



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA
Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique

Mémoire

Présenté par

Mr MAHBOUB Abdellatif

Pour l'obtention du diplôme de Magister

Filière : Hydraulique

Option : Hydraulique Générale

Thème

Réduction des débits de fuites dans un réseau de distribution d'eau potable par l'optimisation du contrôle de la pression via la modélisation hydraulique et les Algorithmes Génétiques

Soutenue le/...../.....

Devant le Jury composé de :

Mr BENDADOUCHE	Hocine	M.C.A	Univ.deBejaia	Président
Mr SEGHIR	Abdelghani	M.C.A	Univ.deBejaia	Examineur
Mr ALLOUACHE	Atmane	M.C.A	Univ.deBejaia	Examineur
Mr BERREKSI	Ali	M.C.B	Univ.deBejaia	Invité
M ^{elle} BENMAMAR	Saâdia	Professeur	E.N.Pd'Alger	Rapporteur

Année Universitaire : 2014/2015

DEDICACE

A mes chers parents :

Ma mère et Monpère.

Mafemme.

Ma petite chère fille : ASMA.

A toute la famille **MAHBOUB,**

A tous mes amis sans exception et d'une façon spéciale a : Ridha, Oussama, Amin, Seif, Issa, Lyamine, Ayoub, Ilyasse, Mourad, Farid.

A l'équipeducentrede modulationdePression delaSEAAL.

MAHBOUB Abdellatif

Remerciement

Je remercie Allah de m'avoir prêté vie, santé et volonté pour achever ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et sincères remerciements à ma directrice de mémoire, **Mlle BENMAMAR Saâdia (Professeur : ENP d'Alger)**, de m'avoir confié ce sujet et de l'aide précieux qu'elle m'a apporté tout-au-long de la réalisation de ce travail.

Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance à **Mr A.GUESMIA et Mr M.A.SID** pour leur accompagnement attentif et productif tout au long de ce travail, ils ont réussi à m'inculper les principes d'un travail efficace et organisé.

C'est avec un énorme plaisir que je formule mes remerciements à Monsieur **N.SILHADI** (Chef de centre rendement de réseau au niveau de la **SEAAL**) ainsi qu'à toute l'équipe du centre rendement de réseau pour la compréhension, l'aide et l'encouragement qui m'ont donné pour accomplir mes études de magister.

J'adresse mes vifs remerciement à **Mr H.BENDADOUCHE** d'avoir accepté de juger ce travail et de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Mes profond remerciement s'adressent aussi aux membres du jury **Dr.A.ALLOUACHE** et **Dr. A.SEGHIR** d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je n'oublie pas de citer aussi : Monsieur **Mr Y.BOUNAH** et **Mr M.BOUKHLIFA**, enseignants à l'Ecole National d'Hydraulique, qu'ils trouvent ici les meilleurs remerciements pour leurs aides et encouragement.

C'est avec un énorme plaisir que je formule ma gratitude, et mes remerciements à Monsieur **A.BERREKSI** et **A.CHENAFI**, enseignants à l'université de Béjaia, remerciements pour leurs aides et encouragement. Et que je n'oublierai jamais.

En fin, je souhaite montrer ma gratitude et ma reconnaissance à tous mes professeurs de l'université de Béjaia et de l'ENSH,

J'ai voulu limiter mes remerciements à mon père **M. BACHIR**, pour m'avoir suivi et guidé dans toutes mes études, à ma mère pour son assistance avertie et ses sens des responsabilités, à toute ma grande famille et à mes amis (e).

MERCI.

MAHBOUB ABDELLATIF

التوزيع	بين	لإيجاد	العديد	المياه	المياه	جميع
	تعديل	التقنيات	المياه.	هي	مرافقها.	
التشكيل	طريق	وتمديد	لتوفير منهجية تعظيم	التشكيل.	اليوم تقنية	
		ية. هذا	هيدروليكية والخوارزميات	معيّنة طريق	MATLAB EPANET الهيدروليكي.	

كلمات مفاتيح: تنميط مثالية MATLAB EPANET الخوارزميا الوراثة.

Résumé

A travers le monde, les service de l'eau cherchent et continuent à chercher des solutions pour trouver un compromis entre le confort de l'abonné et le rendement de leurs installations. Le problème majeur est généralement les fuites d'eau. Plusieurs techniques ont été inventées pour y faire face dont la modulation de la pression des réseaux de distribution qui est devenue à nos jours une technique très répondeur permettant de réduire les débits de fuites et de prolonger la durée de vie des installations. Et ceux en faisant réduire la pression selon la demande en définissant ainsi une courbe de modulation. Le travail dont nous menons consiste à proposer une méthodologie d'optimisation de la courbe de modulation de pression d'un réseau donné par l'utilisation des modèles hydrauliques et les algorithmes génétiques. Cela est assuré par le couplage du logiciel de modélisation hydraulique EPANET et MATLAB.

Mots clés : modulation, optimisation, EPANET, MATLAB, algorithmes génétiques.

Abstract

All over the world, water services are seeking after solutions giving a compromise between the efficiency of their installations and the comfort of the clients. The major problem is generally water leakage. Many technics have been invented to overcome this problem; one is the pressure control of distribution networks which became today a very reliable technic. This technic allows reducing leakage flow and extending life of the networks by reducing the pressure according to water demand by defining a pressure control curve to the control valves. The aim of this work is to propose and optimization methodology of the pressure control curve using hydraulic models and genetic algorithms. This is done by coupling the hydraulic modeling software EPANET with MATLAB thanks to the EPANET Toolkit.

Key words: pressure control, optimization, EPANET, MATLAB, genetic algorithms.

Notations

Nomenclature	Signification	Unité
A	Section de l'orifice	m ²
C	Coefficient de débit	-
c	Coefficient de débit spécifique à un nœud de demande	-
C_d	Coefficient de décharge	-
D	Diamètre d'une conduite	mm
d₀	Diamètre original d'un trou	mm
E	Module d'élasticité	;
e	Epaisseur d'une conduite	mm
F	Fonction de Fitness	-
g	Accélération de la pesanteur	m/s ²
H	Pression exprimée en mètre de colonne d'eau (mCE)	m
L	Longueur d'une conduite	m
N1	Exposant de FAVAD	-
p	Pression	mCE
p_{mes}	Pression mesurée	m
p_{si}	Pression simulée	m
Q	Débit d'écoulement dans une conduite	m ³ /h
Q_c	Débit de consommation	m ³ /h
Q_f	Débit de fuites	m ³ /h
Q_{ff}	Débit de fuite total	m ³ /h
Q_T	Débit total d'un réseau de distribution	m ³ /h
Q_{T,mes}	Débit total mesuré	m ³ /h
Q_{T,sim}	Débit total simulé	m ³ /h
t	Temps	heure
X	Borne supérieur de l'espace de recherche de solutions	-
AG	Algorithmes génétiques.	-
LB, UB	Borne inférieur et supérieure de l'espace de recherche de solutions	-
	Exposant de fuite	-
	Masse volumique	Kg/m ³
C_N	Consignes de modulation	-

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE 01

ETAT DE L'ART SUR LA MODULATION DE PRESSION

Introduction.....	3
ETAT DE L'ART SUR LES TECHNIQUES ET TECHNOLOGIES EXISTANTES EN MATIERE DE MODULATION DE PRESSION.....	3
I. Travaux d'Araujo & Ramos et Colelho (2006).....	3
1. Méthodologies	4
1.1. Model Hydraulique.....	4
1.2. L'Algorithme d'Optimisation	4
1.3.1. Première phase	4
1.3.2. Deuxième phase	5
2. Résultats	5
3. Conclusion	6
II. Travaux de Babel, Islam & Das Gupta (2009).....	7
Résumé.....	7
1. Méthodologies	7
2. Résultats	7
3. Conclusion	9
III. Travaux de Liberatore et Sechi (2009).....	9
1. Méthodologies	10
1.1 Les fonctions objectives :	11
2. Résultats	12
3. Conclusion	12
IV. Travaux de Ryma FARES (2010).....	13
1. L'objectif de La Recherche.....	13
2. Résultats	14
V. Travaux de BEN HASSEN Floriane (2012).....	15
1. Méthodologies	16
2. Résultats	16
VI. Travaux Tricaricoa, Morley, Gargano, Kapelan, de Marinis, Savić et Granata (2013).....	18
1. Méthodologies	18
1.1. Formulation du problème	19
2. Résultats	19
3. Conclusion	19

CHAPITRE 02

GENERALITES SUR LA MODULATION DE PRESSION

Introduction.....	20
1. Intérêts de la modulation de pression	20
1.1. Qu'est-ce que la modulation de pression ?.....	20
1.2. Pourquoi réguler la pression ?	21
1.3 Où réguler la pression ?.....	22
2. Méthode pour l'amélioration du rendement de réseau.....	23

2.1 Amélioration du rendement des réseaux par l'abaissement de la pression :.....	23
2.2 Amélioration du rendement des réseaux par l'abaissement de la pression (réduire le volume des fuites) :.....	24
2.3 Amélioration du rendement des réseaux par l'évaluation du volume des fuites :.....	24
3. Influence de la pression sur le débit de fuite : le concept de «FAVAD»	25
4. Indices et Calcul des différentes composantes des pertes physiques le concept de « BABE »	26
5. L'Impact de la modulation sur la pression et respect du confort de l'abonné	28
6. Des avantages à court-terme et long-terme	28
Conclusion	28

CHAPITRE 03

ALGORITHME GENETIQUE ET DIFFERENTES METHODES D'OPTIMISATION

Introduction.....	29
1. Historique	29
2. Problèmes d'optimisation	30
2.1 Définition	30
2.2 Types d'optimisation	30
2.2.1 Optimisation mono-objectif.....	30
2.2.2 Optimisation multi objectif	31
2.2.3 Optimisation dynamique	32
3. Les méthodes d'optimisation	32
3.1 Les méthodes déterministes	32
3.2 Les méthodes non-déterministes.....	32
4. Les algorithmes évolutionnaires (génétiques)	33
4.1 Principe général de l'algorithme	33
4.2 Les Opérateurs génétiques :.....	34
4.2.1 la sélection.....	34
4.2.2 Le croisement	35
4.2.3 La mutation	36
4.3 Avantages et inconvénients	36
5. Fonctionnement des algorithmes génétiques.....	37

6. Applications	37
Conclusion	38

CHAPITRE 04

METHODOLOGIE ET CONCEPTION DE L'OUTIL

Introduction.....	42
1. Présentation d'EN2Toolkit.....	42
2. Modélisation du comportement hydraulique des fuites.	43
2.1 Les causes des fuites	43
2.2 Rendement d'un réseau	44
2.3 Indice linéaire des pertes	44
3. Gestion de la pression	45
3.1 Relation débit de fuite/pression.....	45
3.2 L'exposant de fuites dans le modèle hydraulique.....	47
3.3 Les vannes de modulation dans le modèle hydraulique.	48
4. Formulation du problème de réduction de débit de fuite par la modulation de pression d'un réseau de distribution d'eau potable.....	50
4.1 Objectif de la recherche	50
4.2 Hypothèses :	50
4.3 Méthodologie adoptée :	50
4.4. Formulation du problème d'optimisation par les AG	53
a. Fonction objective (fitness)	53
b. Contraintes non linéaires	54
5. Présentation de la structure de l'outil.....	56
5.1. Organigramme de principe	56
5.2 Les données d'entrées.....	57
5.3 Les paramètres de sortie	57
Conclusion	57

CHAPITRE 05

APPLICATION ET ANALYSE DES RESULTATS

Introduction.....	55
1. Présentation de la zone d'étude.....	55
1.1. Description de secteur d'étude.....	55
1.1.1. Situation géographique.....	55
1.1.2. Situation Topographique.....	56
1.1.3 Demande en eau.....	56
1.2 Description des installations hydrauliques et du fonctionnement actuel de l'étage de Bologhine.	57
1.2.1 Les ouvrages de stockage de l'étage de Bologhine.....	57
1.2.2 Volume de stockage :.....	58
1.2.3 Totale de Linéaire :.....	58
2. Calage de modèle hydraulique.....	59
2.1 Le calage en débit.....	60
2.1.1 Résultats du calage en débit:.....	60
a) Avant le calage :.....	62
b) Après le calage :.....	63
2.2 Le calage en pression.....	63
2.2.1 Résultats du calage en pression :.....	64
a) Avant le calage.....	64
b) Après le calage :.....	64
2.3 Projet de modulation de pression du réseau de Bologhine.....	67
3. Résultats de calcul de l'outil :.....	67
3.1 Analyse des différents Résultats.....	68
3.1.1 L'évolution de la fonction fitness :.....	68
3.1.2 Résultats des pressions avant et après modulation :.....	69
3.1.3 Résultats des pertes physiques par fuites avant et après modulation :.....	70
Conclusion.....	70
Conclusion générale.....	71
Bibliographie.....	73

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Répartition des pressions pour les heures de pointes et les heures creuses consommation avec six vannes (Araujo & Ramos et Colelho2006).....	5
Figure 1.2 : Répartition des fuites pour les heures de pointes et les heures creuses consommation avec six vannes (Araujo & Ramos et Colelho2006).....	6
Figure 1.3 : Comparaison de débit calculé et observé entrée au système (Babel, Islam& Das Gupta 2009)...	7
Figure 1.4 : Pression du point critique simulé et observé (Babel, Islam & Das Gupta 2009).....	8
Figure 1.5 : Champs de pression pour les six modèles de la demande, associés à 4 :00 heure, 9 :00 heure, 14 :00 heure, 00 heure, Zones de couleur foncée ont $H > 40m$ (Liberatore et Sechi 2009).....	12
Figure 1.6 : comparaison de l'emplacement de la vanne obtenu par PRM par rapport les résultats obtenus par (Araujo et al).....	12
Figure 1.7 : Le taux de réduction du débit de fuite en fonction du taux de réduction de la pression (Ryma FARES 2010).....	14
Tableau 1.8 : La variation de N en fonction du taux de réduction de fuite pour différentes pressions initiales – conduite en PVC (Ryma FARES 2010).....	15
Figure 1.9 : demande utilisée pour la simulation (BEN HASSEN Floriane 2012)	17
Figure 1.10 : Consigne de pression du stabilisateur (BEN HASSEN Floriane 2012)	17
Figure 1.11 : L'un de la configuration de Pareto pendant 5 PATs installés (Tricaricoa, Morley, Gargano, Kapelan, de Marinis, Savi et Granata 2013).....	19
Figure 2.1 : variation de la pression en fonction du temps.	21
Figure 2.2 : variation de la pression en fonction du temps.....	23
Figure 2.3 : variation du débit en fonction du temps.....	23
Figure 2.4 : Diagramme d'économie d'eau.....	23
Figure 2.5 : Diagramme de réduire le volume des fuites/la pression.	23
Figure 2.6 : Diagramme de réduire le volume fuite.....	23
Figure 2.7 : relations entre la pression (P) et le débit de fuite (Q) en fonction de la valeur de N1.	25
Figure 2.8 : influence du type de matériau et de la section de fuite sur la valeur de N1.....	26
Figure 3.1 : Exemple de problème mono-objectif.....	31
Figure 3.2 : Exemple de problème multi-objectif.....	31
Figure 3.3 : Une fonction objectif à plusieurs optima (minimisation).....	32
Figure 3.4 : Les cinq niveaux de l'algorithme génétique.	33
Figure 3.5 : Les principales étapes (Organigramme) d'un algorithme génétique.....	34
Figure 3.6 :Exemple d'une roulette de sélection proportionnelle.....	35
Figure 3.7 : Exemple d'une mutation binaire.....	36
Figure 4.1 : Le taux de réduction du débit de fuite en fonction du tauxde réduction de la pression Ryma, 2010	43
Figure 4.2 : Les valeurs de N (pour les deux conduites PVC et Acier)en fonction du diamètre Ryma, 2010	44
Figure 4.3 :Représentation de la répartition des fuites par rapport à la longueur des conduites sur les nœuds de consommation[GUESMIA Ayoub, 2011].....	45
Figure 4.4 : vanne stabilisatrice aval dans EPANET.....	45
Figure 4.5 : Editeur de commandes d'EPANET.....	46
Figure 4.6 :Principe delastructuregénéraledel'outil.....	53
Figure 5.1 : plan de situation géographique de la ville de BOLOGHINE.....	55
Figure 5.2 : plan de l'étage Bologhine [Document technique. SEAAL.2009].....	57
Figure 5.3 : Débit mesuré Le 25-03-2013 à la sortie du réservoir de Bologhine.....	60
Figure 5.4 : courbe de graphique de consommation réel.....	60
Figure 5.5 : profil de consommation ; original et modifié.....	61
Figure 5.6 : Comparaison des débits de consommation totale mesurés et calculés (simulées par le modèle) avant le calage.....	61
Figure 5.7 : Corrélation entre les valeurs mesurés et simulées : coefficient de corrélation entre valeurs moyennes = 0,599 (donné par EPANET).....	61

Figure 5.8 : Comparaison des débits de consommation totale mesurés et calculés (simulées par le modèle) après le calage.....	62
Figure 5.9 : Corrélation entre les valeurs mesurés et simulées : coefficient de corrélation entre valeurs moyennes = 1,0 (donné par EPANET).....	62
Figure 5.10 : Comparaison des pressions mesurées et des pressions simulées par le modèle avant le calage	63
Figure 5.11 : Comparaison des pressions mesurées et des pressions simulées par le modèle.....	64
Figure 5.12 : Corrélation entre les valeurs mesurés et simulées après le calage : coefficient de corrélation entre valeurs moyennes = 0,999 (donné par EPANET).....	65
Figure 5.13 : Les consignes de modulation de pression.....	66
Figure 5.14 : l'évolution de la fonction fitness au cours de l'optimisation des consignes de modulation du réseau Bologhine.....	67
Figure 5.15 : variation de la pression au point critique P.C avant et après modulation de pression.....	68
Figure 5.16 : variation de la pression au point le plus bas dans le réseau avant et après modulation de pression	69
Figure 5.17 : variation de débit de fuite horaire avant et après la modulation de pression.....	69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Résultats de calibrage (calage) du modèle (Babel, Islam & Das Gupta 2009).....	8
Tableau 1.2 : Résultats de la vérification de modèle. (Babel, Islam & Das Gupta 2009).....	8
Tableau 1.3 : Les résultats de la mise en œuvre avec un profil de pression réduite. (Babel, Islam & Das Gupta 2009).....	9
Tableau 1.4 : La réduction du débit de fuite en fonction de la réduction de la pression pour différentes valeurs de N. (Ryma FARES 2010).....	14
Tableau 2.1 : différence entre la régulation et la modulation de pression.....	21
Tableau 2.2 : critères permettant l'identification des zones prioritaire à réguler.....	22
Tableau 2.3 : concept « BABE », catégories des types de pertes physiques et leur sensibilité respective aux interventions de réseaux.....	27
Tableau 4.1 : fournit l'explication des causes des fuites (CNRC 2003)	40
Tableau 4.2 : Les valeurs d e N pour différents diamètres d'orifice- conduite en acier et en PVC Ryma, 2010.....	44
Tableau 4.3 : exemple de commande simple appliqué à notre modèle.....	46
Tableau 5.1 : L'évolution des besoins en eau de l'étage de Bologhine entre 2009 et 2015 [Document technique. SEAAL.2010].....	56
Tableau 5.2 : Caractéristiques de réservoir de Bologhine [Document technique. SEAAL.2010].....	58
Tableau 5.3 : Linéaire des conduites [Document technique. SEAAL.2011].....	58
Tableau 5.4 : débit total de production journalier avec les nouveaux coefficients de consommation (moyenne de plusieurs jours).....	59
Tableau 5.5 : statistique de calage pour le débit après calage.....	62
Tableau 5.6 : Statistiques de calage pour la pression.....	65
Tableau 5.7 : Comparaison des débits de fuite de réseau de BOULOGHINE avant et après modulation de pression.....	70

Introduction générale

La gestion durable et intégrée des ressources en eau est l'un des défis majeurs pour l'humanité. L'eau douce est une ressource limitée, et parfois même rare, et l'Algérie a souffert de la mauvaise gestion des services de l'eau. Le réseau d'eau potable a pour fonction de base de livrer de façon continue (24 heures sur 24) une eau de bonne qualité en quantité suffisante et à une pression adéquate.

Toutefois, le réseau de distribution subit des dégradations au cours du temps liées aux fortes variations de pression (plus élevée la nuit). Ce qui présente une contrainte majeure à la distribution continue de l'eau potable. En effet, ces changements permanents de conditions hydrauliques engendrent non seulement un grand nombre de fuites, mais provoquent également une fatigue mécanique des canalisations, qui se traduit par une réduction de leur durée de vie. Des efforts doivent alors être consentis pour assurer un bon fonctionnement du réseau de distribution d'eau potable et minimiser les fuites qui causent des pertes d'eau.

La modulation de pression est une technique qui a beaucoup évolué ces dernières années et se développe rapidement aujourd'hui dans beaucoup de pays. Elle met en œuvre des technologies évoluées qui permettent une analyse fine du réseau afin d'optimiser au mieux la gestion de la pression. Donc elle peut être utilisée comme moyen efficace pour réduire le débit de fuite dans les réseaux très dégradés.

La solution stratégique, comme nous allons le voir à travers les chapitres qui suivent, est de faire une modulation de pression à la demande qui permet de maintenir à tout moment la pression à un niveau aussi bas et constant que possible à la valeur minimale nécessaire et suffisante à la satisfaction des besoins des consommateurs.

Vue la complexité du problème que nous traitons, la réduction des débits de fuites dans un réseau de distribution d'eau potable par l'optimisation du contrôle (modulation) de la pression, et l'inexistence de modèle mathématique pouvant donner cette réduction des débits. L'objectif du présent travail est de décrire comment la gestion de la pression (la minimisation de l'excédent de pressions) peut aider à réduire les fuites dans le réseau de distribution d'eau potable.

L'aide donc de proposer un outil qui se base sur le principe de couplage du logiciel de calcul Matlab avec le logiciel de simulation hydraulique Epanet. Ce couplage est assuré par le biais de la bibliothèque de liens dynamiques (DLL) « EN2Toolkit », qui nous permet d'accéder aux paramètres du modèle hydraulique sous Epanet à partir des Algorithmes Génétiques fonctionnalité offerte par MATLAB, cette bibliothèque nous offre aussi la possibilité de lancer des simulations hydrauliques ainsi que d'apporter des modifications aux paramètres du modèle hydraulique tout en restant sur Matlab.

À partir de là, on a élaboré un programme sous Matlab qui accède au modèle hydraulique pour l'optimisation de la courbe de modulation de la pression, et par conséquent la réduction des fuites.

Dans un premier temps, **chapitre 01**, il était nécessaire de faire un état de l'art (étude bibliographique) sur les techniques et technologies existantes en matière de modulation de pression.

Nous allons décrire les différents travaux qui peuvent apparaître dans un système d'AEP, leurs origines et leurs manifestations par rapport au vieillissement des conduites et l'apparition des fuites.

Dans le **chapitre 02**, nous présentons une généralité sur la modulation de pression, ce qu'est une modulation de pression, ses intérêts et ses impacts dans un réseau de distribution, la relation entre le débit de fuite et la pression, et ensuite d'appréhender le métier des réseaux de distribution d'eau potable.

Dans le **chapitre 03**, a pour but de présenter les différents types d'optimisations, ainsi que les concepts de base d'utilisation des Algorithmes Génétiques pour l'accomplissement des calculs et un bref historique avec quelques détails sur leur utilisation dans le domaine de l'eau.

Ensuite nous donnons, dans le **chapitre 04**, la méthodologie suivie pour la conception de l'outil de calcul et les concepts utilisés. Nous présenterons aussi les hypothèses émises pour la simplification des calculs. A la fin du chapitre, nous détaillerons l'application et le paramétrage des algorithmes génétiques dans MATLAB.

Dans un dernier temps, au cours du **chapitre 05**, consiste à présenter une application de l'outil pour le réseau de distribution de la ville de Bologhine suivie d'une interprétation des résultats obtenus.

Nous terminerons enfin par une conclusion en définissant les perspectives d'amélioration de l'outil dans le futur.

CHAPITRE 01

ETAT DE L'ART SUR LA MODULATION DE PRESSION

Introduction

Bien qu'encore peu utilisée, la modulation de pression est une technique qui a beaucoup évoluée ces- dernières années et se développe rapidement aujourd'hui dans beaucoup de pays. Elle met en œuvre des technologies évoluées qui permettent une analyse fine du réseau afin d'optimiser au mieux la gestion de la pression dans un contexte donné.

En effet, partout où il existe de fortes variations de pression (entre le jour et la nuit) ou de fortes pressions, ces contraintes sévères ou ces changements permanents de conditions hydrauliques engendrent non seulement un grand nombre de fuites, mais provoquent également une fatigue mécanique des canalisations, se traduisant par une réduction de leur durée de vie.

Une bonne gestion de la pression hydraulique du réseau peut donc apporter des bénéfices significatifs

- sur la réduction des pertes en eau (économie d'eau),
- sur la durée de vie des réseaux (réduction du stress, de la fatigue du réseau lié aux variations jour/nuit) et cela quelques soient les matériaux utilisés,
- pour le confort de l'abonné (niveau de pression adapté, même aux points critiques si la pression est régulée en fonction de la consommation).

La modulation de pression à la demande consiste à installer à l'entrée d'un secteur une vanne de modulation de pression asservie à un modèle de consommation : l'objectif étant de fournir au consommateur à tout moment de la journée la pression minimale compatible avec une bonne qualité de service. Il s'agit de la méthode de gestion de la pression la plus avantageuse car elle prend en compte toutes les heures creuses de consommation. La plupart des réseaux peuvent en bénéficier si l'amplitude de cette modulation est supérieure ou égale à 15 m sur 24 h.

Ce rapport a pour objectif de regrouper les connaissances et le savoir-faire disponibles sur la modulation de pression et d'en présenter la méthode de mise en œuvre. Une attention spécifique est portée sur les impacts de la modulation de pression sur le débit des fuites, le taux de casses, le rendement de réseau et la consommation.

ETAT DE L'ART SUR LES TECHNIQUES ET TECHNOLOGIES EXISTANTES EN MATIERE DE MODULATION DE PRESSION.

1. Travaux d'Araujo & Ramos et Colelho (2006).

Un modèle pour appuyer les systèmes de décision en ce qui concerne la quantification, l'emplacement et le réglage de l'ouverture des vannes de régulation dans un système de réseau, avec pour principal objectif de réduire les pressions et les niveaux de fuite par conséquent est développé. Ce travail de recherche vise à une solution qui permet d'optimiser simultanément le nombre et l'emplacement des vannes, ainsi que les vannes d'ouverture des ajustements pour la simulation dans une période prolongée, dépendante des caractéristiques du système. Modèle de EPANET est utilisé pour l'analyse de réseau hydraulique et les deux modèles opérationnels sont élaborés sur la base de la méthode d'optimisation algorithme génétique pour la

régulation de pression, et par conséquent la réduction des fuites, car une fuite est une fonction dépendante de la pression. Dans ces deux modules, cette méthode a garanti une performance technique adéquate, ce qui exige une évaluation globale du système pour différents scénarios. Une étude de cas est présentée pour montrer l'efficacité du système par un contrôle de pression à travers la gestion des vannes.

1. Méthodologies

1.1. Model Hydraulique

La simulation du système hydraulique est assurée par des routines basées sur EPANET 2,0. Le choix de cet outil est due à être un modèle robuste libre et largement testé et avec une large communauté d'utilisateurs, Pour chaque utilisateur, il est permis de l'accès à toutes les capacités de simulation du modèle par des routines programmables en C, Basic ou pascal . Les besoins de simulation hydraulique, pour chaque intervalle de temps, de connaître les valeurs des variables intervenant dans le processus de modélisation, à savoir les valeurs de rugosité dans chaque tuyau et tête perte coefficients ou de pression pour chaque vanne.

1.2. L'Algorithme d'Optimisation

Les algorithmes génétiques sont une partie de la méta-heuristique, 2 techniques non-déterministes, de la recherche, l'optimisation et l'apprentissage, qui manipule un espace de

Solutions possibles à l'aide des mécanismes d'adaptation à la "sélection naturelle de Darwin" (Hollande, 1975). Cette technique est robuste et efficace dans les espaces irréguliers, multidimensionnelles et complexes de la recherche , selon il présente des caractéristiques telles qu'elles ne nécessitent pas de produits dérivés, est présent dans une population de points, travaille sur la forme représentant de paramètres (représentation normalement binaire), repose sur des règles non déterministes ou probabilistes, et, pour chaque élément d'une population, il faut que l'information sur la valeur d'une fonction-objectif. Il a été couramment utilisé, avec suffisamment de succès dans la résolution de problèmes d'optimisation des systèmes de distribution d'eau. Dans cette recherche est utilisé une GA-générationnelle conventionnelle dans laquelle toute la population est remplacé par de nouveaux éléments générés par le processus de sélection et l'application des opérateurs : "mutation" et "croisé".

1.3. Les fonctions objectives

La définition de la fonction objective dépend de l'étude de cas et, en général, est liée au modèle hydraulique. Dans ce travail de recherche deux phases principales peuvent être identifiés :

1.3.1. Première phase

Cette première étape (ou module 1) consiste en l'optimisation du nombre et éventuellement localisation des vannes de régulation dans le système de distribution d'eau.

²La prise en compte de soupapes de pseudo dans chaque tube est obtenue par la simulation d'une rugosité supplémentaire qui réduit au minimum les pressions dans chaque nœud du système de

tuyauterie. Les scénarios possibles pour un endroit différent pseudo-vannes sont générés de façon aléatoire, afin le système atteint la pression minimale le long du système, avec un nombre optimal et emplacement de soupapes (par exemple, le nombre de tuyaux de rugosité physique supérieure à 90% de la rugosité de la conduite réelle (adoptée ici que la peine optimale)).

Le projet de la méthode est appliqué à un système d'exploitation de réseau dans la période prolongée. La formulation mathématique de ce volet de l'optimisation est basée sur la fonction objective suivante :

$$f(p_i, nv)I_{t=1}^T = \frac{nv_t}{\left\{ \sum_{i=1}^N \left[(P_{cal,i,t} - P_{min}) / P_{min} \right]^2 \times nv_t + nv_t \right\}^2} I_{t=1}^T \quad (1.1)$$

1.3.2. Deuxième phase

Cette autre étape (ou module 2) de l'optimisation, a comme objectif d'établir ouverture ajustements pour différents types de vannes à travers le coefficient de pertes de charge (Kv) pour Vannes de régulation des gaz (TCV) ou de la pression en aval pour les régulateurs de pression (PRV), afin d'informer le gestionnaire le nombre et l'emplacement le plus adéquat des vannes nécessaires qui sont économiquement et techniquement viable ou simplement pour optimiser les réglages d'ouverture de vannes existantes. Dans cette dernière procédure, la première étape est facultative. La formulation mathématique de l'optimisation de ce composant, est basée sur l'objectif, la fonction suivante :

$$f(p_i)I_{t=1}^T = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \left[(P_{cal,i,t} - P_{min}) / P_{min} \right]^2 I_{t=1}^T} \quad (1.2)$$

2. Résultats

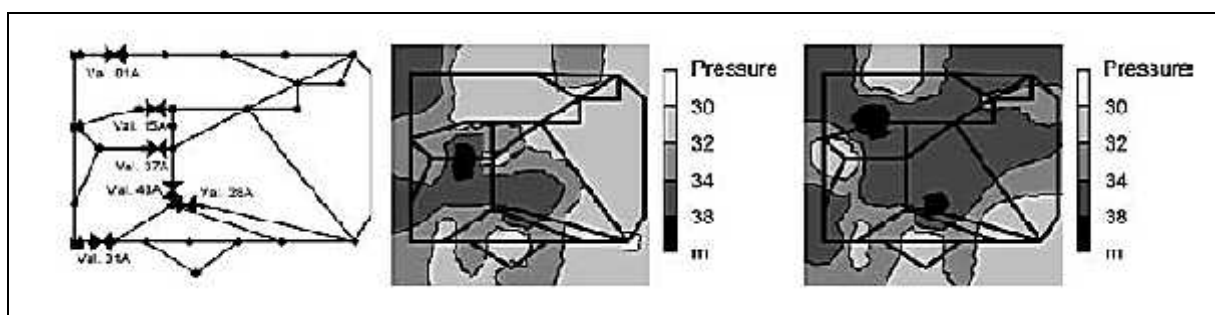


Figure 1.1 : Répartition des pressions pour les heures de pointes et les heures creuses consommation avec six vannes.

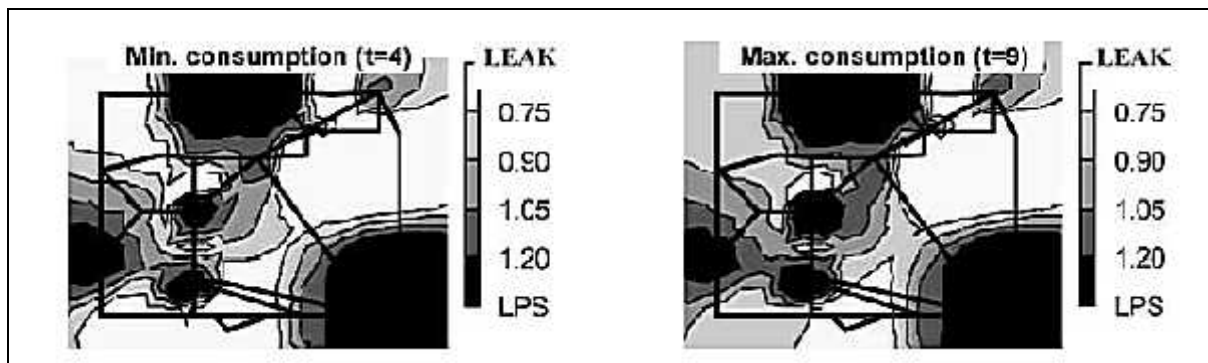


Figure 1.2 : Répartition des fuites pour les heures de pointes et les heures creuses consommation avec six vannes.

L'analyse en détail le comportement du système en fonction de l'écoulement de fuite, on remarque, sur la figure 16a, que la combinaison avec TCV 6 présente le meilleur. Par conséquent, ne perdant que de quelques instants, à la combinaison avec 4 TCV.

Le niveau de fuite a été modifié à partir de 27,3 (l / s) à 22,1 (l / s). Sur la figure 16b est renforcée à la suprématie de la combinaison avec 6 TCV qui obtient une réduction moyenne de 5,2 (l / s) dans l'écoulement de fuite, suivi par la combinaison de quatre TCV, avec une réduction moyenne de 5,1 (l / s). Il est également observé que la quantité de vannes installées est moins importante que sa localisation. Par conséquent, il est vérifié que la solution avec 2 vannes "bien" situées donne de meilleurs résultats que les 3 "mauvaises" vannes situées. La sélection du meilleur emplacement dépend de la typologie et de la variation de la topographie du réseau, qui est seulement vérifiée par une analyse informatique de la sensibilité. Dans ce cas, la solution avec 4 ou même 2 vannes peut être séduisante par rapport avec vannes 6, pour les deux pressions et les niveaux de fuite.

3. Conclusion

Une méthodologie d'optimisation basée sur modèle EPANET pour la simulation hydraulique et deux modèles opérationnels reposent sur un algorithme génétique technique pour le contrôle de la pression. Ces modèles permettent d'optimiser le nombre et l'emplacement des vannes de régulation, ainsi que leurs réglages d'ouverture, pour une puissance apparente optimisation des niveaux de fuite étant donné que les fuites sont modélisées comme un orifice par la fonction pression de pendent. Cette méthodologie a la capacité de trouver une solution qui satisfait pleinement la gestion des pressions extrêmes sans introduire des contraintes importantes à l'efficacité et la performance du système réseau. Une stratégie efficace de

Contrôle et réduction au minimum des pressions est utilisé comme un bon outil opérationnel pour fuites réduction des systèmes d'approvisionnement en eau et de distribution. Scénarios avec des numéros différents et emplacements des vannes de régulation sont analysés.

Distribution de pression et les fuites le long du système de réseau, comme bien l'opérationnel statut de chaque vanne montée permettent de comparer les solutions possibles et à estimer le gain moyen de fuite. Il a été vérifié que la sélection des meilleurs nombre et emplacement des valves de candidat possible dépend de la typologie et caractéristiques du système, qui est obtenu uniquement par sensibilité computationnelle analyse. Pas toujours le plus grand nombre de valves donne la meilleure solution.

II. Travaux de Babel, Islam & Das Gupta (2009).

Résumé

Pertes d'eau due à une fuite se produit dans tout réseau de distribution, la seule différence est d'un montant de fuite. Les fuites sont relativement élevées dans les villes des pays asiatiques en développement. Parmi les différents facteurs, pression de service est le plus important affectant la fuite. Cet article décrit comment la gestion de la pression peut aider à réduire les fuites dans le réseau de distribution d'eau. EPANET est utilisé pour élaborer le modèle hydraulique pour analyser l'effet des profils de pression alternative sur la fuite dans une zone pilote au sein du système de distribution d'eau de Bangkok. Une des alternatives est mise en œuvre sur le terrain pour vérifier l'applicabilité de la modèle. Les résultats indiquent que la réduction moyenne de 2,4 m, la pression peut réduire les fuites de 12,5 % de l'ouverture du système sans compromettre le niveau de service.

1. Méthodologies

Dans cette étude, on élabore un modèle de réseau hydraulique pour un quartier zone (DMA) au sein du réseau de distribution d'eau à Bangkok pour analyser l'effet de pression et sa gestion sur les fuites de comptage. Des variantes analysées sont mis en œuvre sur le terrain pour vérifier les résultats du modèle et son applicabilité dans la gestion des pressions dans les réseaux de distribution d'eau.

2. Résultats

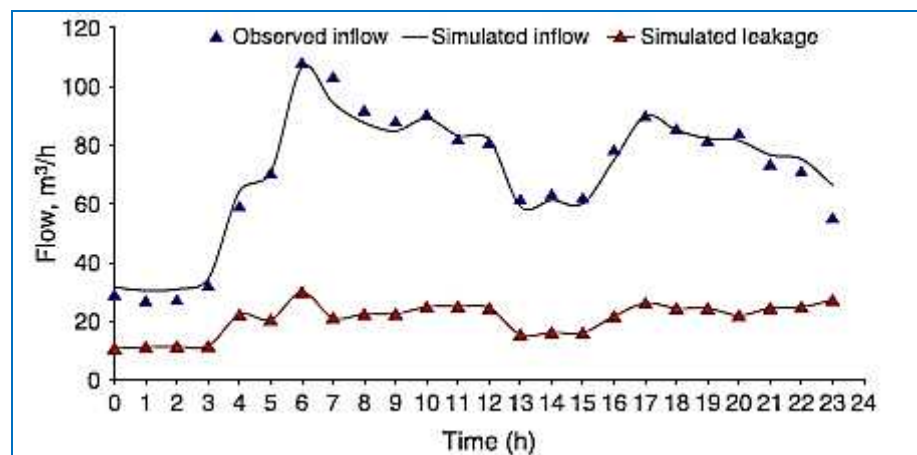


Figure 1.3 : Comparaison de débit calculé et observé entrée au système.

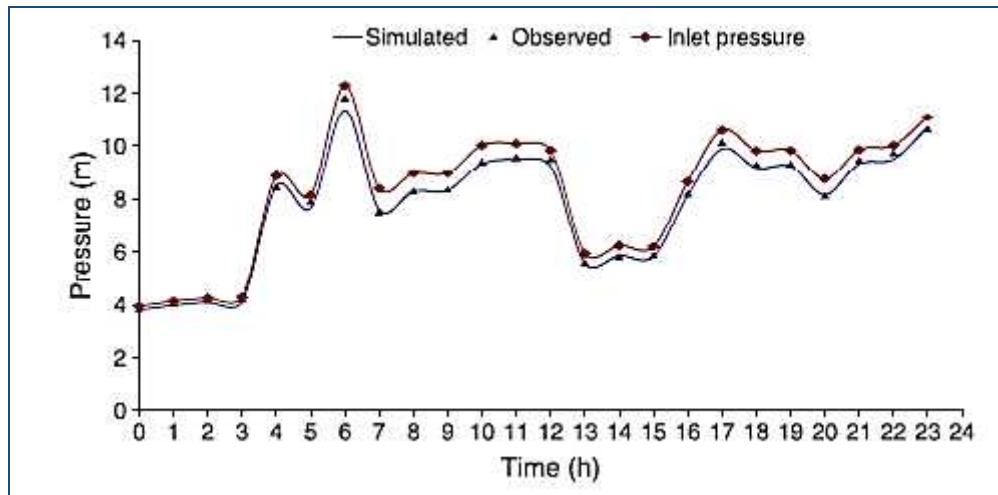


Figure 1.4 : Pression du point critique simulé et observé.

Tableau1.1 : Résultats de calibrage (calage) du modèle.

Parameter	Mean value		
	Simulated	Observed	Error (%)
Inlet flow (m ³ /d)	1,702	1,696	0.35
Critical point pressure (m)	7.86	7.89	-0.38
AZP pressure (m)	8.17	8.09	1.00

Tableau1.2 : Résultats de la vérification de modèle.

Parameter	Date	Mean value		Error (%)
		Observed	Simulated	
Inflow (m ³ /d)	1-2-3 September, 2004 (Avg)	1,933	1,923	-0.52
	26 January, 2005	1,679	1,718	2.32
	25 February, 2005	1,762	1,719	-2.44
Critical point pressure (m)	1-2-3 September, 2004 (Avg)	12.41	12.28	-1.04
	26 January, 2005	8.28	8.15	1.57
	25 February, 2005	8.01	8.00	-0.12

Tableau 1.3 : Les résultats de la mise en œuvre avec un profil de pression réduite.

Day	Average pressure (m)		Average pressure reduction (m)	Flow (m ³ /d)		Savings	
	Before change (Jan 2005)	After change (Mar 2005)		Before pressure change	After pressure change	(m ³ /d)	(%)
1	12.95	10.86	2.09	2,013	1,740	273	13.56
2	12.28	10.68	1.60	2,044	1,777	267	13.06
3	13.78	09.92	3.87	2,001	1,773	228	11.39
4	11.68	10.09	1.60	2,033	1,782	251	12.35
5	11.80	10.14	1.65	2,016	1,751	265	13.14
6	12.30	09.53	2.77	1,956	1,778	178	09.10
7	13.42	10.17	3.25	2,078	1,772	306	14.73
Average/Total			2.42	14,140	12,372	1,768	12.50
Flow calculated from the model (m ³ /7d)					12,632	1,508	10.67

3. Conclusion

A partir de cette étude, on a conclu que le modèle de réseau peut être utilisé pour analyser l'effet de la pression sur les fuites dans le système de distribution d'eau. Ce modèle peut être appliqué pour déterminer le débit et la pression dans le réseau et peut donc contribuer à augmenter l'efficacité de la gestion du réseau de distribution d'eau. On constate que la légère réduction de la pression peut diminuer de façon significative la fuite sans compromettre le niveau de service. Par conséquent, la gestion de la pression est une solution prometteuse pour contrôler les fuites dans le réseau de distribution d'eau. Cependant, la stratégie de gestion de la pression devrait envisager la pression normale de fonctionnement, l'état du réseau, la disponibilité des équipements de contrôle de la pression et la satisfaction des clients.

III. Travaux de Liberatore et Sechi (2009).

Résumé

Récemment, on a observé une augmentation de l'utilisation des techniques de méta-heuristique aborder la conception du réseau de distribution d'eau et les problèmes de la gestion de l'optimisation. L'approche de méta-heuristique appliquée aux systèmes de distribution d'eau a ont donné des résultats intéressants à la fois pour optimiser le dimensionnement de diamètre du tuyau et de l'emplacement et la gestion des dispositifs de contrôle de la pression du réseau (c.-à-pompes et vannes). En ce qui concerne l'insertion et l'étalonnage de vannes de régulation de pression, l'utilisation de techniques de méta-heuristique est relativement récente. Nous cherchons à placer stratégiquement les vannes afin d'obtenir un contrôle de la pression dans le réseau et, par conséquent, les vannes doivent être calibrées par rapport aux tendances de la demande en eau au fil du temps. Dans la pression méthode de référence (PRM) décrit dans le présent document, la

recherche de la vanne l'emplacement est limitée à des ensembles de tuyaux succursales établis sur la base de l'analyse hydraulique et compte tenu de l'écart entre les pressions minimum et maximum acceptables dans le réseau. Dans l'approche PRM, le Scatter-Recherche (Glover et Laguna, 1997) procédures méta-heuristiques sont appliquées pour obtenir la localisation optimale et l'étalonnage de vannes dans le réseau de distribution d'eau.

1. Methodologies

D'une manière générale, l'identification de la localisation optimale et l'étalonnage de soupapes de réduction de pression (VRP) peut être obtenu compte tenu d'une méthode aléatoire simple de recherche dans lequel un nombre prédéfini de valves sont insérées de manière aléatoire dans le réseau et la procédure d'optimisation donne alors un étalonnage optimal d'entre eux. Cette procédure fait partie des méthodes d'énumération, qui finira par produire une solution globale optimale, mais seulement après effort de calcul importante. Il est certainement l'approche la plus simple, mais il peut également être utilisé en association avec des techniques de méta heuristiques pour améliorer la recherche en mettant à jour les emplacements candidats dans la procédure. Cependant, il est difficile de hiérarchiser le nombre de vannes. Ainsi, en termes généraux, cette méthode est difficile à appliquer à des réseaux réels. Suivant la structure topologique du réseau, le procédé de district, telle qu'elle est appliquée par Alonso et al. (2000), consiste à insérer des vannes sur les tuyaux d'alimentation de quartier. Cette méthode est basée sur l'hypothèse que le réseau de distribution est organisé en quartiers urbains, de sorte qu'il n'est pas toujours adapté aux réseaux urbains qui sont cultivés existant sans partitions. Ce cas se produit généralement dans les villes historiques où des réseaux de tuyauterie dans les vieux quartiers sont strictement reliés à de nouvelles zones urbanisées. Souvent, ceux-ci systèmes de distribution n'avaient pas de programme efficace maintenance, et ils exigent une pression contrôle pour la réduction de la fuite. Un système d'échantillonnage pour l'insertion de la valve à l'aide du district Procédé est rapporté à la Fig. 1. Procédures dans lesquelles le problème de l'emplacement de la vanne est une phase d'un processus d'optimisation qui, initialement, prévoit une vanne sur chaque tuyau-branche (vannes factices), appartenant à la classe sur la base de méthodes de calcul.

La technique des vannes mannequin amplifie l'ampleur du problème car le nombre de variables du projet est peu égal au nombre de pipe-branches analysées dans le réseau.

La combinaison de l'optimisation de la méta-analyse heuristique avec hydraulique du réseau, Araujo et al. (2006) aborder le problème de la localisation de la vanne et l'étalonnage en considérant deux phases distinctes : dans la première, un algorithme génétique (GA) Procédure détermine un paramètre pour chaque tuyau exprimant un mannequin-rugosité pour respecter la contrainte de pression au niveau des nœuds (pseudo-vannes); dans la deuxième phase, la méta-heuristique détermine la valeur d'étalonnage optimale de la soupape. Cette approche est, à certains égards, analogue à celui appliqué par Alperovits et Shamir (1977) et par Jowitt et Xu (1990), où une procédure d'optimisation déterministe utilise le.

1.1 Les fonctions objectives :

$$\min OF = \alpha_1 OF_1 + \alpha_2 OF_2 \quad (1.3)$$

$$OF_1 = \sum_{d=1,k} \sum_{i=1,N} |c_i (H_{i,d} - H_{\max})^2|_{H_{i,d} > H_{\max}} \quad (1.4)$$

$$OF_2 = \sum_{j=1,nv} f(H_j^*, D_j) \quad (1.5)$$

$H_{i,d}$ est la tête de pression au nœud i avec la demande modèle d ; H_{\max} indique la maximale autorisée de tête au niveau des nœuds ; H_j^* indique la pression de calibrage des vannes, où $j = (1, \dots, nv)$, et la valve est placée dans le tuyau de diamètre D_j . Les poids α_j sont non négatifs et la somme à 1, et c_i sont les coefficients de pénalité associée au nœud i pour violation de tête. Simulation hydraulique du réseau dans la configuration actuelle permet d'évaluer la fonction globale de la pénalité, de conformité ayant échoué avec les contraintes de pression dans les motifs de la demande. Dans certaines situations, il peut également être nécessaire d'insérer en termes de pénalité, compte tenu des pénalités en raison des pressions relevant la valeur admise, en raison des paramètres de la vanne. Nous avons également observé que le calibrage correct de la pénalité associée à la violation de tête est stratégiquement important pour réduire les temps de calcul et d'atteindre l'optimalité dans un nombre limité d'itérations. Dans OF_2 , le coût économique des valves est essentiellement lié au nombre de soupapes et le D_j des tuyaux de diamètre dans lequel ils sont placés, tandis que la soupape au paramètre H_j^* aussi influence les pénalités sur les têtes qui apparaissent dans OF_1 . Coefficients de pénalité, c_i , en plus de poids, α_j , dans le doivent être réglés en tenant compte des situations spécifiques. Dans les applications de la PRM, nous avons préféré minimiser les sanctions résultant d'une appréciation erronée de la tête hydraulique du réseau, plutôt que de réduire le coût économique des vannes. Analyse de sensibilité variant, HPRM et rapport avec H_{\max} , est d'ailleurs significatif parce que ces valeurs fonctionnent sur l'ensemble de la G_v (lieux de vanne de candidat) et n_v (nombre de tubes de G_v), en plus de l'influence sur le de . La dépendance de la G_v , n_v et de HPRM et H_{\max} est inconnue a priori et est analysée dans les cas suivants de la demande.

À l'aide de routines EPANET, les valves de réduction de pression doivent être définies en assignant une direction de travail afin qu'elles ferment si l'inverse de débit dans le tuyau.

2. Résultats

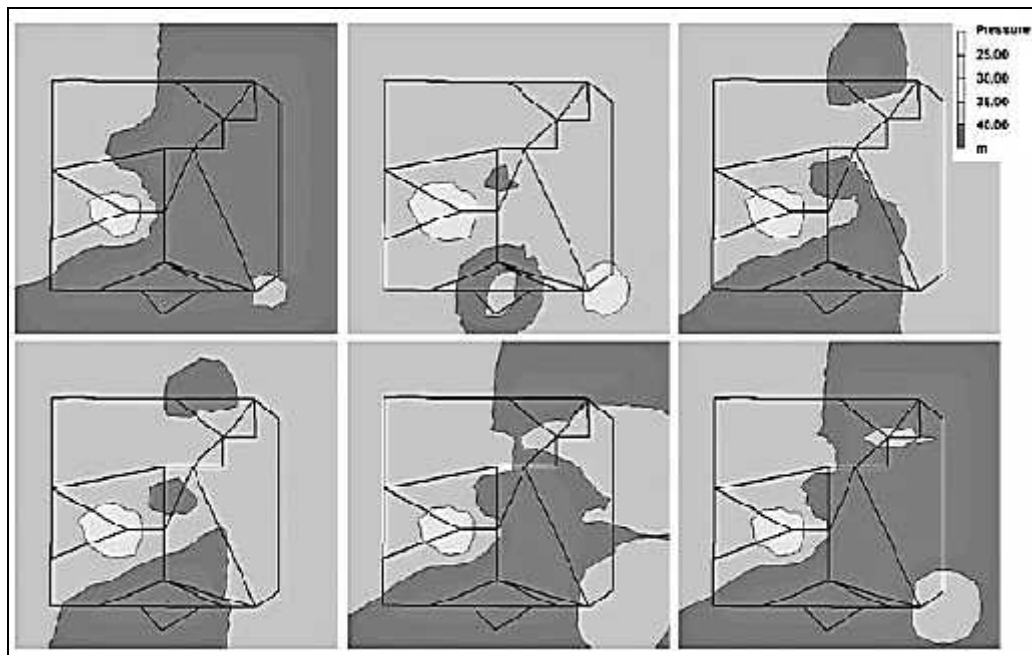


Figure 1.5 : Champs de pression pour les six modèles de la demande, associés à 4 :00 heure, 9 :00 heure, 14 :00 heure, 00 heure, Zones de couleur foncée ont $H > 40m$.

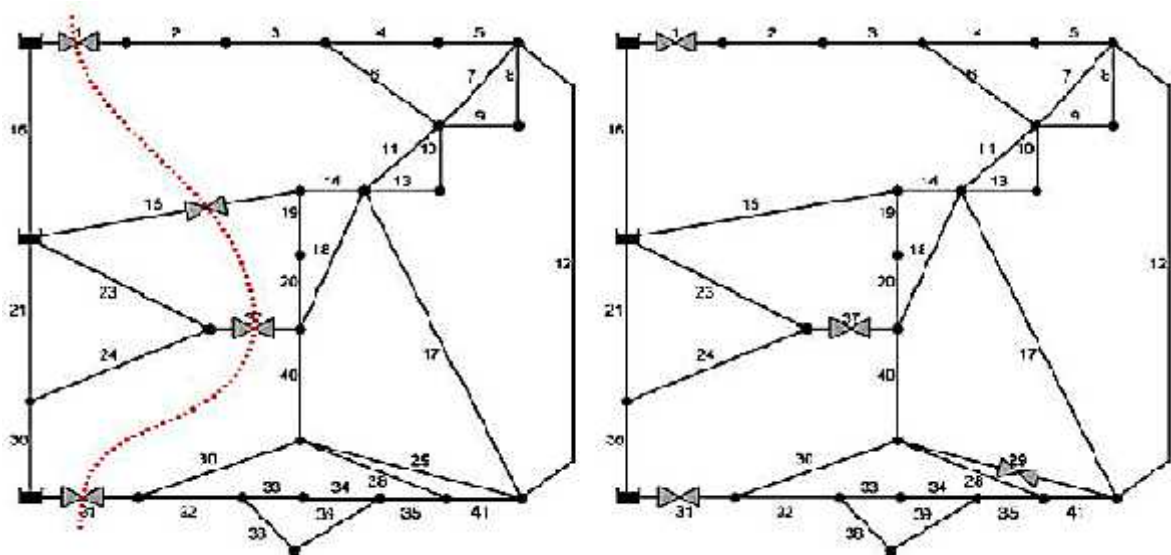


Figure 1.6 : comparaison de l'emplacement de la vanne obtenu par PRM par rapport les résultats obtenus par Araujo et al.

3. Conclusion

Dans la méthode de la PRM, procédures combinées servent à localisation optimale et étalonnage des valves dans les réseaux de distribution d'eau. Dans la première phase, le candidat définit pour connaître l'emplacement des valves sont limités aux tubes définis sur la base d'hydraulique analyse tenant compte de la référence de pression valeur HPRM. Le Scatter méta heuristique Routines de

recherche ont été utilisés dans la deuxième phase pour identifier la meilleure solution dans la emplacement et étalonnage des problèmes en optimisant une fonction multi-objectif pondérée qui considère que le coût de l'insertion de vannes et de la peine pour le nœud des pressions qui dépasser la valeur maximale autorisée H_{max} . Parmi les méthodes d'insertion de soupape dans les réseaux existants et non structurés, les PRM système permet une identification rapide avec charges calculs modestes et contrôle de la pression de réseau avec un nombre limité de vannes. L'application de PRM à un réseau de référence et d'un cas réel obtenu confirme le potentiel de la PRM. En outre, variant la pression de référence H_{PRM} pour déterminer les conduites du candidat emplacement défini pour les valves, permet facilement une analyse de sensibilité. Le comportement de, quand modification de la pression maximale admissible au niveau des nœuds, est également comparé à réglage final localités de la soupape.

IV. Travaux de Ryma FARES (2010).

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 ».

1. 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 sont 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 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. 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.

2. Résultats

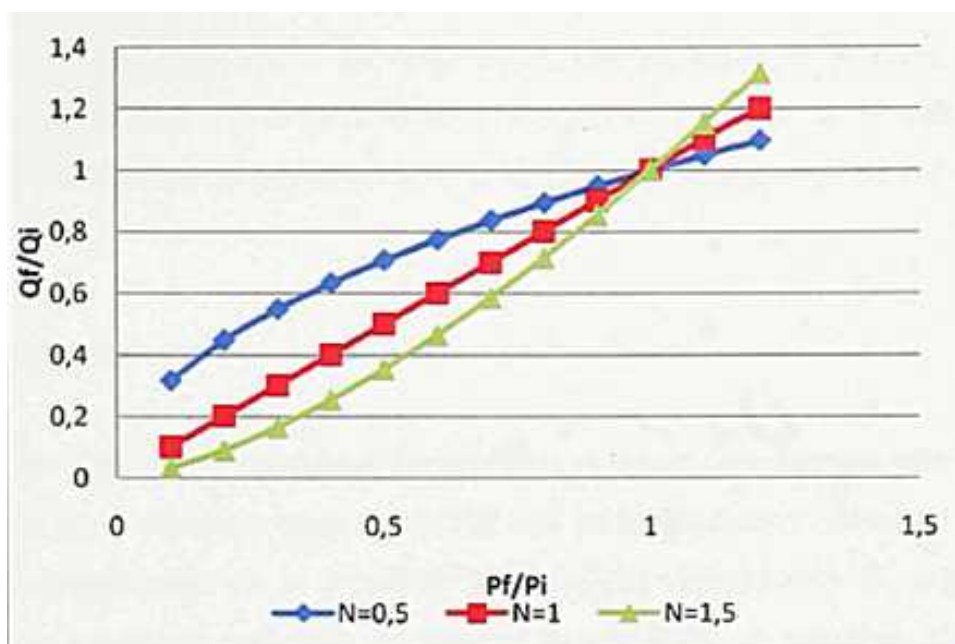


Figure 1.7 : Le taux de réduction du débit de fuite en fonction du taux de réduction de la pression.

Tableau 1.4 : La réduction du débit de fuite en fonction de la réduction de la pression pour différentes valeurs de N.

$\Delta P\%$ \ 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%

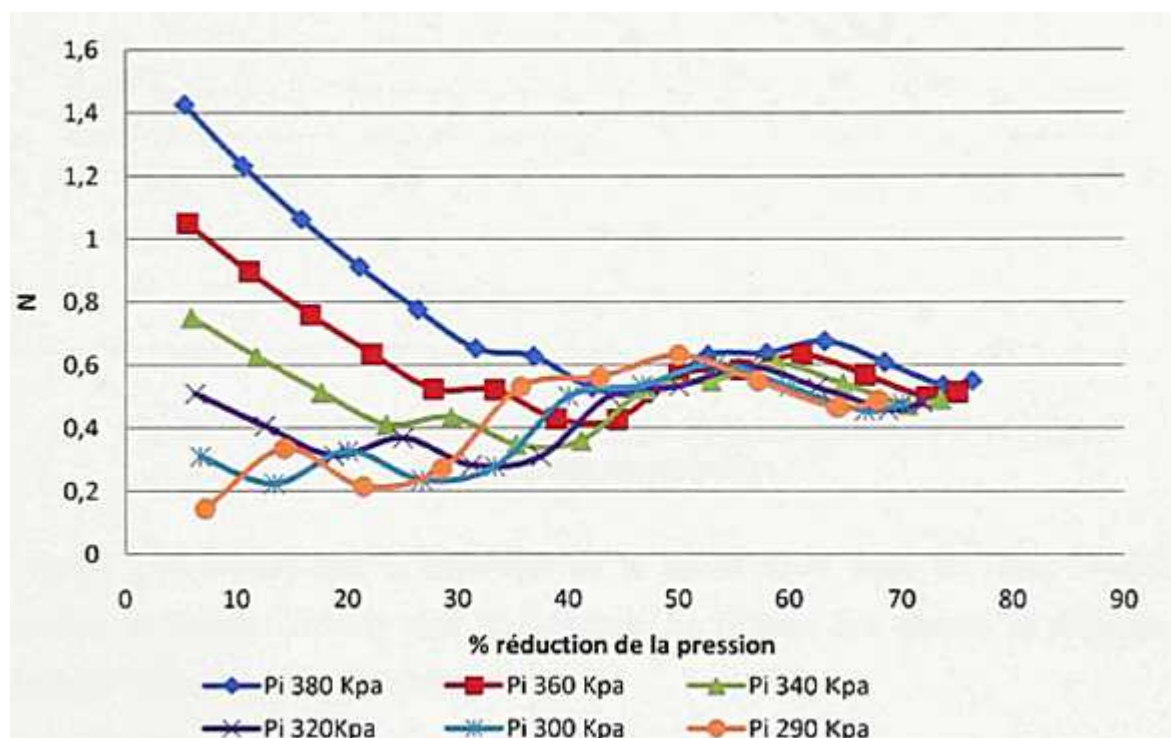


Tableau 1.8 : La variation de N en fonction du taux de réduction de fuite pour différentes pressions initiales – conduite en PVC.

V. Travaux de BEN HASSEN Floriane (2012).

Résumé

La lutte contre les pertes dans les réseaux est une préoccupation majeure tant du côté des organismes publics que des exploitants.

Afin d'évaluer le potentiel de réduction des fuites dans les réseaux d'eau potable, il est nécessaire de se munir d'indicateurs pertinents et complets.

En France, contrairement à ceux utilisés à l'étranger, aucun indicateur caractérisant la performance des services d'eau et spécifié dans le code général de collectivités territoriales ne prend en compte la pression de service du réseau. Or la pression influe sur le niveau des pertes d'un réseau et sa gestion est un mode reconnu de lutte contre les fuites.

Face à ce constat, l'unité Réseau Eputation et Qualité des Eaux d'Irstea de Bordeaux et la direction technique et synergies de Veolia Eau se sont engagés dans une collaboration dont le but est la création d'un indicateur de pertes des réseaux d'alimentation en eau potable incluant le nombre de branchements et la pression.

Ce mémoire présente une étude dont la finalité est l'évaluation de la pression moyenne minimale qui peut être atteinte sur une zone de desserte avec les technologies disponibles et dans le respect des standards de qualité du service délivré aux usagers.

L'étude a débuté par un état de l'art sur les techniques et technologies existantes en matière de régulation de pression, ainsi que sur la façon dont ces appareils sont représentés au sein des logiciels de modélisation hydraulique PORTEAU, EPANET et Syner GEE.

Une méthode de détermination de la pression minimale d'une zone est ensuite proposée et mise en œuvre sur dix secteurs extraits de trois terrains différents.

Enfin une analyse des résultats permet d'établir un lien entre les caractéristiques des secteurs étudiés, et la pression moyenne minimale calculée.

1. Méthodologies

L'objectif de ce mémoire est de savoir quelle est la pression minimum moyenne atteignable pour un secteur de distribution d'eau potable donné. Pour le calcul de la pression moyenne d'une zone (CASP), nous utiliserons une des méthodes mises en œuvre par Mamadou Toumani Sissoko lors de son stage de fin d'étude :

La méthode hydraulique [Sissoko, 2010].

Les méthodes proposées par [Sissoko, 2010] sont inspirées des méthodes de calcul de la pression moyenne de service mises en œuvre par La Water Services Association of Australia (WSAA), mais adaptées aux données disponibles dans les services français. La méthode hydraulique consiste tout d'abord à calculer, grâce à un modèle hydraulique, la pression dynamique moyenne journalière de chacun des nœuds du réseau. Pour cela on calcule pour chaque nœud la pression à chaque pas de temps et on en fait une moyenne. Ensuite, la pression moyenne journalière du secteur est le résultat de la moyenne pondérée des pressions moyennes journalières de chacun des nœuds.

L'étude de Mamadou Sissoko a montré que le meilleur système de pondération serait le nombre de branchements, car des pertes importantes sont constatées au niveau des branchements, cependant cette donnée n'étant généralement pas disponible au niveau des nœuds sur les secteurs d'études, elle est remplacée par la consommation au nœud, que l'on estime représentative du nombre de branchements. L'équation donnant la pression moyenne est alors :

$$P_{moyenne_secteur} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{moyenne_journaliere_i} \times C_{journaliere_i}}{\sum_{i=1}^n C_{journaliere_i}} \dots(1.6)$$

Avec, N, nombre de nœuds sur le secteur. I, nœud. P, pression, C, consommation

2. Résultats

La courbe de demande variable D1 est tirée d'un cas réel rencontré sur nos secteurs d'étude et est donnée ci-après (Figure 1.9).

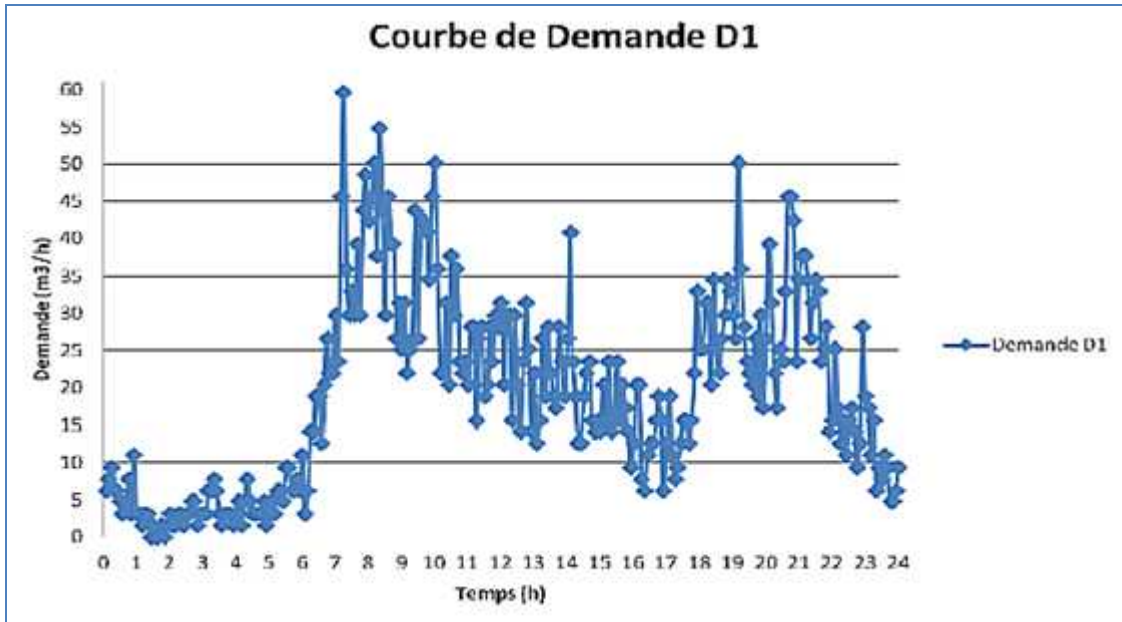


Figure 1.9 : demande utilisée pour la simulation.

La demande fixe D2 est égale à 60 m³/h.

La courbe de consigne variable du stabilisateur S1, est une courbe en escalier donnant une consigne à chaque heure. Cette courbe est ainsi construite car le logiciel Epanet ne permet de faire varier les commandes des stabilisateurs qu'en entrant manuellement une règle de fonctionnement dans l'option « Commandes élaborées » (Figure 1.10).

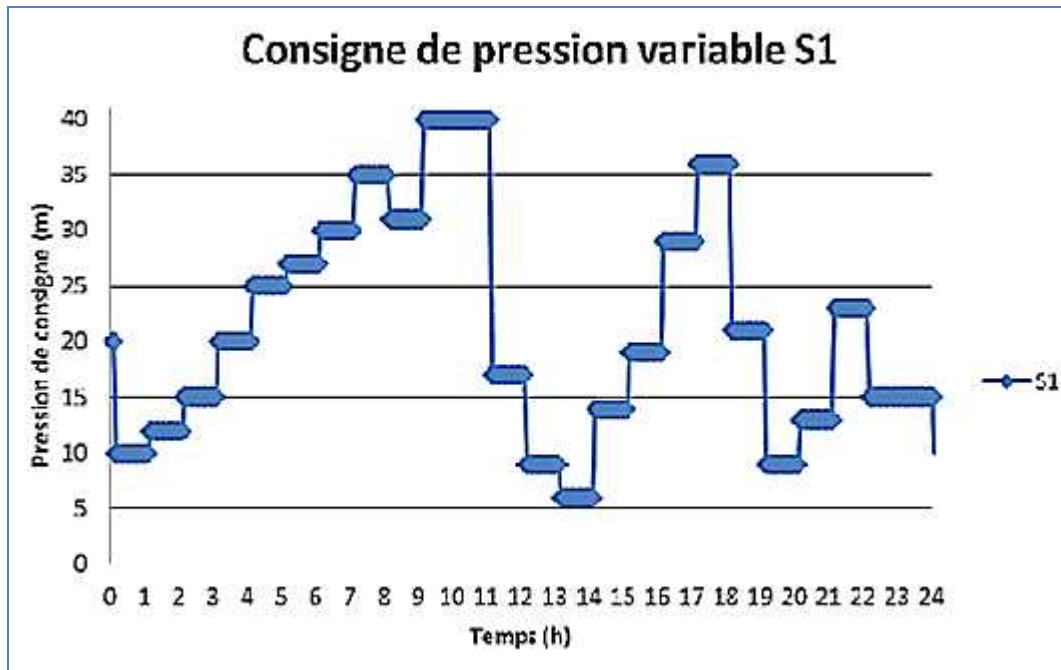


Figure 1.10 : Consigne de pression du stabilisateur.

VI. Travaux Tricaricoa, Morley, Gargano, Kapelan, de Marinis, Savi et Granata (2013).

Résumé

La crise économique de ces dernières années a recentré l'intérêt en réduisant au minimum la consommation d'énergie dans la gestion de WDS. Une méthodologie intégrée est présentée qui cherche à répondre à trois objectifs de conservation de l'énergie large : pumps scheduling classique est considéré comme pour minimiser la consommation d'électricité directe ; Parallèlement, l'optimisation estime la production de énergie en plaçant stratégiquement dans le réseau de pompes fonctionnant comme Turbines (PATs) qui peuvent agir de manière analogue pour classiques réduisant les soupapes, tandis que la récupération de plus d'électricité. Résultats, obtenus sur un véritable WDS, démontrent un avantage économique évident à installer des PATs pour récupération d'énergie en conjonction avec une pompe-ordonnancement et régime de gestion de pression.

Vu les durées de fonctionnement étendues qui peuvent être nécessaires avec des algorithmes d'évolution, intégrées dans le logiciel est le système de EPANET (distribué sur l'évaluation du EPANET) pour paralléliser le calcul associé à la simulation hydraulique (Morley et al. 2006). Elle implémente un système de traitement parallèle qui peut distribuer une piscine de réseaux hydrauliques en attente de simulation pour les transformateurs locaux ou à distance à des ordinateurs sur un réseau local. En raison de la vitesse de transfert de données relativement insignifiant par rapport au calcul effort requis pour une simulation hydraulique période prolongée, près des améliorations linéaires en GA runa times sont obtenus avec l'ajout des cœurs de traitement.

1. Méthodologies

1.1. Formulation du problème

Les fonctions objectives sont formulées en tenant compte :

$$\text{Minimiser } pump \text{ cost} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{Np} P_k^t \cdot C_k^t \quad (1.7)$$

$$\text{Minimiser } \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (P_{i,t} - P_{min}) \quad (1.8)$$

Où : T - le nombre de fois les étapes de la simulation de période prolongée ; NP - le nombre de pompes dans le réseau ; PK - la consommation électrique de la pompe de kth [kw/h] ; CK - Tarif des coûts énergétiques pour la pompe de kwh [€/ kw/h] ; Pi, t – pression calculé au nœud i dans l'intervalle de temps t ; Pmin - exigences de pression minimum pour satisfont pleinement la demande en eau ;

2. Résultats

Résultats obtenus en appliquant l'approche ci-dessus décrite à produit les Fronts Pareto suivants rapportés respectivement pour les simulations déterministes et probabilistes en tenant compte de la possibilité d'affecter, dans le système, un certain nombre d'installations allant de 5, 10 et 15 PATs. En réduisant au minimum la pression excédentaire et les coûts de pompage, couplé avec la maximisation des cordons PATs (Pump As Turbines) revenu sur un Front de Pareto des solutions qui doivent prendre en considération tous ces objectifs collectivement. Le choix de des solutions à adopter, doit donc être faite parmi ceux qui envisagent l'énergie coût minimum pour le pompage, l'excédent de pression minimale et en même temps le revenu maximal de PAT.

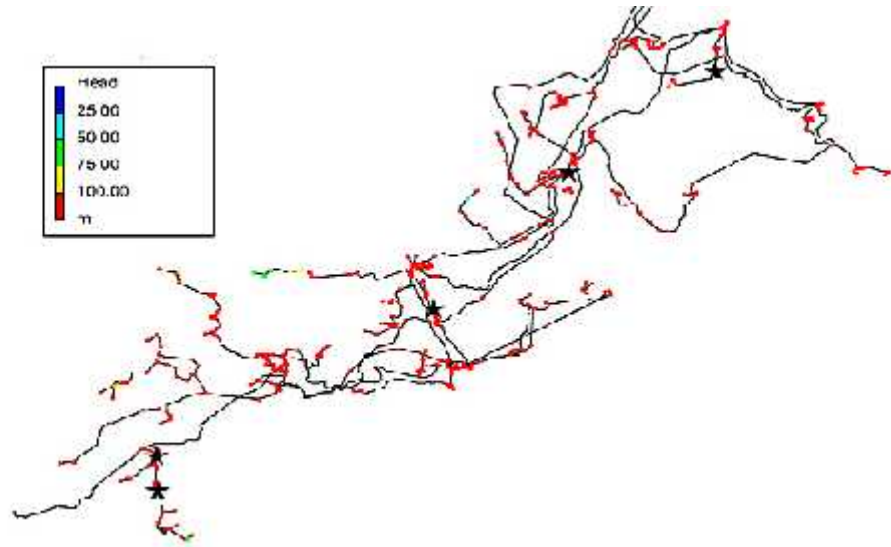


Figure 1.11 : L'un de la configuration de Pareto pendant 5 PAT_s installés.

3. Conclusion

Une nouvelle méthodologie pour la gestion de la pression dans le système de distribution en eau (WDS) a suggéré dans cette œuvre qui accomplit trois objectifs en même temps. En particulier, réduire au minimum les coûts de pompage avec la minimisation de l'excédent de pressions afin de circonscrire au minimum requis et en même temps la maximisation du revenu PAT à attribuer le long du secteur de tronc au lieu des soupapes installées. Le problème a été optimisé au moyen d'algorithmes évolutionnaires, Stochastiques solutions présentent, en outre, qui illustrent un respect de coûts pompage supérieur à celles déterministes en raison de la nécessité de maintenir des pressions plus élevées dans le système et le niveau plus élevé des réservoirs sur le réseau et donc pourrait être considérée comme des configurations plus robustes. Comme un effet secondaire de cette pression systémique supérieure est revenu accru des PAT générateurs pour les configurations dans lesquelles l'eau demande est considérée, pour faire varier de manière probabiliste.

CHAPITRE 02

GENERALITES SUR LA MODULATION DE PRESSION

Introduction

La pression et ses variations sont des facteurs qui contribuent à la détérioration du réseau tout comme le vieillissement, la corrosivité de l'eau et l'agressivité du sol. Une fois l'état structurel du réseau fragilisé, le niveau de pression et ses variations provoqueront une casse.

La modulation de pression a souvent été considérée, à tort, comme une technique relativement rustique, essentiellement destinée à réduire les fuites dans les réseaux très dégradés.

Pourtant, partout où il existe de fortes variations de pression (entre le jour et la nuit) ou de fortes pressions, ces contraintes sévères ou ces changements permanents de conditions hydrauliques engendrent non seulement un grand nombre de fuites, mais provoquent également une fatigue mécanique des canalisations, qui se traduit par une réduction de leur durée de vie.

Une bonne gestion de la pression hydraulique du réseau peut donc apporter des bénéfices significatifs sur :

- ❖ La réduction des pertes en eau (donc une économie d'eau) ;
- ❖ La durée de vie des réseaux (réduction du stress, de la fatigue du réseau lié aux variations jour/nuit) et cela quelques soient les matériaux utilisés ;
- ❖ Le confort de l'abonné (niveau de pression adapté, même aux points critiques si la pression est régulée en fonction de la consommation).

1. Intérêts de la modulation de pression

1.1. Qu'est-ce que la modulation de pression ?

La modulation de pression à la demande permet de maintenir à tout moment la pression à un niveau aussi bas et constant que possible à la valeur minimale nécessaire et suffisante à la satisfaction des besoins des consommateurs.

En d'autres termes, la modulation de pression consiste à installer à l'entrée d'un secteur une vanne de réduction de pression asservie à un modèle de consommation : l'objectif étant de fournir au consommateur à tout moment de la journée la pression minimale compatible avec une bonne qualité de service. Au préalable, les secteurs où sa mise en œuvre se justifie auront été déterminé (campagnes de mesure, sectorisation, définition des points critiques, étude des profils de consommation, historique des casses...).

Pour résumer, il s'agit de réduire au maximum les pressions d'entrée d'un système tout en maintenant des pressions de service satisfaisantes aux points critiques de distribution.

A ce propos, il ne faut pas confondre la modulation de pression avec la réduction de pression, qui consiste simplement à installer un réducteur de pression à l'entrée d'un secteur et qui, pour pouvoir satisfaire les demandes de pointes, délivre une pression presque toujours supérieure à celle réellement nécessaire.

Grâce à la modulation, le système fournit au contraire la pression qui permet de satisfaire la demande de pointe habituelle (été) ou exceptionnelle (incendie), uniquement lorsque celle-ci est

vraiment nécessaire. Par conséquent, la pression est toujours inférieure à ce qu'elle était avant la mise en œuvre de la modulation.

Le tableau ci-après explique la différence qui existe entre la régulation et la modulation de pression.

Tableau 2.1 : différence entre la régulation et la modulation de pression.

Réduction de pression	
Régulation de pression	Modulation de pression
Vanne de régulation de pression	Vanne de modulation de pression
Consigne d'entrée constante	Consigne d'entrée variable selon la demande
On règle (diminue) lorsque la variation de la pression sur 24h n'est pas très importante	On module lorsque la variation de la pression sur 24h dépasse les 20m et que le débit moyen soit le double que celui de nuit.

Les principaux bénéfices de la modulation sont :

- de réduire le débit de toutes les fuites (petites, grandes, visibles ou non) sans avoir à les identifier, et donc d'économiser l'eau produite (de l'ordre de 5 à 20% du volume distribué selon les expériences déjà réalisées) ;
 - de réduire la fréquence des casses et donc :
 - de diminuer les coûts de réparation et d'intervention ;
 - de prolonger la vie du réseau en réduisant le niveau de stress subi par les canalisations.
- Les investissements liés au renouvellement peuvent donc être différés.

1.2. Pourquoi réguler la pression ?

Le pic de consommation représente généralement au maximum 5% à 10% de la journée. Le reste du temps, la pression délivrée au réseau est souvent excessive : la perte de charge est négligeable une fois le pic de consommation passé. Par ailleurs, le confort de l'abonné ne nécessite pas la même pression en pied d'immeuble en permanence.



Figure 2.1 : variation de la pression en fonction du temps.

En effet :

La pression dans un réseau de distribution a deux effets opposés :

- ❖ positif : elle assure une pression suffisantes aux étages supérieurs et aux points les plus loin du réseau en heure de pointe.
- ❖ Négatif : elle provoque des casses de conduite (fuites sur réseau).

La pression disponible à l'entrée d'un réseau à l'heure de pointe doit être égale à la somme de la pression nécessaire au point critique (Point du haut du réseau ou le plus éloigné hydrauliquement) et de la perte de charge créée pour l'alimenter à ce moment de forte demande.

La pointe est un phénomène très aigu, mais presque transitoire, et la période de forte demande dure peu. Comme la perte de charge varie au carré de la vitesse de l'eau, la pression au point critique, souvent à peine suffisante à la pointe, est excessive dès après la pointe, et le réseau est chargé la plupart du temps.

La modulation à la demande est la méthode la plus avantageuse car elle prend en compte toutes les heures creuses de consommation. La pression n'est pas seulement réglée pendant les 7h de la nuit mais aussi pendant environ 15h par jour de faible consommation.

1.3 Où réguler la pression ?

La plupart des réseaux peuvent bénéficier de la modulation de pression suivant la demande, si l'amplitude de cette modulation est supérieure ou égale à 15 m sur 24 h.

Les réseaux particulièrement sensibles seront ceux présentant au moins l'une des caractéristiques suivantes :

- joints au plomb.
- réseau vieillissant.
- plastique de mauvaise qualité ou fragilisé par oxydation.
- points de corrosion (micro-fuites).

Les critères permettant l'identification des zones prioritaire à réguler sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 2.2 : critères permettant l'identification des zones prioritaire à réguler **Rozental, 2010.**

Eléments géographiques	Données opérationnelles
morphologie du terrain (dénivelé)	zones fragiles (nombre de casse et fréquence)
pression d'exploitation	variations de pression « jour /nuit » importantes
entrées d'alimentation possibles	zones ou le rapport du débit de nuit sur le débit moyen est élevé (pertes significatives)
frontières naturelles	étude de la sectorisation existante
étude du type d'habitat (HLM, immeubles, maison)	minimum de pression contractuelle requis

La plupart des réseaux peuvent bénéficier de la modulation de pression, si l'amplitude de cette modulation est supérieure ou égale à 20m sur 24 h.

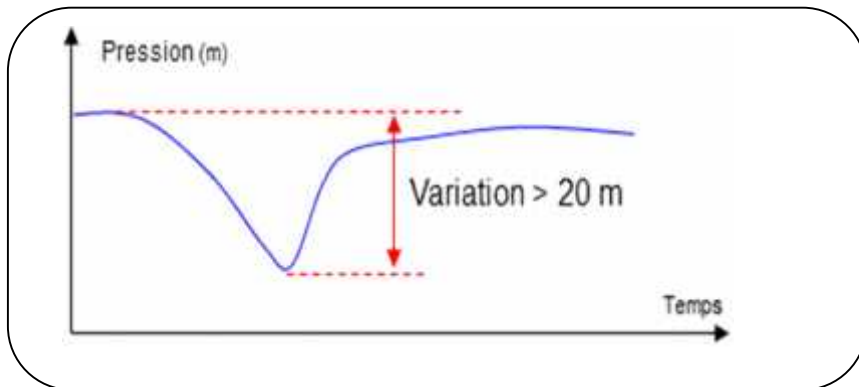


Figure 2.2 : variation de la pression en fonction du temps.

Ou bien : $Q_{moyen} = 2 * Q_{nuit}$

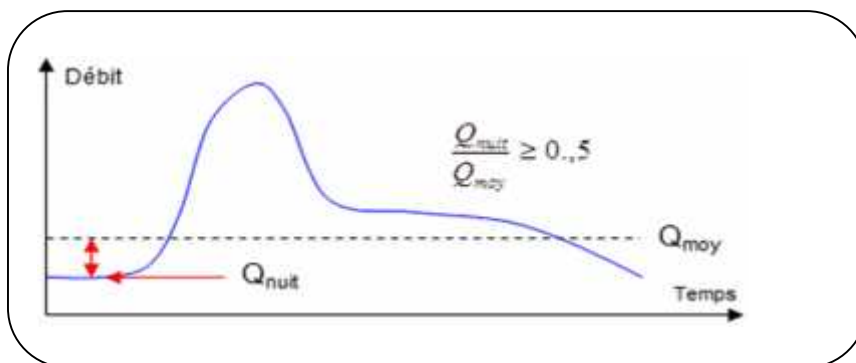


Figure 2.3 : variation du débit en fonction du temps.

2. Méthode pour l'amélioration du rendement de réseau

2.1 Amélioration du rendement des réseaux par l'abaissement de la pression :

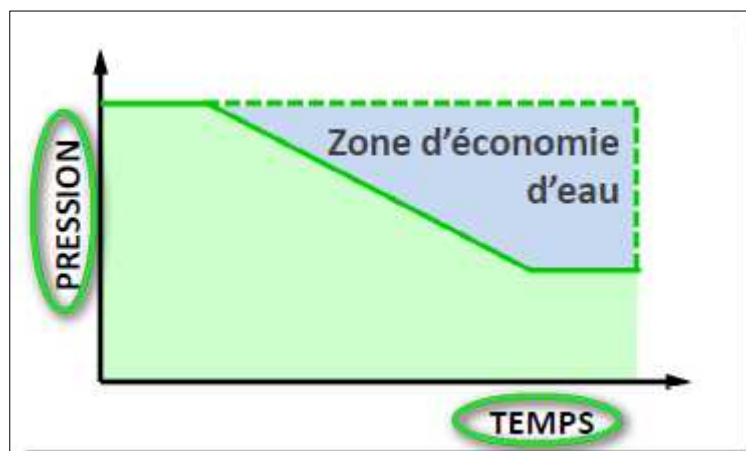


Figure 2.4 : Diagramme d'économie d'eau Bayard, 2011.

Le diagramme ci-dessus montre la zone d'économie d'eau réalisable en produisant un abaissement de la pression (zone bleu).

Elle représente, en fonction du temps, un abaissement de la pression possible pendant une période de basse de consommation.

2.2 Amélioration du rendement des réseaux par l'abaissement de la pression (réduire le volume des fuites) :

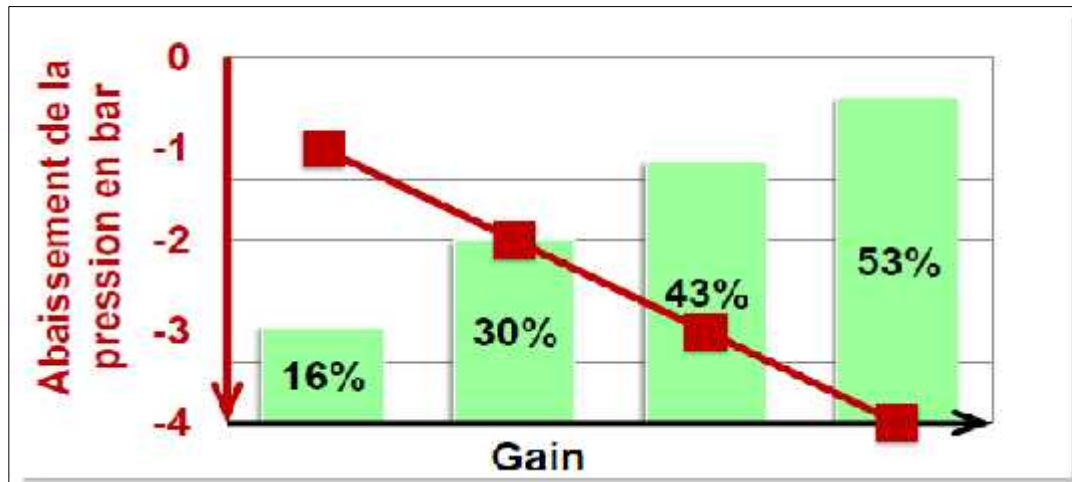


Figure 2.5 : Diagramme de réduire le volume des fuites/la pression Bayard, 2011.

Exemple :

Il suffit d'abaisser la pression initiale de 2(bar) pour réduire le volume des fuites de **30%**!

2.3 Amélioration du rendement des réseaux par l'évaluation du volume des fuites :

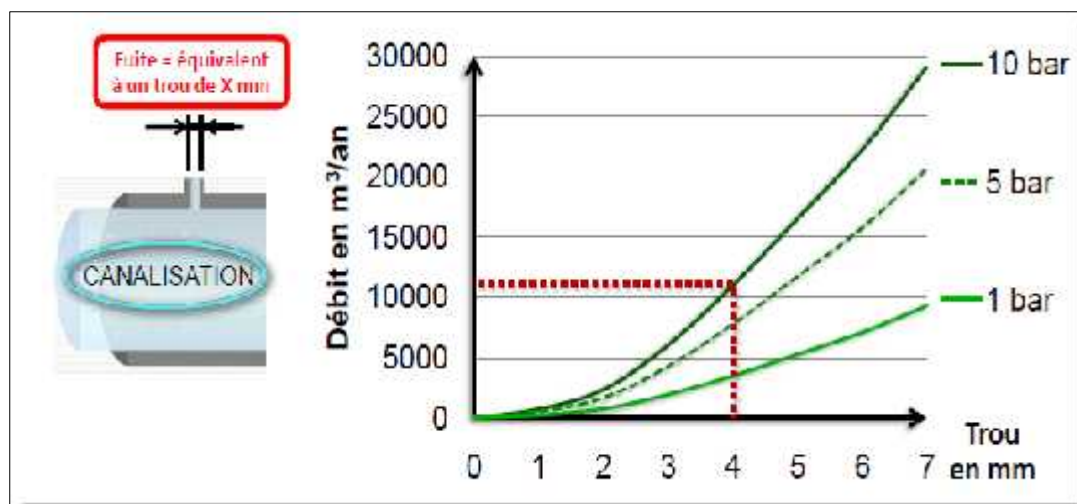


Figure 2.6 : Diagramme de réduire le volume fuite Bayard, 2011.

Exemple :

Le volume d'une fuite annuelle de 4 mm à une pression de 10(bar) est de 11000 m³ soit l'équivalent de 4 piscines olympiques !

3. Influence de la pression sur le débit de fuite : le concept de « FAVAD »

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 donné 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 ».

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 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.

Le terme « **FAVAD** » provient de l'anglais « Fixed and Variable Area Discharge Paths ». **Rozenal**, 2010. Ce concept, via la définition d'un exposant N1, définit la relation entre le débit des fuites et la pression :

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \left\{ \frac{P_1}{P_0} \right\}^{N1} \dots\dots(2.1)$$

Avec Q₀ et Q₁ : le débit de fuite avant et après réduction de la pression.

P₀ et P₁ : la pression avant et après réduction.

La figure 2.7 illustre l'influence de N1 sur l'impact d'une réduction de pression sur le débit de fuite.

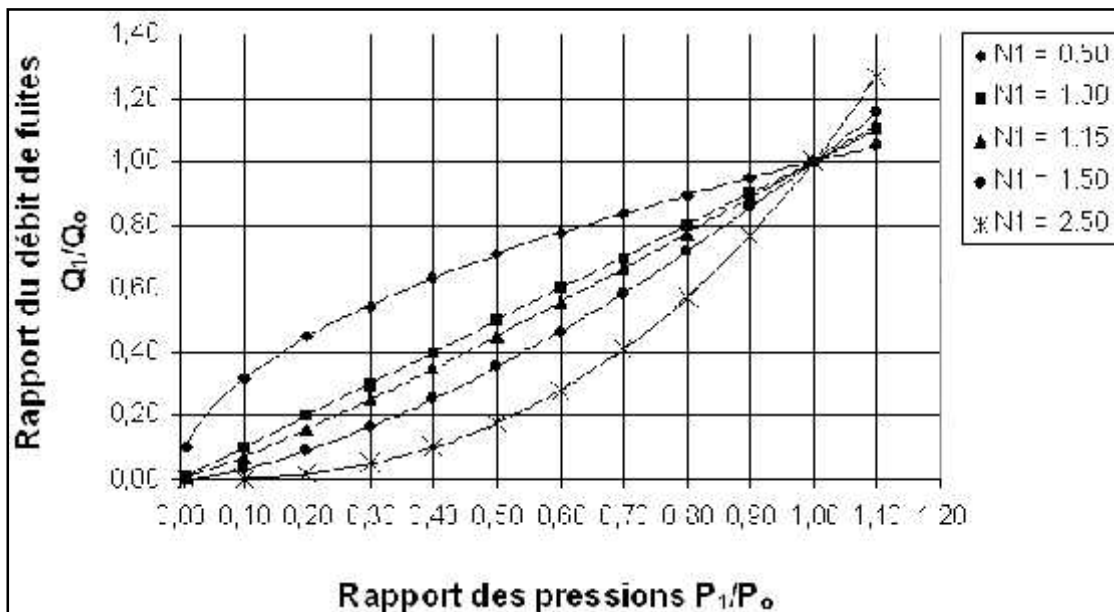


Figure 2.7 : relations entre la pression (P) et le débit de fuite (Q) en fonction de la valeur de N1. **Rozenal**, 2010.

Selon le type de fuites, à savoir la nature du matériau et la forme de la fuite (trous, fissures...), cet exposant N1 varie fortement.

Par exemple, une valeur élevée de $N1$ se traduira par un fort impact d'un changement de pression sur le débit des fuites. A contrario, l'effet sera moins sensible pour un réseau ayant un $N1$ faible. La figure 2.8 illustre la valeur de $N1$ en fonction du type de fuites.

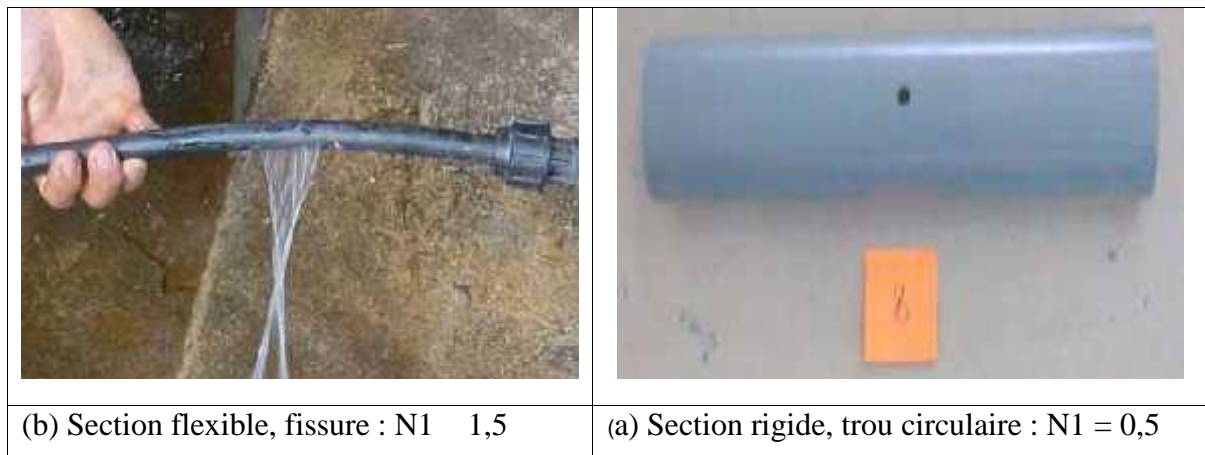


Figure 2.8 : influence du type de matériau et de la section de fuite sur la valeur de $N1$ Rozenal, 2010.

Pour calculer $N1$, il est possible :

- soit de réaliser des mesures de pression et de débit au point moyen et au point critique (Les retours d'expérience internationaux montrent une variation de $N1$ comprise entre 0,36 et 2,95 suivant les réseaux expérimentés).
- soit d'utiliser un logiciel permettant de l'estimer.

4. Indices et Calcul des différentes composantes des pertes physiques le concept de « BABE »

Le concept « BABE » ou « Background and Bursts Estimate » en Anglais consiste à calibrer les relations entre les différentes composantes des pertes physiques. L'estimation des différents types de fuites permettra ensuite d'estimer la fréquence d'intervention économique pour un réseau donné. Les différentes composantes des pertes physiques peuvent, en effet, se classer en 3 catégories (voir ; tableau 2.3) :

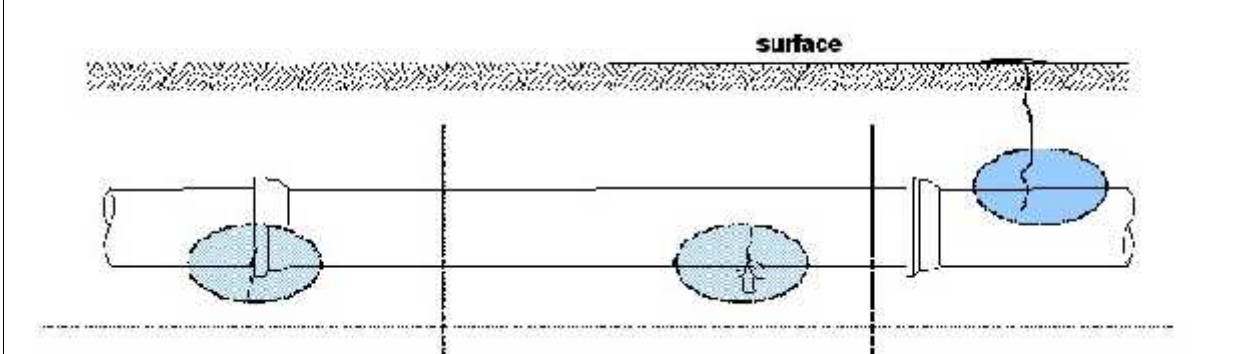
- les fuites invisibles non détectables : généralement de petits débits ;
- les fuites invisibles non détectées : de débits moyens, sur des périodes généralement longues. Elles sont détectables avec les méthodes de recherche de fuites.
- les fuites visibles : de forts débits et de durée généralement courte ;

Pour chaque catégorie, le volume annuel des pertes physiques peut être calculé par typologie de réseaux, telles que :

- ❖ Réservoirs ;
- ❖ Canalisations ;
- ❖ Branchements ;
- ❖ ...

Le nombre de typologie est selon le niveau de complexité souhaité pour le calcul.

Tableau 2.3 : concept « BABE », catégories des types de pertes physiques et leur sensibilité respective aux interventions de réseaux **Thomton, 2003.**



Fuites invisibles non détectables	Fuites invisibles non détectées	Fuites visibles
<p>sensibles à</p> <ul style="list-style-type: none"> - Stabilisation de la pression - Réduction de la pression - Renouvellement - Diminution du nombre de joints et de raccords. 	<p>sensibles à</p> <ul style="list-style-type: none"> - Stabilisation de la pression - Réduction de la pression - Renouvellement - Diminution du nombre de joints et de raccords - Recherche active de fuites. 	<p>sensibles à</p> <ul style="list-style-type: none"> - Stabilisation de la pression. - Réduction de la pression. - Renouvellement - Temps d'intervention

Le volume annuel des pertes physiques est donc la somme des pertes pour chaque catégorie selon la formule suivante :

$$Volume\ Pertes\ Physiques\ Annuel = \left[(débit\ fuites \times durée\ de\ fuites) \right]_{catégorie}$$

Soit :

$$Volume\ Pertes\ Physiques\ Annuel = (Q_1 \times t_1) \text{ fuites invisibles non détectables} + (Q_2 \times t_2) \text{ fuites invisibles non détectées} + (Q_3 \times t_3) \text{ fuites visibles} .$$

A noter qu'il ne s'agit pas seulement de la somme des débits : la durée de la fuite doit être prise en compte également pour le calcul.

Ce temps est estimé par le calcul en tenant compte de la prise de connaissance de la fuite, du temps nécessaire pour la localiser et du temps d'intervention.

Le calcul fourni par le concept « BABE » fournit une estimation du volume des pertes physiques à 20% près (unité : 103 m3/an).

Selon les données de l'IWA et pour une pression moyenne de 50m, le débit minimum d'une fuite représenterait :

- ❖ pour une canalisation : au moins 50 m3/h, ce débit sera influencé par le diamètre de la conduite et le type de matériau utilisé.
- ❖ pour un branchement : 0,25 à 2 m3/h, quel que soit le diamètre et le type de matériau ;

Les fuites invisibles, telles que celles observées au niveau des joints et raccords ainsi que les piqûres de corrosion, auraient un débit inférieur à 0,25 m³/h mais en continu. Elles sont très sensibles à la pression (**FAVAD** : N1 de l'ordre de 1,5) et représente entre 50% et 75% du volume des pertes physiques annuel total.

A noter que le débit au robinet du consommateur est estimé de l'ordre de 0,6 m³/h.

5. L'Impact de la modulation sur la pression et respect du confort de l'abonné

Avec la modulation de pression à la demande, l'abonné conservera un niveau de pression quasi-constant et stable tout au long de la journée.

Tous les bénéfices obtenus par cette méthode se font pendant les heures de faible consommation.

La nuit, la consommation de l'abonné est quasi-nulle. La perte de charge sur le réseau devient nulle également et le niveau de confort de l'abonné peut être abaissé.

En pratique, la perte de charge sur le réseau en fonction de la consommation peut être mesurée par des enregistreurs de pression pendant les jours de plus forte consommation (exemple : vendredi, samedi) **Rozenal**, 2010.

Toutefois si le compteur est équipé avec un réducteur de pression en partie privative, l'impact de la modulation de pression sera négligeable.

6. Des avantages à court-terme et long-terme

Le retour sur investissement est généralement rapide, de l'ordre de 1 à 3 ans si l'on prend en compte les économies d'eau réalisées et la réduction des coûts de détection et réparation de fuites, et cela malgré l'impact sur les ventes d'eau.

Sur le long-terme, la durée de vie des réseaux est prolongée ; les investissements liés au renouvellement peuvent être différés de l'ordre de 5 à 10 ans.

Dès lors que ces 3 effets sont pris en compte (économie d'eau, réduction du nombre d'interventions et renouvellement différé), la mise en place de système de modulation de pression se trouve aisément justifiée

Conclusion

Le retour sur investissement de la modulation de pression selon la demande est généralement rapide, de l'ordre de 1 à 3 ans si l'on prend en compte les économies d'eau réalisées et la réduction des coûts de détection et réparation de fuites, et cela malgré l'impact sur les ventes d'eau. Le retour d'expérience en France montre qu'une diminution de pression d'environ 20% au point moyen entraîne une baisse de 15% environ des volumes mis en distribution ainsi qu'une réduction de plus de 25% des débits de nuits.

Sur le long-terme, la durée de vie des réseaux est prolongée ; les investissements liés au renouvellement peuvent être décalés de l'ordre de 5 à 10 ans.

Dès lors que ces 3 effets sont pris en compte (économie d'eau, réduction du nombre d'interventions et renouvellement différé), la mise en place de système de modulation de pression se trouve aisément justifiée.

Une politique efficace de réduction des pertes serait donc de :

- Mettre en place un système de modulation de la pression selon la demande ;
- Mesurer périodiquement les débits de nuit par secteur étanche localisé ;
- Suivre et Entretien les appareils de modulation de pression.

CHAPITRE 03

ALGORITHME GENETIQUE ET DIFFERENTES METHODES D'OPTIMISATION

Introduction

L'optimisation est une branche des mathématiques cherchant à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consiste à déterminer le meilleur élément d'un ensemble au sens d'un critère qualitatif donné. De nombreuses recherches, théoriques et pratiques lui sont consacrées.

On distingue deux approches :

La première est dite déterministe à savoir que les algorithmes de recherche utilisent toujours le même cheminement pour arriver à la solution, et on peut donc déterminer à l'avance les étapes de la recherche.

La deuxième est dite aléatoire c'est à dire que pour des conditions initiales données, l'algorithme ne suivra pas le même cheminement pour aller vers la solution, et peut même proposer des résultats différents.

Les algorithmes évolutionnaires représentent un outil important pour la résolution des problèmes d'optimisation. D'ailleurs, ils sont de plus en plus utilisés dans de multiples domaines. Ils sont faciles à mettre en œuvre et fournissent d'excellentes performances avec des coûts faibles.

Pour notre travail, nous optons pour l'algorithme de recherche aléatoire de type évolutionnaire ; ceux-ci représentent un outil important pour la résolution des problèmes d'optimisation. Ils sont de plus en plus utilisés dans de multiples domaines.

1. Historique

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation basée sur des techniques tirées de la théorie de l'évolution naturelle de Darwin (1859) et des travaux de Mendel (1865) sur la génétique. Cette classe d'algorithmes, appelée aussi algorithme évolutionnaire, appartient à la famille des méta-heuristiques qui ont pour objectif la résolution, en un temps raisonnable, d'un problème d'optimisation à qui les méthodes déterministes ne répondent pas. Ces méthodes reposent sur l'évolution d'une population de solutions qui, sous l'action de règles précises, optimisent un comportement donné.

Dans son livre « De l'origine des espèces par voie de sélection naturelle », Charles Darwin développa les premiers principes de la théorie de l'évolution. D'après lui, l'évolution des systèmes vivants au cours des générations s'opère en deux étapes : la sélection et la reproduction.

La sélection naturelle est un opérateur au niveau des populations qui mène à la mort sélective des plus faibles et la survie des individus les mieux adaptés à leur environnement.

La reproduction est un opérateur de modifications successives aux individus de la population par mutation et recombinaison, chose qui entraîne une grande diversité entre deux populations d'une même espèce.

D'autre part, le fondateur de la génétique John Mendel (1865) expliqua les lois de transmission des caractères à travers des générations dans le cadre d'une reproduction. Ces caractères héréditaires codés dans des **gènes** sont localisés dans le **génome** qui est le patrimoine génétique de chaque **individu**. La combinaison de deux **parents** du génome par des mécanismes de croisement et

mutation fait engendrer deux **enfants** « individu » distincts possédant des traits propre à chaque parent. Ces deux théories ont fait inciter les chercheurs qui ont développé, pour la résolution des problèmes d'optimisation, des méthodes basées sur les principes cités dessus **Autin, 2006**.

2. Problèmes d'optimisation

2.1 Définition

Commençons par rappeler ce que veut dire le terme « optimisation ». Selon le sens mathématique du terme, l'optimisation d'une fonction mathématique $f(s)$ où $S \subseteq \mathbb{R}^n$, ensemble de solutions de la fonction f consiste à trouver $S_0 \subseteq S$, dite solution optimale, tel que $\forall s \in S$ **Hlioui, 2008**.

- Pour un problème de minimisation $f(s_0) = \min_{s \in S} f(s)$.
- Pour un problème de maximisation $f(s_0) = \max_{s \in S} f(s)$.

Cette fonction, appelée la fonction objectif (fitness), représente une mesure quantitative de la qualité des solutions.

Un exemple très connu est le problème de voyageur de commerce (en Anglais TSP pour Travelling Sales man Problème) **Lawler, et al, 1985**. qui consiste à trouver le tour minimal que peut traverser un voyageur en parcourant toutes les villes. L'une des applications la plus importante de ce problème d'optimisation est la conception de circuits des systèmes informatiques. La fonction de coût dans ce cas est la longueur du câblage. Les longues lignes diminuent la vitesse du circuit électrique, ce qui ralentit la vitesse de l'ordinateur.

Jusqu'aujourd'hui, Il n'y a pas encore un algorithme qui trouve le tour le plus court du TSP ou la longueur du câblage dans la conception d'un circuit dans un temps polynomial de N , où N est la taille du problème. Quand N augmente, la complexité du calcul augmente exponentiellement et elle sera supérieure à la limite de la puissance du calcul de l'ordinateur. Ce type de problèmes s'appellent «les problèmes difficiles ou complets et sont non déterministes en temps Polynomial (NP-difficile ou NP-complet)». Les chercheurs dans le domaine affirment qu'il n'existe pas d'algorithme qui donne une solution à un problème NP-difficile (NP-hard) dans un temps polynomial. Par conséquent, on dispose d'algorithmes approximatifs qui donnent une solution approximative ou une solution exacte avec une certaine probabilité dans un temps polynomial **Talbi, 2009**.

2.2 Types d'optimisation

2.2.1 Optimisation mono-objectif

On dit qu'un problème d'optimisation est mono-objectif lorsque un seul critère est donné où le but principal est de trouver la solution optimale globale : meilleure valeur (plus grande ou plus petite) de la fonction mono-objectif.

Exemple :

On considère la fonction mono-objectif suivante :

$$\begin{cases} \text{Minimiser } f(x) = (x-3)^2 + 1. \\ 0 \leq x \leq 5. \end{cases}$$

On voit facilement dans le graphe suivant la solution optimale qui est $x=3$.

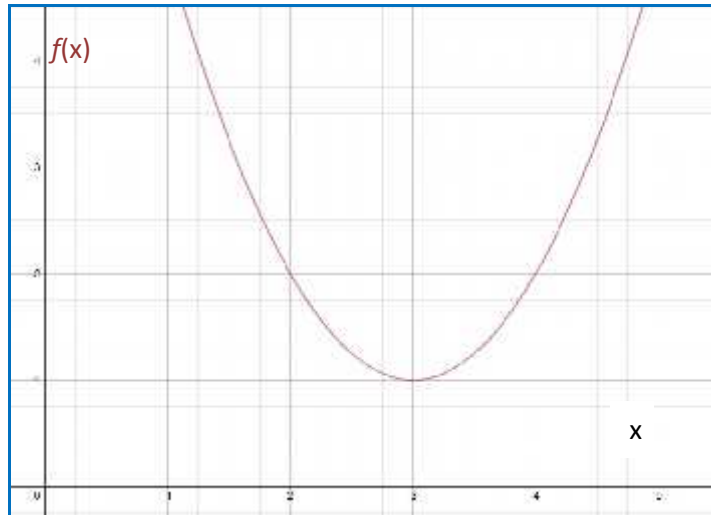


Figure 3.1 : Exemple de problème mono-objectif

2.2.2 Optimisation multi objectif

L'optimisation multi objectif permet de modéliser des problèmes réels faisant intervenir de nombreux critères (souvent conflictuels) et contradictoires. Dans ce contexte, la solution optimale recherchée n'est plus un simple point, mais un ensemble de bons compromis satisfaisant toutes les contraintes **Barichard, et Hao Jin-Kao, 2003**.

Exemple :

On considère le problème d'optimisation multi objectif suivant :

$$\begin{cases} \text{Minimiser } f(x) = x^2 \\ \text{Minimiser } g(x) = (x-1)^2 \\ -2 \leq x \leq 2 \end{cases}$$

On voit dans le graphe suivant qu'on peut :

- minimiser la fonction f si $x=0$.
- minimiser la fonction g si $x=1$.

Mais pour minimiser les deux fonctions au même temps il n'existe pas un optimum commun entre les deux fonctions, donc les solutions optimales sont entre $[0,1]$

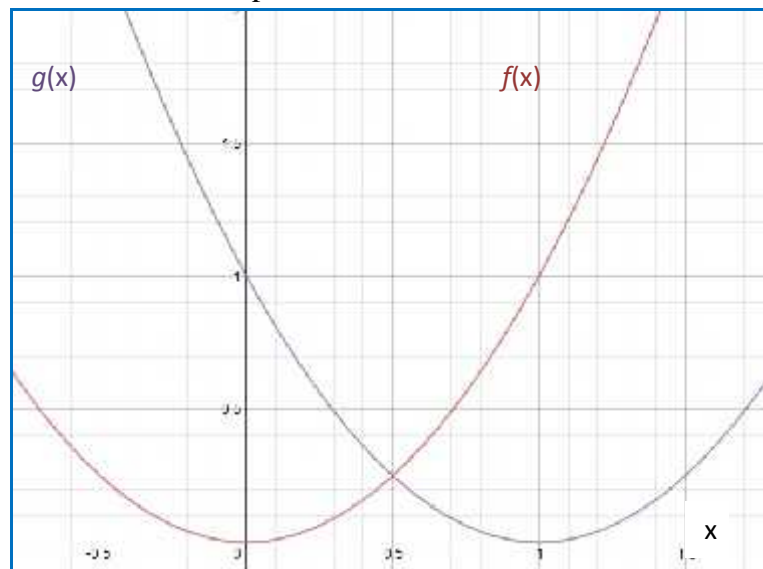


Figure 3.2 : Exemple de problème multi-objectif **Barichard, et Hao Jin-Kao, 2003**.

2.2.3 Optimisation dynamique

L'optimisation dynamique consiste à minimiser ou maximiser une fonction objectif qui varie en fonction du temps. En pratique, l'optimisation dynamique peut être appliquée, par exemple, pour déterminer de bonnes manœuvres dans le domaine aéronautique, pour le contrôle de robots, de réactions chimiques, les bourses économiques, pour le routage dans les réseaux, **Lepagnot, 2011**.

Par rapport à l'optimisation statique, des difficultés supplémentaires apparaissent. Par exemple, les informations que l'algorithme a pu accumuler sur le problème, au cours de son exécution, peuvent être « périmées » à l'issue d'un changement dans la fonction objectif. La résolution d'un problème dynamique consiste à redémarrer un algorithme d'optimisation statique, à chaque fois qu'un changement se produit dans la fonction objectif. En pratique, ces méthodes sont très difficiles à mettre en œuvre. **Lepagnot, 2011**.

3. Les méthodes d'optimisation

3.1 Les méthodes déterministes

Ces méthodes sont généralement adoptées quand la fonction à optimiser est rapide et de forme connue. La connaissance du domaine de variation par localisation graphique ou par discrétisation fine de l'espace de recherche est une étape importante pour éviter les optima locaux (Figure 3.3) et pour réduire le temps de calcul **Hlioui, 2008**.

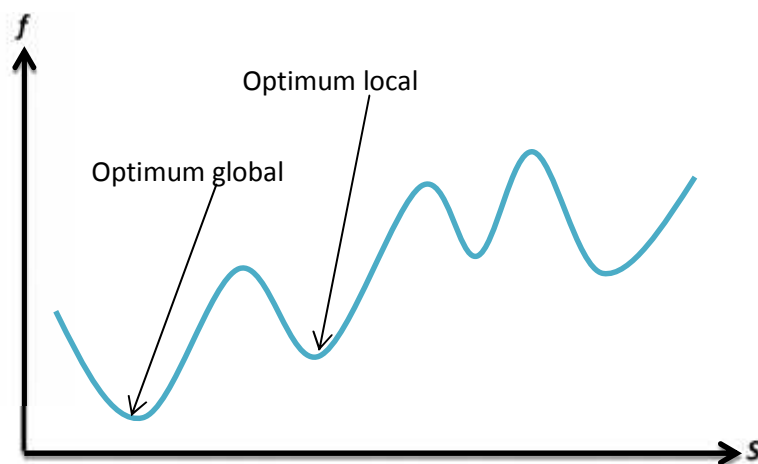


Figure 3.3 : Une fonction objectif à plusieurs optima (minimisation) **Hlioui, 2008**.

3.2 Les méthodes non-déterministes

Dans plusieurs problèmes d'optimisation, nous nous trouvons confrontés à des critères d'optimisation non dérivables et non convexes. De plus, les paramètres d'optimisation peuvent être de nature différente (réels, entiers, booléens ...) ainsi les contraintes à assurer ne sont pas forcément linéaires. Donc, il a été nécessaire de développer des algorithmes robustes et adaptables à de telles problématiques. Parmi ces algorithmes se situent les méthodes stochastiques, où l'aléatoire prend de la place pour balayer le domaine de recherche de (s) solution (s) optimale (s) du problème **Hlioui, 2008**.

4. Les algorithmes évolutionnaires (génétiques)

Les algorithmes génétiques sont des méthodes basées sur les mécanismes biologiques tels que les lois de Mendel et sur le principe fondamental de sélection. Holland [10] exposa les principes de ces algorithmes pour permettre aux ordinateurs d'imiter les êtres vivants en évoluant pour rechercher la solution à un problème. Il expliqua d'abord comment ajouter de l'intelligence dans un programme informatique avec les croisements (échange du matériel génétique) et la mutation (source de la diversité génétique). Dans ce système, on peut comparer les solutions du problème à des chromosomes, qui sont constituées d'une suite de gènes, chaque gène étant associé à une série de bits **Autin, 2006**.

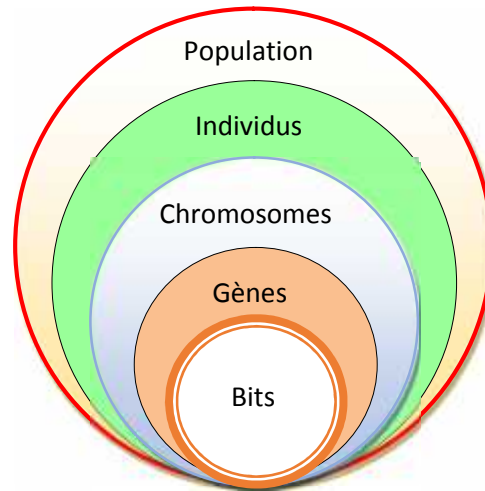


Figure 3.4 : Les cinq niveaux de l'algorithme génétique **Autin, 2006**.

Nous parlerons donc d'individus, qui sont les solutions (complètes, ou partielles). L'ensemble des individus forme une population, que nous ferons évoluer pendant une certaine succession d'itérations appelées générations, jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit vérifié. Pour passer d'une génération à une autre, nous soumettons la population à des opérateurs de sélection. Les opérateurs de variation, eux, permettront de transformer la population, de façon à favoriser l'émergence de meilleurs individus.

La fonction de performance (fitness) que l'algorithme génétique cherche à maximiser ou minimiser, représente la capacité d'adaptation des individus au problème considéré **Autin, 2006**.

4.1 Principe général de l'algorithme

L'algorithme génétique (AG) repose sur l'enchaînement des étapes de sélections et des de croisements. Au début, à partir d'une population de N individus, on choisit ceux autorisés à se reproduire. On croise ensuite ces derniers, de façon à obtenir une population d'enfants, tout en mutant aléatoirement certains gènes (voir Figure 3.5).

La performance des enfants est évaluée, grâce à la fonction fitness, et l'on désigne, dans la population totale résultante parents + enfants, les individus autorisés à survivre, de telle manière que l'on puisse répartir d'une nouvelle population de N individus. Le processus se répète, et l'on recommence une phase de sélection pour la reproduction, une phase de mutation, et ainsi de suite, un critère d'arrêt permet de sortir de la boucle, par exemple un certain nombre d'itérations sans amélioration de la performance des individus **Autin, 2006**.

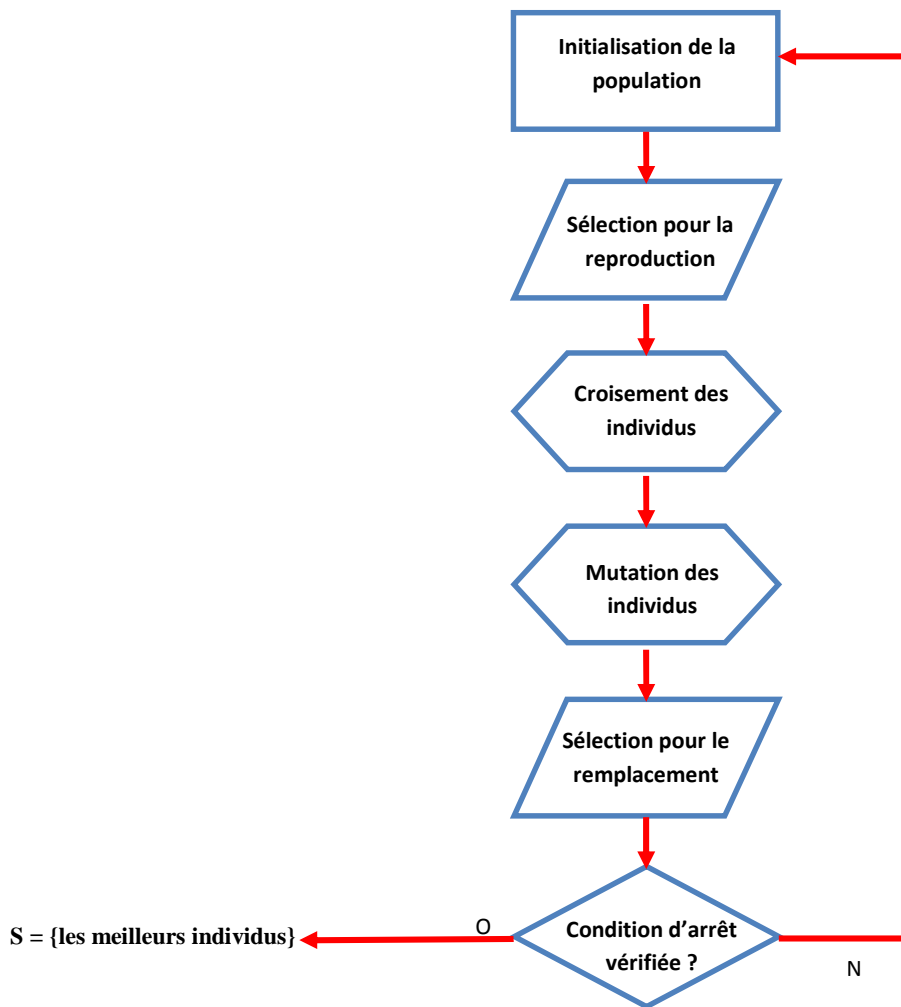


Figure 3.5 : Organigramme d'un Algorithme Génétique

4.2 Les Opérateurs génétiques :

4.2.1 la sélection

Il y a deux étapes de sélection : l'une pour déterminer quels seront les n éléments, parmi les μ individus de la population totale qui vont se reproduire entre eux, et former enfants. Et une seconde étape pour déterminer quels sont ceux qui vont survivre. Ces nombres μ , n et sont des paramètres de l'algorithme, fixés par l'opérateur, qui peuvent conduire à différents scénarios **Autin, 2006**.

- **Sélection déterministe** : c'est la méthode de sélection la plus simple à mettre en œuvre, puisqu'elle consiste à choisir les n meilleurs individus parmi la population, n étant un paramètre fixé (égal à la moitié de la population par exemple). Elle présente l'inconvénient de conserver les éléments ayant une mauvaise performance, si la performance de la population est globalement mauvaise **Autin, 2006**.

- **Sélection par tournois** : l'idée principale est de sélectionner aléatoirement un nombre k d'individus dans la population, et de choisir parmi eux celui qui a la meilleure performance. On organise autant de tournois qu'il y doit y avoir d'individus à sélectionner. On peut décider de faire des tirages avec, ou sans remise. Dans le tirage sans remise l'individu qui a une performance élevée il ne sera pas pris en compte pour le deuxième tour qui permet d'éviter de favoriser excessivement un individu **Autin, 2006**.
- **Sélection proportionnelle** : dans la méthode proportionnelle, le nombre espéré de sélections d'un individu est proportionnel à sa performance. Pour expliciter cela, imaginons une roulette de casino, qui comporterait autant de cases que d'individus, et dont la taille des cases serait proportionnelle à la performance des individus. Chaque sélection est alors déterminée par le lancer d'une bille sur la roulette **Autin, 2006**.

Ainsi, avec une population de quatre individus, dont les valeurs de performance seraient de 250, 500, 50 et 400, on obtiendrait la roulette suivante :

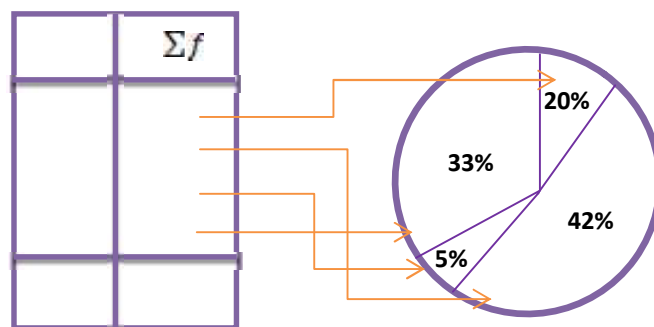


Figure 3.6: Exemple d'une roulette de sélection proportionnelle **Autin, 2006**.

La sélection proportionnelle risque cependant de favoriser excessivement un très bon individu au détriment des autres. Pour éviter cela, on peut se contenter d'un seul tirage aléatoire, qui fixe le premier élément sélectionné, les autres étant déterminés à partir de la position du premier, selon une succession de points équidistants **Autin, 2006**.

4.2.2 Le croisement

Les opérateurs de croisement génèrent des nouveaux individus à partir de plusieurs (un couple, le plus souvent) **Autin, 2006**.

On distingue les croisements suivants

- **Croisement à un point**



- **Croisement à deux points**



- **Croisement uniforme**

0 1 1 0 0 0 1 0



4.2.3 La mutation

Dans la mutation, on modifie à un pas de temps aléatoire, avec une faible probabilité, les gènes des enfants. Les gènes d'un individu seront inversés (un 0 devient un 1, et vice et versa). Ce nombre de bits modifiés peut être fixe, ou choisi aléatoirement. La mutation permet bien sûr d'introduire de la variété dans la population, et explorer davantage l'espace de recherche, mais si la mutation s'applique trop souvent, l'algorithme génétique revient à faire une marche aléatoire dans l'espace des solutions **Autin, 2006**.

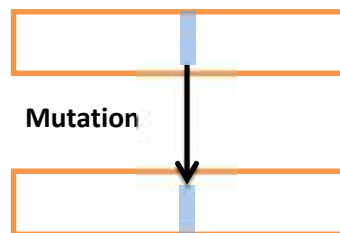


Figure 3.7 : Exemple d'une mutation binaire

4.3 Avantages et inconvénients

Le grand avantage des algorithmes génétiques est qu'ils trouvent de bonnes solutions sur des problèmes très complexes. On les emploie dans les domaines où un grand nombre de paramètres entrent en jeu, et où l'on a besoin d'obtenir de bonnes solutions en quelques itérations seulement – dans les systèmes de régulation de transport en temps réel par exemple **Autin, 2006**.

Néanmoins, les algorithmes génétiques sont coûteux en temps de calcul, puisqu'ils manipulent plusieurs solutions simultanément. Ainsi, l'ajustement d'un algorithme génétique est délicat. L'un des problèmes les plus caractéristiques est celui de la *dérive génétique*, qui fait qu'un bon individu se met, en l'espace de quelques générations, à envahir toute la population. On parle dans ce cas de convergence prématurée, qui revient à lancer à une recherche locale autour d'un minimum local qui n'est pas forcément l'optimum attendu. Un autre problème surgit lorsque les différents individus se mettent à avoir des performances similaires : les bons éléments ne sont alors plus sélectionnés, et l'algorithme ne progresse plus **Autin, 2006**.

5. Fonctionnement des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques fournissent des solutions aux problèmes n'ayant pas de solutions calculables en temps raisonnable de façon analytique ou algorithmique.

Selon cette méthode, des milliers de solutions (génotypes) plus ou moins bonnes sont créés au hasard puis sont soumises à un procédé d'évaluation de la pertinence de la solution mimant l'évolution des espèces : les plus "adaptés", c'est-à-dire les solutions au problème qui sont les plus optimales survivent davantage que celles qui le sont moins et la population évolue par générations successives en croisant les meilleures solutions entre elles et en les faisant muter, puis en relançant ce procédé un certain nombre de fois afin d'essayer de tendre vers la solution optimale.

Le mécanisme d'évolution et de sélection est indépendant du problème à résoudre, seules changent trois fonctions :

- La fonction qui s'occupe de représenter le problème en codant chaque information caractérisant une solution possible selon un codage bien particulier, chaque information représente alors un gène et toutes les valeurs que peuvent prendre cette caractéristique représentent les allèles possibles pour ce gène, et en concaténant tous ces gènes pour obtenir un chromosome qui lui représente une solution dans son intégralité.

- La fonction inverse qui à partir d'un chromosome permet d'obtenir une solution par décodage du génome.

- La fonction qui évalue l'adaptation d'une solution à un problème, sa pertinence. Cette technique est d'application générale.

En effet, quand on utilise les algorithmes génétiques, aucune connaissance de la façon à utiliser pour résoudre le problème n'est requise, il est seulement nécessaire de fournir une fonction permettant de coder une solution sous forme de gènes (et donc de faire le travail inverse) ainsi que de fournir une fonction permettant d'évaluer la pertinence d'une solution au problème donné.

Cela en fait donc un modèle minimal et canonique pour n'importe quel système évolutionnaire et pour n'importe quel problème pouvant être abordé sous cet angle, sous ce paradigme.

Cette représentation nous permet donc d'étudier des propriétés quasiment impossibles à étudier dans leur milieu naturel, ainsi que de résoudre des problèmes n'ayant pas de solutions calculables en temps raisonnables si on les aborde sous d'autres paradigmes, avec des performances quantifiables, facilement mesurables et qu'on peut confronter aux autres stratégies de résolution. **(Radet, 2004)**

6. Applications

Ayant été reconnue comme une approche valide des problèmes nécessitant une exploration performante et économique du point de vue calcul, les algorithmes génétiques sont maintenant appliqués plus largement, aux domaines des affaires, à la recherche scientifique en général, ainsi que pour l'industrie. Les raisons de ce nombre grandissant d'applications sont claires. Ces algorithmes sont simples d'un point de vue de calcul, cependant très performants dans leur recherche d'amélioration.

Conclusion

Ce chapitre a établi les fondations nécessaires à la compréhension des algorithmes génétiques, de leurs mécanismes et de leur puissance, on a présenté les différentes méthodes d'optimisation. Tout d'abord, on a donné une définition au problème d'optimisation. Puis on a classé l'optimisation en trois types: mono-objectif, multi-objectif et l'optimisation dynamique.

En outre: on trouve aussi l'application des A.G dans l'optimisation des réseaux (câbles, fibres optiques, gaz), optimisation de fonctions numériques difficiles, ainsi que les réseaux d'eau, etc.

Dont notre travail l'outil développé est un programme assurant l'interfaçage entre le logiciel de modélisation hydraulique EPANET et le logiciel de calcul mathématique MATLAB permettant d'appliquer les algorithmes génétiques sous MATLAB. La fonction fitness (objective) et la fonction de contraintes non linéaires seront donc calculées à travers des simulations sous EPANET. Cet outil permet de représenter le problème de minimisation de débits de fuites par la modulation sous forme d'un problème d'optimisation non linéaire

Le détail d'application des AG pour notre cas sera abordé dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE 04

METHODOLOGIE ET CONCEPTION DE L'OUTIL

Introduction

Le programme développé dans ce travail se repose sur le couplage entre un logiciel de calcul mathématique Matlab avec un logiciel de simulation hydraulique Epanet. Ce couplage est assuré par le biais de la bibliothèque de liens dynamiques DLL (EN2Toolkit) permettant d'apporter des modifications sur le modèle hydraulique sous Epanet à partir d'un programme sous MATLAB.

L'outil proposé vise l'optimisation des consignes de modulation en utilisant un algorithme génétique. La fonction objective (coût) ciblée par ce programme est le débit de fuite. La fonction objective est évaluée à travers la simulation sous Epanet du comportement du réseau calé. Les résultats obtenus après l'exécution du programme sont les consignes de modulation engendrant une pression optimale et un débit de fuites minimum.

1. Présentation d'EN2Toolkit

EN2Toolkit (EPANET Programmer's Toolkit) est une bibliothèque de liens dynamiques (DLL) de fonctions qui permet aux développeurs de personnaliser le moteur de calcul EPANET pour leurs propres besoins. Les fonctions peuvent être intégrées dans des applications de Windows écrit en C / C ++, Delphi, Pascal, Visual Basic, ou tout autre langage qui peut appeler des fonctions dans une DLL Windows comme c'est le cas de Matlab Il s'agit d'une bibliothèque de fonctions sous forme d'un fichier de type ".dll" (Dynamic Links Library ou bibliothèque de liens dynamiques). Ce type de fichier est connu dans le monde informatique par son rôle primordial dans l'échange dynamique des données (Dynamic Data Exchange ou DDE). Cela se fait en mettant des fonctions externes pouvant être exploitées par des logiciels autres que l'originaire. En introduisant les différentes fonctions présentes sur EN2Toolkit dans des boucles et des instructions conditionnelles sous Matlab, nous arrivons à faire tous les calculs hydrauliques nécessaires (calcul des pressions et des débits par exemple) et récupérer leurs résultats à partir du langage utilisé (pour notre cas à partir de Matlab).

Il faut assurer que tous les fichiers « epanet2.dll » et « epanet2.h » Sont dans le répertoire de travail de Matlab c.à.d. où le programme est enregistré, ainsi que le modèle du réseau à étudier en extension (.inp) .L'utilisation typique des fonctions d'EPANET toolkit pour analyser un système de distribution est la suivante :

1. L'utilisation de la fonction ENopen pour ouvrir EPANET toolkit, avec un fichier d'entrée PANET (.inp).
2. Employer la série de fonctions ENsetxxx pour changer des caractéristiques choisies du modèle.
3. Effectuer une simulation hydraulique en utilisant la fonction d'ENSolveH (qui sauvegarde automatiquement les résultats dans un fichier ou bien l'utilisation de la série des fonctions ENopenH- ENinitH- ENrunH - ENnextH- ENcloseH pour une simulation hydraulique, qui donne un accès aux résultats le long de la simulation avec la série de fonctions d'ENgetxxx.
4. Effectuer une simulation de la qualité de l'eau en utilisant la fonction d'ENSolveQ (qui sauvegarde automatiquement les résultats dans un fichier ou bien l'utilisation de la série des fonctions ENopenQ, ENinitQ, -ENrunQ, ENnextQ, ENcloseQ, pour une simulation hydraulique, qui donne un accès aux résultats le long de la simulation avec la série de fonctions d'ENgetxxx.
5. Utiliser la fonction ENreport pour écrire un fichier de rapport.

6. Appeler la fonction ENclose pour fermer tous les fichiers.

2. Modélisation du comportement hydraulique des fuites.

Le calcul des différents débits de fuite (avant et après modulation de pression) repose principalement sur des rapports entre les volumes mis en distribution et les volumes réellement consommés ou facturés. Si l'un des grandeurs est mal évalué, ces débits n'auront plus de signification pratique et ne peuvent aider les gestionnaires en termes de prise de décision.

2.1 Les causes des fuites

Les causes les plus communes de s 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 4. 1 : fournit l'explication des causes des fuites (CNRC 2003) :

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.
	Age du tuyau	Les effets de la dégradation du tuyau deviennent plus visibles avec l'âge.
Environnemental	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 ou de solvants dans le sol risque de causer une certaine détérioration des tuyaux.
	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.
Opérationnel	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'acquies 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.

2.2 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 :

$$\text{Rendement } R(\%) = \frac{C}{D} \times 100 \dots\dots(4.1)$$

Et les pertes se définissent comme suit :

$$P(\%) = \left(\frac{D - C}{D} \right) \times 100 \dots\dots(4.2)$$

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 $R = 0.50$.

2.3 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 :

$$\text{ILP} = \frac{\text{Débite de perte en distribution}}{\text{Linéaire du réseau}} \text{ m}^3/\text{j}/\text{km} \dots\dots(4.3)$$

Le rendement du réseau et l'indice de pertes permettent d'apprécier l'état du réseau. La méthode d'intervention par la gestion de la pression est la plus appropriée pour réduire le volume des pertes réelles.

La gestion optimale de la pression pour le contrôle des fuites (Manuel 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.

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.

3. 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 donné par Thornton et al, 2003, «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 ».

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 et sans identifier ou réparer une seule fuite.

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.

3.1 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 $Q = c.P^N$. Cette relation s'inscrit dans le prolongement de la relation hydraulique normale de flux à partir d'un orifice fixe de section A sous une charge statique H où le débit est proportionnel à la racine carrée de la pression $N = 0,5$.

$$Q = C_d A \sqrt{2 g H} \dots\dots(4.4)$$

Où, C_d , représente le coefficient de décharge, A, la section de l'orifice, C représente le coefficient de débit, g l'accélération de la pesanteur et H la charge de pression qui en règne (en mCE).

Plusieurs études ont toutefois montré que les fuites provenant de nombreux systèmes de distribution impliqueraient une valeur de N supérieure à 0,5 et souvent supérieure à 1. Une étude de (May1994; Lambert 2004) 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 FAVA D (Fixed And Variable Area Discharges).

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 prédite.

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 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 :

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^N \dots\dots\dots(4.5)$$

Donc, si la pression est réduite de P₀ à P₁, le débit de fuites se réduit de Q₀ à Q₁, et l'ampleur de la réduction dépend de l'exposant N.

La valeur de l'exposant N dans l'équation (4.5) a un effet direct sur la réduction de la fuite par la modulation de la pression. La figure 4.1 fournit la correspondance entre la réduction de pression ΔP et la diminution du débit de fuite ΔQ pour différentes valeurs de N.

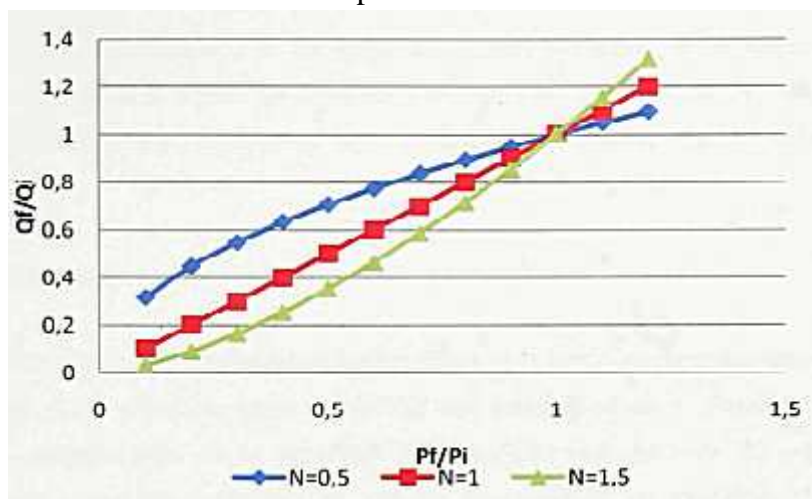


Figure 4.1 : Le taux de réduction du débit de fuite en fonction du taux de réduction de la pression **Ryma, 2010**.

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.

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

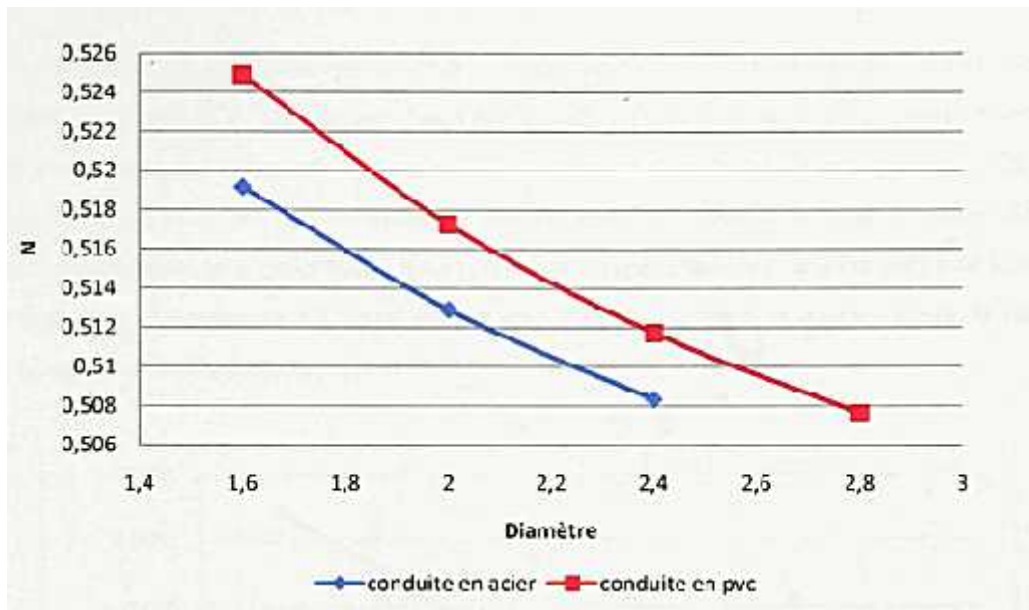


Figure 4.2 : Les valeurs de N (pour les deux conduites PVC et Acier) en fonction du diamètre Ryma, 2010.

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus :

Tableau 4. 2 : Les valeurs de N pour différents diamètres d'orifice- conduite en acier et en PVC Ryma, 2010.

Diamètre de la fuite En (mm)	Exposant de fuite pour les matériaux de conduites N.	
	Acier	PVC
1.6	0,5248625	0.51914091
2	0,51725638	0.51290284
2.4	0,511702266	0.50832924

3.2 L'exposant de fuites dans le modèle hydraulique

Dans la plus part des outils de modélisation hydraulique des réseaux sous pression, notamment EPANET, la modélisation des écoulements au travers les systèmes d'irrigation ou le calcul des débits d'incendie aux nœuds (écoulement disponible à une certaine pression résiduelle au niveau du nœud) ou le débit sortant d'un orifice quelconque est possible par l'utilisation des coefficients de l'émetteur et de décharge localisés dans les nœuds de consommation. Les fuites le sont en effet également si ces deux coefficients peuvent être estimés.

Le débit au travers un orifice est, dans les outils de modélisation hydraulique, exprimé par la formule suivante : $Q = c.P^N$

De même donc que les consommations, les fuites sur les conduites ne seront représentées qu'au niveau des nœuds. Ce qui fait éloigner légèrement la réalité du terrain si les conduites ont des longueurs importantes et présentant aussi des pertes de charge élevées.

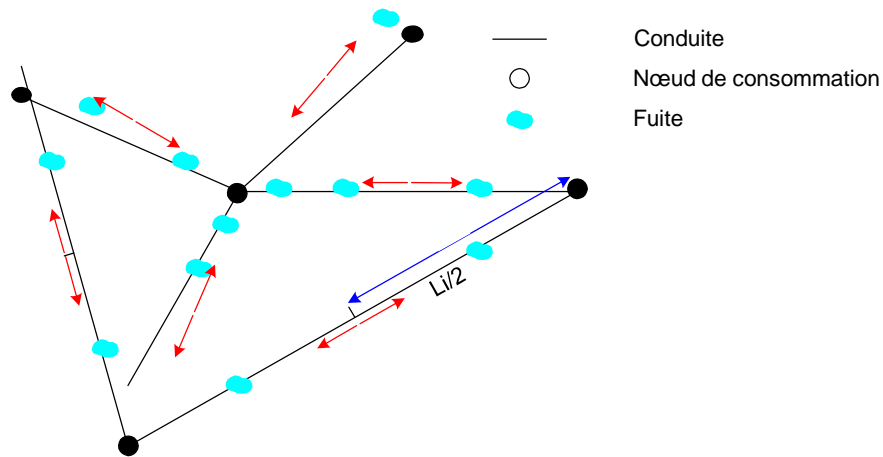


Figure 4.3 : Représentation de la répartition des fuites par rapport à la longueur des conduites sur les nœuds de consommation. **Guesmia, 2011.**

La valeur de l'exposant N et C peut être obtenue à partir des essais dans les réseaux de distribution.

3.3 Les vannes de modulation dans le modèle hydraulique.

Les vannes de modulation de pression, de type stabilisatrice de pression aval à pilote, ce type de vannes garantit une pression aval constante quel que soit la demande ou la pression en amont, le pilote de modulation est équipé d'un contrôleur électronique (Modulo) alimenté par une batterie, permettant de modifier la consigne de pression en fonction du débit délivré ou bien d'un profil horaire. Nous avons choisi l'insertion d'un type réel de vannes (qui existe dans le terrain) comme Un stabilisateur aval dans notre modèle, cette option se trouve dans le menu « type de vanne » dans EPANET :

Propriété	Valeur
*ID Vanne	19
*Nœud Amont	14
*Nœud Aval	17
Description	
Genre	
*Diamètre	400
*Type de Vanne	Stab. Aval
*Consigne	Stab. Aval
Coeff. Perte Charge	Héd. Pression
Frat Préréglé	Régl. Débit
Débit	Usage Général
Vitesse	0,20
Perte de Charge	24,44
Qualité	0,00
Frat	Acid

Figure 4.4 : vanne stabilisatrice aval dans EPANET **Mahboub, 2011.**

Une vanne stabilisatrice aval limite la pression au nœud en aval. *EPANET* calcule à chaque instant de simulation dans quel état se trouve la vanne. Il y a trois états possibles :

- ❖ Partiellement ouverte (c'est-à-dire, en régulation) pour maintenir une pression avale correspondante à la consigne donnée, quand la pression en amont est plus élevée que la pression de la consigne ;
- ❖ Entièrement ouverte si la pression en amont est au-dessous de la consigne souhaitée ;
- ❖ Fermée, si la pression en aval dépasse celle du côté amont (autrement dit, la vanne ne permet pas l'inversion d'écoulement).

Les commandes sont des instructions qui déterminent comment le réseau est géré pendant la simulation, dans notre modèle on a programmé les vannes stabilisatrices avales par des commandes simples, en lui attribuant les consignes de pression selon un profil horaire.

La figure suivante présente l'éditeur de commandes avec les consignes appliquées au modèle.



Figure 4.5: Editeur de commandes d'EPANET Mahboub, 2011.

Tableau 4.3 : exemple de commande simple appliqué à notre modèle Mahboub, 2011.

Commende	signification
LINK stab_Bologhine 48 AT TIME 09:00	Mettre la consigne de pression de la vanne stab_Bologhine à 48m ,9 heures après le début de la simulation.

Le principe des AG et la méthodologie de leur application pour notre cas d'étude sera détaillée dans ce qui suit.

4. Formulation du problème de réduction de débit de fuite par la modulation de pression d'un réseau de distribution d'eau potable.

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.

Dans ce mémoire nous nous intéressant à l'optimisation de la courbe de modulation de pression pour minimiser le débit de fuites dans le réseau.

4.1 Objectif de la recherche

L'objectif de la recherche est de bien cerner la réduction des fuites par le procédé de la modulation de 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. La méthode sera proposée dans ce que suit tenant compte l'optimisation des consignes de modulation et les pressions minimale optimale au point critique.

4.2 Hypothèses :

Les hypothèses que nous émettons pour la simplification de la modélisation du problème sont les suivantes :

- ✓ Nous supposons que les résultats de calage manuelle du modèle sont fiables, ces résultats sont reliaer directement avec les mesures effecteurs sur le terrain (les pressions aux nœuds de calage et le débit mesuré à la sortie du réservoir).
- ✓ La deuxième hypothèse concerne la validité des données disponibles au niveau du service d'eau (notamment le **SIG** (Système d'Information Géographique)) : Il est supposé que les données représentent fidèlement la disposition et la structure géométrique du réseau étudié (longueurs de conduites, diamètres, altitudes des nœuds,...) ;
- ✓ Le débit de fuites sera considéré variable durant toute la journée choisie et varié fonction de la variation de la pression.
- ✓ Nous supposons aussi que les mesures (les pressions dans chaque nœud de mesure et du débit mesuré à la sortie du réservoir) effectuées sur le terrain sont fiables.

4.3 Méthodologie adoptée :

Pour aboutir à une décomposition du débit, nous allons suivre cinq étapes importantes dans le calcul :

I. Calage de modèle hydraulique

Le calage de modèle hydraulique a été effectué manuellement en se basant sur deux étapes successives.

1.1 Calage en débit

La première étape du calage est de corriger la consommation totale du modèle théorique par rapport aux mesures de débits.

Elle est formulée comme suit : la demande totale des nœuds doit être égale au débit mesuré à l'entrée du réseau pour chaque intervalle de temps. Ceci se traduit par l'équation suivante :

Nous avons :
$$Q_{total_mesuré} = Q_{total_simulé} \dots\dots(4.6)$$

Avec :
$$Q_{T,mesuré} = Q_{Tconso} + Q_{fT}$$

Où :
$$Q_{total_mesuré} = \sum_i^1 q_i \dots\dots(4.7)$$

q est la demande dans le nœud i ; i : est le nombre de nœuds.

1.2 Calage en pression

La seconde étape, après avoir calé la consommation du modèle, consiste à caler les pressions dans les différents points de mesures. Les points de mesures sur le terrain sont représentés par des nœuds de consommation pour lesquels nous avons attribué la même cote altimétrique mesurée réellement avec un altimètre.

$$\left| P_{mesuré} - P_{simulé} \right| \leq \dots\dots(4.8)$$

$P_{mesuré} = c$ 'est la pression mesure.

$P_{simulé} = c$ 'est la pression simulé.

2. Optimisation et l'élaboration de la courbe de modulation de pression (les consignes)

Pour déterminer les consignes de modulation injectées dans le Modulo, il est nécessaire d'utiliser les AG, les résultats de calculs des consignes de modulation pour notre cas fera l'objet de chapitre qui suit.

Alors pour déterminer la pression minimale nécessaire au point critique On utilise la formule suivante :

- ✓ $P = 3*N + (1 \text{ mètre de perte de charge pour chaque étage}) + (2 \text{ mètre pour le compteur}) + 10 \text{ mètre pour le dernier étage.}$

Avec : N : c'est le nombre de l'étage.

- ✓ La pression nécessaire du point critique varie en fonction du profil horaire.
Pendant les heures creuses et la nuit on néglige toutes les pertes de charges donc :
- ✓ $P = 2,8*N + 1 \text{ mètre de perte de charge pour chaque étage.}$

A ce propos, il ne faut pas confondre entre la notion de pression et la charge totale.
La charge (H) = la pression (P) + la cote.

3. Calcule du débit de fuites horaire avant et après modulation de pression

L'injection de l'exposant de l'émetteur et du coefficient de décharge trouvés (N1 et C respectivement), permet de produire, dans le modèle hydraulique, un débit supplémentaire pour les nœuds de consommation. Ce débit représente le débit de fuite sur le réseau, ses variations seront donc liées à la pression disponible au niveau des nœuds et elles peuvent être données par la relation suivante :

$$Q_{fT} = \sum_{i=1}^{Nj} \left(c \times \sum_{j=1}^{Nk} \frac{L_{ij}}{2} \times P_i(t)^{N1} \right) \dots\dots(4.11)$$

Avec,

- $Q_{fT}(t)$: variation du débit de fuite total en fonction du temps ;
- $P_i(t)^{N1}$: variations de la pression pour le nœud i.

Le gain en volume des fuites = $Q_{fT \text{ avant modulation}} - Q_{fT \text{ après modulation}}$

4. Calcule la consommation réelle

Par déduction du débit de fuites simulé et celui mesuré en entrée du système, la consommation réelle sera modifiée sur toute la période considérée (24 heures) par

$$Q_{conso}(t) = Q_{T,mesuré}(t) - Q_{fT}(t) \dots\dots(4.12)$$

Où :

- $Q_{conso}(t)$: Consommation réelle en fonction du temps ;
- $Q_{T,mesuré}(t)$: débit total mesuré en entrée du système sur toute la période considérée 24H.

Vue à la complexité de la détermination de l'exposant de (F A V A D) N, et le coefficient de décharge globale C nous avons utilisé le programme de **Mr A.G (ENP Alger)**.

Le programme donne les résultats suivants

- ❖ Exposant de fuites (F.A.V.A.D) : **N1 = 1,0853** ;
- ❖ Coefficient de débit : **C = 0,0589** ;

Une fois le débit décomposé en consommations et fuites sur le réseau pour toute une période de 24 heures, il est possible de calculer le débit de fuite avant et après modulation de pression.

L'étape finale consiste donc de déterminer la différence entre le volume de fuite (avant et après modulation de pression), et voir l'intérêt de la modulation de pression sur la distribution en continue et la réduction du volume des fuites d'eau dans le réseau d'alimentation en eau potable.

A travers l'outil, le but de calculer la différence de débit de fuites avant et après modulation de pression est la détermination de la dépendance entre le débit de fuites et la pression de service du réseau, de pouvoir optimiser la courbe de modulation de pression. En termes d'exploitation et de gestion des rendements des réseaux de distribution, cet aspect ne peut être

négligeable car il donne une prévision sur les gains économiques suite à ces actions (modulation ou régulation de pression) qui sont devenus à nos jours des programmes indispensables pour l'amélioration des performances des installations.

4.4. Formulation du problème d'optimisation par les AG

Pour la minimisation de débit de fuite, nous avons suivi un cheminement permettant de réduire le débit de fuites par la réduction de la pression.

Le principe est donc d'optimiser la courbe de modulation de pression, et de calculer par la suite la différence des débits de fuites dans le modèle (avant et après cette modulation de pression).

a. Fonction objective (fitness)

Notre problème consiste à un problème d'optimisation non linéaire, qui minimise le débit de fuite dans le réseau de distribution d'eau potable, en cherchons les meilleures consignes à appliquer à la vanne de modulation qui donne meilleures pressions au point critique (supérieur à la pression minimal).

Cependant, la définition de la fonction objective dépend de l'étude de cas et, en général, est liée au modèle hydraulique, dans ce travail de recherche la fonction objective principale peut être formalisé comme suit :

$$F(x) = \min_{C_{n1}, C_{n2}, \dots, C_{n24}} Q_{fT} \quad (4.13)$$

$$Q_{fT} = f(P_{cal,t}(C_{n1}, C_{n2}, \dots, C_{n24}))$$

Où :

- $P_{cal,t}$: la pression calculée.
- C_n : la consigne de modulation.
- Q_{fT} : le débit de fuite totale.

Avant d'optimiser les consignes de modulation, il faut tout d'abord modéliser les fuites par l'injection de C et le N dans le modèle, puis la correction de la consommation aux nœuds (consommation réel).

Alors pour trouver la solution X qui minimise notre fonction objective F(x) nous avons utilisé la méthode des algorithmes génétiques sous l'environnement de développement Matlab où elles sont présentes dans la bibliothèque de ce dernier ainsi que d'autres méthodes d'optimisation, Matlab nous permet le choix entre l'emploi des AG dans leur forme la plus simple où nous avons la possibilité d'apporter des modifications dans leurs paramètres.

Et pour minimiser la fonction F(x), nous avons utilisé le codage réel. Le chromosome représente donc le vecteur X (un variable de décision) qui contient vingt-quatre gènes sont les consignes de modulation.

$$\vec{V} = (C_{n1}, C_{n2}, C_{n3}, \dots, C_{n24})$$

b. Contraintes non linéaires

Pour la formule de la fonction fitness présentée se dessus, plusieurs combinaisons des variables de décision peuvent donner un même débit de fuite, mais ce dernier est complètement différent du débit fuite minimal. De plus l’algorithme génétique peut trouver une infinité de solution pouvant minimiser la fonction objective, mais ces solutions n’auront pas une signification pratique. Pour avoir une solution proche de la réalité ou raisonnable il faut intégrer une contrainte non linéaire sur la pression au point critique. Elle est formulée comme suit : la pression calculer au point critique doit être supérieure ou égale la pression minimale nécessaire au même point pour chaque intervalle de temps.

Donc le système non linéaire qui régit cette contrainte est formulé comme suit :

$$(P_{cal,t} \geq P_{min,t})_{P_c} \dots \dots \dots (4.14)$$

Où :

- $P_{cal,t}$: la pression calculée ou bien simulée par le modelé au point critique dans l’intervalle de temps t, elle est en fonction de consignes de modulation ;
- P_{min} : pression minimum nécessaire au point critique dans l’intervalle de temps t.

L’intégration de la contrainte changera rationnellement le processus de convergence de l’algorithme, le temps de calcul sera donc de plus en plus long.

La méthode repose sur l’utilisation d’une seule fonction fitness (4.13) qui regroupe toutes les variables de décision et permettant ainsi à l’algorithme génétique d’agir à la fois sur tous les paramètres tout en respectant la contrainte non linéaire (4.14) sur la pression minimum au point critique et les limites des consignes de modulation (**LB** et **UB**).

5. Présentation de la structure de l'outil

5.1. Organigramme de principe

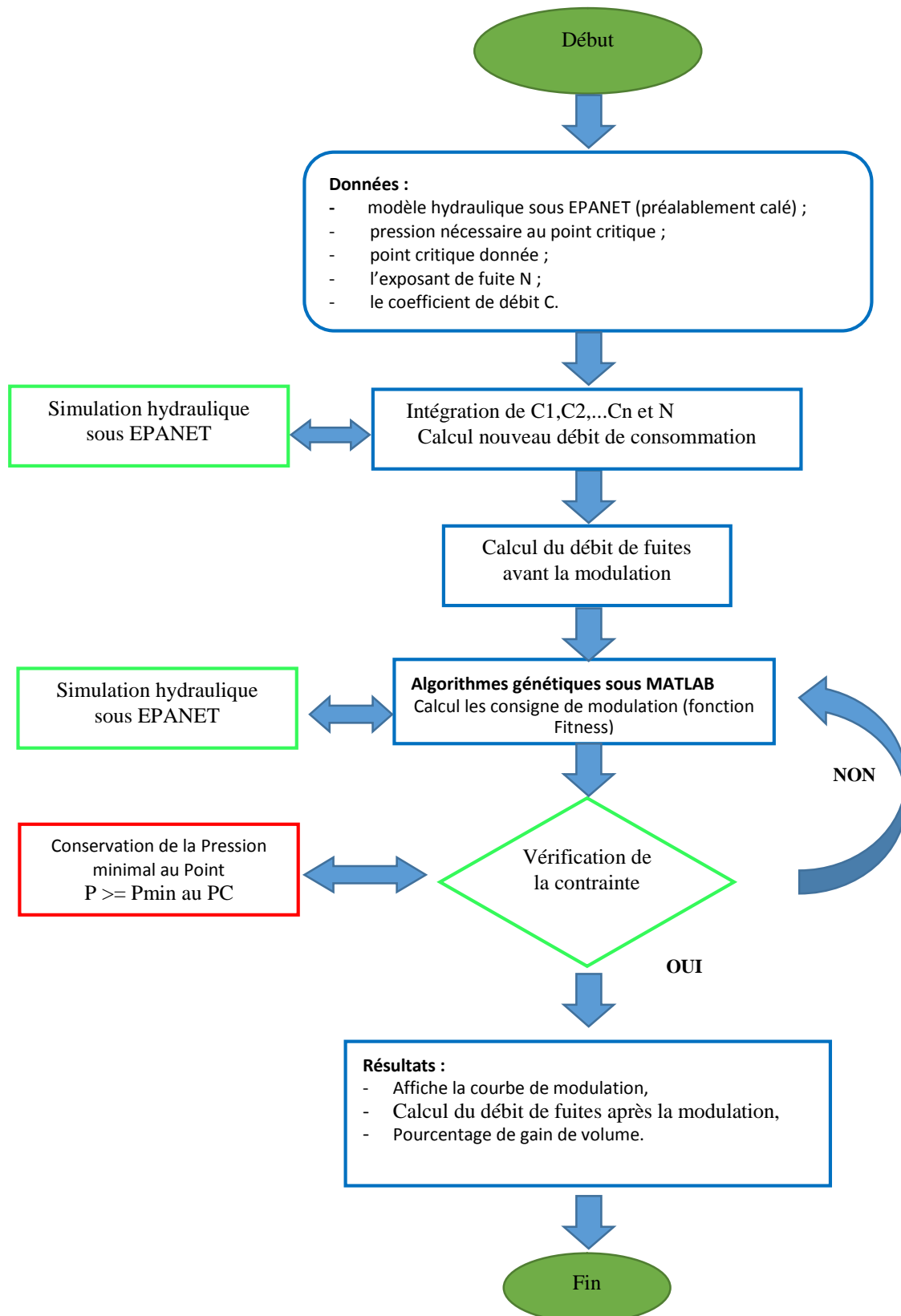


Figure 4.6 : Principe de la structure générale de l'outil.

5.2 Les données d'entrées

Les données de base nécessaire sont lues à partir de trois fichiers :

- *Le modèle du réseau : il est lu à partir d'un fichier en extension (reseau.inp).
- *La pression minimale nécessaire au point critique (la contrainte).
- *l'exposant de fuites **N1** et du coefficient de débit **C**.

5.3 Les paramètres de sortie

Les paramètres de sortie de ce programme sont les suivants :

- *Le graphe qui représente le débit de fuites horaire avant et après la modulation de pression ;
- *Le graphe qui représente l'évolution de la pression au point critique avant et après la modulation de pression sur 24 H ;
- *Les consignes de modulation de pression (la courbe de modulation) sur 24 H ;
- *La valeur de débit de fuite avant et après modulation et le pourcentage de gain en volume.
- *Le rendement de réseau avant et après modulation de pression.

Conclusion

L'outil de calcul qu'on a élaboré est d'une importance capitale, car il nous permet d'optimiser les consignes de modulation et par conséquent réduire le débit de fuites par la réduction de pression qui prend énormément du temps et surtout dans le cas d'un modèle de grande taille, et ainsi il nous offre la possibilité de se focaliser sur les décisions à prendre.

L'élaboration d'outil par les AG sont à priori la seule solution disponible pour résoudre le problème des fuites pour les nœuds d'un modèle hydraulique, car la manipulation de la bibliothèque de liens dynamiques (DLL) EN2Toolkit est d'une difficulté exceptionnel.

CHAPITRE 05 APPLICATION ET ANALYSE DES RESULTATS

Introduction

Pour illustrer le fonctionnement de l'outil, nous avons fait une application du modèle pour le réseau de distribution, à savoir celui de ville de BOLOGHINE de la wilaya d'Alger.

Le modèle hydraulique utilisé pour l'application est de modèle théorique caler manuellement par rapport à un certain nombre de mesures de débits et de pressions dans le réseau en question, le travail du calage a été réalisé dans le cadre du PFE **Mahboub, 2011**.

Nous commençons donc par une brève présentation de la zone d'étude. Par la suite, nous décrivons la procédure que nous avons suivis et les résultats de calage correspondants. Ensuite, nous passerons à la représentation de l'état initial du modèle (avant la modulation). Et pour terminer, nous analyserons les résultats obtenues par l'outil de calcul (après la modulation) avec les interprétations qui leur correspondent.

1. Présentation de la zone d'étude.

La description de la situation de la zone d'étude, nous permet d'assurer une bonne prise en charge et, de mener à bien notre travail. Pour cela, on la fait de point de vue géographique, topographique, géologique, climatique, démographique et hydraulique.

1.1. Description de secteur d'étude.

1.1.1. Situation géographique.



Figure 5.1 : plan de situation géographique de la ville de BOLOGHINE.

La ville de BOLOGHINE se trouve dans le nord-ouest de la wilaya d'Alger, Elle est constituée par les trois (03) communes suivantes :

- **BOLOGHINE**
- **RAÏS HAMIDOU**
- **HAMMAMET**

L'étage de BOLOGHINE est limitée par l'étage BORDJ BOULILA en Amont et par les étages DAZY et FORET DE BAINEM en aval.

1.1.2. Situation Topographique

La wilaya d'Alger représente le site où nous aurons fait l'étude présentée par ce mémoire, a des coordonnées Lambert 36°46'35'' N et 03°03'31'' E.

La région concernée par notre étude constituée de plaines et de collines du Sahel algérois, avec du terrain généralement accidenté a des côtes altimétriques variable entre 0 à 200m NGA, qui donnent un terrain accidenté avec des pentes considérablement fortes présentant une pente moyenne de 5%.

1.1.3 Demande en eau

L'évolution des besoins en eau entre 2009 et 2015 est récapitulée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5.1 :L'évolution des besoins en eau de l'étage de Bologhine entre 2009 et 2015 Document technique SEAAL, 2010.

Année	2009	2011	2015
Population	61867	62668	63525
Demande en eau domestique m3/j	9 159	9436	9 138
Demande en eau diffuse m3/j	2 748	2840	2 742
Demande en eau des grands consommateurs m3/j	638	630	604
Rendement de réseau %	63	66	66,5
Demande en eau totale m3/j	12545	12906	12484

1.2 Description des installations hydrauliques et du fonctionnement actuel de l'étage de Bologhine.

La figure ci-dessous montre le plan de l'étage Bologhine :

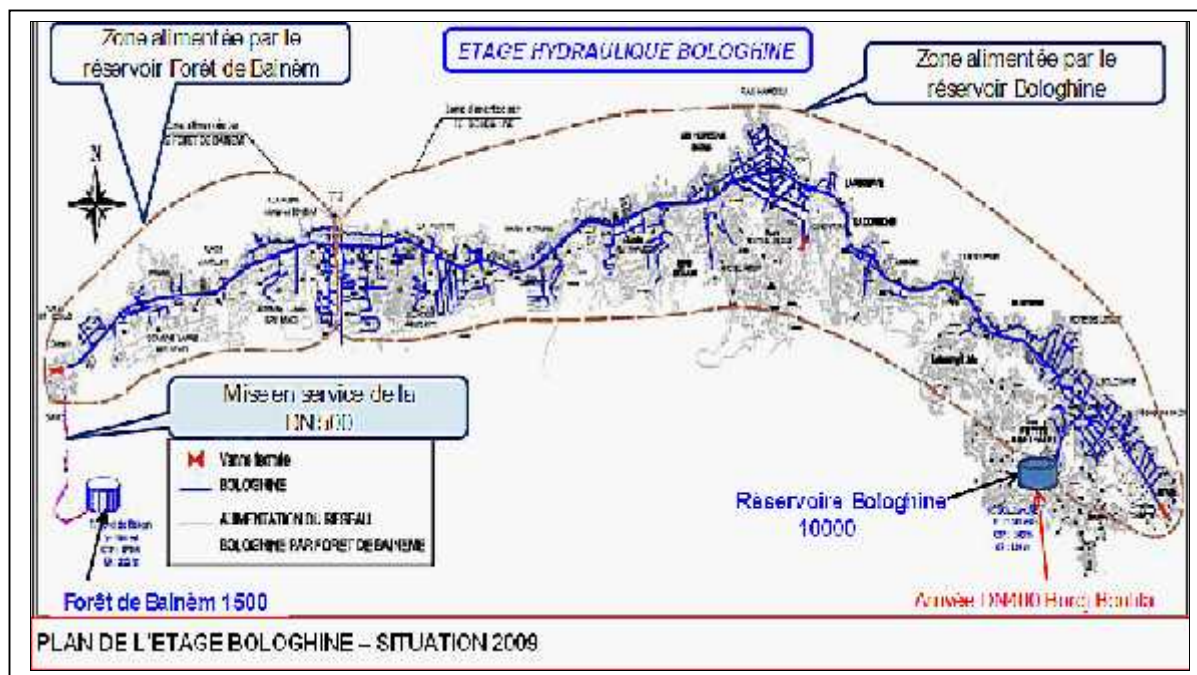


Figure 5.2 : plan de l'étage Bologhine Document technique SEAAL, 2009.

1.2.1 Les ouvrages de stockage de l'étage de Bologhine

Les réservoirs d'eau potable jouent un rôle prépondérant pour :

- ❖ Maintenir la pression dans les réseaux,
- ❖ Assurer l'approvisionnement en eau pendant les heures de pointe,
- ❖ Assurer un stockage de secours (de quelques heures) en cas d'arrêt de la production.

Le réservoir de Bologhine (10 000 m³, CTP = 140 mNGA, CR = 134 mNGA) est actuellement alimenté gravitairement par le réservoir de Bordj Boulila via une conduite en DN400. Le réseau peut être alimenté en totalité via une conduite DN500F (en cours de réalisation) par le réservoir de Forêt de Bainèm (1500 m³, CTP = 170 mNGA, CR = 165 mNGA) alimenté par la station de Bellevue (SP4 Ain Benian) via une conduite DN500F.

Le réservoir de Bologhine assure une distribution gravitaire vers les zones littorales des communes de Bologhine, Raïs Hamidou et Hammamet par 2 conduites principales en parallèle maillées dès le départ du réservoir :

- Une conduite DN600F/DN500/DN400,
- Une conduite en DN300/DN200.

Les usagers desservis par cet étage se situent globalement entre les Altitudes 9 mNGA et 120 mNGA, le tableau ci-après résume les caractéristiques de réservoir de Bologhine.

Tableau 5.2 : Caractéristiques de réservoir de Bologhine [Document technique. SEAAL.2010].

Etage	Commune	Réservoir de tête	Capacité de stockage (m ³)	CR (mNGA)	CTP (mNGA)	Côte Max desservie (mNGA)	Côte Min desservie (mNGA)
Bologhine	Bologhine, Hammamet, Rais Hamidou	Bologhine	RE10000	134	140	110	09

Pour soulager le réservoir de Bologhine, une partie du réseau côté Ouest sera alimenté par le réservoir Forêt de Bainèm 1500 m³ et la partie Est alimentée par le réservoir Bologhine 10 000 m³ avec la possibilité d'alimenter tout le réseau par l'un des deux réservoirs en cas de problème.

Pour avoir la même charge du réservoir Bologhine dans le réseau alimenté par le réservoir de forêt de Bainèm, j'ai proposé d'installer un stabilisateur aval sur la DN500F qui sort du réservoir Forêt de Bainèm.

1.2.2 Volume de stockage :

La capacité de stockage du réservoir est de 10 000 m³. Elle permet d'assurer une autonomie d'alimentation de 23 heures lorsqu'on alimentera la partie Ouest du réseau par le réservoir de Forêt de Bainèm (on soulagera le réservoir de Bologhine de 2 200 m³/j).

Le marnage du réservoir est de 3 m. Le volume stocké au minimum pendant la journée du réservoir Bologhine s'élève à 5 000 m³ soit 50 % du total.

1.2.3 Totale de Linéaire :

Notre réseau d'étude est structuré par un ensemble de conduites de diamètres entre 600 et 80mm, qui permettent l'apport en eau dans divers endroits du réseau.

Le réseau de distribution existant est de type mixte. Il est très ancien (1922) et sous dimensionner. Il y a eu rénovation de quelques tronçons entre 2006 et 2011. L'ensemble des diamètres représentent 70,89 km de canalisations (distribution, adduction, refoulement eau souterraine, refoulement, conduites abandonnées), plus de 15,61 km de diamètre 200 mm.

Les linéaires de canalisations par diamètre sont représentés dans le tableau ci-après :

Tableau 5.3 : Linéaire des conduites Document technique SEAAL, 2011.

Diamètres (mm)	Linéaire (km)	Pourcentage (%)
<100	13,22	18,65
100	30,88	43,56
200	15,62	22,03
300	1,72	2,42
400	7,62	10,74
500	1,12	1,57
600	0,73	1,03

2. Calage de modèle hydraulique

Faute de pouvoir mesurer ou estimer certains des paramètres du modèle et compenser sur ces seuls paramètres les erreurs liées au modèle et/ou aux données, il est nécessaire de les estimer par calibration ou (calage), en optimisant (manuellement ou automatiquement) l'ajustement de certaines variables simulées à leurs valeurs mesurées **Mathieu et al, 2010**.

Le calage de modèle hydraulique a été effectué manuellement en se basant sur des mesures de débits de consommation globales sur la zone d'étude, et des mesures de pressions réparties à l'intérieur de réseau de distribution.

2.1 Le calage en débit

La première étape du calage est de corriger la consommation totale du modèle théorique par rapport aux mesures de débits.

Pour déterminer le graphique de consommation il est nécessaire de mesurer le débit total à la sortie du réservoir de Bologhine (débit de production) sur 24 h et par la suite calculer les nouveaux coefficients de consommation (multiplicateurs). Les résultats sont résumés dans le tableau ci-après.

Tableau 5.4 : débit total de production journalier avec les nouveaux coefficients de consommation (moyenne de plusieurs jours).

Heure	Débit Moyenne mesuré (m3/h)	Coefficient mesuré	pourcentage (%)
00:00	276,1	0,61	2,56
01:00	255,2	0,57	2,36
02:00	246,5	0,55	2,28
03:00	245,4	0,54	2,27
04:00	250,9	0,56	2,32
05:00	277,2	0,62	2,56
06:00	292,8	0,65	2,71
07:00	356,4	0,79	3,30
08:00	476,8	1,06	4,41
09:00	620,7	1,38	5,74
10:00	739,0	1,64	6,84
11:00	744,8	1,65	6,89
12:00	733,3	1,63	6,79
13:00	653,9	1,45	6,05
14:00	533,0	1,18	4,93
15:00	480,9	1,07	4,45
16:00	491,8	1,09	4,55
17:00	486,9	1,08	4,51
18:00	495,4	1,10	4,58
19:00	507,8	1,13	4,70
20:00	486,9	1,08	4,51
21:00	445,8	0,99	4,13
22:00	387,0	0,86	3,58
23:00	321,4	0,71	2,97
	450,25	24	100

D'après le tableau ci-dessus on peut tracer la courbe de débit de production journalier moyenne.



Figure 5.3 : Débit mesuré Le 25-03-2011 à la sortie du réservoir de Bologhine.

A partir des résultats du tableau (5.6) aussi, nous obtenons le graphique réel de consommation le suivante :

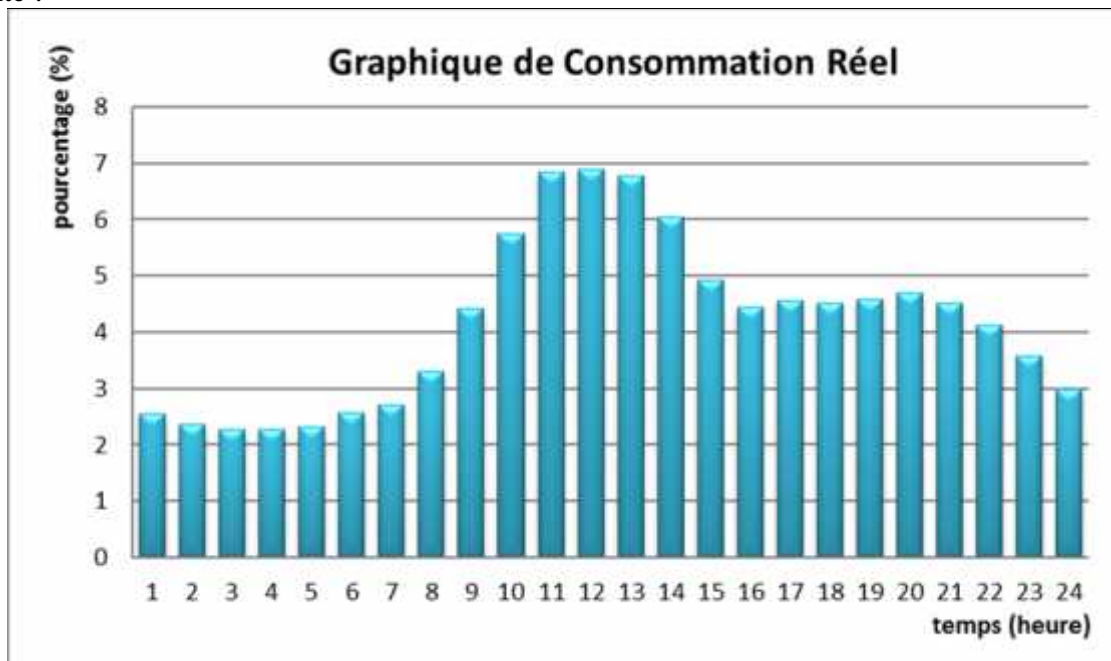


Figure 5.4 : courbe de graphique de consommation réel.

Et cela se traduit, dans le logiciel de calcul hydraulique EPANET, par le changement des demandes de base dans les nœuds de consommation tout en gardant la même répartition spatiale initiales dans le modèle. Les courbes de modulation de la demande doivent aussi être corrigées de manière à suivre la variation réelle de la consommation dans le temps pour la journée de référence choisie.

A l'aide du logiciel EXCEL nous avons essayé de rapprocher au mieux que possible le débit simulé à celui mesuré en modifiant ce profil de consommation tout en gardant la moyenne de ces coefficients (multiplicateurs dans EPANET) égale à l'unité soit d'une durée de 24h.

Le graphe ci-dessous superpose le profil original et modifié :

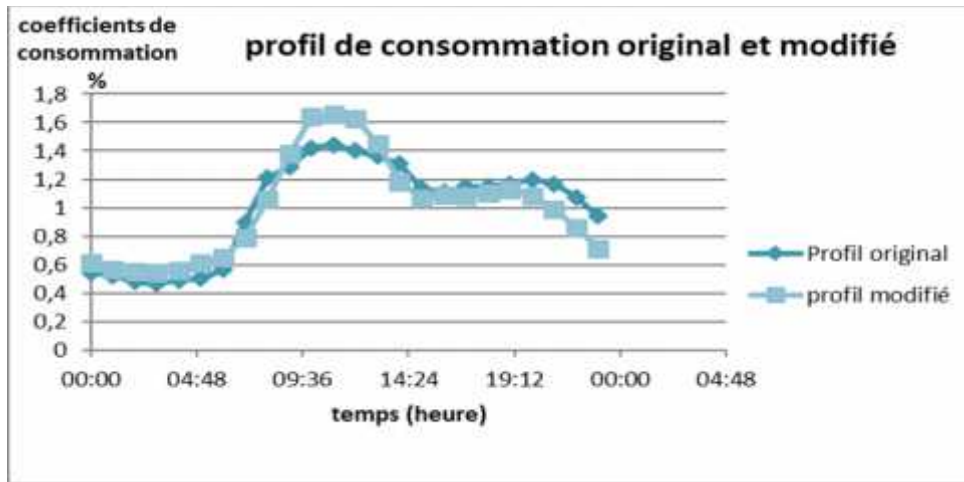


Figure 5.5 : profil de consommation ; original et modifié.

Le débit sortant de la conduite de distribution principale alimentant le réseau n'est jamais égal au débit qui arrive aux abonnés, car il existe toujours des pertes physiques et commerciales dans le réseau.

Nous obtenons par la suite une seule courbe de modulation qui caractérise la consommation globale de différente catégorie de consommation à la fois. Nous prenons en considération les pertes.

La modification de la demande de base à chaque nœud (débit sortant à chaque nœud) a été effectuée de manière automatique dans Excel et importées en suite dans EPANET.

- Nous avons dans un premier cas et à partir d'un fichier EXCEL créé un pourcentage de demande pour chaque nœud via la demande de base initialement injecté dans EPANET.
- Nous avons par la suite multiplié ce pourcentage de demande au débit moyen mesuré afin d'obtenir les nouvelles demandes aux nœuds.

2.1.1 Resultats du calage en débit:

Dans cette section nous présentons le travail du calage réalisé dans le cadre du PFE [MAHBOUB, 2011]. Le réseau calé sera utilisé dans la prochaine simulation, afin de valider l'algorithme de modulation proposé considéré en tant que l'objectif principal de ce mémoire. La figure ci-dessous illustre le débit mis en distribution et simulé par le modèle et observé sur le terrain. Les courbes montrent les valeurs simulées par le modèle, les mesures sont représentées par des pointes.

a) Avant le calage :



Figure 5.6 : Comparaison des débits de consommation totale mesurés et calculés (simulés par le modèle) avant le calage.

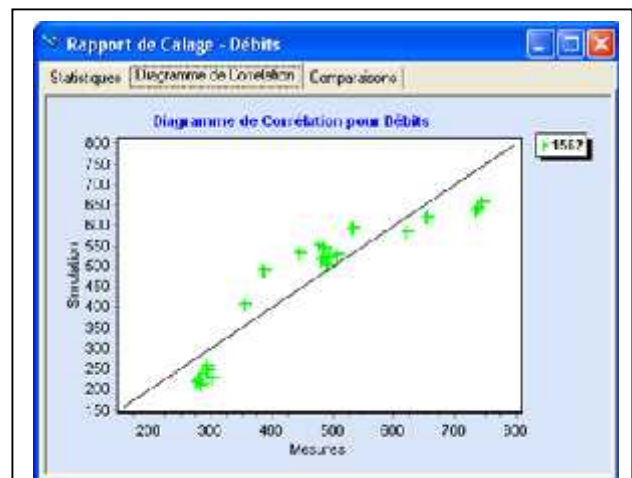


Figure 5.7 : Corrélation entre les valeurs mesurées et simulées : coefficient de corrélation entre valeurs moyennes = **0.599** (donné par

Nous n'avons conservé qu'une seule courbe de modulation représentant toutes les catégories de consommation à la fois.

Le calage en volume s'effectue pour les débits mis en distribution sur chacun des secteurs hydraulique identifiés. Le débit en sortie d'un ouvrage de stockage ou mis en distribution sur un secteur hydraulique est composé de deux composantes distinctes :

- Le volume moyen distribué par secteur hydraulique ;
- Le volume de pertes (assimilé au volume de fuites).

Après injection de la nouvelle courbe de modulation et des nouvelles demandes aux nœuds dans notre modèle nous avons obtenus les résultats suivant :

b) Après le calage :

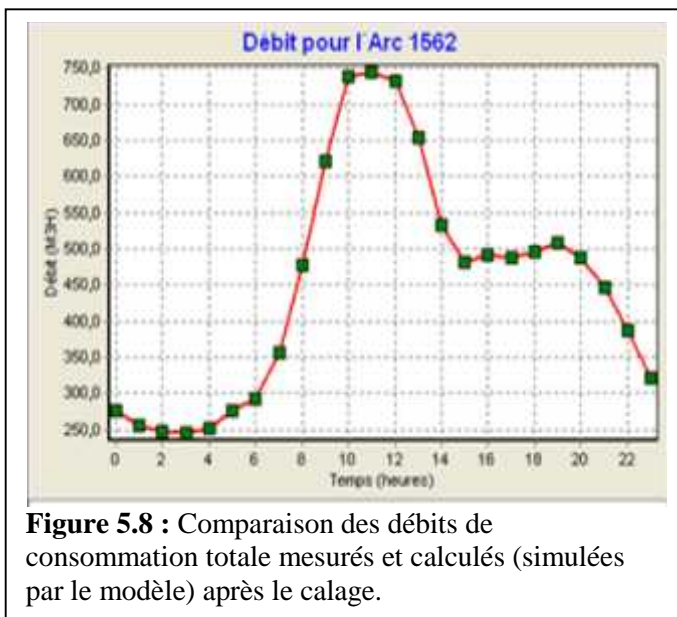


Figure 5.8 : Comparaison des débits de consommation totale mesurés et calculés (simulés par le modèle) après le calage.

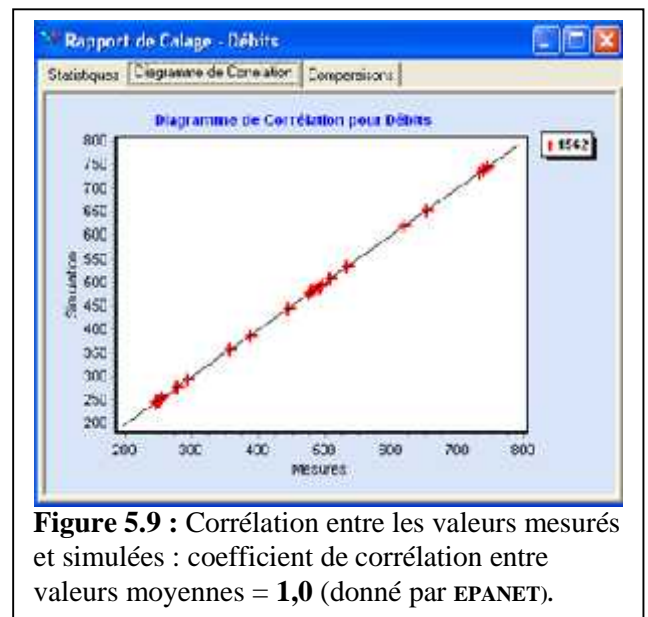


Figure 5.9 : Corrélation entre les valeurs mesurées et simulées : coefficient de corrélation entre valeurs moyennes = **1,0** (donné par EPANET).

Nous remarquons à l'issue de ce graphe que le débit simulé est identique à celui observé donc nous pouvons dire que notre modèle est calé en débit.

Le rapport de calage donné par EPANET est illustré dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5.5 : statistique de calage pour le débit après calage.

Bologhine					
Statistique de calage pour le débit					
Point de mesure	Nombre obs.	Moyen obs.	Moyen Sim	Erreur moyen	Différence
Sortie Bologhine	24	1069.29	1069.29	0.000	0.000
réseau	24	1069.29	1069.29	0.000	0.000
Corrélation entre valeurs moyenne : 1.000					

Nous avons donc calé notre modèle en débit, nous procédons donc au calage du modèle en pressions.

2.2 Le calage en pression

Cette partie du calage vise à faire correspondre au plus près les résultats de la simulation retournés par le logiciel de modélisation avec les enregistrements de pression effectués sur le réseau.

Les graphiques ci-après représentent la comparaison et la corrélation entre les valeurs de pressions mesurées et simulées pour le réseau de BOLOGHINE avant et après calage des de modèle.

2.2.1 Résultats du calage en pression :

a) Avant le calage

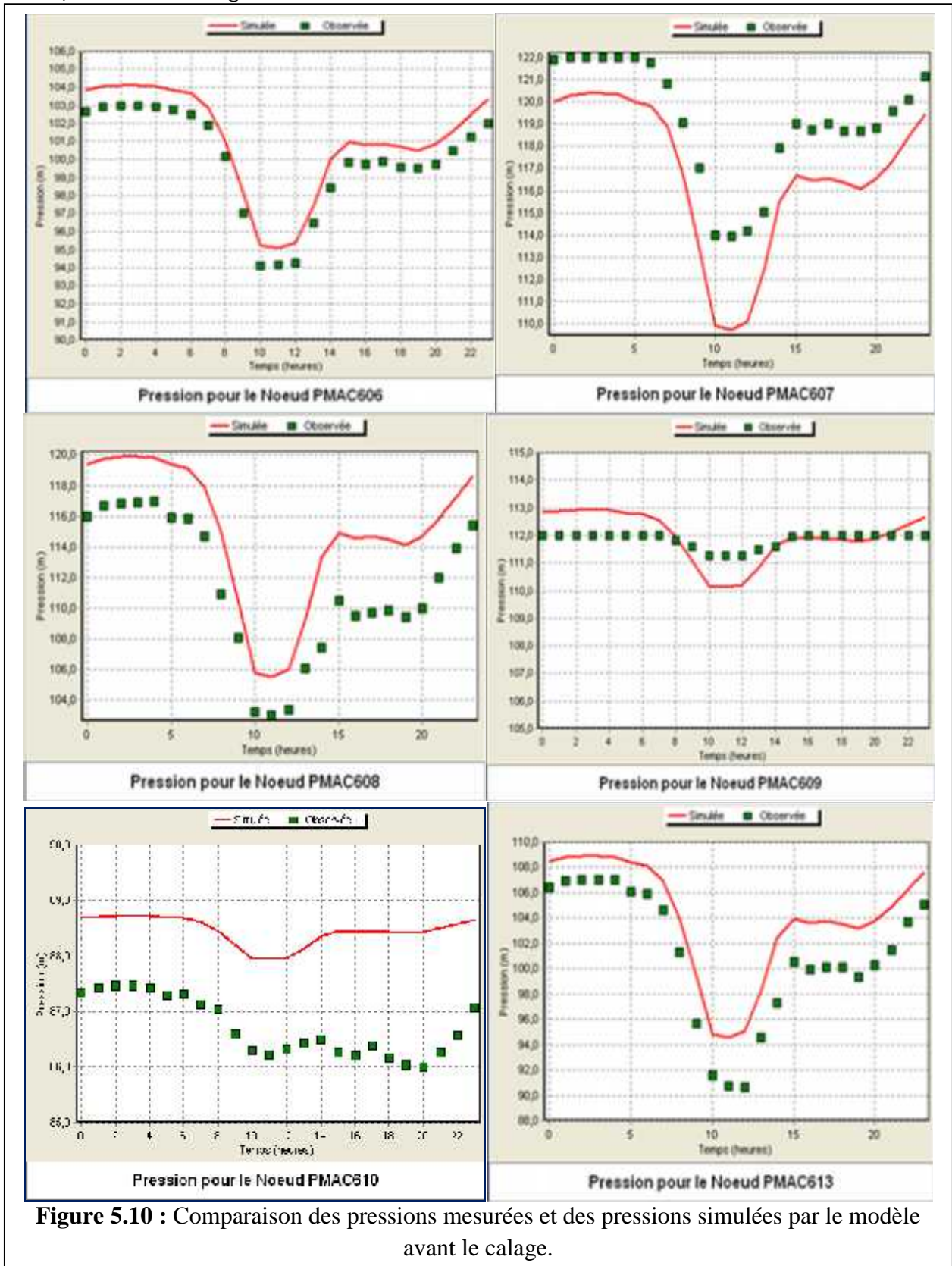


Figure 5.10 : Comparaison des pressions mesurées et des pressions simulées par le modèle avant le calage.

b) Apres le calage

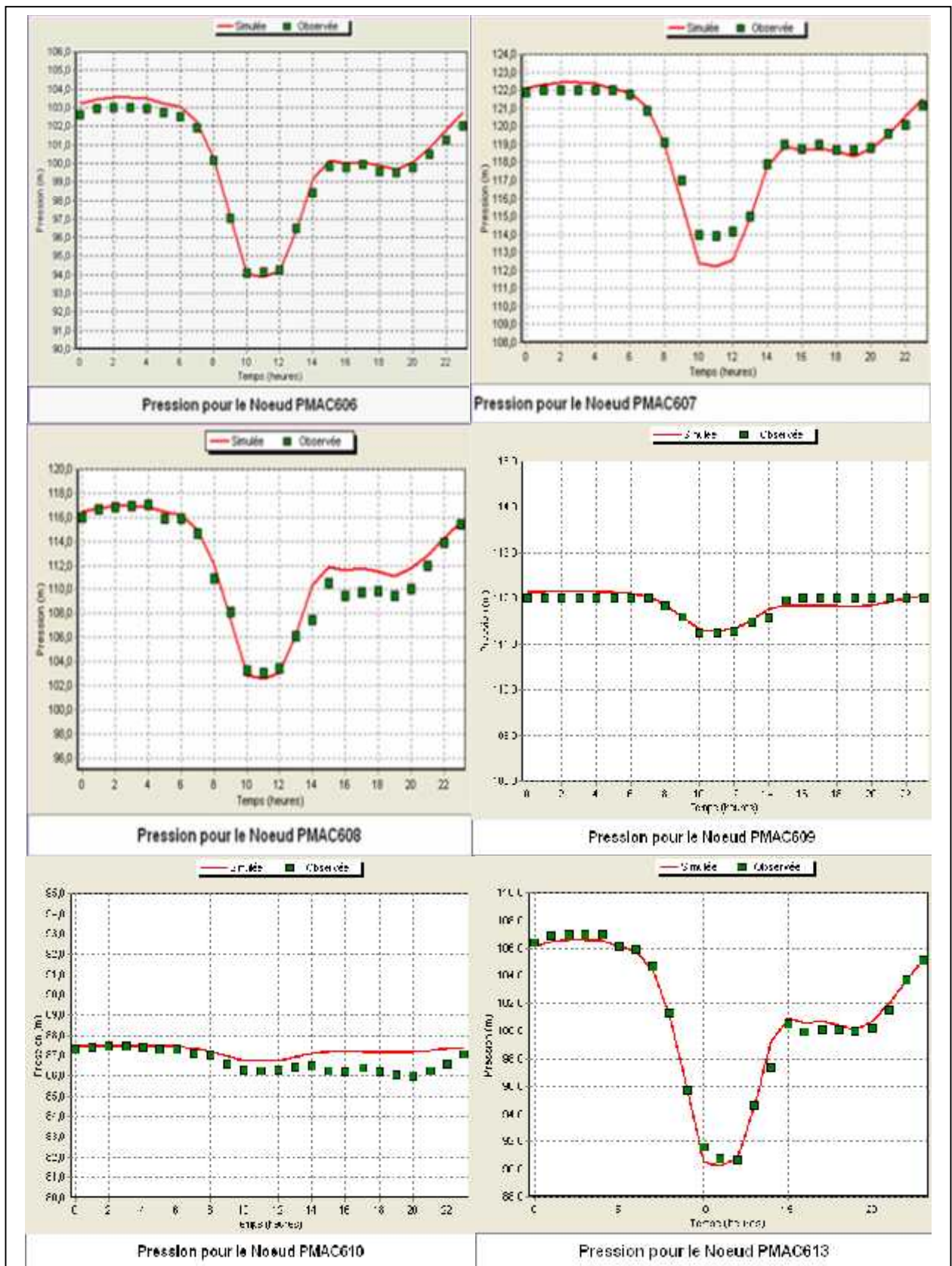


Figure 5.11 : Comparaison des pressions mesurées et des pressions simulées par le modèle

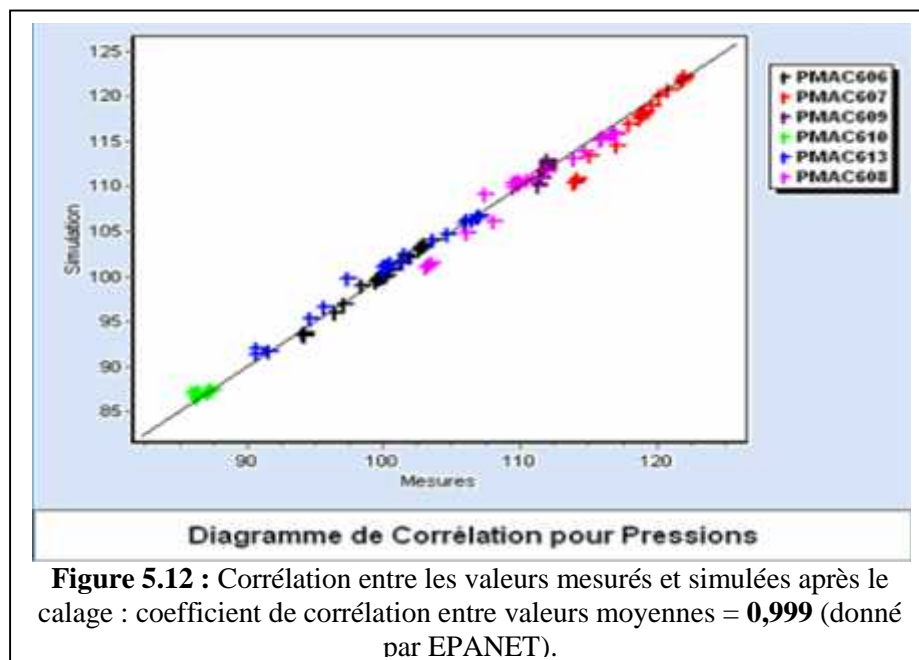
Le calage s'effectue en intervenant essentiellement sur la rugosité des conduites, l'introduction de singularités en certains points du réseau (pertes de charge singulières éventuellement non répertoriées).

Le rapport de calage de pression, donné par EPANET, est représenté dans le tableau suivant :

Tableau 5.6 : Statistiques de calage pour la pression.

Statique de Calage Pour la Pression				
Point-Mesure	Nombre Observé	Moyen Observé	Moyen Simulé	Erreur Moyen
PMAC606	24	99,84	99,98	0,335
PMAC607	24	119,05	118,07	1,052
PMAC608	24	100,82	101,62	0,452
PMAC609	24	111,84	111,93	0,541
PMAC610	24	86,70	87,14	0,452
PMAC613	24	100,82	101,39	0,452
Réseau	138	104,90	104,85	0,669

Donc le diagramme de corrélation pour la pression après calage est représenté comme suit :



Le modèle de réseau sera considéré comme calé lorsque les courbes obtenues par simulation présenteront le même profil que les courbes de mesure.

La qualité du calage en pression a eu une diminution plus au moins considérable, mais le résultat reste toujours acceptable vue le niveau d'information que nous avons sur le réseau.

En réalité, il est très difficile sinon impossible, d'avoir un bon calage de pression pour un réseau aussi grand avec un niveau d'information minimal. Et une connaissance minimal de son état (plus de 30 % des vannes de circulation sont fermées ou cassées). Mais il reste toujours possible d'avoir une amélioration en procédant à des investigations sur terrain, pour s'informer de l'état de toutes les vannes de circulation et faire d'éventuelles corrections.

2.3 Projet de modulation de pression du réseau de Bologhine.

Afin de bien comprendre le fonctionnement du réseau et de contrôler la bonne communication entre les différents tronçons et maillages, on peut concevoir un projet de modulation de pression par l'installation des vannes de modulation de pression et pour que ces vannes stabilisatrices fonctionnent correctement et sans perturbation, il est nécessaire que toutes alimentations du réseau passent par ces vannes, donc il faut maîtriser toutes les entrées du réseau, Pour cela, des modifications (maillages, raccordement, installation de vannes, fermeture de quelques vannes, ...) sont établies. Et avant tous il faut identifier le point critique de réseau

Le point critique situé à la cote 26,5 m (R+8).

La pression nécessaire du point critique varie en fonction du profil horaire.

Pendant les heures de pointe :

$$P = 3 \cdot 8 + 8 + 2 + 10 = 44 \text{ m.}$$

Pendant les heures creuses et la nuit on néglige toutes les pertes de charges donc :

$$P = 2,8 \cdot N + 8 = 2,8 \cdot 8 + 8 = 30 \text{ m.}$$

Dans notre cas (la vanne en modulation), est programmée à s'ouvrir ou à se fermer selon un profil horaire.

3. Résultats de calcul de l'outil développé :

Après avoir bien calé notre modèle, on peut concevoir un système de modulation de pression sous EPANET, nous présenterons dans cette partie les différents résultats de simulation obtenus par l'outil de calcul ainsi l'analyse des différents scénarios des pressions et des pertes par fuites possibles avant et après la modulation de pression de réseau de distribution.

Les résultats des consignes de pression, sont résumés dans l'histogramme suivant :

La courbe suivante illustre les variations des consignes de modulation de pressions obtenues par les AG :

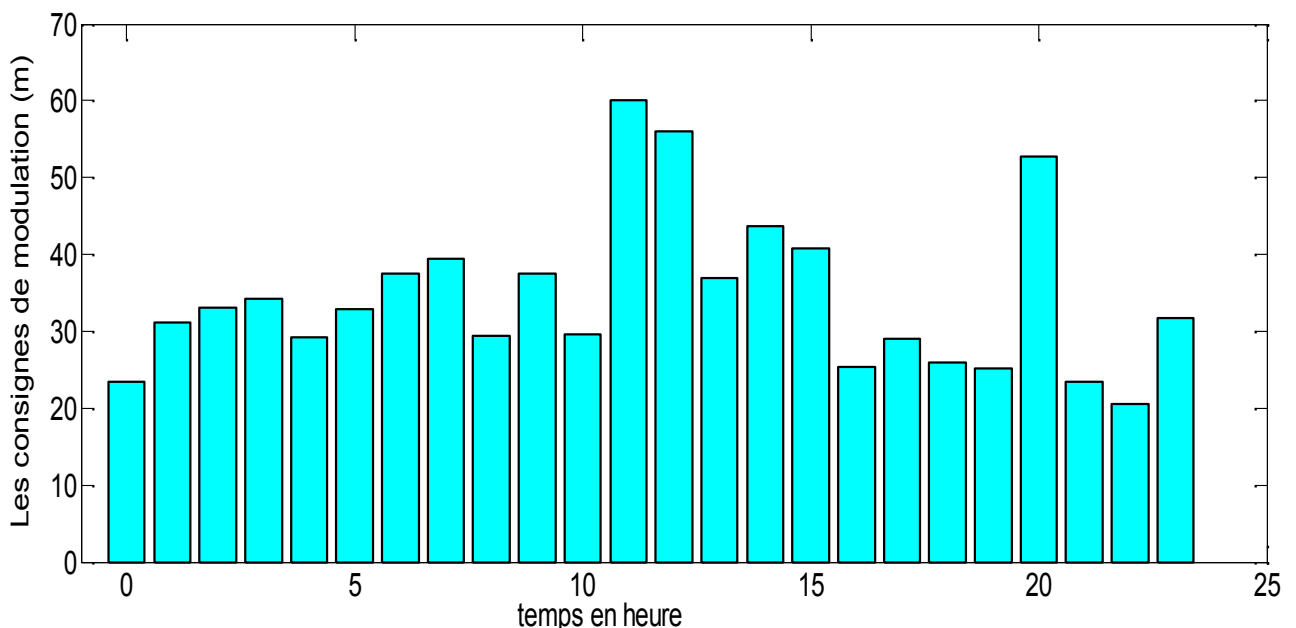


Figure 5.13 : Les consignes de modulation de pression.

3.1 Analyse des différents Résultats

3.1.1 L'évolution de la fonction fitness :

Le graphe suivant illustre l'évolution de notre simulation d'une génération à une autre.

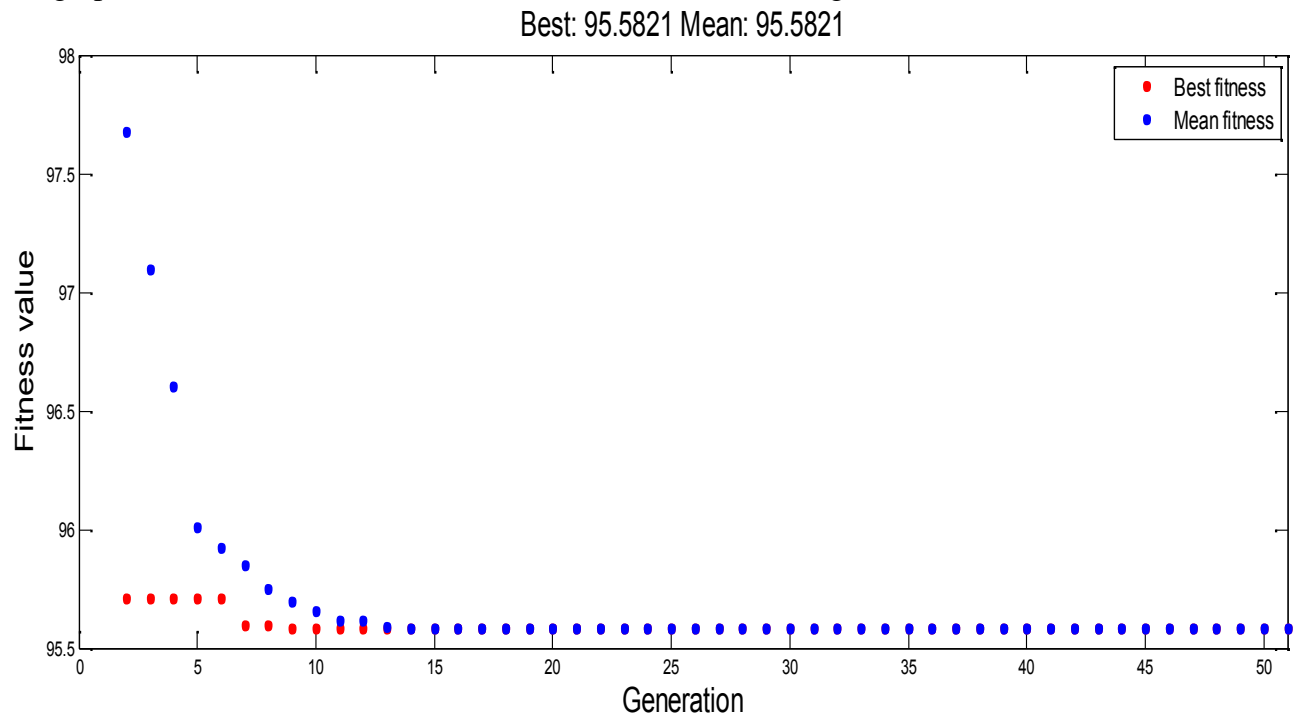


Figure 5.14 : l'évolution de la fonction fitness au cours de l'optimisation des consignes de modulation du réseau Bologhine.

En fait, ce graphe contient deux tracés : le premier (en bleu) montre le comportement moyen des individus au sein de la même génération. Ce comportement est estimé par le calcul de la moyenne arithmétique de la fonction coût de chaque individu. Cependant, le deuxième tracé (en rouge) donne la meilleure solution de chaque génération. La solution optimale converge vers une valeur constante après quelques itérations. Par contre, la moyenne arithmétique prend plus de temps pour converger, et cela, pour avoir plus de chance de trouver d'autres solutions (probablement meilleurs). L'algorithme d'optimisation s'arrête lorsque la solution optimale ne montre aucune amélioration considérable au cours de la simulation.

3.1.2 Résultats des pressions avant et après modulation :

La courbe de variation de la pression au **PC** point critique avant et après la modulation de pression est représentée comme suit :

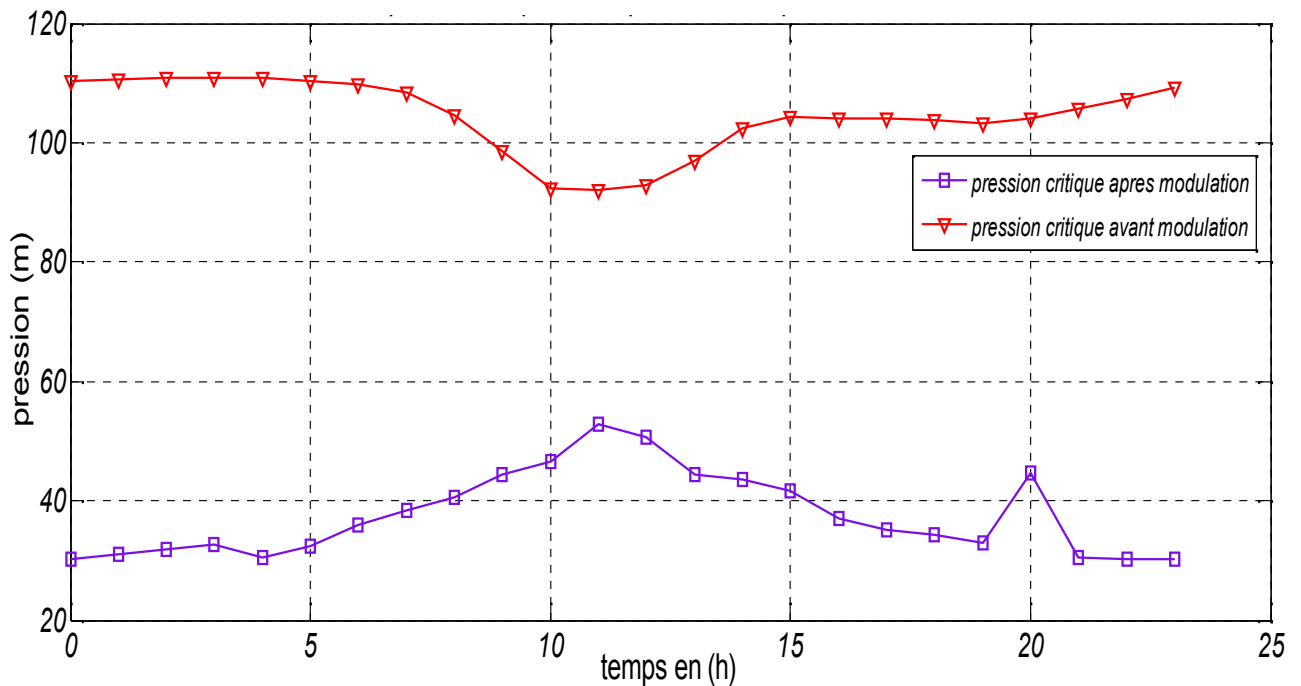


Figure 5.15 : variation de la pression au point critique **P.C** avant et après modulation de pression.

Nous remarquons à l'issue de la figure ci-dessus avant modulation de pression, les pressions étaient très importantes dans le point critique de réseau même aux heures de pointes (supérieurs à 90 m et atteignent les 120 m aux heures creuses).

Après modulation de pression, les pressions sont devenues moins importantes, et surtout aux heures creuses (inférieurs à 60 m et atteignent les 30 m aux heures creuses) ceci est dû à la consigne de pression délivrée.

La courbe suivante illustre la variation de pression au point le plus bas dans le réseau avant et après la modulation de pression.

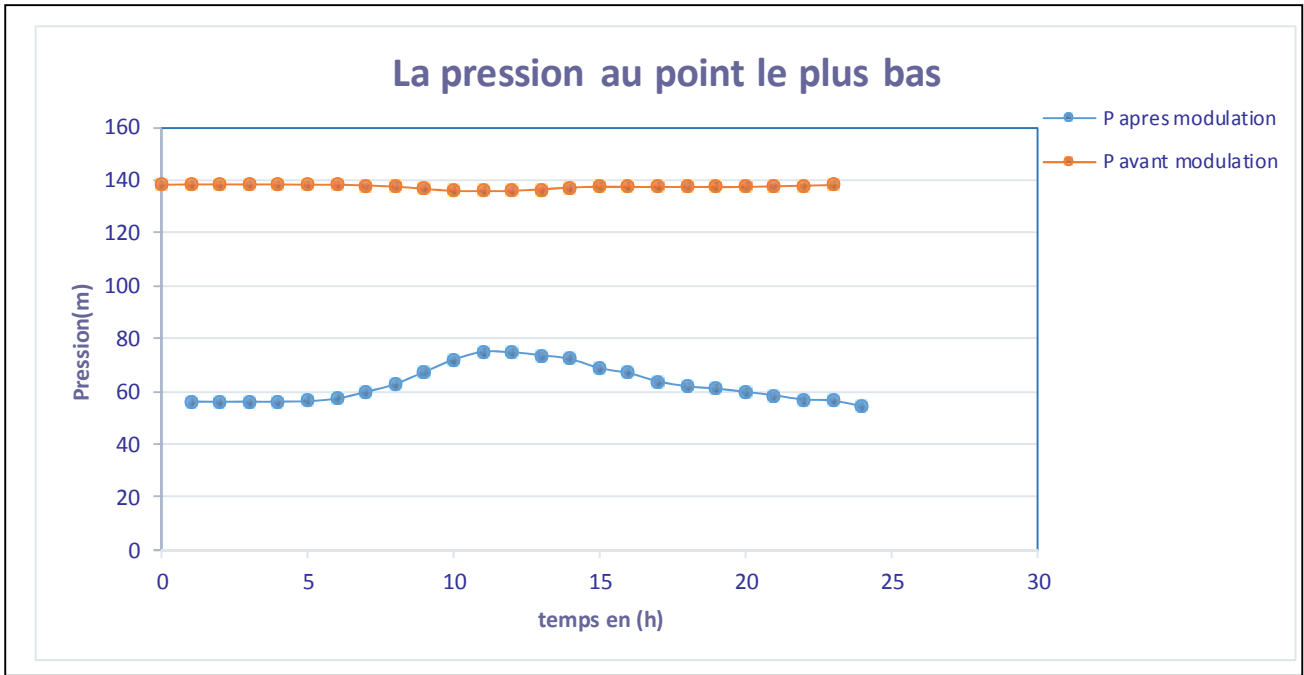


Figure 5.16 : variation de la pression au point le plus bas dans le réseau avant et après modulation de pression.

D'après la figure 5.16 et Avant la modulation de pression, les pressions sont excessives dans la majeure partie du réseau surtout aux heures creuses.

Mais après la modulation les pressions sont devenues moins importantes et cela a cause de consignes de modulation qui donne des pression optimale.

Les valeurs des pressions dans le reste des nœuds du réseau sont comprises entre les valeurs des pressions de point critique et le pointe le plus bas du réseau.

3.1.3 Résultats des pertes physiques par fuites avant et après modulation :

La variation de débit de fuite horaire avant et après la modulation de pression est représentée comme suit :

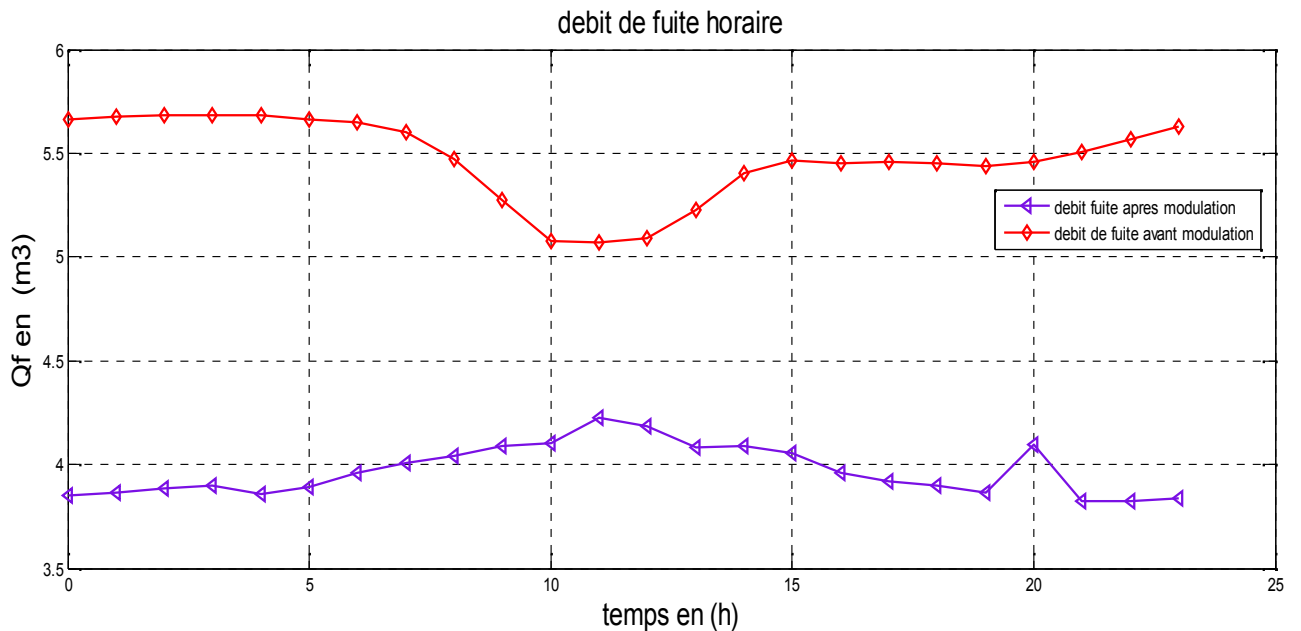


Figure 5.17 : variation de débit de fuite horaire avant et après la modulation de pression.

Le tableau ci-dessous représente les gains en pressions et en volumes de fuite obtenue à l'aide des simulations effectuées par l'outil de calcul.

Tableau 5.7 : Comparaison des débits de fuite de réseau de BOULOGHINE avant et après modulation de pression.

	Avant Modulation		Après Modulation		Différence	
	Heures creuses 00 :00	Heure de pointe 11 :00	Heures creuses 00 :00	Heure de pointe 11 :00	Heures creuses 00 :00	Heure de pointe 11 :00
Pression au point critique (bars)	10.92	9.24	3.01	4.65	7.91 - 72.43%	4.59 - 49.67%
Volume journalier mis en distribution (m ³ /j)	10805.500		10769.4664		36.0336	
Volume de pertes par fuites (m ³ /j)	131.3504		95.3168		36.0336 - 27.43%	

Le débit de fuite calculé par l'outil de calcul (Après la modulation) par l'introduction d'un exposant de fuites et d'un coefficient de débit dans le modèle, réduit par rapport le débit de fuite initial (Avant la modulation). Cette réduction de débit de fuite peut être expliquée par une seule chose : la diminution de pression (modulation de pression).

L'avantage de notre outil est permet d'optimiser la courbe de modulation de la pression par les AG, pour minimiser le débit de fuites et donc maximiser les gains de volumes mis en distribution.

Conclusion

La perte d'eau se produit dans tous les systèmes de distribution, seul le volume de perte varie. À travers les résultats de simulations obtenus dans ce chapitre, nous avons remarqué que l'optimisation des consignes de modulation engendre une baisse de pression de 72,43% en heures creuses et de 49.67% en heures de pointe, permettant de réduire le débit de fuite de 27.43%.

Nous pouvons alors affirmer l'efficacité des algorithmes génétiques dans l'optimisation du fonctionnement du réseau. Ces résultats sont fortement reliés à la fiabilité des données d'exploitation, le bon placement des points de calage, la précision des instruments de mesure ainsi que la mise à jour du modèle hydraulique.

Il est à noter que l'optimisation du fonctionnement du réseau, à travers la sélection des consignes de modulation optimales, engendre une pression satisfaisante permettant de minimiser le débit des fuites et par conséquent assure l'amélioration des performances requises, à savoir : le rendement du réseau, l'indice des pertes, la durée de vie etc..

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous proposons une solution opérationnelle pour l'optimisation de la courbe de modulation de pression des réseaux de distributions en eau potable. Les impacts constatés après cette optimisation sont très satisfaisants et permettent de réduire le volume des pertes physiques (économie d'eau).

Ce travail de recherche nous a permis d'élaborer un outil qui optimise la courbe de modulation de la pression afin de minimiser au maximum le débit de fuite (volume d'eau perdue) dans les réseaux d'alimentation en eau potable. En fait, nous développons une solution basée sur la méthode d'optimisation par algorithmes génétiques.

L'intérêt principal de cette approche se réside dans l'établissement automatique des consignes de modulation de la pression d'un réseau d'AEP et le remplacement du réglage manuel utilisé par la plupart des techniciens en hydraulique par un outil informatique plus performant.

La méthode proposée dans ce travail constitue un bon départ pour la réalisation d'un outil informatique solide et plus élaboré et capable de traiter d'autres problèmes de conception plus complexes à savoir le nombre et l'emplacement des vannes de modulation de pression.

Comme perspective, nous pouvons considérer plusieurs problèmes de conception simultanément en définissant une fonction objective adéquate, par exemple : une fonction objective qui dépend des consignes et de l'emplacement des vannes au même temps. Une direction envisageable de notre recherche, se manifeste dans l'utilisation d'autres algorithmes méta heuristiques tels que : l'optimisation par essaim de particules, colonies de fourmis, l'algorithme Krill Herd, etc

BIBLIOGRAPHIE

- Araujo, L.S., Ramos, H., and Coelho, S.T.,** 2006. «Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management ». Conference Proceedings, 17 pages.
- Autin, B.,** 2006 “Les métaheuristiques en optimisation combinatoire“. Mémoire présenté en vue d’obtenir l’examen probatoire en informatique, Conservatoire National des Arts et Métiers Paris, 159 pages.
- Barichard, V., et Hao Jin-Kao.,** 2003“Une approche hybride pour l’optimisation multiobjectif sous contraintes”. 12èmes Journées Francophones de Programmation Logique et programmation par Contraintes (JFPLC’03), pp 33-48, Amiens.
- Bayard,** 2011“ Gestion de la pression” Document technique de Bayard PPH 21/03/2011,159 pages.
- Ben Hassen, F.,** 2012. « Caractérisation et évaluation de la pression moyenne minimale d’une zone de desserte d’un réseau d’alimentation en eau potable » Mémoire d’ingénieur ENGEES, 103 pages.
- Général Water Saving,** « Réduire l’eau non contrôlée », Document technique de la SEAAL, Société des Eaux et d’Assainissement d’Alger.
- CNRC.,** 2003. "Élaboration d'un plan de renouvellement de réseau de distribution d'eau. Guide national pour des infrastructures municipales durables". Infra guide. Ottawa, Canada, 54pages.
- Guesmia, A.,** 2011. Amélioration du diagnostic des réseaux d’alimentation en eau potable. Thèse de Magister ENP Alger, 89 pages.
- Hlioui, S.,** 2008 «Machine synchrone à double excitation Modélisation analytique Modélisation éléments finis 3D Optimisation multi-objectifs Pré-dimensionnement optimal ».Thèse de doctorat en Génie Électrique, université de Besançon, 159 pages.
- Lambert, A.,** 2004. "Best Practice performance indicators: practical approach". Water 21: 3 pages.
- Lawler, E.L., et al.**1985” The traveling salesman problem: a guided tour of combinatorial optimization”. Wiley, Chichester 12 pages.
- Lepagnet, J.,** 2011 “Conception de métaheuristiques pour d’optimisation dynamique : application à l’analyse de séquences d’images IRM”. Thèse De Doctorat en informatique, 155 pages.
- Liberatore, S., · Sechi G. M.,** 2009. Location and Calibration of Valves in Water Distribution Networks Using a Scatter-Search Meta-heuristic Approach, Water Resour Manage (2009) Conference Proceedings, 17 pages.
- Manual 5.,** 2002. "Advanced Pressure Management and PRV Sélection, Managing and Reducing Losses from Water Distribution Systems", State of Queensland, Environmental Protection Agency, Wide Bay Water. " ISB N 0 724 2 949 3 7: 25 pages.
- Mahboub, A.,** 2011. Diagnostic et conception d’un réseau d’alimentation en eau potable par la modulation de pression: application à l’étage de Bologhine Alger. Mémoire de fin d’études ENSH Blida, 104 pages.

Mukand, S Babel., Md, S Islam., and A. Das Gupta., 2009 « Leakage management in a low-pressure water distribution network of Bangkok » Water Science & Technology : Water Supply-WSTWS- 9.2 -2009 Conference Proceedings, 07 pages.

May, J., 1994. "Pressure dépendent leakage." world water and water engineering. October 1994.

Nafi, A., 2006. « La programmation pluriannuelle du renouvellement des réseaux d'eau Potable ». Thèse de Doctorat. Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 232 pages.

Rossman, Manuel de l'utilisateur d'Epanet 2.0. (2003) version française. Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory U.S. environmental protection agency cincinnati, oh 45268. 214p :u.s.a.

Rozental, M., 2010. « La modulation de Pression Intérêts, Bénéfices et Mise en œuvre ».SUEZ-Environnement, 86 pages.

Ryma, F., 2010. « Modélisation Théorique et Validation Expérimental de la Réduction des Fuites par la Modulation de la Pression ».Mémoire de Maîtrise en génie de la construction école de technologie supérieure université du Québec, 82 pages.

Talbi, H., 2009 «Algorithmes évolutionnaires quantiques pour le recalage et la segmentation multiobjectif d'images». Thèse de doctorat en informatique, Université Mentouri constantine, 159 pages.

Thomton, J., and al., 2003. "Managing leakage by managing pressure." Water 21 by the IWA Water Loss Task Force: 2 pages.

Tricaricoa, C., et al., 2013. «Integrated optimal cost and pressure management for water distribution systems» Conference Proceedings, 10 pages.

Zheng, Y., & Walski, W. T., & Mankowski, R., & Herrin, G., & Gurrieri, R., & Tryby, M., 2002. « Calibrating water distribution model via genetic algorithms ».10 pages.