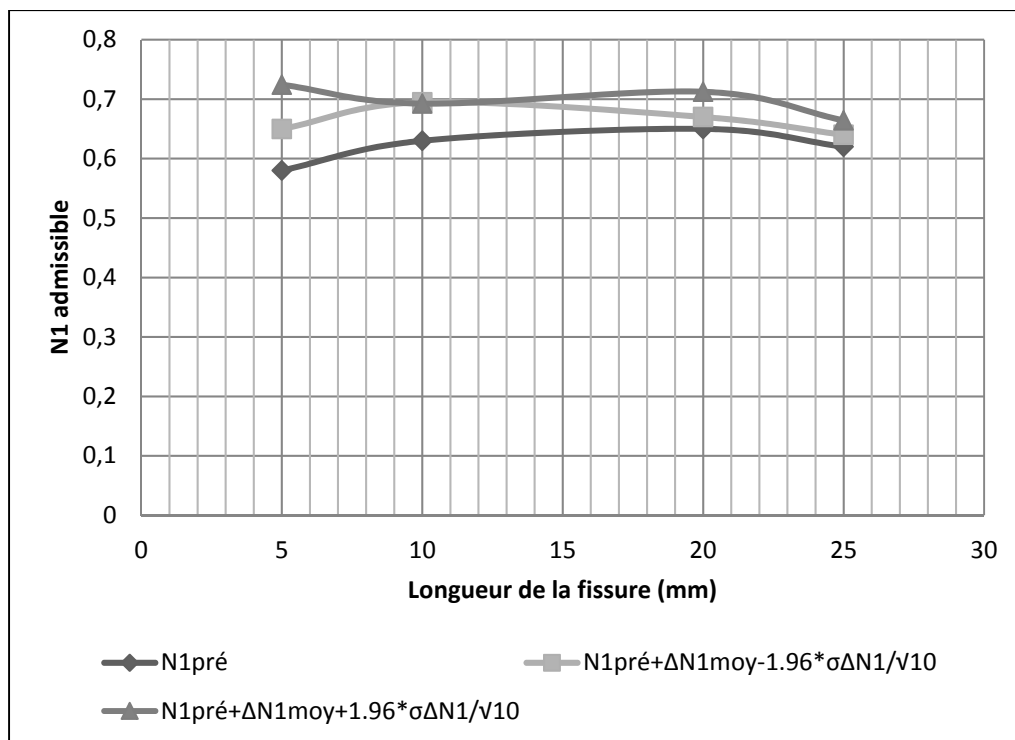


Figure 3.15 Courbes des valeurs admissibles de N1 pour les conduites en PVC

Comme prévu, les valeurs admissibles de N1 pour les conduites en PVC (entre 0,64 et 0,72) sont inférieures à celles en PEHD (entre 0,78 et 1,02), ce qui s'explique par la fissure en PVC qui s'ouvre moins que la fissure en PEHD. Les valeurs pour le PVC sont toutefois supérieures à la valeur de 0,5, ce qui indique tout de même que la fissure en PVC est légèrement flexible.

3.2 Étude expérimentale in situ

Au Québec, un premier essai documenté pour calculer l'exposant N1 dans le cadre d'une étude expérimentale in situ a été réalisé dans la nuit du 29 au 30 septembre 2014 dans un secteur résidentiel de Saint-Jean-sur-Richelieu. La température extérieure était d'environ 11 degrés Celsius. Le service des incendies a été avisé lors de l'essai. De plus, lors de l'essai, le chef de division coordonnait l'opération alors qu'un opérateur était disponible en tout temps pour moduler la pression à l'installation de production et que deux employés des travaux publics manipulaient les vannes.

3.2.1 Méthodologie utilisée

Pour faciliter la mise en œuvre de l'étude expérimentale in situ, l'essai a été réalisé dans un secteur résidentiel qui nécessitait peu de manipulations pour l'isoler et pour prendre les mesures de débits et de pressions nécessaires à l'étude. De plus, l'essai a été réalisé de nuit pour minimiser l'impact sur le niveau de service aux citoyens et aux entreprises. En complément au schéma du réseau illustré à la Figure 3.16, voici les caractéristiques du secteur résidentiel étudié :

- un point d'entrée, qui est à l'installation de production d'eau potable et d'où il est possible de moduler la pression en contrôlant la fréquence de rotation de la pompe et de mesurer le débit à l'aide d'un débitmètre électromagnétique;
- un point de sortie qui est l'eau exportée vers le réservoir Sainte-Anne d'une capacité d'environ 400 m³ et d'où il est possible de mesurer le débit à l'aide d'un débitmètre électromagnétique;
- trois vannes existantes qui permettent d'isoler le secteur résidentiel étudié du secteur industriel voisin;
- environ 104 km de conduites de distribution d'eau potable (environ 60 % des conduites sont flexibles et 40 % sont rigides);
- environ 4 800 branchements de service, soit environ 45 branchements de service par kilomètre;
- des pertes d'eau potentielles estimées à 295 litres par branchement de service par jour, soit un indice de fuite des infrastructures (IFI) instantané de l'ordre de 4. L'IFI instantané représente le ratio des pertes actuelles sur les pertes inévitables à la suite de l'analyse des débits de nuit;

- un taux de réparation moyen des 5 dernières années estimé à 14 réparations par 100 km de conduite par année et à 1 réparation par 1 000 branchements de service de propriétés municipales par année. Le très faible taux de réparation sur les branchements de service pourrait s'expliquer par la recherche de fuites effectuée par la Ville qui se concentre sur l'écoute aux poteaux d'incendie et non aux branchements de service.

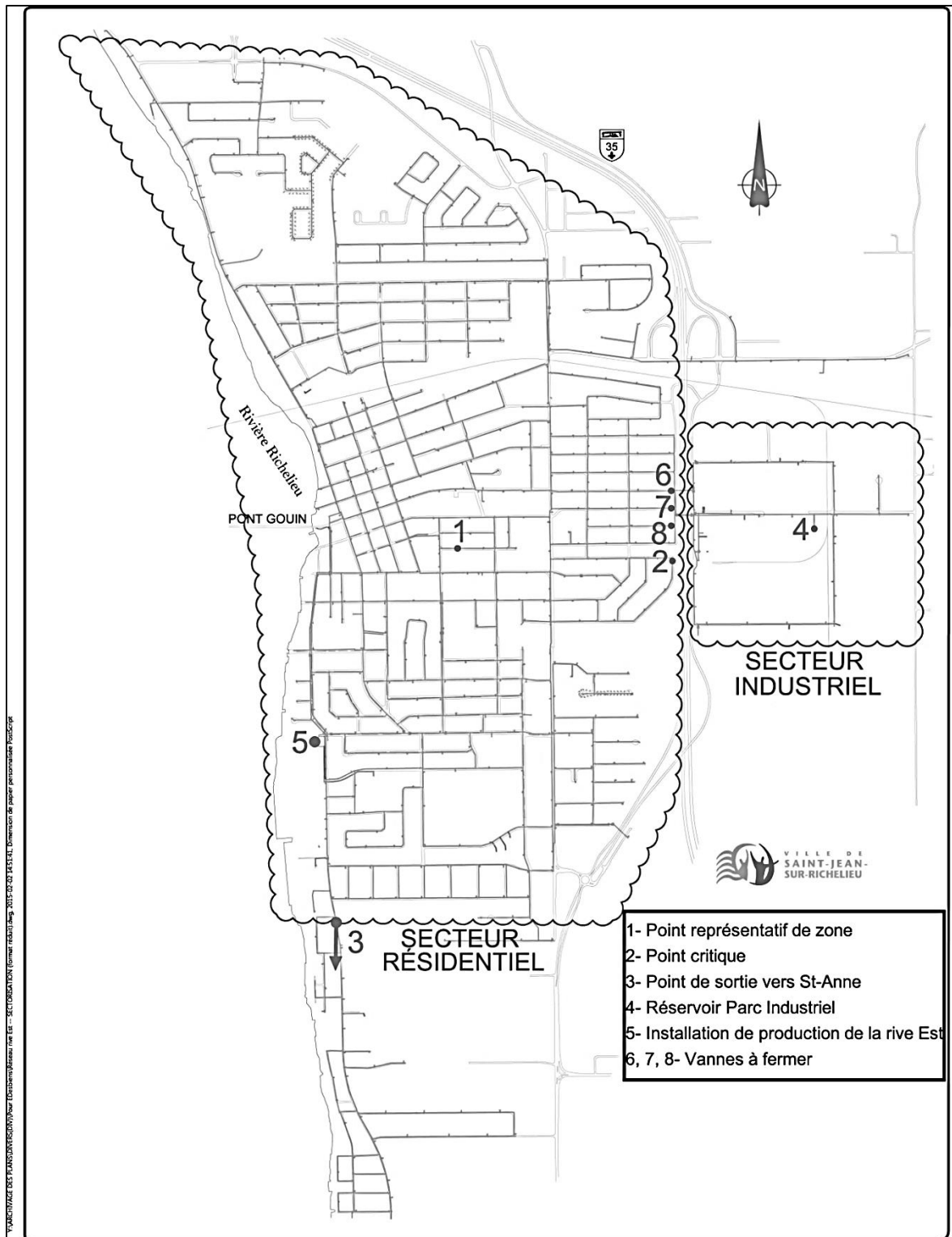


Figure 3.16 Schéma du réseau de distribution étudié à Saint-Jean-sur-Richelieu

Pour réaliser l'essai, le volume d'eau distribué a été mesuré à l'aide d'un débitmètre à l'installation de production d'eau potable et d'un débitmètre au réservoir Sainte-Anne. La précision du débitmètre à l'installation de production est de 0,2 % comme indiqué à la Figure-A II-1. Cependant, dans le cadre de notre étude, une incertitude de 3 % a été retenue pour les débitmètres étant donné que l'incertitude ne provient pas seulement de l'incertitude qui provient de l'instrument, mais aussi de l'incertitude provenant de l'installation in situ (conditions moins idéales qu'en laboratoire). Par ailleurs, la précision du débitmètre à l'installation de production a été vérifiée au préalable avec la méthode volumétrique et l'écart était inférieur à 3 % (Réseau Environnement, 2016, p. 31). Le système de contrôle et d'acquisition de données Cimplity permettait de connaître les débits distribués en temps réel. De plus, comme le montre la Figure 3.17, un manomètre et un enregistreur de données, installés sur le poteau d'incendie situé le plus près du point représentatif de zone, ont permis de calculer la pression moyenne de zone. La précision de l'instrument est de $\pm 0,25\%$, comme spécifié à la Figure-A II-2.



Figure 3.17 Manomètre et enregistreur de données installés sur le poteau d'incendie situé le plus près du point représentatif de zone du secteur résidentiel étudié de Saint-Jean-sur-Richelieu

Enfin, l'essai a nécessité la fermeture temporaire de trois vannes, tel qu'illustré à la Figure 3.18, dont l'étanchéité avait été vérifiée au préalable.



Figure 3.18 Fermeture de l'une des trois vannes pour isoler le secteur à l'étude

Pour estimer le débit de fuite, nous avons noté le débit produit à l'installation de production auquel nous avons soustrait le débit exporté et mesuré vers le réservoir Sainte-Anne ainsi que le débit consommé et estimé par les résidences :

$$Q_{fuites} = [Q_{prod} - Q_{exp} - Q_{rés}] \quad (3.1)$$

Aux fins d'analyse, la consommation résidentielle a été estimée à 2,5 litres par personne par heure (Réseau Environnement, 2016, p. 25) avec une incertitude de 20 % (Réseau Environnement, 2016, p. 12).

3.2.2 Résultats et discussion

Comme le montre le Tableau 3.7, en réduisant la pression nocturne de 443 kPa à 293 kPa (64 psi à 43 psi), le débit de fuite durant la nuit de l'essai a diminué de 59,19 m³/h à 40,64 m³/h, soit une réduction de 31 %. Ainsi, selon l'équation (2.12), les résultats de l'essai proposent une valeur de N1 de 0,9, ce qui est près de la valeur moyenne de 1 reconnue à l'international.

Tableau 3.7 Pressions et débits mesurés ou estimés ainsi que le N1 estimé de l'étude expérimentale in situ

	Sans régulation de pression	Avec régulation de pression
Pression moyenne de la zone (kPa)	443	292
Q _{prod} (m ³ /h)	114,38	95,83
Q _{exp} (m ³ /h)	13,79	13,79
Q _{rés} (m ³ /h)	41,40	41,40
Q _{fuites} (m ³ /h)	59,19	40,64
N1	0,91	

Par ailleurs, cette valeur de 0,9 trouvée dans le cadre de l'étude expérimentale in situ au Québec se compare aux valeurs trouvées dans le cadre l'étude expérimentale au laboratoire de l'ÉTS et présentées à la section 3.1.2. L'amélioration des connaissances portant sur la variabilité des débits de nuit permettra de raffiner les résultats, par exemple en installant des compteurs d'eau dans le secteur résidentiel pour mesurer la consommation nocturne réelle.

Pour réaliser l'analyse des incertitudes, il est utile de calculer dans un premier temps l'incertitude sur la pression moyenne par l'utilisation de « la méthode des extrêmes » tel qu'expliqué à la section 2.4.1. Le Tableau 3.8 présente ainsi les pressions minimales, moyennes et maximales de la pression moyenne de la zone sans et avec régulation de pression. À partir de ces données, il a été possible de calculer l'incertitude sur la pression moyenne. Il faut noter que les valeurs extrêmes ont été supprimées manuellement.

Tableau 3.8 Incertitude sur la pression moyenne

	P_{moy} (kPa)	P_{max} (kPa)	P_{min} (kPa)	ΔP_{moy} (kPa)
Pression moyenne de la zone sans régulation de pression	443,19	448,57	436,71	6,48
Pression moyenne de la zone sans régulation de pression	292,92	295,41	289,65	3,28

Ensuite, l'incertitude sur le débit de fuite est obtenue par la racine carrée de la somme des carrés des incertitudes absolue des débits de production d'exportation et de consommation résidentielle (Réseau Environnement, 2016, p. 12). L'incertitude des débits mesurés ou estimés sans régulation de pression est présentée au Tableau 3.9.

Tableau 3.9 Incertitude des débits mesurés ou estimés sans régulation de pression

	Valeur mesurée ou estimée (m³/h)	Incertitude relative (%)	Incertitude absolue ΔQ (m³/h)
Q _{prod}	114,38	3%	3,43
Q _{exp}	13,79	3%	0,41
Q _{rés}	41,40	20%	8,28
Q _{fuites}	59,19		8,97

De la même façon, l'incertitude des débits mesurés ou estimés avec régulation de pression est présentée au Tableau 3.10.

Tableau 3.10 Incertitude des débits mesurés ou estimés avec régulation de pression

	Valeur mesurée ou estimée (m³/h)	Incertitude relative (%)	Incertitude absolue ΔQ (m³/h)
Q _{prod}	95,83	3%	2,88
Q _{exp}	13,79	3%	0,41
Q _{rés}	41,40	20%	8,28
Q _{fuites}	40,64		8,77

Il est intéressant de noter que même si l'incertitude absolue du débit de fuite sans et avec régulation de pression est similaire (8,97 et 8,77 m³/h), leur incertitude relative respective est significativement différente (15 et 22 %). Ceci s'explique par un débit de fuite plus faible lorsqu'il y a régulation de pression.

Enfin, le Tableau 3.11 résume l'ensemble des incertitudes de pressions et débits sans et avec régulation de pression. Ces données permettent donc de calculer, à partir de l'équation (2.20), l'incertitude de N1 qui est de 0,94.

Tableau 3.11 Incertitude totale des pressions et débits sans et avec régulation de pression

	Pression (kPa)				Débit de fuite (m³/h)	
	P _{moy}	ΔP_{moy}	ΔP_{ins}	ΔP	Q _{fuites}	ΔQ_{fuites}
Sans régulation de pression	443,03	6,48	1,11	6,58	59,19	8,97
Avec régulation de pression	292,61	3,28	0,73	3,36	40,64	8,77

Cette incertitude importante est d'ailleurs plus élevée que la valeur de N1 de 0,91. Pour de futurs essais, il serait donc approprié d'avoir des conditions plus favorables. Par exemple, si la consommation résidentielle était mesurée plutôt qu'estimée, l'incertitude de cette consommation pourrait passer de 20 % à 3 % (Réseau Environnement, 2016, p. 12).

L'incertitude du N1 passerait ainsi de 0,94 à 0,39. Afin de limiter l'incertitude dans une moindre mesure, il serait aussi possible de mesurer la consommation d'un échantillon représentatif d'immeubles résidentiels.

À titre indicatif, les économies, en dollars canadiens de 2014, liées à la réduction du débit de fuite ont été estimées dans notre étude expérimentale in situ. Ainsi, en réduisant la pression de 443 kPa à 293 kPa entre 23 h et 5 h, la Ville économiserait environ 41 000 m³/an. En outre, en estimant les coûts variables des services d'eau potable, principalement de l'énergie et des produits chimiques, à 0,06 \$/m³ (Sauvé, 2011, p. 23), cette économie d'eau représenterait une somme de l'ordre de 2 500 \$/an.

Par ailleurs, le Service de l'eau de la Ville analyse actuellement, en collaboration avec le Service des incendies, la possibilité de réduire la pression moyenne de zone de 443 kPa à 345 kPa (64 psi à 50 psi) de 5 h à 23 h étant donné que le secteur industriel voisin ne sera plus alimenté par ce secteur résidentiel. Pour ce faire, un débit représentant la somme du débit journalier maximum de l'année et du débit incendie devrait être simulé au point critique du secteur pour vérifier si la pression à ce point sera supérieure à la pression minimale requise de 140 kPa, soit 20 psi (MDDELCC, 2002, p. 45).

En diminuant la pression à 345 kPa de jour et à 293 kPa de nuit, les économies liées à la réduction du débit de fuite seraient de l'ordre de 120 000 m³ d'eau par an, soit de 7 000 \$ par an.

Enfin, il faut noter que dans notre cas d'étude comme dans la majorité des cas, le coût des pertes d'eau réelles est seulement équivalent au coût variable de la production et de la distribution d'eau potable (ex. : 0,06 \$/m³ en moyenne au Québec pour, entre autres, l'électricité et les produits chimiques). Par contre, le coût des pertes d'eau réelles peut être plus élevé selon la situation de la municipalité :

- dans le cas d'une municipalité qui pourrait éviter ou reporter la construction ou l'agrandissement de ses infrastructures d'eau, le coût des pertes réelles est équivalent à la somme des coûts variables et des coûts évités. Par exemple, 1,25 \$ par litre d'eau épargné par jour (\$/l/d) pour la Ville de Toronto sur 20 ans (Sauvé, 2011, p. 27);
- dans le cas d'une municipalité qui importe de l'eau potable d'une municipalité voisine, le coût des pertes réelles est équivalent au coût d'achat de l'eau potable. Par exemple, 0,69\$/m³ en moyenne au Québec pour le coût de production (MAMOT, 2015, p. 15);
- dans le cas d'une municipalité en pénurie d'eau, le coût des pertes réelles est équivalent à l'eau perdue qui pourrait être vendue aux consommateurs. Par exemple, 2,26\$/m³ pour le coût moyen des services d'eau au Québec (MAMOT, 2015, p. 15). Les économies annuelles sont calculées en fonction de la durée de la pénurie d'eau. Cette dernière peut être constante dans le cas d'un avis de restriction de consommation d'eau en tout temps lorsque la capacité de la source est limitée. La pénurie d'eau peut être effective seulement pendant la saison estivale dans le cas d'un avis de restriction de consommation d'eau d'une durée de deux mois lorsque la source est plus vulnérable avec les températures élevées et les précipitations faibles.

À titre de comparaison, le Tableau 3.12 montre les économies estimées sur 20 ans, en dollars canadiens de 2014, de notre étude de cas (réduction du débit de fuite de l'ordre de 120 000 m³/an) en fonction de la situation de la municipalité.

Tableau 3.12 Économies estimées en fonction de la situation de la municipalité en considérant une réduction du débit de fuite de l'ordre de 120 000 m³/an

	Coûts variables	Investissements évités ou reportés	Importation d'eau potable	Pénurie d'eau estivale	Pénurie d'eau constante
Coût unitaire	0,06 \$/m ³	1,25 \$/l/d sur 20 ans	0,69\$/m ³	2,26\$/m ³	2,26\$/m ³
Économie estimées sur 20 ans	144 000 \$	411 000 \$	1 656 000 \$	452 000 \$	5 424 000 \$

Les résultats du Tableau 3.12 démontrent bien que les économies sont très variables en fonction de la situation de la municipalité. Cette différence marquée entre les différentes situations devrait donc aider à orienter les actions et investissements futurs pour une saine gestion de l'eau et des finances publiques. Par ailleurs, pour atteindre des retours sur investissement aussi intéressants que ceux obtenus dans les études de cas à l'international, l'impact de la réduction de la pression sur la fréquence d'apparition de nouveaux bris et sur le prolongement de la durée de vie des infrastructures devront être analysés. En effet, les études internationales montrent que l'économie associée à ces deux facteurs est considérablement plus importante que l'économie associée au débit de fuite. Les prochaines études sur la gestion de la pression pourront donc se pencher sur l'un ou l'autre de ces facteurs maintenant que nous avons une meilleure compréhension de la relation entre la pression et le débit de fuite.

CONCLUSION

Les recherches et études de cas réalisées à l'international sur la gestion proactive de la pression confirment l'utilité, la faisabilité technique et la rentabilité que peut apporter cette solution dans une démarche de réduction des pertes d'eau par les fuites. Cependant, peu de municipalités québécoises ont mis en œuvre cette solution dont la compréhension demeure limitée.

Dans le cadre de cette étude, notre compréhension de la relation entre la pression et le débit de fuite s'est améliorée non seulement dans le cadre d'une étude expérimentale en laboratoire, mais aussi dans le cadre d'une étude expérimentale in situ. Les résultats obtenus sont près de ceux reconnus à l'international. De plus, une analyse des incertitudes démontre que les résultats ont une précision acceptable dans le cadre de l'étude expérimentale en laboratoire, mais qu'il y a place à amélioration dans le cadre de l'étude expérimentale in situ. En effet, l'installation de compteurs d'eau à la consommation permettrait d'atteindre une précision acceptable lors d'une étude expérimentale in situ.

Afin de mieux apprécier l'ensemble des économies réalisées, il serait pertinent d'étudier l'influence de la pression sur la fréquence d'apparition de nouveaux bris et sur la consommation. Toutefois, même s'il demeure difficile d'évaluer l'ensemble des bénéfices de la gestion proactive de la pression, il apparaît clair que cette solution peut offrir un potentiel intéressant autant sur le plan environnemental, économique que social.

Pour faciliter le développement de cette solution auprès des municipalités, celles-ci devront avoir accès à des outils simples permettant de les accompagner du questionnement à savoir si la gestion proactive de la pression est bénéfique pour une situation donnée jusqu'à ce que la pression soit optimisée de façon efficace et rentable.

RECOMMANDATIONS

Dans le cadre de l'étude expérimentale en laboratoire, il est recommandé d'avoir un enregistreur de données non seulement pour les données de pression, mais aussi pour les données de débits et de poids. D'ailleurs, le débitmètre Arkon MAGX2 et la balance GFK 75 offrent cette possibilité qui permettrait de réduire l'incertitude totale. La lecture manuelle sur l'afficheur permettrait de valider les données. De plus, étant donné que l'erreur relative est plus élevée pour de faibles débits de fuite, il serait pertinent de pouvoir effectuer la mesure du débit sur une plus longue période. Pour cela, la capacité du réservoir et celle de la balance devraient être plus élevées.

Dans le cadre de l'étude expérimentale in situ, il est recommandé de mesurer non seulement les débits produits et exportés, mais aussi les débits consommés. S'il y a absence de compteurs d'eau à la consommation, l'installation de compteurs d'eau sur un échantillonnage d'immeubles résidentiels peut s'avérer une alternative intéressante.


Par ailleurs, étant donné que les bénéfices économiques les plus importants de la gestion proactive de la pression sont ceux liés à la réduction de la fréquence d'apparition de nouveaux bris et à l'augmentation de la durée de vie des conduites, il serait pertinent d'étudier ces relations dans le cadre de futures recherches.

ANNEXE I

Fiches techniques des instruments de mesure de l'étude expérimentale en laboratoire


MAGX2

Transmitter specifications MAGX2



Measurable media	Conductive fluids
Min. media electrical conductivity	≥5µS/cm ≥20µS/cm for demineralised water
Flow range	0.1 to 10 m/s; 0.015 - 10000 l/s
Displayed values	Actual flow (m³/h l/s, l/m, US gal/min, UK gal/min), volume (m³, l, US.Gal, UK.gal), positive, negative, total volume and auxiliary (clearable) volume, sensor temperature
Accuracy	±0.2% (0.5 - 10 m/s) of actual value
Power supply options	90-250 VAC 50/60 Hz or 24 VDC or 12 VDC
Power consumption	Max. 15VA
Communication protocol	Modbus RTU can be used with all the communication modules i.e. RS232, RS485, USB, BLUETOOTH, TCP/IP, GPRS
Flow direction	Bi-directional measurement
Ambient temperature	-20°C to 60°C (-4°F to 140°F)
Display	LCD 128 x 64 px graphical, contrast setup
Controls	6 touch-buttons + communication modules (optional)
Low flow cut-off	OFF, 0.5%, 1%, 2%, 5%, 10% of Flow Qn
Adjustable filter constant	0 - 120 samples; default value is 15 samples
Max. electronics weight (including housing)	2 kg
Housing material	Aluminium-powder coating
Housing dimensions	Ø 134 - 132 mm
Cable terminal	3+1xM16x1,5 IP68 cable glands
Electronics protection	Standard IP67 / NEMA 5
Other features	Auto-diagnostics Multi-language options (English and Spanish standard; other languages possible) Indicative temperature measurement up to 150°C (1% max. Error) Test of excitation coils Empty pipe detection Zero flow adjusting Flow simulator
Excitation frequency	3.125 Hz or 6.25 Hz
Real time	Clock function for datalogging
Analogue outputs	Optionals: Current 4-20 mA, Voltage 0-10V, Pulse
Digital outputs (communication)	Optionals: USB, RS232, RS485, BLUETOOTH, GPRS, TCP/IP
Datalogger	Micro SD card

Sensor specifications MAGX2



Connection types	DIN, ANSI, JIS flanged. Other types on request
Flange	Steel 1.0036 or higher, Dimensions according to DIN EN 1092-1, ASME B 16.5, JIS B 2239
Nominal size	10-1000 mm (1/2" - 40")
Maximum nominal pressure	PN 40/300 psi
Max. media temperature	70°C (158°F) for Hard Rubber liner, 130° (266°F) for PTFE liner in remote version
Ambient temperature	- 20 to 60°C (-4 to 140°F)
Sensor protection	Remote IP68 (NEMA 6), Compact IP67 (NEMA 5)
Liner	Hard Rubber, PTFE other material on request
Electrodes	CrNi austenitic steel 1.4305 DIN 1013, other material on request
Measuring tube	Stainless steel 1.4301 dimensions according to DIN 17457
Outer casing	Carbon steel (1.0036) as standard
External coating	Lacquered finish (anticorrosive)
Accessories options	Earthing rings for plastic and lined pipes
Coils resistance	80 / 100 Ω
Other features	Earthing through 3 rd electrode Automatic electrode cleaning

Figure-A I-1 Fiche technique du débitmètre Arkon MAGX2

Manomètre numérique BETA

Modèle BetaGauge P.I.-PRO

- Grand affichage 5½ chiffres, 0,65" de haut, avec rétro-éclairage
- Grande précision : $\pm 0,05\%$ PÉ, avec compensation de la température de 0 à 50° C,
- Certificat d'étalonnage INCLUS
- Boîtier en inox NEMA4/IP 65, de 4,375" dia
- Alimentation par piles ou 24 Vcc (option)
- Raccord inox au bas ¼" npt ou arrière (option)
- Minimum, maximum, TARE, affiche la température
- Sécurité intrinsèque (CSA), sortie RS232
- Kit pour simulation incluant manomètre, pompe à main, raccords et valise
- Choix des unités d'affichage (selon la pression); psi, bar, kg/cm², poH₂O, piH₂O, cmH₂O, mH₂O, kPa, mBar, poHg, mmHg et Torr.



Figure-A I-2 Fiche technique du manomètre numérique BETA

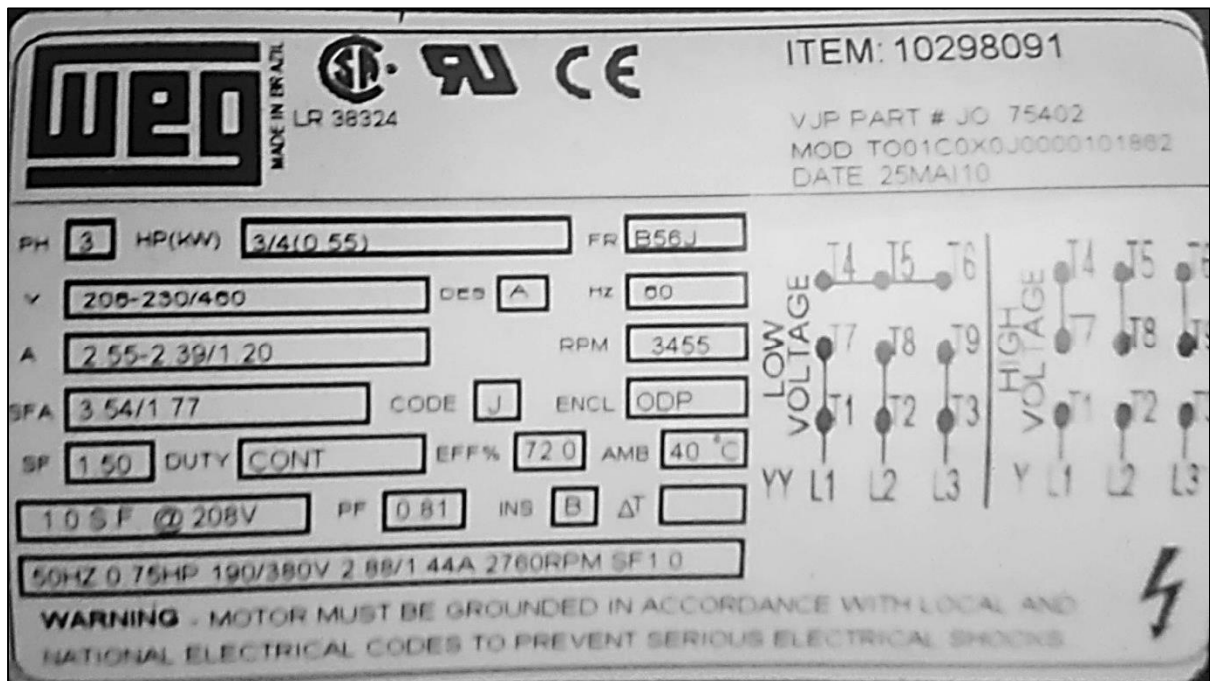


Figure-A I-3 Plaque signalétique de la pompe Weg LR 38324

Caractéristiques Techniques						
Modèle	GFK 75	GFK 75H	GFK 150	GFK 150H	GFK 300	GFK 600
Capacité	75kg	75kg	150kg	150kg	300kg	600kg
Précision	5g	1g	10g	2g	20g	50g
Reproductibilité (S.D)	5g	2g	10g	4g	20g	50g
Linéarité (+/-)	10g	3g	20g	6g	40g	100g
Taille du plateau	400 x 500mm					600 x 800mm
Dimensions totales	400 x 620 x 860mm					600 x 940 x 900mm
Poids net	12.5kg					24kg
Modèle	GBK 8	GBK 16	GBK 32	GBK 60	GBK 120	
Capacité	8kg	16kg	32kg	60kg	120kg	
Précision	0.1g	0.5g	1g	2g	5g	
Reproductibilité (S.D)	0.2g	1g	2g	4g	10g	
Linéarité (+/-)	0.3g	1g	2g	4g	10g	
Taille du plateau	300 x 400mm					
Dimensions totales (bpxh)	300 x 520 x 680mm					
Poids net	7.6kg					
Modèle	CBK 4	CBK 8H	CBK 8	CBK 16	CBK 32	CBK 48
Capacité	4kg	8kg	8kg	16kg	32kg	48kg
Précision	0.1g	0.1g	0.2g	0.5g	1g	2g
Reproductibilité (S.D)	0.1g	0.1g	0.2g	0.5g	1g	2g
Linéarité (+/-)	0.2g	0.2g	0.4g	1g	2g	4g
Taille du plateau	225 x 275mm					
Dimensions totales (bpxh)	315 x 355 x 110mm					
Poids net	4.5kg					
Fonctions Générales						
Adam offre une gamme de modèles homologués de ces unités.						
Unités de pesage	Grammes (g), Kilogrammes (kg)					
Modes	Pesage, Comptage de pièces, Contrôle de pesée, Pesage en pourcentage, Comptage préréglé, Pesage dynamique/animal ¹					
Temps de stabilisation	2 - 3 secondes					
Calibrage	Automatique externe					
Interface	RS-232 bidirectionnelle avec date et heure					
Ecran	Ecran rétro-éclairé vert avec des chiffres de 20mm et Indicateur de capacité					
Alimentation	Cordon d'alimentation/batterie interne rechargeable					
Batterie	Batterie jusqu'à 90 heures d'autonomie avant la prochaine recharge					
Température d'utilisation	-10 °C à 40°C					
Construction	Carter: Plastique ABS pour les CBK. Plate-formes pour les GFK et GBK sont en fonte aluminium. Plateau de pesée en Inox 304					
¹ Pesage dynamique / animal pas disponible sur les séries CBK						
www.adamequipment.com			ADAM			
www.adamequipment.com, Adam Equipment poursuit une politique d'amélioration continue et se réserve le droit de modifier les spécifications et les prix sans préavis. Conditions générales Adam Equipment et conditions de vente s'appliquent. Sauf erreur ou omission. © Adam Equipment 2011.						


Figure-A I-4 Fiche technique de la balance GFK 75

ANNEXE II

Fiches techniques des instruments de mesure de l'étude expérimentale in situ




Figure-A II-1 Plaque signalétique du débitmètre Endress+Hauser Promag 53W à l'installation de production d'eau potable


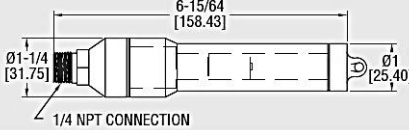



Series
DLP

Pressure/Temperature Data Logger

1/4" NPT Fitting, Up to 5000 PSIA



The Series DLP data logger can record pressure and temperature. The 1/4" NPT fitting comes standard and allows the logger to be adapted to almost any pressure fitting. The internal temperature sensor provides accurate temperature measurements without the need of a separate temperature recorder, and many of the models provide a choice between measuring pressure in PSIA or PSIG. The DLP can easily be started and stopped from a PC or delayed to start up to six months in advance. The battery-powered data logger can store over 16,000 measurements per channel, and the easy to use DL700 software makes retrieving data simple.

ACCESSORIES
DL700, Software, Manual and USB Interface Cable
TL-2150, Replacement battery for Series DLP

Model	Description
DLP-A08	0 to 30 psia Pressure and Temperature Recorder
DLP-G08	0 to 30 psig Pressure and Temperature Recorder
DLP-A10	0 to 100 psia Pressure and Temperature Recorder
DLP-G10	0 to 100 psig Pressure and Temperature Recorder
DLP-A13	0 to 300 psia Pressure and Temperature Recorder
DLP-G13	0 to 300 psig Pressure and Temperature Recorder
DLP-A14	0 to 500 psia Pressure and Temperature Recorder
DLP-G14	0 to 500 psig Pressure and Temperature Recorder
DLP-A15	0 to 1000 psia Pressure and Temperature Recorder
DLP-A19	0 to 5000 psia Pressure and Temperature Recorder

SPECIFICATIONS
Range: Temperature: -40 to 176°F (-40 to 80°C); Pressure: 0 to 30 psia(g), 0 to 100 psia(g), 0 to 300 psia(g), 0 to 500 psia(g), 0 to 1000 psia, and 0 to 5000 psia depending on the model.
Memory Size: 16,383 readings per channel.
Accuracy: Temperature: ±0.2°F (±0.1°C); Pressure: 2% FSR, 0.25% at 77°F (25°C) typical.
Resolution: Temperature: 0.2°F (0.1°C); Pressure: 0.002 psia(g), 0.005 psia(g), 0.05 psia(g), 0.05 psia, and 0.2 psia depending on the model.
Sampling Method: Stop on memory full.
Sampling Rate: Selectable from 2 s to 12 hrs.
Computer Requirements: Windows® 95, Windows® 98, Windows® 2000, Windows® ME, Windows NT®, and Windows® XP operating system, one free USB port.
Power Requirements: 3.6 V TL2150 lithium metal battery, installed functional, user replaceable.
Battery Life: 1 yr (approx).
Interface: USB port (interface cable required).
Material: 303 SS.
Weight: 12 oz (340 g).
Agency Approvals: CE.

Windows® is a registered trademark of Microsoft Corporation

100
DWYER INSTRUMENTS, INC. | www.dwyer-inst.com

Figure-A II-2 Fiche technique de l'enregistreur de pression DLP-G10 et du logiciel DL700 servant à calculer la pression moyenne de la zone

ANNEXE III

Tableaux de calcul des $N1_{pré}$ des conduites en PEHD

Tableau-A III-1 Résultats de l'essai d'une fissure longitudinale de 5 mm sur une conduite en PEHD

Test	A1							
Matériau	PEHD							
Diamètre	20 mm							
fissure	5 mm longitudinale							
Tableau des données de l'essai								
Test A1	Fréquence pompe (Hz)	Pression manomètre (kPa)		Poids t0 (g)	Poids t1 (g)	Volume (l)	Delta t (min)	Débit (l/min)
		Moy	Écart- type					
1	47,2	661,22	0,38	786	3 121	2,335	2,00	1,17
2	42,1	525,77	0,16	4 324	6 391	2,067	2,02	1,02
3	37,6	419,46	0,12	8 267	9 995	1,728	2,02	0,86
4	33,1	324,46	0,05	11 228	12 695	1,467	2,00	0,73
5	26,8	210,42	0,03	13 994	15 050	1,056	2,04	0,52
Tableau des calculs de $N1_{pré}$								
A1 entre	N1							
1 et 2	0,58							
1 et 3	0,68							
1 et 4	0,65							
1 et 5	0,71							
2 et 3	0,79							
2 et 4	0,69							
2 et 5	0,74							
3 et 4	0,60							
3 et 5	0,73							
4 et 5	0,80							
$N1_{pré}$	0,70							

Tableau-A III-2 Résultats de l'essai d'une fissure longitudinale de 10 mm sur une conduite en PEHD

Test	A2							
Matériau	PEHD							
Diamètre	20 mm							
fissure	10 mm longitudinale							
Test A2	Fréquence pompe (Hz)	Pression manomètre (kPa)		Poids t0 (g)	Poids t1 (g)	Volume (l)	Delta t (min)	Débit (l/min)
		Moy	Écart-type					
1	47,7	660,52	0,37	6 317	13 213	6,90	2,01	3,43
2	42,5	526,47	0,34	18 048	23 901	5,85	2,01	2,91
3	37,9	419,81	0,28	26 154	30 987	4,83	2,02	2,39
4	32,9	315,79	0,26	33 380	37 064	3,68	2,00	1,84
5	27	210,76	0,19	38 785	41 299	2,51	2,00	1,26
A2 entre	N1							
1 et 2	0,72							
1 et 3	0,80							
1 et 4	0,84							
1 et 5	0,88							
2 et 3	0,87							
2 et 4	0,90							
2 et 5	0,92							
3 et 4	0,92							
3 et 5	0,93							
4 et 5	0,94							
N1_{pré}	0,87							

Tableau-A III-3 Résultats de l'essai d'une fissure longitudinale de 20 mm sur une conduite en PEHD

Test	A3				
Matériau	PEHD				
Diamètre	20 mm				
fissure	20 mm longitudinale				
Test A3	Fréquence pompe (Hz)	Pression manomètre (kPa)		Débit (gal US/min)	Débit (l/min)
		Moy	Écart-type		
1	54	654,93	3,11	6,17	23,36
2	48,7	526,48	0,25	5,34	20,21
3	42,9	421,54	0,44	4,53	17,13
4	36,4	316,61	0,45	3,56	13,46
5	29,2	211,28	0,47	2,54	9,61
A3 entre	N1				
1 et 2	0,66				
1 et 3	0,70				
1 et 4	0,76				
1 et 5	0,79				
2 et 3	0,74				
2 et 4	0,80				
2 et 5	0,81				
3 et 4	0,84				
3 et 5	0,84				
4 et 5	0,83				
N1_{pré}	0,78				

Tableau-A III-4 Résultats de l'essai d'une fissure longitudinale de 20 mm et transversale de 5 mm sur une conduite en PEHD

Test	A4				
Matériau	PEHD				
Diamètre	20 mm				
fissure	20mm longitudinale et 5 mm transversale				
Test A4	Fréquence pompe (Hz)	Pression manomètre (kPa)		Débit (gal US/min)	Débit (l/min)
		Moy	Écart-type		
1	54	657,13	2,24	5,65	21,38
2	47,6	525,66	0,19	4,86	18,39
3	42	420,87	0,35	4,07	15,42
4	35,8	315,81	0,40	3,21	12,15
5	28,9	211,33	0,43	2,31	8,76
A4 entre	N1				
1 et 2	0,67				
1 et 3	0,73				
1 et 4	0,77				
1 et 5	0,79				
2 et 3	0,79				
2 et 4	0,81				
2 et 5	0,81				
3 et 4	0,83				
3 et 5	0,82				
4 et 5	0,82				
N1_{pré}	0,79				

ANNEXE IV

Tableaux de calcul des incertitudes sur N1 pour les conduites en PEHD

Tableau-A IV-1 Incertitudes de l'essai d'une fissure longitudinale de 5 mm sur une conduite en PEHD

Test	A1							
Matériau	PEHD							
Diamètre	20 mm							
Fissure	5 mm longitudinale							

Test A1	Pression (kPa)				Poids (g)			
	P _{moy}	ΔP _{moy}	ΔP _{ins}	ΔP	M _{mes}	ΔM _{moy}	ΔM _{ins}	ΔM
1	661,22	2,75	0,33	2,77	2 335	30	5	30,41
2	525,77	0,51	0,26	0,58	2 067	20	5	20,62
3	419,46	0,55	0,21	0,59	1 728	15	5	15,81
4	324,46	0,25	0,16	0,30	1 467	10	5	11,18
5	210,42	0,08	0,11	0,13	1 056	5	5	7,07

Test A1	Temps (s)			
	T	ΔT _{moy}	ΔT _{ins}	ΔT
1	120,0	2	0,01	2,00
2	121,2	2	0,01	2,00
3	121,2	2	0,01	2,00
4	120,0	2	0,01	2,00
5	122,2	2	0,01	2,00

A1 entre	N1	ΔN1
1 et 2	0,58	0,26
1 et 3	0,68	0,13
1 et 4	0,65	0,08
1 et 5	0,71	0,05
2 et 3	0,79	0,24
2 et 4	0,69	0,11
2 et 5	0,74	0,06
3 et 4	0,60	0,20
3 et 5	0,73	0,07
4 et 5	0,80	0,11
Moyenne	0,70	0,13
Écart-type		0,08

Tableau-A IV-2 Incertitudes de l'essai d'une fissure longitudinale de 10 mm sur une conduite en PEHD

Test	A2			
Matériau	PEHD			
Diamètre	20 mm			
Fissure	10 mm longitudinale			

Test A2	Pression (kPa)				Poids (g)			
	P _{moy}	ΔP _{moy}	ΔP _{ins}	ΔP	M _{mes}	ΔM _{moy}	ΔM _{ins}	ΔM
1	660,52	1,13	0,33	1,17	6896	50	5	50,25
2	526,47	0,99	0,26	1,02	5853	30	5	30,41
3	419,81	0,83	0,21	0,86	4833	20	5	20,62
4	315,79	0,80	0,16	0,82	3684	15	5	15,81
5	210,76	0,71	0,11	0,71	2514	10	5	11,18

Test A2	Temps (s)			
	T	ΔT _{moy}	ΔT _{ins}	ΔT
1	120,6	2	0,01	2,00
2	120,6	2	0,01	2,00
3	121,2	2	0,01	2,00
4	120,0	2	0,01	2,00
5	120,0	2	0,01	2,00

A2 entre	N1	ΔN1
1 et 2	0,72	0,21
1 et 3	0,80	0,11
1 et 4	0,84	0,07
1 et 5	0,88	0,04
2 et 3	0,87	0,20
2 et 4	0,90	0,09
2 et 5	0,92	0,05
3 et 4	0,92	0,16
3 et 5	0,93	0,07
4 et 5	0,94	0,12
Moyenne	0,87	0,11
Écart-type		0,06

Tableau-A IV-3 Incertitudes de l'essai d'une fissure longitudinale de 20 mm sur une conduite en PEHD

Test	A3							
Matériau	PEHD							
Diamètre	20 mm							
Fissure	20 mm longitudinale							
Test A3	Pression (kPa)				Débit (gal US/min)			
	P_{moy}	ΔP_{moy}	ΔP_{ins}	ΔP	Q_{moy}	ΔQ_{moy}	ΔQ_{ins}	ΔQ
1	654,93	5,95	0,33	5,96	6,17	0,09	0,012	0,09
2	526,48	0,97	0,26	1,00	5,34	0,03	0,011	0,04
3	421,54	1,05	0,21	1,07	4,53	0,02	0,009	0,03
4	316,61	0,97	0,16	0,98	3,56	0,04	0,007	0,04
5	211,28	1,06	0,11	1,07	2,54	0,09	0,005	0,09
A3 entre	N1	$\Delta N1$						
1 et 2	0,66	0,13						
1 et 3	0,70	0,06						
1 et 4	0,76	0,05						
1 et 5	0,79	0,05						
2 et 3	0,74	0,07						
2 et 4	0,80	0,04						
2 et 5	0,81	0,05						
3 et 4	0,84	0,07						
3 et 5	0,84	0,07						
4 et 5	0,83	0,13						
Moyenne	0,78	0,07						
Écart-type		0,03						

ANNEXE V

Tableaux de calcul des $N1_{\text{pré}}$ des conduites en PVC

Tableau-A V-1 Résultats de l'essai d'une fissure longitudinale de 5 mm sur une conduite en PVC

Test	B1							
Matériau	PVC							
Diamètre	50 mm							
Fissure	5 mm longitudinale							
Tableau des données de base								
Test B1	Fréquence pompe (Hz)	Pression manomètre (kPa)		Poids t0 (g)	Poids t1 (g)	Volume (l)	Delta t (min)	Débit (l/min)
		Moy	Écart-type					
1	47,4	661,17	0,20	6804	10 007	3,20	2,00	1,60
2	42,2	525,71	0,14	10 893	13 685	2,79	2,00	1,40
3	37,7	419,83	0,10	15 050	17 502	2,45	2,01	1,22
4	32,7	314,90	0,04	18 450	20 532	2,08	2,01	1,04
5	26,9	210,66	0,03	21 467	23 142	1,68	2,01	0,83
Tableau des calculs de $N1$								
Test B1 entre		N1						
1 et 2		0,60						
1 et 3		0,60						
1 et 4		0,59						
1 et 5		0,57						
2 et 3		0,60						
2 et 4		0,58						
2 et 5		0,56						
3 et 4		0,57						
3 et 5		0,55						
4 et 5		0,54						
$N1_{\text{pré}}$		0,58						

Tableau-A V-2 Résultats de l'essai d'une fissure longitudinale de 10 mm sur une conduite en PVC

Test	B2							
Matériau	PVC							
Diamètre	50 mm							
fissure	10 mm longitudinale							
Test B2	Fréquence pompe (Hz)	Pression manomètre (kPa)		Poids t0 (g)	Poids t1 (g)	Volume (l)	Delta t (min)	Débit (l/min)
		Moy	Écart-type					
1	47,6	661,38	0,59	9589	15 151	5,56	2,01	2,77
2	42,4	524,27	0,17	17 603	22 375	4,77	2,01	2,37
3	37,9	421,11	0,11	24 647	28 778	4,13	2,01	2,06
4	32,9	316,39	0,07	30 280	33 758	3,48	2,01	1,73
5	27	210,58	0,04	35 271	38 000	2,73	2,01	1,36
Test B2 entre	N1							
1 et 2	0,66							
1 et 3	0,66							
1 et 4	0,64							
1 et 5	0,62							
2 et 3	0,66							
2 et 4	0,63							
2 et 5	0,61							
3 et 4	0,60							
3 et 5	0,60							
4 et 5	0,60							
N1pré	0,63							

Tableau-A V-3 Résultats de l'essai d'une fissure longitudinale de 20 mm sur une conduite en PVC

Test	B3								
Matériau	PVC								
Diamètre	50 mm								
Fissure	20 mm longitudinale								
Test B3	Fréquence pompe (Hz)	Pression manomètre (kPa)		Poids t0 (g)	Poids t1 (g)	Volume (l)	Delta t (min)	Débit (gal US /min)	Débit (l /min)
		Moy	Écart -type						
1	49,4	660,81	0,18	-	-	-	2,00	2,99	11,31
2	43,9	526,68	0,14	-	-	-	2,00	2,55	9,66
3	39,1	420,34	0,12	-	-	-	2,00	2,23	8,43
4	33,9	316,83	0,10	-	-	-	2,00	1,85	7,02
5	27,8	211,65	0,07	32 759	43 398	10,64	2,00	-	5,32
Test B3 entre	N1								
1 et 2	0,70								
1 et 3	0,65								
1 et 4	0,65								
1 et 5	0,66								
2 et 3	0,60								
2 et 4	0,63								
2 et 5	0,65								
3 et 4	0,65								
3 et 5	0,67								
4 et 5	0,69								
N1_{pré}	0,65								

Tableau-A V-4 Résultats de l'essai d'une fissure longitudinale de 20 mm et transversale de 5 mm sur une conduite en PVC

Test	B4				
Matériau	PVC				
Diamètre	50 mm				
Fissure	20mm longitudinale et 5 mm transversale				
Test B4	Fréquence pompe (Hz)	Pression manomètre (kPa)		Débit (gal US/min)	Débit (l/min)
		Moy	Écart-type		
1	50,2	660,29	0,15	3,66	13,86
2	44,6	526,41	0,03	3,18	12,03
3	39,8	421,71	0,06	2,76	10,44
4	34,4	316,65	0,05	2,31	8,76
5	28,1	211,04	0,05	1,80	6,81
Test B4 entre	N1				
1 et 2	0,63				
1 et 3	0,63				
1 et 4	0,62				
1 et 5	0,62				
2 et 3	0,64				
2 et 4	0,62				
2 et 5	0,62				
3 et 4	0,61				
3 et 5	0,62				
4 et 5	0,62				
N1_{pré}	0,62				

ANNEXE VI

Tableaux de calcul des incertitudes sur N1 pour les conduites en PVC

Tableau-A VI-1 Incertitudes de l'essai d'une fissure longitudinale de 5 mm sur une conduite en PVC

Test	B1							
Matériau	PVC							
Diamètre	50 mm							
Fissure	5 mm longitudinale							
Test B1	Pression (kPa)				Poids (g)			
	P_{moy}	ΔP_{moy}	ΔP_{ins}	ΔP	M_{mes}	ΔM_{moy}	ΔM_{ins}	ΔM
1	661,17	0,69	0,33	0,77	3203	20	5	20,62
2	525,71	0,55	0,26	0,61	2792	15	5	15,81
3	419,83	0,45	0,21	0,50	2452	10	5	11,18
4	314,90	0,32	0,16	0,36	2082	10	5	11,18
5	210,66	0,09	0,11	0,14	1675	5	5	7,07
Test B1	Temps (s)							
	T	ΔT_{moy}	ΔT_{ins}	ΔT				
1	120,0	2	0,01	2,00				
2	120,0	2	0,01	2,00				
3	120,6	2	0,01	2,00				
4	120,6	2	0,01	2,00				
5	120,6	2	0,01	2,00				
B1 entre	N1	$\Delta N1$						
1 et 2	0,60	0,20						
1 et 3	0,60	0,10						
1 et 4	0,59	0,06						
1 et 5	0,57	0,04						
2 et 3	0,60	0,20						
2 et 4	0,58	0,09						
2 et 5	0,56	0,05						
3 et 4	0,57	0,15						
3 et 5	0,55	0,06						
4 et 5	0,54	0,11						
Moyenne	0,58	0,11						
Écart-type		0,06						

Tableau-A VI-2 Incertitudes de l'essai d'une fissure longitudinale de 10 mm sur une conduite en PVC

Test	B2							
Matériau	PVC							
Diamètre	50 mm							
Fissure	10 mm longitudinale							
Test B2	Pression (kPa)				Poids (g)			
	P_{moy}	ΔP_{moy}	ΔP_{ins}	ΔP	M_{mes}	ΔM_{moy}	ΔM_{ins}	ΔM
1	661,38	2,90	0,33	2,92	5562	20	5	20,62
2	524,27	0,56	0,26	0,62	4772	15	5	15,81
3	421,11	0,41	0,21	0,46	4131	10	5	11,18
4	316,39	0,30	0,16	0,34	3478	10	5	11,18
5	210,58	0,10	0,11	0,14	2729	5	5	7,07
Test B2	Temps (s)							
	T	ΔT_{moy}	ΔT_{ins}	ΔT				
1	120,6	2	0,01	2,00				
2	120,6	2	0,01	2,00				
3	120,6	2	0,01	2,00				
4	120,6	2	0,01	2,00				
5	120,6	2	0,01	2,00				
B2 entre	N1	$\Delta N1$						
1 et 2	0,66	0,19						
1 et 3	0,66	0,10						
1 et 4	0,64	0,06						
1 et 5	0,62	0,04						
2 et 3	0,66	0,19						
2 et 4	0,63	0,08						
2 et 5	0,61	0,05						
3 et 4	0,60	0,14						
3 et 5	0,60	0,06						
4 et 5	0,60	0,10						
Moyenne	0,63	0,10						
Écart-type		0,06						

Tableau-A VI-3 Incertitudes de l'essai d'une fissure longitudinale de 20 mm sur une conduite en PVC

Test	B3							
Matériau	PVC							
Diamètre	50 mm							
Fissure	20 mm longitudinale							
Test B3	Pression (kPa)				Poids (g)			
	P_{moy}	ΔP_{moy}	ΔP_{ins}	ΔP	M_{mes}	ΔM_{moy}	ΔM_{ins}	ΔM
1	660,81	0,67	0,33	0,75				0
2	526,68	0,52	0,26	0,59				0
3	420,34	0,43	0,21	0,48				0
4	316,83	0,44	0,16	0,47				0
5	211,65	0,24	0,11	0,27	10 639	10	5	11,18
Test B3	Temps (s)				Débit (gal US/min)			
	T	ΔT_{moy}	ΔT_{ins}	ΔT	Q_{moy}	ΔQ_{moy}	ΔQ_{ins}	ΔQ
1		0	0	0,0	2,99	0,02	0,006	0,024
2		0	0	0,0	2,55	0,02	0,005	0,016
3		0	0	0,0	2,23	0,01	0,004	0,009
4		0	0	0,0	1,85	0,02	0,004	0,016
5	120,0	2	0,01	2,0				
B3 entre	N1	$\Delta N1$						
1 et 2	0,70	0,07						
1 et 3	0,65	0,05						
1 et 4	0,65	0,05						
1 et 5	0,66	0,02						
2 et 3	0,60	0,05						
2 et 4	0,63	0,05						
2 et 5	0,65	0,07						
3 et 4	0,65	0,05						
3 et 5	0,67	0,03						
4 et 5	0,69	0,07						
Moyenne	0,65	0,05						
Écart-type		0,02						

Tableau-A VI-4 Incertitudes de l'essai d'une fissure longitudinale de 20 mm et transversale de 5 mm sur une conduite en PVC

Test	B4							
Matériau	PVC							
Diamètre	50 mm							
Fissure	20 mm longitudinale + 5mm transversale							
Test B4	Pression (kPa)				Débit (gal US/min)			
	P_{moy}	ΔP_{moy}	ΔP_{ins}	ΔP	Q_{moy}	ΔQ_{moy}	ΔQ_{ins}	ΔQ
1	660,29	0,97	0,33	1,03	3,66	0,016	0,007	0,018
2	526,41	0,06	0,26	0,27	3,18	0,024	0,006	0,024
3	421,71	0,13	0,21	0,25	2,76	0,016	0,006	0,017
4	316,65	0,10	0,16	0,19	2,31	0,016	0,005	0,016
5	211,04	0,10	0,11	0,14	1,80	0,008	0,004	0,008
B4 entre	N1	$\Delta N1$						
1 et 2	0,63	0,06						
1 et 3	0,63	0,03						
1 et 4	0,62	0,02						
1 et 5	0,62	0,01						
2 et 3	0,64	0,06						
2 et 4	0,62	0,03						
2 et 5	0,62	0,01						
3 et 4	0,61	0,05						
3 et 5	0,62	0,02						
4 et 5	0,62	0,03						
Moyenne	0,62	0,03						
Écart-type		0,02						

BIBLIOGRAPHIE

- Alegre, Helena, Wolfram Hirner, Jaime Melo Baptista et Renato Parena. 2000. *Performance Indicators for Water Supply Services*, 1st ed. London: IWA Publishing, 160 p.
- AWWA. 2009. *Audits, bilans d'eau et programmes de réduction des pertes*, 3e éd. Denver: American Water Works Association, 285 p.
- Fanner, Paul, Julian Thornton, Roland Liemberger et Reinhard Sturm. 2007. *Evaluating water loss and planning loss reduction strategies*. Denver: Awwa Research Foundation, 289 p.
- Fares, Ryma. 2010. « Modélisation théorique et validation expérimentale de la réduction des fuites par la modulation de la pression ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction. Montréal, École de technologie supérieure, 96 p.
- Farley, Malcolm. 2001. *Leakage management and control : a best practice training manual*. Geneva: World Health Organization, 163 p.
- GIZ. 2011. *Guide pour la réduction des pertes en eau | résumé : centré sur la gestion de la pression*. Eschborn, 12 p.
<http://www.waterloss-reduction.com/fileadmin/Summary/Summary_FR_-_Guidelines_for_water_loss_reduction.pdf>. Consulté le 28 août 2016.
- IWA. 2007. *District Metered Areas Guidances Notes*. London: IWA Publishing, 100 p.
< <http://waterlinks.org/publications/24> >. Consulté le 28 août 2016.
- Lalonde, Alain, Au Candice, Paul Fanner et Jian Lei. 2008. *City of Toronto water loss study & pressure management pilot*. Technical report. U.S. Department of Energy - Office of Electricity Delivery and Energy Reliability.
- Lamarre, Jean, et Pascal Caron. 2014. « Montréal : sectorisation et régulation de la pression de l'aqueduc en conformité avec la protection contre les incendies ». In *Salon des technologies environnementales du Québec*. (Québec, 11-12 mars 2014). Réseau Environnement.
- Lambert, A, TG Brown, M Takizawa et D Weimer. 1999. « A review of performance indicators for real losses from water supply systems. ». *AQUA*, vol. 48, n° 6, p. 227-237.
- Lambert, Allan, et Marco Fantozzi. 2010. « Recent developments in Pressure Management ». In *IWA International Specialised Conference Water Loss 2010*. (Sao Paulo, June 6-9, 2010).

- Lambert, Allan, et Alain Lalonde. 2005. « Using practical predictions of Economic Intervention Frequency to calculate Short-run Economic Leakage Level, with or without Pressure Management ». In *IWA Leakage Conference*. (Halifax, September 12-14, 2005). IWA Publishing.
- MAMOT. 2015. *Rapport sur le coût et les sources de revenus des services d'eau*. Québec.
< <http://www.mamot.gouv.qc.ca/grands-dossiers/strategie-quebecoise-deconomie-deau-potable/documentation-et-liens/> >. Consulté le 15 juin 2016.
- MAMOT. 2016. *Rapport annuel de l'usage de l'eau potable 2014*. Québec.
< <http://www.mamot.gouv.qc.ca/grands-dossiers/strategie-quebecoise-deconomie-deau-potable/outils-aux-municipalites/> >. Consulté le 15 juin 2016.
- McKenzie, R., et W. Wegelin. 2010. « Scope for Pressure Management in South Africa ». In *IWA Water Loss 2010*. (Sao Paulo).
- MDDELCC. 2002. *DIRECTIVE 001 : Captage et distribution de l'eau*. 71 p.
- Ofwat. 2003. *Levels of service for the water industry in England & Wales : 2002-2003 report*. Birmingham, 54 p.
- Ofwat. 2010. *Service and delivery : performance of the water companies in England and Wales 2009-10*. Birmingham, 64 p.
- ONU. 2000. « Déclaration du Millénaire ». < <http://www.un.org/french/millenaire/ares552f.htm> >. Consulté le 28 août 2016.
- Pilipovic, Z., et R. Taylor. 2003. « Pressure management in Waitakere City, New Zealand - A case study ». *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 3, n° 1-2, p. 135-141.
- Réseau Environnement. 2016. *L'économie d'eau potable et les municipalités - Volume 1*, 5e éd., 197 p.
< http://www.reseau-environnement.com/Uctrl/scripts/kcfinder/upload/files/leconomie_deau_dans_les_municipalites_volume1-5eedition.pdf >. Consulté le 8 août 2016.
- Sauvé, Claude. 2011. *Mise à jour de l'Évaluation économique de la Stratégie québécoise d'économie d'eau potable et du Rapport concernant l'instauration d'une tarification de l'eau réalisés en 2006*. 73 p.
- Tardelli Filho, Jairo. 2006. « Controle e Redução de Perdas ». In *Abastecimento de Água*, 3^a edição. Sao Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo.

- Thornton, Julian. 2003. « Managing leakage by managing pressure : a practical approach ». *Water 21*, p. 43-45.
- Thornton, Julian. 2005. « Metro Nashville Water Services Department Uses New Methods to Reduce Leakage Efficiently ». In *AWWA Distribution & Plant Operations Conference*. (Tampa, September 18-21). American Water Works Association.
- Thornton, Julian. 2015. « Applying Advanced Leakage Control and Pressure Management ». In *North American Water Loss 2015*. (Atlanta, December 8-8).
< <https://www.dropbox.com/s/z5eywnb56mbfd1f/Session%2018%20LM%205%20Leakage%20Pressure%20Management.pdf?dl=0> >. Consulté le 28 août 2016.
- Thornton, Julian, et Allan Lambert. 2005. « Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships ». In *IWA Leakage Conference*. (Halifax, September 12-14, 2005). IWA Publishing.
- Thornton, Julian, et Allan Lambert. 2006. « Managing pressures to reduce new breaks ». *Water 21*, vol. Décembre, p. 24-26.
- Thornton, Julian, et Allan Lambert. 2012. « Pressure: Bursts Relationships: Influence of Pipe Materials, Validation of Scheme Results, and Implications of Extended Asset Life ». In *IWA Water Loss 2012*. (Manila, Feb. 26-29).
- Thornton, Julian, Martin Shaw, M Aguiar et Roland Liemberger. 2005. « How Low Can You Go? A Practical Approach to Pressure Control in Low Pressure Systems ». In *IWA Leakage Conference*. (Halifax, September 12-14, 2005). IWA Publishing.
- Thornton, Julian, Reinhard Sturm et George Kunkel. 2008. *Water loss control*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 632 p.
- WRC. 1994. *UK Water Industry: Managing Leakage: Report E: Interpreting measured night flows*. Blagrove, 63 p.