

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M.Ing.

PAR
Ryma FARES

MODÈLISATION THÉORIQUE ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE DE LA
RÉDUCTION DES FUITES PAR LA MODULATION DE LA PRESSION

MONTRÉAL, LE 23 AVRIL 2010

© Ryma Fares, 2010

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Saad BENNIS, directeur de mémoire
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. David BENSOUSSAN, président du jury
Génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Azzeddine SOULAIMANI, membre du jury
Génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

LE 19 AVRIL 2010

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens spécialement à remercier mon directeur de recherche, le professeur Saad BENNIS, qui m'a soutenu financièrement et académiquement tout au long du projet. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a accordée. Sur un plan plus amical, merci pour sa compréhension, son soutien et ses encouragements.

Je tiens également à remercier le technicien Michäel Dubois pour sa disponibilité et pour son appui durant la phase expérimentale du projet. Ses idées de concepteur ont été très fructueuses dans les tests expérimentaux

J'adresse mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté de juger ce mémoire.

Ce travail n'aurait pas pu aboutir sans le soutien moral et effectif de mes parents. Je les remercie pour leur confiance leur soutien et leurs encouragements durant toutes mes études. Merci, follement, pour tout ce que vous avez fait pour moi et de moi.

L'aide précieuse de mon ami Boudjemaa, sa présence et son soutien m'ont aidé à accomplir ce mémoire. Je le remercie du fond du cœur.

Je remercie toute ma famille et tous mes amis qui ont contribué de loin à la réalisation de ce projet par leurs prières et leur soutien.

Merci à tous.

MODÈLISATION THÉORIQUE ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE DE LA RÉDUCTION DES FUITES PAR LA MODULATION DE LA PRESSION

Ryma FARES

RÉSUMÉ

Le réseau d'eau potable a pour fonction de base de livrer de façon continue une eau de bonne qualité et avec une quantité suffisante à une pression adéquate. Néanmoins, le réseau de distribution subit des dégradations au cours du temps qui peuvent engendrer des fuites. Des efforts doivent alors être consentis pour minimiser ces fuites qui causent des pertes d'eau. La modulation de la pression peut être utilisée comme moyen efficace pour réduire le débit de fuite dans les réseaux de distribution d'eau potable. L'analyse de l'opportunité économique et de la faisabilité technique d'implantation d'un tel procédé dans un secteur donné nécessite une bonne compréhension de l'impact de la pression sur le débit de fuite. L'objectif du présent mémoire est de présenter une nouvelle formulation du modèle théorique qui relie la réduction du débit de fuite à la réduction de la pression dans le réseau. Le modèle proposé présente l'avantage de tenir compte d'une manière explicite et séparée de la géométrie des fuites et de la rigidité du matériau de la conduite. Un montage expérimental a permis d'analyser les paramètres du modèle théorique dans un environnement contrôlé où la géométrie de la fuite et le matériau de la conduite peuvent être modifiés. L'étude expérimentale a permis de déterminer les paramètres qui interviennent dans le modèle théorique et a révélé que la réduction du débit de fuite ne dépend pas seulement de la réduction de la pression mais dépend aussi du matériau de la conduite, des dimensions de la fuite et de la pression initiale dans le réseau. Ainsi pour le même pourcentage de réduction de la pression, la réduction du débit de fuite sera plus importante dans les conduites flexibles ayant des pressions de service élevées.

Mots clés : fuite, modulation, réduction, modélisation, validation.

THEORETICAL MODELING AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF THE REDUCTION OF LEAKAGE THROUGH THE MODULATION OF THE PRESSURE

Ryma FARES

ABSTRACT

The drinking water system has the basic function to deliver continuously good water quality with a sufficient quantity at adequate pressure. However, the distribution network undergoes degradation over time which can engender leaks. Efforts should then be granted to minimize leaks which cause water loss. The pressure modulation may be an effective way to reduce the leakage flow in the drinking water system. The choice of this method of intervention is based on ground conditions and local factors of a municipality. The aim of this paper is to present a new formulation of the theoretical model that links leakage flow rate and pressure rate in the network. The proposed model has the advantage of taking into account the geometry of the leakage and stiffness of the material of the pipe. An experimental assembly was used to analyze the parameters of the theoretical model in a controlled environment where the geometry of the leak and the material of the pipe can be changed. The experimental study has identified the parameters involved in the theoretical model, and found that reducing the leakage rate depends not only on pressure but also depends on pipe material, size of the leak and the initial pressure in the network. So, for the same amount of pressure reduction, reducing the leakage rate will be higher in the flexible pipe with high pressures.

Keywords: leakage, modulation, reducing, modeling, validation.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 Problématique et objectifs.....	3
1.1 Problématique de terrain	3
1.1.1 Les causes des fuites	3
1.1.2 Type des fuites	6
1.1.3 Programme de détection de fuites.....	8
1.1.4 Bilan d'eau	10
1.1.5 Rendement d'un réseau.....	15
1.1.6 Indice linéaire des pertes.....	17
1.1.7 Détections des fuites	17
1.1.8 Méthodes d'intervention	20
1.1.9 Différents types de gestion de la pression.....	23
1.1.10 La problématique	27
1.2 Problématique de recherche	27
1.2.1 Gestion de la pression	29
1.2.2 Relation débit de fuite/pression	30
1.2.3 L'objectif de la recherche	32
CHAPITRE 2 Développements théoriques	33
2.1 Introduction	33
2.2 Modélisation des écoulements à travers des orifices	34
2.3 Conclusion	41
CHAPITRE 3 Étude expérimentale.....	42
3.1 Introduction	42
3.2 La similitude	42
3.3 Matériels et méthodes	44
3.4 Les mesures.....	47
3.4.1 Première étape de mesure	47
3.4.2 Deuxième étape de mesure	47
3.5 Calcule de N	49
3.6 Résultats et discussion	51
3.6.1 Conduite en acier – orifice circulaire	51
3.6.2 Conduite en PVC – orifice circulaire	56
3.6.3 Conduite très flexible – orifice circulaire	64
3.6.4 Conduite très flexible – orifice longitudinal	73
3.7 Conclusion	75
CONCLUSION.....	76
ANNEXE I Schémas du montage.....	77

BIBLIOGRAPHIE	79
---------------------	----

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Les facteurs de la détérioration d'un réseau de distribution.....
Tableau 1.2	Les modes de défaillance des conduites de distribution.....
Tableau 1.3	Les modes de défaillance structurale des différents matériaux de conduite.
Tableau 1.4	L'audit annuel du réseau de distribution d'eau.
Tableau 2.1	La réduction du débit de fuite en fonction de la réduction de la pression pour différentes valeurs de N.....
Tableau 3.1	Les valeurs de N pour différents diamètres d'orifice - conduite en acier.
Tableau 3.2	Les valeurs de N pour différents diamètres d'orifice - conduite en PVC.
Tableau 3.3	L'écart des valeurs de N entre les deux conduites (acier et PVC).
Tableau 3.4	Les valeurs de n_q pour différents diamètres d'orifice.
Tableau 3.5	Les valeurs de N pour différents diamètres d'orifice - conduite très flexible.....
Tableau 3.6	L'écart des valeurs de N entre les deux conduites
Tableau 3.7	Les valeurs de N pour différentes dimensions d'orifice

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Méthodes d'intervention pour contrôler les fuites.....	21
Figure 1.2	Options de conception typiques de SSD.....	25
Figure 1.3	Composants des pertes réelles et outils permettant d'en réduire les volume	26
Figure 2.1	Le taux de réduction du débit de fuite en fonction du taux de réduction de la pression.	40
Figure 3.1	Le montage du réseau dans le laboratoire de l'ETS	45
Figure 3.2	Le montage pour simuler les fuites.....	46
Figure 3.3	La mesure de débit de fuite.....	48
Figure 3.4	La variation de N en fonction du diamètre de l'orifice- conduite en acier.	52
Figure 3.5	La variation de N en fonction de la réduction de la pression – conduite en acier.....	53
Figure 3.6	La variation de N en fonction de taux de réduction de fuite pour différentes pressions initiales – conduite en acier.	55
Figure 3.7	La variation de N en fonction de la pression pour le même pas de réduction (10 kPa) – conduite en acier.	56
Figure 3.8	La variation de la valeur de N en fonction du diamètre de l'orifice – conduite en PVC.....	57
Figure 3.9	La variation de N en fonction du taux de réduction de fuite pour différentes pressions initiales – conduite en PVC.	58
Figure 3.10	Les valeurs de N (pour les deux conduites PVC et Acier) en fonction du diamètre.	59
Figure 3.11	La valeur de n_a en fonction du diamètre – conduite en PVC.....	60
Figure 3.12	Les valeurs de n_a en fonction de la réduction de la pression – conduite en PVC.....	61

Figure 3.13	La valeur de n_q en fonction du diamètre.....	62
Figure 3.14	Les valeurs de n_q en fonction de la réduction de la pression pour chaque diamètre.	63
Figure 3.15	La variation de C_q en fonction de la réduction de la pression pour différents diamètres de la conduite en PVC.	64
Figure 3.16	La variation de la valeur de N en fonction du diamètre - conduite très flexible.....	65
Figure 3.17	La variation de N en fonction de taux de réduction de fuite pour différentes pressions initiales – conduite très flexible.....	66
Figure 3.18	Les valeurs de N (pour les deux conduites en Acier et la conduite très flexible) en fonction du diamètre.....	67
Figure 3.19	La valeur de n_a en fonction du diamètre – conduite très flexible.	68
Figure 3.20	La courbe de tendance avec une régression de puissance.	69
Figure 3.21	Les valeurs de n_a en fonction de la réduction de la pression pour chaque diamètre – conduite très flexible.	70
Figure 3.22	Les courbes de tendance avec une régression exponentielles.	71
Figure 3.23	La valeur de n_q en fonction de diamètre.	72
Figure 3.24	Les valeurs de n_q en fonction de la réduction de la pression pour chaque diamètre.	73
Figure 3.25	La variation de la valeur de N en fonction de la dimension de l'orifice – conduite très flexible.	74

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AIDE : Association internationale des distributions d'eau.

AWWA : American Water Works Association.

CARL : Current Annual Real Losses.

ELL : Economic Leakage Level.

IWA : International Water Association.

ILI : Infrastructure Leakage Index.

SRP : Secteur de Régulation de Pression.

SSD : Secteurs de Suivi de Distribution.

UARL : Unavoidable Annual Real Losses.

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A : l'aire de l'orifice [L^2].

A' : la surface de la coupe du sol [L^2].

C_c : coefficient de contraction.

C_q : coefficient de débit.

C_v : coefficient de perte de charge.

D : diamètre de l'orifice du prototype [L].

d : diamètre de l'orifice du modèle réduit [L].

F : nombre de Froude.

f_t : les perte des charges [L].

g : force de gravité (L/T^2).

h_p : la perte de charge dans le tuyau [L].

h_o : la perte de charge de l'orifice [L].

h_s : est la perte de charge dans le sol [L].

H : la hauteur du prototype [L].

h : la hauteur du modèle réduit [L].

K : la conductivité hydraulique [$L \cdot T^{-1}$].

L : la longueur d'écoulement [L].

N : le coefficient.

n_q : coefficient dépendant de débit.

n_a : coefficient dépendant de l'orifice.

P_E : Pression en point E [F/L^2].

P : pression du prototype [F/L^2].

p : pression du modèle réduit [F/L^2].

P_1 : pression initiale [F/L^2].

P_2 : pression réduite [F/L^2].

P_S : Pression en point S [F/L^2].

Q : débit du prototype (L^3 / T).

q : débit du modèle réduit (L^3 / T).

Q_1 : débit avant la réduction de la pression (L^3 / T).

Q_2 : débit après la réduction de la pression (L^3 / T).

Q', Q'', Q^* : débit (L^3 / T).

V : vitesse du prototype [L / T].

v : vitesse du modèle réduit [L / T].

V_E : la vitesse de l'eau en point E [L / T].

V_S : la vitesse en point S [L / T].

Z : l'élévation [L].

Z_E : la hauteur en point E [L].

Z_S : la hauteur en point S [L].

ρ : masse volumique de l'eau [P/L^3].

λ_l : échelle de longueur.

λ_p : échelle de pression.

λ_v : échelle de vitesse.

INTRODUCTION

La population mondiale a explosé au cours du XXe siècle. Environ 6 milliards d'habitants à la fin de l'année 2000 contre 4 milliards en 1974. Cette croissance est la preuve de la capacité unique de l'homme à fournir l'essentiel de la qualité de l'air, de l'eau, de nourriture et de soins de santé à ses collectivités. Toutefois, durant la seconde moitié du même siècle, l'homme a également reconnu que les ressources du monde ne pouvaient pas continuer à maintenir ce taux de croissance indéfiniment, du moins pas en utilisant les mêmes méthodes que par le passé, car nos ressources sont limitées.

La disponibilité de l'eau potable a été un facteur majeur contribuant à la croissance de la population mondiale. La capacité de créer de grands systèmes d'approvisionnement en eau, traiter et transporter l'eau au bout des doigts des communautés se présente comme une des merveilles d'ingénierie. La plupart des systèmes d'eau de la planète ont été un grand succès dans la livraison d'eau de haute qualité à de vastes populations. Cependant, la plupart de ces systèmes présentent des pertes d'eau qui se produisent dans leurs opérations. Par le passé, les fuites ont été largement négligées. Avec de l'eau facilement disponible et relativement peu coûteuse, les pertes ont été ignorées par les services d'eau, ou supposées être naturellement inhérentes à l'exploitation d'un système d'approvisionnement en eau. Mais avec la croissance démographique et l'augmentation des coûts, il devient de plus en plus irréaliste de permettre la perte de l'eau (Julian Thornton 2008).

Cependant, une quantité importante de l'eau transportée par les réseaux de distribution, à partir des usines de traitement jusqu'aux points de consommation, n'arrive jamais à destination. Selon une enquête réalisée en 1991 par l'Association internationale des distributions d'eau (AIDE), la quantité d'eau perdue ou « non comptabilisée » se situerait entre 20 % à 30 % de la production totale. L'eau échappe au contrôle à cause des fuites, des erreurs aux compteurs et du piratage, les fuites étant la cause principale.

Par ailleurs, il est bien établi que le débit des fuites est directement relié à la pression dans le réseau de distribution. Mais malheureusement, les paramètres qui interviennent dans le modèle de prédition du débit de fuite à partir de la pression dans le réseau ne sont pas bien maîtrisés. L'objectif du présent travail est la validation expérimentale d'une nouvelle formulation du modèle de prédition du débit de fuite. Cette validation se fera à l'aide d'une installation expérimentale en laboratoire. Le mémoire traite ces questions en se structurant comme suit :

Dans le premier chapitre, nous définissons le contexte et la problématique de notre étude, en donnant l'essentiel en ce qui concerne les fuites dans les réseaux de distribution d'eau et en donnant une revue bibliographique sur la relation reliant le débit de fuite et la pression.

Le chapitre 2 est consacré aux développements théoriques d'une nouvelle formulation de l'équation reliant le débit de fuite et la pression, en mettant en évidence l'effet de la rigidité du matériau et de la géométrie de la fuite.

Nous validons dans le chapitre 3 la nouvelle formule trouvée, avec une installation expérimentale dans le laboratoire de l'ETS. Des mesures ont été prises pour différents types de fuites et de matériaux.

CHAPITRE 1

Problématique et objectifs

1.1 Problématique de terrain

Les réseaux d'aqueduc, en général, sont confrontés à des fuites et à des bris qui dépendent de plusieurs facteurs. Ces fuites et ces bris peuvent varier en fréquence et en importance notamment selon l'âge de la conduite, son matériau de fabrication, le sol dans lequel elle est enterrée ainsi qu'en fonction de ses conditions d'utilisation et de sollicitation.

Une fuite souterraine peut rester invisible pendant une très longue période. L'eau s'infiltre dans le sol et se fraye un chemin jusqu'à l'égout, le fossé ou le cours d'eau le plus proche. Elle peut aussi apparaître en surface et devenir un bris. Le volume d'eau perdu par une fuite qui s'écoule sur une longue période est habituellement supérieur à celui perdu lors d'un bris, car ce dernier est détecté et rapidement réparé. À titre d'exemple, une fuite de 50 litres par minute gaspille 26 200 m³ sur une base annuelle, tandis qu'un bris de 1 000 litres par minute gaspille 1 440 m³ dans une journée (Osama Hunaidi 2000).

1.1.1 Les causes des fuites

Les causes les plus communes des fuites sont les suivantes :

- mauvaises installation et fabrication des conduites;
- mauvais choix de matériaux des conduites;
- une mauvaise manipulation de matériaux avant l'installation;
- remblai incorrect;
- l'instabilité de la pression;
- variations de la pression;
- l'excès de la pression;
- la corrosion;

- les vibrations et le chargement de la circulation;
- les conditions environnementales telles que le froid et le chargement;
- manque d'entretien approprié.

Le tableau 1.1 fournit l'explication des causes des fuites (CNRC 2003) :

Tableau 1.1 Les facteurs de la détérioration d'un réseau de distribution.

	Facteur	Explication
Physique	Matériaux du tuyau	La nature de la défaillance varie selon le matériau du tuyau.
	Épaisseur de la paroi du tuyau	La corrosion pénètre plus rapidement dans une paroi moins épaisse.
	Âge du tuyau	Les effets de la dégradation du tuyau deviennent plus visibles avec l'âge.
	Époque de fabrication du tuyau	L'époque et l'endroit de fabrication d'un tuyau peuvent avoir une incidence sur la vulnérabilité à la défaillance.
	Diamètre du tuyau	Les tuyaux de petit diamètre sont plus sensibles à une défaillance au niveau du cylindre.
	Type de joints	Certains types de joint ont connu une défaillance prématuée (p. ex. joints au plomb).
	Retenue de la poussée	Si la retenue de la poussée est inadéquate, les efforts longitudinaux risquent d'augmenter.
	Revêtements intérieur et extérieur du tuyau	Les tuyaux munis d'un revêtement sont moins sensibles à la corrosion.
	Métaux dissemblables	Les métaux dissemblables sont sensibles à la corrosion galvanique.
	Pose des tuyaux	De mauvaises pratiques en ce qui a trait à la pose peuvent endommager les tuyaux, les rendant ainsi plus vulnérables à la défaillance.
Environnemental	Fabrication des tuyaux	Les tuyaux peuvent être plus vulnérables, la défaillance en raison d'imperfections dans les parois résultant de la fabrication. Ce problème est plus fréquent dans les anciens tuyaux en fonte coulée en fosse.
	Assise du tuyau	Une mauvaise assise peut entraîner la défaillance prématuée du tuyau.
	Matériau de remblai des tranchées	Certains matériaux de remblai sont sensibles à la corrosion ou au gel.
	Type de sol	Certains sols sont corrosifs; dans le cas de certains sols, la modification de la teneur en humidité entraîne un important changement de volume, ce qui modifie le chargement des conduites. La présence d'hydrocarbures

Environnemental	Type de sol	ou de solvants dans le sol risque de causer une certaine détérioration des tuyaux.
	Eaux souterraines	Certaines eaux souterraines peuvent être agressives pour certains matériaux de tuyauterie.
	Climat	Le climat a une influence sur la pénétration du gel et l'humidité du sol. On doit tenir compte du pergélisol dans les régions nordiques.
	Emplacement du tuyau	La migration du sel routier dans le sol peut augmenter le taux de corrosion.
	Mouvements	Certains mouvements souterrains dans l'environnement immédiat d'un tuyau peuvent endommager ou modifier la structure de charge et de soutien du tuyau.
	Courant électrolytique	Les courants vagabonds causent de la corrosion électrolytique.
	Activité sismique	L'activité sismique peut augmenter les efforts qui s'exercent sur un tuyau et causer des variations de pression.
Opérationnel	Pression interne de l'eau et variation de la pression	Des modifications à la pression interne de l'eau auront une incidence sur les efforts qui s'exercent sur le tuyau.
	Fuite	Une fuite corrode l'assise du tuyau et fait augmenter la teneur en humidité du sol dans les environs immédiats du tuyau.
	Qualité de l'eau	Il existe de l'eau agressive qui favorise la corrosion.
	Vitesse d'écoulement	Le taux de corrosion interne est plus élevé dans les conduites de distribution en cul-de-sac sans revêtement intérieur.
	Possibilités de retour d'eau	Les connexions croisées avec des réseaux qui ne contiennent pas d'eau potable peuvent causer la contamination du réseau de distribution.
	Pratiques d'exploitation et d'entretien	De mauvaises pratiques peuvent compromettre l'intégrité structurale des tuyaux et la qualité de l'eau.

La clé de l'élaboration d'une stratégie de perte d'eau est d'acquérir une meilleure compréhension des causes des pertes et les facteurs qui les influencent. Ensuite, les techniques et les procédures peuvent être développées et adaptées aux caractéristiques spécifiques du réseau et les facteurs locaux influant, pour s'attaquer à chacune de ces causes par ordre de priorité.

1.1.2 Type des fuites

Généralement les ruptures transversales ont lieu sur les petits diamètres alors que les gros diamètres subissent plutôt des ruptures longitudinales ou des piquages. Aussi, les fuites sur tuyaux ont surtout lieu sur des petits diamètres, alors que les diamètres plus élevés ont des fuites au niveau des joints (Merzouk, 2005). Les types de ruptures les plus courants dans les conduites de distribution sont illustrés dans le tableau 1.2 (CNRC 2003).

Tableau 1.2 Les modes de défaillance des conduites de distribution.

Type de fuite	La cause
Fissure circulaire	<ul style="list-style-type: none"> • Contrainte de flexion due au gel. • Contrainte de flexion due à de l'argile gonflante. • Contraction thermique. • Contrainte longitudinale à proximité des robinets et des raccords.
Rupture longitudinale	<ul style="list-style-type: none"> • Contrainte périphérique due à la pression interne de l'eau. • Contrainte annulaire due à la surcharge exercée par la couverture de sol. • Contrainte périphérique due à de l'eau gelée. • Contrainte annulaire due à la surcharge exercée par la circulation.
Déboîtement	<ul style="list-style-type: none"> • Dilatation du matériau du joint.
Cisaillement de l'emboîtement	<ul style="list-style-type: none"> • Enfoncement excessif du cordon dans l'emboîtement. • Contrainte de flexion.
Rupture en colimaçon	<ul style="list-style-type: none"> • Combinaison de contrainte de flexion et de contrainte périphérique due à la pression interne de l'eau.

Type de fuite	La cause
Rupture/ Éclatement	<ul style="list-style-type: none"> • Contrainte périphérique due à la pression interne de l'eau. • Corrosion des fils de précontrainte en acier dans les tuyaux sous pression en béton.
Trou traversant	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosion par piqûres. • Imperfection dans le moulage.

Tout matériau de canalisation d'eau potable doit se conformer à certaines spécifications de telle sorte qu'il évite de détériorer la qualité de l'eau transportée et retarde au maximum le vieillissement du réseau (Brière,00). Le tableau 1.3 résume les modes de défaillance structurale pour les matériaux les plus répandus (CNRC 2003).

Tableau 1.3 Les modes de défaillance structurale des différents matériaux de conduite.

Matériau de conduite de distribution	Mode de défaillance structurale (voir le tableau 1.2)
Fonte Petit diamètre (<375 mm). Gros diamètre (>500 mm). Diamètre moyen (de 375 à 500 mm).	<ul style="list-style-type: none"> • Rupture circulaire, emboîtement fendu et corrosion sous forme de trous traversants. • Ruptures longitudinales, emboîtement cisaillé et corrosion sous forme de trous traversants. • Même chose que pour les tuyaux de petits diamètres, en plus de ruptures longitudinales et de fissures en colimaçon, et tronçons éclatés.
Fonte ductile	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosion sous forme de trous traversants.
Acier	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosion sous forme de trous traversants; les tuyaux de gros diamètres sont vulnérables à l'effondrement.
Chlorure de polyvinyle	<ul style="list-style-type: none"> • Rupture longitudinale causée par de trop grandes contraintes mécaniques. • Sensibilité aux ruptures à la suite d'impacts dans des conditions de froid externe.

Matériaux de conduite de distribution	Mode de défaillance structurale (voir le tableau 1.2)
Polyéthylène haute densité (PEHD)	<ul style="list-style-type: none"> Imperfections au niveau des joints, dégradation mécanique en raison de mauvaises méthodes de pose et sensibilité à l'effondrement causée par le vide en présence d'indices de faible pression.
Amiante-ciment (AC)	<ul style="list-style-type: none"> Rupture circulaire et dégradation du tuyau dans de l'eau agressive. Fentes longitudinales.
Tuyau sous pression en béton	<ul style="list-style-type: none"> Les tuyaux contenant des fils précontraints peuvent se rompre en raison d'une perte de précontrainte à la suite de multiples défaillances au niveau des fils. Dégradation du tuyau dans des sols particulièrement agressifs, corrosion de l'âme en acier et béton endommagé en raison de mauvaises méthodes de pose.

1.1.3 Programme de détection de fuites

La première étape dans l'élaboration d'une stratégie est de poser quelques questions sur les caractéristiques du réseau, les pratiques d'exploitation, les outils et les mécanismes disponibles pour proposer des solutions appropriées, lesquelles sont utilisées pour formuler la stratégie. Les questions typiques sont :

- Quelle est la quantité d'eau perdue?
- Pourquoi est-elle perdue?
- Quelles stratégies peuvent être introduites pour réduire les pertes et améliorer la performance?
- Comment pouvons-nous maintenir la stratégie?

La perte d'eau se produit dans tous les systèmes de distribution, seul le volume de perte varie. Cela dépend des caractéristiques du réseau et d'autres facteurs locaux, des pratiques opérationnelles de la compagnie des eaux, et du niveau de technologie et de l'expertise

appliqués. Le volume perdu varie largement d'un pays à l'autre, et entre les régions de chaque pays. Une des pierres angulaires d'une stratégie de perte d'eau est donc de comprendre l'importance relative de chacune des composantes, garantissant que chacune est mesurée ou estimée aussi précisément que possible, afin que les priorités puissent être définies par une série de plans d'action.

D'une manière générale, l'implantation d'un programme dédié au contrôle des pertes dans les réseaux se réalise en quatre phases (Thornton et al. 2008). La première phase consiste à faire l'audit de l'eau pour établir le diagnostic du réseau selon certains critères de performance. Selon les résultats obtenus dans cette phase et les objectifs fixés, la municipalité fera le choix de la méthode d'intervention la plus appropriée pour contrôler les pertes. La deuxième phase consiste à planter des projets pilotes pour tester les recommandations et ajuster au besoin certains éléments du programme initial. Lorsque les résultats obtenus dans les projets pilotes s'avèrent probants, la troisième phase consiste à mettre en œuvre le programme de contrôle des fuites sur l'ensemble du réseau. Finalement, la quatrième phase consiste à faire la gestion et l'entretien des installations de contrôle des fuites. Les bilans d'eau, par secteur ou pour l'ensemble du réseau, réalisés durant la phase initiale de l'audit, permettent de déterminer les quantités d'eau perdues dans les réseaux de distribution.

Une fois que le volume d'eau perdu par les fuites est connu, la municipalité doit vérifier la rentabilité de la mise en place d'une campagne de détection des fuites avant d'entamer cette détection sur le terrain. Ainsi, après avoir déterminé l'importance des fuites dans le réseau d'aqueduc municipal et établi qu'un potentiel technique et économique de réduction des fuites est envisageable, il est nécessaire de poursuivre la démarche en recherchant ces fuites et en les localisant. Le guide de RÉSEAU environnement présente les méthodes suivantes qui permettent de compléter cette étape :

- la localisation par observation directe : filet d'eau en surface, tassemement des terrains, plaintes de citoyens, gazon plus vert, etc.;

- la sectorisation : isolement temporaire et mesure du débit de nuit;
- l'écoute de la fuite : écoute à l'aide d'un appareil amplifiant le bruit de la fuite à l'oreille du dépisteur;
- la corrélation acoustique : écoute de la fuite à l'aide de deux capteurs disposés sur le réseau ou en contact avec l'eau par une borne-fontaine et qui émettent deux signaux dont le décalage temporel permet de situer précisément la fuite;
- les essais sous pression : habituellement pratiqués sur des conduites neuves ou réhabilitées, ils permettent de mesurer le débit des fuites dans des conditions contrôlées;
- l'injection de gaz : injection d'un gaz inerte dans la conduite, qui s'échappe par les fuites et indique leur localisation en se dégageant dans le sol.

La réparation des fuites ainsi localisées doit alors se faire le plus tôt possible afin de limiter les pertes d'eau et d'éviter la détérioration progressive de l'infrastructure. Le guide sur les fuites aborde également différentes considérations relatives au choix et au coût des techniques de réparation.

Par ailleurs, il est important d'insister sur le fait que l'apparition de fuites est continue et qu'en ce sens les municipalités qui décident d'établir un programme de contrôle des fuites doivent le faire sur une base permanente. Le programme doit donc contenir les interventions permettant de mesurer le niveau des fuites et de les réparer, mais aussi de prévenir les fuites et les bris à venir (Réseau-environnement 1999; Osama Hunaidi 2000).

1.1.4 Bilan d'eau

Les bilans d'eau permettent de déterminer et d'estimer les quantités d'eau perdues dans les réseaux de distribution. Ils peuvent être effectués sur l'ensemble du réseau ou par secteur. Sur l'ensemble du réseau, ils donnent une idée globale des pertes d'eau. Dans le cas des bilans par secteur, le réseau de distribution est divisé en secteurs comportant environ 20 à 30 km de conduites. Chacun de ces secteurs est isolé par fermeture des vannes appropriées; seules les vannes situées aux points de contrôle restent ouvertes, où des débitmètres portables

sont mis en place pour mesurer la quantité d'eau qui s'écoule sur une période de 24 heures. Pour savoir s'il y a des fuites importantes, on détermine le rapport du débit nocturne minimum sur le débit diurne moyen et on le compare aux ratios considérés comme normaux ou à des ratios établis précédemment pour le secteur donné. Les débits d'eau liés à des usages commerciaux ou industriels devraient être soustraits des débits mesurés. Si tous les raccordements aux abonnés sont équipés de compteurs, on peut obtenir des données plus précises concernant les fuites en relevant les quantités d'eau écoulées et consommées dans tel ou tel secteur sur une longue période.

Les zones où se produisent des fuites importantes peuvent être déterminées par la méthode du test par étapes. Celle-ci consiste à subdiviser le secteur, puis à mesurer les débits après avoir coupé successivement l'alimentation de chacun des sous-secteurs par fermeture des vannes correspondantes. Une diminution marquée du débit indique que des fuites importantes se produisent dans le sous-secteur dont l'alimentation vient d'être coupée.

Les bilans par secteur sont coûteux et exigent beaucoup de travail, car ils se font la nuit. Depuis quelques années, on a tendance à installer de façon permanente des débitmètres raccordés au système SCADA par télémétrie. Les valeurs des débits ainsi transmises sont automatiquement analysées et permettent de déceler les augmentations inhabituelles de consommation d'eau causées par de nouvelles fuites (Osama Hunaidi 2000).

Les bilans par secteur et les tests par étapes permettent de déterminer les zones du réseau de distribution où il y a des fuites importantes, mais cela n'empêche qu'il y ait des inconvénients en se fiant uniquement sur le bilan hydrique pour évaluer les pertes réelles :

- les erreurs accumulées par les autres composantes seront associées à l'estimation des pertes réelles;
- un bilan d'eau couvre normalement une période rétrospective de 12 mois, donc il a une valeur limitée en tant que système d'alerte précoce pour identifier de nouvelles fuites non déclarées, et initier le contrôle actif des fuites pour limiter leur durée;

- le bilan d'eau ne donne aucune indication sur les composantes de pertes réelles ou comment elles sont influencées par les politiques de services publics.

Pour ces raisons, les pertes réelles devraient de préférence être également appréciées par des méthodes complémentaires, à savoir :

- l'analyse des composantes des pertes réelles;
- l'analyse des flux de nuit.

Le principe général d'évaluation de certaines composantes de pertes réelles à partir des statistiques de réparation est bien connu. Le nombre annuel des réparations est supposé être le nombre annuel de nouvelles fuites et des bris, qui sont ensuite classés en différentes catégories, avec différents débits (Julian Thornton 2008).

Il est possible d'utiliser l'analyse des débits de nuit pour déterminer la différence entre le volume de l'eau utilisé durant la nuit et celui des pertes dans le secteur défini. Les différences entre les débits de nuit entre 02:00 h et 04:00 h peuvent aider l'opérateur à déterminer le nombre et l'importance des fuites d'eau dans un secteur donné.

Le Tableau 1.4 montre les divers composants du bilan d'eau qui sont utilisés durant l'audit annuel d'un réseau de distribution (CNRC 2003). Chacun de ces composants peut être mesuré, estimé ou calculé à partir d'autres composants.

Tableau 1.4 L'audit annuel du réseau de distribution d'eau.

Volume introduit dans le réseau	Consommation autorisée	Consommation autorisée et facturée	Consommation mesurée et facturée (y compris l'eau exportée)	Eau payante
			Consommation non mesurée, facturée	
		Consommation autorisée et non facturée	Consommation mesurée, non facturée	Eau non payante
	Perte d'eau	Perte apparente	Consommation non mesurée, non facturée	
			Imprécision de compteurs de clients	
	Perte réelle		Fuites dans les conduites d'adduction ou de distribution	Eau non payante
			Fuites et débordements dans les réservoirs d'emmagasinement de l'entreprise de service public	
			Fuites dans les branchements, entre la conduite et le compteur du client	

Ci-dessous, nous donnerons la définition de chaque composante du tableau 1.4 :

La consommation autorisée est le volume d'eau autorisé à être consommé, il peut être mesuré par compteur ou non. Il inclut toutes les utilisations résidentielles, commerciales, industrielles et institutionnelles, la lutte contre l'incendie, le curage à l'eau de conduite, le nettoyage de canalisation d'égout et toute utilisation, municipale ou autre, autorisée par la municipalité.

Consommation autorisée = consommation facturée + consommation non facturée.

La Consommation facturée est le volume d'eau consommé par les clients; celui-ci est mesuré par compteurs ou non et inclut l'eau exportée. La consommation facturée non mesurée est

une estimation du volume d'eau consommé par chaque client et qui sert de base pour une tarification forfaitaire.

La consommation non facturée est la portion de la consommation autorisée qui n'est pas facturée aux clients. La raison de la non-facturation de cette consommation dépend de la municipalité, en général la consommation non facturée est typiquement celle destinée à l'usage de la municipalité pour le nettoyage des rues, la lutte aux incendies,...

L'eau payante est le volume d'eau facturé aux clients et qui inclut la consommation mesurée par compteurs ainsi que la consommation non mesurée.

L'eau non payante, Le volume d'eau non payante, inclut toutes les pertes apparentes, toutes les pertes réelles et toute la consommation non facturée (CNRC 2003).

Le volume d'eau perdu se calcule alors par différence entre le volume d'eau total injecté dans le réseau et la consommation autorisée :

La perte d'eau = l'eau produite — la consommation autorisée.

Il est important de faire la différence entre la perte d'eau et les fuites. L'International Water Association a défini la perte de l'eau comme :

La perte d'eau = pertes réelles + pertes apparentes.

Le volume d'eau perdu se compose de pertes réelles, appelées communément 'fuites', qui sont dues à des ruptures ou à des fuites de conduites, de tuyaux de branchement, de réservoirs d'emmagasinement ou au débordement de ces derniers. Elles peuvent être graves, se transforment en bris et apparaissent en surface, comme elles peuvent passer inaperçues pendant des mois, voire des années. Le volume perdu dépendra en grande partie des caractéristiques du réseau et de la politique pratiquée. Le volume d'eau perdu se compose

aussi de pertes apparentes. Ces dernières sont principalement causées par les raccordements illicites au réseau et par le sous comptage des compteurs (Kunkel et al. 2008). Ainsi, l'International Water Association (IWA) définit :

- les pertes réelles : sont l'échappement physique de l'eau du système de distribution, et comprennent les fuites dans les tuyaux et les raccords; les fuites dans les réservoirs et les citermes, et les pertes d'eau causées par les débordements de réservoir;
- les pertes apparentes : sont causées par des imprécisions de mesure associée à la clientèle, les erreurs de données de gestion de facturation, des utilisations non mesurées, et toute forme de consommation non autorisée (vol ou l'utilisation illégale).

Les pertes apparentes peuvent être estimées à partir de l'analyse des incertitudes de mesure par type de compteurs selon leur âge et par des mesures ciblées de certaines consommations (AWWA, 2004). Les pertes réelles sont alors calculées en faisant la différence entre le volume total perdu et les pertes apparentes estimées. Le coût unitaire des pertes apparentes est bien supérieur à celui des pertes réelles. Le coût unitaire associé aux pertes réelles est généralement considéré égal au coût marginal de l'eau généré par les dépenses excédentaires en produits chimiques et en énergie lors du processus de traitement alors que le coût des pertes apparentes est considéré identique à celui chargé aux consommateurs.

1.1.5 Rendement d'un réseau

Le rendement est un critère d'appréciation relatif à la qualité et à l'efficacité de la distribution de chaque réseau. Il permet de suivre l'état d'un réseau en observant les variations d'une année à une l'autre.

Il est défini comme étant le rapport entre deux volumes : le volume sortant du réseau et le volume entrant dans le réseau :

$$\text{Rendement } R(\%) = \frac{C}{D} \times 100 \quad (1.1)$$

Et les pertes se définissent comme suit :

$$P (\%) = \left(\frac{D - C}{D} \right) \times 100 \quad (1.2)$$

Où

C = volume effectivement consommé annuellement.

D = volume distribué annuellement.

Il est à noter que:

- les pertes sont rarement inférieures à 15 %, soit un rendement R=0.85;
- dans un réseau bien entretenu, les pertes atteignent 25 %, soit un rendement R=0.75;
- pour un réseau mal entretenu, les pertes peuvent atteindre, voire dépasser 50%, soit un rendement R=0.50.

Les fuites indétectables, qui généralement abaissent le rendement d'un réseau, ne lui permettent pas d'avoir une valeur supérieure à 90% (Eisenbeis 1996).

La notion de rendement d'un réseau a l'inconvénient de ne pas tenir compte du linéaire sur lequel se produisent les pertes. Il est admis depuis plusieurs années que l'on ne peut pas qualifier de façon absolue un réseau par son rendement, de plus il ne permet pas de comparer l'état de fonctionnement des réseaux, d'où l'intérêt de calculer l'indice linéaire de perte (Merzouk 2007).

1.1.6 Indice linéaire des pertes

L'indice linéaire des pertes constitue un indicateur intéressant, car il prend en compte la longueur du réseau et le degré d'urbanisation d'une collectivité. Il est défini comme étant le rapport entre le débit des pertes en distribution et le linéaire total du réseau hors branchements :

$$ILP = \frac{\text{Débit de perte en distribution}}{\text{Linéaire du réseau}} \text{ m}^3/\text{j}/\text{km} \quad (1.3)$$

Le rendement du réseau et l'indice de pertes permettent d'apprécier l'état du réseau, tandis que les débits minimums nocturnes doivent être pris en considération dans la mise en place du modèle de fonctionnement hydraulique (Merzouk 2007).

1.1.7 Détections des fuites

Les pressions économiques, la menace pour la santé publique et, tout bonnement, la nécessité d'économiser l'eau ont poussé les exploitants de réseaux d'aqueduc à mettre en place des programmes d'élimination des fuites. Tous ces programmes de contrôle, quelle que soit la formule adoptée, comportent deux volets principaux : la surveillance des débits et la détection des fuites. Les programmes de surveillance des débits visent le relevé précis de l'écoulement aux points d'entrée et de sortie des réseaux de distribution ou dans des tronçons déterminés. Ces vérifications permettent de déceler les sections où les fuites sont importantes. Malheureusement, il est impossible d'en connaître l'endroit précis. C'est alors qu'entre en jeu la détection des fuites.

Dans les études de détection, on repère les fuites à l'aide d'appareils acoustiques qui captent les bruits ou les vibrations émis par l'eau s'échappant sous pression des canalisations. Ces appareils sont des tiges d'écoute, des aquaphones (ou sonoscopes) et des géophones (ou microphones de sol). Ils permettent d'écouter les sons produits par les fuites aux points de raccordement des canalisations avec des prises d'incendie et des soupapes, par exemple. Il y a

aussi les instruments de détection par corrélation, appelés corrélateurs. Ce sont des instruments informatiques modernes, faciles à installer sur le terrain, qui mesurent les signaux (sons ou vibrations) en deux points situés de part et d'autre de l'endroit suspect. L'emplacement exact de la fuite est automatiquement trouvé grâce au décalage des signaux et par corrélation croisée (AWWA 1990).

Les techniques de recherche des fuites sur les conduites de distribution les plus répandues sont les suivants :

- la technique de quantification : cette méthode donne des résultats satisfaisants. Elle présente l'avantage de réparer en priorité les plus grosses fuites. Elle permet une détection des tronçons à problème. Les fuites sont ensuite localisées avec d'autres appareillages. Cette méthode reste pour nous une méthode de prélocalisation;
- la technique du gaz traceur : cette technique consiste à injecter dans une partie isolée d'une conduite un gaz non toxique, plus léger que l'air et insoluble dans l'eau (p. ex. l'hélium ou l'hydrogène). Le gaz s'échappe par l'ouverture de la fuite, puis atteint la surface en s'infiltant à travers le sol et la chaussée. On repère la fuite en balayant la surface du sol située juste au-dessus de la conduite au moyen d'un détecteur de gaz très sensible;
- la technique du comptage : une fraction de pertes est due au sous comptage, d'où la nécessité de bien gérer les compteurs au niveau de la production et la distributions;
- la technique de la thermographie : Le principe d'utilisation de la thermographie pour la détection des fuites est le suivant : l'eau s'échappant d'une conduite souterraine modifie les caractéristiques thermiques du sol environnant (p. ex., elle crée une zone d'absorption thermique plus efficace que le sol sec environnant). Les anomalies thermiques produites au-dessus de la conduite sont décelées par des caméras infrarouges portatives ou embarquées dans un véhicule terrestre ou un avion;

- la technique du géoradar : Les radars permettent de repérer de deux façons les fuites dans les conduites d'eau enfouies : ils détectent les vides créés dans le sol par l'eau qui fuit et circule autour de la conduite, ou bien les segments de canalisations qui semblent plus profonds qu'ils ne le sont en réalité à cause de l'augmentation de la valeur de la constante diélectrique du sol gorgé d'eau, aux alentours de la fuite. Les ondes du géoradar sont partiellement réfléchies vers la surface du sol lorsqu'elles rencontrent une anomalie dans les propriétés diélectriques (p. ex. un vide ou une conduite). En balayant la surface du sol, on obtient la taille et la forme de l'objet sur l'écran du radar. Le décalage entre le moment où l'onde est émise et le moment où elle est réfléchie détermine la profondeur de l'objet qui réfléchit l'onde;
- la technique acoustique : cette méthode est basée sur l'analyse du bruit émis par la fuite (Merzouk 2007).

Depuis longtemps, la recherche des fuites consiste à écouter puis analyser les bruits captés sur le sol ou sur les canalisations. Les différents matériels mis à la disposition des exploitants sont tous basés sur le principe du stéthoscope, amélioré par des systèmes amplificateurs :

- mécanique;
- électronique;
- corrélateurs acoustiques;
- les enregistreurs de bruits.

Il s'agit des tiges d'écoute, des aquaphones et des géophones, ou microphones au sol; ces appareils sont soit mécaniques, soit électroniques. Ils utilisent des mécanismes ou des matériaux sensibles (comme les éléments piézoélectriques) pour capter les vibrations ou les bruits émis par les fuites. Les appareils électroniques modernes sont munis d'amplificateurs de signaux et de filtres antiparasites pour mettre en relief le signal produit par la fuite.

Les corrélateurs de bruit des fuites sont des appareils portatifs à microprocesseurs qui repèrent précisément et automatiquement les fuites par la méthode de la corrélation croisée.

On mesure dans ce cas le signal acoustique émis par une fuite au moyen de capteurs de vibrations ou d'hydrophones disposés sur deux points de contact avec la conduite (généralement des bouches d'incendie ou des vannes), ce qui permet de déterminer l'emplacement de la fuite présumée. Les signaux produits par les fuites sont transmis, sans fil, des capteurs au corrélateur. Dans la plupart des cas, la fuite ne se trouve pas à égale distance des points de mesure; il existe donc un décalage dans la réception des signaux. Ce décalage temporel est calculé au moyen de la fonction de corrélation croisée des signaux produits par la fuite. La fonction de corrélation croisée donne alors une crête qui coïncide avec le décalage entre les signaux. L'emplacement de la fuite est déterminé au moyen d'une formule algébrique dans laquelle interviennent le décalage, la distance entre les capteurs et la vitesse de propagation des ondes sonores dans la conduite. La distance entre les capteurs est mesurée directement sur place ou relevée sur les cartes du réseau de distribution. La vitesse de propagation le long des conduites de différentes catégories et dimensions est généralement indiquée par la plupart des appareils vendus dans le commerce; elle peut aussi être calculée facilement sur place (Osama Hunaidi 2000; Merzouk 2007).

1.1.8 Méthodes d'intervention

Le choix de la méthode d'intervention la plus appropriée pour réduire le volume des pertes réelles dépend des facteurs qui causent ces pertes et de l'analyse avantage coût de chaque méthode. La figure 1.1 montre les quatre interventions potentielles pour réduire les fuites. Selon les données de terrain et le contexte local, on peut choisir l'une ou l'autre ou toute combinaison des quatre méthodes suivantes :

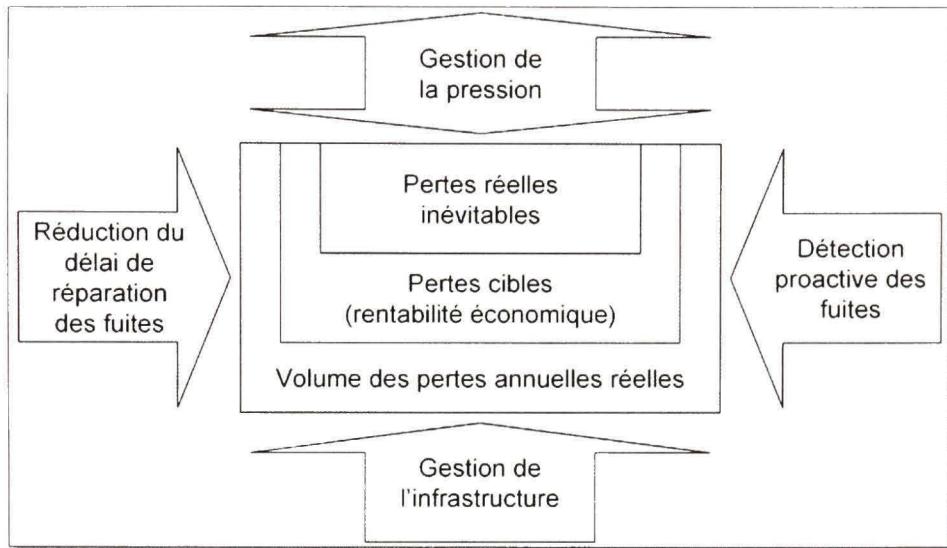


Figure 1.1 Méthodes d'intervention pour contrôler les fuites.

Adaptée de (Julian Thornton 2008)

- 1- La réduction du délai de détection et de localisation et la réparation rapide des fuites peuvent réduire substantiellement le volume des fuites.
- 2- La détection proactive des fuites consiste à utiliser des méthodes acoustiques pour rechercher les fuites avant qu'elles ne deviennent des bris visibles en surface. Cette détection est normalement précédée d'une sectorisation temporaire ou permanente permettant de mieux focaliser la recherche des fuites dans les secteurs les plus critiques et d'accélérer leur localisation.
- 3- La gestion optimale de la pression pour le contrôle des fuites (Manual 5, 2002) : peut être définie comme, le contrôle de la pression pour assurer un service efficace aux consommateurs tout en évitant l'excès inutile de cette pression qui fait augmenter indûment les fuites et les bris. La modulation de la pression peut être obtenue en utilisant différentes méthodes dont les plus fréquentes sont le contrôle à pression de sortie constante, le contrôle modulé selon l'heure de la journée, le contrôle modulé selon le débit de consommation et le contrôle par télémétrie plus ou moins automatisé. La modulation

de la pression ne doit, cependant, pas être appliquée de façon systématique. Sur un grand territoire, certains secteurs peuvent être soumis à de fortes pressions qui causent des bris et des fuites alors que d'autres secteurs peuvent même souffrir d'un manque de pression. L'analyse hydraulique du réseau, appuyée par des mesures ciblées de pression, permettra de déterminer les secteurs où la modulation de la pression est économiquement rentable (Pearson et al. 2008).

4- La réhabilitation des infrastructures : les objectifs visés par cette méthode d'intervention vont bien au delà du simple contrôle des pertes. La réhabilitation des réseaux englobe les méthodes de nettoyage abrasives et non abrasives qui visent l'amélioration de la qualité de l'eau, les méthodes de projection d'un revêtement interne non structurant, les méthodes de gainage interne structurant et non structurant ainsi que le remplacement des conduites pour assurer la pérennité des infrastructures. À ces méthodes, il faut ajouter les protections active et passive des conduites métalliques pour les protéger contre la corrosion. D'une manière générale, une petite portion de conduites possède un taux de bris relativement élevé par rapport au reste du réseau. Afin de maximiser l'impact de la réhabilitation sur la performance du réseau, il est important d'identifier les conduites critiques ayant le taux de casse le plus élevé et les réhabiliter en priorité. Selon l'état du réseau et le budget disponible, le taux annuel de remplacement des conduites peut varier de 1 à 2% du réseau. Par ailleurs, les méthodes d'intervention sans tranchée qui minimisent les coûts sociaux et la perturbation de l'environnement, doivent de plus en plus être utilisées (CERIU, 2007).

Avant d'arrêter leur choix, les ingénieurs doivent analyser l'opportunité technique et la rentabilité économique de chaque méthode d'intervention selon les données propres au secteur visé et les objectifs à atteindre par la municipalité (Farrley and Trow 2003).

La gestion de la pression peut être un outil efficace de réduction des pertes dans un réseau de distribution d'eau. Les pressions maximales (y compris l'influence des surpressions) peuvent avoir une incidence importante sur la vitesse à laquelle les fuites se produisent. La gestion de la pression permet aux municipalités de réduire la pression d'eau dans certaines parties ou la

totalité du réseau de distribution, réduisant ainsi le volume des pertes d'eau liées aux fuites. La gestion de la pression peut être simple ou complexe, mais elle doit à tout prix répondre aux besoins des clients et de la collectivité. Il convient de remarquer qu'une pression d'eau faible peut avoir une incidence sur la protection des incendies et peut-être sur la qualité de l'eau; il faut donc solliciter l'avis d'experts avant d'entreprendre un programme de gestion de la pression. On peut également utiliser ce genre de programme pour réduire les augmentations de pression qui ont lieu la nuit. On pourra ainsi réduire le volume des pertes liées aux fuites et diminuer la fréquence des nouvelles fuites produites dans les conduites d'eau par la réduction de pression, puisque plus la pression est élevée dans le réseau, plus le volume d'eau perdu à travers les fuites est important. Ordinairement, une réduction de pression de 1 % entraîne une diminution de 0,5 à 1,5 % des débits de fuites existants dans le réseau, selon le matériau des conduites et le type de fuite (CNRC 2003).

1.1.9 Différents types de gestion de la pression

La gestion de la pression peut prendre plusieurs formes. Chaque système de distribution dans le monde peut avoir des exigences différentes, voire plusieurs exigences. Les formes les plus courantes de la gestion de la pression sont les suivantes (Julian Thornton 2008) :

- sectorisation;
- contrôle de pompage;
- prise fixe;
- deux points de contrôle (temps ou de débit);
- la modulation de débit.

Dans le cas d'une prise fixe des vannes de régulation de pression, la pression est réglée en continu en aval de la soupape de sûreté, indépendamment de la valeur de la pression dans le réseau. La pression à la soupape de sûreté est généralement réglée de telle manière que le niveau minimum de service est satisfait au point critique du réseau à la demande maximale.

Les autres méthodes fournissent un meilleur contrôle de la pression que la prise fixe. La méthode de deux points de contrôle est utilisée pour réguler la pression dans le réseau à deux pressions différentes en fonction de la demande. La modulation du débit est la méthode la plus avancée de régulation de la pression. Avec cette méthode la pression est en permanence contrôlée et basée sur la demande, de sorte qu'au point critique du réseau, la pression est toujours maintenue à un niveau minimum de service. Ainsi, on parvient à la réduction de la pression maximale à tout moment (Charalambous 2007).

En ce qui concerne la sectorisation, on trouve les SSD et les SRP. Les secteurs de suivi de distribution (SSD) ont l'avantage de combiner deux des quatre outils utilisables contre les pertes réelles (figure 1-1). Les SSD aident à réduire le délai de réparation des fuites en identifiant les nouvelles fuites par une analyse du débit minimum de nuit. Les SSD facilitent aussi les efforts de détection proactive des fuites en identifiant comme zones prioritaires celles où l'analyse des données SSD montre les taux de fuite les plus élevés (Julian Thornton 2008).

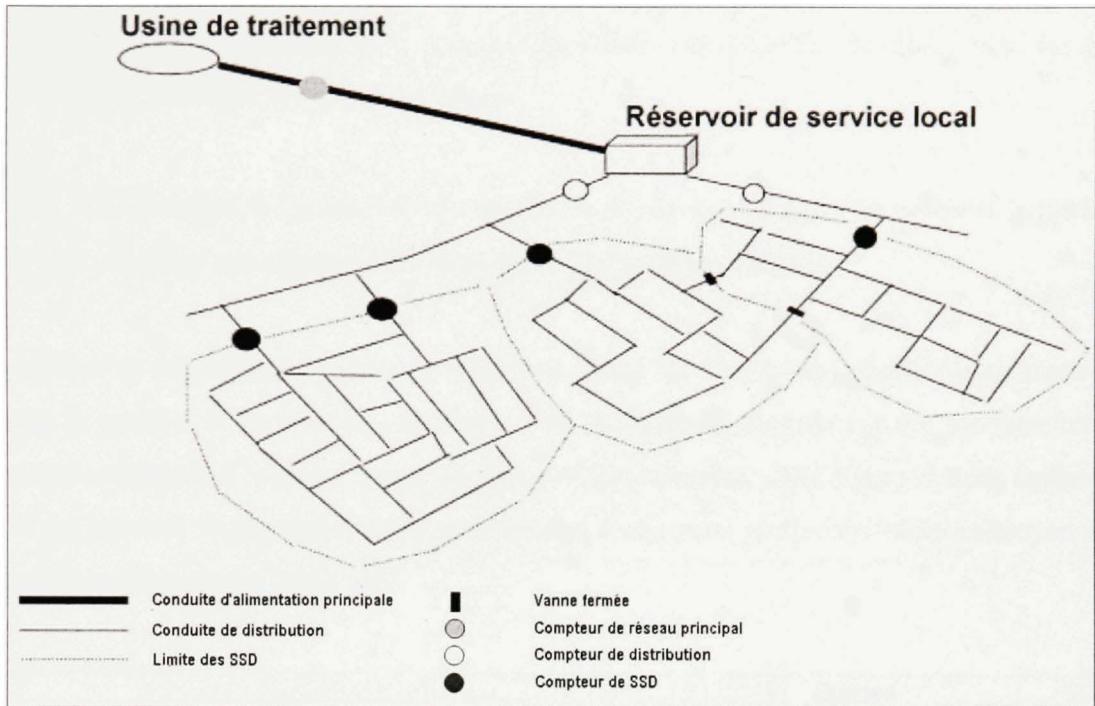


Figure 1.2 Options de conception typiques de SSD
Tirée de(Julian Thornton 2008)

Un SSD est composé généralement de :

- 1 point de régulation;
- 2 points de mesures (débit / pression);
- 1 point de mesure (pression).

Un SSD est une zone distincte alimentée par plusieurs points. L'eau alimentant le SSD est mesurée par des débitmètres et dans certaines circonstances un SSD peut alimenter en cascade un SSD adjacent (figure ci-dessus). La création de SSD a deux avantages principaux:

- Ils permettent de subdiviser le réseau en sections plus petites, chacune équipée de compteurs d'eau afin de mesurer le volume total d'eau à l'entrée (avec un accent sur les débits minimaux de nuit), ce qui permet d'identifier la présence de bris et fuites non

signalés. Les renseignements sur le débit minimum de nuit servent à identifier l'apparition de bris et de fuites ainsi qu'à orienter les efforts de détection de fuites vers les SSD présentant les fuites les plus importantes.

- Les SSD donnent à l'exploitant du réseau la possibilité de gérer la pression à l'échelle locale, assurant que chaque SSD fonctionne à la pression optimale.

Le secteur de régulation de pression (SRP) est parmi les moyens disponibles pour mettre en œuvre la gestion de la pression. Le schéma de la figure ci-dessous montre les facteurs qui peuvent influencer le volume actuel de pertes réelles. De plus, cette figure montre également qu'il est possible de réduire ce volume au niveau d'une perte réelle inévitable au moyen d'un ou plusieurs des quatre outils clés.

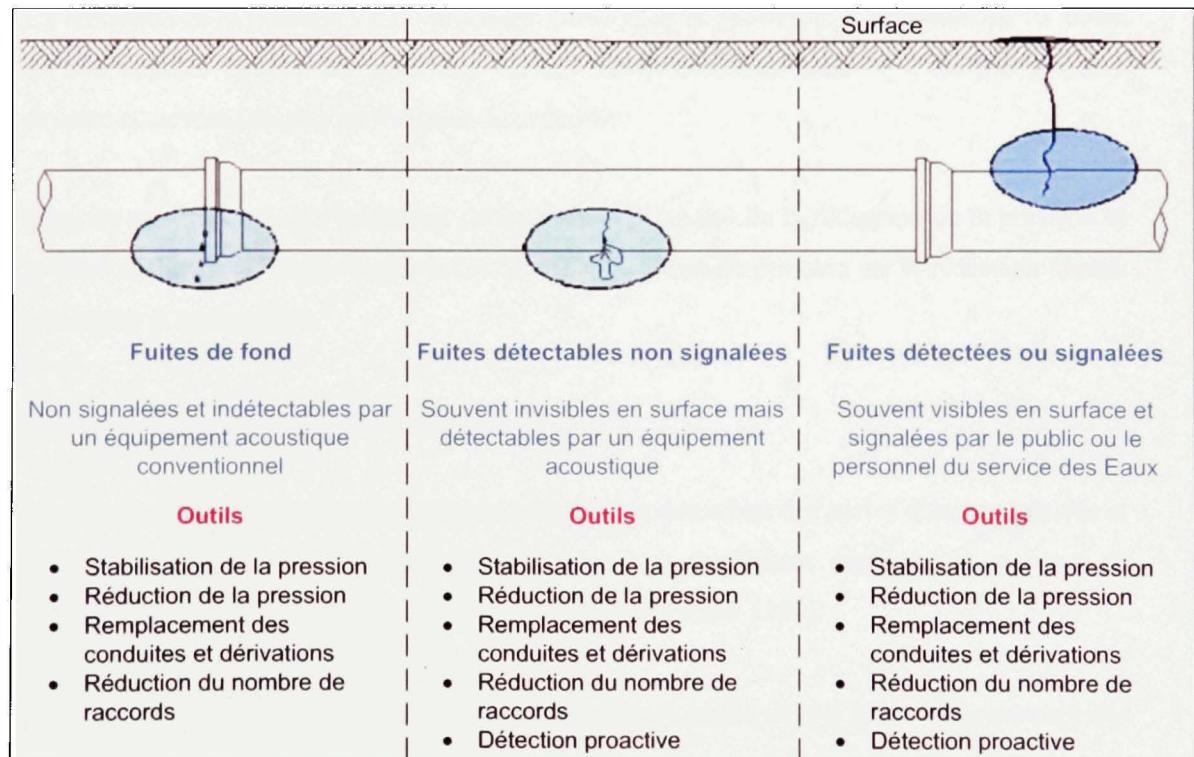


Figure 1.3 Composants des pertes réelles et outils permettant d'en réduire les volumes.
Tirée de water loss control, Julian Thornton (2008)

La conception des SRP, requiert des informations de base appropriées sur l'usage autorisé et les demandes en matière de fuites indétectables, de même que les profils de pression critique et d'alimentation afin de dimensionner, contrôler et estimer les économies reliées aux secteurs proposés de régulation de pression (Julian Thornton 2008).

1.1.10 La problématique

Les pertes réelles existent dans pratiquement tous les réseaux de distribution d'eau. Elles ne peuvent jamais être complètement éliminées, car il existe un volume minimum de pertes réelles qui est inévitable. Cependant, le volume minimum des pertes réelles inévitable dépend des caractéristiques générales du réseau de distribution et de la politique de la gestion des fuites employées par le service d'eau.

La réduction de la pression est la principale fonction de la gestion de la pression, au vu de ce qu'elle apporte comme bénéfice aux réseaux de distribution, mais ce n'est pas toujours évident et surtout rentable de diminuer la pression.

Dans ce mémoire on va s'intéresser surtout à la relation qui lie la réduction de la pression et le débit de fuites, à l'impact que peut avoir cette réduction de pression sur le réseau au niveau technique et hydraulique.

1.2 Problématique de recherche

La Banque mondiale a reconnu les graves problèmes découlant des pertes d'eau excessives et a donc lancé une initiative visant à promouvoir de meilleures pratiques en matière de réduction des fuites et la gestion des pertes d'eau (Malandain 1999).

Puisque les pertes réelles ne peuvent être éliminées totalement. On a introduit le concept des fuites inévitables (UARL) qui représente le niveau minimum de pertes réelles qui pourrait être atteint. Toutefois, la plupart des services publics affirment qu'il ne serait pas

économique de réduire les pertes réelles à ce niveau. Ils ont, donc, établi un certain niveau des pertes acceptables dont il est approprié pour une municipalité d'atteindre. C'est ce qu'on appelle le niveau économique des fuites (ELL).

Par ailleurs, l'IWA (International Water Association) définit un indicateur de performance d'un réseau, appelé ILI (Infrastructure Leakage Index), qui exprime le rapport entre les pertes réelles calculées et les pertes inévitables (Sturm et al. 2008). Ces pertes inévitables sont constituées des fuites de fond dont le débit est inférieur à la limite de détection par des moyens acoustiques mais incluent aussi les pertes dues aux délais d'intervention pour la détection et la réparation. Plusieurs équations sont proposées dans la littérature pour estimer les pertes inévitables en fonction du linéaire du réseau, le nombre de raccordements et la pression dans le réseau (Alegre et al. 2006). Idéalement, la valeur de l'indice de performance ILI doit avoisiner l'unité (1). Mais selon la disponibilité de l'eau et du coût de son traitement, la municipalité peut viser une valeur supérieure. D'ailleurs la moyenne des ILI calculée à partir des données de 27 réseaux de distribution situés dans 20 pays est de 4.38 (Lambert et McKenzie, 2004).

Une des façons qui permet d'améliorer la valeur de l'ILI est la gestion de la pression, qui est un nouveau concept qu'on a introduit ces derniers temps dans la gestion des fuites (Charalambous 2007). Lors de la conception des infrastructures d'eau, les ingénieurs sont souvent confrontés à fournir des niveaux précis de pression du système de distribution. Toutefois, les directives locales pour fournir des flux d'incendie, d'extension des capacités, et les facteurs de sécurité ont souvent abouti à des systèmes qui fournissent une pression d'eau au-dessus des exigences minimales, sans tenir compte de l'impact de la pression excessive. À la fin des années 1900, les rapports fondamentaux entre la pression et les taux de fuite ont été établis et montrent que certains types de fuites sont très sensibles aux changements de pression. On peut désormais considérer que, si certains niveaux minimaux de pression doivent être fournis, le niveau maximal de pression devrait également être établi et ne doit pas être dépassé. La pression d'eau excessive augmente non seulement certains types de fuites, mais influence aussi les taux de rupture et la quantité d'énergie inutile. La pression

d'eau peut être contrôlée dans une gamme appropriée qui répond aux besoins du client et du fournisseur sans causer d'effet nuisible à l'infrastructure (Julian Thornton 2008).

1.2.1 Gestion de la pression

La gestion de la pression n'implique pas seulement la réduction de la pression, mais aussi d'autres méthodes de contrôle et d'optimisation de pression sans compromettre le service à la clientèle. Une définition de la gestion de la pression dans son sens le plus large est donnée par Thornton et al, 2005, «la gestion de la pression consiste à contrôler la pression du système afin d'atteindre un niveau de service optimal, pour assurer un approvisionnement efficace aux consommateurs tout en évitant les excès inutiles de cette pression qui augmenterait indûment les fuites et les bris » (Thornton and Lambert 2005).

Les services d'eau prennent souvent pour concevoir leurs réseaux de distribution la pression minimale qui se produit au point critique à la demande maximale. La compréhension de ce concept est d'une importance capitale, étant donné qu'une régulation de la pression peut entraîner une réduction significative des fuites sans compromettre le niveau de service à la clientèle. Makenzie et Wegelin, (2005), ont réalisé un projet dans Sebokeng / Evaton, Afrique du Sud, et ils ont rapporté qu'en maîtrisant les pressions au cours des périodes creuses il est souvent possible de réduire significativement les pertes sans identifier ou réparer une seule fuite (Makenzie and Wegelin 2005).

The Water Losses Task Force favorise l'adoption de la méthode des «quatre composants» pour gérer les pertes réelles, car la gestion de la pression a une influence sur les autres composants (Manual 5, 2002).

Toutefois, comprendre l'impact que la gestion de la pression peut avoir sur le fonctionnement d'un système de distribution est essentiel dans l'application du bon type d'approche et d'équipement. La gestion de la pression est l'optimisation de la pression dans un système de distribution pour fournir le niveau minimum de service à tous les clients, qui

devrait idéalement se situer entre 20m et 40m avec un minimum absolu de 15 m si les conditions le permettent (Charalambous 2007).

1.2.2 Relation débit de fuite/pression

Les pertes de fond ont un débit trop faible pour être détectées par une inspection visuelle ou par des techniques acoustiques traditionnelles de détection des fuites. Elles continueront de circuler à moins que ce soit détecté par hasard, ou jusqu'à ce qu'elles s'aggravent progressivement à un point où elles peuvent être détectées. Le niveau de fuite de fond tend à augmenter avec l'âge du réseau et la pression. Le type de matériaux de tuyaux et les techniques d'assemblage sont également des facteurs qui contribuent au niveau des pertes de fond. La gestion et la réduction de la pression est une option efficace pour réduire les pertes de fond. Dans certains cas, elle est aussi une option moins coûteuse que les alternatives de remplacement de l'infrastructure, mais souvent cette dernière est un bon investissement à long terme.

La relation entre le débit de fuite et la pression a fait l'objet de nombreuses études et plusieurs documents ont été publiés sur le sujet. Ces travaux ont établi que les débits de fuite sont liés à la pression par une loi de puissance. Ce facteur est appelé N, à savoir $Q = P^N$. Cette relation s'inscrit dans le prolongement de la relation hydraulique normale de flux à partir d'un orifice fixe où le débit est proportionnel à la racine carrée de la pression i.e. $N = 0,5$. Plusieurs études ont toutefois montré que les fuites provenant de nombreux systèmes de distribution impliqueraient une valeur de N supérieur à 0,5 et souvent supérieur à 1. Une étude de (Mai 1994; Lambert 2001) a montré que cela peut s'expliquer par le fait que certains orifices ne sont pas de dimensions fixes. Ce phénomène est connu comme la théorie de FAVAD (Fixed and Variable Area Discharges). Ce travail a suggéré que N peut être aussi élevé que 1,5 et peut même atteindre 2,5 dans le cas des fuites dans certains systèmes de tuyaux en plastique (Pearson, Fantozzi et al. 2005).

La plupart des ouvrages hydrauliques mentionnent que l'équation d'écoulement turbulent Q traversant un orifice fixe de section A suit le principe de la racine carrée, en vertu duquel Q est proportionnel à la surface d'orifice A et la vitesse de fluide V qui varie avec la racine carrée de la pression statique h , et le coefficient de perte de charge C_d .

Toutefois, si la superficie de l'orifice, et ou le coefficient de décharge, changent avec la pression, le débit à travers l'orifice sera plus sensible à la pression que la relation racine carrée prédictive.

Ainsi, l'exposant N dans l'équation dépasse 0,5, si l'aire du trou et le coefficient de perte de charge C_d changent avec la pression. C'est la raison pour laquelle il est maintenant recommandé, par Water Losses Task Force (J Thornton 2003) et au Royaume-Uni (UKWIR 2003), que l'expression la plus pratique ayant un sens physique pour représenter la relation entre la pression et le débit de fuite est une loi de puissance simple du type :

$$Q_1/Q_0 = (P_1/P_0)^N \quad (1.4)$$

Donc, si la pression est réduite de P_0 à P_1 , le débit de fuites se réduit de Q_0 à Q_1 , et l'ampleur de la réduction dépend de l'exposant N .

La valeur de l'exposant N peut être obtenue à partir des essais dans les réseaux de distribution, en réduisant les pressions d'entrée la nuit, pendant la période de consommation minimum. Les débits de fuite (Q_0 , Q_1 et Q_2) obtenus peuvent être comparés à des pressions (P_0 , P_1 , P_2) mesurées, pour obtenir des estimations de l'exposant N . des essais effectués à ce jour en Amérique du Nord ont donné des valeurs de N de 0,5 à 1,5. Le taux de fuites dans les systèmes de distribution est généralement beaucoup plus sensible à la pression quand la valeur de N est supérieure à 0,5 (Pearson, Fantozzi et al. 2005). Une explication physique de ce paradoxe apparent a été proposée par Mai (1994), en utilisant le concept FAVAD. Mai a réfléchi à ce qui se passerait si la superficie de certains types de fuite change avec la pression, tandis que la vitesse a changé avec la racine carrée de la pression. Cela signifierait que les différents types de fuites peuvent avoir des relations différentes de pression; débit.

1.2.3 L'objectif de la recherche

La multitude de valeurs du coefficient N trouvées dans la littérature, engendre une incertitude quant aux gains potentiels de réduction des fuites par le procédé de modulation de la pression. En effet, la valeur de N contrôle directement le pourcentage de réduction du débit pour une réduction donnée de la pression. Plus la valeur de N est élevée plus le taux de fuites dans les systèmes de distribution est sensible à la pression.

L'objectif de la recherche est de bien cerner les plages de variation du paramètre N pour différents types de fuites localisés dans les conduites rigides et flexibles et aussi de trouver une nouvelle formulation du modèle théorique qui relie la réduction du débit de fuite à la réduction de la pression dans le réseau. Le modèle sera proposé dans le chapitre 2 en tenant compte de la géométrie des fuites et de la rigidité du matériau de la conduite. La nouvelle formule sera validée, par la suite, par un montage expérimental dans le chapitre 3. L'étude expérimentale permettra d'analyser et de déterminer les paramètres qui interviennent dans le modèle théorique avec une installation expérimentale dans le laboratoire de l'ETS.

CHAPITRE 2

Développements théoriques

2.1 Introduction

La réduction des fuites par la modulation de la pression nécessite une bonne compréhension de l'hydraulique des écoulements en charge et l'utilisation de modèles de simulation du comportement des réseaux. Il y a deux types de contrôles dans les écoulements à travers les fuites. Nous dirons que le contrôle du débit de fuite se fait au niveau de l'orifice quand le sol environnant est capable de drainer plus d'eau que l'orifice ne laisse sortir de la conduite. Inversement, nous dirons que le contrôle se fait au niveau du sol quand ce dernier draine un débit inférieur à celui échappé par l'orifice. Nous comprenons donc intuitivement que, pour les petits orifices débitant sous des pressions relativement élevées dans un sol très perméable, le contrôle sera au niveau de l'orifice qui constitue le facteur limitant. Inversement, pour des sols peu perméables le contrôle se fera au niveau du sol en présence de grands orifices soumis à des pressions de zone relativement faibles. (Walski 2006) a réalisé une étude expérimentale dans le but de comprendre la relation entre le débit de fuite et la pression dans un modèle réaliste de distribution d'eau. Il a mis en évidence un nombre adimensionnel, OS (Orifice/Soil), qui traduit le rapport entre la perte de charge dans l'orifice et la perte de charge au sol. Des tests effectués pour différentes dimensions de conduites et pour une large gamme de débits et de pressions ont montré que, pour de grands nombres de 'OS', le débit de fuite est contrôlé par les conditions de l'orifice. Alors que pour des petites valeurs de 'OS', le débit de fuite est contrôlé par la perte de charge au sol. Walski (2006) a démontré, par ailleurs, que dans la plupart des cas réels le débit de fuite est contrôlé par l'orifice.

2.2 Modélisation des écoulements à travers des orifices

L'analyse de débit de fuite à travers les défectuosités d'une conduite de distribution d'eau fait appel à l'écoulement par les orifices qui est bien documenté dans les ouvrages de l'hydraulique (Bennis, 2004). La simulation du débit de fuite est cependant beaucoup plus complexe que l'écoulement à travers un orifice. Tout d'abord la géométrie de l'orifice est souvent considérée régulière de forme circulaire ou rectangulaire alors que les trous de corrosion sont irréguliers et peuvent prendre la forme de fissures longitudinales, transversales ou multiples. La variation de l'aire de la fissure avec la pression pour des conduites flexibles ajoute une autre dimension à l'hydraulique classique des orifices. L'environnement confiné dans le sol au voisinage d'une fuite contraste avec la sortie libre ou noyée d'un orifice.

L'équation de conservation d'énergie appliquée entre deux points E et S situés de part et d'autre de la fuite s'écrit :

$$\frac{P_E - P_S}{\rho g} + \frac{V_E^2 - V_S^2}{2g} + z_E - z_S = h_{ft} \quad (2.1)$$

En écrivant l'équation de continuité entre une section longitudinale de la conduite et la section de l'orifice nous pouvons démontrer que l'énergie cinétique V_E^2 est négligeable devant V_S^2 . De plus, en prenant deux points E et S très rapprochés, nous pouvons considérer $Z_E - Z_S = 0$ et la perte de charge totale $h_{ft} = 0$. Ces deux hypothèses seront plus tard corrigées pour l'introduction d'un coefficient de débit C_q . En tenant compte de ces hypothèses l'équation (2.1) s'écrit :

$$V = \sqrt{\frac{2(P_E - P_S)}{\rho}} \quad (2.2)$$

L'élaboration théorique, faite par Walski (Walski, 2006), de la relation entre les pertes de charge entre l'orifice et le sol peut être utile pour comprendre les conditions au cours de

lesquelles l'orifice ou le sol domine. L'équation énergétique est appliquée entre le (point S) et la surface de l'eau libre (point B)

$$z_S + \frac{P_S}{\rho g} + \frac{V_S^2}{2g} = z_b + \frac{P_b}{\rho g} + \frac{V_b^2}{2g} + h_P + h_o + h_s \quad (2.3)$$

Où : Z est l'élévation, P est la pression, V est la vitesse, g est l'accélération gravitationnelle, h_P est la perte de charge dans le tuyau, h_o est la perte de charge de l'orifice, h_s est la perte de charge dans le sol, et ρg est le poids spécifique de l'eau.

La perte de charge dans la conduite h_P est insignifiante (la longueur du tuyau est très petite), la vitesse est négligeable (v) et la pression P_b à la surface est la pression atmosphérique. Ainsi, l'équation peut être simplifiée, comme suit :

$$\frac{P_S}{\rho g} + z_S - z_b = h_o + h_s \quad (2.4)$$

En utilisant la loi de Darcy, La perte de charge du sol peut être calculée comme montré dans l'équation suivante :

$$Q^* = KA' \left(\frac{h_s}{L} \right) \quad (2.5)$$

Où Q^* est le débit, K est la conductivité hydraulique, A' est la surface de la coupe du sol, et L est la longueur d'écoulement.

Ainsi, nous trouvons :

$$h_s = \frac{Q^* L}{KA'} \quad (2.6)$$

La perte de charge de l'orifice peut être trouvée par l'équation suivante :

$$Q' = C_d A \sqrt{2 g h_o} \quad (2.7)$$

Où C_d est le coefficient de décharge, A' est l'aire de l'orifice, ainsi, nous trouvons :

$$h_o = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q'}{C_d A} \right)^2 \quad (2.8)$$

En substituant l'équation 2.6 et 2.8 dans 2.4, nous obtenons:

$$h_c = \frac{Q^* L}{K A'} + \frac{1}{2g} \left(\frac{Q'}{C_d A} \right)^2 \quad (2.9)$$

Où $h_c = \frac{P_s}{\rho g} + z_s - z_b$

En rendant l'équation adimensionnelle, nous obtiendrons :

$$\frac{h_c K A'}{Q^* L} = 1 + \frac{K A Q'}{2 g L} \left(\frac{1}{C_d A} \right)^2 \quad (2.10)$$

Le dernier terme est un nombre sans dimension. Walski a appelé ce terme le nombre OS (orifice / sol).

$$OS = \frac{K A Q'}{2 g L} \left(\frac{1}{C_d A} \right)^2 = \frac{h_o}{h_s} \quad (2.11)$$

Lorsque le nombre OS a une valeur de 1, la perte de charge dans le sol et la perte de charge de l'orifice sont de même ordre. Lorsque le nombre OS est faible ($< 0,1$), les pertes de charge dans le sol sont dominantes, le débit de fuite est contrôlé par la perte de charge au sol. Quand OS est grand (> 10), les pertes de charge de l'orifice sont dominantes, le débit de fuite est contrôlé par les conditions de l'orifice.

De ce fait nous supposons dans ce qui suit que le débit de fuite est contrôlé par les conditions de l'orifice. Cependant, la pression P_E dans la conduite dépend de la pression dans le réseau, du débit de consommation du diamètre et de la rugosité de la conduite ainsi que son

élévation. La pression P_E qui peut être contrôlée varie généralement entre 140 Kpa et 700 Kpa. La pression extérieure P_S est imposée par les conditions environnantes de la conduite et dépend, entre autres, du type de sol au voisinage de la fuite et de sa conductivité hydraulique, ainsi que du chemin emprunté par le débit de fuite vers la surface du sol ou vers une conduite d'égout. En supposant que le débit de fuite s'échappe par une sortie libre dans un sol bien drainé, nous pouvons négliger P_S devant P_E si bien que l'équation (2.2) s'écrit :

$$V = \sqrt{\frac{2 P_E}{\rho}} \quad (2.11)$$

Ainsi, le débit de fuite se calcule par l'équation suivante :

$$Q'' = AV = A \sqrt{\frac{2 P_E}{\rho}} \quad (2.12)$$

Où A est l'aire de l'ouverture par où s'échappe l'eau. P_E est la pression moyenne dans le réseau au voisinage de la fuite.

Le coefficient C_c exprime la contraction de la section d'écoulement dans la fuite. Il est similaire au coefficient utilisé dans l'hydraulique des orifices. Le coefficient C_v a été introduit pour corriger l'hypothèse de fluide idéal et tenir compte des pertes de charge. En agrégeant ces deux coefficients dans un seul paramètre de débit, on obtient l'expression du coefficient de débit:

$$C_q = C_c C_v \quad (2.14)$$

Addison (1954) propose pour un orifice mince circulaire de diamètre $D \geq 6\text{cm}$ et une pression interne $P \geq 4.5 \text{ KPa}$, pour de l'eau aux températures ordinaires et à la pression atmosphérique $C_q = 0.597$. Cartier (1986) propose pour des orifices plus petits, pour de l'eau à d'autres températures et des pressions plus faibles, d'utiliser la formule :

$$C_q = 0.592 + \frac{4.5}{\sqrt{R_e}} \quad (2.13)$$

Où le nombre de Reynolds $R_e = \frac{VD}{\nu}$

Avec D : le diamètre équivalent de l'orifice, V : la vitesse moyenne de l'eau à la sortie Et ν la viscosité cinétique de l'eau pour sa température.

Étant donné que la pression résiduelle minimale exigée dans un réseau d'eau potable est de 140 KPa, et que le contrôle des débits de fuite n'est pertinent que pour des pressions encore bien supérieures, la valeur fixe du coefficient $C_q = 0.597$ peut être retenue.

Ce qui conduit à récrire l'équation (2.13) sous la forme :

$$Q'' = AV = C_q A \sqrt{\frac{2 P_E}{\rho}} \quad (2.14)$$

Si nous faisons l'hypothèse que le coefficient de débit C_q et l'aire de la fuite A varient avec la pression de zone P, l'équation (2.16) s'écrit :

$$Q'' = C_q(P) A(P) \sqrt{\frac{2 P_E}{\rho}} \quad (2.15)$$

Le contrôle du débit de fuite par la modulation de la pression consiste à réduire la pression de la valeur P_1 à P_2 . Le débit de fuite se voit alors modifié selon le rapport :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{C_q(P_1)}{C_q(P_2)} \frac{A(P_1)}{A(P_2)} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{0.5} \quad (2.18)$$

En supposant aussi que les rapports des coefficients des débits et des surfaces de fuites varient selon une loi de puissance des rapports de pression, nous trouvons :

$$\frac{C_q(P_1)}{C_q(P_2)} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{n_q} \quad (2.16)$$

Et $\frac{A(P_1)}{A(P_2)} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{n_a}$ (2.17)

Ainsi, l'équation (2.18) devient :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^N \quad (2.18)$$

Où $N = 0,5 + n_q + n_a$ (2.19)

L'équation (2.18) qui a été abondamment utilisée en pratique, renferme un paradoxe; la théorie des orifices fournit un coefficient N constant égal à 0.5, alors que plusieurs études expérimentales et des relevés de terrain révèlent des valeurs de N supérieures ou inférieures à 0.5. Le présent travail présente l'avantage d'expliciter de façon séparée l'influence de la variation du coefficient du débit et de l'aire des fuites avec la pression par l'introduction des coefficients n_a et n_q dans les équations (2.16), (2.17) et (2.18). Le paramètre n_q est relié à la forme et aux dimensions de l'orifice par où s'échappe l'eau. Le paramètre n_a qui est relié à la rigidité du matériau de la conduite exprime la variation de la section de l'orifice avec la pression. La valeur de ces deux paramètres sera établie dans la partie expérimentale.

La valeur de l'exposant N dans l'équation (2.18) a un effet direct sur la réduction de la fuite par la modulation de la pression. Plus grand est l'exposant N , plus le programme de contrôle des fuites sera rentable. Ce n'est donc pas surprenant que la valeur du paramètre N soit très controversée selon les sources et les solutions défendues. La figure 2.1 et le tableau 2.1 fournissent la correspondance entre la réduction de pression ΔP et la diminution du débit de fuite ΔQ pour différentes valeurs de N .

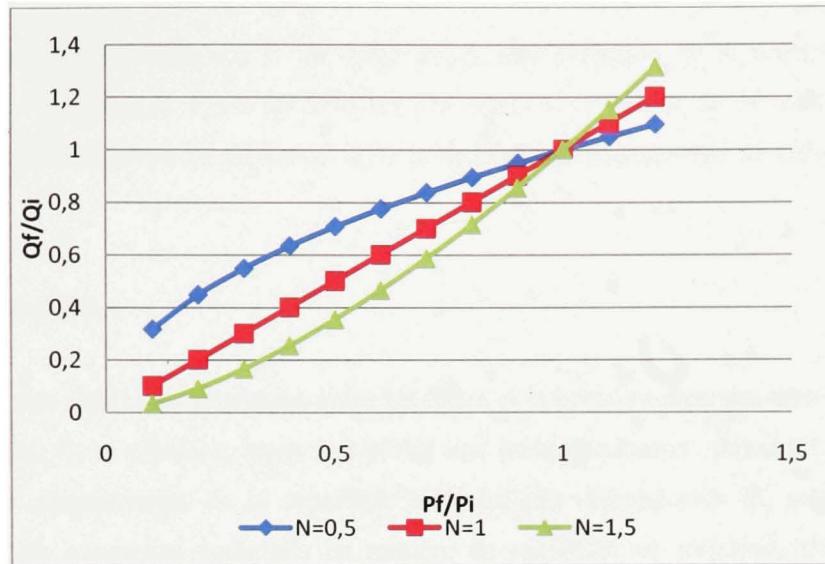


Figure 2.1 Le taux de réduction du débit de fuite en fonction du taux de réduction de la pression.

Quand $N=1$, une réduction de pression produit exactement la même réduction du débit de fuite. Quand N est supérieur à 1, en l'occurrence $N=1.5$, une réduction de pression produit une réduction supérieure du débit de fuite. Inversement, quand N est inférieur à 1, en l'occurrence $N=0.5$, une réduction de pression produit une réduction de débit de fuite inférieure.

Tableau 2.1 La réduction du débit de fuite en fonction de la réduction de la pression pour différentes valeurs de N.

$\Delta P\% \backslash N$	5%	10%	15%	20%	25%	30%	50%
0.5	3%	5%	8%	11%	13%	16%	29%
1	5%	10%	15%	20%	25%	30%	50%
1.5	7%	15%	22%	28%	35%	41%	65%
2	10%	19%	28%	36%	44%	51%	75%
2.5	12%	23%	33%	43%	51%	59%	82%

Ainsi si la valeur du coefficient N est égale à 0.5, une réduction de la pression de 10% produira une réduction du débit de fuite de 5%. Mais si la valeur de N était de 2.5, la réduction du débit de fuite aurait été de 23% pour le même pourcentage de réduction de la pression.

2.3 Conclusion

Il est maintenant établi que la relation entre les fuites et la pression n'est pas une fonction de la racine carrée de la pression, mais suit plutôt une loi de puissance. Ainsi les fuites sont soumises aux changements de la superficie ainsi qu'aux changements de pression. Cela signifie que les avantages potentiels en matière de réduction de pression, n'affecte pas seulement le volume des fuites mais aussi la superficie de celle-ci.

CHAPITRE 3

Étude expérimentale

3.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est de bien cerner les plages de variation des paramètres qui interviennent dans les équations (2.21) et (2.22). Les paramètres n_q et n_a seront calculés dans différentes conditions dans le but d'estimer la valeur du paramètre N .

L'étude expérimentale a été réalisée au laboratoire en réalisant un montage pour simuler des fuites dans un environnement contrôlé. La mesure simultanée de la pression et du débit de fuite nous a permis d'acquérir les séries temporelles qui sont à la base de la calibration des paramètres de la relation reliant le débit de fuite à la pression dans le réseau.

3.2 La similitude

Comme il est difficile et plus coûteux de calculer les paramètres N , n_a , et n_q in situ sur des réseaux réels de distribution appelés ici prototype, nous avons conçu une installation expérimentale en modèle réduit pour arriver à cette fin. Cette installation permet de calculer les paramètres recherchés dans un environnement contrôlé où toutes les variables pertinentes qui influencent le débit de fuite peuvent être modifiées à volonté. Ainsi, nous allons examiner la relation entre les variations de la pression et du débit de fuite en considérant la rigidité du matériau de la conduite, la géométrie et la taille des orifices, ainsi que les pressions initiale et finale dans le réseau. Toutefois, pour que le modèle réduit soit une réplique du prototype et que les conclusions tirées à partir des données expérimentales s'appliquent au cas réel il faut respecter certaines règles de similitude. Comme ces règles n'ont pas encore été établies pour les fuites, nous allons appliquer celles des écoulements par les orifices. Dans la théorie des modèles réduits des orifices, deux écoulements sont dynamiquement semblables si les nombres de Reynolds et de Froude du modèle réduit et du prototype sont identiques. Dans

certains écoulements où la turbulence est complètement développée comme lors du passage de l'eau à travers une fuite, le respect total de l'identité des nombres de Reynolds n'est pas vraiment nécessaire. C'est plutôt l'identité du nombre de Froude entre le modèle réduit et le prototype qui doit être observée. Considérons deux perforations de même forme géométrique mais de dimensions différentes, comme par exemple deux trous circulaires de diamètre D et d . La longueur caractéristique qui intervient dans la similitude géométrique est bien évidemment le diamètre du trou. Posons dans ce cas que le rapport entre les échelles de longueur est :

$$\lambda_L = \frac{D}{d} \quad (3.1)$$

Carlier (1986) a démontré les résultats suivants : Si le premier orifice (diamètre D) débite un débit Q avec une vitesse V , sous une pression P et le second (diamètre d) débite un débit q avec une vitesse v sous une pression p , les deux écoulements sont dits semblables si le rapport entre les échelles de pression est :

$$\lambda_p = \frac{P}{p} = \lambda_L \quad (3.2)$$

Nous pouvons facilement démontrer dans ce cas que le rapport entre les échelles de vitesse et de débit se calcule par les relations suivantes :

$$\lambda_v = \frac{V}{v} = \lambda_L^{1/2} \quad (3.3)$$

$$\lambda_Q = \frac{Q}{q} = \lambda_L^{5/2} \quad (3.2)$$

Remarquons que de la relation

$$\frac{V}{v} = \left(\frac{P}{p} \right)^{1/2} \quad (3.3)$$

On peut déduire

$$\frac{V}{\sqrt{gH}} = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (3.6)$$

Où

$$H = \frac{P}{\rho g} \text{ et } h = \frac{P}{\rho s} \quad (3.7)$$

Et comme

$$\frac{H}{h} = \frac{D}{d} \quad (3.8)$$

Nous pouvons également écrire :

$$\frac{V}{\sqrt{gD}} = \frac{v}{\sqrt{gd}} = F \text{ nombre de Froude} \quad (3.9)$$

Nous voyons donc que le respect de l'équation (3.9) permet d'assurer la similitude entre le modèle réduit et le prototype.

3.3 Matériels et méthodes

Les mesures ont été prises à partir d'un réseau conçu dans le laboratoire d'Hydraulique de l'ETS. Ce réseau, composé de conduites et de vannes, est un modèle réduit qui permet de simuler un réseau d'aqueduc municipal. Ainsi, il est construit sous forme de mailles qui peuvent être isolées à l'aide de vannes placées stratégiquement. De plus, le jeu de vanne permet une grande diversité de configuration d'écoulement. Plusieurs jonctions de conduites sont munies de petites vannes permettant la simulation de fuite ou de consommation. Notons aussi la présence d'une conduite d'écoulement de grand diamètre permettant de simuler un fort débit de consommation ou un débit d'incendie.

Pour faire fonctionner le réseau, il faut de toute évidence un système de pompage. Ce dernier est composé; de deux bassins d'eau, d'une pompe de recirculation, d'un interrupteur on/off pour démarrer la pompe et de divers dispositifs de renvois de l'eau vers les bassins.

En ce qui concerne les instruments de mesure utilisés, ce sont principalement; des capteurs de pression de précision et des débitmètres à turbine axiale, et un débitmètre magnétique :

- Les capteurs de pression sont mobiles et peuvent être déplacés à tout point du réseau. Ces derniers affichent la pression en kPa de façon numérique et en temps réel.
- Deux types de débitmètres : un débitmètre à turbine axiale, il affiche les débits en l/min, et un débitmètre de type magnétique qui affiche le débit en galon/min.

La figure ci-dessous montre le montage



Figure 3.1 Le montage du réseau dans le laboratoire de l'ETS.

Le diamètre des conduites constituant les cinq mailles varie entre 20 et 35 mm alors que les longueurs des tronçons de conduites varient entre 0.5 et 2.5 m. Les deux schémas, (figure A et figure B) de l'annexe 1, permettent de mieux visualiser l'installation du réseau.

Dans le but de bien simuler les fuites, nous avons pris plusieurs types de conduites (conduites flexible et rigide), avec deux types de fuites (longitudinale et circulaire). Pour se faire, nous avons fait un montage, qui nous a permis de changer aisément les conduites, et les dimensions des fuites. Nous avons percé des trous circulaires (1.6, 2, 2.4, 2.8 mm) et longitudinaux (2, 4, 5 mm²), dans des bouts de conduites qui sont facilement connectées à notre réseau et qui sont emboîtées dans une autre conduite qui est à son tour munie d'un orifice pour permettre la mesure des débits de fuites. Le montage est montré dans la figure 3.2 ci-dessous :

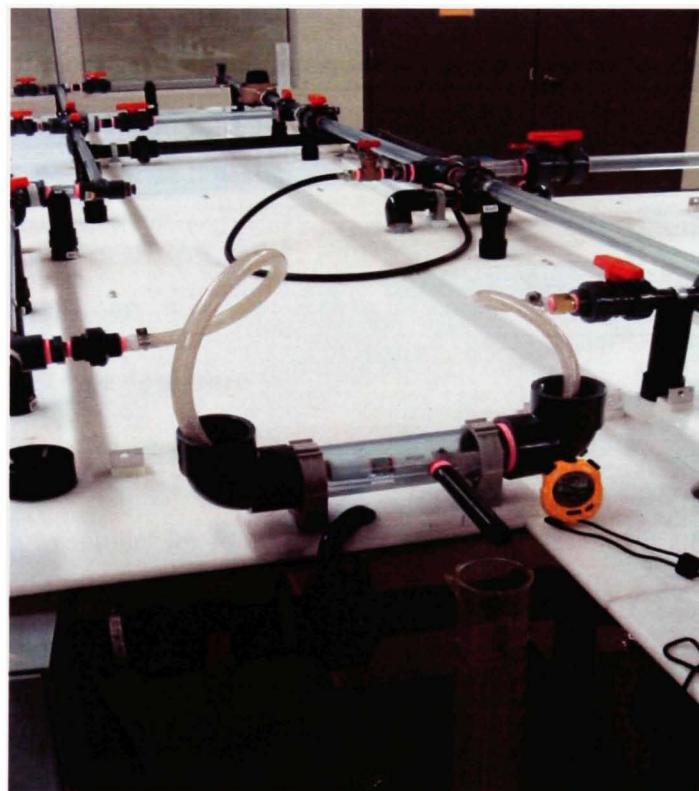


Figure 3.2 Le montage pour simuler les fuites.

Ce montage nous a permis d'avoir un intervalle de pression de 90 à 380 kPa.

3.4 Les mesures

Pour commencer, nous avons pris des mesures de P et Q, pour une fuite quelconque. Ensuite, nous avons caractérisé les fuites par leurs types et leurs dimensions. Après cela, nous nous sommes intéressés à l'impact du type de matériau sur les fuites, de la pression initiale et du taux de réduction de la pression sur le calcul de N.

3.4.1 Première étape de mesure

En faisant marcher la pompe, l'eau se diffuse dans le réseau. Pour réguler le débit de consommation et pour réduire la pression, nous manœuvrons sur la vanne guillotine qui est sur une conduite munie d'un débitmètre et un capteur de pression. Ces derniers nous permettent de lire directement la pression et le débit de consommation en temps réel. À l'aide de la valve d'intersection, nous avons pu simuler les fuites. Ainsi, grâce au débitmètre, nous avons pris les mesures (débit de fuites) directement pour chaque pression prise. Après avoir fait l'expérience, nous avons obtenu pour chaque pression; un débit de consommation et un débit de fuite que nous avons regroupés dans une série de 60 couples de (P_i, Q_i) et (P_j, Q_j) .

3.4.2 Deuxième étape de mesure

En restant sur le même montage que les premières mesures. Nous avons rajouté le montage décrit plus haut (pour simuler les fuites). Des conduites de différents matériaux (plastique, PVC et acier), avec des tailles d'orifice allant de 1,6 mm (3/65 po) à 2,8 mm (7/65 po), ont été préparées pour bien mener les essais.

Au cours des expériences, les pressions ont été mesurées avec un manomètre étalonné. Les débits ont été mesurés en recueillant l'eau qui coulait dans le trop-plein dans une éprouvette graduée pour une période de temps mesurée (figure 3.3). Le débit de la fuite a été mesuré

pour des pressions de 380 kPa, à 90 kPa pour chaque orifice. Avec un pas de réduction de 10 à 20 kPa.



Figure 3.3 La mesure de débit de fuite.

Il faut rappeler le résultat important obtenu lors de l'établissement des règles de similitude; les pressions et les dimensions des fuites dans le prototype et le modèle réduit doivent être dans le même rapport. Comme la pression maximale qu'on observe normalement dans un réseau d'aqueduc est de l'ordre de $P = 760$ Kpa alors que la pression maximale disponible dans le modèle réduit est $p=380$ Kpa, le rapport de similitude dynamique est donc $\lambda_p = 2$. Comme le rapport de similitude géométrique λ_L est identique au rapport de similitude dynamique, les dimensions des fuites dans le modèle réduit doivent être multipliées par deux (2) pour obtenir celles du prototype.

3.5 Calcul de N

Comme montré dans le chapitre 2, la relation qui lie la pression et le débit de fuite est la suivante :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^N \quad (3.10)$$

Afin de calculer l'exposant N, qui est la seule inconnue dans l'équation 3.10, nous devons procéder à une transformation logarithmique comme suit :

$$\ln(Q_1/Q_0) = N \ln(P_1/P_2) \quad (3.4)$$

Puis écrire :

$$N = \ln(Q_1/Q_0) / \ln(P_1/P_2) \quad (3.12)$$

Donc avec deux couples de mesure (Q_0, P_0) et (Q_1, P_1) , nous sommes, en théorie, en mesure d'estimer l'exposant N. En réalité les choses ne sont pas aussi simples. D'une part, les relevés de la pression P et du débit Q comportent toujours une erreur de mesure. D'autre part, la relation (3.10) qui relie la variation de la pression à la variation du débit n'est pas parfaite. Elle comporte plusieurs incertitudes reliées au régime d'écoulement et au type et à la forme de l'orifice. C'est la raison pour laquelle la relation (3.11) sera réécrite sous la forme suivante :

$$\ln(Q_i/Q_j) = N \ln(P_i/P_j) + \varepsilon_{10} \quad (3.13)$$

Où ε_{10} représente la somme des erreurs de mesure et de modélisation.

Pour obtenir la valeur la plus représentative de l'exposant N, nous devons prendre plusieurs mesures couvrant toute la gamme de variation du débit et de la pression puis former le système d'équations suivant :

$$\ln(Q_i/Q_j) = N \ln(P_i/P_j) + \varepsilon_{ij} \quad i=1 \dots, K \text{ et } j=1 \dots, K \quad (3.14)$$

La meilleure estimation de N s'obtient alors en minimisant la somme des carrés des erreurs suivantes :

$$\sum \sum \varepsilon_{ij}^2$$

Cependant, nous pouvons écrire l'équation (3.13) sous la forme suivante :

$$Y = a_0 + a_1 X \quad (3.15)$$

$$\text{Où : } Y = \ln(Q_i/Q_j), \quad X = \ln(P_i/P_j), \quad a_0 = \varepsilon_{ij} \text{ et } a_1 = N.$$

Nous constatons que c'est l'équation d'une droite, il suffit de considérer deux points quelconques (X_1, Y_1) et (X_2, Y_2) qui se trouvent sur la droite, pour calculer les constantes a_0 et a_1 .

Puisque dans notre cas, nous procémons avec une série de mesure de couples de (P_i, Q_i) et (P_j, Q_j) , il est impossible de faire le calcul en prenant les données couple par couple, c'est pour cela que nous avons procédé avec la méthode de régression, et nous avons pu tirer facilement et très rapidement le N à l'aide de la formule du coefficient de régression :

$$a_1 = \frac{\text{cov}(X, Y)}{S^2(X)} \quad (3.16)$$

Avec : $\text{cov}(X, Y)$ est la covariance, et $S^2(X)$ est la variance.

D'où :

$$N = a_1 = \frac{\sum_1^n (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{\sum_1^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3.17)$$

3.6 Résultats et discussion

Pour commencer, nous avons pris une fuite quelconque dans une conduite rigide. Alors, tel qu'indiqué dans la première étape de mesure, nous avons recueilli 60 couples de pression et de débit. Ainsi, à l'aide de la méthode de régression, et en insérant ces valeurs mesurées en laboratoire dans la formule (3.17), nous avons trouvé une valeur de N qui est égal à 0.5213.

Nous voyons bien que la valeur obtenue n'est pas loin de 0.5 trouvée dans la littérature. Cependant, pour mieux comprendre l'impact de la pression sur les fuites, et les débits de fuites, il a fallu spécifier les dimensions des fuites ainsi que les matériaux des conduites.

Comme décrit dans le chapitre deux, la variation du débit de fuite avec la pression dépend non seulement de la forme et les dimensions de l'orifice, mais aussi du matériau de la conduite. Tel qu'indiqué dans la deuxième étape de mesure, nous avons fait varier ces paramètres (forme et dimension de la fuite et le matériau de la conduite) dans notre plan d'expérience. Pour mieux présenter les résultats, nous allons les partager en quatre parties :

- 1- Conduite en acier – orifice circulaire;
- 2- Conduite en PVC – orifice circulaire;
- 3- Conduite très flexible – orifice circulaire;
- 4- Conduite très flexible – orifice longitudinal.

3.6.1 Conduite en acier – orifice circulaire

Des essais ont été réalisés selon des orifices de tailles différentes pour un large éventail de pressions. Des orifices circulaires de diamètres 1.6, 2, 2.4 mm, ont été testés pour des conduites en acier. Selon le rapport de similitude pour les modèles réduits, ces diamètres correspondent aux trous réels, c.-à-d. dans un vrai réseau, de 3.2, 4 et 5.6 mm respectivement. Pour chacun de ces diamètres, 30 couples de pression et de débit de fuite ont été mesurés et la valeur de N a été calculée par la méthode des moindres carrés.

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus :

Tableau 3.1 Les valeurs de N pour différents diamètres d'orifice
- conduite en acier.

Diamètre de la fuite (mm)	N
1,6	0,51914091
2	0,51290284
2,4	0,50832924

Ainsi, le graphe suivant montre la variation du paramètre N avec le diamètre de l'orifice :

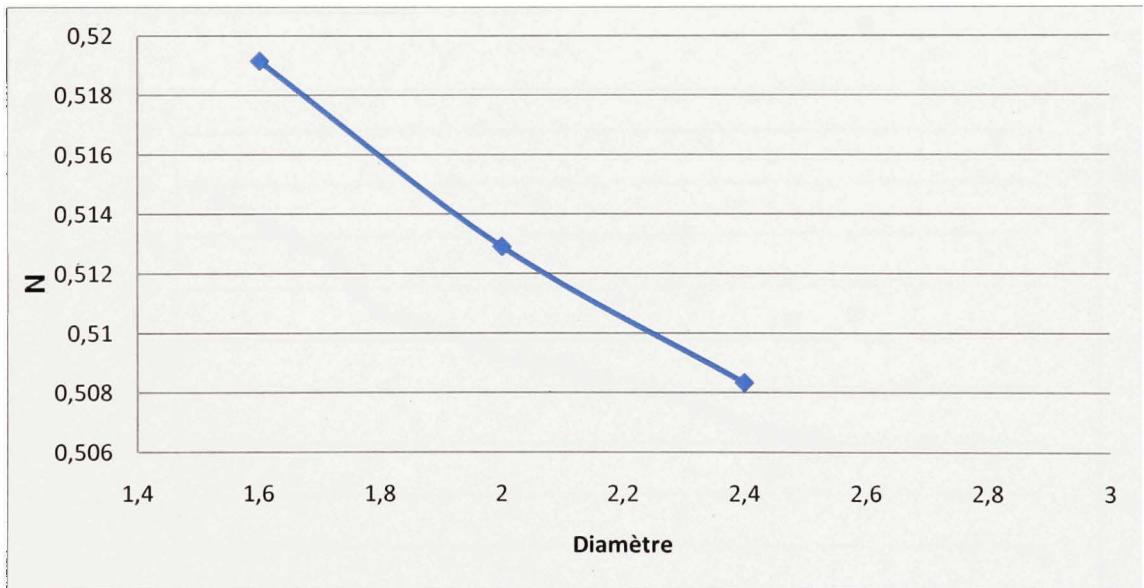


Figure 3.4 La variation de N en fonction du diamètre de l'orifice
- conduite en acier.

Nous remarquons que les valeurs de N se situent entre 0.508 et 0.519, qui sont légèrement supérieures à la valeur standard de 0.5 obtenue dans d'autres expériences rapportées dans la littérature. Nous constatons par ailleurs que la valeur de N décroît légèrement avec le diamètre de l'orifice pour atteindre la valeur standard N=0.5.

Cette légère baisse du paramètre N signifie que pour une réduction de pression fixée, le gain potentiel en réduction de débit de fuite est décroissant avec le diamètre de l'orifice. Quoique la variation du paramètre N avec le diamètre de l'orifice soit relativement faible, ces résultats confirment le principe établi de l'efficacité de la modulation de la pression pour contrôler les petites fuites.

Les valeurs du paramètre N que nous avons présentées précédemment sont des valeurs globales moyennes pour toute la gamme des pressions explorées. En réalité, pour une fuite donnée, la valeur de N varie avec la pression initiale dans le réseau et avec le pourcentage de réduction de cette pression. La courbe présentée dans la figure 3.5 représente la variation du paramètre N avec le pourcentage de réduction de la pression initiale de 380 Kpa pour une fuite circulaire de diamètre 2 mm.

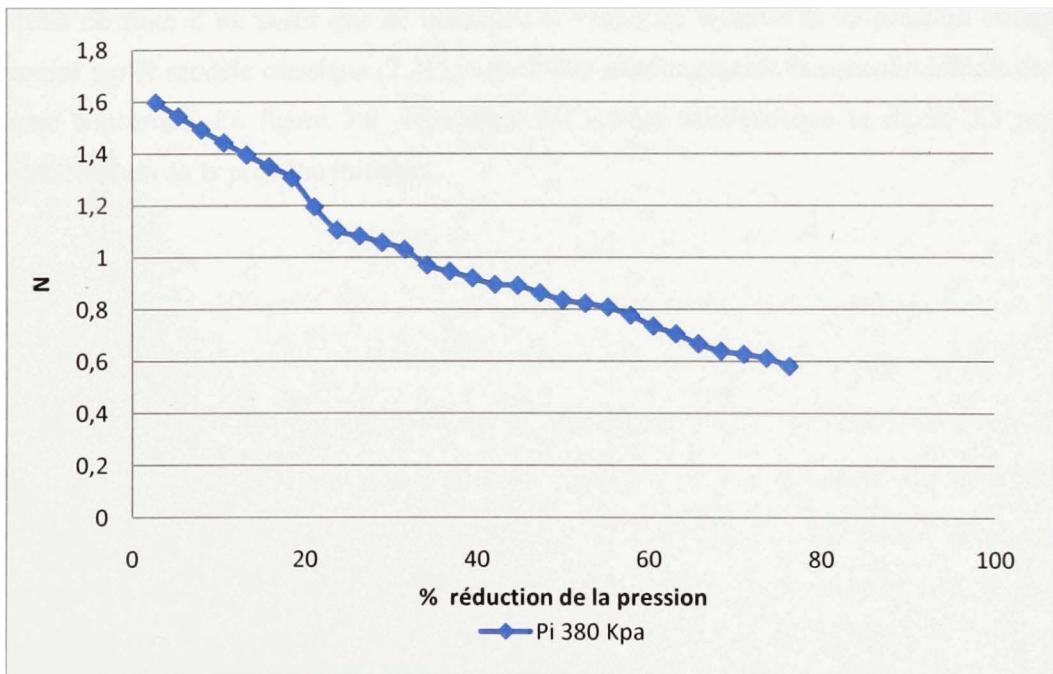


Figure 3.5 La variation de N en fonction de la réduction de la pression – conduite en acier.

Cette courbe montre clairement que le paramètre N est décroissant avec le pourcentage de réduction de la pression dans le réseau. Ceci signifie que le gain en réduction du débit de fuite diminue au fur et à mesure que nous appliquons les échelons successifs de réduction de la pression. À titre d'exemple pour la première tranche de réduction de la pression, la valeur de N est 1.6 comparativement à 0.58 pour la dernière tranche de réduction de la pression. En pratique, ceci implique que ramener la pression de 380 kpa à 360 kpa réduit le débit de fuite de 10 % comparativement à 5 % quand la pression est ramenée de 160 kpa à 140 kpa. Et pourtant, il s'agit de la même réduction absolue de la pression de 20 kpa. Ce résultat intéressant est encore plus éloquent si l'on raisonne en termes de variation relative de la pression qui intervient dans le calcul de la réduction du débit de fuite. La réduction relative de la pression de 5.2%, quand la pression est ramenée de 380 à 360 Kpa, produit une réduction du débit de fuite de 10% comparativement à 5% quand la pression est réduite de 12.5 % en l'abaissant de 160 à 140 kpa. Ce résultat démontre que pour prédire la réduction du débit de fuite il ne suffit pas de connaître la réduction relative de la pression comme préconisé par le modèle classique (2.21), mais il faut aussi connaître la pression initiale dans la zone concernée. La figure 3.6 représente les mêmes résultats que la figure 3.5 pour d'autres valeurs de la pression initiale.

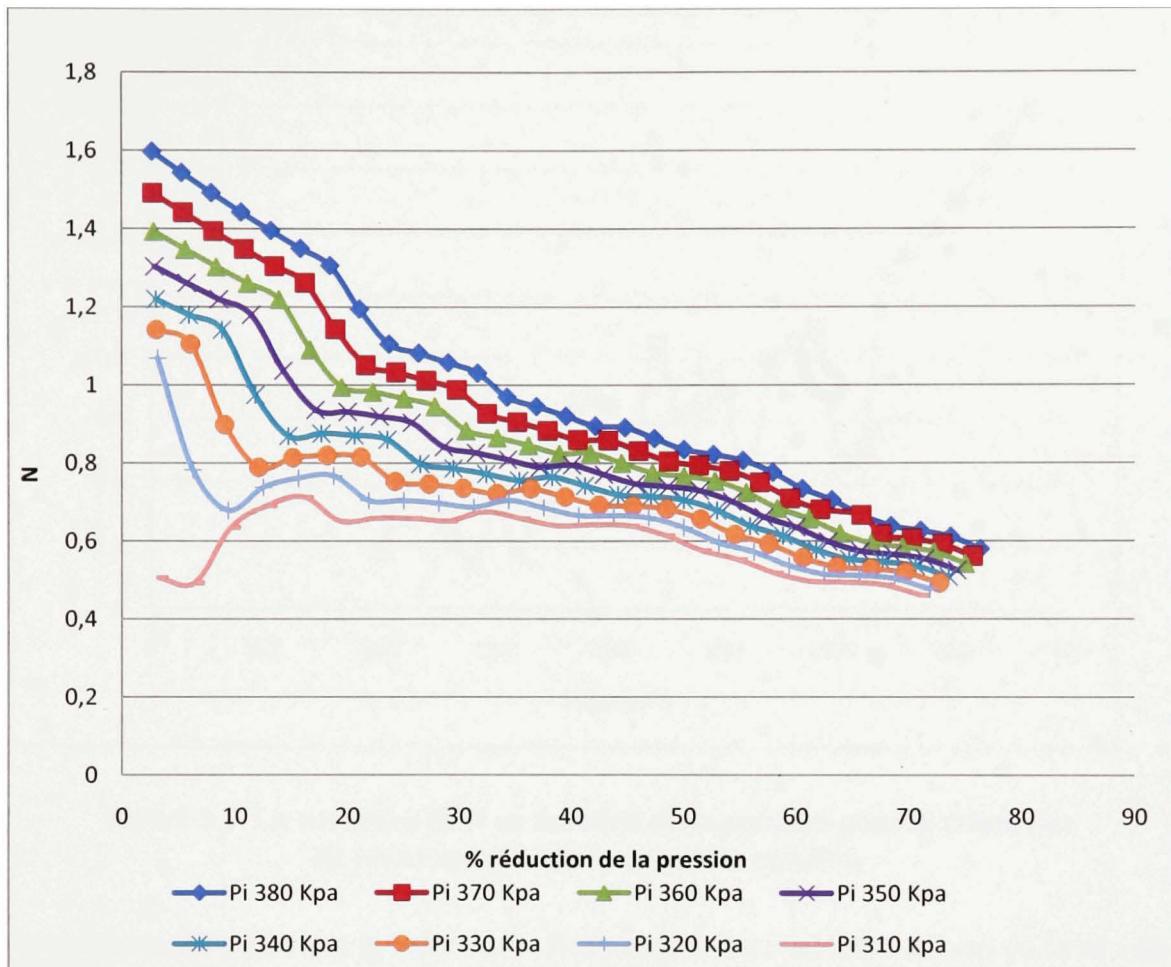


Figure 3.6 La variation de N en fonction de taux de réduction de fuite pour différentes pressions initiales – conduite en acier.

Cette figure 3.6 montre que le paramètre N est décroissant avec la pression initiale et avec le pourcentage de réduction de la pression. Autrement dit, plus la pression initiale est élevée, plus grande sera la valeur de N. Nous concluons donc que pour une réduction donnée de la pression, la réduction du débit de fuite sera d'autant plus importante quand la pression initiale dans le réseau est élevée. Le graphe suivant, montre la variation de N en fonction de la pression pour le même pas de réduction (10 kPa).

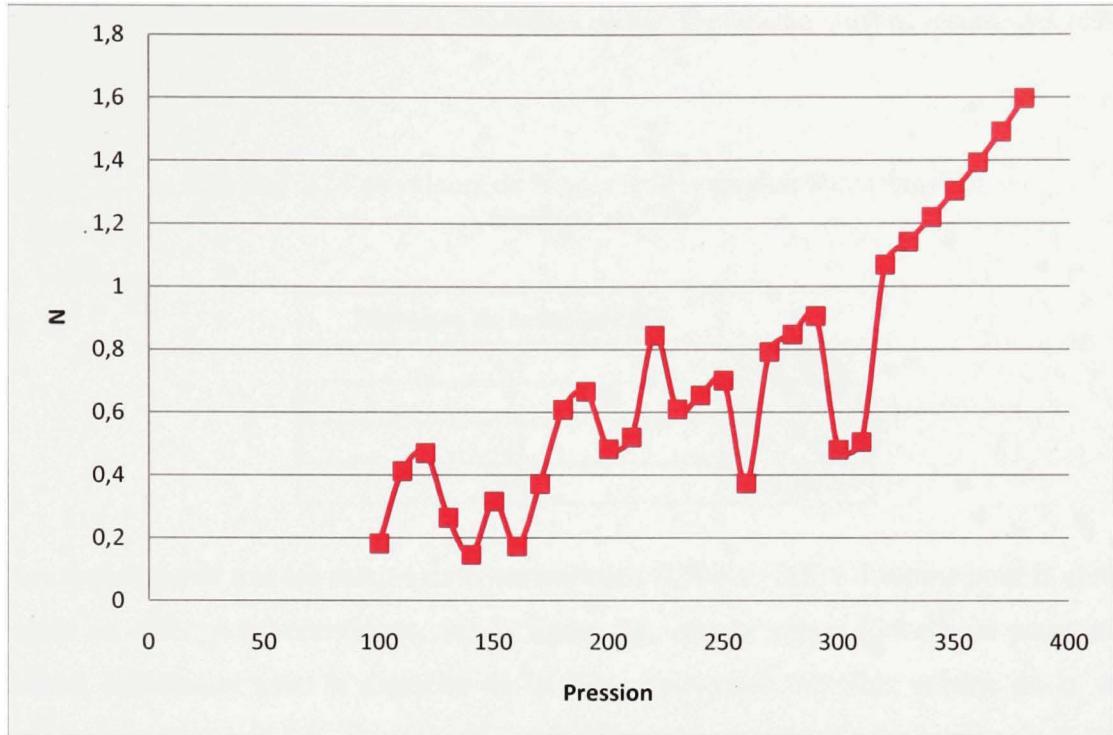


Figure 3.7 La variation de N en fonction de la pression pour le même pas de réduction (10 kPa) – conduite en acier.

Ce graphe montre bien que la valeur de N fluctue entre deux valeurs extrêmes (0.18 et 1.6). Ceci explique les valeurs élevées de N trouvées dans la courbe présentée dans la figure 3.6 qui représente la variation du paramètre N avec le pourcentage de réduction de la pression pour différentes pressions initiales. Alors que nous avons trouvé une valeur unique, qui est de 0,51 (pour un diamètre de 2 mm), par la méthode des moindres carrés.

3.6.2 Conduite en PVC – orifice circulaire

De la même manière, plusieurs essais ont été faits sur des orifices de tailles différentes pour une conduite en PVC. Cette fois, des orifices circulaires de diamètres 1.6, 2, 2.4 et 2.8 mm, ont été testés. Toujours avec le même rapport de similitude pour les modèles réduits, 16 couples de pression et de débit de fuite ont été mesurés pour chaque diamètre et la valeur de

N a été calculée par la méthode des moindres carrés. Le tableau suivant résume les résultats trouvés :

Tableau 3.2 Les valeurs de N pour différents diamètres d'orifice
- conduite en PVC.

Diamètre de la fuite (mm)	N
1,6	0,5248625
2	0,51725638
2,4	0,51170266
2,8	0,50760169

Nous remarquons que les valeurs de N varient entre 0.504 et 0.524. Comme pour la conduite rigide en acier, nous constatons, sur la figure 3.8, que la valeur globale du paramètre N décroît légèrement avec le diamètre de la fuite, mais reste toutefois voisine de la valeur standard théorique de 0.5. Par ailleurs, conformément à nos attentes les valeurs de N pour la conduite flexible en PVC sont légèrement supérieures à celles obtenues pour la conduite rigide en acier, tel qu'illustré sur la figure ci-dessous :

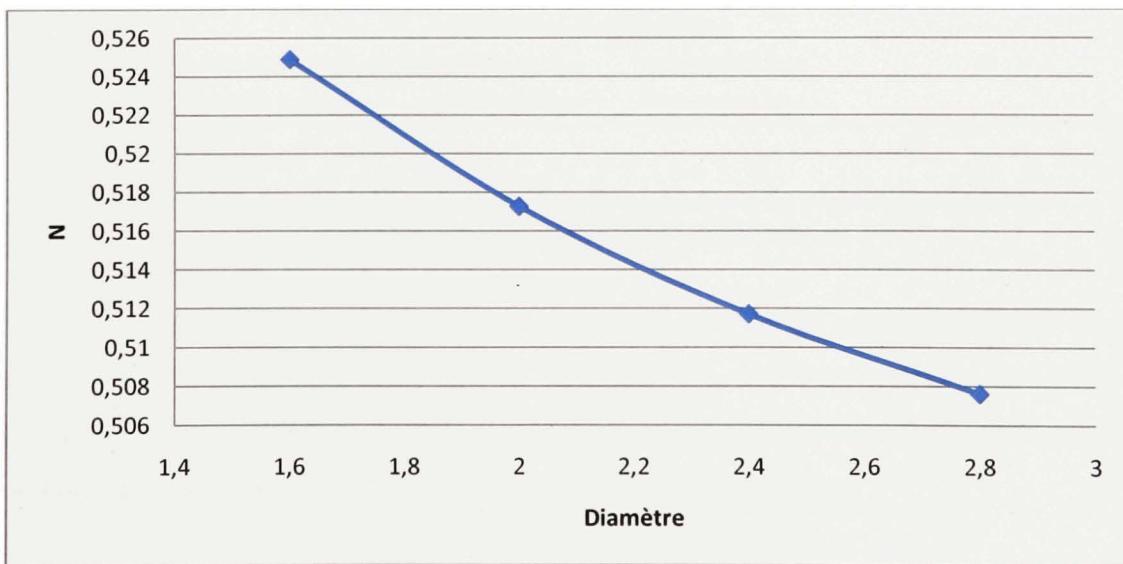


Figure 3.8 La variation de la valeur de N en fonction du diamètre de l'orifice
- conduite en PVC.

Les valeurs du paramètre N que nous avons présentées dans la figure 3.8 sont des valeurs globales moyennes pour toute la gamme des pressions explorées. La figure 3.9 représente la variation du paramètre N en fonction du pourcentage de réduction de la pression pour différentes valeurs de la pression initiale dans le réseau. Même si les résultats sont légèrement différents de ceux obtenus pour la conduite en acier, les conclusions à tirer sont identiques.

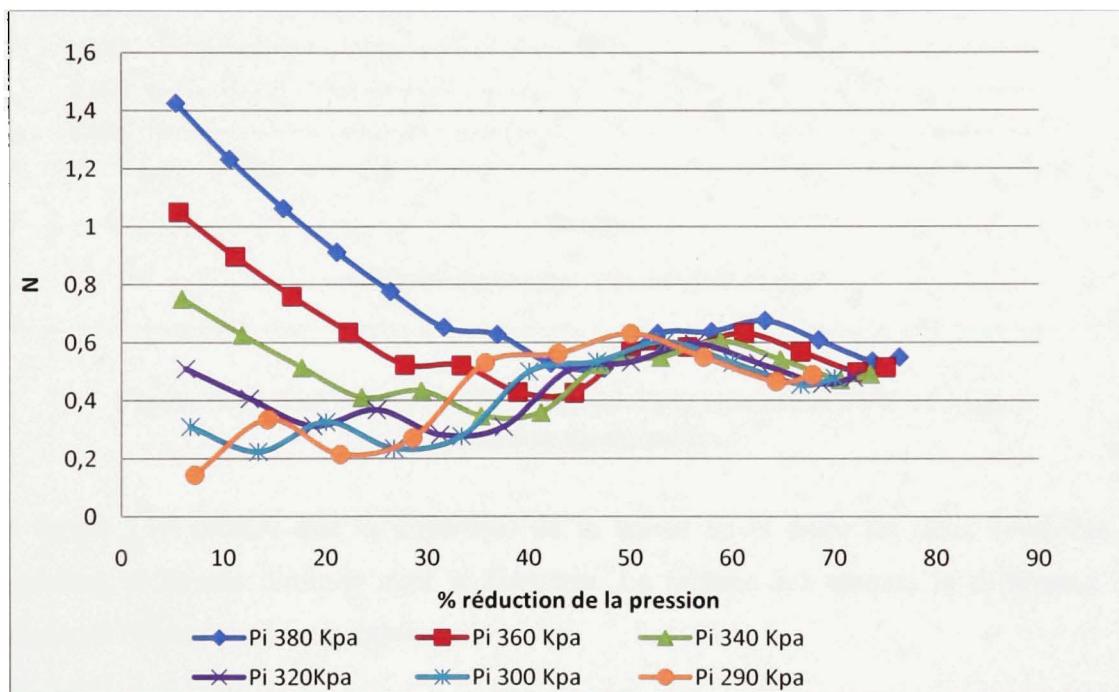


Figure 3.9 La variation de N en fonction du taux de réduction de fuite pour différentes pressions initiales – conduite en PVC.

Cette étude nous a permis de confirmer nos conclusions et de rajouter un autre facteur influençant la valeur de N, c'est le type du matériau. Nous avons constaté que les valeurs de N trouvées pour une conduite en PVC sont légèrement supérieures aux valeurs de N pour une conduite en acier en prenant le même diamètre de l'orifice.

De ce fait, il serait judicieux d'analyser et d'expliquer plus concrètement cette différence. La figure 3.10 illustre cette différence :

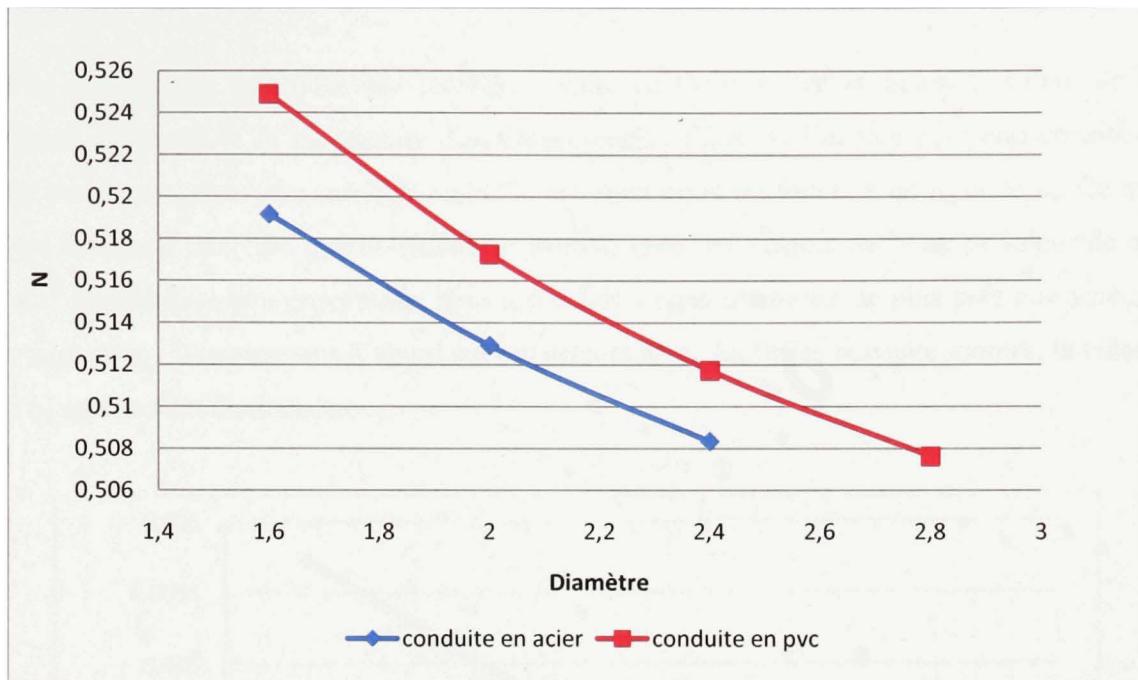


Figure 3.10 Les valeurs de N (pour les deux conduites PVC et Acier) en fonction du diamètre.

La figure 3.10 montre que la différence de la valeur de N entre les deux conduites de matériaux différents diminue avec le diamètre. Le tableau 3-3 résume la différence des valeurs de N pour les deux conduites :

Tableau 3.3 L'écart des valeurs de N entre les deux conduites (acier et PVC).

Diamètre de la fuite (mm)	ΔN	$\% \Delta N$
1,6	0,0057216	0,90130446
2	0,00435354	0,83841804
2,4	0,00337342	0,65925456

Nous pouvons expliquer cette différence en nous référant aux développements théoriques fait dans le chapitre 2, où le paramètre N a été exprimé sous la forme suivante :

$$N = 0,5 + n_q + n_a$$

Nous considérons que pour une conduite rigide, en l'occurrence en acier, la valeur de N dépend uniquement de n_q , puisque le changement de l'aire de l'orifice peut être considéré nul. Par contre, dans une conduite en PVC, la valeur de N est fonction de n_q et de n_a . Ce qui nous ramène à conclure que la différence trouvée entre les valeurs de N est la valeur de n_a . Cette constatation très importante, nous a conduit à nous intéresser de plus près aux valeurs de n_a et de n_q . Commençons d'abord par les valeurs de n_a . La figure suivante montre, la valeur de n_a en fonction du diamètre :

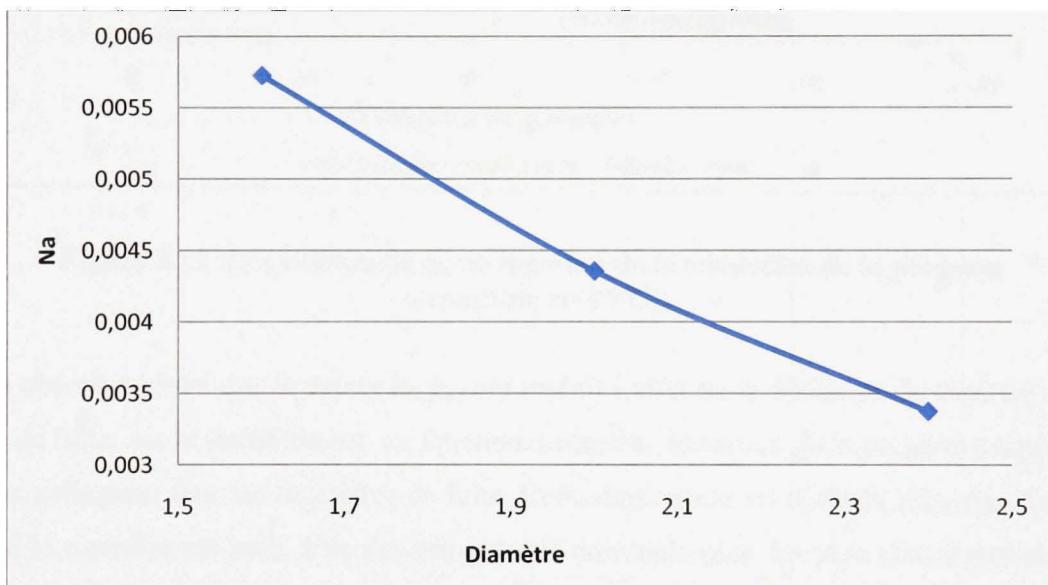


Figure 3.11 La valeur de n_a en fonction du diamètre – conduite en PVC.

À l'instar du paramètre N , nous constatons que la valeur du paramètre n_a diminue avec le diamètre de la fuite. Cela peut être expliqué par le fait que la valeur de n_a est plus sensible à la réduction de pression quand le diamètre de l'orifice est petit. Au fur et à mesure que la pression dans le réseau baisse, l'effet de dilatation de l'orifice de la fuite diminue. Le paramètre n_a présenté dans la figure 3.11 représente la valeur moyenne pour toute la gamme des pressions explorées. La figure 3.12 représente la variation du paramètre n_a avec le pourcentage de réduction de la pression pour différents diamètres de la fuite.

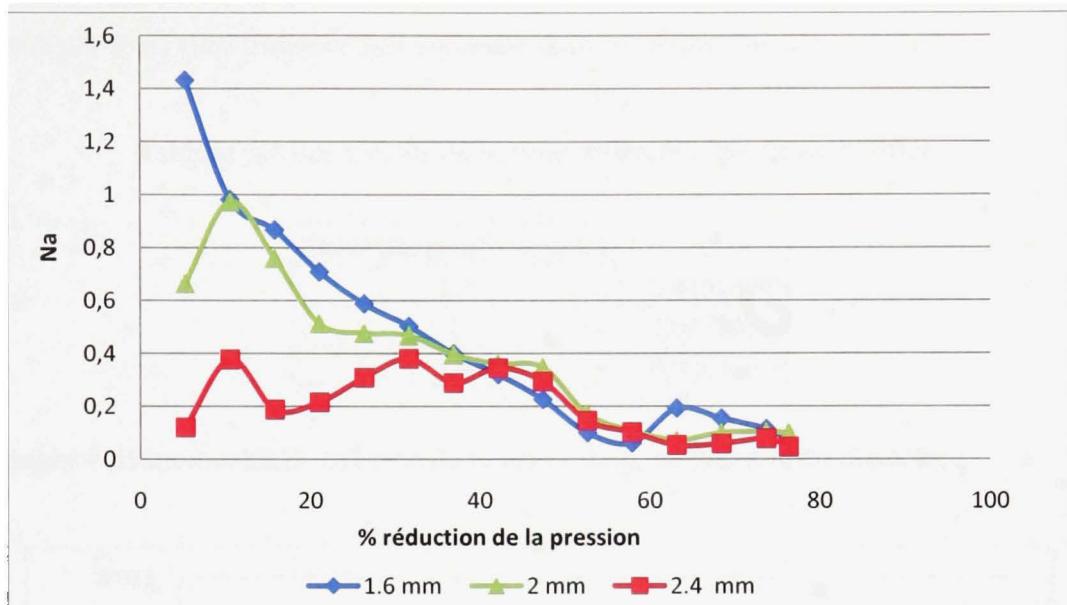


Figure 3.12 Les valeurs de n_a en fonction de la réduction de la pression – conduite en PVC.

Nous observons bien que la valeur de n_a , qui traduit l'effet de la dilatation de l'orifice sur le débit de fuite, varie sensiblement en fonction du taux de réduction de la pression jusqu'à une valeur nulle pour tous les diamètres de fuite. Cette diminution est d'autant plus significative quand le diamètre est petit. Elle devient presque constante pour les plus gros diamètres. La valeur la plus élevée du paramètre $n_a=1.42$ est observée pour la plus petite fuite de diamètre 1.6 mm quand la pression initiale est maximale (380 Kpa). Au fur et à mesure que la pression diminue la valeur de n_a décroît sensiblement de façon monotone vers zéro.

Nous passons maintenant à la recherche des valeurs de n_q . Nous avons deux façons pour trouver ces valeurs; soit à partir de la valeur de N de la conduite en acier, où on a :

$$N = 0.5 + n_q \Rightarrow n_q = N - 0.5.$$

Ou à partir de la valeur de N de la conduite en PVC;

$$N = 0.5 + n_q + n_a \Rightarrow n_q = N - 0.5 - n_a. \text{ (La valeur de } n_a \text{ est déjà calculée).}$$

Les valeurs de n_q ainsi trouvées sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 3.4 Les valeurs de n_q pour différents diamètres d'orifice.

Diamètre de la fuite (mm)	n_q
1,6	0,01914091
2	0,01290284
2,4	0,00832924

Le graphe suivant montre la variation de la valeur de n_q en fonction du diamètre :

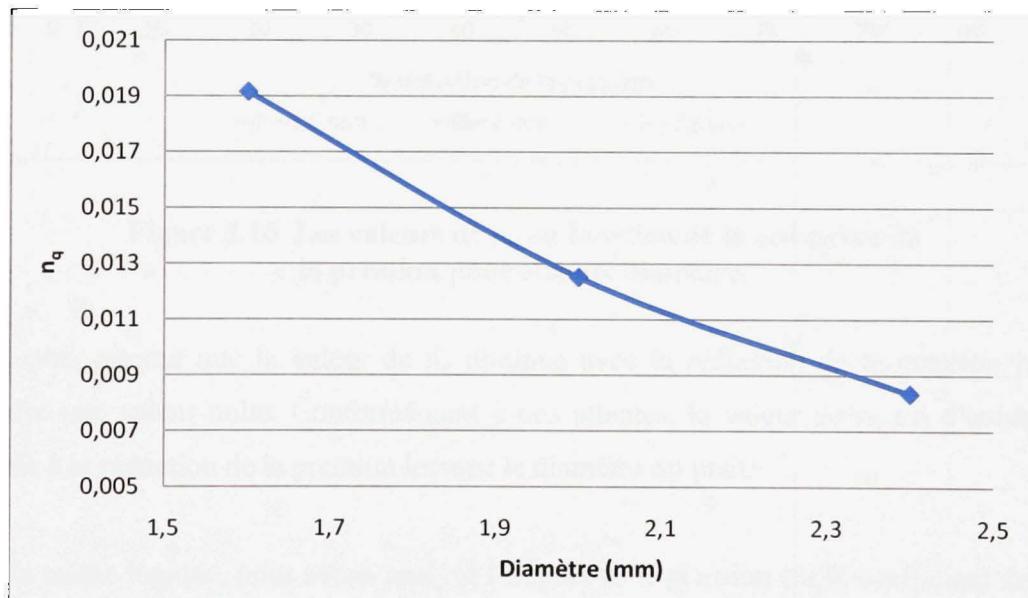


Figure 3.13 La valeur de n_q en fonction du diamètre.

Nous constatons également que la valeur de n_q , diminue aussi avec le diamètre de l'orifice. Mais contrairement à la valeur de n_a , la valeur de n_q ne dépend pas du type du matériau de la conduite.

Pour voir la variation de n_q en fonction de la réduction de la pression, nous présentons le graphe suivant :

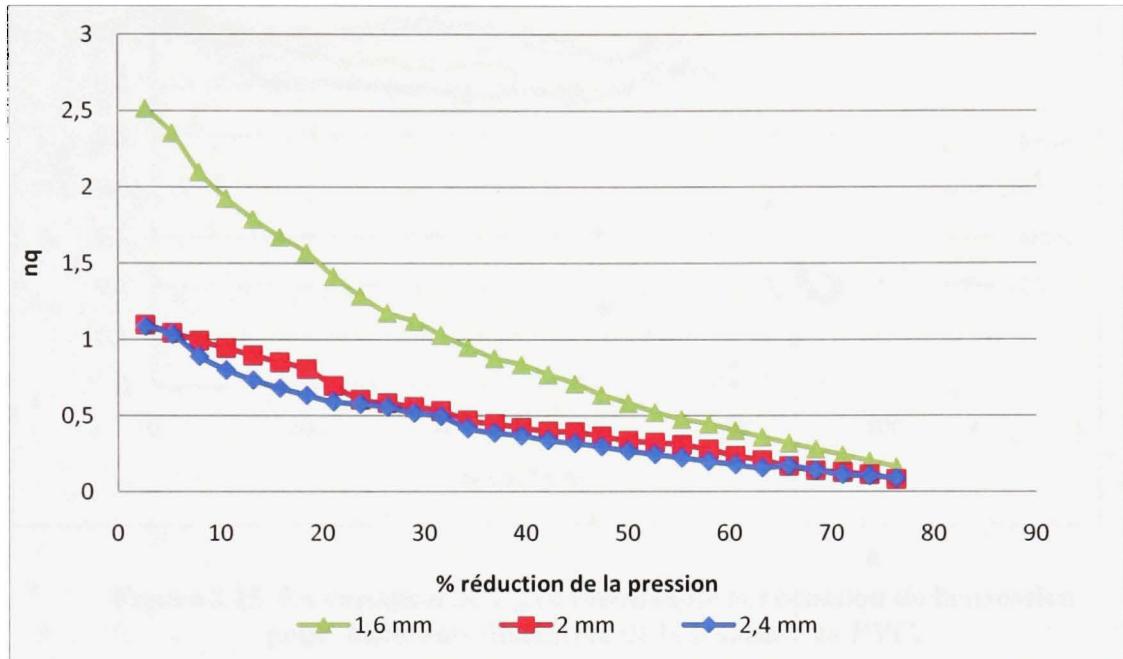


Figure 3.14 Les valeurs de n_q en fonction de la réduction de la pression pour chaque diamètre.

Ce graphe, montre que la valeur de n_q diminue avec la réduction de la pression jusqu'à atteindre une valeur nulle. Conformément à nos attentes, la valeur de n_q est d'autant plus sensible à la réduction de la pression lorsque le diamètre est petit.

Dans la même logique, nous avons analysé l'impact de la pression sur le coefficient de débit. Le graphe suivant montre la variation de C_q en fonction de la réduction de la pression pour différents diamètres de la conduite en PVC.

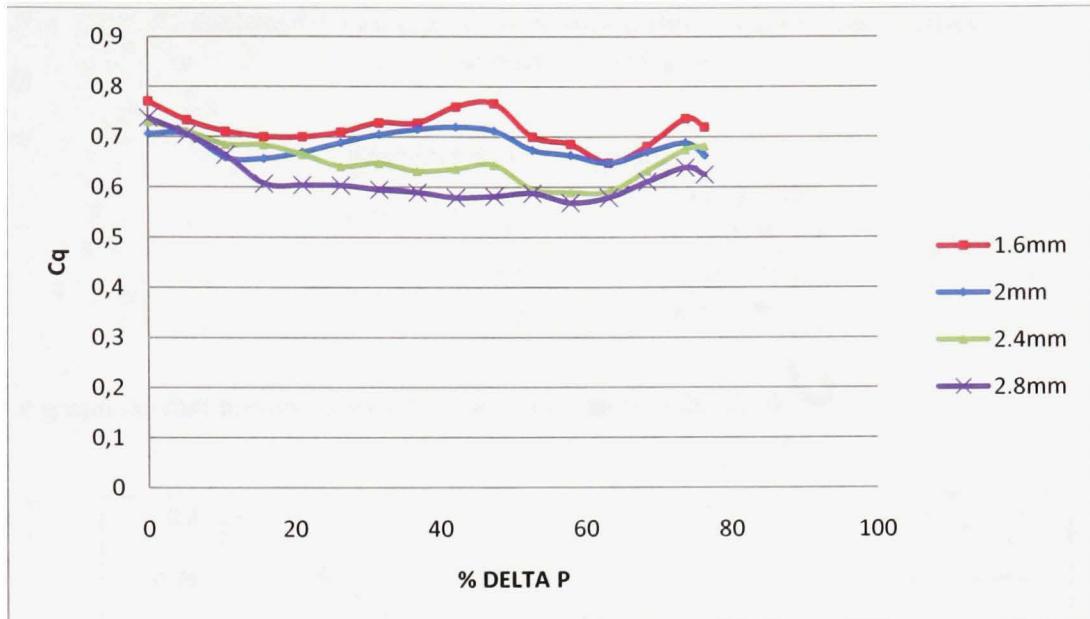


Figure 3.15 La variation de C_q en fonction de la réduction de la pression pour différents diamètres de la conduite en PVC.

Ce graphe montre que la valeur du coefficient de débit se situe entre 0.57 et 0.77. Cette valeur diminue avec la pression et avec le diamètre. Cela veut dire que plus le trou de la fuite est grand et plus nous réduisons la pression plus le coefficient de débit est petit. Cette constatation approuve notre hypothèse que le coefficient de débit varie avec la pression selon une loi de puissance (le coefficient n_q).

3.6.3 Conduite très flexible – orifice circulaire

Dans la même optique, plusieurs essais ont été faits selon des orifices de tailles différentes pour une conduite en plastique très flexible. Des orifices circulaires de diamètres 1.6, 2, 2.4 et 2.8 mm, ont été testés. Toujours avec le même rapport de similitude pour les modèles réduits, 16 couples de pression et de débit de fuite ont été mesurés pour chaque diamètre et la valeur de N a été calculée par la méthode des moindres carrés. Le tableau suivant résume les résultats trouvés :

Tableau 3.5 Les valeurs de N pour différents diamètres d'orifice
- conduite très flexible.

Diamètre de la fuite (mm)	N
1,6	0,75356925
2	0,65038747
2,4	0,59023163
2,8	0,56515691

Le graph suivant montre la variation de N en fonction du diamètre :

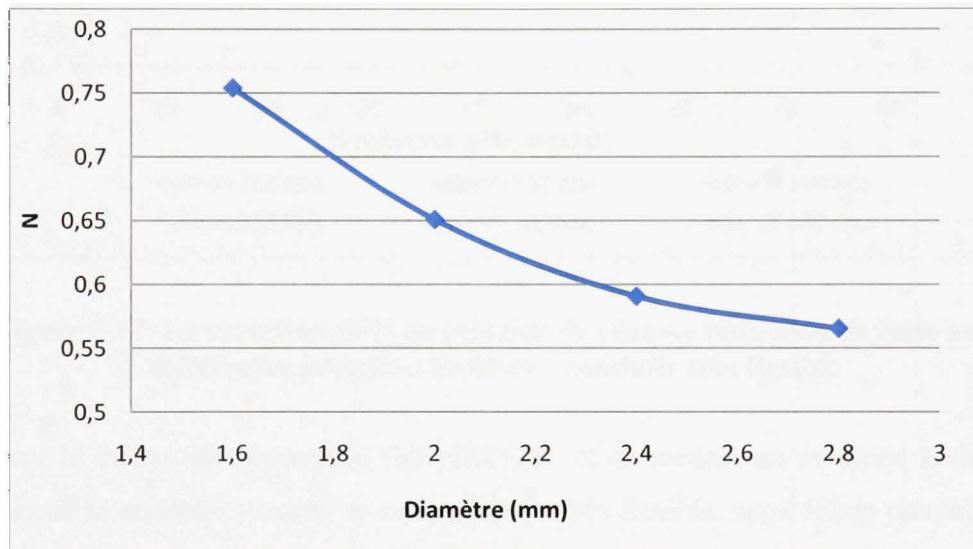


Figure 3.16 La variation de la valeur de N en fonction du diamètre de l'orifice - conduite très flexible.

Nous remarquons que les valeurs de N décroissent avec le diamètre de l'orifice et varient entre 0.565 et 0.753, qui sont supérieures à la valeur standard $N = 0.5$. La figure 3.17 valide les résultats et les constatations établis. La valeur du paramètre N varie avec le taux de réduction de la pression ainsi que la pression initiale du réseau.

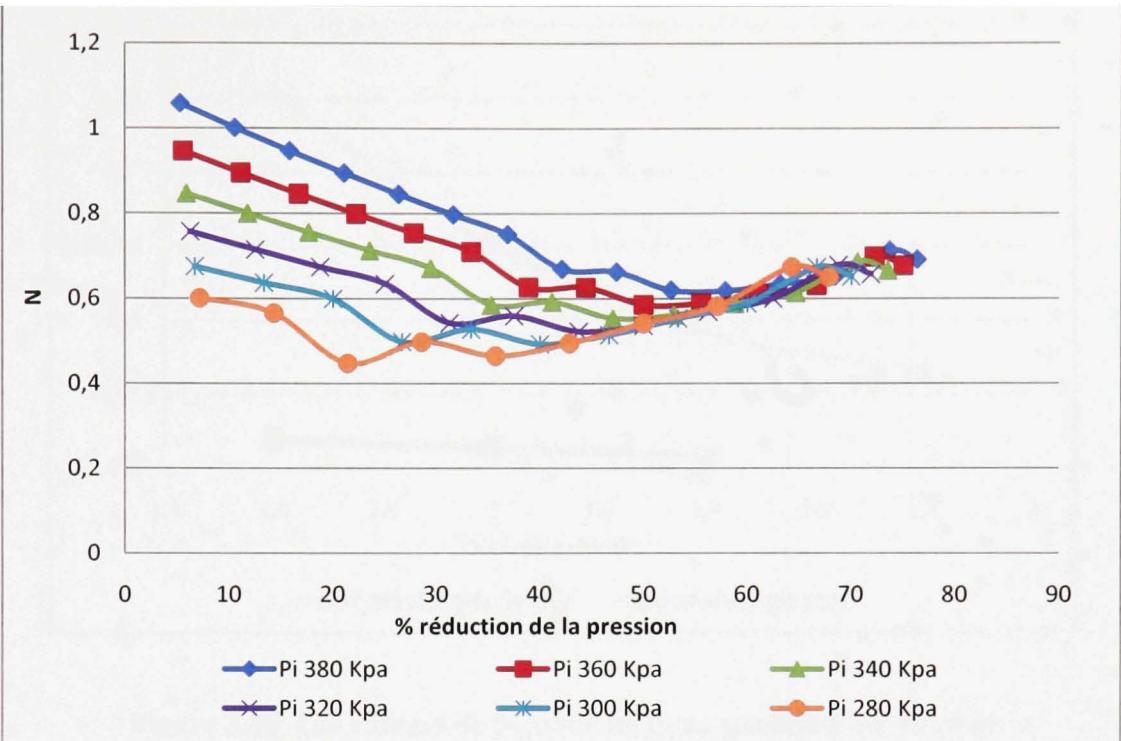


Figure 3.17 La variation de N en fonction de taux de réduction de fuite pour différentes pressions initiales – conduite très flexible.

En suivant le même développement fait plus haut, et en mettant en évidence la différence trouvée entre la conduite en acier et cette conduite très flexible, nous allons pouvoir valider les résultats et les constatations faites sur les valeurs de n_a et n_q .

La figure 3.18 illustre la différence entre les valeurs de N, pour une conduite en acier et une conduite très flexible :

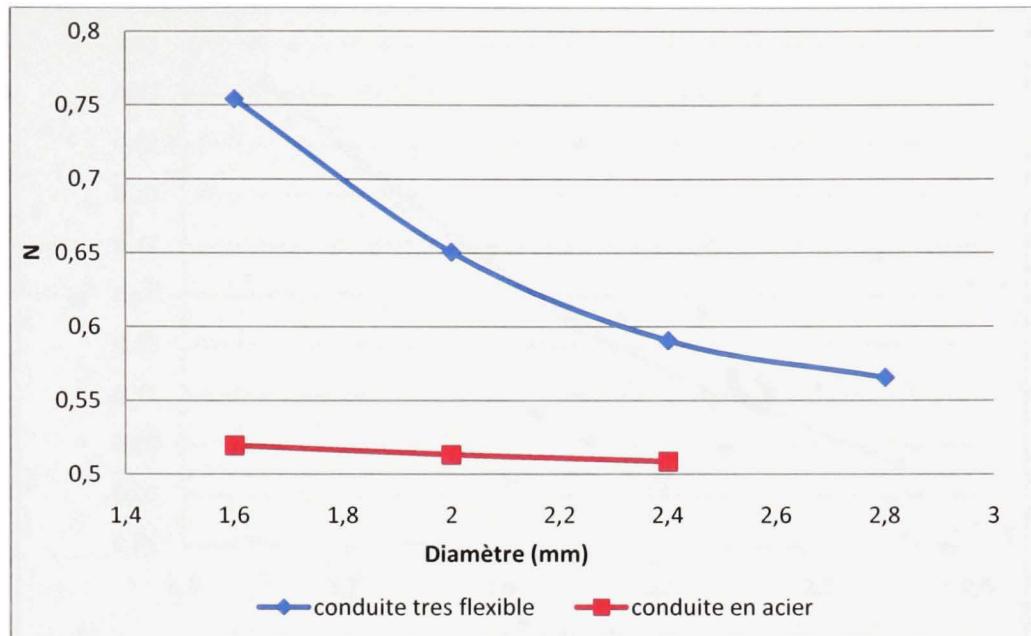


Figure 3.18 Les valeurs de N (pour les deux conduites en Acier et la conduite très flexible) en fonction du diamètre.

Comme nous l'avons déjà conclu, cette différence est la valeur de n_a . Le tableau 3.6 résume la différence de la valeur de N pour les deux conduites :

Tableau 3.6 L'écart des valeurs de N entre les deux conduites (acier et la conduite très flexible).

Diamètre de la fuite (mm)	ΔN	$\% \Delta N$
1,6	0,23442835	31,1090647
2	0,13748463	20,8313711
2,4	0,08190239	13,8763133

Nous constatons que la valeur de n_a est élevée dans ce cas (conduite très flexible), par rapport au premier cas (conduite en PVC). et cela s'explique par le fait que la valeur de n_a dépend du matériau de la conduite. Nous remarquons aussi, que dans ce cas, la diminution de la valeur de n_a en fonction du diamètre est très significative (de 31% à 13%). La figure suivante montre, la valeur de n_a en fonction du diamètre :

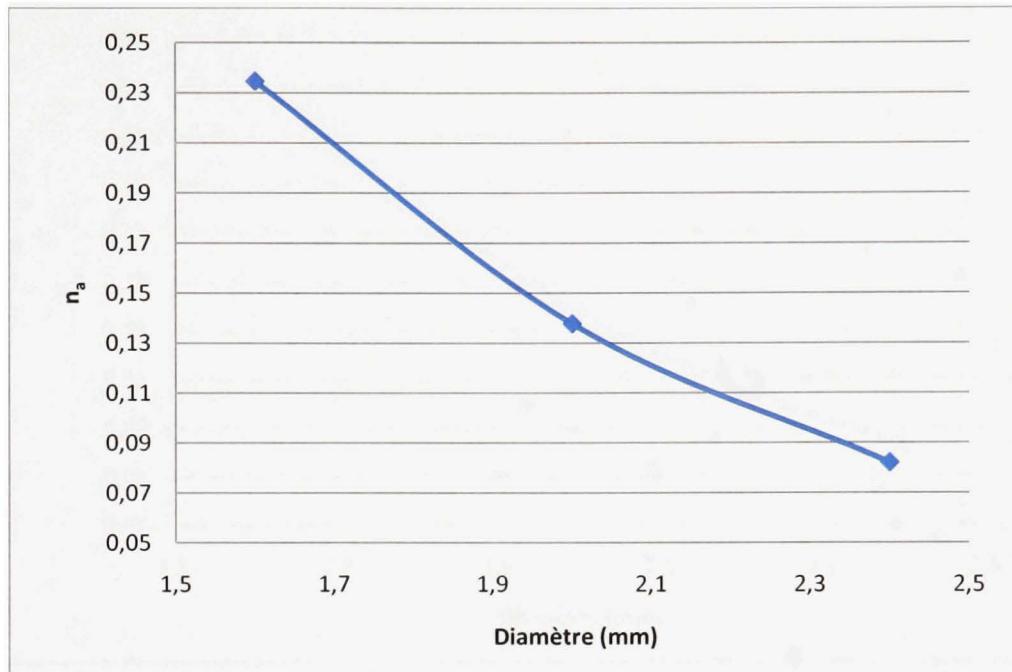


Figure 3.19 La valeur de n_a en fonction du diamètre – conduite très flexible.

À partir de cette courbe et les résultats précédents, et en établissant une courbe de tendance avec une régression de puissance, nous avons pu avoir une relation qui lie le paramètre n_a et le diamètre qui est comme suit :

$$n_a = b \left(\frac{1}{D}\right)^a \quad (3.18)$$

Avec : a et b des coefficients qui prennent des valeurs entre [0, 2,5] et [0,1] respectivement. Plus le matériau est rigide plus on a des faibles valeurs de a et b.

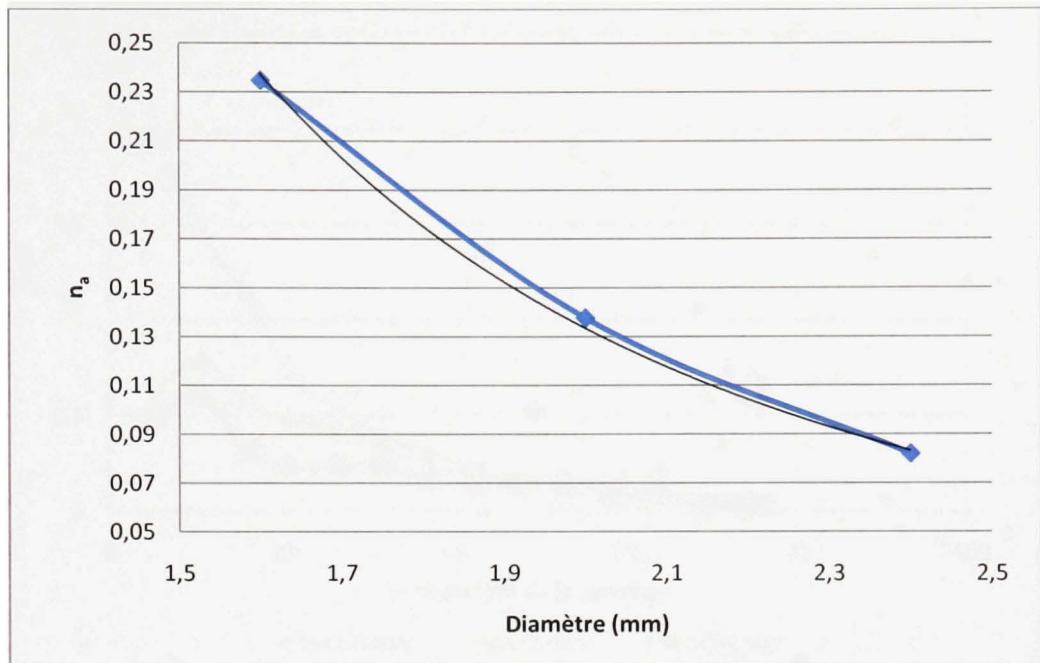


Figure 3.20 La courbe de tendance avec une régression de puissance.

Dans la même logique, nous avons cherché la relation entre la réduction de la pression et la valeur de n_a . Le graphe ci-dessous montre la variation de n_a en fonction de la réduction de la pression :

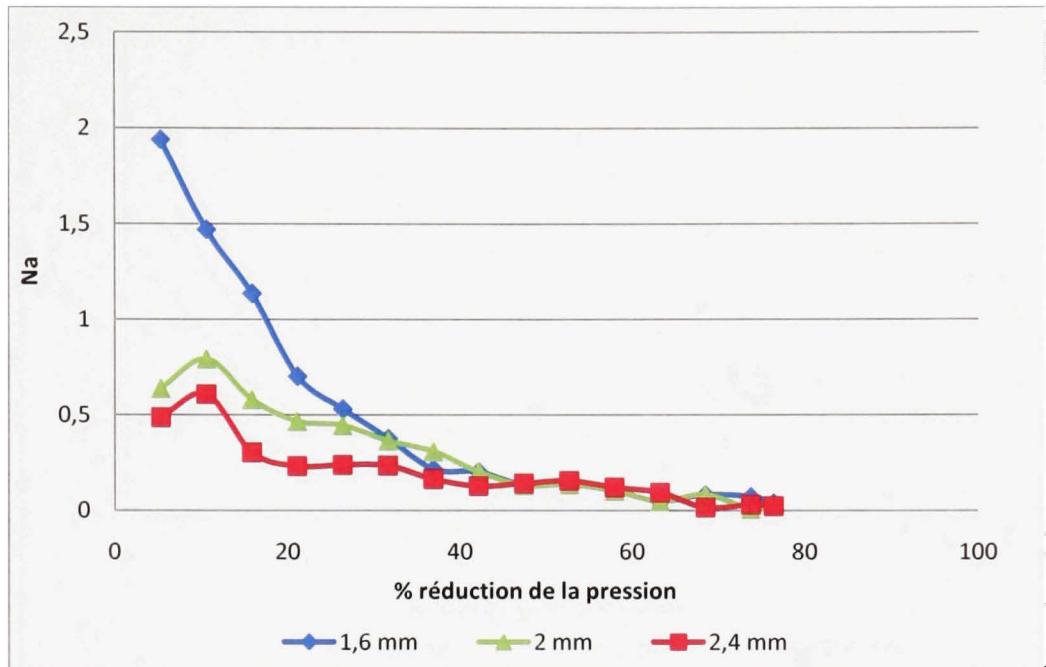


Figure 3.21 Les valeurs de n_a en fonction de la réduction de la pression pour chaque diamètre – conduite très flexible.

Nous voyons que la valeur de n_a diminue aussi en fonction du taux de réduction de la pression jusqu'à une valeur nulle, ce qui confirme les résultats déjà obtenus.

En faisant une régression exponentielle, nous avons pu avoir une relation qui lie le paramètre n_a et le taux de réduction de fuite. Le graphe suivant montre les courbes de tendances :

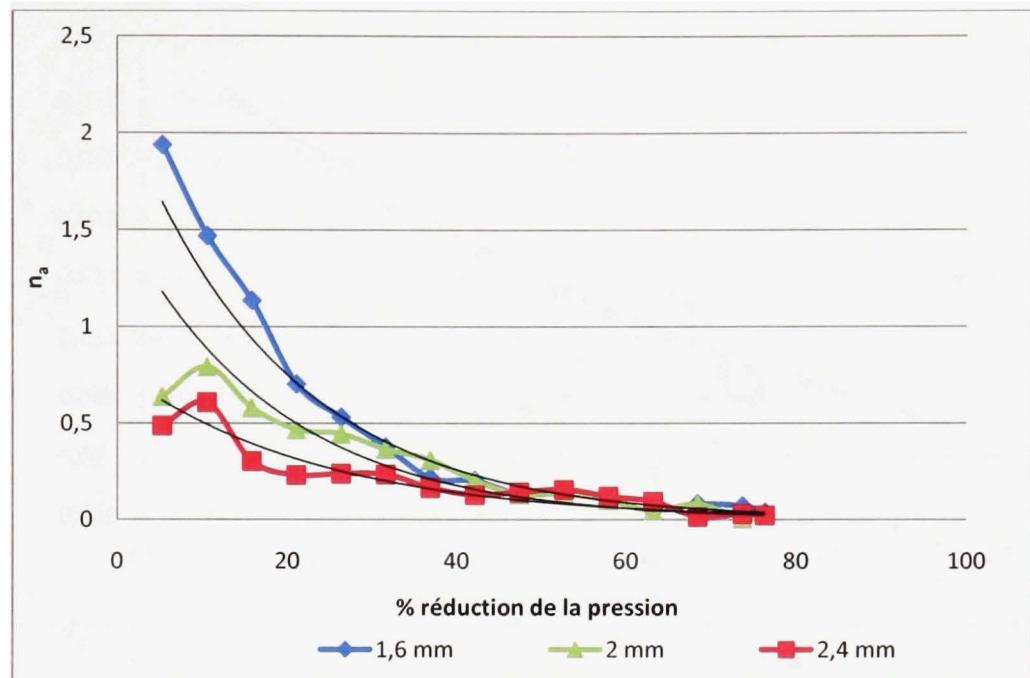


Figure 3.22 Les courbes de tendance avec une régression exponentielles.

La relation trouvée est de la forme suivante :

$$n_a = b e^{-a\Delta P} \quad (3.19)$$

Où : a et b sont des coefficients qui prennent des valeurs entre [0.01, 0.06] et [0,2.5] respectivement.

Nous passons maintenant à la recherche de la relation entre le paramètre n_q et le diamètre. Puisque Les valeurs de n_q ne changent pas avec le matériau, alors elles sont identique aux celles trouvées précédemment.

Le graphe suivant montre la courbe de tendance avec une régression de puissance :

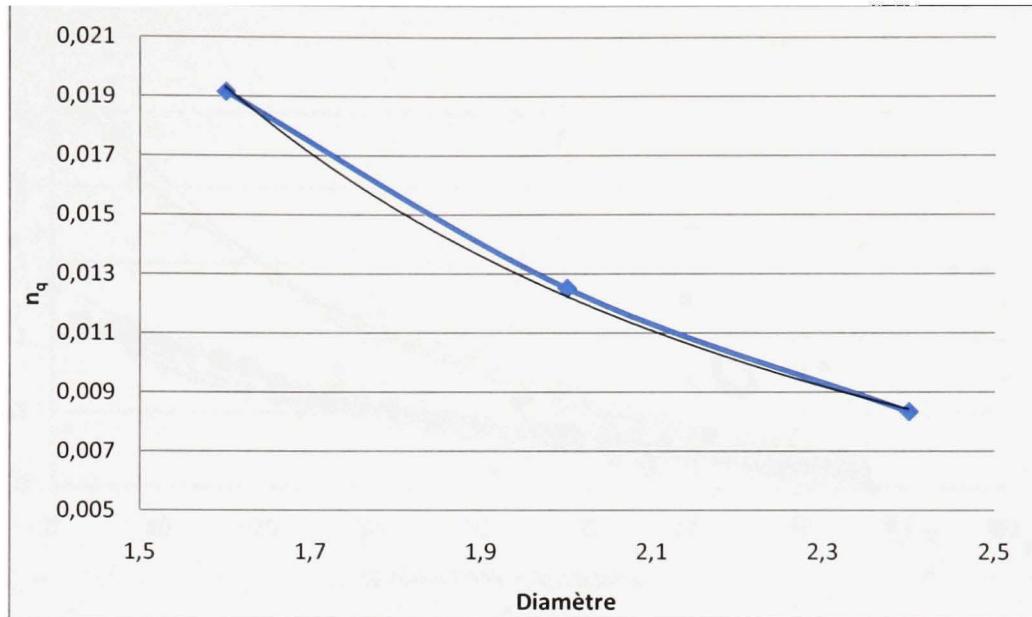


Figure 3.23 La valeur de n_q en fonction de diamètre.

La relation ainsi déduite est de la même forme que pour le paramètre n_a :

$$n_q = b \left(\frac{1}{D}\right)^a \quad (3.20)$$

De la même façon, nous déduisons la relation entre n_q et la réduction de la pression :

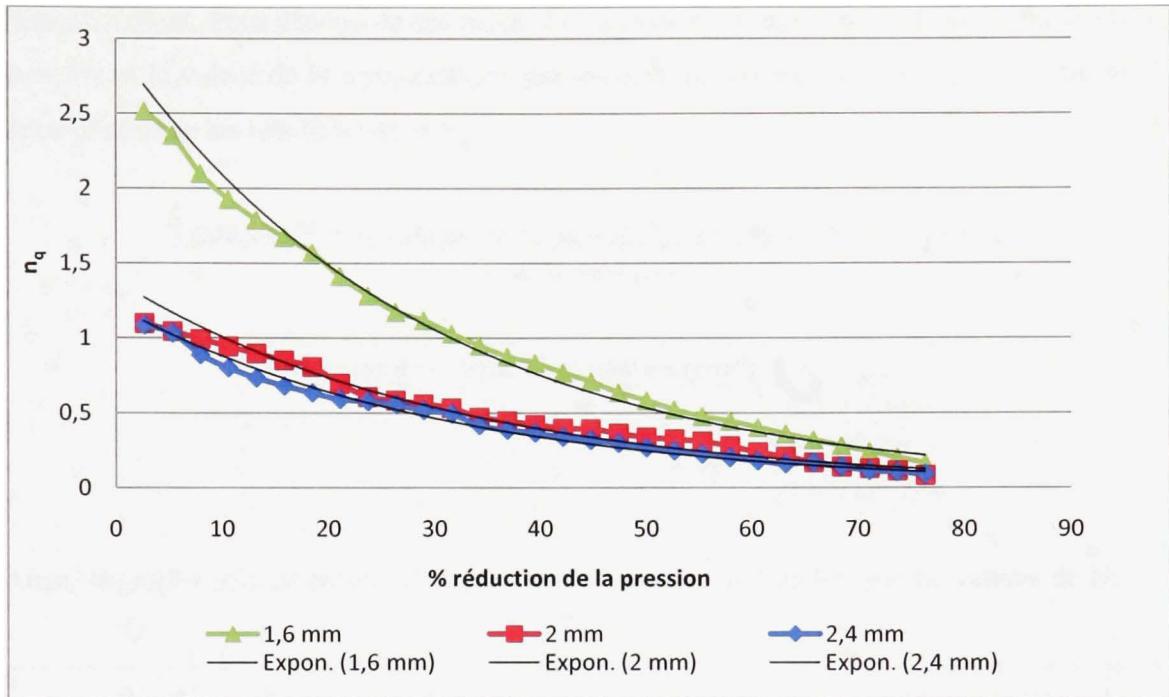


Figure 3.24 Les valeurs de n_q en fonction de la réduction de la pression pour chaque diamètre.

La relation est de la forme :

$$n_q = b e^{-a\Delta P} \quad (3.21)$$

Avec ces résultats nous constatons que les deux paramètres n_a et n_q varient de la même manière en fonction du diamètre et le taux de réduction de pression. Mais la valeur de n_q ne dépend pas du matériau de la conduite, contrairement à la valeur de n_a qui varie en fonction du type de matériau.

3.6.4 Conduite très flexible – orifice longitudinal

Des essais ont été réalisés selon des orifices longitudinaux de tailles différentes 2, 4, 5 mm^2 pour des conduites très flexibles. Selon le rapport de similitude pour les modèles réduits, ces dimensions correspondent aux trous réels, i.e. dans un vrai réseau, de 4, 8 et 10 mm^2

respectivement. Pour chacun de ces trous, 14 couples de pression et de débit de fuite ont été mesurés et la valeur de N a été calculée par la méthode des moindres carrés. Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus :

Tableau 3.7 Les valeurs de N pour différentes dimensions d'orifice - conduite très flexible.

Dimension de la fuite longitudinale (mm ²)	N
2	0,95750745
4	0,90026442
5	0,87312186

Ainsi, le graphe suivant montre l'impact de la dimension de l'orifice sur les valeurs de N:

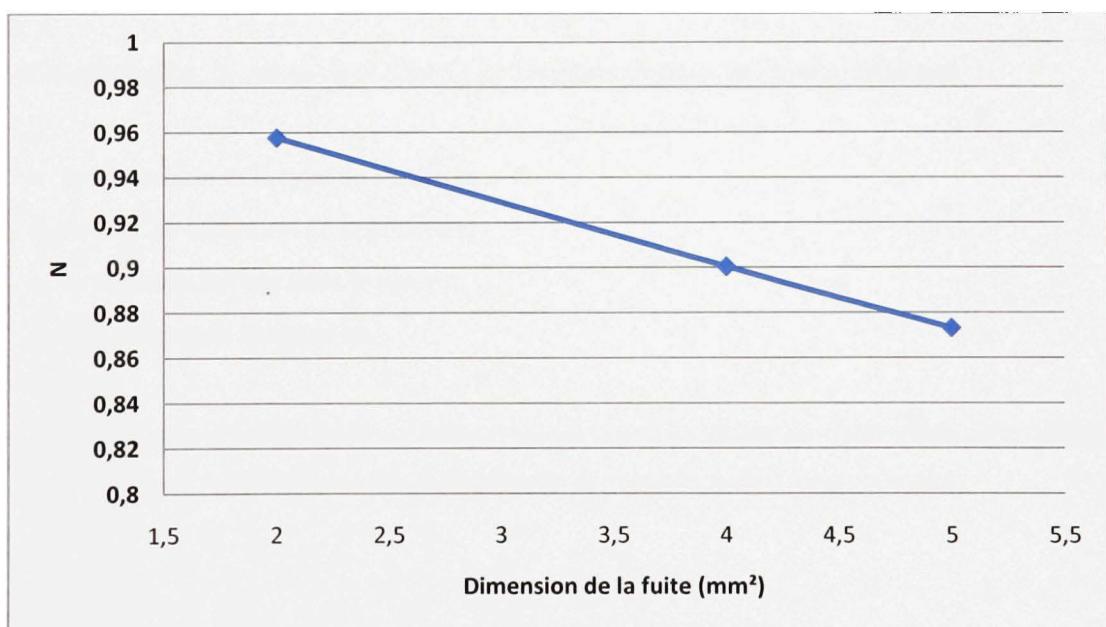


Figure 3.25 La variation de la valeur de N en fonction de la dimension de l'orifice – conduite très flexible.

Nous remarquons que les valeurs de N se situent entre 0,873 et 0,957. Cette baisse du paramètre N signifie que pour une réduction de pression fixée, le gain potentiel en réduction de débit de fuite est décroissant avec le diamètre de l'orifice.

Nous avons constaté que la valeur du paramètre N varie aussi avec le pourcentage de réduction de la pression ainsi qu'avec la pression initiale du réseau.

3.7 Conclusion

Ces résultats nous ont permis de faire les constatations suivantes :

- les valeurs de n_a et n_q diminuent avec le diamètre de l'orifice ;
- les valeurs de n_a et n_q , sont plus sensibles à la réduction de la pression, quand le diamètre de l'orifice est de plus en plus petit, ce qui confirme le principe établi de l'efficacité de la modulation de la pression pour contrôler les petites fuites;
- contrairement à la valeur de n_a , n_q ne dépend pas du type de matériau.

En conclusion, la valeur de N dépend de plusieurs facteurs qui sont les suivants :

- la dimension et le type de l'orifice;
- le taux de réduction de la pression;
- la pression initiale dans le réseau;
- le matériau de la conduite.

Il à noter, que la valeur de N est autant plus élevée pour les petites dimensions de l'orifice, et cela confirme l'efficacité de la modulation de la pression pour les petites fuites.

CONCLUSION

La perte d'eau est une maladie chronique, et souvent sévère, un problème mondial, allant des pays hautement développés aux pays en développement. Le changement climatique, la sécheresse et des pénuries d'eau, qui surviennent souvent dans des régions arides ou semi-arides de la population, ont un impact croissant sur l'approvisionnement en eau, et l'eau devient un facteur limitant pour la croissance économique et la durabilité de l'environnement. Compte tenu de cette sombre réalité, il est inconcevable que la plupart des pays n'aient pas un suivi fiable des approvisionnements en eau et leurs pertes.

Des progrès considérables ont été accomplis dans la dernière décennie dans le développement de méthodes pratiques pour comprendre et prévoir comment les taux de fuites et les fréquences de bris dans les systèmes de distribution, et certains éléments de la consommation sont influencés par la pression.

Dans ce mémoire, nous avons présenté une étude théorique qui a abouti à une nouvelle formulation de l'équation qui relie le débit de fuite et la pression, en tenant compte de deux paramètres qui sont engendrés par le type de matériaux de la conduite et la forme de la fuite. Il a été montré que l'exposant N se décompose en deux paramètres qui sont fonctions de la géométrie de l'orifice et de la rigidité du matériau de la conduite. Nous avons fait par la suite une étude expérimentale au sein de laboratoire de L'ETS pour analyser et valider la relation développée dans l'étude théorique. L'analyse des données expérimentales a révélé que la réduction du débit de fuite ne dépend pas seulement de la réduction de la pression, tel que stipulé par le modèle hydraulique classique, mais dépend aussi du matériau de la conduite, des dimensions de la fuite et de la pression initiale dans le réseau. Ainsi pour le même pourcentage de réduction de la pression, la réduction du débit de fuite sera plus importante dans les conduites flexibles ayant des pressions de service initiales élevées.

ANNEXE I

Schémas du montage

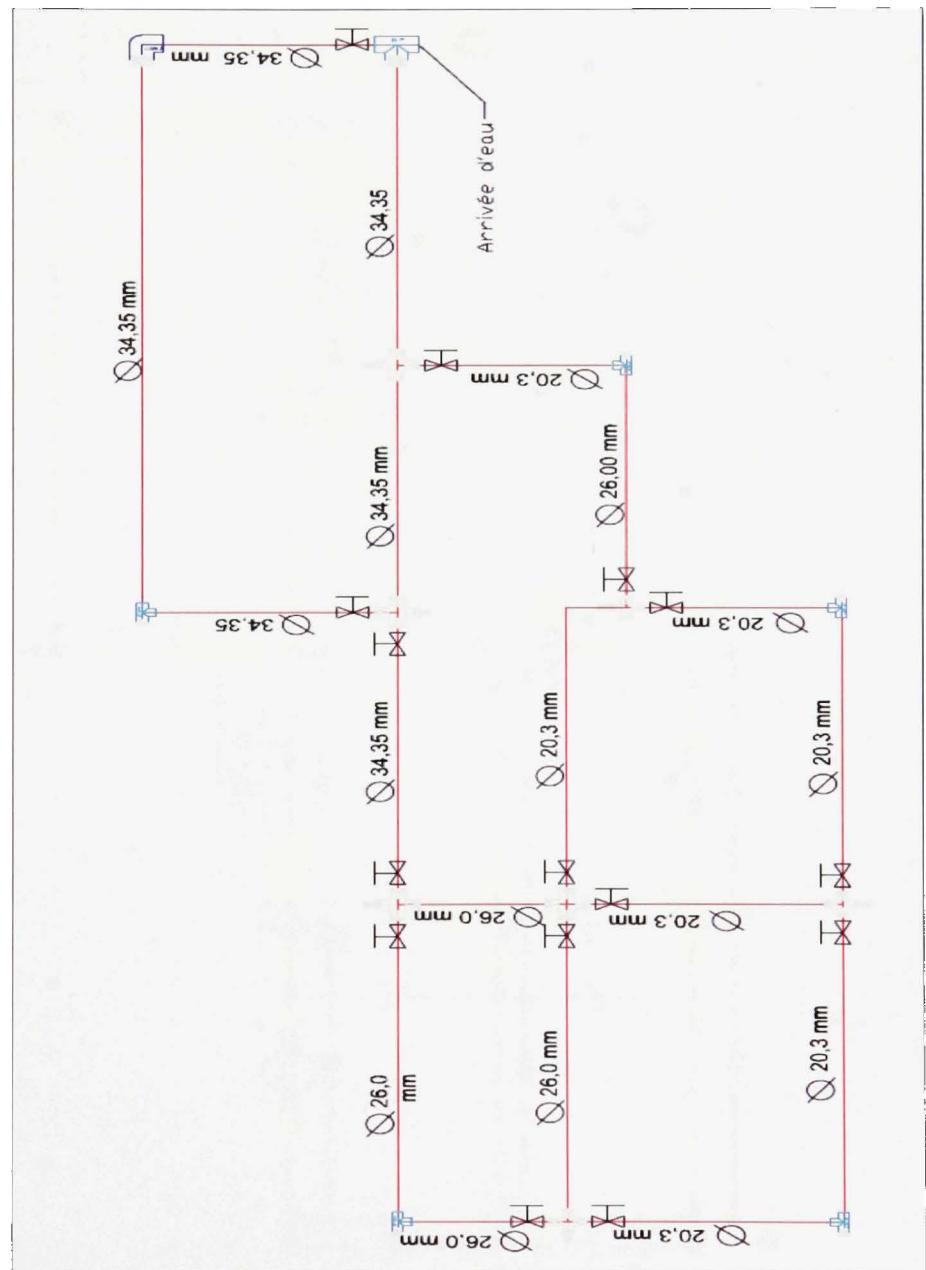


Figure A

	Ball Vanne
	Vanne Guillotine
	Coude
	Croix
	Té
	Union
	Nipple
	Débitmètre à turbine
	Vanne de jonction
	Compteur d'eau
	Débitmètre électromagnétique

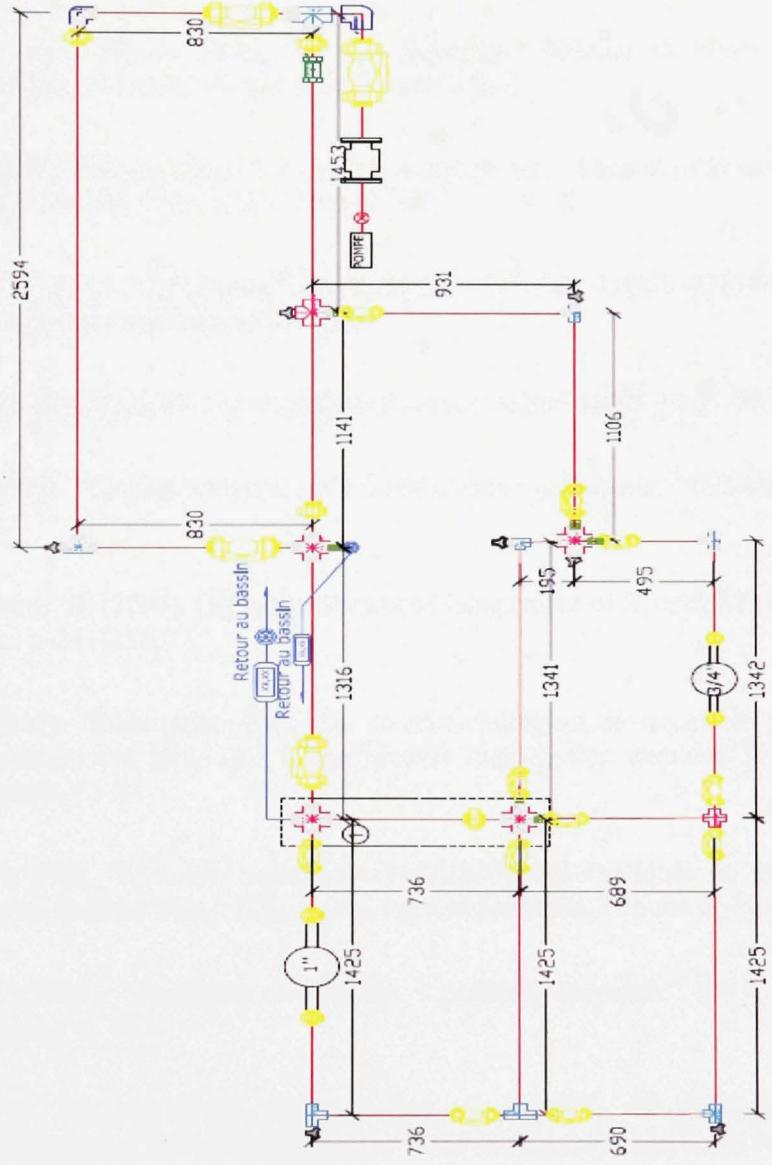


Figure B

BIBLIOGRAPHIE

- Alegre,H., J. Baptista, E. Cabrera Jr, et al.(2006). "Performance Indicators for Water supply Services". 2nd ed. Manual of Best practice series.IWA Publishing, ISBN1843390515.
- AWWA (1990). "Water audits and leak detection." Manuel of Water Supply Practices No.M36, Americam Water Works Association.
- AWWA (2004). "Sizing Water Service Lines and meters". Manual of Water Supply Practices M22. Denver, Colo. ISBN 1-58321-279-5.
- Bennis, S. (2004). "Hydraulique et hydrologie", 2nd Ed., ISBN2-921145-50-02, École de Technologie supérieure, Montréal.
- Brière, F. (2000). "Distribution et collecte des eaux usées". ISBN 2-553-00775-2.
- CERIU (2007). "Gestion intégrée des infrastructures municipales". *Gestion*, vol. 159, p. 51-65.
- Charalambous, B. (2007). "Effective Pressure Management of District Metered Areas." water loss: p-241-255.
- CNRC, (2003). "Élaboration d'un plan de renouvellement de réseau de distribution d'eau. Guidenational pour des infrastructures municipales durables".Infraguide. Ottawa, Canada, P : 54 .
- Eisenbeis (1996). "L'analyse statistique des défaillances appliquée au renouvellement des réseau d'eau potable." (Séminaire organisé par la Ful.Tribune de l'Eau): 13-24,23.
- Fanner, P. (2004). "Assessing real losses: a practical approach.". IWA Water Loss Task Force. n°6, P:2.
- Fanner, V.P., J.THORNTON, R.Liemberger, el al.(2007). "Evaluating Water Loss and Planning Loss Reduction Strategies". Denver,Colo.:AwwaRF and AWWA.
- Fantozzi M. and Lambert A. (2007): "*Including the effects of Pressure Management in calculations of Economic Leakage Level*". Proceedings of IWA Special Conference 'Water Loss 2007', Bucharest, Romania, September 2007.

- Farley, M., and Trow, s. (2003) "Losses in Water Distribution Networks: A Practitioner's Guide to Assessment, Monitoring and Control", IWA Publishing, Alliance House, 12 Caxton St., London, UK. ISBN: 9781900222112.
- Hamilton, S. (2007). "When is a DMA not a DMA?", Hydrosave International, The Barn, Thorpe Underwood, Northamptonshire, UK, NN6 9PA, P:10.
- Hunaidi, O., and Brothers, K. (2007). "Night Flow Analysis of Pilot DMAs in Ottawa." Water Loss Specialist Conference, International Water Association, pp. 32-46, Bucharest, Romania, P: 23-26.
- Hunaidi. O. (2000). "Programme de réhabilitation des infrastructures urbaines.", Conseil national de recherches du Canada, Juin 2000, ISSN 1206-1239.
- Kunkel, G., R, Sturm and J., Thornton (2008). "Controlling Apparent Losses and Capturing Missing Revenu". Water Loss Control Book. Chapter 11. P: 155-169. ISBN 978-0-07-149918-7.
- Lambert, A. and al (1999). "A review of performance indicators for real losses from water supply systems." J. Water SRT - Aqua 48, No 6, P: 227-237.
- Lambert, A. And R. Meckenzie (2004). "Best Practice performance indicators: practical approach". Water 21.P:43-45.
- Makenzie and Wegelin (2005). "Sebokeng / Evaton Pressure/ Leakage Reduction : Public Private Partnership." IWA specialised conference "leakage 2005" P: 385.
- Malandain (1999). "Modélisation de l'état de santé des réseaux de distribution d'eau pour l'organisation de maintenance". Genie Civil. Lion, INSA, P: 205.
- Manual 5 (2002). "Advanced Pressure Management and PRV Selection, Managing and Reducing Losses from Water Distribution Systems", State of Queensland, Environmental Protection Agency, Wide Bay Water." ISBN 0 7242 9493 7: p25.
- May, J. (1994). "Pressure dependent leakage." world water and water engineering. October 1994.

- Merzouk, N. (2005). "Méthodologie de détection et de localisation des fuites dans un réseau d'eau potable dans les petites et moyennes collectivités". Proposition de deux modèles de localisation. Génie Civil, d'Atrois, P: 180.
- Ogura (1979). Japan water works association journal. June 1979. P 38- 45.
- Pearson, D., M. Fantozzi, et al. (2005). "Searching for N2: How does Pressure Reduction Reduce Burst Frequency?" Proceedings of IWA Special Conference 'Leakage 2005', Halifax, Canada, September 2005, P: 14.
- RÉSEAU environnement (1999), "*Le contrôle des fuites*", P: 54. (réalisé dans le cadre du programme «Travaux d'infrastructures Canada-Québec » – 1997).
- Sturm, R., G., Kunkel and J., Thornton (2008). "Evaluating Water Losses Using a Standardized Water Audit and Performance Indicators". Water Loss Control Book. Chapter 7. pp 75-94. ISBN 978-0-07-149918-7.
- Thornton, J. and A. L. (2003). "managing leakage by managing pressure." Water21 by the IWA WaterLoss Task Force, P: 2.
- Thornton, J and Lambert A (2006). "Managing pressures to reduce new break frequencies, and improve infrastructure management." Water 21, December 2006. P:5.
- Thornton J and Lambert A (2007). "Pressure management extends infrastructure life and reduces unnecessary energy costs". Proceedings of IWA Special Conference 'Water Loss 2007', Bucharest, Romania, 23-27 September 2007. P: 10.
- Thornton, J. and R. S., George Kunkel (2008)." Water Loss Control". ISBN: 0071499180, P: 632.
- Thornton, J., R., Sturm and G., Kunkel (2009). "Controlling Real Losses by Infrastructure Management". Water Loss Control Book. Chapter 19. pp 345-350. ISBN 978-0-07-149918-7.
- UKWIR (2003). "Leakage Index Curve and the Longer term effects of Pressure Management." UKWIR report REF 03/WM/08/29, ISBN 1 84057 280 9.
- Walski, T. M., Bezts, W., Poslusny, E.T., Weir, M. and Whitman, B.E. (2006). "Modeling Leakage Reduction through Pressure Control." JAWWA: p. 147-155.

Yates, C. D. (2005). "Water Accountability – The New Way. IWA Specialised Conference "Leakage 2005", Halifax, Nova Scotia, Canada." Conference Proceedingspp 15-21.