

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université de Bejaia
Département hydraulique

MÉMOIRE DE MAGISTER

En Vue De L'obtention Du Diplôme De Magister

Préparé Par :

M^{elle}. BOUMAZA NAIMA

Filière : Hydraulique

Option : Hydraulique Générale

Thème

Calage des modèles hydrauliques d'AEP- Application à un cas réel

Soutenu le: 05 / 12 / 2015

Devant le jury composé de:

Mr. BENDADOUCHE HOCINE	MCA	Université de Bejaia	Président
M ^m . BENMAMAR SAÂDIA	Professeur	ENP d'Alger	Rapporteur
Mr. ALLOUACHE ATMANE	MCA	Université de Bejaia	Examineurs
Mr. SEGHIR ABDELGHANI	MCA	Université de Bejaia	Examineurs
Mr. BERREKSI ALI	MCB	Université de Bejaia	Invité

Année Universitaire 2014/2015

DEDICACE

Je dédie ce Travail :

A mes très chers parents que Dieu les protège

A mes Frères,

A mes sœurs,

A mes nièces Kenza et Nerdjessa et Sara,

A mes neveux Hakim et Ahmed,

A toute ma famille,

A tous mes amis.

NAIMA BOUMAZA

REMERCIEMENTS

Gloire a Dieu qui m'a prêté vie, santé, volonté et courage pour achevé ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et sincères remerciements à ma directrice de mémoire, Madame BENMAMAR Saâdia (professeure : ENP d'Alger), de m'avoir confier ce sujet et de l'aide précieux qu'elle m'a apporter pour sa disponibilité, les conseils avisés qu'elle a su me prodiguer tout-au-long de la réalisation de ce travail.

Mes profondes remerciement s'adressent aussi aux membres de jury d'avoir accepter d'examiner mon travail.

C'est avec un énorme plaisir que je formule mes remerciements à Monsieur Brreksi.A et Monsieur Saou.H enseignants du département Hydraulique pour l'aide et l'encouragement qui m'ont donné pour accomplir mes études de magistère.

Je remercie mes parents de m'avoir donné la vie, de m'avoir élevé, instruit, pour tout leurs sacrifices, ... Les mots s'épuisent sans doute, mais vous comprendrez que tout un univers de paroles ne suffit pour vous dire MERCI.

Ma profonde gratitude va à mes frères et mes sœurs qui ont tout fait pour que je réalise se modeste travail.

NAIMA BOUMAZA

ملخص

النماذج الهيدروليكية للإمداد بمياه الشرب أصبحت تستخدم بشكل متزايد عند مسيري المياه و المخططين والاستشاريين. لجعل النماذج الهيدروليكية مفيدة وفعالة يشترط أن يعدل قبل استخدامها. محاكاة شبكة المياه تستلزم ضبط بعض المعلمات الشبكة التشغيلية والمادية. الهدف تحقيق تقريب معقول بين الضغوط ومعدلات تدفق المحسوبة والمقاسة في الشبكة.

مهمة محاكاة النماذج الهيدروليكية مهمة ثقيلة جداً لمصممي النماذج، التغيير اليدوي (الإستهلاك، غلاظة الماء، معامل قناة شكة لمياه...) عملية الضبط المتعاقبة لمعرفة تأثير هذه التغييرات تستغرق وقتاً وقد لا تصل إلى صانع الهدف في وقت أمثل. وفي الواقع، في أغلب الأحيان النماذج الهيدروليكية ليست مضبوطة جيداً.

ولذلك المثير لتطوير أداة إجراء التغييرات الضرورية على الوجه أمثل، وإطلاق عدد كبير من عمليات الضبط أيضاً في الوقت الأمثل لمستخدمي النماذج الهيدروليكية. يمكن اقتران المحاكاة الهيدروليكية مع خوارزميات التحسين ولذلك جعل مهمة الضبط أكثر كفاءة وأقل مملّة.

إن هدفنا في هذه المذكرة عمل برنامج من متلاب، يسمح قبل وبعد إدخال نموذج هيدروليكي مع قياسات الضغط والتدفق، ضبط معلمات مختلفة من الشبكة. الخوارزميات المستعملة لتحسين قيم هذه المعلمات تكون الخوارزميات الجينية. الحاسبة الهيدروليكية المستخدمة ستكون المتلاب. و الاقتران مضمون من قبل المكتبة الوظيفية "أبنت تولكيت".

كلمات البحث : الخوارزميات الجينية، ضبط، الأبنت، المتلاب، نموذج هيدروليكي، خصائص الضبط، شبكة مياه الشرب.

Résumé :

Les modèles hydrauliques des réseaux d'alimentation en eau potable sont de plus en plus utilisés par les gestionnaires de services d'eau, les planificateurs, les consultants ... Pour rendre les modèles hydrauliques utiles et performants, il est nécessaire qu'ils soient calés avant d'être utilisés. Le processus de calage d'un modèle hydraulique consiste à ajuster certains paramètres opérationnels et physiques du réseau. L'objectif étant de réaliser un rapprochement raisonnable entre les pressions et les débits calculés et mesurés dans le réseau.

La tâche de calage d'un modèle hydraulique est une tâche très lourde pour le modélisateur, la modification manuelle des paramètres de calage (consommations aux nœuds, rugosités des conduites, états des vannes...) et les simulations successives pour voir l'impact de ces modifications prennent énormément de temps et le modélisateur peut ne pas atteindre son objectif dans un temps optimal. En effet, le plus souvent les modèles hydrauliques ne sont pas parfaitement calés.

L'élaboration d'un outil permettant d'effectuer les modifications nécessaires de façon optimale et de lancer un nombre important de simulations aussi en un temps optimal s'avère donc intéressante pour les utilisateurs des modèles hydrauliques. Le couplage des simulateurs hydrauliques avec des algorithmes d'optimisation peut donc rendre la tâche de calage plus performante et moins fastidieuse.

L'objectif de ce mémoire est donc de construire un outil sous MATLAB permettant, en ayant en entrée un modèle hydraulique avec des mesures de pressions et de débits, d'ajuster les différents paramètres du réseau. Les algorithmes utilisés pour l'optimisation des valeurs de ces paramètres seront les algorithmes génétiques. Le calculateur hydraulique utilisé est EPANET et le couplage est assuré par la bibliothèque de fonctions « *EPANET tool-kit programmer* »

Mots clés : Algorithmes Génétiques, Calage, EPANET, MATLAB, Modèle hydraulique, Paramètres de calage, Réseaux d'AEP.

Abstract :

Hydraulic models of drinking water supply networks have become increasingly used by water managers, planners, consultants... to make the hydraulic models useful and efficient, it is necessary that they be calibrated before being used. The timing of a hydraulic model process to adjust certain operational and physical network parameters. The objective is to achieve a reasonable approximation between pressures and flow rates calculated and measured in the network.

The spot of calibration of a hydraulic model is a very heavy spot for the modelisator, the manual modification of the parameters (consumption to the nodes, roughnesses of the conduits, states of the valves...) and successive simulations to see the impact as of these modifications enormously take time and the modelisator can not reach are objective in an optimal time. Indeed, generally the hydraulic models are not calibrated perfectly

Making a tool it possible to carry out the modifications necessary in an optimal way and to also launch a significant number of simulations in an optimal time thus proves interesting for the users of the hydraulic models. The coupling of the hydraulic simulators with algorithms of optimization can thus make the spot calibrate more powerful and less tiresome.

The objective being thus to build a tool under allowing MATLAB, by having in entry a hydraulic model with measurements of pressures and flows, to adjust the various parameters of the network. The algorithms used for the optimization of the values of these parameters will be the genetic algorithms. The hydraulic calculator used will be EPANET and the coupling will be ensured by the library of functions « *EPANET tool-kit to program* ».

Keywords: Calibrating, calibrating parameters, Epanet, hydraulic model, Genetic algorithms, Matlab, Water distribution systems.

NOTATIONS

Nomenclature	Signification	Unité
C	coefficient de friction	-
D	Diamètre d'une conduite	mm
F	Fonction de Fitness	-
f	le facteur de friction de Darcy-Weisbach	-
J	nombre total des nœuds	-
i	Indice des nœuds	-
G	Accélération de la pesanteur	m/s ²
K	coefficient de perte de charge de la vanne	-
L	Longueur d'une conduite	M
N	nombre de mesures (observations)	-
P	Prix unitaire d'une conduite	DA, \$, €,...
p	exposant des différences entre les variables simulées et les variables mesurées.	-
p _{mes}	Pression mesurée	mce
p _{sim}	Pression simulée	mce
Q	Débit d'écoulement dans une conduite	m ³ /h
Q _{in}	débit à l'entrée des nœuds	m ³ /h
Q _{out}	débit à la sortie des nœuds	m ³ /h
Q _e	la demande aux nœuds	m ³ /h
q	la demande dans le nœud i	m ³ /h
Q _{T, mes}	Débit total mesuré	m ³ /h
Q _{T, sim}	Débit total simulé	m ³ /h
T	durée total de simulation	Seconde (s)
V	Vitesse	m/s
X	vecteur qui contient les variables de décision	-
$\bar{X}$	Borne supérieure de l'espace de recherche de solutions	-

$\underline{X}$	Borne inférieure de l'espace de recherche de solutions	-
α	Exposant de fuite	-
ρ	Masse volumique	Kg/m ³
W_i	les facteurs de poids	-

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : Etat d'art sur les modèles hydrauliques En Alimentation en Eau Potable

Introduction	3
I.1. Travaux sur les défaillances des conduites d'eau potable.....	3
I.2. Travaux sur les pressions et les débits dans les réseaux d'AEP	6
I.3. Travaux sur les fuites dans le système d'alimentation en eau potable	8
I.4. Travaux sur le calage de modèle de réseau d'alimentation en eau potable	11
I.5. Travaux sur la conception d'un modèle de réseau d'alimentation en eau potable	20
Conclusion.....	21

CHAPITRE II : Présentation des modèles Hydrauliques

Introduction	22
II.1. La simulation des réseaux de distribution	22
II.2. La modélisation hydraulique d'un réseau AEP	23
II.3. Modèles mathématiques utilisés dans les analyses des réseaux d'AEP	24
II.3.1. Modèles dynamiques.....	25
II.3.2. Modèles stationnaires	25
II.4. Le processus de la modélisation	26
II.5. Les Modèles hydraulique existants	28
II.5.1. Le modèle Aqua Cad	28

II.5.2. Le Modèle AQUIS	28
II.5.3. Le Modèle EPANET	29
II.5.4. Le Modèle H2ONET	30
II.5.5. Le modèle Info Works WS	31
i. Module de la qualité de l'eau	32
ii. Module d'auto calibrage	32
II.5.6. Le modèle MIKE URBAN	33
II.5.7. Le Modèle PICCOLO	34
II.5.8. Le Modèle PORTEAU	35
i. Le module Zomayet	36
ii. Le module Opointe	36
iii. Module Qualité	36
II.5.9. Le Modèle SynerGEEwater	37
i. Les Modules de SynerGEE water	37
II.5.10. Le Modèle WATERCAD	37
II.6. Comparaison et choix du modèle	38
II.6.1. Critères d'évaluation	38
a. Formules utilisées par le programme	38
a.1). Les équations (Q)	38
a.2) Les équations (h)	39
a-3) Les équations (ΔQ)	39
a-4) La méthode Hybride	39
b. Facilité d'utilisation	40
II.6.2. Choix du Modèle	41
II.7. LA modélisation du réseau sur EPANET	42
II.7.1. Présentation du Modèle	42
II.7.2. Principes hydrauliques régissant les calculs du modèle Epanet	43
II.7.3. Algorithme de la simulation par EPANET	45
Conclusion	49

CHAPITRE III : Les Algorithmes Génétiques

Introduction.....	50
III.1.Historique	50
III.2. Conditions d'utilisation des Algorithmes Génétiques	51
III.3. Présentation des Algorithmes Génétiques (AG)	51
III.3.1. Définitions	52
a.Gènes, chromosomes et population	52
b.La fonction d'adaptation (fitness)	53
III.3.2. Principe de fonctionnement des algorithmes génétiques	53
a.Les Operateurs	56
i.La sélection.....	56
i.1.Sélection par la roue de la fortune « Roulette Wheel Selection ».....	56
i.2. Sélection par Tournoi	57
i.3.La méthode élitiste.....	58
ii. Les opérateurs croisement et mutation	58
ii.1. L'opérateur de croisement.....	59
ii.2.L'opérateur de mutation	60
b.Le Codage	60
III.4. Avantages et inconvénients des Algorithmes Génétiques	61
III.5.Algorithmes génétiques dans le domaine de l'eau	62
III.5.1. Utilisation pour le dimensionnement des réseaux d'AEP.....	62
III.5.2. Utilisation pour le renouvellement des réseaux d'AEP	63
III.4.3. Utilisation pour aider à la recherche des fuites	64
III.4.4. Calage automatique des modèles hydrauliques des réseaux AEP	64
III.4.5. Autres domaines d'application	65
Conclusion.....	66

CHAPITRE IV : Conception de l'outil de calage

IV.I. Introduction.....	67
-------------------------	----

IV.1. Calage des modèles hydrauliques des réseaux d'AEP	67
IV.2. La méthodologie de calage des modèles de réseaux d'AEP	68
IV.2.1. Le calage en volume	68
IV.2.2. Le calage en niveau	68
IV.2.3. Le calage en pression	69
IV.3. Le choix de la période de mesure	69
IV.4. Les différents modèles de calage	70
IV.4.1. Les Modèles Itératifs	70
IV.4.2. Les Modèles Explicites (ou modèles hydrauliques de simulation)	70
IV.4.3. Les Modèles Implicites (ou modèles d'optimisation)	71
IV.5. Formulation du problème du calage des réseaux d'AEP	72
IV.5.1. Présentation d'EN2Toolkit	73
IV.5.2. Hypothèses	75
IV.5.3. Formulation de la fonction fitness	76
IV.5.4. La contrainte	76
IV.6. Méthodologie adoptée	77
IV.6.1. Les données d'entrée	77
IV.6.2. Les fonctions	78
IV.6.3. Programme pour appeler la bibliothèque ENtoolkit	78
IV.6.4. Formulation du problème d'optimisation par les algorithmes génétiques	78
IV.7. Présentation de la structure de l'outil	81
Conclusion	82

Chapitre V : Application sur un cas réel.

Introduction	83
V.1. Les Ressources En Eau De La Ville D'Alger	83
V.1.1. De la source au réseau	84
a. Le barrage de Béni Amrane	84

b. Le barrage de Keddara	84
c. Le barrage de Taksebt	84
d. Le barrage de Bouroumi	85
e. Le barrage de Boukerdane	85
f. Transfert Béni Amrane – Keddara	85
g. Conduite Keddara - Station de traitement Boudouaou	85
V.1.2. Conduites d'amenée	85
V.2. Présentation De La Zone D'étude d'Issèr- Keddara (SPIK)	85
V.2.1. Conduites de piquages SPIK	86
V.2.2. Conduites Mazafran	86
V.3. Positionnement des points de mesure sur le Modèle SPIK	86
V.4. Situation initial (avant le calage)	88
V.5. Résultats obtenus après le calage	91
5.1. L'évolution de la fonction fitness	91
5.2. Résultats de calage	92
V.6. Analyse et interprétation des résultats	95
Conclusion	97
 CONCLUSION GENERALE	 98
BIBLIOGRAPHIE	100

Liste des Figures

Figure II.1 : Schéma du processus de la modélisation d'un réseau d'AEP	27
Figure II.2: Composants Physiques d'un Système de Distribution d'Eau dans Epanet	43
Figure III.1 : Chromosome et ses différentes composantes.....	52
Figure III.2: Les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique (Levasseur, 2007)	53
Figure III.3 : Organigramme d'un algorithme génétique standard	55
Figure III.4 : Exemple de roue de fortune biaisée (Kouba, 2010)	57
Figure III.5 : Principe de la sélection par tournoi (Le candidat le plus vert dans 04 groupes de 05) [Vaillancourt, 2008].....	58
Figure III.6 : Principe de l'élitisme (Kouba, 2010).....	58
Figure III.7 : Opérateur croisement mono point sur deux chromosomes à six bits.....	59
Figure. III.8 : Slicingcrossover à deux points.....	59
Figure. III.9. Exemple d'un chromosome muté	60
Figure III.10 : procédure de calage d'optimisation (Savi et col., 2009)	65
Figure IV-1 : principe de la structure générale de l'outil	81
Figure V.1 : Système de production Isser Keddara (SPIK)	84
Figure V.2 : Modèle du réseau d'adduction SPIK «via EPANET »	87
Figure V-3 : Variations des pressions mesurées et simulées du nœud TC292.....	88
Figure V-4 : Variations des pressions mesurées et simulées du nœud TC020	88
Figure V-5 : Variations des pressions mesurées et simulées du nœud TC030.....	88
Figure V-6 : Variations des pressions mesurées et simulées du nœud TC290	88
Figure V-7 : Variations des pressions mesurées simulées du nœud TC291.....	89
Figure V-8 : Variations des pressions mesurées simulées du nœud TC390	89
Figure V-9 : Variations des pressions mesurées simulées du nœud TC469	89

Figure V-10 : Variations des pressions mesurées simulées du nœud TC394.....	89
Figure V-11 : Variations des pressions mesurées simulées du nœud TC498	90
Figure V-12 : Corrélation entre les pressions simulées et les pressions mesurées avant le calage.....	91
Figure V-13 : Evolution de la fonction fitness au cours de calage de modèle de réseau de SPIK	92
Figure V-14 : Variations des pressions mesurées simulées du nœud TC469	92
Figure V-15 : Variations des pressions mesurées simulées du nœud TC498	92
Figure V-16 : Variations des pressions mesurées simulées du nœud TC030	93
Figure V-17 : Variations des pressions mesurées simulées du nœud TC020.....	93
Figure V-18 : Variations des pressions mesurées simulées du nœud TC290.....	93
Figure V-19 : Variations des pressions mesurées simulées du nœud TC291.....	93
Figure V-20 : Variations des pressions mesurées simulées du nœud TC292	94
Figure V-21 : Variations des pressions mesurées simulées du nœud TC390	94
Figure V-22 : Variations des pressions mesurées simulées du nœud TC394.....	94
Figure V-23 : Corrélation entre les pressions simulées et mesurées après le calage de modèle SPIK	95
Figure V-24 : Répartition des coefficients de rugosité pour l'ensemble des conduites du réseau SPIK.....	96
Figure V-25 : répartition des coefficients de perte de charge singulière pour l'ensemble des conduites du réseau SPIK.....	96
Figure V. 26 : Localisation des points qui présentent une augmentation remarquable da la demande de base.....	97

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1: comparaison des modèles.....	41
Tableau (IV-1) : fonctions d'EN2Toolkit	74
Tableau V-1 : Moyennes et écarts type des différences entre les pressions mesurées et simulées	90
Tableau V-2 : Moyennes et écarts type des différences entre les pressions mesurées et simulées après calage.....	95

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est un bien naturel et économique. Elle constitue un patrimoine qui doit être géré avec l'objectif de protéger l'intérêt de toute la collectivité.

Chaque ville possède un réseau d'alimentation d'eau aux caractéristiques propres (longueur et diamètres des conduites, géographie de terrain, consommation des abonnés...). Nous nous retrouvons, sur le terrain, face à des problèmes, tels que la coupure de l'eau, les fuites et les pressions insuffisantes, qui ne reflètent nullement un bon fonctionnement de réseau. C'est pourquoi la recherche d'une meilleure connaissance du fonctionnement d'un réseau d'alimentation d'eau nécessite, d'une part un modèle de simulation et, d'autre part la perception aussi exacte que possible des données techniques représentant la réalité de réseau. Aussi puissants et conviviaux que pourront être des logiciels de calculs et de représentation graphique, la clé de succès dans leur utilisation repose essentiellement sur la qualité des données collectées avant la simulation.

De manière à rendre ce fonctionnement utilisable et performant, tout modèle hydraulique doit être adapté au modèle de réseau d'alimentation en eau potable modélisé en ajustant les valeurs des paramètres internes, lesquelles sont soit difficiles, soit impossibles à mesurer. L'ajustement de ces paramètres, appelé calage, est crucial pour l'utilisateur d'un modèle hydraulique puisqu'il détermine le niveau de confiance envers l'outil de simulation. L'ajustement manuel des paramètres peut être complexe et difficile à effectuer (essais et erreurs) et le recours à des algorithmes d'optimisation est très souvent la méthode envisagée. Ces algorithmes sont essentiellement des procédures de raisonnements mathématiques, lesquels permettent de trouver une combinaison de paramètres qui rend les débits et pression simulés par le modèle hydraulique le plus similaires possible aux débits et pressions observés sur le réseau.

L'objectif de ce présent travail est d'élaborer un outil de calcul qui nous permet de caler les pressions dans un réseau d'AEP, en se basant sur une approche d'optimisation par les algorithmes génétiques simples et en agissant sur les paramètres de calage suivants : les demandes aux nœuds, les rugosités des conduites et, les pertes de charge singulières. L'outil proposé est principalement basé sur l'utilisation d'une passerelle entre le logiciel de simulation hydraulique EPANET, qui nous permet d'accomplir la simulation hydraulique, et l'outil de calcul MATLAB, qui offre beaucoup de fonctionnalités, et en particulier les algorithmes génétiques. Cette passerelle est assurée par le biais de la bibliothèque de liens dynamiques EN2Toolkit.

Introduction générale

Le cas de la ville d'Alger constitue l'un de ces problèmes : une ancienne ville en plein développement urbain. Nous verrons à travers ce qui suit que le problème de cette ville n'est pas un problème de manque de la ressource, mais c'est plutôt un problème qui se situe au niveau de la structure hydraulique du réseau d'alimentation en eau potable : des manques d'eau locale en différents point du réseau. Les résultats du l'outil de calage proposé dans ce travail ont montré un bon accord de caler le modèle du réseau d'adduction ainsi de réduire les fuites dans le système d'alimentation d'eau.

Le texte de ce mémoire est organisé comme suit. Un premier chapitre expose une revue de la littérature scientifique en lien avec la problématique examinée dans cette étude.

Dans le chapitre II nous présentons, les modèles hydrauliques d'alimentation en eau potable. Dans le chapitre III, nous donnons 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. Dans le chapitre IV, nous définissons le calage des modèles des réseaux d'AEP, la méthodologie de calage, ainsi que les différentes approches utilisées pour le calage. Ensuite, nous expliquons la méthodologie suivie pour la conception de l'outil. Ainsi qu'une description d'EN2Toolkit. Dans un dernier temps, au cours du chapitre V, nous présentons une application de l'outil pour réseaux d'adduction de la ville d'Alger suivie d'une interprétation des résultats obtenus.

CHAPITRE I

Etat d'Art Sur Les Modèles Hydrauliques En Alimentation En Eau Potable

Chapitre I

Etat d'art sur les modèles hydrauliques En Alimentation en Eau Potable

Introduction

La modélisation du fonctionnement d'un réseau d'AEP cherche à décrire le comportement hydraulique des différents dispositifs du réseau. L'intérêt est de reproduire ce qui se déroule en réalité dans le réseau à l'aide d'un modèle hydraulique. La représentation et la précision du modèle sont tributaires des objectifs du service de l'eau et des analyses escomptées, le niveau de détail conditionne donc les résultats de la modélisation.

L'objet de ce chapitre est de présenter les travaux existants, menés pour améliorer la gestion des réseaux d'eau potable en général, et ceux qui ont abordé la problématique des défaillances en particulier. Nous nous sommes intéressés aux différents modèles de prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable et du calage, qui sont utilisés dans le cadre du renouvellement des conduites. Les limites d'utilisations des différentes approches nous permettront de relever les manques et de définir le cadre de notre contribution.

I.1 Travaux sur les défaillances des conduites d'eau potable

Eisenbeis(1994) a créé un modèle statistique de prévision des défaillances des conduites d'eau potable. Le modèle permet de définir quels sont les facteurs les plus influents sur les casses tels que le nombre de défaillances, le diamètre des conduites et de prévoir sur une période donnée le nombre de casses que les conduites pourront subir en fonction de ces facteurs. L'auteur a montré la nécessité d'exploiter des tronçons de canalisation de longueur minimale; ceci serait facilité par l'utilisation d'un système d'information géographique des conduites et de leurs défaillances. La méthode d'apprentissage permet avec un minimum de données d'avoir un bon résultat.

Rostum(2000) a développé une méthode statistique pour la prédiction des défaillances de chaque conduite dans un réseau de distribution. L'auteur a utilisé deux modèles de régression dans le but de relier l'influence des variables explicatives pour les temps de défaillance d'un réseau d'eau. La première approche est comme une généralisation de l'analyse de données de survie (c.-à-d. les modèles hasards proportionnels), la deuxième approche est un processus de dépouillement. Les modèles incluent des covariables, ils peuvent être appliqués à l'échelle du réseau pour la prédiction de défaillances. L'auteur a divisé les tuyaux du réseau en groupes basés sur les caractéristiques des différentes défaillances et les covariables qui se sont avérées importantes : longueur du tuyau, dimension du tuyau, l'état du sol, l'âge de conduite. Les résultats du modèle

sont satisfaisants sur modèle de réseau calé. Il permet facilement de prédire le nombre de défaillances futures en intégrant directement la fonction définissant l'intensité des échecs.

Blindu(2004) a élaboré un outil d'aide au diagnostic d'un réseau d'eau potable par analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydraulique. La méthode proposée par l'auteur est basée sur l'analyse de l'état de fonctionnement du réseau d'eau potable en utilisant des information indirectes telles que l'analyse des incidents , et des interventions survenues sur le réseau, ainsi que sur des information portant sur l'environnement du réseau(nature des sol, aménagement du territoire...).L'outil proposé par l'auteur est composé de deux aspects: diagnostique et aide à la décision. Le premier réalise une analyse qualitative et quantitative de tous les aléas pouvant exister sur le réseau et de détecter la simultanéité de deux ou plusieurs manifestations de dysfonctionnement se produisant dans un même laps de temps. Il a utilisé la théorie des graphes pour passer d'une analyse espace -temps entre 2 à m événements à une analyse de deux événements. Le deuxième aspect quantifie le niveau d'urgence dans le réseau pour assurer la réhabilitation. L'auteur a utilisé la méthode Hiérarchique Multicritère. Cette approche aide à la gestion et à l'analyse du fonctionnement du réseau d'eau potable et assure l'optimisation de la maintenance.

Poinard et ses collaborateurs(2004) ont développé une approche étudiant le vieillissement des réseaux d'eau potable. Le modèle permet de quantifier le taux de casse des réseaux d'eau potable. Les principes de ce modèle sont basés sur les deux effets suivants : la tendance de vieillissement et climatiques. Le modèle développé est basé sur un modèle stochastique de vieillissement en définissant la vie d'un tronçon comme une suite d'états de plus en plus dégradés pour établir des pronostics sur le long terme et modéliser le vieillissement du réseau. Il est possible de définir les courbes de survie pour des catégories de tronçon.

Alvisi et Franchini(2006) ont proposé une technique pour la planification de la réhabilitation quasi-optimale des systèmes de distribution d'eau. Cette approche est basée sur un simulateur hydraulique liée à l'optimiseur pour représenter les différents scénarios hydrauliques et de casse. Le problème est formulé en soulignant les variables de décision sur les tuyaux. Les contraintes sont représentées par les coûts maximaux qui sont autorisés par an. Les résultats obtenus reflètent la formulation de la fonction objective utilisée dans la quelle une importance est accordée aux coûts réduits et le volume d'eau non attribués au futur.

Dridi et ses collaborateurs(2006) ont développé une approche pour le renouvellement et la planification des interventions sur les conduites dans un réseau de distribution d'eau potable. Cette approche utilise : 1) un modèle probabiliste pour estimer les probabilités d'occurrence des bris de conduites qui assimile les durées entre les différents bris à des variables aléatoires, 2) un algorithme évolutionnaire afin de trouver les solutions optimales et, 3) un module de visualisation qui permet d'illustrer, à chaque phase de planification, plusieurs éléments intéressants comme par exemple : le nombre de casses enregistrées pour chaque conduite, le

nombre de conduite à remplacer, l'année du remplacement de chaque conduite et la pression calculée à chaque nœud du réseau pour la meilleure solution trouvée. Cette approche permet de tenir compte de la détérioration structurale des conduites et de la performance hydraulique du réseau pour satisfaire les pressions voulues.

Nafi(2006) a proposé un modèle d'aide à la décision permettant d'évaluer les besoins en renouvellement, de déterminer les priorités et de programmer dans le temps la réalisation des travaux sur un horizon donné de manière pluriannuelle. Le modèle élaboré propose une séquence acceptable d'interventions sur le réseau d'alimentation en eau potable (AEP) identifiant les conduites devant faire l'objet de travaux, ainsi que la nature des interventions à effectuer. L'auteur a tenu compte des contraintes liées à la disponibilité des ressources financières et aux prescriptions techniques de fonctionnement du réseau sur un horizon de planification donné. Le modèle utilise une optimisation multi-objective basée sur l'optimum de Pareto, faisant appel à un algorithme génétique spécifique couplé avec un logiciel de simulation hydraulique.

Jin et ses collaborateurs(2008) ont développé la méthode multi-objectives pour la réhabilitation de modèle du réseau d'alimentation en eau potable. Les auteurs ont utilisé un algorithme génétique de tri non dominé pour résoudre le modèle d'Optimisation Multi-Objectifs avec une seule valeur de l'AG conventionnelle. Par l'introduction d'une mutation artificielle, la population est dirigée au champ de solutions réalisables rapidement, et peut rechercher la meilleure solution dans le domaine ainsi, la convergence de l'algorithme a été améliorée et donne des solutions plus réalistes. Les résultats obtenus ont montré que la méthode de mutation artificielle accélère la vitesse de convergence de la population, améliore également la rationalité et la faisabilité des solutions.

Babykina(2010) a développé un outil d'analyse des défaillances des réseaux d'eau. Le modèle tient compte de l'historique incomplet des événements, du vieillissement des systèmes, et de l'impact négatif des défaillances précédentes sur l'état des systèmes et des covariables. Les paramètres du modèle sont estimés par la méthode du Maximum de Vraisemblance (MV). Une covariable dépendante du temps est intégrée au modèle. Il est supposé qu'elle est extérieure au processus de défaillance et constante par morceaux. L'auteur a utilisé des méthodes heuristiques afin de tenir compte de cette covariable lorsqu'elle n'est pas observée et de simulation de données artificielles. La méthode développée a été appliquée à l'analyse des défaillances des réseaux d'eau. L'influence des variations climatiques sur l'intensité de défaillance est prise en compte par une covariable dépendante du temps. Globalement les résultats ont montré une amélioration des prédictions du comportement futur du processus lorsque la covariable temporelle est incluse dans le modèle.

Gheisi et Naser (2013) ont examiné les erreurs possibles et la précision dans la fiabilité et l'analyse de tolérance de dommages d'un système de distribution d'eau si le nombre de composant, et les défaillances ne sont pas convenablement estimés. Il prend en compte toutes les

combinaisons composant les défaillances possibles ainsi que des variations temporelles et spatiales de la demande en utilisant le concept de l'analyse de la demande commandée par la pression. L'approche proposée est capable d'évaluer les conditions de défaillances partielles lorsque la pression nodale est suffisante seulement pour fournir partiellement les demandes nodales. Un modèle de simulation hydraulique a été utilisé pour l'analyse hydraulique. La fiabilité et la redondance d'estimer le nombre de combinaisons de défaillances ont été évalués sur la base de la moyenne pondérée des indices de performance du système et l'incorporation d'erreur maximale.

Obaid (2013) a proposé un outil pour l'amélioration des réseaux d'alimentation en eau et pour réduire les pertes d'eau dans le réseau en fonction d'une base de données SIG et d'un modèle de simulation hydraulique. L'auteur a développé un modèle d'évaluation intégrée pour étudier les stratégies de réhabilitation optimale dans les conduites. Il comprend trois composantes; modèle hydraulique d'évaluation, modèle d'évaluation physique et le modèle d'évaluation structurelle. **Obaid** a développé une méthode pour examiner l'état du réseau de distribution d'eau en utilisant des données résultant de l'analyse de la probabilité de défaillance mécanique sur la base des caractéristiques différentes conduites, telles que le diamètre du tuyau, la longueur, la pression et l'historique de défaillance des tuyaux. Un modèle linéaire généralisé est appliqué pour prédire les défaillances dans les tubes individuels et dans les zones de compteurs de district à partir des données disponibles. L'auteur a réalisé des corrélations entre les intervalles spatiales et temporelles des échecs de tuyaux pour développer un modèle d'évaluation et comparer la défaillance entre les conduites en PVC et en fer.

I.2.Travaux sur les pressions et les débits dans les réseaux d'AEP

Ulanicki et ses collaborateurs(2000) ont proposé une méthode de contrôle en ligne des secteurs où sont implantés des réducteurs de pression. Les méthodes envisagées prennent explicitement en compte un modèle de fuite. L'optimisation de pression à la sortie des réducteurs de pression a été exprimée sous forme d'un problème de programmation non linéaire. Le problème a été résolu à l'aide d'un modèle de simulation hydraulique. Les résultats ont été appliqués sur une zone à trois réducteurs de pression et deux points cibles. La méthode est appliquée sur une zone à trois réducteurs de pression et deux points cibles. Les résultats ont montré que le contrôle opérationnel de pression est une action pour réduire les fuites proche de celle prédite par les études de planification optimales

Lamaddalena et ses collaborateurs(2005) ont développé un Algorithme Evolutionnaire (AE) pour l'optimisation des débits sur les réseaux maillés d'alimentation en eau. L'objectif a été de réduire et de stabiliser le débit maximal produit. Le modèle a été utilisé pour calculer les arrivées optimales de sept (07) réservoirs d'un système hydraulique. La technique de calcul adopter par les auteurs permet d'utiliser le modèle avec efficience pour des réseaux hydrauliques comportant un grand nombre de réservoirs, sans contraintes de matériel ni de temps de calcul.

Greyvenstein et VanZyl(2006 et 2007) ont réalisé une étude expérimentale pour montrer l'effet de la pression sur les défaillances des conduites de distribution de différents matériaux. L'étude a été appliquée sur des tubes en acier et PVC et amiante-ciment. Pour montrer la relation entre la pression et les fuites, ils ont proposé de réaliser des défaillances sur ces tubes telles que les fissures longitudinales, trous rond et circulaire et corrodées. Ils ont identifié et analysé les facteurs qui peuvent être responsables de coefficient de fuite plus élevés. Quatre (04) facteurs sont considérés : fuite hydraulique, comportement matériel de tuyauterie, la demande hydraulique et de l'eau du sol. Les résultats montrent que le coefficient de fuite dépend de type de conduite et de l'état de défaillance. Les coefficients de fuite trouvés dans le cas des conduites en acier et PVC avec trou rond sont plus proches du coefficient théorique qui est de 0.5.

AbdelMeguid(2011) a développé une méthode pour calculer les horaires de réduction de la pression des vannes et les courbes de modulation de débit. Le temps et le débit de modulation peuvent être appliqués à une seule entrée de la zone d'étude. La méthode de modulation temporelle est basée sur la résolution d'un problème de programmation non linéaire. L'auteur a utilisé les algorithmes génétiques (GA) pour calculer les coefficients optimaux entre le débit et la pression de sortie d'un réducteur de pression pour minimiser la fuite de fond. L'auteur a développé le modèle mathématique du contrôleur hydraulique de pression à la sortie de la vanne. Le contrôleur a été testé expérimentalement afin d'évaluer ses performances et des fonctionnalités dans différentes conditions et plages de fonctionnement. Les résultats du modèle ont été comparés avec les données expérimentales et ont montré un bon accord de réduire les fuites dans le système de distribution d'eau.

Gomes et ses collaborateurs(2011) ont développé une méthode pour la gestion de la pression dans les systèmes de distribution d'eau. Les auteurs ont utilisé un modèle de simulation hydraulique et les relation de la pression / fuite et pression / consommation pendant le débit minimum de nuit pour estimer la réduction des pertes en eau à l'aide d'installation des vannes de réduction de pression dans les zones district avec compteur au points d'entrée. La méthode a été testée sur deux réseaux un petit et un grand. Les résultats ont montré que la gestion de pression peut aider à établir le niveau à partir duquel il ya un intérêt plus économique en termes de la réduction des pertes d'eau, mais il se traduit aussi par une réduction du chiffre d'affaires de l'eau.

Ojo et ses collaborateurs(2012) ont proposé un modèle pour améliorer la prédiction du débit dans le réseau de distribution malgré l'incertitude des paramètres d'entrée et de la demande nodale. Cette méthode simule l'effet de conditions de fonctionnement de diamètre du tube, longueur de tuyau et le facteur de frottement sur le débit. La logique floue a été utilisée avec succès pour capturer la relation non linéaire et viser l'incertitude dans le modèle de distribution de l'eau.

Spiliotis et Tsakiris(2012) ont proposé une technique pour l'analyse d'un réseau maillé avec la variabilité de la demande en eau et leur influence sur la charge hydraulique aux nœuds du réseau. La méthode proposée est basée sur une formulation de logique floue de la demande d'eau au

niveau des nœuds du réseau en utilisant la méthode Newton-Raphson comme un solveur. La méthode est très utile pour identifier les zones vulnérables du réseau en ce qui concerne la variation de la pression.

I.3.Travaux sur les fuites dans le système d'alimentation en eau potable

Poulakis et ses collaborateurs(2003) ont développé la méthode bayésien pour la détection des fuites dans les réseaux de distribution d'eau. Les auteurs ont couplé un modèle de simulations hydraulique avec la méthode probabiliste bayésien permettant le traitement explicite des incertitudes consécutives à des erreurs de modélisation et des erreurs de mesure. La méthode fournit des estimations de la probabilité de chaque événement de fuite (emplacement de la fuite et sa gravité) compte tenu des débits et de la pression dans la conduite. L'approche actuelle peut faire partie d'un logiciel intégré pour faciliter la prise de décision de la stratégie de gestion de réseau globale de l'eau basée sur des outils assistés par ordinateur, lorsque les erreurs de modélisation et de mesure ne dépassent pas certains seuils au-dessus duquel le diagnostic du système n'est pas possible.

Merzouk(2005) a proposé une méthodologie pour la gestion des fuites adaptée à la capacité des petites et moyennes collectivités et à la mise au point des modèles permettant la localisation des fuites sur les conduites de distribution. L'auteur a traité deux modèles ; la première base sur les pertes de charge se traduit par l'élaboration d'une équation de corrélation hydraulique en fonction du débit de fuite. Le deuxième modèle repose sur le principe du nœud mobile, celui-ci consiste à faire déplacer un nœud actif entre deux nœuds fixes d'un tronçon et rend possible la localisation relativement précise des fuites, il nécessite la modélisation du réseau et la simulation de son fonctionnement hydraulique.

Chesneau(2006) a proposé un outil d'aide à la maîtrise des fuites dans le réseau d'eau potable. L'auteur a suivi la procédure suivante :- reconstituer des chroniques de débit de fuite à partir de données de débit et de réparations de casses et de fuites ; - décomposer le débit de fuite en des parts distinctes sur les quelles opérer avec des moyens d'intervention ciblés ; - introduire expressément la dimension temporelle, en tenant compte de l'âge des réseaux, dans la formulation des fuites; - élaborer un outil prédictif qui permet de simuler les différents scénarios de gestion, incluant les diverses options à disposition de recherche des fuites ou renouvellement. Il permet de quantifier et de repérer le débit de fuite sur des réseaux sectorisés qui servent au calage d'un modèle de réseau hydraulique. Cette étude vise à minimiser les manifestations et les effets de la dégradation des réseaux dans le domaine des fuites.

Wu et Sage(2006) ont développé une approche basée sur l'optimisation pour quantifier et localiser les pertes d'eau par le processus de calage du modèle hydraulique. Le calage du modèle a été formulé en tant que problème d'optimisation non linéaire et est résolu en utilisant un algorithme génétique. La méthode est développée comme un cadre intégré de simulation et de modélisation hydraulique d'optimisation. Les résultats obtenus ont montré que la méthode est

efficace pour détecter les pertes d'eau dans le cadre du calibrage hydraulique du modèle de réseau.

Motiee et ses collaborateurs(2007) ont développé une méthode d'évaluation des fuites en raison de la haute pression dans les réseaux d'eau. Les auteurs ont utilisé un site pilote qui a servi à démontrer la méthodologie, y compris les fréquences de données de réseau pour les données spatiales et avec attributs stockées dans une base de données SIG grâce à l'utilisation d'un outil d'extension interface, les données ont été transformées dans le simulateur hydraulique aide pour quantification physique des pertes d'eau dans un réseau de distribution.

Brémond et ses collaborateurs(2009) ont développé un modèle pour améliorer le fonctionnement d'un réseau de distribution. La formulation dérive des équations de Navier-Stokes en tenant compte de la relation entre la pression et la fuite dans un réseau d'eau. Le problème a été résolu à l'aide d'une méthode numérique implicite. Les auteurs ont montré que la pression est un phénomène important lié à la fuite dans un réseau de distribution. Par contre, le modèle de simulation hydraulique suppose que les fuites soient uniformes le long d'un tuyau et un meilleur comportement pour agrandir l'éventail des exposants de fuite a été obtenu par cette approche algorithme.

Jaumouille (2009) a proposé une méthode pour optimiser l'état hydraulique d'un réseau d'eau potable afin de réduire les pertes. L'auteur a modélisé l'écoulement de l'eau dans les conduites en tenant compte des fuites et en utilisant différentes formulations. La première formulation est un système d'équations différentielles ordinaires représentant des fuites constantes et réparties uniformément le long des conduites. La seconde formulation prend en compte la relation entre les fuites et la pression. L'auteur a utilisé un système de deux équations aux dérivées partielles pour le contrôle du volume des fuites par action sur la pression. Un problème d'optimisation est résolu sous la contrainte que la pression doit être minimale pour réduire les fuites et être suffisante pour garantir un bon service aux consommateurs. Les résultats trouvés confirment que la réduction de la pression permet de réduire le volume des fuites de façon significative et que le choix de l'emplacement des points de contrôle est primordial pour optimiser cette réduction.

Tabesh et ses collaborateurs(2009) ont développé un modèle qui intègre les fuites pour calculer et évaluer les composantes d'un modèle des pertes d'eau réelles dans le réseau de distribution. Les auteurs ont utilisé les sorties de modèles hydrauliques EPANET pour tirer les données rassemblées à partir d'une enquête de terrain la sortie des résultats analysés par un modèle de GIS. Le modèle est capable de déterminer le nœud et tube de fuite et diriger les taux de fuite d'une façon plus réaliste.

Islam et ses collaborateurs(2011) ont proposé une nouvelle méthode pour détecter et localiser les fuites dans le système de distribution d'eau. Les auteurs ont utilisé la méthode de la logique flou qui intègre diverses incertitudes dans différents paramètres tels que : la rugosité, les demandes nodales, le niveau d'eau des réservoirs, les pressions contrôlées dans différents nœuds

et le débit dans les différents tubes. La méthode proposée est utilisée pour estimer le degré d'adhésion des fuites et sa gravité en termes d'indice de fuite aide à détecter et localiser les fuites dans système de distribution d'eau dans un minimum de temps après son apparition.

Haghighi et Ramos(2012) ont développé une approche (la méthode d'analyse transitoire inverse) pour la détection des fuites et le calage des facteurs de friction dans des tuyaux sous pression. La méthode proposé consiste créer un écoulement transitoire pour provoquer un changement dans une sortie de la consommation Cela pourrait être pratiquement fait en fermant ou en ouvrant une vanne de régulation disponibles. Le réseau est numériquement modélisé pour l'analyse des écoulements transitoires. Le modèle est élaboré en fonction des variables de décision et des facteurs de fuite et de friction des tuyaux. Les auteurs développée la programmation non linéaire et la fonction objectif moindres carrés pour minimiser les écarts entre les pressions mesurées et calculées sur les sites de mesure. La technique d'optimisation non linéaire est finalement utilisée pour résoudre le problème d'analyse transitoire inverse. Ils ont montré que pour réussir le modèle développé, il est recommandé que l'écoulement transitoire doive être produit très rapidement parce que contient plus d'informations sur le système et par conséquent entraînent à la détection des fuites plus fiable. En outre, les courants transitoires très rapides peuvent causer des problèmes pratiques aux systèmes tels que les pressions du coup de bélier indésirables ou cavitation.

Lijuan et ses collaborateurs(2012) ont développé une méthode pour détecter les fuites dans le réseau de distribution. Le problème est présenté comme un modèle non linéaire de détection des fuites dans le cas de pression élevée. La solution du problème a été obtenue par l'utilisation d'un modèle d'optimisation de l'algorithme génétique couplé avec un simulateur hydraulique. Les auteurs ont montré que le modèle construit peut quantifier et donner l'emplacement des fuites des petits modèles de réseau hydraulique.

Paola et Giugni(2012) ont réalisé une étude expérimentale afin d'analyser la relation entre le débit de fuite et la pression dans un modèle de distribution d'eau de laboratoire. Les auteurs ont effectué des essais expérimentaux à la fois avec les approches statique et dynamique, afin de simuler diverses conditions de fonctionnement d'un système d'eau. Les essais statiques simulent les conditions de fonctionnement de nuit, tandis que les essais dynamiques simulent le fonctionnement quotidien. L'étude a été appliquée sur des matériaux métalliques avec différent diamètre de jet rectangulaire et circulaire. Les résultats de l'expérience ont montré que le coefficient de fuite est loin de la valeur théorique qui est de 0,50 mais dépend de la nature de la défaillance sur la conduite et de la pression d'eau.

Rosich et Puig(2013) ont développé et appliqué une méthode pour détecter et localiser les fuites dans un réseau de distribution d'eau. La méthode est basée sur l'analyse du modèle de réseau d'eau avec des fuites afin de dériver une classe spéciale des résidus structurés. Le modèle de réseau de l'eau est décrit par un ensemble d'équations non linéaires avec une solution non

explicite. Les résidus sont calculés numériquement à l'aide d'un algorithme numérique Newton-Raphson. L'approche pourrait être étendue de manière décentralisée pas tous les résidus seraient calculés à la fois, mais certains d'entre eux, et en fonction de leurs réponses un nouvel ensemble seraient choisis pour le calcul, etc. jusqu'à ce que la fuite se corrige. Les résidus calculés sont conçus de sorte que les fuites sont découplées, ce qui améliore la localisation de fuites. Les auteurs ont supposé que les demandes sont connues et la mesure sont exactes qui ne est pas réel dans la pratique.

Gao et ses collaborateurs(2014) ont développé un modèle de lutte contre les fuites du système de distribution d'eau multi- source. Les variables de décision sont les caractéristiques de la pompe et la fermeture et l'ouverture de la vanne en utilisant le programme optimal de la pompe. La base de ce modèle, le schéma de partition et de la programmation de la pompe du système d'alimentation en eau sont déterminés; l'algorithme génétique est utilisé pour résoudre le problème d'optimisation.

Cette méthode a été testée avec succès sur un grand système de distribution d'eau multi- source : prouvé pour réduire simultanément la consommation d'énergie et les fuites du réseau afin d'améliorer avantage économique des entreprises d'approvisionnement en eau, que par commutation vannes et pompes, et aucun investissement supplémentaire nécessaire.

I.4.Travaux sur le calage de modèle de réseau d'alimentation en eau potable

Savic et Walters(1995) ont développé un modèle d'optimisation non linéaire pour le calage de réseau d'AEP. La fonction objective utilisée est de type du moindre carré basée sur l'algorithme génétique. Les paramètres de calage peuvent être de type différent, seuls les facteurs de frottement ont été examinés dans l'étude de cas. Cet outil de calage est appliqué sur un petit système de distribution pour trois états de charge: min, max et moyenne heure de la demande. Les résultats ont montré que les grands problèmes de calage de réseau peuvent être contrôlés et les paramètres supplémentaire de calage tels que les demandes nodal, les diamètres de tuyau, etc.) peuvent être facilement incorporés dans le modèle de calage.

En1997, les auteurs ont développé un outil de calibrage automatique de réseau d'AEP pour contrôler de plus grands réseaux, plusieurs conditions de chargement et plusieurs paramètres de calibrage; et permet l'incorporation facile de types de paramètre supplémentaires (les diamètres de tuyau, les demandes, etc.) et les contraintes dans le processus d'optimisation. Un réseau de distribution peut être considéré comme un graphe connexe avec des arcs représentant les tuyaux et les nœuds représentant des éléments de réseau tels que vannes, pompes, réservoirs, les points de demande, etc. Deux variables hydrauliques sont associées à des éléments de réseau, les débits et les pressions. Les auteurs ont combiné le travail théorique et pratique dans la modélisation (simulation) et les algorithmes génétiques pour l'amélioration du fonctionnement et de surveillance plus ciblée des systèmes d'approvisionnement en eau.

Leroy(1996) a proposé une méthode de calage automatique de réseau de distribution d'eau. L'auteur a amélioré les algorithmes pour augmenter la précision des estimations stables des paramètres du modèle réseau tels que la rugosité et les demandes aux nœuds. L'opération de calage consiste à rapprocher les valeurs mesurées des valeurs calculées par le modèle de simulation pour déterminer les emplacements de mesures les plus performants. Réduire l'influence des erreurs de mesures sur les estimations de paramètres s'assure par l'opération de sectorisation automatique. Consiste à choisir un certain nombre de tronçons sur le réseau et à les isoler par l'installation de vannes. L'auteur a proposé trois algorithmes qui déterminent la sectorisation du réseau : le premier algorithme utilise les débits et les charges mesurés et cherche à fermer des vannes pour augmenter les temps de séjour et les pertes de charge dans le réseau. Le deuxième algorithme consiste à remettre en cause le choix des mesures pour chaque sectorisation et raisonne sur chaque sectorisation initialement proposée pour rechercher les configurations du réseau réalisables. Le troisième est une amélioration des algorithmes précédents. L'application des algorithmes de sectorisation automatique sur le réseau de distribution permet une configuration optimale et définit les emplacements de mesures les plus performants.

Ormsbee et Lingireddy(1997) ont développé une méthode pour le calage d'un modèle de réseau de distribution. La technique se compose de sept étapes : identifier la destination du modèle ; déterminer les estimations initiales des paramètres du modèle ; collecter des données de calage ; évaluer les résultats du modèle ; effectuer le calage micro-niveau ; effectuer l'analyse de sensibilité ; effectuer le calage micro-niveau. Une des étapes la plus difficile du processus a été l'ajustement des valeurs finales de la rugosité des conduites et les demandes nodales à travers le processus de calage. La rugosité du tuyau est mesurée sur le terrain au niveau des bouches d'incendie avec deux méthodes soit par une méthode de conduite parallèle ou la méthode à deux bouches. La validité de ce modèle, dépend en grande partie de la précision des données d'entrée.

De Schaetzen et ses collaborateurs(2000) ont utilisé trois (03) approches différentes pour la calibration du modèle : deux (02) pour trouver le plus court chemin de la source et l'autre a été utilisée la sensibilité et l'entropie. Compte tenu du nombre de points d'échantillonnage, les deux premières méthodes calculer le chemin le plus court à partir de la source vers chaque autre nœud dans le réseau puis le nœud le plus éloigné de la source est sélectionnée est choisi sans équivoque pour être un emplacement de point d'interception. Les méthodes continuent de manière itérative jusqu'à ce qu'un nombre fixe de points d'échantillonnage soient choisis. La première méthode ajoute un tube fictif reliant la source au nœud choisi à l'étape précédente avec une longueur égale à zéro. La seconde méthode est légèrement différente et il attribue une longueur nulle à tous les tuyaux qui sont une partie de la voie choisie à l'itération précédente. La troisième méthode utilise la fonction de sensibilité donne une mesure de la sensibilité de la pression par rapport aux coefficients de rugosité calibrés par le calcul d'une matrice de sensibilité numériquement. L'autre critère dans la troisième méthode est une fonction l'entropie de Shannon (après Shannon, 1948), qui dit que dans le cas d'une distribution de probabilité inconnue ; la

meilleure approche est de supposer une distribution uniforme (pour les coefficients de rugosité dans ce cas). Cette fonction d'entropie de sorte que les points de prélèvement sont répartis uniformément au sein du réseau et l'utilisation de la matrice de sensibilité en sorte que les endroits qui sont les plus sensibles aux coefficients de rugosité sont sélectionnés. Ces deux critères sont combinés dans la fonction objective d'un algorithme génétique et résolu.

Vítkovský et ses collaborateurs(2000) ont développé un modèle de calage automatique et de détection des fuites à la fois. Les auteurs ont développé une technique transitoire inverse et la technique de l'algorithme génétique avec de nouveaux schémas de l'opérateur de croisement et de mutation pour déterminer le coefficient de frottement dans un réseau de distribution. La détérioration des tuyaux indiqués par des cas de frottement élevé peut être détectée avec l'existence des fuites. Les auteurs ont montré que pour les grands réseaux avec de nombreux tuyaux et raccords, le problème devient plus difficile à résoudre que l'espace de décision de l'analyse transitoire inverse devient plus complexe et multimodale et l'algorithme génétique prend beaucoup de temps pour les évaluations de la fonction objectif ainsi que pour ses calculs internes.

Kapelan(2002) a développé une approche sur le calage des modèles de réseau de distribution. L'auteur a analysé trois modèles mathématiques : l'écoulement stationnaire, l'écoulement quasi-stationnaire, l'écoulement dynamique incompressible. Le calage est formulé comme un problème d'optimisation de contrainte de type de moindre carrée pondérée qui permet une intégration efficace d'information sur les paramètres de calage et une méthode d'optimisation introduit l'algorithme génétique simple et multi-objectif. L'algorithme génétique couplé à un simulateur hydraulique.

L'auteur a développé une nouvelle méthode d'optimisation hybride algorithme génétique (HGA) pour le calage et la conception à la fois. Les résultats ont montré que la valeur de la fonction objective finale, de qualité optimale trouvée par HGA est généralement meilleure que celle obtenue par GA.

Lingireddy et Ormbee(2002) ont développé un modèle d'optimisation pour caler des modèles de réseau de distribution. Le modèle d'optimisation conçu introduit les pressions résiduelles, les débits des tuyaux, et les niveaux des réservoirs à la fois dans des conditions d'état stationnaire ainsi que quasi stationnaire. Le modèle proposé obtient une solution optimale par minimisation non linéaire de la fonction objective. La fonction objectif soumise à un ensemble de contraintes linéaires et non linéaires inclure les paramètres de calage tels que le coefficient de rugosité et la demande nodale. Les auteurs concluent que le bon résultat exige une grande probabilité de croisement et faible probabilité de mutation, mais la solution optimale globale n'est pas garantie par l'algorithme génétique.

Walski et ses collaborateurs(2002) ont proposé un outil de calage automatique de réseau de distribution d'AEP. Le calage est résolu comme un problème d'optimisation non linéaire implicite compte tenues des paramètres du modèle dont le coefficient de rugosité du tube, la demande de jonction et tuyau et vanne de statut opérationnel ou n'importe quelle combinaison des paramètres. Cette approche intègre deux modèles : un modèle des algorithmes génétiques et un modèle de simulation hydraulique. Les résultats de calage ont minimisé l'écart entre le modèle prédit et le champ observé des pressions aux nœuds et des débits de tuyau.

Kapelan et collaborateurs(2003) ont développé une méthode de conception des systèmes de distribution d'eau pour trouver l'emplacement optimal d'une série des appareils de mesure. Les auteurs utilise les données de mesure dans le calage du modèle de réseau de distribution d'eau. Le problème d'optimisation est formulé pour deux objectifs qui sont : la maximisation de la précision du modèle calibré par la minimisation des incertitudes pertinentes, et la minimisation des coûts totaux d'échantillonnage. Le problème optimal de conception d'échantillonnage est résolu en utilisant des algorithmes génétiques multi-objectifs sur la base de classement Pareto.

Atiquzzaman et Liong(2004) ont développé un modèle de calage pour déterminer les paramètres du réseau tels que les coefficients de rugosité et les demandes nodaux. L'idée de base de calage automatique du modèle de réseau consiste à utiliser un algorithme d'optimisation pour générer les variables de décision et un modèle de simulation du réseau hydraulique pour analyser le réseau. L'algorithme est lié à solveur de simulation de réseau pour estimer le coefficient de rugosité et évaluer ensuite la pression nodale à la fois à l'état d'équilibre et lors de la simulation en période prolongée. Les résultats du modèle de simulation sont transmis à la routine d'optimisation, où l'algorithme calcule la fonction objective, évalue les contraintes et met à jour les variables de décision. Les nouvelles variables de décision sont ensuite transférées dans l'outil de simulation de nouveau et le processus est répété jusqu'à l'obtention d'une solution acceptable. Deux exemples ont été résolus pour démontrer l'efficacité de l'algorithme proposé en termes de précision de la prédiction et de temps de calcul.

Martínez et ses collaborateurs(2004) ont développé une méthode de calage des réseaux de distribution d'eau. Les paramètres de calage le coefficient de rugosité des conduite et le coefficient de vanne. Le problème de calage est formulé par deux approches seront formulées : l'approche en avant procède à partir des réservoirs aux nœuds. L'approche arrière procède en amont, à partir des nœuds de fin ou de la zone de plus basse pression aux sources d'une façon plus simple. Une extension sur commande de SIG a été développée par les auteurs, capable de modéliser et calibrer des réseaux de l'eau en utilisant un optimiseur incorporé d'algorithme génétique. La méthode donne de bons résultats grâce au couplage entre SIG et les AG.

Wu et Walski(2005) ont proposé une approche pour appliquer efficacement la méthode de calage d'optimisation dans le modèle de distribution d'eau et une étude de cas sur la découverte des causes des problèmes de calage automatique. Les auteurs ont proposé le groupement de tuyaux

pour réduire le nombre de variables de calage. La fonction objective minimise l'écart entre le modèle simulé et observé des valeurs de pressions de jonction et les débits tuyau pour les conditions aux limites données telles que les niveaux des réservoirs, réglage de la vanne et la vitesse de la pompe. Le paramètre de calage est la rugosité et la demande en au nœud .La procédure et des mesures trouve efficace à l'amélioration de calage à l'aide de utilisation de algorithme l'optimisation.

Awad et ses collaborateurs(2006) ont développé une méthode de calage implicite des réseaux de distribution d'eau. Le modèle proposé est formulé à l'aide d'un concept d'un algorithme d'optimisation. Les paramètres du modèle de calage sont les demandes nodales et les pressions aux nœuds source et la rugosité des tuyaux. L'algorithme d'optimisation qui intègre un modèle de simulation de réseau est utilisé pour calibrer le réseau grâce à un intervalle de temps spécifié, présentant plusieurs motifs de la demande. Les résultats ont montré que le modèle proposé est capable de réduire au minimum la fonction objective et donne plusieurs bonnes solutions optimales.

Pasha (2006)a développé un modèle de calage pour identifier les coefficients de désintégration de la paroi. L'auteur a analysé les effets des incertitudes sur les estimations des modèles de qualité de l'eau dans un système de distribution dans des conditions stables et instables. Les sources d'incertitude pour la qualité de l'eau comprennent les coefficients désintégration, le diamètre de la conduite, le coefficient de rugosité et les exigences spatiales et temporelles nodaux. Le problème est résolu en utilisant l'algorithme d'optimisation d'algorithme génétique, qui est couplé avec des modèles de simulation hydraulique et qualité de l'eau.

Walski et colaborateur(2006) ont développé un modèle de calage automatique et testé la capacité de la méthode sur un modèle physique de laboratoire(maquette) d'un système de distribution pour déterminer les valeurs de la rugosité des conduites, et la localisation des vannes fermées, ainsi que la demande en eau dans le réseau. Le modèle hydraulique choisi a bien fonctionné indépendamment du fait que les formules de Hazen- William, Manning, ou Darcy - Weisbach ont été utilisées et les algorithmes génétiques. Les valeurs du modèle de calage automatique ont été comparées avec les valeurs de mesure obtenues à partir du modèle de laboratoire adaptée exactement aux débits et aux pressions mesurées dans le système.

Wu(2006) a développé une méthode qui permet de caler un modèle de qualité de l'eau d'un système de distribution d'eau. La méthode est formulée pour régler les paramètres de qualité de l'eau et les taux de réaction de la qualité d'eau tous dépend des matériaux des conduites et de stockage dans le réservoir. L'auteur a appliqué les algorithmes génétiques pour optimiser les paramètres du modèle en minimisant la différence entre les valeurs prévues par le modèle de simulation hydraulique et les valeurs observées. La méthode est appliquée à un système d'eau réel et a démontré qu'un modèle de qualité de l'eau peut être optimisé pour l'analyse des résidus de désinfectants d'une manière rentable.

Behzadian et ses collaborateurs(2008) ont proposé une méthode statistique pour le calage du modèle de réseau de distribution. Le problème est formulé comme un problème d'optimisation multi-objectif en vertu de l'incertitude des paramètres de calage. Pour résoudre le problème de temps de calcul, le problème d'optimisation est résolu en utilisant un multi-objectif d'algorithmes génétiques et les réseaux de neurones adaptatifs.

Ami et ses collaborateurs(2009) ont développé une approche basée sur les données statistiques d'un modèle de réseau hydraulique et est appliqué pour estimer la demande future en eau pour le calage de modèle de réseau. Les auteurs ont utilisé la méthode des moindres carrés et les paramètres de calage utilisés dans cette étude sont les variations de la demande en eau, les facteurs de multiplication sont calibrés à chaque pas de temps de l'ensemble du processus d'autres variables sont supposées constantes pendant une certaine période de temps. Ils ont supposé que les paramètres d'entrée de la vanne ou de la pompe sont connus alors que les coefficients de rugosité sont calibrés hors ligne en utilisant des procédures classiques (avec des informations complètes supplémentaires sur le diamètre du tuyau, le type de matériau et l'âge).L'estimation à priori des valeurs des variables de décision permet une meilleure convergence du modèle d'étalonnage vers la solution du problème; et fournit des informations adéquates sur l'état hydraulique du système pour l'optimisation en temps réel. La méthodologie proposée est démontrée sur un système municipal prototype de distribution d'eau.

Liberatore et Sechi(2009) ont développé une technique pour l'insertion et le calage de soupapes de régulation de pression. Les auteurs ont utilisé les techniques de méta-heuristique pour 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. La recherche de l'emplacement de la vanne est limitée à des ensembles tuyau défini sur la base de l'analyse hydraulique et compte tenu de l'écart entre les pressions minimum et maximum acceptables dans le réseau.

Sumer et Lansey(2009) ont développé un modèle pour déterminer la quantité des données nécessaires pour caler correctement un modèle d'un système de distribution pour deux objectifs différents : fonctionnement quotidien et la conception de l'extension du système dans une condition de l'état d'équilibre de forte demande et de la programmation quotidienne de la pompe. Les résultats suggèrent que le modèle construit à des fins d'exploitation a besoin de données sur le terrain avec les pertes de charge dans le système sont de petite taille .Ils ont montré que le modèle d'opération peut être calé avec des données limitées car la sensibilité est faible pour les décisions et les conditions hydrauliques sont très stables. Les prédictions du modèle de ces pressions sont fortement influencées par des paramètres calibrés. Une extension du système de distribution nécessite des données significatives puisque la condition de forte demande provoque des pressions critiques faibles.

Wu et Clark(2009) ont développé un modèle de calage défini comme un problème d'optimisation non linéaire implicite, qui est résolu en utilisant un algorithme évolutionnaire. Le modèle effectue une combinaison des paramètres d'optimisation tels que la rugosité de la canalisation, la demande de jonction et lien (tuyaux, vannes et pompes), mais aussi une variété des tâches de calage d'une manière progressive selon les conditions de système pratique, y compris l'équilibre des débits en période prolongée et identifier les données problématiques et les anomalies de modèle. Le modèle développé permet d'intégrer l'outil de calibration GA avec le modèle de simulation hydraulique pour atteindre un bon niveau de précision en ce qui concerne la détermination des paramètres de modèle dans le système distribution d'eau.

Zhiqiang et ses collaborateurs(2009) ont développé une technique de calage du coefficient de rugosité des conduites de réseau distribution. Les auteurs ont utilisé la formule Manning et l'algorithme génétique pour déterminer la fonction objective du facteur de rugosité sous plusieurs conditions de chargement en raison de l'âge de la conduite ainsi que la suppression des soupapes. La plupart des conduites dans le modèle hydraulique du système de distribution d'eau pratique sont rugueuses. Les résultats ont montré que la formule Manning a de meilleures performances dans un réseau à grande échelle avec de nombreux tuyaux vieillissants et réduit le temps d'exécution de calage.

Jung et Karne(2010) ont réalisé une étude quantitative sur comment les incertitudes quant au diamètre des conduites, la célérité des ondes et la demande d'eau à l'heure des essais détériorent invariablement la performance des approches de calage. La méthode proposée dans le calage systématique devrait explicitement inclure ces incertitudes additionnelles durant le processus d'analyse inverse de transitoire (ITA). Les méthodes d'optimisation (Algorithmes Génétiques et une Optimisation par Essaim) sont appliquées afin de réduire au minimum la différence entre la mesure et la prédire pendant le calcul inverse. Les deux optimisations ont tendance à fournir un étalonnage relativement précis des fuites mais des valeurs plus pauvres pour les facteurs de frottement.

Laucelli et ses collaborateurs (2011) ont développé un modèle à Cinq étapes pour le calage de réseau d'AEP. Le problème de calage est résolu comme suit : 1. Interprétation et analyse de réseau à l'état d'équilibre – 2. Analyse topologique et simplification du réseau – 3. Le processus d'optimisation afin d'estimer les valeurs proches optimales pour les variables de décision – 4. Évaluation des meilleures solutions à l'aide des essais d'écoulement dans le poteau d'incendie – 5. Vérification des résultats de calage. Ce dernier est formulé comme un problème d'optimisation multi objectif, les contraintes implicites sont les équations de masse et de bilan énergétique. Les paramètres de calage sont les coefficients de rugosité, les coefficients de vitesse de la pompe et les coefficients des vannes. Les résultats obtenus sur l'étude de cas ont montré la bonne concordance entre les valeurs prévues et observées après 7 jours.

Nicolini et ses collaborateurs(2011) ont proposé une méthode de calage des pressions et la gestion optimale des fuites dans le réseau de distribution d'eau. Le Calage du modèle est basé sur un seul objectif, un algorithme génétique codé réel qui fournit les valeurs optimales des coefficients de frottement de la tuyauterie et détermine le coefficient de fuite. La Gestion des fuites est réalisée par l'introduction et la régulation des soupapes de réduction de pression. Les auteurs ont adopté une approche basée sur les algorithmes génétiques multi-objectifs de telle manière à minimiser le nombre de vannes et les fuites totales dans le réseau.

Nicolini(2011) a développé une méthode pour le calage des modèles de simulation dans les systèmes de distribution d'eau. Le modèle est basé sur un algorithme génétique de codé réel, et les variables de décision sont la rugosité des conduites et les coefficients de fuite. La simulation du système est réalisée sur un horizon de temps d'une journée, à partir des données enregistrées des précédentes 24 heures. La méthode repose sur un ensemble de station de mesure dans laquelle la pression et le débit sont enregistrés et sont transmis via le protocole GPRS. Le calage a été obtenue par la subdivision de certains zone dans les secteurs, ce qui a également permis de donner la priorité des campagnes de détection des fuites.

Tabesh et ses collaborateurs(2011) ont développé un modèle d'optimisation pour le calage des modèles de réseau de distribution; la demande d'eau et la pression à l'aide d'algorithme génétique. Les variables de calage incluent les coefficients de rugosité, diamètre du tuyau et les demandes nodales. Quatre (04) types de consommation ont été considérés : consommations minimum, normale, maximum et incendies. Le terme de fuite est incorporé dans les équations hydrauliques pour pouvoir évaluer la situation hydraulique sur l'analyse de pression et de la demande d'eau.

Craig Ashby(2013) a proposé une technique de calage appliquée sur deux modèles de réseau de distribution maillé et ramifié au laboratoire. L'auteur a effectué trois (03) différents calages en utilisant exclusivement la pression à partir des données de simulation hydrauliques, les vitesses à partir de données de qualité de l'eau, et des combinaisons des deux en tant que la base de calage. Les résultats des recherches ont montré la nécessité d'utiliser à la fois la vitesse et les données de pression pour le calage hydraulique et d'éviter ainsi les erreurs de compensation.

Elsheikh et ses collaborateurs(2013) ont développé un modèle de calage de chlore dans les réseaux d'AEP. Le problème est basé sur une fonction objective de conception minimales des coûts et satisfaire les contraintes de vitesse et de pression. Le paramètre de calage est le coefficient de réaction. Le calage a été effectué sur la pression et le débit. Trois (03) cas test sont été réalisés : écoulement quasi-stationnaire, poteau d'incendie et l'extension longue durée. Les résultats sur la qualité de l'eau dans le réseau de distribution ont montré des concentrations élevées de fer et de manganèse dans les zones à proximité des sources et décroissance forte de chlore dans le réseau.

Darvini(2014) a développé une méthode d'optimisation multi - objectifs pour discriminer le modèle concurrent dans l'analyse de distribution d'eau et l'amélioration de l'estimation des paramètres précis lors de calage du modèle simultanément. La méthode proposée est basée sur une procédure permettant la détermination du modèle le plus approprié parmi ceux disponibles lors de la construction du modèle du réseau de distribution d'eau. Elle permet de réduire de manière significative l'incertitude des estimations des paramètres, en choisissant les meilleures expériences supplémentaires et en utilisant des mesures de pression nodale disponibles. L'analyse de l'ensemble fournit l'identification de l'emplacement optimal où l'installation des capteurs de pression supplémentaires pour la détermination du modèle adéquat et l'estimation des paramètres.

Dini et Tabesh (2014) ont développé un modèle pour le calage d'un système de distribution. La méthode utilisée consiste à combiner un simulateur hydraulique avec les algorithmes d'optimisation. Les paramètres de calage sont les coefficients de Hazen-Williams et la demande nodale. Les données mesurées sont les pressions nodales et les débits. La nouvelle méthode proposée a été examinée sur un exemple d'essai de deux-boucles puis sur un grand réseau d'alimentation en eau. La comparaison des résultats avant et après le calibrage a montré que l'erreur moyenne des essais a été améliorée de 6,80 à 2,12.

Maskit et Ostfeld(2014) ont proposé une méthode pour le calage des paramètres de fuite dans le réseau de distribution .La méthode consiste à classer la conduite dans le réseau en groupe selon le matériel, ainsi les paramètres de calage sont les coefficients de fuite pour chaque type de conduite. La méthode de calage est basée sur une technique d'optimisation et un modèle de simulation hydraulique. La fonction objective est exprimée en fonction du volume de fuites et les pressions dans le réseau pendant une journée. Les résultats de calage des coefficients sont très proches de leurs valeurs expérimentales.

I.5.Travaux sur la conception d'un modèle de réseau d'alimentation en eau potable

Todini(2000)a développé une technique sur la base d'indice de résilience de conception réseaux en boucle afin d'augmenter la fiabilité hydraulique et la disponibilité de l'eau pendant la défaillance des tuyaux de réseau de distribution. L'auteur a proposé une procédure appliquée sur n'importe quel ensemble de diamètres selon le processus suivant est : (1) Fixer une valeur de l'indice de résilience de minimum requis. (2) Tous les tuyaux sont fixés à un diamètre donné. Le diamètre initial pour les tuyaux peut être sélectionné sur la base de considérations techniques ou plus simplement peut être réglé à la plus grande classe de diamètres commerciaux (3) analyse hydraulique du réseau, qui est réalisée en utilisant le " gradient mondiale " développé par Todini (1979).Todini et Pilati (1988) ont acquis une certaine crédibilité après son inclusion dans EPANET (Rossman, 1993).Le problème est formulé comme un problème d'optimisation de vecteur avec deux fonctions objectives : le coût et la résilience. La solution du problème

d'optimisation engendrée par une approche multi- objective utilise une technique heuristique même dans le cas de grands réseaux.

Misirdali(2003) a développé une méthode qui consiste à calculer la fiabilité d'un système de distribution d'eau à partir d'un point de vue hydraulique. L'auteur a examiné la variation spatiale de la demande totale du secteur, les caractéristiques du coefficient de frottement de différent niveau d'eau dans le réservoir de stockage et les tuyaux en utilisant les données de consommation.

Bhave et Gupta(2004) ont développé un modèle basé sur la logique floue pour la conception optimale des réseaux de distribution pour les demandes en eau future. Ils ont modifié les contraintes de boucle-perte de charge sous forme de contraintes chemin-perte de charge en tenant compte des contraintes de perte de charge supplémentaire de chemin d'accès. Le concept « chemin » est suggéré pour décider de la direction du débit et de fixer la distribution initiale. Le modèle de programmation linéaire est modifié pour éviter la procédure itérative et fournit également une solution moins coûteuse.

Liong et Atiquzzaman (2004) ont proposé un outil de conception de réseau de distribution. Les auteurs ont couplé un modèle hydraulique et un algorithme d'optimisation modifié pour traiter à la fois l'état d'équilibre et de simulation de période prolongée. Les résultats ont montré que le coût de calcul minimal et la pression minimale nécessaire à la conception du réseau sont satisfaits.

Akdoğan (2005) a amélioré une méthode de conception de réseaux de distribution d'eau. L'auteur a suivi une procédure d'optimisation linéaire, la fonction objective impose la minimisation du coût en capital des tuyaux. La méthode est basée sur un algorithme d'optimisation couplé à un simulateur hydraulique à l'heure de pointe. La méthodologie peut être appliquée facilement à n'importe quel réseau de distribution d'eau même si les longueurs des conduits sont inconnues, le coût augmente avec le niveau fiabilité.

Shau et ses collaborateurs(2005) ont proposé un modèle d'optimisation pour la conception optimale des systèmes de réseaux de distribution. Les auteurs ont modifié les algorithmes génétiques pour les utiliser dans la minimisation du coût du réseau dans les exigences pratiques avec les ressources limitées et le manque de temps et dans la conception optimale des réseaux maillés et ramifiés aux différents diamètres.

Djebedjian et ses collaborateurs(2006) ont proposé un modèle d'optimisation de la conception d'un système de distribution d'eau. Ils ont utilisé les algorithmes génétiques pour optimiser les diamètres des tuyaux et la méthode de Newton pour l'analyse du réseau hydraulique. La méthode proposée a montré sa capacité à résoudre les problèmes d'optimisation réelle et satisfaire les pressions nodales.

Čistý et Bajtek(2008) ont élaboré un modèle pour déterminer le coût minimal pour la conception d'un système de distribution d'eau. Le modèle est basé sur une combinaison de méthodes de programmation linéaire et une approche des algorithmes génétiques pour la conception optimale des réseaux de distribution d'eau de grande boucle.

Blokker (2010) a développé un modèle de la demande en eau et de valider sa capacité de prévoir la demande d'eau maximum pour plusieurs types d'utilisateurs résidentiels et non résidentiels. Ce modèle a été appliqué dans le cas où des études liées à la modélisation de la qualité de l'eau. L'accent était mis sur les conditions hydrauliques qui affectent le processus de qualité de l'eau dans le système de distribution d'eau, tels que le temps de séjour et une vitesse maximale.

Chandramouli et Malleswararao(2011)ont développé une technique de conception optimale du réseau de distribution d'eau. Cette méthode consiste à évaluer le paramètre de fiabilité globale du réseau en utilisant le concept de la logique floue basée sur les excès de pressions disponibles au niveau des nœuds de la demande. Ce paramètre a été incorporé dans le modèle en utilisant la combinaison d'algorithmes génétiques et le modèle simulation hydraulique EPANET.

Conclusion

Les modèles hydrauliques sont largement utilisés par les planificateurs et les gestionnaires des services de l'eau pour l'analyse, la conception, la réhabilitation et la gestion des réseaux d'alimentation en eau potable. Ils permettent de détecter les anomalies qui peuvent se produire sur le réseau. La difficulté de ces modèles est l'injection des données d'entrées ainsi que le choix des nœuds. Pour rendre un modèle hydraulique applicable, il est nécessaire de le caler (**Walski, 1986**)[in **wu et col.,2002**].

L'attitude des praticiens va changer avec le développement récent des logiciels de modélisation commercialisés qui comprennent un module de calage automatique (optimisation) dans le logiciel disponible (**Wu et Clark 2009**). En outre, les types de paramètres de calage à considérer vont de la rugosité seulement aux études considérant une variété de paramètres de calage, y compris les rugosités, les demandes aux nœuds, les paramètres de commande liés aux dispositifs de régulation, les paramètres des fuites, etc. De même, les types de méthodes d'optimisation employées varient en sophistication, partant des méthodes locales de recherche (non-dérivé et dérivé), passant par l'optimisation mathématique (linéaire et non linéaire) aux méthodes globales de recherche (les modèles de simulation et les algorithmes génétiques), ou une combinaison des méthodes globales et locales.

L'analyse de l'existant nous permet d'orienter notre travail vers le calage automatique en utilisant un modèle de simulation couplé avec logiciel d'analyse numérique.

CHAPITRE II

Présentation Des Modèles Hydrauliques

Chapitre II

Présentation des modèles Hydrauliques

Introduction

Un modèle hydraulique de réseau d'AEP est un modèle mathématique employé pour simuler le comportement du réseau dans des conditions de fonctionnement spécifiques. Cependant, chaque modèle mathématique, peu importe son degré de complexité, est seulement une approximation du réseau réel de distribution. Les modèles mathématiques diffèrent dans la complexité, les techniques de résolution utilisées, les données d'entrées, les données de sortie générées. La modélisation des réseaux est mise en œuvre par les concepteurs et par les gestionnaires selon des objectifs différents ainsi, il est indispensable d'avoir recours aux modèles pour concevoir, dimensionner, exploiter, gérer et maintenir les réseaux (*Merzouk,2005*).

La modélisation cherche à reproduire une réalité pour expliquer et prédire en vue d'une gestion efficace, quantitativement et qualitativement.

Ce chapitre présente les modèles hydraulique en définissant la nature et les buts de la simulation de système de distribution, et donner les étapes de base dans le processus de modélisation ;ainsi nous essayons de donner un aperçu sur les différents modèles hydrauliques et programmes existants dans le domaine avec une présentation des interface graphique à la base de tout modèle hydraulique , puis une comparaison des modèles cités et nous donnons d'une manière détaillée une définitions , mode d'utilisation et algorithme de calcul du modèle maintenu pour réaliser notre travail .

II.1. La simulation des réseaux de distribution

Le terme simulation se rapporte généralement au processus d'imitation du comportement d'un système. Dans notre travail, nous considérons la simulation comme le processus de l'utilisation d'une représentation mathématique du système réel, cette représentation est appelé "modèle".

La simulation d'un réseau de distribution qui reproduit le comportement dynamique d'un système existant ou projeté, est généralement appliquée, surtout dans les cas où on ne peut pas soumettre directement le système réel à l'expérimentation, ou afin d'évaluer un projet de système de distribution avant de le réaliser réellement.

Des simulations peuvent être utilisées pour prévoir les réactions du système sous un éventail de conditions sans perturber le système en place.

La simulation peut être utilisée dans un état statique ou dynamique. La simulation à l'état statique est utilisée pour déterminer le comportement d'opération du système à cet état ; ce type d'analyse

peut aider à déterminer l'effet à court terme du débit d'incendie ou de la demande moyenne sur le système.

La simulation à l'état dynamique est utilisée pour évaluer les performances du système avec le temps, ce type d'analyse permet à l'utilisateur de modéliser le remplissage et le vidage des réservoirs, régulariser l'ouverture et la fermeture des vannes, variation des pressions et des débits à travers le système en fonction de la variation des conditions de la demande et mettre en place une stratégie de contrôle automatique.

Les logiciels modernes de la simulation utilisent l'interface graphique, ce qui facilite la création des modèles et la visualisation des résultats de la simulation.

Le terme "modèle" est un terme générique. On le définit comme étant une conceptualisation de la réalité, une certaine image de la réalité que nous créons, une image incomplète et partielle, comprenant des caractéristiques, des attributs de la réalité qui nous intéressent en particulier ou que nous avons la possibilité de connaître (*Kapelan, 2002*).

On distingue deux régimes de modélisation :

- Modélisation en régime statique : c'est la représentation d'une situation stationnaire pour des conditions définies déterminées et constantes dans le temps.
- Modélisation en régime dynamique : c'est la représentation dans l'espace et dans le temps du fonctionnement de l'ensemble des éléments du réseau.

II.2. La modélisation hydraulique d'un réseau AEP

La modélisation du fonctionnement du réseau cherche à décrire le comportement hydraulique des différents dispositifs du réseau. L'intérêt est de reproduire ce qui se déroule en réalité dans le réseau à l'aide d'un modèle hydraulique (*Nafi, 2006*).

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

▪ Modèle pour l'analyse du fonctionnement hydraulique et diagnostic

Dans ce type de modèle, on estime la demande des abonnés ainsi que la rugosité dans les canalisations, inversement aux modèles de dimensionnement. Ce modèle nécessite la connaissance des données topographiques, les classes de tuyaux et la typologie des consommateurs. Les mesures de débits et de pressions en certains points, permettent d'effectuer le calage du modèle. L'opération de calage doit permettre pour les paramètres pression et débit d'obtenir une bonne adéquation entre mesures et résultats de calcul (*Nafi, 1996*).

▪ Modèle pour le dimensionnement du réseau

Le modèle permet de vérifier pour une configuration donnée du réseau, la satisfaction des exigences des abonnés en terme de pression et de débit. L'intérêt est de dimensionner les conduites et dispositifs hydrauliques. L'état des conduites et la demande sont supposés connus. Le niveau de détail est important, toutes les conduites sont représentées (*Nafi, 1996*).

▪ **Modèles pour le suivi de la qualité de l'eau**

Ces modèles utilisent les résultats du fonctionnement hydraulique, pour suivre les trajets et le temps de séjour de l'eau dans les canalisations. Il permet aussi de prédire toute modification de la qualité de l'eau. L'objet du modèle est de mesurer l'évolution d'un produit à titre d'exemple le chlore dans le réseau et d'en mesurer les concentrations à des points précis du réseau.

▪ **Modèle d'optimisation des réseaux d'eau potable**

Ces modèles ont pour objectif de fournir l'ensemble des commandes optimales à appliquer sur un réseau. Essentiellement basé sur la construction, à partir de modèles de simulations hydrauliques, de module d'optimisation, ils permettent d'optimiser la gestion des différents pompages et stockage sur la journée, l'évolution des débits dans les liaisons, les arrêts-démarrages des pompes, sur une journée complète (*Merzouk, 2005*).

▪ **Modèle pour l'analyse des phénomènes transitoires**

On considère comme phénomènes transitoires dans un réseau d'eau potable, les coups de bélier. Ce phénomène oscillatoire a pour origine des variations brusques de fonctionnement des pompes, des vannes, des consommations. Leur utilisation vise à protéger le réseau et les installations des ondes de pression très brutales causées souvent par des manœuvres brutales comme la disjonction d'une pompe ou la fermeture brusque d'une vanne, en permettant le choix, le positionnement et le dimensionnement des appareils de protection (*Merzouk, 2005*).

Le modèle que nous adoptons est celui de l'analyse du fonctionnement du réseau, il peut être utilisé pour :

- Détecter les zones de faibles et fortes pressions,
- Analyser le marnage des réservoirs,
- Analyser la capacité du réseau dans son fonctionnement futur afin de prévoir les aménagements à mettre en œuvre à un horizon déterminé,
- Etudier la fiabilité du service grâce à l'étude de scénarios tels que la mise hors service momentanée une portion du réseau d'eau potable à des fins de réparation.

II.3. Modèles mathématiques utilisés dans les analyses des réseaux d'AEP

L'écoulement unidimensionnel d'un fluide incompressible à travers un système hydraulique en charge, peut être analysé sous différents points de vue.

II.3.1. Modèles dynamiques

Dans lesquels les variables principales (débit et pression) sont considérées dépendantes du temps. Ces modèles peuvent être subdivisés en (*Enrique, 1994*) :

➤ Modèles inertiels

Qui prennent en considération l'inertie de l'eau, et en conséquence les changements de vitesses le long des conduites. Ce type de modèles est basé sur l'existence des effets élastiques dans la conduite et le liquide, il donne naissance à deux modèles différents qui sont :

- Les modèles rigides ;
- Les modèles élastiques (connues sous le nom coup de bélier).

➤ Modèles non inertiels

Dans lesquels les caractéristiques dynamiques sont données par les variations temporaires des conditions limites. Ces modèles sont très utilisés dans l'analyse et la gestion des réseaux, ils sont connus sous le nom de « modèles à longue durée de simulation ou modèles quasi-stationnaire ».

II.3.2. Modèles stationnaires

Dans lesquels les variables caractéristiques du système ne changent jamais dans le temps. Donc il existe quatre (04) modèles différents, trois (03) d'entre eux sont dynamiques et l'autre est stationnaire. Ils peuvent être employés pour analyser les systèmes de distribution de l'eau. Les critères de choix du modèle correct sont les suivants :

Pour l'analyse des changements brusques des variables principales du réseau (débit et pression), causées par le démarrage d'une pompe, rupture d'une conduite ou la fermeture instantanée d'une vanne, il nous faut un modèle inertiel élastique.

L'analyse d'une variation significative des variables principales du réseau, causée par une augmentation rapide de la consommation exige aussi un modèle rigide qui tient compte de l'accélération de l'eau.

Une variation lente des conditions de fonctionnement du système telle que le changement de la consommation le long de la journée qui cause de faibles changements des débits dans le temps donc les effets inertiels sont négligeables. Le modèle quasi-statiques (ou modèle à longue période de simulation) est le modèle le plus approprié pour cette analyse.

Les modèles stationnaires peuvent seulement analyser des états stationnaires bien définis comme la réponse du réseau vis-à-vis d'une consommation donnée. En fait le modèle quasi-stationnaire est juste une superposition dans le temps des différentes simulations stationnaires, avec des différentes conditions de charge (consommations) et conditions limites (le niveau des réservoirs) (*Enrique, 1994*).

II.4. Le processus de la modélisation

Les tâches qui composent le processus de la modélisation sont illustrées sur la **figure II.1** ; quelques tâches peuvent être faites en parallèle, tandis que d'autres doivent être faites en série.

La modélisation est un processus itératif, la première étape en entreprenant n'importe quel projet de modélisation est de fixer les objectifs et les besoins pour lesquels le modèle sera employé à court et à long terme.

La deuxième étape est le calage du modèle en précisant son exactitude.

La modélisation concerne une série d'abstraction :

D'abord les conduites et les pompes réelles dans le réseau sont représentées sur des cartes ; puis les cartes sont converties en modèle qui représentent les équipements du système comme des arcs et des nœuds, une autre couche d'abstraction est introduite, c'est la présentation mathématique des arcs et des nœuds ; les équations du modèle sont alors résolues, et les solutions sont affichées sous forme de cartes et de graphes ou sous forme de tableaux.

La valeur d'un modèle provient du rôle de ces abstractions en facilitant la conception efficace pour le développement du système, ou l'amélioration de son fonctionnement.

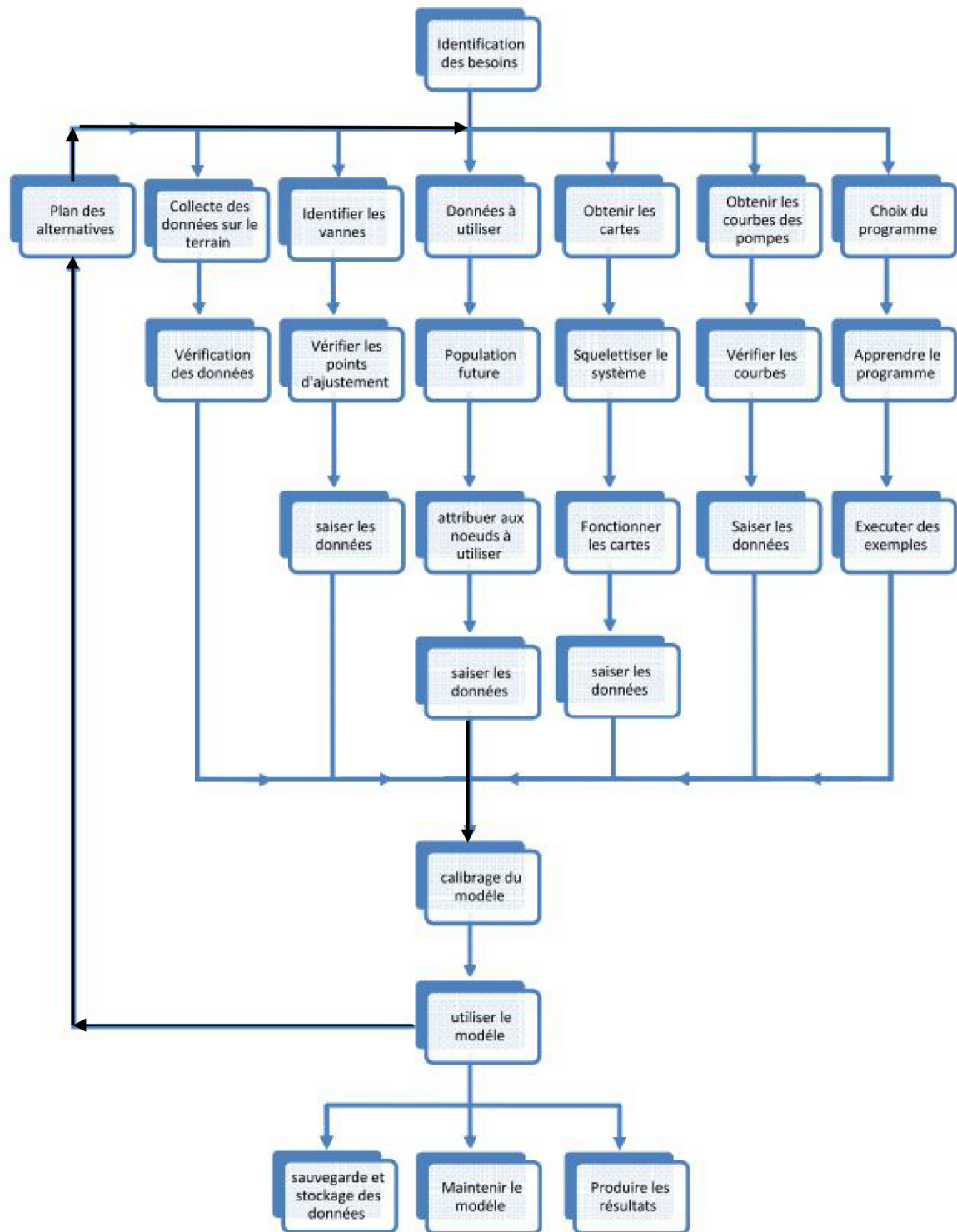


Figure II.1 : Schéma du processus de la modélisation d'un réseau d'AEP

II.5. Les Modèles hydraulique existants

II.5.1. Le modèle Aqua Cad

Le logiciel AquaCad conçu et mis en application en 1987. Il permet le diagnostic de l'état des réseaux d'eau potable et d'égouts. Il permet de gérer l'inventaire, l'état et l'hydraulique de ces réseaux. Ce logiciel permet d'établir des scénarios permettant une action rapide en cas d'urgence et facilite la localisation et la planification des mesures correctives des endroits problématiques. Quatre volets sont disponibles: la gestion des opérations, l'analyse hydraulique, la géomatique et l'aide à la décision.

Les principales caractéristiques du modèle sont :

- Permet la gestion des trois types de données nécessaires à l'analyse du fonctionnement des réseaux d'aqueduc et d'égouts : inventaire, état et hydraulique ;
- Facilite la compréhension du fonctionnement des réseaux ;
- Établit des scénarios permettant une action rapide en cas d'urgence bris, refoulement, contamination ;
- Facilite la localisation et la planification des mesures correctives des endroits problématiques;
- Outil essentiel à la mise en place d'un plan directeur d'interventions basé sur l'état des infrastructures.
- Permet de définir des schémas de consommations en fonction du temps pour chaque type d'utilisateurs ;
- Permet de définir la forme des réservoirs et les volumes d'eau disponibles en fonction du temps ;
- Permet de définir l'intervalle de temps pour chaque analyse ;
- Permet d'imposer des "actions" sur le réseau en fonction de "conditions" (ex. : démarrer une pompe supplémentaire en fonction de l'heure de la journée ou d'un débit identifié) ; Déroulement graphique des résultats en fonction du pas de l'intervalle choisi ;
- Résultats disponibles en fonction du temps : pression, consommation, débit, vitesse, perte de charge, démarrage des pompes et autres ; et la valeur minimale et maximale à chaque élément.

II.5.2. Le Modèle AQUIS

AQUIS est un logiciel de simulation du réseau de distribution de l'eau conçu pour améliorer les paramètres suivants d'un réseau :

- Performance hydraulique ;
- Qualité de l'eau ;
- Sécurité du fonctionnement ;

- AQUIS peut simuler la pression, l'écoulement et la qualité pour n'importe quel moment donné.

Le modèle d'AQUIS est alimenté par des informations en temps réel grâce au système d'information de SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Ceci permet au modèle de prévoir la future consommation même pendant des périodes de changement rapide ou dans des conditions atmosphériques extrêmes.

Différentes variables, telles que la pression d'approvisionnement, la quantité de produits chimique dans l'eau ou l'écoulement peuvent être affichée. Des effets des interpositions, telles que l'ouverture ou la fermeture des vannes peuvent être évaluées par les simulations.

L'opérateur ne requiert aucune connaissance approfondie de modèle AQUIS ; par simple bouton de défilement sur l'interface graphique, il peut obtenir l'information de son réseau de distribution dont il a besoin tels que la pression, le débit et la qualité pour un point donné dans le temps - dans le passé ou le futur.

AQUIS affiche les données, telles que la pression, avec des couleurs code à travers tout le réseau, permettant à l'utilisateur d'apprendre comment le réseau fonctionne à un moment donné.

L'information peut être rendue disponible au centre d'appels, ce dernier peut cliquer en fonction n'importe quel nœud dans le réseau pour voir des mesure telles que la pression d'eau à l'emplacement particulier.

Identifie automatiquement les zones de contrôle de la pression en fonction de la topologie réseau et les dispositifs de contrôle comme les pompes et vannes de réduction de pression.

II.5.3. Le Modèle EPANET

Le logiciel Epanet est un logiciel de simulation du comportement hydraulique et qualitatif de l'eau dans les réseaux d'eau potable. Un réseau d'eau potable sur un logiciel se définit par des tuyaux (tronçons sur le logiciel), des nœuds (intersection de deux tuyaux et extrémité d'une antenne) mais également d'autres organes (réservoirs, pompes, clapets, différents types de vannes,...). Le logiciel permet de calculer le débit parcourant chaque tuyau, la pression à chacun des nœuds mais également le niveau de l'eau à n'importe quel moment de la journée et quelle que soit la période de l'année où on se situe. Le moteur de calcul hydraulique intégré permet de traiter des réseaux de taille illimitée. Il dispose de plusieurs formules de calcul de pertes de charges, il inclut les différentes pertes de charge singulières et modélise les pompes à vitesse fixe et variable. En résumé, le logiciel présente tous les outils pour remplir les objectifs suivants :

- Régulation des pressions dans le réseau,
- Détection des zones de fonctionnement déficitaire,
- Dimensionnement de réseaux,
- Amélioration de la gestion des équipements d'eau.

Le logiciel présente également un module « *qualité* » qui permet de calculer les concentrations en substances chimiques, les temps de séjour de l'eau dans différentes parties du réseau. Il permet également de suivre l'origine de l'eau. L'utilisation de ce module qualité nécessite un calage hydraulique préalable.

➤ Capacités pour la Modélisation Hydraulique

EPANET contient un moteur de calcul hydraulique ayant les caractéristiques suivantes:

- La taille du réseau étudié est illimitée ;
- Pour calculer les pertes de charge dues à la friction, il dispose des formules de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach, et Chézy-Manning ;
- Il inclut les pertes de charge singulières aux coudes, aux tés, etc ;
- Il peut modéliser des pompes à vitesse fixe ou variable ;
- Il peut calculer l'énergie consommée par une pompe et son coût ;
- Il peut modéliser différents types de vannes, comme des clapets anti retour, des vannes de contrôle de pression ou débit, des vannes d'arrêt, etc ;
- Les réservoirs peuvent avoir des formes variées (le diamètre peut varier avec la hauteur) ;
- Il peut y avoir différentes catégories de demandes aux nœuds, chacune avec une caractéristique propre ;
- Il peut modéliser des consommations dépendantes de la pression (buses par exemple) ;
- Le fonctionnement de station de pompage peut être piloté par des commandes simples, (heures de marche/arrêt en fonction du niveau d'un réservoir) ou des commandes élaborées plus complexes.

II.5.4. Le Modèle H2ONET

H2ONET est un logiciel de modélisation et d'analyse des réseaux d'eau sous pression. Il exécute les calculs hydrauliques d'une manière rapide, fiable, et complète. Il modélise la qualité et l'hydrodynamique de l'eau, la gestion de l'énergie, la simulation en temps réel et l'analyse de débit d'incendie, il peut intégrer l'interface en ligne automatisée de SCADA. Le programme peut également être effectivement employé pour analyser les systèmes de collection d'égout pressurisés. Il est produit et commercialisé depuis 1996.

Les principales caractéristiques du modèle sont :

- Partager les données librement avec tous les SIG, tableur, et applications de base de données standard ;
- Faciliter le flux d'information et la gestion avec une structure de base de données ouverte ;
- Supporter les demandes conventionnelles (nœud) ou par compteur (enregistrements de facturation) ;
- Se connecter par interface sans couture à tous les programmes Windows ;

- La requête, affichage, et met en valeur n'importe quelles informations système ;
- Données d'importation créées avec d'autres envois de modélisation ;
- Commander les dernières avances dans l'écoulement hydraulique, du feu, et les analyses de coût énergétique ;
- Exécuter les simulations dynamiques complètes de qualité de l'eau ;
- Automatiser en ligne la modélisation et la surveillance par l'interface directe de SCADA ;
- Améliorer l'exploitation et la performance du système avec les informations en temps réel ;
- Développer la réduction de fuite et les stratégies pertinentes de gestion de l'énergie
- Simuler le fonctionnement en temps réel ;
- Mettre à jour la compatibilité d'EPANET (l'importation et exportent tous les fichiers) ;
- Créer les ordres graphiques d'animation des paramètres variables dans le temps ;
- Couleur-code du réseau selon la variable ;
- L'exploitation de lot et comparent des résultats (des graphiques et des états) de divers scénarios immédiatement ;
- Réaliser la solution au niveau de l'entreprise de gestion ;
- Maximiser l'épargne de temps ;
- Réduire au minimum les coûts par une productivité plus élevée ;
- Optimiser les stratégies opérationnelles et la décision d'amélioration de capital.

II.5.5. Le modèle Info Works WS

Infoworks WS est un modèle qui permet de gérer, analyser et contrôler les réseaux d'AEP avec efficacité et exactitude.

Infoworks WS peut être configuré en tant que composant d'un réseau d'entreprise (Intranet) ou sous la forme d'une application de bureau.

Les capacités développées du logiciel permettent une modélisation réelle du comportement des pompes et des vannes et non pas une simple représentation.

Infoworks WS a la capacité de réaliser des simulations dans des conditions critiques permettent au modéleur de diagnostiquer l'endroit et l'ampleur de n'importe quel problème de simulation en utilisant une base de données relationnelle comme celle utilisée par Microsoft Access, le logiciel permet d'afficher et de contrôler la version courante et les versions historiques du modèle du réseau et de fournir les détails de chaque modification apportée aux paramètres du réseau.

Le logiciel a la fonction de comparer deux versions différentes du modèle de réseau, ou un ensemble de paramètres et d'éditer un rapport détailler donnant les différences.

Infoworks WS peut être configuré en mode réseau et l'équipe de travail (work group) peut accéder aux modèles stockés dans une base de données principale.

Les principales caractéristiques sont :

- Le lien direct entre Infoworks et les SIG MapInfo professionnelle ou ARCVIEW permet aux données d'être converties directement vers la base de données Infoworks WS pour la création du modèle.
- Infoworks soutient l'exportation des données de réseau et des résultats de simulation vers les couches particulières de Mapinfo Professionnelle et ARC View.
- Une interface de données spatiale a été incorporée pour permettre à l'utilisateur d'importer n'importe quel type de données de référence géographique pour appuyer la modélisation hydraulique.
- Le fusionnement des modèles existants dans un grand modèle combiné peut être effectué, il est également possible de réaliser des modèles des sous-ensembles et d'exécuter la simulation immédiatement en utilisant les paramètres de contrôle spécifiques.
- L'utilisateur a la capacité de créer des thèmes d'affichage de réseau basés sur n'importe quel aspect des données de réseau ou de simulation. L'affichage des cartes ou des graphes peut être statique ou changeant selon les résultats qui varient avec le temps de la simulation.
- L'affichage de la simulation complète est incluse pour laisser l'utilisateur observer le changement dynamique du système avec le temps tels que le remplissage des réservoirs, la variation des pressions et des débits etc....

Les modules optionnels du modèle sont :

i. Module de la qualité de l'eau

Le module dynamique de la qualité de l'eau utilise le modèle mathématique de l'EPA (Agence pour la protection de l'environnement, Etats Unis). En utilisant ces capacités, le logiciel peut modéliser des phénomènes en rapport avec la qualité de l'eau comme:

- Le mélange d'eau provenant de différentes sources ;
- Le temps de séjour de l'eau dans le réseau ;
- Diminution du chlore résiduel ;
- L'accroissement des sous-produits de la désinfection ;
- La diffusion d'un polluant dans le réseau, introduit en certains points.

ii. Module d'auto calibrage

Infoworks fournit un module automatique de calage, ce module prend en compte le facteur de frottement pour réaliser une bonne correspondance entre le comportement réel de l'écoulement et celui de la simulation, la méthode peut inclure des paramètres de vieillissement des conduites et des équipements du réseau, de ce fait on peut modéliser le mécanisme physique des dépôts sur la conduite.

Infoworks WS est produit et commercialisé par Wallingford Software.

II.5.6. Le modèle MIKE URBAN

C'est un outil dédié à la gestion des eaux urbaines (réseau de collecte et de distribution) complètement intégré sous Système d'Information Géographique (SIG).

MIKE URBAN est composé de plusieurs entités:

- Le gestionnaire de modèle est la base de cet ensemble. Les données relatives aux réseaux et aux bassins versants sont stockées dans une base de données géo référencées. Le gestionnaire de modèle se compose tout d'abord des fonctionnalités performantes du SIG telles que l'interface graphique moderne et conviviale, l'analyse puissante des résultats, les outils de visualisation. Il permet aussi la modélisation des réseaux d'eaux usées et d'eaux pluviales avec le moteur de calcul SWMM5 et la modélisation des réseaux de distribution d'eau avec le moteur de calcul EPANET ;
- Les modules additionnels CS permettent de réaliser une modélisation avancée des réseaux de collecte (eaux usées et eaux pluviales) et s'associent au moteur de calcul MOUSE ;
- Les modules additionnels WD complètent les options disponibles pour la modélisation des réseaux de distribution ;
- Un large domaine d'applications:
 - Gestion des données des réseaux d'assainissement et des réseaux de distribution d'eau potable,
 - Modélisation de la distribution d'eau potable,
 - Modélisation des phénomènes de coup de bélier.
- La modélisation des réseaux de distribution avec MIKE URBAN est basée sur le moteur de calcul EPANET (US EPA) et permet de réaliser:
 - Des simulations de l'état d'équilibre (stationnaire),
 - Des simulations dynamiques,
 - Des simulations dynamiques de la qualité de l'eau.
- De nombreux outils sont proposés pour :
 - L'analyse du débit incendie
 - Analyse rapide des améliorations proposées pour la sécurité incendie,
 - Calcul des débits disponibles pour une pression donnée,
 - Calcul des pressions disponibles pour un débit donné.
 - Affectation et distribution des consommations :
 - Utilisation des données SIG pour l'affectation des demandes aux nœuds,
 - Géocodage et totalisation de la demande,
 - Possibilités d'attribuer plusieurs catégories de demandes à un même nœud,

- Possibilités d'utiliser plusieurs méthodes de distribution automatique de la demande.
- Analyses de la qualité de l'eau :
 - Suivi et mélange de l'eau à partir de sources différentes,
 - Age de l'eau dans le système (temps de séjour),
 - Dégradation du chlore,
 - Propagation de polluants.

II.5.7. Le Modèle PICCOLO

PICCOLO est un outil général de simulation des écoulements en charge dans les réseaux maillés. A partir des données du réseau, PICCOLO calcule les vitesses, les pressions, les débits, l'évolution des niveaux de réservoirs. Les calculs peuvent concerner un régime statique ou dynamique.

Les différentes fonctions de base PICCOLO sont :

- **Le module environnement de travail :** Le module de base comporte un éditeur de saisie intégré, des fonctions graphiques de saisie et de modification. Il permet le calcul hydraulique statique et dynamique : calcul des débits, vitesses et pressions en régime permanent et dynamique, la visualisation sous forme de texte, de graphique et de courbes des résultats. Il dispose d'opérateurs pour faciliter la construction du modèle : import de données, allocation automatique des consommations, etc.
- **Le module simulation hydraulique :** Il calcule, en fonction d'une description de la structure du réseau et de la répartition des consommations, les débits, vitesses et pressions en tout point. Ce calcul est réalisé en régime permanent (simulation instantanée pour des conditions de fonctionnement telles que le jour de pointe, l'heure de pointe) ou en régime dynamique (évolution du réseau sur 24 heures). PICCOLO possède des modules complémentaires optionnels de simulation de la qualité de l'eau, de prévision des dépôts, de calcul des coûts de fonctionnement, et d'aide au dimensionnement.
- **Le module langage de commande :** Le langage de commande de PICCOLO, permet à l'utilisateur d'étendre à l'infini les possibilités du logiciel : procédures paramétrables pour la manipulation des données, importation de données dans un format tabulaire quelconque, développements avancés tels que des études de vulnérabilité, etc.

Les modules optionnels de PICCOLO sont des modules qui complètent la version de base pour des utilisations approfondies.

➤ **Module qualité dynamique**

- Calcul des temps de séjour, détermination de l'origine de l'eau et des zones d'influence des ressources et réservoirs, renouvellement de l'eau dans les réservoirs,

- Propagation d'espèces stables (polluant, nitrates, etc.) en régime permanent ou dynamique,
- Modélisation évoluée de la consommation en chlore par le réseau,
- modèle de dépôt-érosion pour la prédiction des dépôts de sédiments et le rinçage du réseau.

➤ **Module de calcul des coûts d'exploitation**

Evaluation des coûts de production et de distribution associés à la production, au traitement et au refoulement.

➤ **Module de dimensionnement**

Ce module calcule automatiquement les diamètres d'extensions, pour des conditions de fonctionnement données, respectant des contraintes de pression minimum et de vitesse. Les diamètres sont choisis dans un bordereau de diamètres nominaux associé à chaque matériau, dans lequel figure également un coût / ml.

II.5.8. Le Modèle PORTEAU

Porteau est un outil de modélisation du comportement d'un réseau maillé de distribution ou de transport d'eau sous pression. Il constitue une aide à la décision pour le dimensionnement et la gestion d'un réseau de distribution ou d'adduction d'eau potable. Il a été développé par le CEMAGREF (Centre d'Etudes du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts).

L'interface graphique du logiciel permet de schématiser le réseau étudié par l'emploi de tronçons pour les conduites et de nœuds pour les intersections. Ces éléments sont documentés de sorte que toutes les infrastructures présentes sur le réseau et toutes les conditions d'utilisation, puissent être représentées afin de rendre compte le plus fidèlement possible de la réalité.

Les principales caractéristiques sont :

- visualisation de schémas de réseaux de distribution d'eau potable,
- Visualisation et impression des résultats sous forme de tableau ou sur le schéma du réseau,
- Visualisation et impression des résultats sous forme de profils hydrauliques,
- Exportation des données et des résultats vers un tableur de type Excel,
- Exportation des graphiques de résultats vers un traitement de texte de type WinWord.

Le logiciel Porteau est constitué de trois (3) modules de calculs permettant soit une approche hydraulique, soit une approche qualité des réseaux modélisés.

i. Le module Zomayet

Il permet d'étudier, par une simulation sur plusieurs heures (de 24 heures à 15 jours), le fonctionnement hydraulique d'un réseau maillé de distribution ou de transport d'eau sous pression et de visualiser son schéma.

Le réseau peut comporter des réservoirs (avec plusieurs modes possibles de remplissage/vidange), des pompes, des limiteurs de débits, des stabilisateurs de pression, des vannes motorisées, des réducteurs de pression et des consommations régies par au plus 10 modèles de répartition sur la journée.

Les données nécessaires comprennent toute la topographie du réseau (longueur, diamètre et rugosité des conduites, cote de terrain naturel des nœuds à débit fixé, cote de l'eau, du radier et du trop-plein, surface au radier et au trop-plein pour les nœuds à charge fixée) ainsi que la répartition la plus exacte possible des consommateurs sur les nœuds ou desservis en route.

Un modèle déterministe permet de traiter les données. Les résultats du calcul donnent les variations de différentes valeurs concernant chaque nœud et tronçon au cours de la journée : cote de l'eau dans les réservoirs, volumes entrants et sortants, cote piézométrique des points de consommation, débits dans les tronçons, heures de fonctionnement des pompes et leur point de fonctionnement, fonctionnement des différents organes du réseau, etc...

ii. Le module Opointe

Il permet de simuler le fonctionnement d'un réseau maillé de distribution d'eau potable en régime de pointe et de visualiser son schéma.

Les données utilisées sont les données physiques concernant les nœuds et tronçons (cotes au sol, cotes de l'eau, diamètres, longueurs), les données hydrauliques (rugosités, consommations domestiques ou industrielles), les données de répartition des abonnés. Il nécessite de connaître les probabilités d'ouverture et de satisfaction des abonnés sur le réseau.

Un modèle probabiliste permet de traiter ces données et d'estimer les débits de pointe, ainsi que les pressions en chaque nœud.

iii. Module Qualité

Il permet de simuler en fonction du temps et de l'espace, les évolutions de concentration en soluté à travers le réseau.

Le calcul Qualité permet donc de se rendre compte de la qualité de l'eau dans le réseau et d'optimiser les quantités injectées et/ou la position des points d'injection. Ce calcul se base sur les cinétiques de réaction et considère que les mélanges à chaque nœud sont parfaits. Les concentrations sont calculées à partir des données hydrauliques obtenues à l'aide du module ZOMAYET.

Trois types de résultats sont fournis : la concentration en un produit conservatif ou réactif, l'âge de l'eau et la provenance de l'eau. Les résultats sont affichables soit sous forme de tableau en chacun des pas de temps (5 min à 1h) pour tout le réseau, soit sous forme de tableau sur toute la journée par tronçon et nœud, soit sous forme de courbes de variations des différentes valeurs au cours de la journée par tronçon et nœud à partir du schéma du réseau.

II.5.9. Le Modèle SynerGEEwater

SynerGEE water est un logiciel de simulation employé pour modéliser et analyser des systèmes d'alimentation en eau. SynerGEE peut simuler un système de distribution extrêmement grand de plus de 100.000 éléments y compris équipement et accessoire nécessaires au fonctionnement du réseau. SynerGEE peut modéliser un montage complexe pour des pompes, des vannes et des régulateurs dans n'importe quel scénario opérationnel. Les modules facultatifs sont disponibles pour des conditions de modélisation plus avancées telles que l'isolement de zone, l'analyse de fiabilité, la gestion de sous-système et l'étalonnage.

i. Les Modules de SynerGEE water

La fonctionnalité noyau de SynerGEE peut être étendue par un certain nombre de modules ajoutés qui sont autorisés séparément.

Chaque module ajoute des capacités significatives au logiciel. Les différents modules disponibles sont :

- **Gestion de sous-système** : permet à l'utilisateur de travailler avec soit un grand réseau détaillé ou avec des versions simplifiées du plus grand réseau. Ce module permet pour l'extraction de modèle, fusion, squelettisation, et la réduction.
- **Isolement de zone** : le modèleur permet d'évaluer rapidement l'effet d'une isolation principale dans le réseau de distribution. Le module zone d'isolement informe le modèleur qui vanne doit être fermées pour isoler une certaine zone.
- **Module d'analyse de fiabilité** : permet la performance de l'état d'équilibre et la période prolongée des simulations de qualité hydraulique et de l'eau.
- **Analyse en ligne** : permet le transfert automatique des données opérationnelles et de référence à partir d'un système SCADA et SIG.

II.5.10. Le Modèle WATERCAD

WATERCAD est un logiciel qui permet de modéliser le comportement hydraulique et la qualité de l'eau dans le réseau de distribution. WATERCAD aide à analyser, concevoir et optimiser les réseaux de distribution d'eau.

Grâce à ces fonctions intégrées ce logiciel permet d'analyser les constituants de l'eau, son âge, son mélange dans les réservoirs et la traçabilité des sources, il est ainsi possible de programmer la chloration, de simuler des contaminations, de visualiser les zones d'influences des différentes

sources. Les fonctions de WATERCAD permettent également d'améliorer la turbidité, le goût et l'odeur de l'eau en identifiant les problèmes de mélange et en proposant des solutions.

WATERCAD permet aussi :

La simulation en condition normale ; La simulation en période étendue ; L'analyse de criticité
L'analyse de mélange de l'eau dans les réservoirs ; Le pompage à vitesse variable ; La gestion de la consommation d'énergie et des coûts d'infrastructure ; La modélisation des fuites ; L'analyse de la consommation en fonction de la pression ; La modélisation des vannes.

WATERCAD prend en charge divers arrière-plans, intègre des utilitaires de conversion à partir de logiciels CAO ou SIG et de bases de données et permet une utilisation illimitée de la fonction annuler/rétablir mise en forme.

WATERCAD est produit et commercialisé par BENTLEY Systems Incorporated, la première version sous Windows est apparue en 1996.

II.6. Comparaison et choix du modèle

De toutes les façons, tous les programmes de modélisation des réseaux de conduites sont similaires parce que chaque programme détermine la répartition des débits dans les conduites et calcule les pressions, les pertes de charge dans la conduite en utilisant soit l'équation de Darcy-Weisbach ou celle de Hazen - William plus tous les programmes construisent et résolvent les matrices.

Notre but est de préparer une comparaison basée sur des critères entre les différents modèles hydrauliques existants , c'est-à-dire présenter les avantages et les inconvénients de chaque modèle pour nous aider à choisir un modèle .

II.6.1. Critères d'évaluation

a)Formules utilisées par le programme

Les programmes informatiques des modèles hydrauliques utilisent généralement deux méthodes pour résoudre une des quatre formulations des équations de continuité et de conservation d'énergie qui sont nécessaire pour la mise en œuvre de logiciel de modélisation hydraulique :

- La méthode de Newton-Raphson ;
- La méthode de la théorie linéaire.

Les quatre systèmes d'équations sont les suivants :

a.1).Les équations (Q) : les équations de la continuité (Débit entrant = Débit sortant), à

Chaque nœud elles sont ajoutées aux équations de pertes de charge autour de chaque maille du réseau. Cette méthode produit deux ensembles séparés d'équations, des équations à résolution linéaire pour les nœuds, et non linéaires pour les mailles , le nombre totale des équations qui

doivent être résolus simultanément égale aux nombre de conduites ,par conséquent , les programmes utilisant les équations (Q) , prennent souvent beaucoup de temps pour accomplir le système des calculs.

$$\sum_{i=1}^{p_l} h_{il} - \sum_{i=1}^{P_l} h_{pkl} = dh_i \quad (II - 1)$$

$$\sum_{i=1}^{P_n} Q_{in} = q_n \quad (II - 2)$$

Avec :

h_{il} : perte de charge de la conduite i dans la maille l ; h_{pkl} : la hauteur fournie par la pompe k dans la maille l ; dh_i : variation de charge dans la maille l ; p_l : nombre de conduite dans la maille l ; P_l : nombre de pompe dans la maille l ; Q_{in} : le débit dans le nœud n fournie par la conduite i ; q_n : demande de base dans le nœud n ; P_n : nombre de conduite raccordé au nœud n .

a.2)Les équations (h) : Cette relation exprime le principe de conservation de l'énergie .Toutes les équations développées sont non linéaires, mais il y'a peu d'équations à résoudre qu'avec les équations (Q), parce qu'il n'ya pas de boucle d'équations à résoudre.

$$h_i - h_j = K_{ij} |Q_{ij}|_{ij}^{(m)} (\text{sgn}) Q_{ij} \quad (II - 3)$$

Avec:

h_i :la charge dans le nœud i ; h_j :la charge dans le nœud j ; K_{ij} :coefficient de perte de charge de nœud i vers j ; Q_{ij} : le débit dans la conduite ij ; m_{ij} :l'exposant de perte de charge dans la conduite liant nœud i et j ; (sgn) : elles ne peuvent donc ne prendre que les valeurs -1 ou +1.

a-3)Les équations (ΔQ) : ou le programme propose une valeur initiale pour les débits à travers la maille, et la résout itérativement pour le débit correctif inconnu autour de chaque boucle , évidemment il y'a peu de mailles que des conduites et des nœuds, ainsi la matrice créée par la formulation (ΔQ) , est plus petite qu'avec les autres méthodes.

$$\sum_{i=1}^{P_l} K_i (Q_{i0} + \Delta Q_l) |Q_{i0} + \Delta Q_l|^m = dh_l \quad (II - 4)$$

Avec :

Q_{i0} :le débit initial dans la conduite i ; ΔQ_l : correction de débit dans la maille l ; P_l :nombre de conduite dans la maille.

a-4)La méthode Hybride : Elle utilise une combinaison entre les équations (h), et les équations (ΔQ) . Cette méthode profite de la matrice creuse telle que formulée par les équations (h); et le

nombre minimal d'équations exigées par la formulation de (ΔQ) et puisque le nombre d'équations est atténué, le temps de convergence est généralement plus petit.

b. Facilité d'utilisation

Le programme à utiliser doit être simple pour l'utilisation cela inclut la facilité d'introduire les données, la qualité de la documentation qui accompagne le programme (manuel de l'utilisation) , édition des messages de diagnostic , les possibilités d'affichage graphique , et la possibilité d'établir des liens avec des bases de données comme les systèmes d'information géographique (SIG). En utilisant les critères cités ci-dessus, nous avons pu établir un tableau de comparaison entre les différents modèles cités dans ce chapitre.

En utilisant les critères cités ci-dessus, nous avons pu établir un tableau II.1 de comparaison entre les différents modèles cités dans ce chapitre.

Tableau II.1: comparaison des modèles

Les modèles Hydraulique	EPANET	WaterCAD	H2ONET	SynerGEE Water	AquaCAD	PICCOLO	PORTEAU	AQUIS	MIKE URBAN	InfoworksWS
Domaines d'application										
Possibilités d'analyse la qualité d'eau	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
Les capacités d'analyse des débits d'incendie	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
Aptitude à établir des liens avec les bases de données d'autres logiciels	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Liens vers les systèmes d'information géographique (SIG)	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Documentation d'aide à l'utilisation										
Edition des messages de diagnostic	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Service d'aide en ligne	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
capacités d’Affichage graphique										
Annotation claire des composantes du modèle	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Capacités de mise en page	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Graphisme / profilage des composants de système / Résultats du Modèle	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Facilité d'utilisation										
Capacités de gestion des scénarii	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Oui	Non	Non
Environnement Windows	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

II.6.2.Choix du Modèle

Tous les modèles cités dans ce chapitre, sont des programmes modernes et donnent des résultats satisfaisants, et répondent aux critères de la sélection des modèles.

Notre objectif n'est pas de choisir le meilleur programme ou le programme le plus fiable mais de montrer l'intérêt qu'apporte la modélisation à la conception et la gestion des réseaux surtout les plus complexes d'entre eux.

Pour atteindre nos objectifs dans notre travail sur le calage des modèles hydrauliques, nous avons choisi le modèle EPANET pour les raisons suivantes :

- Le modèle utilise la méthode hybride (Méthode du Gradient) de Todini et Pilati (1987) *[Rossman, 2003]* pour calculer les équations de perte de charge et de conservation de masse, cette méthode est renommée pour sa fiabilité, et sa rapidité dans les calculs car la convergence est plus rapide que les autres programmes ;
- Disponibilité du programme : EPANET, est un logiciel disponible, peut être téléchargé sur internet légalement, gratuitement et sans aucun engagement, ce qui n'est pas le cas pour les autres méthodes ;
- Facilité d'utilisation : EPANET, présente une interface graphique, avec deux versions en langue anglaise ou française, avec un manuel d'utilisation très explicite, les résultats sont présentés soit sous forme de tableaux ou sous la forme de graphique ;
- Il permet de rendre compte des comportements des différents consommateurs dans l'espace et dans le temps, de simuler dans le temps différents scénarios et de calculer différents paramètres (débit, pressions, rugosité,...).
- En plus des composants physiques, Epanet utilise trois types d'objets non-physiques : des courbes, des courbes de modulation et des commandes de contrôle.

II.7. LA modélisation du réseau sur EPANET

II.7.1. Présentation du Modèle

EPANET modélise les réseaux d'AEP comme un ensemble d'arcs connectés aux nœuds. Les types d'éléments des nœuds incluent les jonctions, les bâches, et les réservoirs. Les types d'éléments des arcs incluent les conduites, les vannes, et les pompes. Les jonctions sont des points dans le réseau où les arcs se joignent ensemble et où l'eau entre ou part du réseau. Dans EPANET, les demandes peuvent être seulement une fonction de temps. Les demandes négatives sont employées pour modéliser les entrées de réseau aux sources. Les bâches sont des nœuds qui représentent des sources extérieures infinies au réseau. Ils sont employés pour modéliser les lacs, les fleuves, les aquifères d'eaux souterraines, et les raccordements aux autres réseaux. Les charges dans les bâches sont invariables dans le temps. Les réservoirs sont des nœuds avec une capacité de stockage, où le volume d'eau stockée peut changer avec du temps pendant une simulation. Les nœuds de réseau sont reliés entre eux au moyen des arcs. Trois types d'arcs sont modélisés en EPANET et qui sont : les conduites, les vannes et les pompes. Les conduites sont des arcs qui conduisent l'eau d'un point de réseau à un autre. EPANET suppose que les conduites sont pleines à n'importe quel moment. Le sens de l'écoulement est de la charge hydraulique la plus élevée vers la charge la plus faible. Les pompes sont des arcs qui communiquent l'énergie au fluide et ainsi augmentent la charge hydraulique. Les vannes sont des arcs qui limitent la pression ou le débit à un point spécifique dans le réseau.

En plus des composants physiques, EPANET utilise trois(03) types d'objets non physiques: des courbes, des courbes de modulation et des commandes de contrôle. Ils décrivent le comportement et les aspects fonctionnels d'un système de distribution.

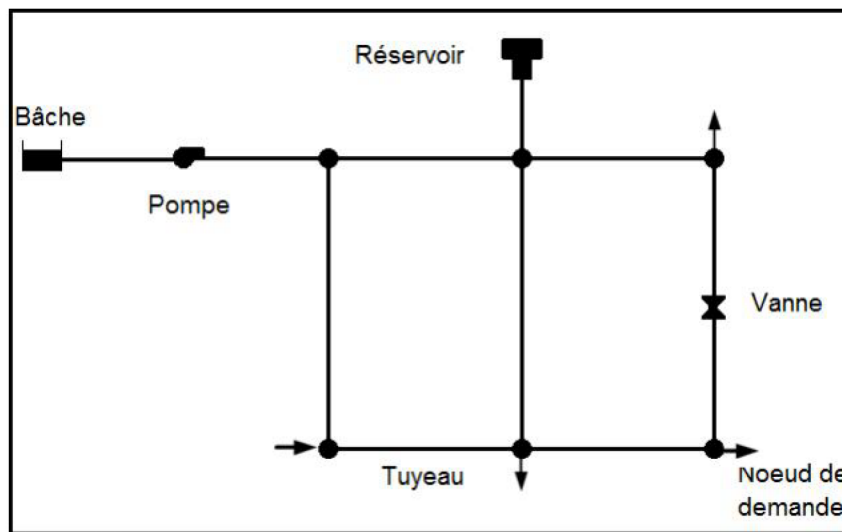


Figure II.2: Composants Physiques d'un Système de Distribution d'Eau dans Epanet

II.7.2.Principes hydrauliques régissant les calculs du modèle Epanet

Le calcul des pertes de charges

La perte de charge ou charge hydraulique perdue à cause du frottement de l'eau avec les parois du tuyau peut être calculée en utilisant un de ces trois formules :

- Formule de Hazen-Williams ;
- Formule de Darcy-Weisbach ;
- Formule de Chezy-Manning.

L'équation de Manning est plus généralement utilisée pour l'écoulement à surface libre et dépend de la longueur du tuyau et diamètre, débit et le coefficient de rugosité (friction de Manning)

$$\Delta H = \frac{10.29 L (n Q)^2}{D^{5.33}} \quad (\text{II-5})$$

Avec, **n** : coefficient de rugosité de Manning ; **L** : longueur de la conduite ; **D** : diamètre de la conduite ; **Q** : débit dans la conduite.

La formule de Darcy-Weisbach est théoriquement la plus correcte et est la plus largement utilisée en Europe. Elle s'applique à tous les régimes d'écoulement et à tous les liquides. La formule de Chezy-Manning est généralement utilisée pour les écoulements dans les canaux découverts et pour les grands diamètres.

La formule de **Darcy-Weisbach** est donnée comme suit :

$$\Delta H = \frac{f L V^2}{2g D} \quad (\text{II-6})$$

Où, f : est le facteur de friction de Darcy-Weisbach ; L est la longueur de la conduite ; V est la vitesse ; D est le diamètre intérieur de la conduite et g la constante de gravité.

Dans l'équation (II-6), le facteur de friction f est en général en fonction de la rugosité relative $\left(\frac{k}{D}\right)$ est la rugosité absolue) et de nombre de Reynolds $R_e = \frac{VD}{\nu}$ où ν est la viscosité cinématique).

La formule de Hazen-Williams est la formule de perte de charge la plus utilisée aux États-Unis. Elle ne peut pas être utilisée pour des liquides autres que l'eau et a été initialement développée uniquement pour les écoulements turbulents.

Une manière alternative d'estimer les pertes de charges linaires est la formule empirique de **Hazen-Williams** :

$$\Delta H = \frac{10.66 L Q^{1.852}}{C^{1.852} D^{4.871}} \quad (\text{II-7})$$

Où ; C est le coefficient de friction ; les autres variables sont en SI.

Les équations (II-2) et (II-3) peuvent être généralisées comme suit :

$$\Delta H = R Q |Q|^{n-1} \quad (\text{II-8})$$

Où, il est exprimé le coefficient de résistance R des arcs qui peut être dérivé des équations mentionnées, $n=2$ pour Darcy-Weisbach ou 1,85 pour Hazen-Williams.

Si l'arc de réseau représente une vanne, l'équation de perte de charge est donnée comme suit :

$$\Delta H = K \frac{V |V|}{2g} \quad (\text{II-9})$$

Où ; K est le coefficient de perte de charge de la vanne. Il dépend du type de la vanne, les valeurs de ce coefficient peuvent être fixées (mode input) ou variables (à déterminer par le modèle). La valeur de K dépend de l'ouverture relative de la vanne et de ses caractéristiques physiques (diamètre, matériau, géométrie, etc.). L'expression (II-9) est aussi utilisée pour modéliser les pertes de charge singulières dans les arcs, dans ce cas K est le coefficient de perte de charge singulière.

Si un arc représente une pompe, l'expression de ΔH est comme suit :

$$\Delta H = -\omega H_P \left(\frac{Q_P}{\omega} \right) \quad (\text{II-10})$$

Où, ω est la vitesse relative de la pompe (égale à 1 pour les pompes à vitesses constantes) ; $H_p(Q)$ est la courbe caractéristique de la pompe pour $\omega = 1$, qui peut être exprimée analytiquement en utilisant une fonction parabolique ou exponentielle.

Le signe négatif dans l'équation (II-11) est employé pour dire que la charge est gagnée par le pompage.

II.7.3. Algorithme de la simulation par EPANET

Une fois la disponibilité du matériel informatique est devenue un lieu commun, les algorithmes qui permettent de résoudre l'ensemble du réseau ont été développés. L'un des algorithmes les plus couramment utilisés a été développé par Todini et Pilati. (1987) et est appelée la méthode du gradient. Cette méthode permet à un modéleur pour analyser de grands réseaux en résolvant un système d'équations linéaires et en partie non- linéaires qui expriment l'équilibre de masse et d'énergie. Ce système d'équations est constitué de n pipe et n nœud équations. Ci-dessous l'équation utilisée pour résoudre la méthode du gradient (*Iftekhhar,1997*).

La Méthode de Gradient

C'est une méthode itérative matricielle qui permet de répartir sur l'ensemble du réseau les corrections pour obtenir l'équilibre des pertes de charge (loi des mailles) à partir de débits initiaux Q_0 choisis en fonction de la loi des nœuds.

On écrit le système d'équations non linéaires à partir de la loi des mailles auquel on applique la méthode de NEWTON RAPHSON pour chaque maille.

La matrice de problème peut se formulé comme suit :

$$\begin{aligned} A_{12} h + K(Q) &= -A_{10} h_0 \\ A_{21} Q &= q \end{aligned} \quad (II-12)$$

Avec : h la charge dans le nœud ; Q les débits des conduites ; q les demandes de base dans les nœud ; h_0 des charges fixes de chaque nœud ; $[K_i(Q_i)]$ les lois de perte de charge pour chaque conduite .

Le problème est de déterminer tous les débits (Q) dans les conduites et toutes les charges inconnues (h) au niveau des nœuds

La charge au nœud inconnu dans la matrice transposée :

$$A_{12} = A_{21}^T$$

La charge fixe au nœud inconnu dans la matrice transposée :

$$A_{10} = A_{01}^T$$

Le débit dans chaque conduite :

$$Q^T = [Q_1, Q_2, \dots, Q_{nc}] \quad ;$$

La demandes au nœud :

$$q^T = [q_1, q_2, \dots, q_{nn}]$$

La charge inconnue au nœud :

$$h^T = [h_1, h_2, \dots, h_{nn}] \quad ;$$

La charge fixe au nœud :

$$h_o^T = [h_{o1}, h_{o2}, \dots, h_{ono}] \quad ;$$

la loi exprimant les pertes de charge ($K_i(Q_i)$)

$$K^T(Q) = [K_1, K_2, \dots, K_{ne}]$$

Avec : nn = nombre de nœud ayant la charge inconnue ; no = nombre de nœud avec la charge fixe ; ne = nombre de conduite ayant le débit inconnu ;

$$A_{12}(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{si le débit de la conduite } i \text{ entre au nœud } j \\ 0 & \text{si la conduite } i \text{ et nœud } j \text{ sont pas connecté} \\ -1 & \text{si le débit de la conduite } i \text{ sort de nœud } j \end{cases}$$

Et avec A_{10} défini similaire à A_{12} pour fixer la charge aux nœuds.

Le système représenté par l'équation (II-12) peut avoir plus d'une solution en fonction de la forme de $[K_i(Q_i)]$. Si tout $[K_i(Q_i)]$ sont des fonctions monotones croissantes, il peut être prouvé que la solution du système existe et unique (*Todini et Pilati, 1987*)[in *Iftekhhar, 1997*]. Le premier ensemble d'équations (II-12) sont les équations de perte de charge pour chaque conduite tandis que le second est l'ensemble des relations de l'équilibre au nœud.

Todini et Pilati (1987) Un réseau est en équilibre lorsque la somme algébrique des débits Q , aux nœuds est nulle et que, simultanément la somme algébrique des pertes de charge autour d'une maille s'annule. Ceci définit la loi des nœuds et la loi des mailles.

Les deux conditions peuvent être exprimées dans ce système compact d'équations :

$$\begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Q \\ h \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -A_{10} h_0 \\ q \end{vmatrix} \quad (\text{II-13})$$

Où, A_{11} = matrice (ne,ne) dépend de la relation particulière de perte charge -débit ;

A_{12} = matrice(ne,nn) topologique (incidence) ; $A_{21} = [A_{12}]^T$; $A_{10}h_0$ = vecteur connu (ne, 1).

Puisque A_{11} dépend clairement du débit, la partie supérieure du système ci-dessus est un ensemble d'équations non linéaires en débit (Q). La relation généralisée entre le débit et la charge peut être écrite comme suit:

$$h_i = K_i Q_i^m \quad (\text{II-14})$$

avec : $i = 1, 2, \dots, ne$; m le coefficient de pertes de charge singulières.

Pour les pompes, la perte de charge (valeur négative du gain de charge) peut être calculée avec une formule de la forme suivante:

$$A_{11} Q + A_{12} h = -A_{10} h_0 \quad (II-15)$$

Avec,

$$A_{11} = \begin{vmatrix} K_1 |Q_1|^m & 0 & 0 \\ 0 & K_2 |Q_2|^m & 0 \\ 0 & 0 & K_{ne} |Q_{ne}|^m \end{vmatrix} \quad (II-16)$$

Puisque le système représenté dans l'équation (II-13) est non linéaire, donc impossible d'avoir une solution directe, mais une approche itérative de gradient est effectivement réalisable. Différencier le système d'équation (II-13) donne :

$$\begin{vmatrix} NA_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} dQ \\ dh \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} dE \\ dq \end{vmatrix} \quad (II-17)$$

Avec , N = matrice diagonale (ne, ne).

À l'itération k' , où la convergence n'a pas encore été achevée, un ($ne, 1$) vecteur dE et un ($nn, 1$) vecteur dq sont définis comme :

$$dE = A_{11} Q_i^{k'} + A_{12} h_i^{k'} + A_{10} h_0 \quad (II - 18)$$

$$dq = A_{21} Q_i^{k'} - q \quad (II-19)$$

Équation (II-18) représente l'énergie déséquilibre à chaque lien tout en (II-19) représente le déséquilibre des débits à chaque nœud. La solution de (II-12) est

$$\begin{vmatrix} dQ \\ dh \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} NA_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{vmatrix}^{-1} \begin{vmatrix} dE \\ dq \end{vmatrix} \quad (II-20)$$

En suivant une approche similaire à celle Todini et Pilati (1987), l'inverse de la matrice triangulaire de bloc dans (II-20) peut être calculée comme une autre matrice par bloc :

$$\begin{vmatrix} NA_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{vmatrix}^{-1} = \begin{vmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{vmatrix} \quad (II-21)$$

En supposant que :

$$NA_{11} = D^{-1} \quad (II-22)$$

$$DA_{11} = N^{-1}$$

Avec : N , A_{11} et D en diagonale

En comptant de l'inverse des blocs dans l'équation (II-21), on obtient :

$$\begin{aligned} B_{11} &= D - DA_{12} (A_{12}DA_{12})^{-1} A_{21}D \\ B_{12} &= DA_{12} (A_{21}DA_{12})^{-1} \\ B_{21} &= (A_{21}DA_{12})^{-1} A_{21}D \\ B_{22} &= - (A_{21}DA_{12})^{-1} \end{aligned} \quad (II-23)$$

La solution de l'équation (II-13) provient donc du fait que

$$\begin{aligned} dQ &= B_{11}dE + B_{12}dq \\ dh &= B_{21}dE + B_{22}dq \end{aligned} \quad (II-24)$$

En substituant l'ensemble d'équations (II-23) dans les équations (II-24), ce qui suit peut être obtenu :

$$\begin{aligned} dh &= (A_{21}DA_{12})^{-1}A_{21}D(A_{11}Q^{k'} + A_{12}h^{k'}A_{10}h_0) - (A_{21}DA_{12})^{-1}(A_{21}Q^{k'} - q) \\ &= h^{k'} + (A_{21}DA_{12})^{-1}\{A_{21}D(A_{11}Q^{k'} + A_{10}h_0) + (q - A_{21}Q^{k'})\} \end{aligned} \quad (II-25)$$

$$\begin{aligned} dQ &= \{D - DA_{12}(A_{21}DA_{12})^{-1}A_{21}D\}(A_{11}Q^{k'} + A_{12}h^{k'} + A_{10}h_0) + DA_{12}(A_{21}DA_{12})^{-1} \cdot (A_{21}Q^{k'} - q) \\ &= D(A_{11}Q^{k'} + A_{10}h_0) - DA_{12}(A_{21}DA_{12})^{-1}\{A_{21}D(A_{11}Q^{k'} + A_{10}h_0) + (q - A_{21}Q^{k'})\} \end{aligned} \quad (II - 26)$$

À l'aide de la définition de D telle que présentée plus tôt :

$$\begin{aligned} dQ &= Q^{k'} - Q^{k'+1} \\ dh &= h^{k'} - h^{k'+1} \end{aligned} \quad (II-27)$$

Un algorithme de Newton-Raphson est obtenu comme suit

$$h^{k'+1} = -(A_{21}N^{-1}A^{-1}_{11}A_{12})^{-1}\{A_{12}N^{-1}(Q^{k'} + A^{-1}_{11}A_{10}h_0) + (q - A_{21}Q^{k'})\} \quad (II - 28)$$

$$Q^{k'+1} = (1 - N^{-1})Q^{k'} - N^{-1}A^{-1}_{11}(A_{12}h^{k'+1} + A_{10}h_0) \quad (II - 29)$$

Où A_{11} , est calculée à l'aide de $Q^{k'}$, k' et $(k' + 1)$ sont des étapes consécutives d'itération.

Conclusion

Le modèle hydraulique EPANET est employé pour résoudre un grand nombre de problèmes : La détermination des pressions de service dans chaque nœud ainsi que les débits qui parcourent les conduites pour n'importe quelle condition de chargement, et particulièrement les pics de consommation, le débit d'incendie, etc. dans ce cas, l'utilisation du modèle va nous renseigner sur la capacité du réseau à répondre aux exigences de la demande. D'autre part, ce modèle nous aide à établir des plans d'opérations pour la gestion des pannes et des ruptures qui sont susceptibles de se produire dans des points stratégiques de réseau et qui sont préalablement simulées par le modèle. De cette façon, les situations les plus vulnérables du système peuvent être détectées, et les précautions nécessaires doivent être prises.

Les modèles peuvent expliquer beaucoup plus la complexité des systèmes réels que des calculs manuels, ils donnent à l'ingénieur une grande confiance sur le bon fonctionnement du réseau une fois il est mis en application. Mais dans des systèmes aussi complexes que les systèmes de d'alimentation en eaux potable (calage), où il existe de nombreux paramètres en interaction les uns avec les autres, ce processus peut s'avérer ardu et long. Une démarche plus formelle peut conduire à une solution optimale plus rapidement. Le couplage de la simulation avec des méthodes d'optimisation mathématiques est alors bien adaptée.

Deux problèmes principaux restent néanmoins à résoudre:

1. Quelles méthodes d'optimisation choisir ? Car s'il existe de nombreuses méthodes d'optimisation, il n'existe pas de méthode d'optimisation universelle.
2. Mettre en œuvre le couplage entre le modèle de simulation, qui fournira la fonction objective évaluée, et le module d'optimisation qui, en fonction des résultats fournis et des valeurs antérieures des variables de décision, déterminera les prochaines valeurs des variables de décision à tester.

Le détail de présentation de la méthode d'optimisation qui accompagne notre modèle de simulation EPANET sera abordé dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE III

Les Algorithmes Génétiques

Chapitre III**Les Algorithmes génétiques****Introduction**

La résolution des problèmes d'optimisation consiste, en règle générale, à définir une ou plusieurs fonctions objectives à minimiser ou maximiser selon le type de problème traité. Il existe deux grandes approches de l'optimisation. L'une est dite déterministe : 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. L'autre est aléatoire : pour des conditions initiales données, l'algorithme ne suivra pas le même cheminement pour aller vers la solution, et peut même proposer différentes solutions. C'est vers cette seconde approche, que va s'orienter notre travail, et plus particulièrement vers un type bien précis d'algorithme de recherche aléatoire, les algorithmes du type évolutionnaires. Les algorithmes génétiques font partie de cette famille, ils permettent d'explorer des domaines possédant de très nombreuses solutions, et leur efficacité pratique a été prouvée bien avant que les résultats de convergence théorique soient établis. Dans ce chapitre, on donne un aperçu sur le principe de fonctionnement des algorithmes génétiques et leur utilisation dans le domaine de l'eau.

III.1.Historique

Les algorithmes génétiques appartiennent à une famille d'algorithme appelé méta heuristiques.

Les algorithmes génétiques utilisent la notion de sélection naturelle développée par le scientifique Charles Darwin dans son livre en 1860 « L'origine des espèces par voie de sélection naturelle ou la lutte pour l'existence dans la nature », 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 « individus » distincts possédant des traits propres à chaque parent.

Ces deux théories ont incité les chercheurs à développer, pour la résolution des problèmes d'optimisation, des méthodes basées sur les principes cités dessus.

Les algorithmes les plus utilisés dans ce sens sont les algorithmes génétiques.

III.2. Conditions d'utilisation des Algorithmes Génétique

Pour pouvoir utiliser un algorithme génétique, les points suivants sont requis :

- **Codage des éléments de la population :** Cette étape associe à chacune des solutions de l'espace de recherche une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité.

Partant du codage binaire, le codage réel est désormais largement utilisé, notamment dans les domaines applicatifs pour l'optimisation des problèmes à variables réels. Il est à noter que la qualité du codage conditionne le succès des algorithmes génétiques.

- **Génération de la population initiale :** Le choix de la population initiale est très important du fait qu'il peut rendre plus au moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien sur le problème à résoudre, il est essentiel de répartir la population initiale sur tout le domaine de recherche.
- **Une fonction à optimiser :** Appelée fonction d'évaluation, la valeur qu'elle retourne pour un individu est nommé fitness.
- **Opérateurs de diversification et d'exploration de la population :** Au cours des générations, l'opérateur croisement permet la recombinaison des gènes des individus existants dans la population et l'opérateur mutation garantit l'exploration de l'espace d'état.
- **Des paramètres de dimensionnement :** Ces paramètres sont : La taille de la population, le nombre total des itérations « générations » ou critère d'arrêt et, la probabilité d'application des opérateurs de croisement et de mutation (*Dridi, 2005*).

III.3. Présentation des Algorithmes Génétiques (AG)

Un algorithme génétique est une procédure itérative sur un échantillon de candidats à la solution d'un problème à optimiser. Un AG se définit par (*Lerman & Ngouenet, 1995*) [in *Levasseur, 2007*]:

- **Individu/chromosome/séquence :** une solution potentielle du problème ;
- **Population :** un ensemble de chromosomes ou de points de l'espace de recherche ;
- **Environnement :** l'espace de recherche ;
- **Fonction de fitness :** la fonction - positive - que nous cherchons à minimiser.

Les AG fonctionnent donc selon les étapes suivantes :

- **Initialisation** : Une population initiale de N chromosomes est tirée aléatoirement ;
- **Codage** : La procédure normale pour coder un algorithme génétique ayant plusieurs paramètres est de coder chaque paramètre comme une séquence de bits. Les séquences sont ensuite tronquées l'une après l'autre pour former une grande s'séquence, le chromosome, qui représente le vecteur des paramètres. Chaque séquence du vecteur total représente un gène, et la valeur de chaque gène est un allèle.
- **Évaluation** : Chaque chromosome est décodé, puis évalué ;
- **Sélection** : Création d'une nouvelle population de N chromosomes par l'utilisation d'une méthode de sélection appropriée ;
- **Reproduction** : Possibilité de croisement et mutation au sein de la nouvelle population ;
- Retour à la phase d'évaluation jusqu'à l'arrêt de l'algorithme.

III.3.1. Définitions

a. Gènes, chromosomes et population

Les paramètres de solution d'un problème sont représentés par des gènes, les valeurs que peuvent prendre constituent les Allèles des gènes. Il faut donc coder chaque gène de manière à ce qu'il soit unique et différent des autres (une bijection entre l'Allèle réel et sa représentation codée).

Un **chromosome** est un ensemble de **gènes**, nous pouvons par exemple regrouper les paramètres similaires d'une solution dans un même chromosome. Le gène sera donc repéré par sa position dans ce chromosome (Locus). Le chromosome est appelé aussi individu, il représente une des solutions possibles au problème recherché.

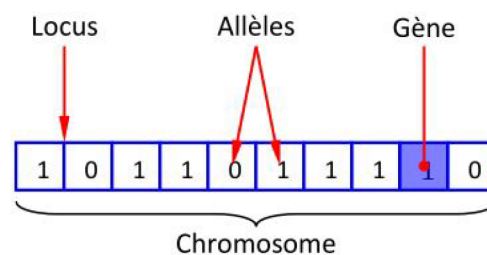


Figure III.1 : Chromosome et ses différentes composantes.

Le regroupement de plusieurs **individus** constitue une **population**. Chaque individu de la population code un point de l'espace de recherche de la solution. Une population est donc un tableau d'individus dans lequel chaque élément représente les paramètres codés. La figure ci-après représente le principe d'organisation d'un AG.

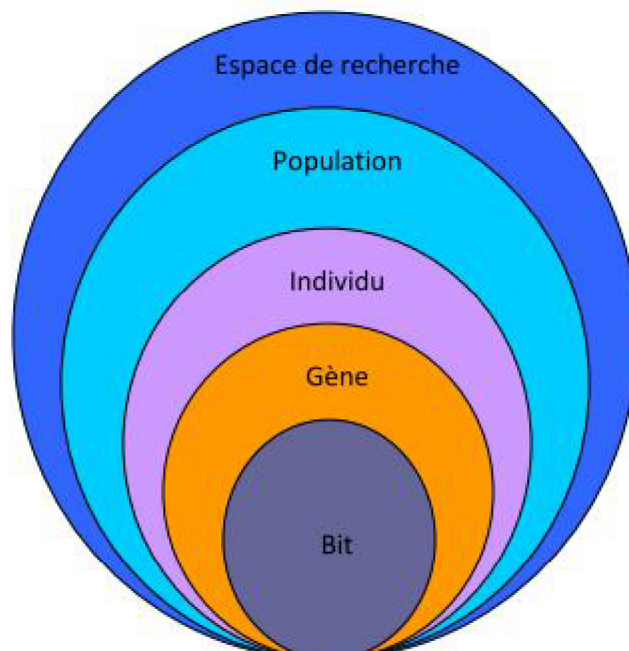


Figure III.2: Les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique (Levasseur, 2007).

b. La fonction d'adaptation (fitness)

La fonction de Fitness permet de vérifier la qualité d'une solution et donc l'adaptation des individus en fonction de l'environnement dans le but les classer entre eux. On dénomme par « Fitness » le critère à optimiser peut qui être n'importe quel processus qui prend un chromosome en entrée, et produit une mesure de qualité en sortie.

Si élément de population viole une contrainte, il aura attribué une mauvaise fitness et une probabilité forte d'être éliminé par le processus de sélection. Il peut cependant être intéressant de conserver, tout en les pénalisant, les éléments non admissibles car ils peuvent permettre de générer des éléments admissibles de bonne qualité. Pour de nombreux problèmes, l'optimum est atteint lorsque l'une au moins des contraintes de séparation est saturée, c'est-à-dire sur la frontière de l'espace admissible. Gérer les contraintes en pénalisant la fonction fitness est difficile, un "dosage" s'impose pour ne pas favoriser la recherche de solutions admissibles au détriment de la recherche de l'optimum ou inversement.

III.3.2. Principe de fonctionnement des algorithmes génétiques

Un algorithme génétique nécessite en premier lieu le codage de l'ensemble des paramètres du problème d'optimisation en une chaîne de longueur finie. Le principe d'un algorithme génétique est simple, il s'agit de simuler l'évolution d'une population d'individus jusqu'à un critère d'arrêt. On commence par générer une population initiale d'individus (solutions) de façon aléatoire. Puis, à chaque génération, des individus sont sélectionnés, cette sélection est effectuée à partir d'une fonction objectif appelée fonction d'adaptation. Puis, les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués et une nouvelle population est créée. Ce processus est itéré jusqu'à un

critère d'arrêt. Le critère le plus couramment utilisé est le nombre maximal de générations que l'on désire effectuer. **La figure III.3** présente le principe de l'Algorithme Génétique standard. Ce dernier débute par la génération d'une population initiale et l'évaluation de la fonction d'adaptation de tous les individus qui composent cette première population. Puis, des individus sont sélectionnés aléatoirement pour la reproduction selon le principe de la survie du plus adapté. Ensuite, des individus « enfants » (ou les descendants) sont générés en appliquant les deux opérateurs génétiques suivants : le croisement et la mutation. Ces enfants sont placés dans une nouvelle population $P(t)$ et vont se substituer, en tout ou en partie, à la population de la génération précédente. De nouvelles populations d'individus vont ensuite se succéder, d'une génération (t) à la génération $(t+1)$, chaque génération représentant une itération jusqu'à l'atteinte du critère d'arrêt. L'algorithme génétique présenté ci-dessus est dit générationnel car tous les individus enfants générés sont placés dans une population et vont remplacer entièrement la population des individus parents.

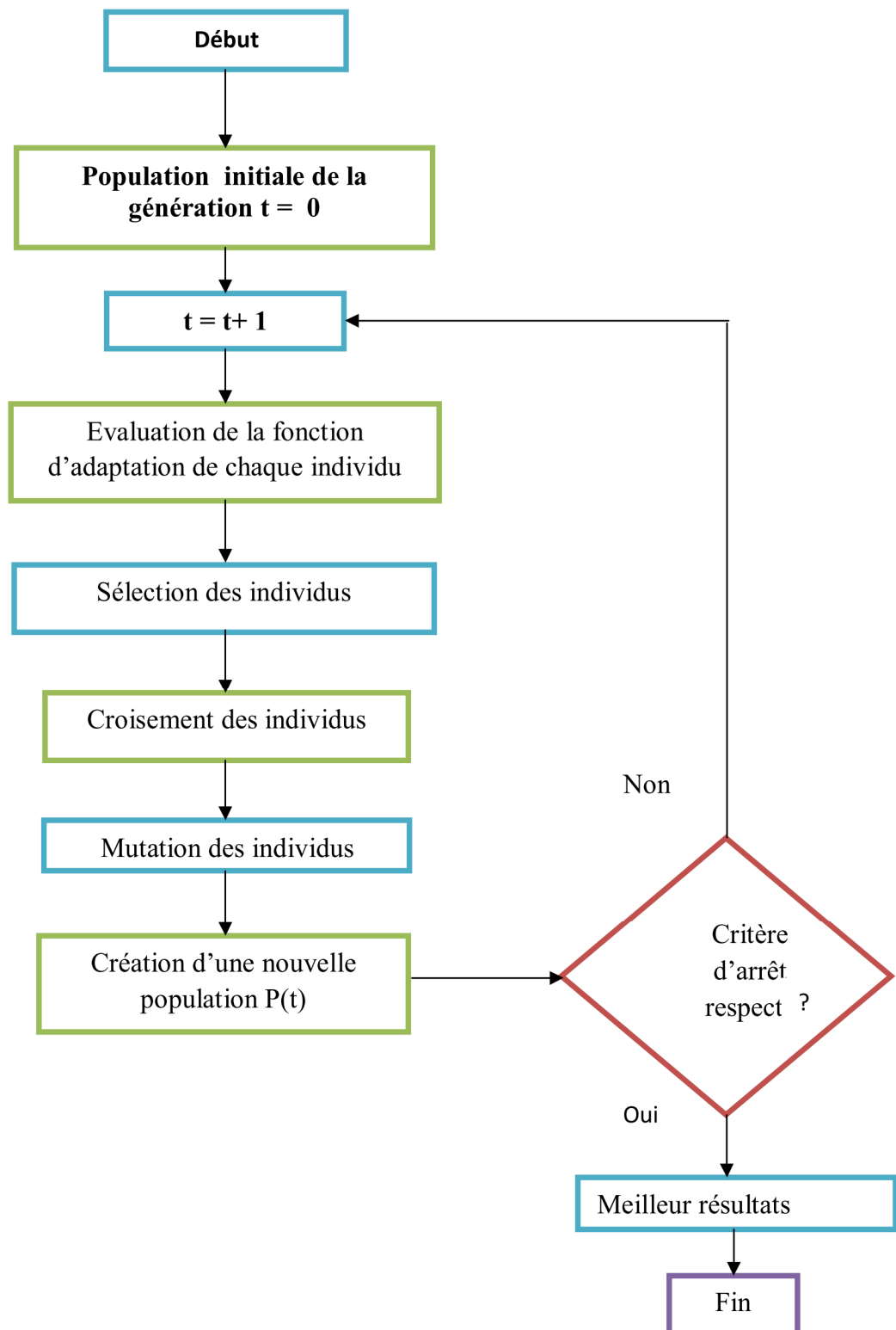


Figure III.3 : Organigramme d'un algorithme génétique standard

a. Les Operateurs

i. La sélection

La sélection a pour objectif d'identifier les individus qui doivent se reproduire. Cet opérateur ne crée pas de nouveaux individus mais identifie les individus sur la base de leur fonction d'adaptation, les individus les mieux adaptés sont sélectionnés alors que les moins bien adaptés sont écartés (*Dridi, 2005*).

La sélection doit favoriser les meilleurs éléments selon le critère à optimiser (minimiser ou maximiser). Ceci permet de donner aux individus dont la valeur est plus grande une probabilité plus élevée de contribuer à la génération suivante.

La sélection peut se faire selon plusieurs procédures, les plus couramment utilisées sont :

- La sélection par la roue de la fortune ;
- La sélection par tournoi;
- La méthode élitiste.

i.1. Sélection par la roue de la fortune « Roulette Wheel Selection »

Cette méthode est la plus ancienne, où chaque individu, de la population de taille maximale $J_{\max}$, occupe une section de la roue proportionnellement à sa fonction d'adaptation $Fitness(j)$, la probabilité de sélection d'un individu (j) s'écrit :

$$prob(j) = \frac{Fitness(j)}{\sum_{j=1}^{J_{\max}} Fitness(j)} \quad (III-1)$$

À chaque fois qu'un individu doit être sélectionné, un tirage à la loterie s'effectue et propose un candidat, les individus possédant une plus grande fonction d'adaptation ayant plus de chance d'être sélectionnés (*Dridi, 2005*).

On crée donc une roue de fortune biaisée dans laquelle chaque individu possède une partie proportionnelle à sa valeur de fitness. On tire ensuite aléatoirement les individus dans cette roue dont les plus forts ont plus de chance d'être sélectionnés, et les plus faibles existent tout de même.

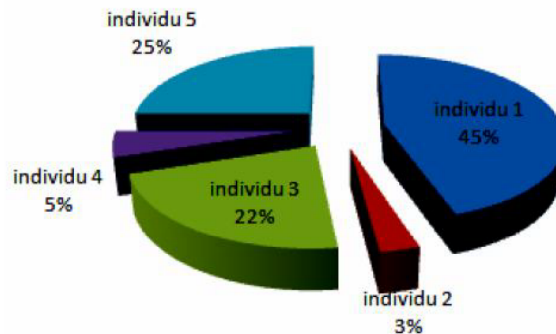


Figure III.4 : Exemple de roue de fortune biaisée (Kouba, 2010).

L'inconvénient est qu'il peut y exister un élément possédant un fitness très élevé par rapport à celui des autres individus. Cela implique qu'il aura la plus grande proportion de la roue. Il est donc fort probable qu'après un certain nombre de générations, qu'on se retrouve avec une population constituée seulement de copies de cet individu. Ce qui peut causer une convergence prématurée de l'algorithme vers cette solution.

Des améliorations ont été apportées à cette méthode pour éliminer ce genre de problèmes à savoir le « Scaling ».

Le scaling, vise à recalculer la fonction d'évaluation d'un individu en prenant en compte la fonction d'évaluation moyenne de la population. Le but de cette manœuvre est d'éviter qu'un individu qui aurait une fonction fitness très élevée, ne devienne trop prépondérant dans une population. Ceci aurait pour effet de détruire l'hétérogénéité de la population et de former des populations à un seul individu. Grâce à cette technique l'échelle diminue artificiellement et laisse une chance presque à tous les individus, incluant les moins adaptés.

i.2. Sélection par Tournoi

Le principe ici est de tirer aléatoirement un groupe de k individus dans la population, et de sélectionner le meilleur d'entre eux. Ce processus est répété jusqu'à ce que le nombre d'individus de la population intermédiaire soit égal au nombre total d'individus formant la population initiale. La population est donc divisée en m groupes de k individus. Ensuite, on sélectionne le meilleur de chaque groupe. Il faut k itérations pour remplir la population intermédiaire parce que chaque fois m individus sont sélectionnés, où m est défini par :

$$m = \frac{\text{taille de la population}}{k} \quad (\text{III-2})$$

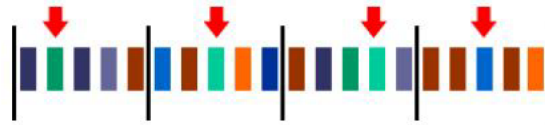


Figure III.5 : Principe de la sélection par tournoi (Le candidat le plus vert dans 04 groupes de 05)
[Vaillancourt, 2008].

i.3. La méthode élitiste

À la création d'une nouvelle population, le ou les meilleurs individus seront perdus après les opérations de croisement et de mutation. Pour éviter ceci, on utilise la méthode de l'élitisme. Cette méthode consiste à directement copier un ou plusieurs des meilleurs individus de la génération parents vers la génération enfants. Ensuite, on génère le reste de la population selon l'algorithme habituel. Cette méthode améliore considérablement les AG, car elle ne permet pas la perte de la meilleure solution tout en continuant à effectuer le brassage génétique et la recherche de la solution optimale. [Shau et col, 2005].

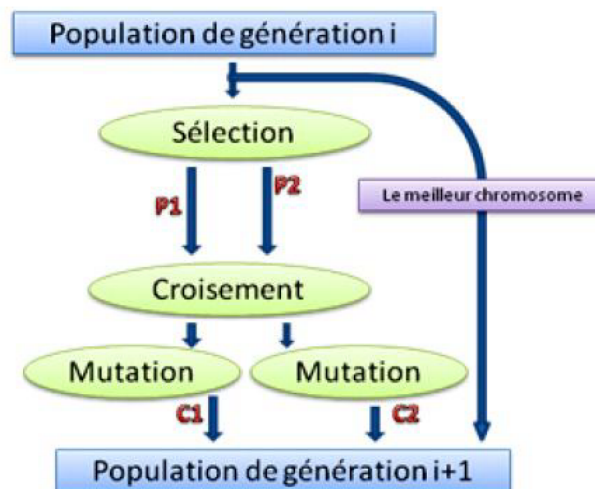


Figure III.6 : Principe de l'élitisme (Kouba, 2010).

ii. Les opérateurs croisement et mutation

Le croisement et la mutation sont des opérateurs de reproduction qui agissent sur un ou plusieurs chromosomes issus de la phase de sélection en fonction d'une certaine probabilité. Ils sont appliqués aux individus parents pour générer de nouveaux individus constituant ce que l'on appelle une population enfant.

ii.1. L'opérateur de croisement

Le croisement permet le brassage du patrimoine génétique présent dans la population en produisant de nouveaux chromosomes « enfants » à partir de chromosome parents avec une probabilité de croisement (P_c). Ainsi, cet opérateur permet d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes. Initialement, les chromosomes de codage en chaîne de bits subissent un croisement à découpage de chromosomes «slicingrossover». Sur deux chromosomes, pères, de M gènes on tire aléatoirement une position de chacun des parents puis en fait un échange des sous-chaînes terminales de ces parents, ce qui génère deux enfants C_1 et C_2 ; (Figure III.7). Ce type de croisement à découpage de chromosomes peut être étendu en choisissant plusieurs positions de croisement où s'effectue le changement d'information ou de gènes(Figure. III.8).Le mécanisme de croisement est généralement appliqué selon une probabilité qui varie entre 0,5 et 0,8 (Nouiri et col.,2006).

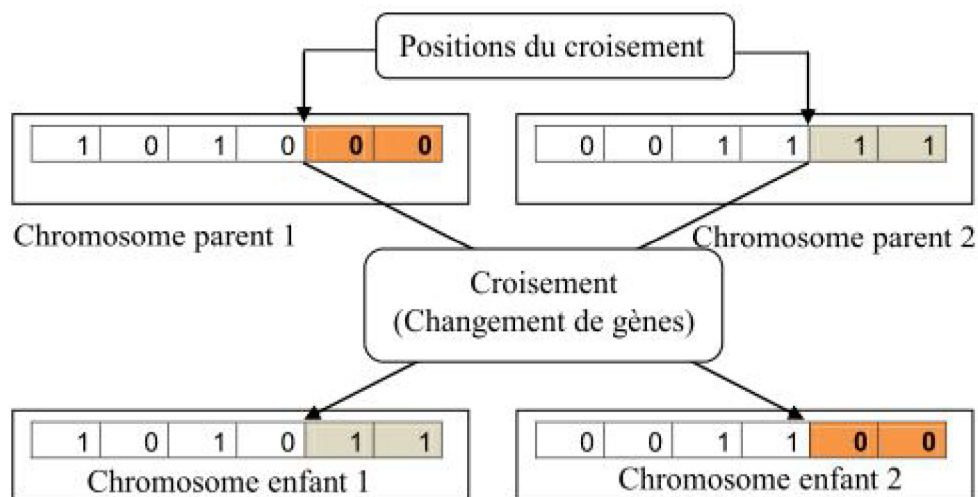


Figure III.7 : Opérateur croisement mono point sur deux chromosomes à six bits.

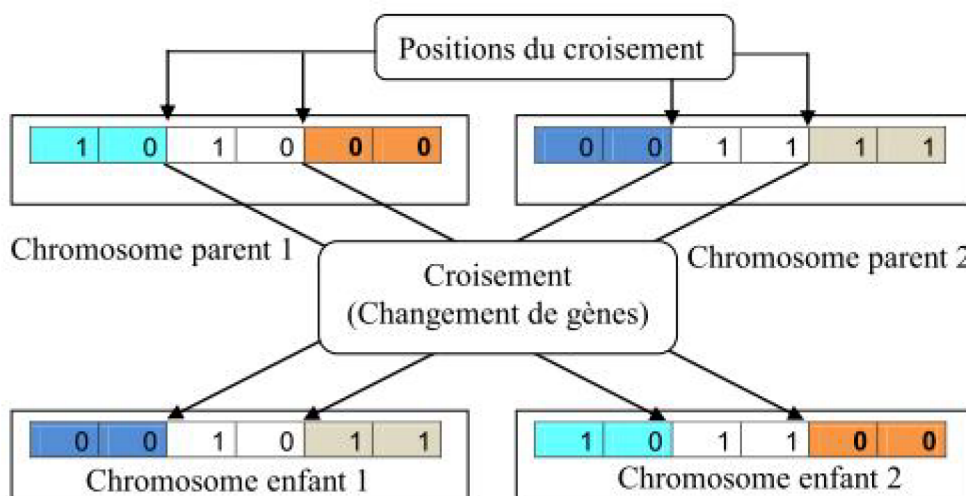


Figure. III.8 : Slicingcrossover à deux points.

ii.2. L'opérateur de mutation

La mutation est exécutée seulement sur une seule chaîne. L'opérateur de mutation (*figure III.9*) est présent pour s'assurer que tout l'espace des solutions est parcouru. Il sert également à empêcher l'algorithme de stagner sur une solution en s'aveuglant à toutes autres. C'est un opérateur totalement aléatoire. On prend un bit au hasard dans un individu et on le remplace par un autre bit générée également au hasard. En toute rigueur et théoriquement, si l'on n'appliquait pas l'opérateur de croisement, la mutation suffirait à long terme pour couvrir tout l'espace des solutions. Ceci en fait un opérateur primordial, mais, par contre, il implique beaucoup de dispersion dans la recherche. Il faut donc le limiter, et en même temps lui garantir sa place. Les individus d'une population sont également soumis à la mutation, qui introduit dans la population une variabilité aléatoire, selon une probabilité variant entre 0,01 et 0,1 (*Nouiri et col, 2005*).

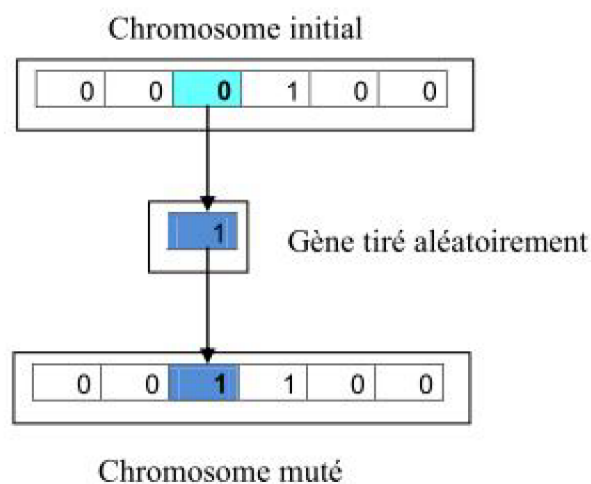


Figure. III.9. Exemple d'un chromosome muté.

b. Le Codage

Il y a trois principaux types de codage utilisables, et on peut passer de l'un à l'autre relativement facilement (*Dridi, 2005*) :

- **Codage binaire**

Ce codage est le plus utilisé. Chaque gène dispose du même alphabet binaire {0, 1}. Un gène est alors représenté par un entier long (32 bits), les chromosomes qui sont des suites de gènes sont représentés par des tableaux de gènes et les individus de notre espace de recherche sont représentés par des tableaux de chromosomes.

- **Codage réel**

Dans ce codage le génome est un vecteur réel et l'espace de recherche est un sous-ensemble de IR. Cette représentation est aujourd'hui très utilisée dans les problèmes d'optimisation car dans de nombreuses applications du monde réel, ces problèmes sont naturellement formulés sous

forme paramétrique i.e. Les premiers travaux qui ont utilisé ce type de représentation ont été ceux de Rechenberg et de Schwefel quand ils ont introduit les stratégies d'évolution cela peut-être utile notamment dans le cas où l'on recherche le maximum d'une fonction réelle (*Dridi,2005*).

▪ **Codage de Gray**

Dans le cas d'un codage binaire on utilise souvent la "distance de Hamming" comme mesure de la dissimilitude entre deux éléments de population, cette mesure compte les différences de bits de même rang de ces deux séquences. Et c'est là que le codage binaire commence à montrer ses limites. En effet, deux éléments voisins en termes de distance de Hamming ne codent pas nécessairement deux éléments proches dans l'espace de recherche. Cet inconvénient peut être évité en utilisant un "codage de Gray" : le codage de Gray est un codage qui a comme propriété qu'entre un élément n et un élément $n + 1$, donc voisin dans l'espace de recherche, un seul bit diffère.

III.4.Avantages et inconvénients des Algorithmes Génétiques

Les Algorithmes Génétiques, qui décrivent l'évolution d'une population d'individus en réponse à un environnement, sont utilisées pour créer des méthodes d'optimisation exploitées pour résoudre des problèmes assez complexes. Ils sont par exemple utilisés pour optimiser la performance des outils de data mining et de text mining. Les AG résolvent des problèmes n'ayant aucune méthode de résolution décrite précisément ou dont la solution exacte, si elle est connue, est trop complexe pour être calculée en un temps raisonnable. C'est notamment le cas quand des contraintes multiples, complexes et parfois même en partie contradictoires doivent être satisfaites simultanément. Pour résumer, on peut dire que les AG sont essentiellement utilisées pour traiter les deux cas suivants :

- L'espace de recherche est vaste ou le problème possède énormément de paramètres devant être optimisés simultanément ;
- Le problème ne peut pas être facilement décrit par un modèle mathématique précis (ou problème mal posé).

Dans des cas pareils, les Algorithmes Génétiques présentent les avantages suivants :

- Peuvent fonctionner avec les problèmes complexes, (non linéaires, à variables nombreuses, non dérivables, etc). Le modèle ou les modèles d'évaluation peuvent reposer sur la simulation ;
- Convenablement « libérée » de contraintes implicites, l'utilisation du hasard apporte de la créativité ;
- Souvent plus efficaces que l'exploration systématique des cas (espaces de recherche de solutions) ;

- S'accordent très bien avec l'approche multicritère. Approche d'ailleurs utile pour responsabiliser l'utilisateur ;
- Il existe des moteurs « raisonnablement » généralistes et très accessibles ;

Tout de même, nous pouvons citer les quelques désavantages :

- les AG sont des algorithmes de calcul stochastique, et donc pas une grande garantie dans les résultats. Mais cela peut être occupais par les résultats obtenus pour plus d'une décennie d'utilisation ;
- ce sont des algorithmes de calcul massif qui consomme beaucoup de temps de calcul (mais la puissance des machines de calcul croît exponentiellement).

III.5.Algorithmes génétiques dans le domaine de l'eau

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

III.5.1. Utilisation pour le dimensionnement des réseaux d'AEP

Le dimensionnement des conduites des réseaux d'alimentation en eau potable se traduit par la détermination des caractéristiques hydrauliques des conduites : diamètre et rugosité.

D'autres applications portent sur le dimensionnement des pompes de manière à réduire les coûts liés à l'énergie.

L'optimisation de dimensionnement d'un réseau de distribution consiste généralement à choisir une combinaison de diamètres des conduites. Cette combinaison doit plutôt vérifier deux principales conditions. La première condition, appelée objectif de l'optimisation, se traduit par le fait que la combinaison des diamètres choisie doit présenter un coût de réalisation minimal, tout en assurant que les conditions sur les pressions et les vitesses d'écoulement ne dépassent pas les limites posées. Cette dernière condition peut être considérée comme contrainte pour l'optimisation.

Pour l'Algorithme Génétique, il s'agit donc de considérer la fonction de variation du coût de réalisation comme une fonction fitness à minimiser.

$$F = \sum_{i=1}^n P_i (D_i) * L_i \quad (\text{III-3})$$

Dont $P_i (D_i)$ représente Le prix (par mètre linéaire) d'une conduite de diamètre (D_i) pour le tronçon (i) ; L_i est La longueur du tronçon i .

La fonction contrainte s'exprime par les bornes de la vitesse d'écoulement dans les arcs et de la pression résiduelle dans les nœuds de consommation.

$$V_{\min} < V < V_{\max} \quad (\text{III-4})$$

$$P_{\min} < P < P_{\max} \quad (\text{III-5})$$

En ajoutant les contraintes au problème de minimisation de la fonction fitness, le problème devient donc une optimisation multi-objective. En effet, l'algorithme ne doit pas seulement trouver un minimum de la fonction objective, mais un minimum qui peut minimiser aussi la fonction de contrainte.

Dandy et ses collaborateurs(1996) ont présenté une approche d'optimisation basée sur les AG pour la conception des réseaux d'AEP. Le travail présenté propose des améliorations à l'utilisation antérieure d'AG en apportant des modifications sur la définition des variables de décision, les opérateurs de mutation et le codage en Gray. L'approche proposée cherche à partir d'une topologie donnée du réseau et une demande de base connue, une combinaison adéquate des dimensions de conduites afin de minimiser les coûts de conception du réseau. Les contraintes considérées sont d'assurer la continuité du flux, le respect des consignes hydrauliques en termes de pression, respect de certaines dimensions pour des conduites spécifiques.

Savic et Walters (1997) ont développé un modèle d'optimisation basé sur l'utilisation d'un algorithme génétique. Le modèle permet d'assurer une conception dite optimale du réseau AEP. Le modèle considère un objectif économique qui exprime le coût d'acquisition de la conduite, ce coût est fonction du diamètre et de la longueur de la conduite. Des objectifs techniques sont considérés : la satisfaction de la demande aux nœuds de consommation et assurer une pression minimum de service. Les auteurs utilisent un algorithme génétique simple, la variable de décision représente le diamètre de conduite à utiliser, le codage utilisé permet de représenter sous forme de chromosome les dimensions de diamètre à appliquer pour chaque conduite. Chaque gène représente une conduite, le diamètre est codé sur 3bits.

Abebe(1998) a proposé une approche de dimensionnement des réseaux, permettant de déterminer les diamètres des conduites pour une structure donnée du réseau, avec des contraintes portant sur la pression de service et la demande au niveau des nœuds de consommation. L'auteur utilise un modèle permettant de coupler un outil d'optimisation et un simulateur hydraulique. L'approche se base sur l'utilisation d'un algorithme génétique simple et d'une fonction objective traduisant les coûts d'acquisition des conduites et des pénalités liées à la contrainte sur la pression de service. Le modèle a été appliqué au problème de dimensionnement du réseau de Hanoi (**Nafi, 2006**).

III.5.2.Utilisation pour le renouvellement des réseaux d'AEP

Les approches d'optimisation classiques ne peuvent donc aboutir à des choix optimaux. Halhal et ses Collaborateurs (1997) adoptent une approche multi-objective utilisant le concept d'optimalité au sens de Pareto qui cherche à trouver un compromis entre un ensemble d'objectifs techniques à travers la définition de fonctions bénéfiques, et un objectif purement économique à travers une fonction coût (**Nafi, 2006**).

III.5.3. Utilisation pour aider à la recherche des fuites

Un autre volet d'utilisation des algorithmes génétique dans le domaine d'AEP concerne l'optimisation des opérations de recherche des fuites dans les réseaux de distribution. Le principe consiste généralement en l'utilisation de la modélisation hydraulique et le calage automatique de ces modèles. Dans un modèle hydraulique, une fuite peut être représentée par une demande supplémentaire dans un nœud. Les pressions dans les nœuds sont en fait influencées par les fluctuations des demandes, une observation des pressions dans le réseau peut donner une idée sur l'existence et la localisation des fuites (fuites importantes).

Par rapport aux pressions observées sur le terrain, l'AG doit trouver un scénario de demande au niveau des nœuds de consommation dans le modèle hydraulique qui peut conduire au même comportement.

A partir d'une combinaison entre les mesures de pressions et de débits de consommation sur un réseau donné, nous pouvons construire la fonction objective (fitness) à optimiser et les fonctions de contraintes à respecter. Ainsi la forme générale de la fonction fitness sera :

$$F(\vec{X}) = \sum_{i=1}^N (|P_{i,\text{mes}} - P_{i,\text{sim}}|) \quad (\text{III-6})$$

Dont $\vec{X}$ est la variable de décision qui représente les consommations dans les nœuds de demande, $P_{i,\text{mes}}$ et $P_{i,\text{sim}}$ sont respectivement les pressions mesurées et simulées dans les points d'observation dans le réseau, et N représente le nombre de nœuds d'observation dans le réseau.

Pour une bonne et rapide résolution, l'espace de recherche doit être bien déterminé (borné). En effet les valeurs du vecteur $\vec{X}$ doivent être comprises entre deux limites : $\vec{X}_{\text{et}} \underline{X}$.

La fonction contrainte quant-à-elle peut représenter, entre autres, la condition au limite du modèle hydraulique. C'est la conservation du volume, c'est-à-dire que la consommation totale dans le modèle doit être la même que celle mesurée sur le terrain au moment de la création de la fuite considérée. Cela se traduit donc de la forme suivante :

$$Q_{T,\text{mes}} \cong Q_{T,\text{sim}} \quad (\text{III-7})$$

III.5.4. Calage automatique des modèles hydrauliques des réseaux AEP

Le premier calage d'optimisation de réseaux d'alimentation en eau potable présenté par Shamir (1974) (*Kapelan, 2002*). Ce modèle était capable entre autre de faire un calage implicite des modèles hydrauliques statiques de réseau d'AEP. De même, Ormsbee (1989) a également employé une méthode implicite de calage pour les modèles stationnaires et quasi-stationnaires (ou modèles à longue période de simulation) des réseaux d'AEP (*Kapelan, 2002*).

Ces types de calage se ramènent aux problèmes qui sont formulés et résolus en utilisant une technique d'optimisation couplée avec un calculateur hydraulique. La **figure (III.10)** illustre le procédé par lequel l'outil d'optimisation pose/actualise les paramètres et les passe sur le modèle de simulation qui à son tour fait retourner les variables simulées obtenues du modèle (par exemple : charges, débits, niveau des réservoirs, etc.). L'outil d'optimisation utilise alors une fonction objective pour minimiser les différences entre les variables mesurées et les variables simulées par le modèle (*Savic et col., 2009*).

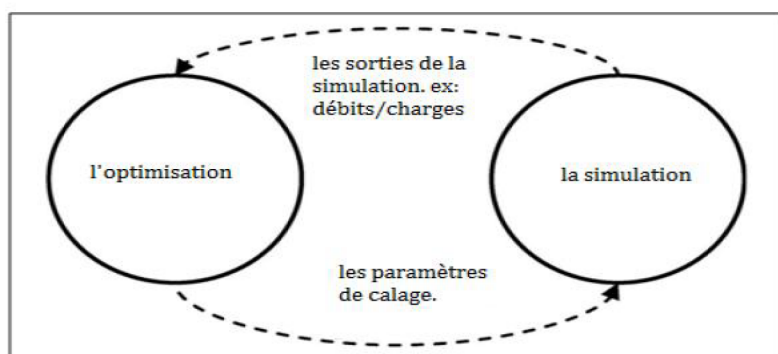


Figure III.10 : procédure de calage d'optimisation (*Savi et col., 2009*)

III.5.5 Autres domaines d'application

Couplés à la modélisation hydraulique, les AG peuvent constituer un outil considérablement puissant pour faire face à d'énormes phénomènes nécessitant des approches multi-objectifs, ou dont les solutions mathématiques ou les formulations numériques sont difficiles à obtenir ou même inconnues. Les domaines d'application sont en effet très divers. Citons comme exemples :

- Optimisation des emplacements des stations de chloration dans les systèmes d'AEP; (*Nouiri&Lebdi, 2005*) ;
- Détection des sources de pollution dans les réseaux d'AEP ;
- Optimisation du fonctionnement des stations de pompage (*L'opez-Ibáñez, 2009*) ;
- Pour réduire les coûts du capital et de maintenance futurs du réseau AEP dans le but de planifier les travaux de réhabilitation du réseau (*Nafi, 2006*).

Conclusion

Les algorithmes génétiques fournissent des solutions proches de la solution optimale à l'aide des mécanismes de sélection, de croisement et de mutation. Un algorithme génétique nous donne une grande liberté dans le paramétrage et dans l'implémentation des différents traitements. Nous sommes libre ensuite de modifier tel ou tel paramètre si les solutions obtenues ne nous conviennent pas.

Vue la complexité du problème que nous traitons le calage des modèles hydrauliques pour un réseau d'alimentation en eau potable, et l'inexistence de modèle mathématique pouvant donner cette différence de pression en fonction des différents paramètres de calage (demande de base, exposant de fuite, coefficient de décharge, rugosité), vue aussi les avantages que présentent les AG pour ce genre de problème.

Nous utilisons Matlab pour faire appel au AG. La fonction de fitness et la fonction de contraintes non linéaires seront donc calculées à travers des simulations sous EPANET. La liaison entre Matlab (AG) et les simulations sous EPANET sera assurée par l'utilisation de la Toolkit d'EPANET permettant de faire appel à EPANET à partir d'un programme externe.

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

CHAPITRE IV

Conception De L'outil De Calage

Chapitre IV

Conception de l'outil de calage**Introduction**

Le modèle hydraulique permet la simulation du comportement hydraulique d'un réseau d'eau potable quelque soit la saison ou l'heure à laquelle nous positionnons. Après avoir récolté toutes les données décrivant l'architecture du réseau et effectué toutes les mesures de débit et de pression envisagées, il est nécessaire de confronter les premiers résultats du modèle aux valeurs mesurées : c'est la phase de calage du modèle. Ce calage du modèle ne permet pas seulement d'affiner les paramètres choisis pour décrire l'état intérieur des conduites mais également la répartition des consommations sur le réseau (paramètres de calage) mais aussi de détecter de fortes incohérences avec les éléments en notre possession.

Dans cette section, nous développons la méthodologie que nous avons suivie pour résoudre le problème de calage en utilisant le logiciel de calcul numérique MATLAB avec le logiciel de simulation hydraulique Epanet. Ce couplage est assuré par EPANET Toolkit.

Nous allons aussi clarifier l'application des algorithmes génétiques et leur adaptation pour le calcul des valeurs des paramètres de calage (demandes aux nœuds, les coefficients de rugosité, les coefficients de pertes de charge singulières).

IV.1. Calage des modèles hydrauliques des réseaux d'AEP

Le calage du modèle est l'étape qui permet de rapprocher le modèle le plus possible de la réalité du terrain. Le calage est un processus important qui devrait être effectué pour l'établissement de la crédibilité du modèle et de le placer comme un repère pour prévoir des problèmes potentiels et d'établir la compréhension de l'exploitation du système. Le calage est aussi utilisé pour découvrir des erreurs avec le système [Savic et col, 2009].

Il a pour but de garantir :

- **L'établissement de la crédibilité du modèle** : Les données et les hypothèses sur lesquelles est fondé un modèle non calé sont peu susceptibles de décrire la réalité d'un réseau. D'autre part, un modèle calé est conçu pour simuler un réseau sous une gamme des conditions de fonctionnement, ses données d'entrée sont examinées et ajustées pour assurer qu'il peut être employé comme outil précis et prédictif. Par conséquent, l'utilisation d'un modèle non-calé n'est pas une bonne pratique d'ingénierie, puisqu'elle mènera sans doute à des résultats imprécis qui engendrent de mauvaises décisions.
- **L'utilisation du modèle calé comme un repère** : Une fois le modèle de réseau est calé sous une gamme de conditions de fonctionnement, les pressions et les débits calculés par ce

modèle deviennent comme un repère à qui on compare ultérieurement les débits et les pressions des modèles modifiés (qui pourrait inclure des vannes additionnelles ou des pompes pour augmenter la pression dans le réseau) pour analyser l'impact des changements apportées.

- **La prédiction des problèmes potentiels** : Un modèle calé peut être employé pour prévoir tous les problèmes potentiels dus aux changements de l'exploitation du réseau.
- **Comprendre le fonctionnement du réseau** : Au cours du calage d'un modèle, en rassemblant et en analysant les données employées, l'ingénieur gagne un aperçu précieux sur le réseau, et en analysant son fonctionnement, il peut lui apporter des améliorations.
- **Découvrir Les Erreurs** : La plus part du temps durant le processus de calage d'un modèle, les contradictions entre les résultats du modèle et les données du terrain seront examinées et comparées avec les données additionnelles du terrain rassemblées et analysées, et c'est ce qui nous permet de découvrir d'éventuelles erreurs comme par exemple : les diamètres incorrects des conduites, ou même les vannes qui sont fermées par inadvertance.

IV.2. La méthodologie de calage des modèles de réseaux d'AEP

Un modèle est toujours construit à partir d'une image du fonctionnement du réseau pour une période donnée. Les modèles sont à réactualiser périodiquement même si toutes les modifications de structure du réseau sont entrées dans le modèle. Cette réactualisation est généralement faite lorsque les données de mesures semblent diverger par rapport aux informations fournies par le modèle.

Le calage d'un modèle est réalisé en quatre étapes successives (*Liratni, 2011*) :

IV.2.1. Le calage en volume

La répartition des débits de puisage dans l'espace (volumes de base attribués aux nœuds) et dans le temps (courbes de modulation) est l'un des paramètres déterminants de la représentativité du modèle et joue un rôle clé dans la simulation des marnages des réservoirs et dans la simulation de la répartition des débits entre les différentes branches d'un réseau maillé ou non. 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).

IV.2.2. Le calage en niveau

Le calage du niveau de réservoir passe par :

- Le renseignement de la valeur initiale de niveau (à $T=0$) ;
- Le diamètre équivalent du réservoir (courbe de volume si réservoir de forme particulière) ;
- L'établissement des contrôles (niveaux des remplissages) ;
- Lorsque les débits amont et aval (entrée/sortie) du réservoir sont calés, et que le fonctionnement lié aux commandes est correct, le niveau du réservoir se cale automatiquement.

Si le niveau du réservoir est difficile à caler, il peut s'agir :

- D'un problème de calage des débits de sortie de l'ouvrage de stockage ;
- D'un problème d'asservissement (erreur sur les commandes) ;
- D'un fonctionnement particulier du réservoir (remplissage par un robinet à flotteur avec pertes de charges fluctuantes en fonction du débit de remplissage, courbe de volume réelle différente de la courbe de volume renseignée dans le logiciel) ;
- D'un débordement du réservoir (passage au trop plein).

IV.2.3. 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.

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 calage s'effectue en deux temps :

- Calage en statique (validation des altimétries : radier, altitude du point de mesure) ;
- Calage en dynamique (validation des rugosités et pertes de charges singulières).

Le modèle de réseau sera considéré comme calé lorsque les courbes obtenues par simulation présenteront le même profil que les courbes de mesure, avec des niveaux moyens proches. Il n'est pas possible de définir à l'avance l'écart maximum acceptable, qui sera obligatoirement supérieur aux erreurs cumulées de mesures et aux incertitudes sur différents facteurs (altimétrie des radeaux de réservoir, du poteaux incendies (PI) ...).

IV.3. Le choix de la période de mesure

Le choix d'une période de mesures (1 journée ou plus) et d'un pas de temps de calage (1h par exemple) est effectué suivant une analyse multicritère justifiée par la disponibilité, la continuité des mesures et la représentativité des mesures.

Le cycle de 24H utilisé pour réaliser le calage sera choisi de manière à optimiser les deux critères suivants :

- Journée ayant le plus de données disponibles et exploitables ;
- Journée de plus forte consommation (cette journée permettra de caler plus précisément les rugosités).

Remarque : Le calage sera effectué à partir des résultats d'essais débits-pressions effectués sur les nœuds de demande et les nœuds de piquage à divers endroits du réseau. Ces essais seront sélectionnés en fonction de leur localisation et sur chaque zone du réseau.

IV.4. Les différents modèles de calage

De nombreuses procédures de calage des réseaux de distribution d'eau ont été développées depuis les années 70 (*Savic et col, 2009*).

Généralement, les modèles de calage peuvent être groupés dans trois catégories : Les procédés itératifs (d'essai-et-erreur) ; Les modèles explicites (ou modèles hydrauliques de simulation) et les modèles implicites (ou modèles d'optimisation).

IV.4.1. Les Modèles Itératifs

Les modèles itératifs de calage sont basés en gros sur une procédure d'essai-et-erreur spécifiquement développée par Rahal et col. en 1980 ; Walski en 1983 et 1986 et par Bhawe en 1988 [*in Savic et col, 2009*]. Dans ces procédures de calage, les paramètres inconnus sont actualisés à chaque itération/essai en utilisant les valeurs des charges (et/ou débits) obtenues par la résolution de l'ensemble des équations de conservation de masse et les équations d'énergie. Une simplification significative du réseau (à travers la schématisation et l'utilisation des conduites équivalentes) est typiquement exigée afin de manipuler efficacement le problème de calage comme seulement de petits problèmes (un nombre restreint de paramètres de calage) pouvant être efficacement manipulés. Généralement, le taux de convergence des modèles itératifs est lent.

Historiquement, l'avantage principal du développement des procédures itératives est vu de nos jours dans l'établissement de quelques principes fondamentaux et directifs concernant le calage des modèles de réseau d'AEP. Ces principes ont été utilisés plus tard dans le développement des modèles de calage explicites et implicites plus sophistiqués (*Savic et col, 2009*). Le premier chapitre illustre quelques modèles itératifs de calage [De *Schaetzen et col, 2000*] et [*Ormsbee et Lingireddy, 1997*].

IV.4.2. Les Modèles Explicites (ou modèles hydrauliques de simulation)

Les modèles explicites sont basés sur la résolution d'un ensemble prolongé d'équations de conservation de masse et d'équations d'énergie développé par Ormsbee et Wood en 1986 ; Boulos et Wood en 1990 ; Boulos et Ormsbee en 1991 et par Ferreri et col en 1994 (*in Savic et col, 2009*). Cet ensemble prolongé se compose des équations initiales (décrivant un modèle stationnaire de réseau) et d'un certain nombre d'équations additionnelles dérivées des

mesures disponibles des débits et des charges (une équation additionnelle par mesure). L'ensemble prolongé d'équations est résolu explicitement, généralement par la méthode de Newton-Raphson. Évidemment, le nombre de paramètres de calage inconnus est limité par le nombre de mesures disponibles. Lorsque le nombre de paramètres de calage inconnus est plus grand que le nombre de mesures disponibles, les paramètres de calage doivent être groupés. Les méthodes explicites de calage ont plusieurs inconvénients et limites :

- Le nombre de paramètres de calage à déterminer doit être égal au nombre de mesures ;
- Les erreurs de mesure ne sont pas prises en considération ;
- Il n'y a aucune méthode qui permet de quantifier les incertitudes liées aux paramètres de calage estimés.

En outre, ces méthodes exigent une expertise mathématique considérable et des outils de résolution sophistiqués, on leur donne seulement une signification historique car elles n'ont aucune influence apparente sur la pratique courante de calage.

IV.4.3. Les Modèles Implicites (ou modèles d'optimisation)

Le calage implicite se rapporte aux problèmes qui sont formulés et résolus en utilisant une technique d'optimisation couplée avec un calculateur hydraulique. L'outil d'optimisation utilise alors une fonction objective pour minimiser les différences entre les variables mesurées et les variables simulées par le modèle.

La fonction objective généralisée pour le calage peut être exprimée comme suit :

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^n W_i |y_i^{\text{obs}} - y_i(x)|^p \quad (\text{IV.1})$$

Où, **f**: la fonction objective à minimiser, **x** : le vecteur des paramètres inconnus, **n** : le nombre de mesures (observations), **W_i** : les facteurs de poids ; **y_i^{obs}**: les observations ; **y_i(x)** : les variables simulées ; **p** : exposant des différences entre les variables simulées et les variables mesurées.

Deux ensembles de contraintes sont normalement utilisés par une approche implicite :

- Les systèmes de contraintes (le bilan de masse de réseau et les équations d'énergie), qui sont implicitement satisfaits en employant un modèle de simulation ;
- Limites supérieures et inférieures pour tous les paramètres de calage.

Le système de contraintes peut s'exprimer comme suit :

$$\sum Q_{\text{in}} - \sum Q_{\text{out}} = Q_e \quad \text{pour chaque nœud} \quad (\text{IV.2})$$

$$\sum h_f - \sum E_p = 0 \quad \text{pour chaque maille} \quad (\text{IV.3})$$

$$\sum h_f - \Delta H, \text{ Pour chaque chemin indépendant entre la charge fixe de réservoirs} \quad (\text{IV.4})$$

Où, Q_{in} : débit à l'entrée des nœuds ; Q_{out} : débit à la sortie des nœuds ; Q_e : la demande aux nœuds, E_p : l'énergie transmise au fluide par la pompe, ΔH : la différence de charge entre deux niveaux de charge de réservoir, h_f : la perte de charge.

Lors de calage des paramètres, les limites explicites inférieures et supérieures doivent également être assignées.

$$x^{\min} \leq x \leq x^{\max} \quad (IV.5)$$

Où : $x^{\min}$ et $x^{\max}$ sont les limites supérieure et inférieure.

L'un des premiers modèles implicites de calage a été présenté par Shamir (1974), ce modèle était capable entre autre de faire un calage implicite des modèles hydrauliques statiques de réseau d'AEP. De même, Ormsbee (1989) a également employé une méthode implicite de calage pour les modèles stationnaires et quasi-stationnaires (ou modèles à longue période de simulation) des réseaux d'AEP (*Kapelan, 2002*).

IV.5. Formulation du problème du calage des réseaux d'AEP

Les données nécessaires pour l'accomplissement des calculs par l'outil que nous proposons sont en grande partie disponibles dans le modèle hydraulique lui-même. En effet, le modèle hydraulique regroupe plusieurs données liées au fonctionnement hydraulique du réseau, notamment les pressions et les consommations au niveau des nœuds. Le modèle ne doit pas présenter plusieurs catégories de consommation ; les consommations, qu'elles soient de nature domestiques, commerciales ou industrielles, ne seront représentées que par une seule courbe de modulation de la demande. Et cela à cause du fait que la version de la Toolkit d'EAPNET disponible ne permet pas d'accéder à plusieurs courbes de modulation de demande dans le même modèle.

L'outil proposé est basé 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 ». Cette bibliothèque nous offre la possibilité de lancer des simulations hydrauliques ainsi que d'apporter des modifications aux paramètres du modèle hydraulique tout en restant sur Matlab. A partir de là, on a élaboré un programme sous Matlab qui accède au modèle hydraulique et effectue des modifications au niveau des paramètres de calage par l'intermédiaire des algorithmes génétiques. Ces modifications sont en réalité une régénération de nouveaux paramètres qui sont conditionnés par la fonction objective (qui doit être la plus minime possible) et la contrainte linéaire. Cette régénération se poursuit jusqu'à ce que les paramètres de calage s'adaptent au nouvel environnement du modèle qui est apporté par les données de mesure injectées dans ce programme. Et ainsi, on obtient un modèle calé dont les valeurs simulées vont coïncider avec les valeurs mesurées avec une marge d'erreur tolérée.

IV.5.1. 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 fondamental dans l'échange dynamique des données (Dynamic Data Exchange ou DDE)(*L'opez-Ibáñez, 2009*). Cela se fait en mettant des fonctions externes pouvant être exploitées par des logiciels autres que l'originale. 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 précise des fonctions d'EPANET toolkit pour analyser un système de distribution est la suivante :

- L'utilisation de la fonction **ENopen** pour ouvrir EPANET toolkit, avec un fichier d'entrée EPANET (**.inp**).
- Employer la série de fonctions **ENsetxxx** pour changer des caractéristiques choisies du modèle.
- Effectuer une simulation hydraulique en utilisant la fonction **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**).
- Effectuer une simulation de la qualité de l'eau en utilisant la fonction **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**).
- Utiliser la fonction **ENreport** pour écrire un fichier de rapport.
- Appeler la fonction **ENclose** pour fermer tous les fichiers.

Le tableau (IV-1) résume les différentes fonctions d'EN2Toolkit, leur syntaxe et leurs rôles dans un programme Matlab.

Tableau (IV-1) : fonctions d'EN2Toolkit

ENopen	Syntaxe sous Matlab	calllib('epanet2','ENopen','nom_du_fichier_epanet.inp',' nom_du_fichier_epanet.rpt').
	Description	ouvrir l'Epanet toolkit pour analyser un réseau spécifié.
ENgetnodetype	Syntaxe sous Matlab	calllib('epanet2', 'ENgetnodetype',int index, inttypecode).
	Description	avoir la valeur d'un paramètre pour un nœud spécifié.
	Argumentation	Index: l'index du noeud considéré. typecode: le code du type (0 : nœud de consommation ,1 : réservoir ,2 : bête d'eau)
ENgetnodevalue	Syntaxe sous Matlab	calllib('epanet2', 'ENgetnodevalue', Int index, paramcode, float value).
	Description	avoir la valeur d'un paramètre pour un nœud spécifié.
	Argumentation	paramcode: le code du paramètre Value: la valeur du paramètre (0 : élévation 1: demande de base ,2 : courbe de modulation, 3 : coefficient de décharge,11 : pression)
ENgetlinktype	Syntaxe sous Matlab	calllib('epanet2','ENgetlinktype', intindex, inttypecode).
	Description	avoir la valeur d'un paramètre pour un arc spécifié.
	Argumentation	Index: l'index de l'arc considéré. typecode: le code du type(1 : conduite ,2 : pompe ,3 : vanne de réduction de pression)
	Syntaxe sous Matlab	calllib('epanet2', 'ENgetlinkvalue', Int index, paramcode, float value).

ENgetlinkvalue	Description	avoir la valeur d'un paramètre pour un arc spécifié.
	Argumentation	paramcode: le code du paramètre (0 : longueur ,1 : diamètre ,3 : coefficient de perte de charge singulière ,5 : coefficient de rugosité ,8 : débit ,9 : vitesse)
ENsetnodevalue	Syntaxe sous Matlab	calllib('epanet2', 'ENsetnodevalue', int index, paramcode, float value).
	Description	modifier la valeur d'un paramètre pour un nœud spécifié.
	Argumentation	paramcode: le code du paramètre (0 : élévation ,1 : demande de base ; 3 : coefficients émetteurs)
ENsetoption	Syntaxe sous Matlab	calllib('epanet2', 'ENsetoption', intoptioncode, float value).
	Description	modifier la valeur d'une option particulière d'analyse
	Argumentation	Index: l'index du nœud considéré. Paramcode : le code du paramètre. Value: la valeur du paramètre.
Enclose	Syntaxe sous Matlab	calllib ('epanet2','ENClose');

IV.5.2. Hypothèses

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

- La première 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,...) ;
- Nous supposons aussi que les mesures (les pressions dans chaque nœud de mesure et du débit mesuré à l'entrée et la sortie du réservoir) effectuées sur le terrain sont fiables.

IV.5.3. Formulation de la fonction fitness

Notre problème se ramène à un problème d'optimisation non linéaire où la fonction à optimiser (à minimiser) est définie comme étant la différence absolue entre les pressions simulées et les pressions observées :

$$F(X) = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T |P_{mes} - P_{sim}| \quad (IV.6)$$

Où, J : nombre total des nœuds ; T : durée totale de simulation ; X : vecteur qui contient les variables de décision ; P_{mes} : La pression mesurée et P_{sim} : La pression simulée.

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.

Le vecteur X contient les variables de décision suivantes :

- Les demandes de base ;
- Les coefficients de perte de charge singulière ;
- Les coefficients de rugosité.

IV.5.4. La contrainte

Pour la formule de la fonction fitness présentée ci-dessus, plusieurs combinaisons des variables de décision peuvent donner un même débit total, mais ce dernier est complètement différent du débit total mesuré. 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 sur la demande totale aux nœuds. Cette dernière exprime la condition au limite du modèle, sans elle il n'est même pas possible de donner un avis sur le calage des pressions.

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 :

$$Q_{total_mesuré} = Q_{total_simulé} \quad (IV.7)$$

Formulation du système linéaire qui régit cette contrainte :

Nous avons :

$$Q_{total_simulé} = \sum_i^I q_i \quad (IV.8)$$

Où : q est la demande dans le nœud i ; I : est le nombre des nœuds.

En divisant les deux membres de l'équation (IV-8) par $Q_{total_mesuré}$, on a l'équation suivante :

$$W_i = \frac{q_i}{Q_{\text{total_mesuré}}} \quad (\text{IV.9})$$

$$\sum_i^I W_i = 1 \quad (\text{IV.10})$$

A partir de là, on a formulé le système linéaire sous la forme $AX = b$ comme suit :

$$(1 \ 1 \ \dots \ 1) \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_I \end{pmatrix} = 1 \quad (\text{IV.11})$$

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.

IV.5.5. Les différentes formulations de la fonction fitness

On a traité le problème d'optimisation des paramètres par deux méthodes différentes :

- i) La première méthode repose sur l'utilisation d'une seule fonction fitness (IV-6) 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 linéaire (IV-11) sur les débits de bases et les limites LB et UB des autres paramètres. Dans ce cas, le vecteur de variables de décision va contenir toutes les variables de décision.
- ii) Dans la deuxième méthode, on a utilisé trois fonctions fitness (une pour chaque paramètre de calage), qui s'exécutent l'une après l'autre. Cette formulation permet à l'outil de caler le modèle hydraulique en agissant sur un seul paramètre à la fois. Les fonctions fitness utilisées sont les mêmes que celles utilisées dans la première formulation, et dans ce cas la contrainte ne concerne que la première fonction fitness celle qui agit sur les demandes de bases. Cette méthode présente l'avantage de voir l'impact de chaque paramètre sur le calage séparément des autres paramètres, mais elle met énormément de temps pour donner des résultats. Ces résultats sont les mêmes que ceux de la première méthode. c'est à cause de ça d'ailleurs qu'on a opté pour la première méthode.

IV.6.Méthodologie adoptée

IV.6.1.Les données d'entrée

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).
- Les pressions mesurées : elles sont lues à partir d'un fichier Excel nommé : **(P_mes.xlsx)** il contient les pressions récupérées du terrain (capteurs de pression).
- Le débit mesuré à l'entrée du réseau : il est lu à partir d'un fichier Excel nommé **(Q_mes.xlsx)**.

IV.6.2. Les fonctions

La pression, la demande dans les nœuds et le débit dans les conduites sont des variables calculées plusieurs fois dans notre programme donc pour éviter la répétition de ce calcul on a établi quelques fonctions :

- La fonction `get_nodes_base_dem` : permet de calculer la demande de base dans les nœuds ;
- La fonction `get_nodes_dem` : permet d'avoir la demande dans les nœuds pendant chaque $\frac{1}{4}$ heure sur toute la durée de simulation ;
- La fonction `get_nodes_pr` : permet d'avoir la pression dans les nœuds de consommation pendant toute la durée de simulation.

IV.6.3. Programme pour appeler la bibliothèque ENtoolkit

```
% enregistrer epanet2.dll and epanet2.h  
  
Load library ('epanet2', 'epanet2')  
  
% ouvrir des fonctions de la bibliothèque  
  
Libfunctions ('epanet2')  
  
% ouvrir le modèle, lire adduction_alger.inp  
  
Calllib ('epanet2', 'ENopen', 'adduction_alger.inp', 'adduction_alger.rpt', '');  
  
% lancer simulation hydraulic et enregistrer dans output file  
  
calllib('epanet2', 'ENsolveH');  
  
% fermer toolkit  
  
calllib('epanet2', 'ENclose');
```

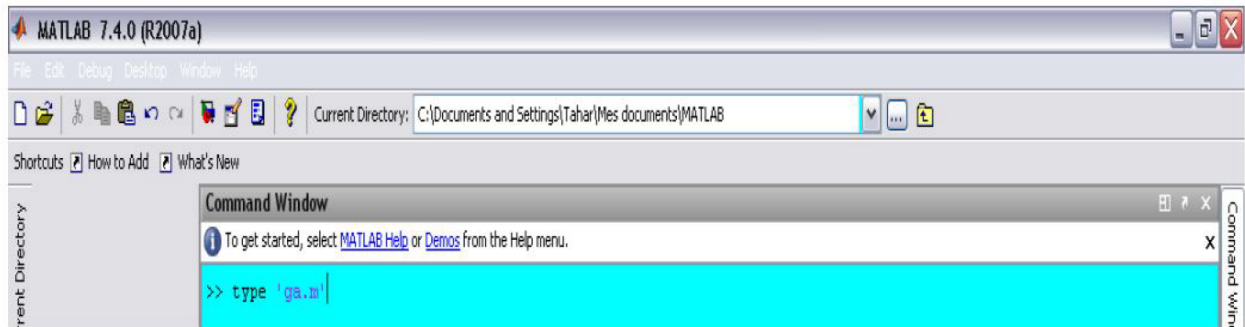
IV.6.4. Formulation du problème d'optimisation par les algorithmes génétiques

Comme il a été signalé auparavant, le mécanisme adopté pour la recherche de la solution de notre problème est basé sur les AG.

L'utilisation d'un module peut se faire de deux manières différentes. Soit en utilisant une interface conviviale ou par commande dans un espace de travail Windows. La dernière option présente l'avantage de permettre à l'utilisateur d'utiliser ces fonctionnalités dans un programme personnalisé (on peut par exemple faire appel à un AG via un autre programme élaboré sous MATLAB).

Pour lancer le module d'optimisation dans MATLAB, il faut choisir **Toolbox>Global optimization>optimizationTool (optimtool)** dans le menu **Start** de la barre des tâches de MATLAB. Il existe plusieurs méthodes d'optimisation qu'on peut choisir, les **AG** entre autres.

En mode commandes, on peut visualiser le contenu de cette fonction avec la commande **type** en écrivant dans la fenêtre commande Windows : **type 'ga.m'**.



On utilise la syntaxe suivante pour faire appel à un AG :

[x, fval, exitflag, output, population, scores] = ga(@obj_function, nvars, Aineq, bineq, Aeq, beq, LB, UB, nonlcon, options);

où, **x** : Le dernier individu sélectionné à la fin de l'optimisation (solution d'optimisation) ;

fval : La valeur finale de la fonction fitness à la fin de l'optimisation ;

exitflag : La raison d'arrêt de l'algorithme génétique qui retourne des valeurs entières relatives de -5 à 5. Chaque valeur présente une raison pour laquelle l'exécution de l'algorithme est stoppée ;

output : Structure contenant des informations sur la performance de l'algorithme pour chaque génération ;

Population : La dernière population ;

Scores : Le vecteur des valeurs trouvées de la fonction fitness correspondant à la dernière population ;

obj_function : La fonction fitness qui doit être définie dans un fichier «obj_function.m» ;

nvars : Désigne le nombre de variables dans la fonction fitness ;

Aineq et bineq : La matrice 'A' et le vecteur 'b' du système linéaire des inégalités de forme « $A \cdot X \leq b$ » respectivement. Les composantes du vecteur X sont les variables de décision de la fonction fitness ;

Aeq et beq : La matrice 'A' et le vecteur 'b' du système linéaire des égalités de forme « $A \cdot X = b$ » respectivement. Les composantes du vecteur X représentent les variables de décision de la fonction fitness ;

LB et UB : Les vecteurs de bornes inférieures et supérieures, respectivement, des variables de décision (ces deux valeurs définissent la taille de l'espace de recherche) ;

nonlcon : Fonction des contraintes non linéaires ;

Options : définit l'ensemble des options qu'on peut rajouter pour la fonction des AG tel que la visualisation graphique de l'évolution de la fonction fitness, certaines conditions d'arrêt de l'algorithme,...

La fonction de contraintes non linéaires est définie de la même manière que la fonction fitness (un fichier « **nonlcon.m** »).

Le premier membre de la commande représente les variables de sortie de l'algorithme tandis que le second constitue les valeurs d'entrée.

IV.6.5. Les paramètres de sortie

Les paramètres de sortie de ce programme sont les suivants :

- Des graphes qui représentent l'évolution des pressions simulées et mesurées dans chaque nœud de mesure ;
- Les valeurs des paramètres de calage (demandes aux nœuds, les coefficients de rugosité, les coefficients de pertes de charge singulières) ;
- La valeur de la fonction fitness.

IV.7. Présentation de la structure de l'outil

L'organigramme du principe est comme suit :

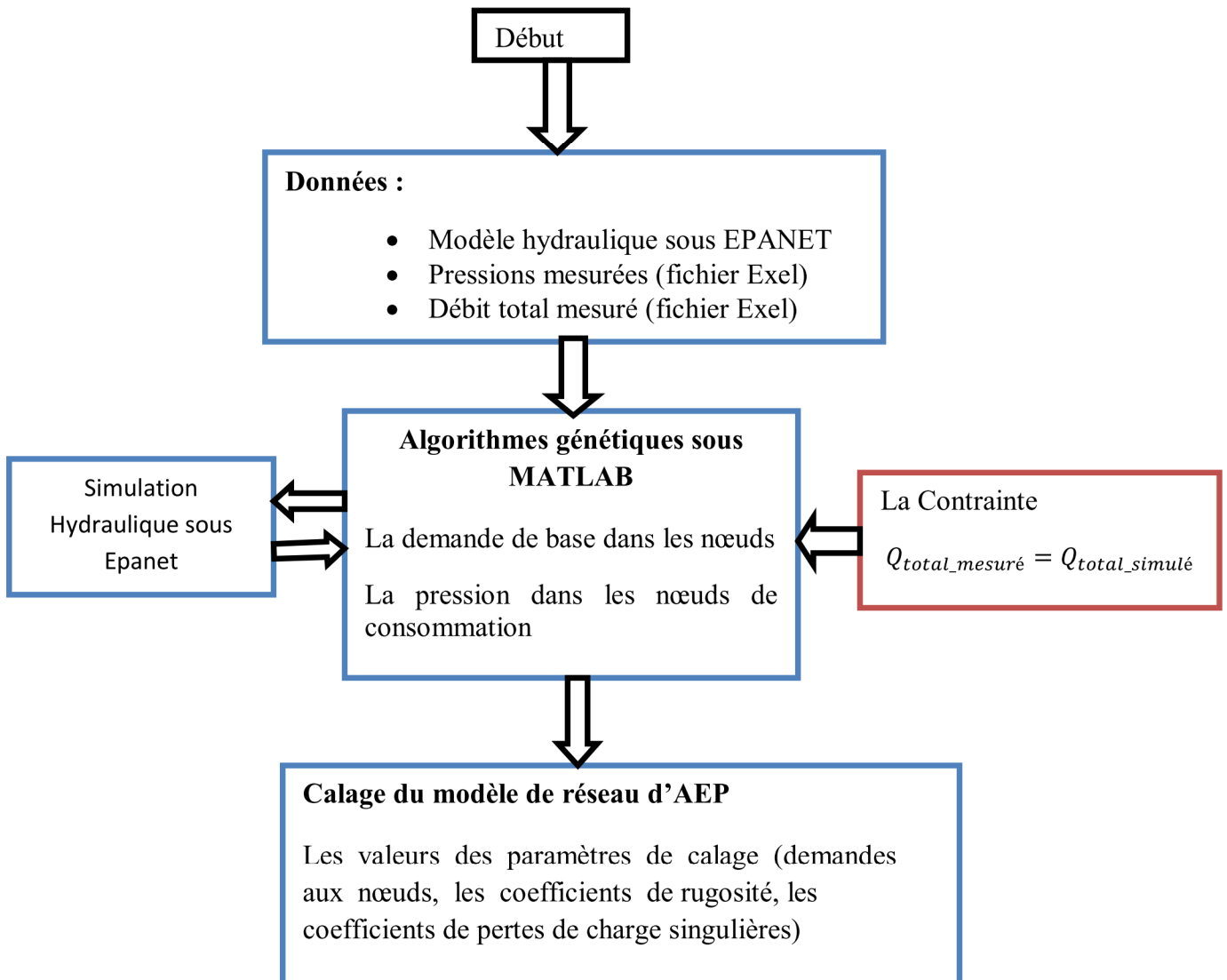


Figure IV-1 : principe de la structure générale de l'outil.

Conclusion

Afin de rendre les modèles de simulation de réseau utile, il est nécessaire de les calibrer avant qu'ils soient utilisés (*Ormsbee et Lingireddy, 1997*) et une grande quantité de données d'observation fiables est nécessaire pour estimer correctement les paramètres de calage (*Walski, 2000*). Cependant, ceci est en totale contradiction avec ce qui est réellement disponible comme données en raison des contraintes financières ou de temps pour la collecte des mesures sur le terrain et l'absence de guidance. La question de la qualité et de la quantité de données est étroitement liée au procédé de mesure utilisé.

L'outil de calage qu'on a proposé basé sur GA peut gérer des réseaux plus importants, plusieurs conditions de chargement et un plus grand nombre de paramètres de calage ; et permis l'incorporation facile des types de paramètres supplémentaires (diamètre de la conduite, demandes, etc.) et contraintes dans le processus d'optimisation.

Dans le cadre de notre travail, nous n'avons pas approfondie les détails d'utilisation et de paramétrage des AG. Nous les avons appliquées dans leur utilisation standard dans MATLAB. Cela peut en fait avoir un effet sur les résultats trouvés, mais ils restent toujours très proches des résultats obtenus avec un algorithme très détaillé. La seule différence peut probablement être observée dans la rapidité de convergence des calculs.

Chapitre V

Application Sur Un Cas Réel

Chapitre V

Application à un cas réel

Introduction

Un modèle informatique est devenu un outil essentiel pour la gestion des systèmes d'alimentation en eau autour du monde. La valeur de ces modèles est directement liée à quel point le modèle représente le vrai système d'alimentation en eau.

Pour enrichir le fonctionnement de l'outil pour le calage des modèles hydrauliques, nous avons fait une application du modèle sur un le périmètre d'étude de réseau d'adduction Boudouaou - Gué de Constantine de la wilaya d'Alger.

Nous commençons par une brève présentation des zones d'études. Par la suite, nous passons à la représentation de l'état initial du modèle (avant le calage). Et pour finir, nous exposerons les différents résultats obtenus (après le calage) avec leurs interprétations.

V.1.Les Resource En Eau De La Ville D'Alger

L'alimentation en eau potable de la population de la ville d'Alger est assurée au moyen de trois sources principales : les eaux de surface, les eaux de nappes phréatiques ainsi que les eaux issues du dessalement

L'adduction est assurée par un réseau transversal s'étend sur un axe Est-Ouest (enveloppe jaune sur la figure II.1) de la station de traitement de Boudouaou dans la wilaya de Boumerdes aux réservoirs de SP3 au Sud-Ouest de la wilaya d'Alger et complété depuis 2002 par un apport d'eaux de surface des barrages de Bouroumi, de Boukourdane et du Ghrib situés à l'Ouest d'Alger et alimentant la station de traitement de Reguieg Kaddour (dite SAA).



Figure V.1 : Système de production Isser Keddara (SPIK)

V.1.1. De la source au réseau

La production en eaux superficielles est assurée au moyen de sept (07) barrages réparties dans les côtes Est et Ouest d'Alger.

a) Le barrage de Béni Amrane

C'est un barrage réservoir situé dans la wilaya de Bouira, de capacité de 11 Hm^3 (source ANBT) alimenté par l'affluent du oued Sebaou et qui assure le transfert par refoulement de ses eaux vers le barrage de Keddara ainsi que la station de traitement de Boudouaou afin d'alimenter le grand Alger.

b) Le barrage de Keddara

Le barrage de Keddara est situé dans la wilaya de Boumerdès, à 8 km de Boudouaou et à 50 Km à l'Est d'Alger. Une capacité de 142 Hm^3 (ANBT). Il est alimenté par les affluents des oueds Boudouaou et Isser d'une part et par les eaux excédentaires du barrage Hamiz d'autre part. Il est destiné à satisfaire les besoins en eau potable de l'agglomération algéroise par passage de l'usine de traitement de Boudouaou.

c) Le barrage de Taksebt

Situé dans la wilaya de Tizi-ouzou, ce barrage est de capacité de 181 Hm^3 (source ANBT).

Ces eaux sont traitées par la station de traitement qui se trouve en aval du barrage alimente le réseau Isser – Keddara (SPIK).

d) Le barrage de Bouroumi

Situé dans la wilaya de Blida, ce barrage de capacité de 181 Hm³ (*source ANBT*) récupère une partie de ses eaux du barrage de Ghrib transfert vers la station de traitement SAA.

e) Le barrage de Boukerdane

Situé dans la wilaya de Blida, ce barrage de capacité de 105 Hm³ (*source ANBT*) transfert ses eaux vers la station de traitement SAA.

f) Transfert Béni Amrane - Keddara

C'est une conduite de ϕ 2000 et d'environ 31,3 km de longueur reliant le barrage de Béni Amrane à la retenue de Keddara, par le biais station de pompage de Béni Amrane.

g) Conduite Keddara - Station de traitement Boudouaou

Deux conduites de 2 m de diamètre a 5,65 km, et 3,1 km avec deux tuyaux jumelés de diamètre 1.5 m entre la retenue de Keddara et la station de traitement de Boudouaou.

V.1.2. Conduites d'amenée

Le réseau d'adduction d'Alger a été partagé en cinq (05) grandes chaines qui sont :

- La chaine des Hauteurs,
- La chaine des adductions,
- La chaine centre,
- La chaine côtière,
- La chaine SPIK : notre zone d'étude.

La chaine des hauteurs assure d'une part l'alimentation du réservoir STAND (Rostomia) à partir de la SP1 (Tassala El Merdja) et puis la SP2 (Draria) et d'autre part l'alimentation du réservoir de Garidi.

La chaine des adductions transporte de l'eau refoulée par la station de pompage SP3, la station de traitement de Douaouda et le champ de captage de Mazafran vers le complexe hydraulique d'El Harrach.

La chaine centre transporte de l'eau refoulée par le complexe d'El Harrach vers le réservoir Kouba 97 afin d'alimenter la station de pompage de Telemly.

V.2. Présentation De La Zone D'étude d'Isser- Keddara (SPIK)

Le secteur « adduction transversale » constitue l'épine dorsale du système d'adduction de la wilaya d'Alger. Les eaux de surface sont mobilisées principalement par le système de production Isser-Keddara(SPIK) mis en service en 1986 et alimenté à partir des eaux des barrages de Keddara et Beni Amrane via la station de traitement de Boudouaou. Ce système de production est complété depuis 2002 par un apport d'eaux de surface des barrages de Bouroumi, de

Boukourdane et du Ghrib situés à l'Ouest d'Alger et alimentant la station de traitement de Reguieg Kaddour (dite SAA).

L'adduction des barrages de Keddara et Taksebt comprend une liaison entre le site de Boudouaou et la station Gué de Constantine, à l'aide de deux (02) conduites en DN 1500 BPAT, elles s'étendent sur 28 km de longueur chacune sur la moitié Est de la wilaya d'Alger, et sont alimentées par Boudouaou, possédant plusieurs piquages permettant d'alimenter diverses stations de pompage et réservoirs.

V.2.1. Conduites de piquages SPIK

Un export de $25\,000\text{ m}^3/\text{j}$ en moyenne est réalisé par les stations de pompage Boudouaou et Boumerdès.

La conduite DN 300 F Reghaia ville au PK 4, qui effectue la distribution sur le réseau de Reghaia ville (Boucle Est (Bordj El Kiffan – Rouiba – Reghaia)). Ce piquage a été réalisé sur une vidange des conduites SPIK.

Une antenne sur les conduites du SPIK en DN 800/700/500, appelé « antenne Reghaia », elle relie le SPIK au complexe «Reghaia Nord»

L'antenne Bordj El Kiffan DN 1200 BPAT au PK 12, qui effectue l'alimentation de trois (03) ouvrages de stockage (Boucle Est (Bordj El Kiffan – Rouiba – Reghaia)).

L'antenne Tafourah DN 1200 BPAT au PK 21, qui effectue l'alimentation de deux (02) ouvrages de stockage (Chaîne Tafourah (SPIK –Tafourah – Telemly)).

Le complexe d'El Harrach ($2*5\,000\text{ m}^3$, CTP 12,5 m NGA, $2*10\,000\text{ m}^3$, CTP 10,4 m NGA) par un double piquage en DN 1200 BPAT au PK 25.

Le réservoir de Baraki Ville ($3\,000\text{ m}^3$, CTP 26,2 m NGA) par un piquage en DN 500/400 F au PK 27 (Chaîne Tafourah (SPIK –Tafourah – Telemly)).

Les deux conduites SPIK aboutissent en DN 1000 BPAT aux réservoirs d'aspiration de la station de pompage Gué de Constantine ($2 * 10\,000\text{ m}^3$, CTP 24 m NGA).

V.2.2. Conduites Mazafran

Les « conduites Mazafran », DN 930 BPAT, DN 1000 AC et de diamètre 42 pouces AC : elles s'étendent sur 9 km à 31 km sur la moitié Ouest de la wilaya d'Alger et sont alimentées par SP3.

V.3. Positionnement des points de mesure sur le Modèle SPIK

Le schéma ci-dessous représente les différents points de mesure de pression et de débits. Les mesures ont été obtenues chaque 15 mn pendant une journée.

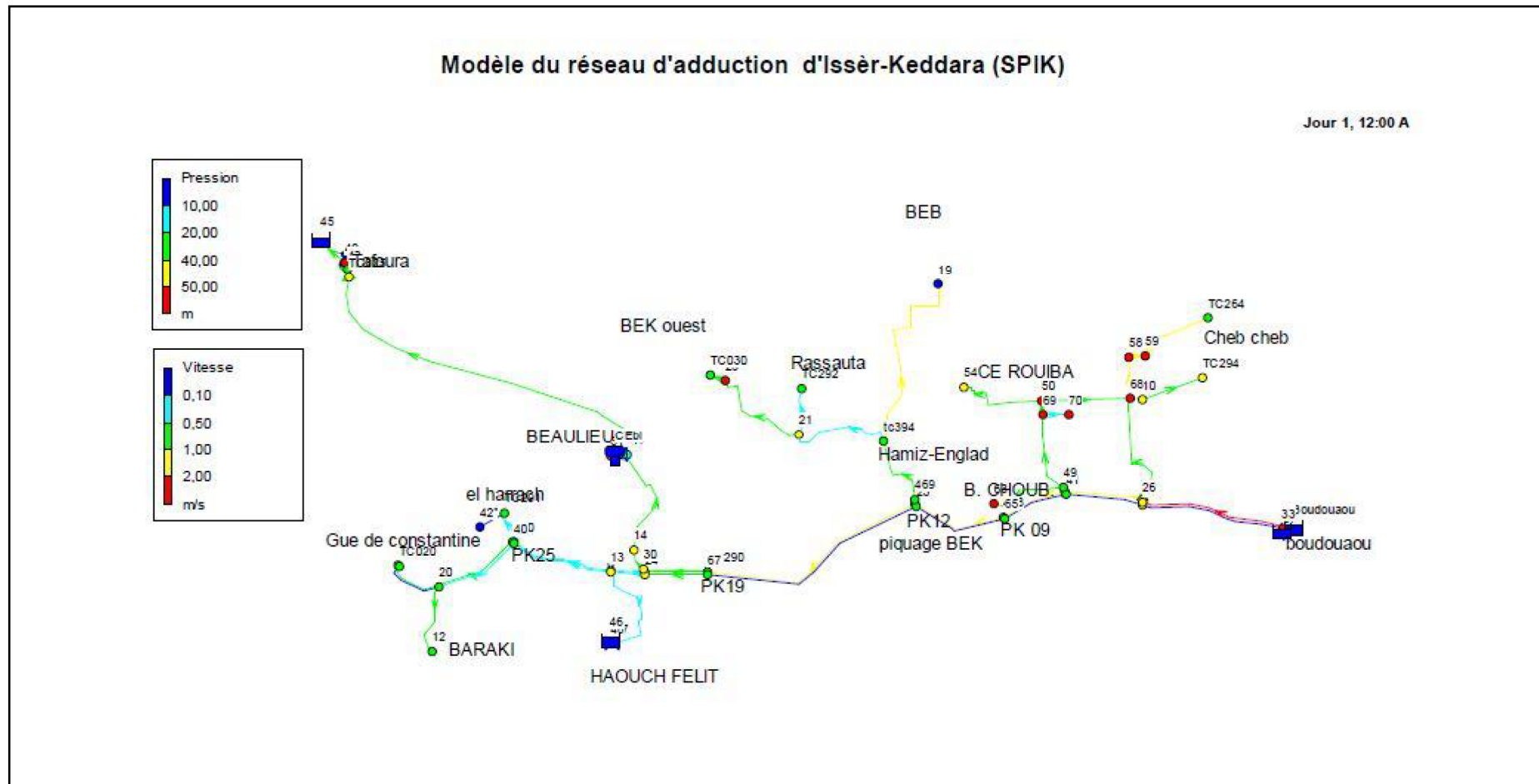


Figure V.2 : Modèle du réseau d'adduction SPIK «via EPANET »

V.4. Situation initial (avant le calage)

Les figures (V-3) ÷(V-11) représentent les variations des pressions (mesurées : étoilée, et simulées : courbe bleu) aux différents points de mesure durant la durée de simulation.

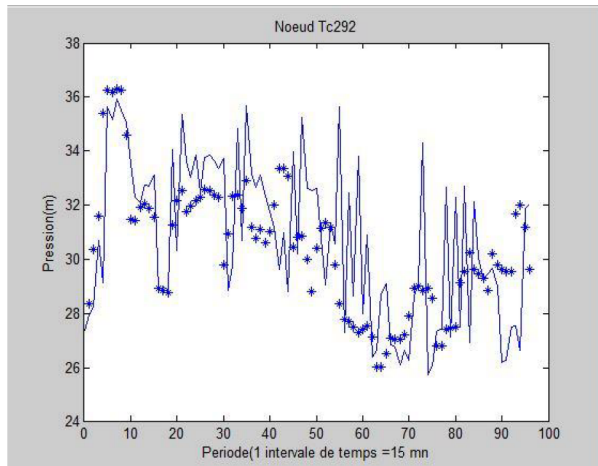


Figure V-3 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud Tc292

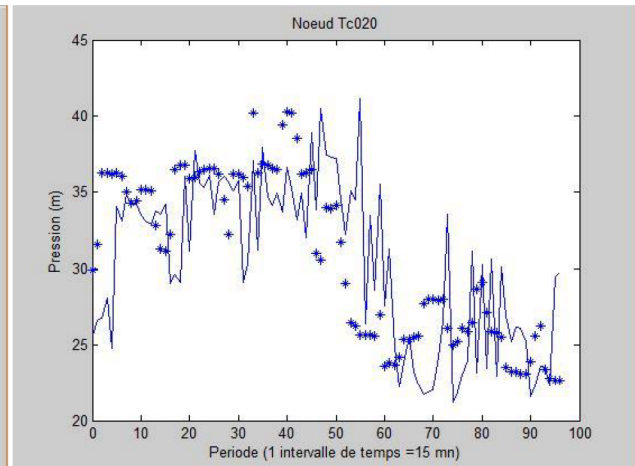


Figure V-4 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud Tc020

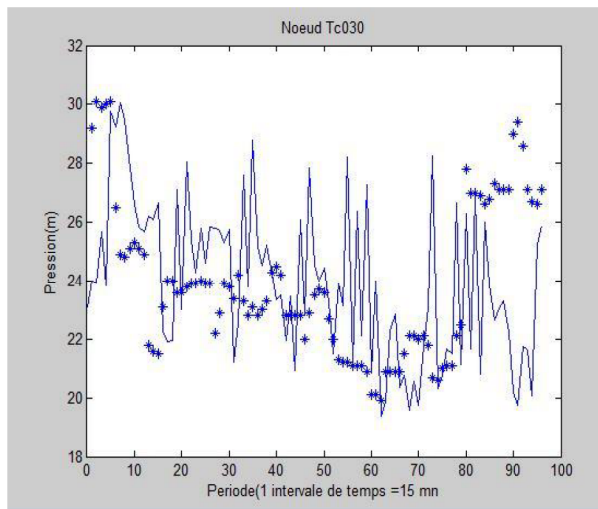


Figure V-5 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud Tc030

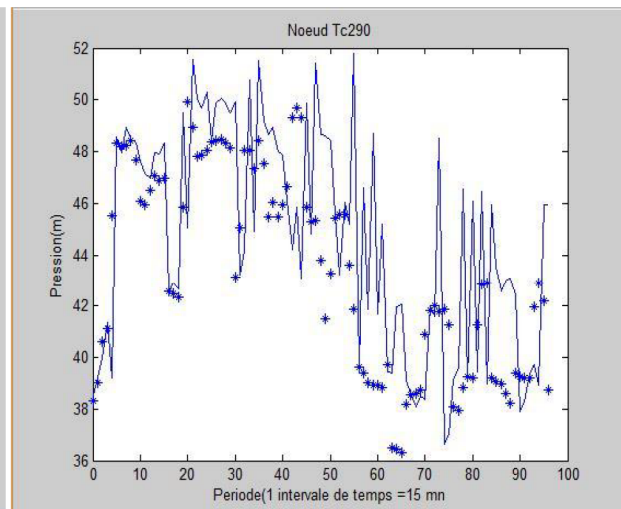


Figure V-6 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud Tc290

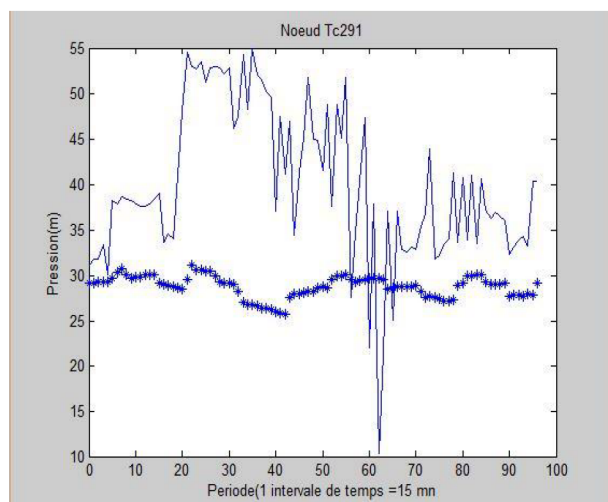


Figure V-7 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud Tc291

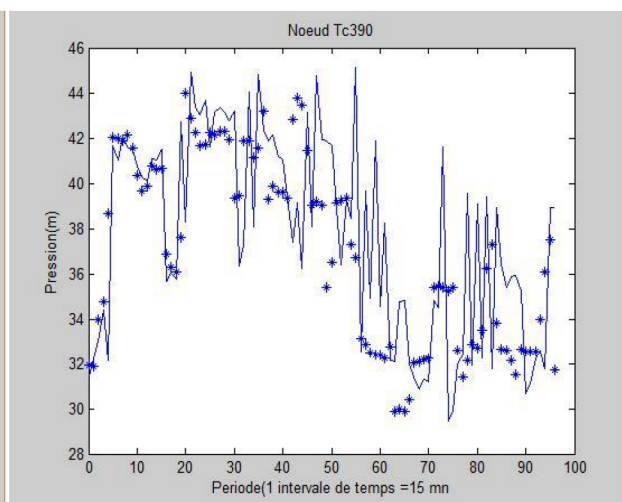


Figure V-8 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud Tc390

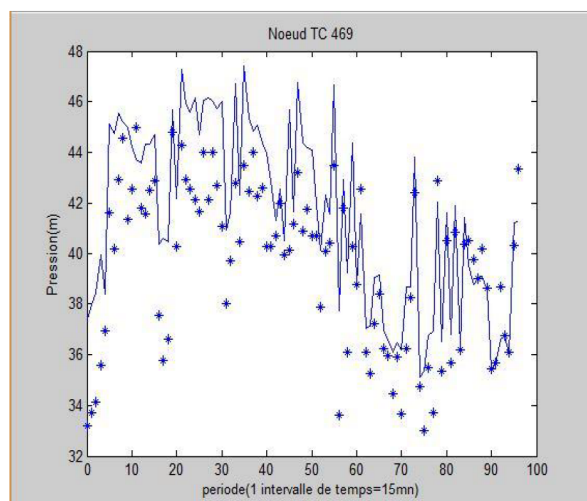


Figure V-9 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud Tc469

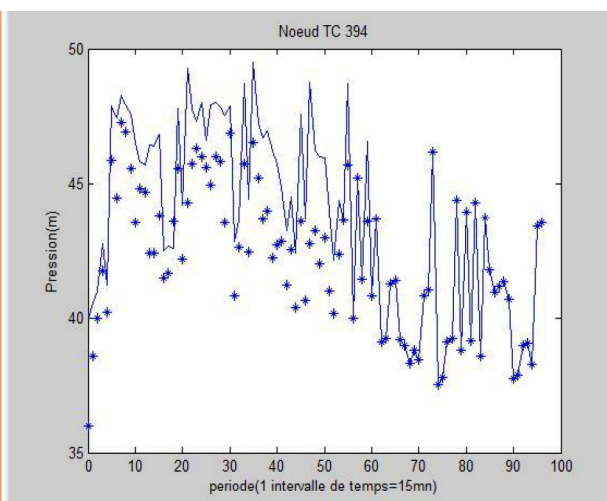


Figure V-10 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud Tc394

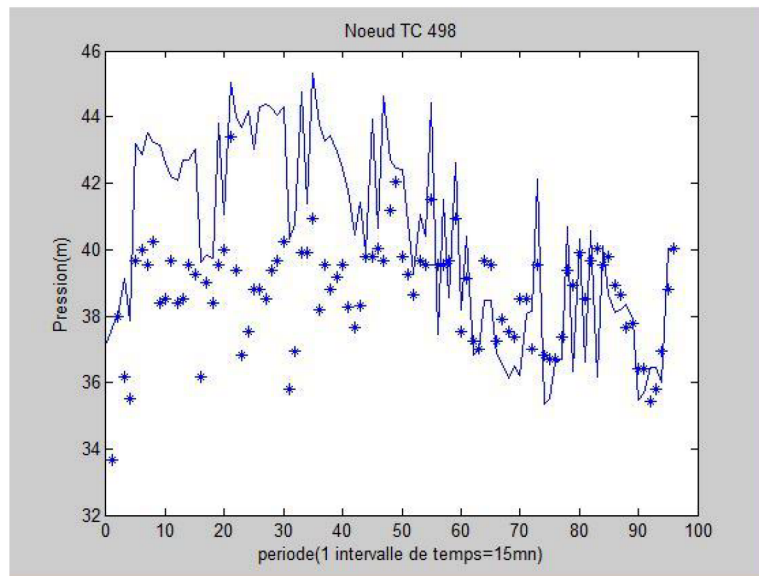


Figure V-11 : Variations des pressions
mesurées simulées au nœud Tc498

Le tableau V-1 représente les moyennes et les écarts type des différences entre les pressions mesurées et simulées pour chaque nœud de mesure pendant la durée de la simulation.

Tableau V-1 : Moyennes et écarts type des différences entre les pressions mesurées et simulées

Point de mesure	Nombre d'observation	Erreur moyenne (m)	Ecart type d'erreur
Tc 394	97	01,38387597	1,28068409
Tc469	97	02,08696656	1,17633035
Tc498	97	16,78581400	2,47079266
Tc030	97	02,65163519	1,85052323
Tc390	97	02,57171067	1,94809686
Tc020	97	03,68385422	2,11779459
Tc290	97	02,77533463	1,99443836
Tc292	97	01,89553636	1,30384393
Tc291	97	12,00130630	6,48485451

La figure qui suit montre la corrélation entre les pressions mesurées et les pressions simulées avant le calage.

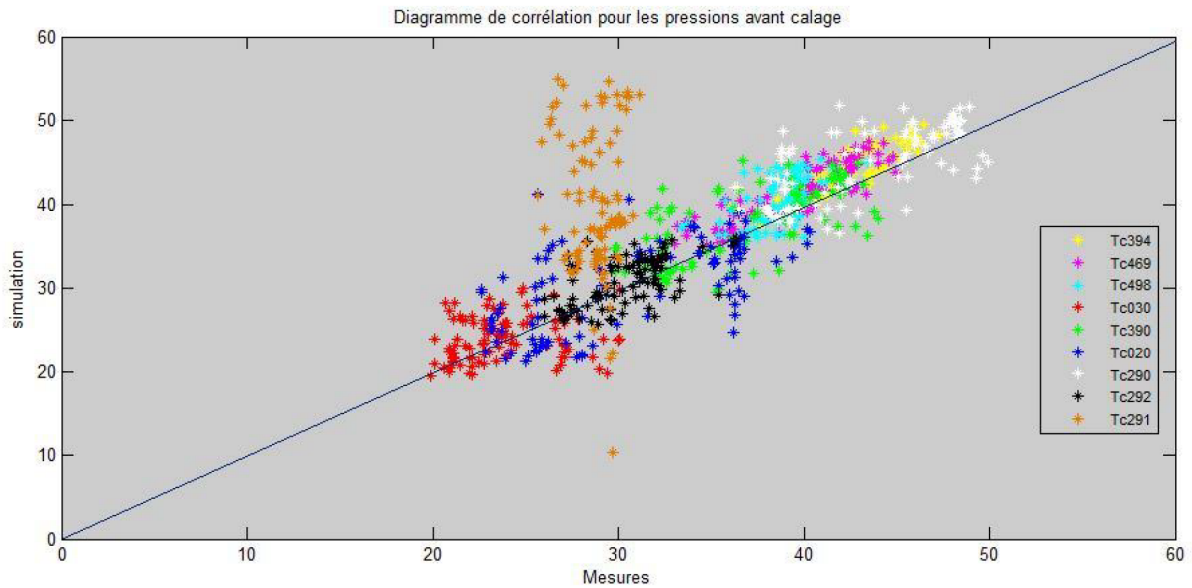


Figure V-12 : *Corrélation entre les pressions simulées et les pressions mesurées avant le calage.*

V.5. Résultats obtenus après le calage

Dans cette partie, nous présentons les résultats de calage obtenus pour le réseau d'adduction du système de production Isser-Keddara(SPIK).

Les données d'entrée pour l'outil sont : un fichier *.inp du modèle hydraulique du réseau concerné, ainsi que les deux fichiers Excel qui contiennent les valeurs des pressions mesurées et le débit mesuré.

5.1. L'évolution de la fonction fitness

La figure ci-dessous donne l'évolution de la fonction fitness au cours du calage du modèle du réseau de système de production Isser-Keddara(SPIK).

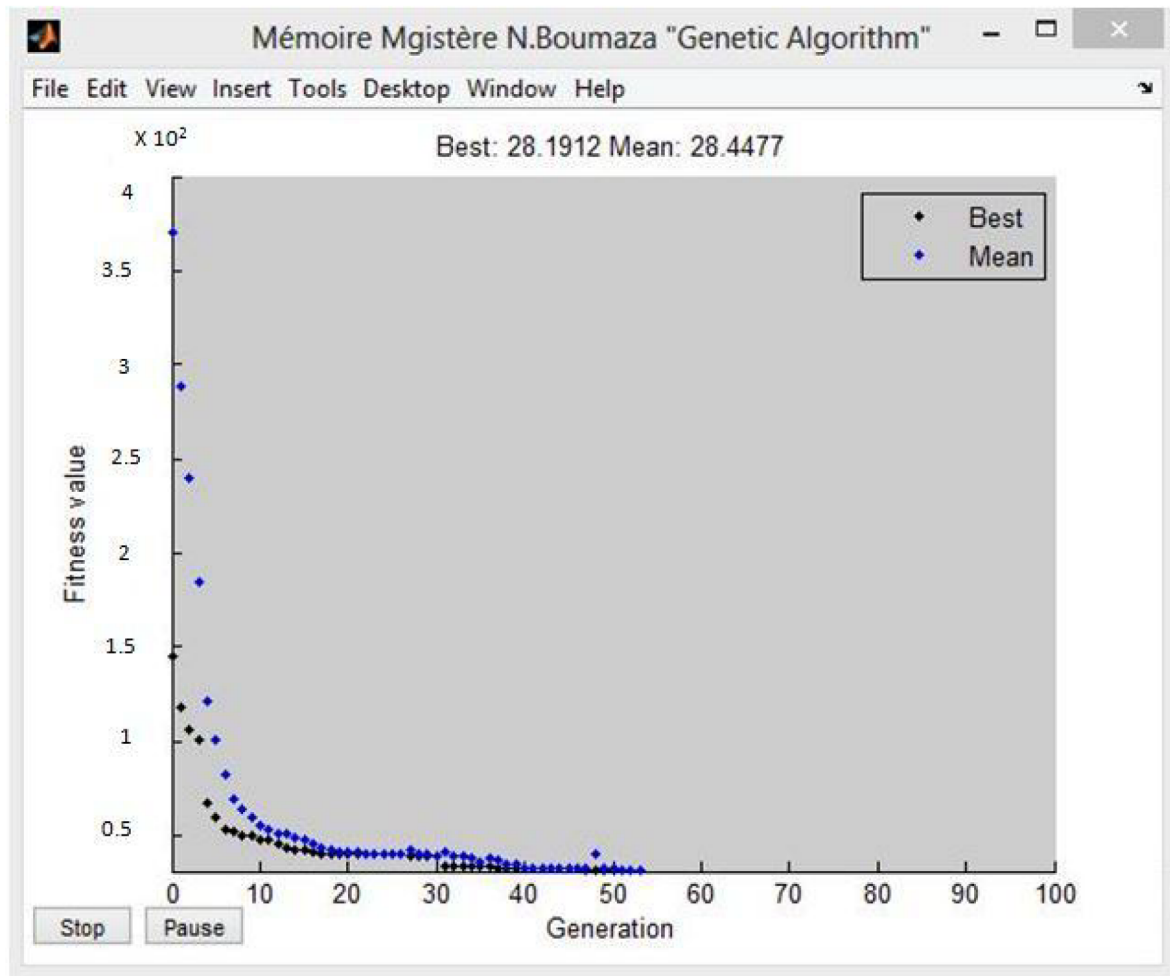


Figure V-13 : Evolution de la fonction fitness au cours de calage de modèle de réseau de SPIK

5.2. Résultats de calage

Les graphes ci-dessous représentent les variations des pressions (mesurées : étoiles ; et simulées : ligne continue) aux différents points de mesure après le calage.

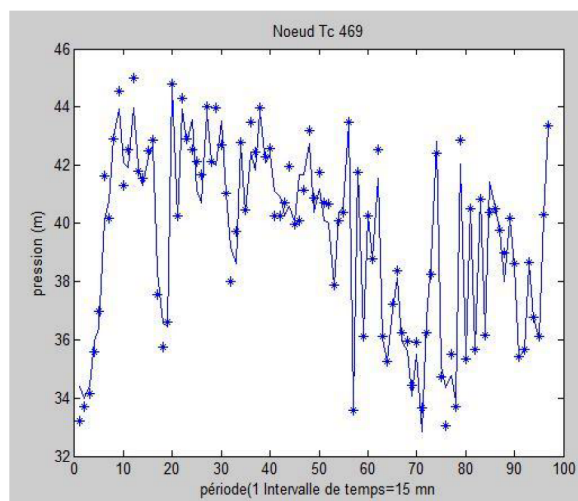


Figure V-14 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud TC469 et

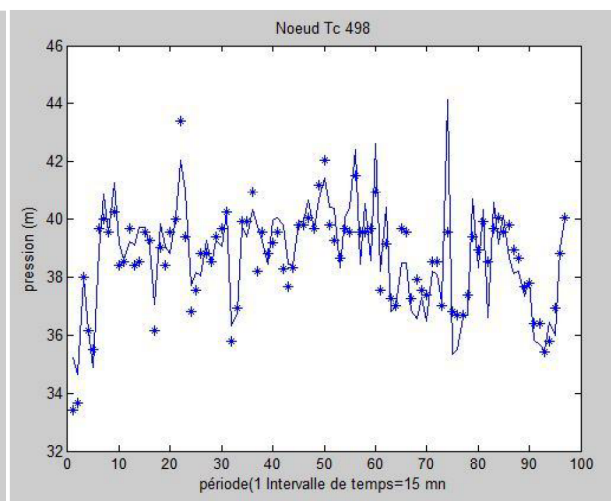


Figure V-15 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud TC498et

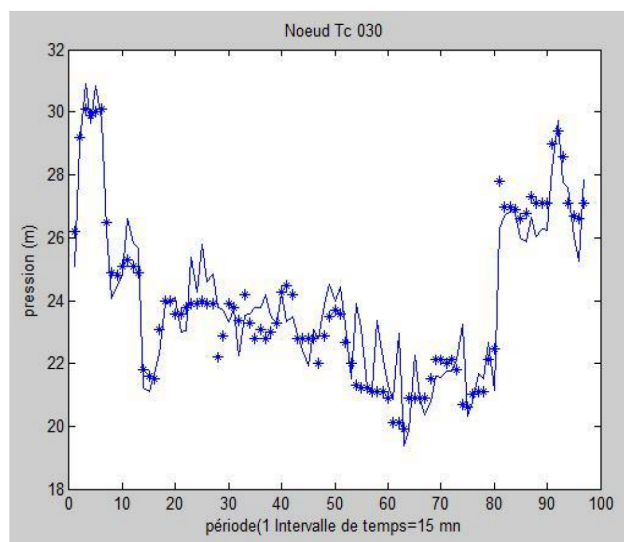


Figure V-16 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud TC030

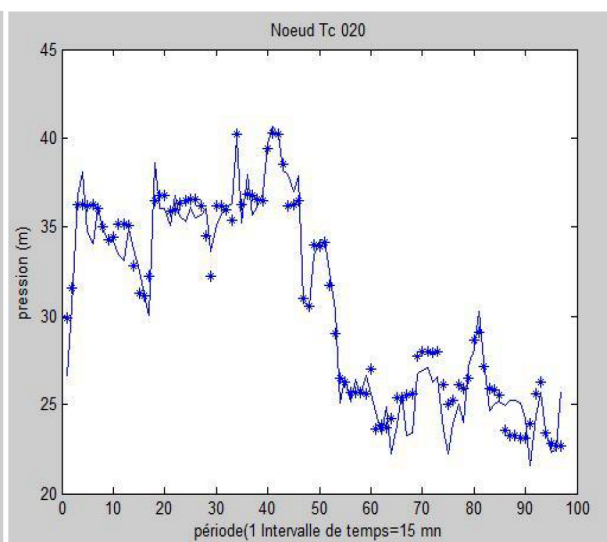


Figure V-17 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud TC020

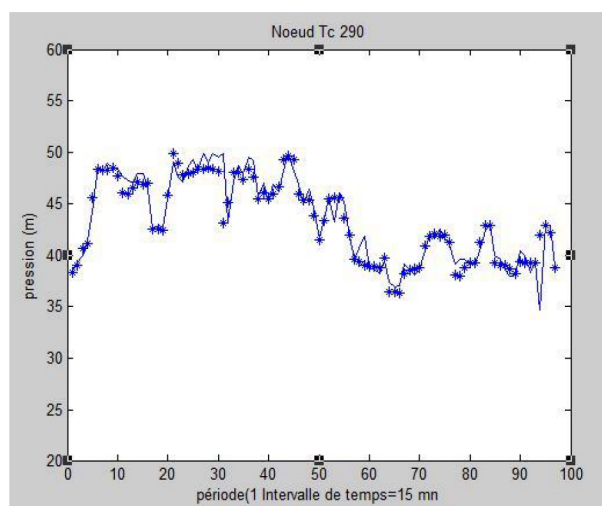


Figure V-18 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud TC290

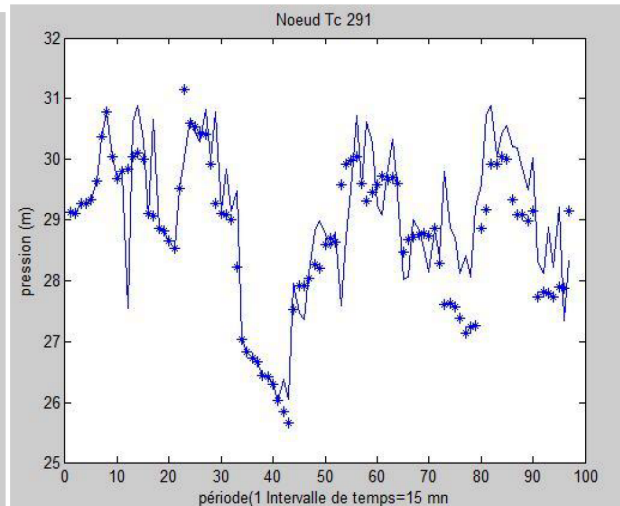


Figure V-19 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud TC291

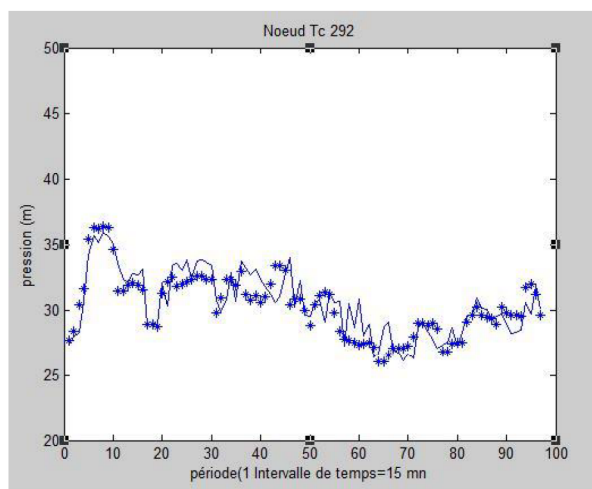


Figure V-20 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud TC292

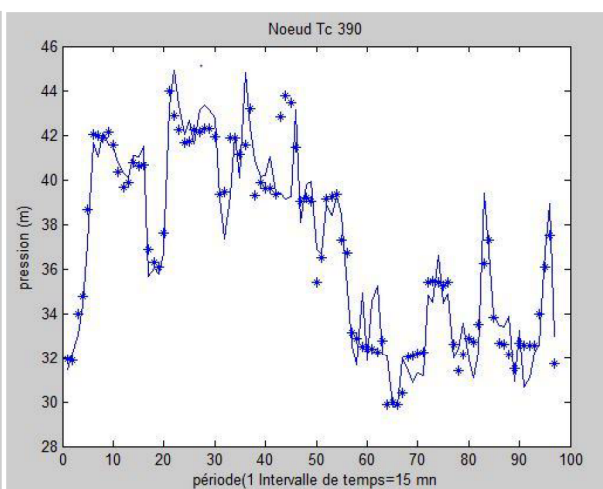


Figure V-21 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud TC390

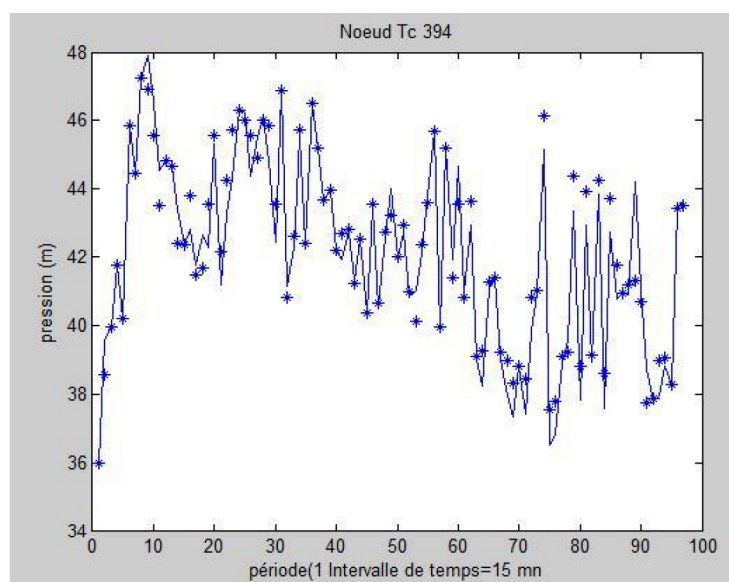


Figure V-22 : Variations des pressions mesurées et simulées au nœud TC394

Dans le tableau qui suit, nous calculons les erreurs moyennes et l'écart type de l'erreur pour chaque nœud de mesure.

Tableau V-2 : Moyennes et écarts type des différences entre les pressions mesurées et simulées après calage

Point de mesure	Nombre d'observation	Erreur moyenne (m)	Ecart type d'erreur
Tc 394	97	0,46620918	0,43985099
Tc469	97	0,50879783	0,39774291
Tc498	97	0,69631500	0,41054228
Tc030	97	0,73392765	0,40765662
Tc390	97	1,05854168	0,63274807
Tc020	97	1,02828823	0,59669023
Tc290	97	0,81348585	0,56524829
Tc292	97	1,03897261	0,60897259
Tc291	97	0,73618055	0,45391007

La figure qui suit montre la corrélation entre les pressions mesurées et les pressions simulées après le calage.

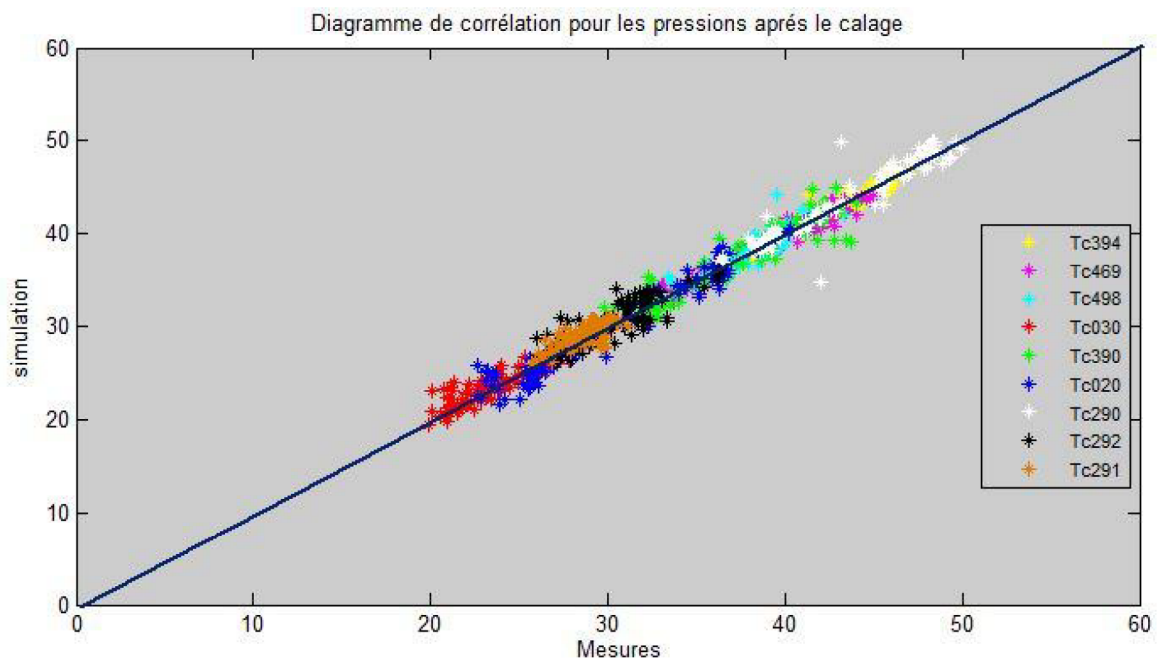


Figure V-23 : Corrélation entre les pressions simulées et mesurées après le calage du modèle de système de production Isser-Keddara(SPIK)

V.6. Analyse et interprétation des résultats

Après avoir calé le modèle hydraulique d'adduction SPIK, nous avons constaté une redistribution des demandes de base, et qu'il y a des nœuds qui ont subis une augmentation importante dans leur consommation de base. Cette augmentation est peut-être dû au fait que les conduites connectées à ces nœuds présentent des fuites importantes.

L'algorithme Génétique est appliqué pour le problème mentionné ci-dessus. La figure V.13 représente la meilleure valeur de la fonction objective à chaque génération jusqu'à 50 générations. Un des facteurs principaux qui affecte au nombre total des évaluations de fonction

est temps de recherche et la sélection de contrainte, à chaque fois nous devrions appliquer la contrainte pour rétrécir la recherche dans la région la plus prometteuse de l'espace de recherche.

Après le calage du modèle SPIK, nous avons eu des coefficients de rugosité qui varient de 0,1 jusqu'à 1,5. La figure V-24 montre les pourcentages des différents coefficients sur l'ensemble des conduites de réseau qui sont de l'ordre de 64 conduites.

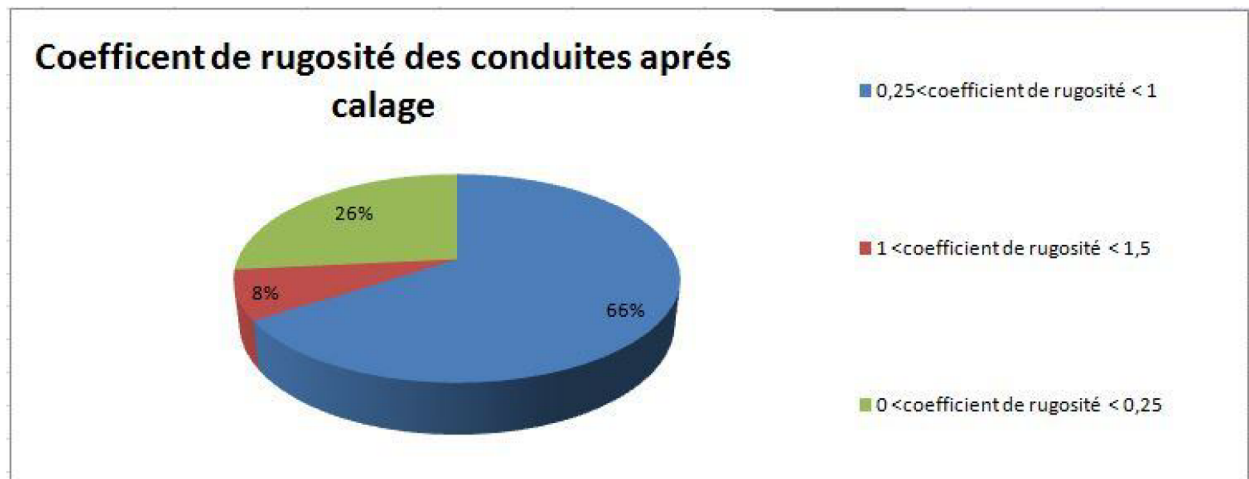


Figure V-24 : Répartition des coefficients de rugosité pour l'ensemble des conduites du réseau SPIK.

Les coefficients des pertes de charges singulières sont répartis sur l'ensemble des conduites de réseau de la façon qui suit.

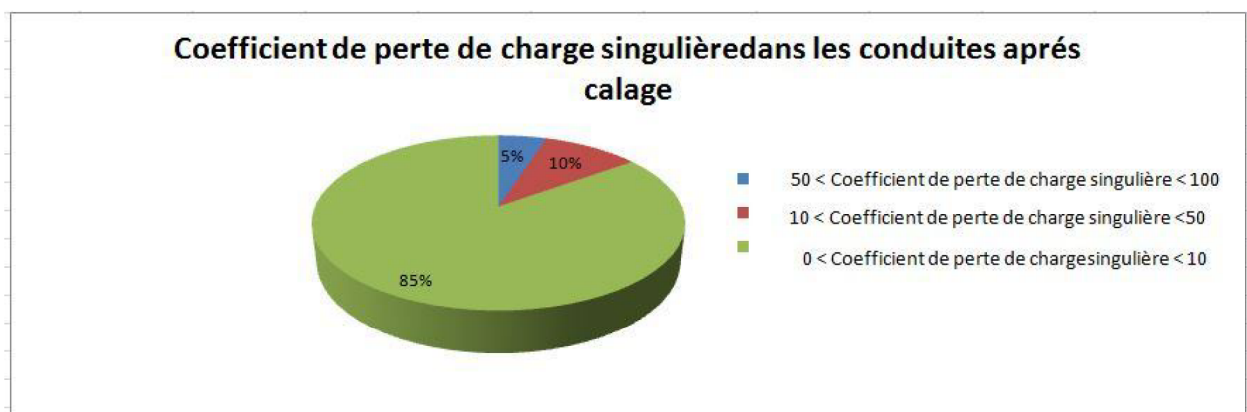


Figure V-25 : Répartition des coefficients de perte de charge singulière pour l'ensemble des conduites du réseau SPIK

Dans la figure qui suit, on localise sur le modèle les différents nœuds qui présentent une augmentation remarquable de la demande de base après le calage.

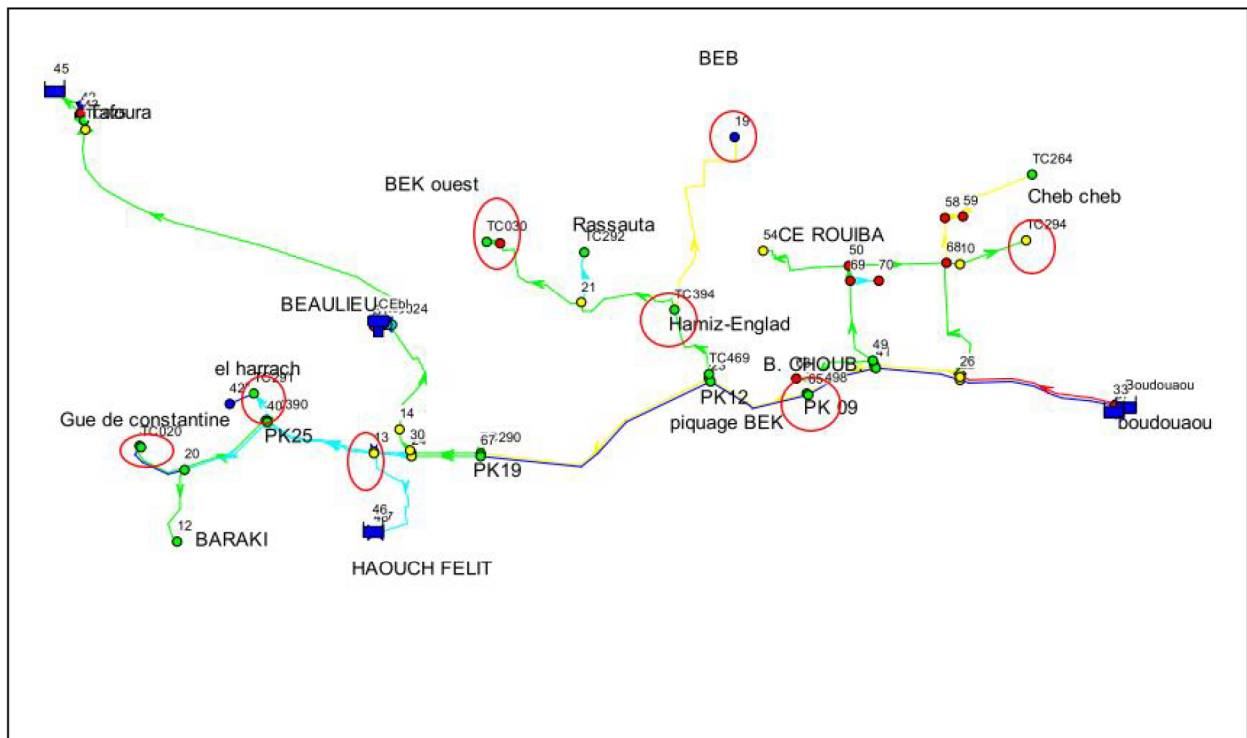


Figure V. 26 : Localisation des points qui présentent une augmentation remarquable de la demande de base

Conclusion

Nous pouvons conclure, que l'outil donne des résultats tout à fait cohérents vis à vis de la réalité du terrain. Seulement, ces résultats sont fortement impactés par la fiabilité des données d'exploitation comme la mise à jour du modèle hydraulique, le bon positionnement des points de calage et la précision des instrument de mesure.

Le modèle minimise l'erreur obtenue entre les variables observées et calculées au cours d'une période prolongée de simulation qui présente une opération journalière typique pour un réseau d'alimentation en eau potable. Les bons résultats obtenus à partir de l'application indiquent que les caractéristiques de recherche des AG conviennent pour le problème de calage appliquées dans leur utilisation standard dans MATLAB mais présentent l'inconvénient de prendre énormément de temps pour donner des résultats. Nous pensons que de meilleures solutions pourraient être obtenues si une amélioration interne des AG est faite.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

La première conclusion qui peut être tirée des études précédentes est qu'un degré élevé d'intérêt pour le système d'alimentation en eau potable a été montré par des chercheurs, mais elle a été considérablement moins couverte par des praticiens.

L'approche suivie dans ce travail nous a permis d'élaborer un outil de calage en pression des modèles de réseau d'alimentation en eau potable. Trois paramètres de calage ont été pris en considération à savoir les demandes de base aux nœuds de consommation, les coefficients de perte de charge singulière et les coefficients de rugosité des conduites.

L'environnement de travail de cet outil est très simple, il suffit juste de lui introduire un fichier de modèle en extension (.INP) ainsi que les deux fichiers Excel qui contiennent respectivement les pressions mesurées aux nœuds de calage et le débit mesuré à l'entrée de réseau. Après, il faut fixer les bornes des intervalles de variation des coefficients de rugosité ainsi que celles des coefficients de perte de charge singulière. L'intérêt principal de cette approche est d'effectuer automatiquement le calage des modèles hydrauliques de réseau d'AEP offrant ainsi un moyen de contourner le calage manuel qui est à la fois ennuyé et fatigant et surtout dans le cas des modèles de grande taille.

L'utilisation de cette approche est d'une très grande importance, car en plus de calage, elle peut nous servir comme un outil d'aide pour la localisation des fuites dans les nœuds en remarquant une demande de base très élevée.

Les résultats obtenus par cette approche sont conditionnés par la représentativité du modèle hydraulique (le modèle hydraulique doit être représentatif du réseau réel) et la fiabilité des mesures effectuées sur le terrain.

L'unique inconvénient que possède l'outil est lié à l'utilisation des algorithmes génétiques et qui réside dans le fait de ne pas donner de bons résultats à la première exécution, et il est nécessaire de répéter l'exécution du programme plusieurs fois et par la suite ça converge vers le meilleur résultat.

Il est à signaler aussi que l'utilisation d'un grand nombre de points de mesures est d'un intérêt majeur pour se rapprocher au mieux de la réalité et de faire un calage parfait du modèle hydraulique en question. Dans le cas contraire, les algorithmes génétiques vont nous conduire à des résultats qui n'ont pas de sens physiques.

Finalement, on tient à dire que ce présent travail constitue un bon départ pour la réalisation d'un outil solide pour le calage des modèles du réseau d'AEP. L'aspect exploratoire de ce travail permet de fournir plusieurs pistes pertinentes qui peuvent servir au développement de nouvelles approches de calage plus adaptées au contexte de la problématique de calage

des modèles hydrauliques coûteux en temps de calcul. Pour parvenir à un outil de calage complet et efficace, il est nécessaire que d'autres travaux succèdent le nôtre, par exemple la prise en considération des fuites lors du calage en ajoutant les coefficients de débit et l'exposant des fuites comme paramètres de calage ce la nécessite une fonction Fitness très compliquée à définir pour l'AG en prenant en considération les pressions mesurées dans les différents points de modèle du réseau et l'utilisation des algorithmes génétiques développés soit de modifier l'opérateur de mutation et croisement.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

AbdelMeguid, H.S.S.,(2011).«Pressure, Leakage and Energy Management in Water Distribution Systems ». A Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy by De Montfort University, 266 pages.

Akdoğan,T., (2005). « Design of water distribution system by optimization using reliability considerations ». In partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in department of civil engineering, the graduateschool of natural and applied sciences of middle east technical university,104pages.

Alvisi, S.&Franchini, M.,(2006).« Near-optimal rehabilitation scheduling of water distribution systems based on a multi-objective genetic algorithm ». Civil Engineering and Environmental Systems,Vol. 23:3, pp 143-160.

Ami, P. & Whittle, A.&Ostfeld, A., (2009). « Online HydraulicState Prediction for Water Distribution Systems ».American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 32-32, 24pages

Atiquzzaman, M. &Liong, S.,(2004). « Using shuffled complex evolution to calibrate water distribution network model ». Journal of Civil Engineering (IEB), Vol.32(2),pp. 111-119.

Awad, H. &Kawamura, A.&Jinno, K.,(2006). « Implicit Calibration Of Water Distribution Networks Using Sce-Ua ». Institute of Environmental Systems, Kyushu University Hakozaki, Higashi-Ku, Fukuoka, Japan, 8pages.

Babykina,E., (2010). « Modélisation statistique d'événements récurrents.Exploration empirique des estimateurs, prise en compte d'une covariable temporelle et application aux défaillances des réseaux d'eau ». Thèse de doctorat del'Ecole doctorale de mathématiques et informatique de l'Université de bordeaux II, 171pages.

Behzadian, K. &Ardesir, A.& Kapelan, Z.&Savic, D., (2008). "Stochastic sampling design for water distribution model calibration».International Journal of Civil Engineerng. Vol. 6, N° 1, pp.48-58.

Bhave, P. & Gupta, R., (2004). « Optimal design of water distribution networks for fuzzy demands ». Civil Engineering and Environmental Systems, Vol 21:4, pp. 229-245.

Blindu, I. (2004).« Outil d'aide au diagnostic du réseau d'eau potable pour la ville de CHISINAU par analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydrauliques ». Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne,263 pages.

Blokker,E.J.M., (2010)."Stochastic water demand modelling for a better understanding of hydraulics in water distribution networks».Thèse de doctorat a University Delft, The Netherlands, 212pages.

BIBLIOGRAPHIE

Brémond, B. & Fabrie, P. & Jaumouillé, E. & Mortazavi, I. & Piller, O., (2009). « Numerical simulation of a hydraulic Saint-Venant type model with pressure-dependent leakage ». *Applied Mathematics Letters*, 22, pp. 1694–1699.

Chandramouli, S. & Malleswararao, P., (2011). « Reliability Based Optimal Design Of A Water Distribution Network For Municipal Water Supply ». *International Journal of Engineering and Technology*, Vol.3 (1), pp. 13-19.

Chesneau, O., (2006). « Un outil d'aide à la maîtrise des pertes dans les réseaux d'eau potable : la modélisation dynamique de différentes composantes du débit de fuite ». Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur Strasbourg I, 224 pages.

Čistý, M. & Bajtek, Z., (2008). « Optimal Design Of Water Distribution Systems By A Combination Of Stochastic Algorithms And Mathematical Programming ». *Slovak journal of civil engineering*, pp. 1-7.

Craig Ashby, R., (2013). « Investigation of usage of velocity and pressure data within a water distribution lab model for calibrating hydraulic models ». A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of Master of Science in Civil Engineering in the College of Engineering at the University of Kentucky, 125 pages.

Dandy, G. & Simpson, A. & Murphy, L., (1996a). « An Improved Genetic Algorithm for Pipe Network Optimization ». *Water Resources Research*, Vol. 32(2), pp 449-458.

Darvini, G., (2014). « Experimental Design For Model Discrimination And Precise Parameter Estimation In WDS Analysis ». 11th International Conference on Hydroinformatics Hic 2014, New York City, USA, 7 pages

De Schaetzen, W. & Walters, G. A. & Savic, D., (2000). « Optimal sampling design for model calibration using shortest path, genetic and entropy algorithms ». *Urban Water*, Volume 2(2), pp. 141-152.

Djebdjian, B. & Yaseen, A. & Abou Rayan, M., (2006). « Optimization Of Large Water Distribution Network Design Using Genetic Algorithms ». Tenth International Water Technology Conference, Alexandria, Egypt, page 31.

Dini, M. & Tabesh, M. (2014). « A new method for simultaneous calibration of demand Pattern and Hazen-Williams coefficients in water distribution systems ». *Water Resource Manage*, Volume 28, pp. 2021 – 2034.

Dridi, L., (2005). « Les algorithmes génétiques ». Chapitre est extrait de sa thèse de doctorat, 31 pages.

Dridi, L. & Mailhot, A. & Parizeau, M. & Villeneuve, J.P., (2006). « Planification optimale du renouvellement des Conduites dans un réseau de distribution d'eau potable ». Conference

BIBLIOGRAPHIE

Infra :12 th Annual Urban Infrastructure Week Quebec. Under Construction : Optimizing Infrastructure Resources, pp. 1-14.

Eisenbeis, P., (1994), « Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable ». Thèse de doctorat en Génie de l'environnement de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 156 pages.

Elsheikh, M.& Saleh, H.& Rashwan, R.& Samadoni, M., (2013). « Hydraulic modelling of water supply distribution for improving its quantity and quality ». Sustain. Environ. Res., vol 23(6), pp.403-411.

Enrique, C. & Antonio, F., (1994). « Improving efficiency and reliability in water distribution systems ». 395 pages.

Gao, J.& Wu, S.& Han, A.& Chen, C., & Ruan, T., (2014). « Leakage control of multi-source water, distribution system by optimal pump schedule ». Procedia Engineering, Elsevier, vol 70 ,page 698 – 706, 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry .

Gheisi, A. & Naser, G., (2013). « On the significance of maximum number of components failures in reliability analysis of water distribution systems ». Urban Water Journal, Vol.10,N°1, pp.10-25.

Gomes, R. & Marques, A. & Sousa, J., (2011). « Estimation of the benefits yielded by pressure management in water distribution systems ». Urban Water Journal. Vol 8:2, pp 65-77.

Greyvenstein, B. & Van Zyl J.E., (2006). « An Experimental Investigation into the Pressure Leakage Relationship of some failed water pipes ». Conference Proceedings, 10 pages.

Greyvenstein, B., (2007). « An experimental investigation into the pressure leakage relationship of fractured water pipes ». Magister ingenerial in civil engineering at university of Johannesburg, 113 pages.

Haidar, H., (2006). « Rehabilitation des réseaux d'eau potable: méthodologie d'analyse multicritère des patrimoine des programmes de rehabilitation ». Thèse de Doctorat de l'Institut national des sciences appliquées de Lyon, Ecole doctorale de genie civil urbain, 232 pages

Haghighi, A. & Ramos, H., (2012). « Detection of leakage freshwater and friction factor calibration in drinking networks using central force optimization ». Water Resource Manage volume 26: pp.2347 – 2363.

Ibáñez, L., (2009). « Operational Optimisation of Water Distribution Networks ». A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of Edinburgh Napier University, for the award of Doctor of Philosophy, 221 pages.

BIBLIOGRAPHIE

Iftekhar, A., (1997).« Application of the gradient method for the analysis of unsteady flow in water networks ». For the Degree of master of science in the Graduate College The University Of Arizona, 187pages.

Islam, S.&Sadiq, R. & Rodriguez, M.&Francisque, A. &Najjaran, N. &Hoorfar, M.,(2 011).«Leakage detection and location in water distribution systems using a fuzzy-based methodology».Urban Water Journal, Vol. 8:6, pp. 351-365.

Jaumouille,E., (2009). « Contrôle de d'état hydraulique dans un réseau d'eau potable pour limiter les pertes». Thèse de Doctorat de l'Université de bordeaux I, Spécialité : mathématiques appliqués, 136 pages.

Jin, X. &Zhang, J. &Gao, J.& Wu, W., (2008).« Multi-objective optimization of water supply network rehabilitation with non-dominated sorting Genetic Algorithm-II». Journal of Zhejiang University science A ISSN, Vol. 9(3):pp. 391-400.

Jun, H.,(2005).« Strategic valve locations in a water distribution system».Dissertation Submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy,Civil and Environmental Engineering, 201 pages.

Jung,B.S. &Karne,Y.B.W., (2008).« Systematic exploration of pipeline network calibration using transient ».Journal of International Association of Hydraulic Engineering and Researchs,Vol. 46 Extra Issue 1, pp. 129–137,

Kapelan, Z. (2002).«Calibration of water distribution system hydraulic models». PhD thesis, Dept. of Engineering, University of Exeter, U.K, 336 pages.

Kapelan, Z.&Savic, D. & Walters, G., (2003).«Multiobjective Sampling Design for Water Distribution Model Calibration».Journal of Water Resources Planning and Management,Vol. 129, No. 6, pp. 466-479.

Kouba, G.,(2010). « Calcul des trajectoires utilisant les algorithmes génétiques en trois dimensions pour un avion modélisé en six dimensions ». Mémoire comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie,Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, 92 pages.

Lamaddalena, N.&Lebdi, F.&Nouiri, I. (2005).«Algorithme Evolutionnaire (AE) Pour L'optimisation Des Debits Sur Les Reseaux Hydrauliques A La Demande».Irrigation systems performance, Bari: CIHEAM, pp.49-58. Options Méditerranéennes : série B Etudes et Recherches

Laucelli, D. & Berardi, L. &Giustolisi, O.,(2011).«Calibration of water distribution system using topological analysis ».Water Distribution System Analysis, Tucson, AZ, USA, pp. 1664-1681.

BIBLIOGRAPHIE

Leroy, I., (1996). « Méthodes de calage automatique et sectorisation ». Mémoire D'études Approfondie, Université Louis Pasteur Strasbourg, 83pages.

Levasseur, S.,(2007). « Analyse inverse en géotechnique : développement d'une méthode à base d'algorithmes génétiques ». Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier - Grenoble I, 240 pages.

Liberatore, S.&Sechi, M. (2009).« Location and Calibration of Valves in WaterDistribution Networks Using a Scatter-Search Meta-heuristic Approach».Water Resour Manage, vol 23:pp1479–1495.

Lijuan, W.&Hongwei, Z.& Hui, J. (2012).«A Leak Detection Method Based on EPANET and Genetic Algorithm in Water Distribution Systems». Software Engineering and Knowledge Engineering, AISC 114, pp. 459–464.

Lingireddy, S. &Ormbee, L.E. (2002). « Hydraulique Network Calibration Using Genetique Optimisation ». Civil Engineering and enviromental systems, Vol. 19-1, pp.13-39.

Liratni, M. (2001). « Guide méthodologique pour le diagnostic des réseaux de distribution d'eau potable ». 99 pages.

Liong, S. &Atiquzzaman, M., (2004). « Optimal Design Of Water Distribution Network UsingShuffledComplex Evolution».Journal of the institution of engineers, Singapore, Vol. 44 Issue 1, pp 93-107

Martínez, F.&Bartolín, H. & Bou, V. &Ayllón, M.A., (2004). « Calibration of valve-driven water distribution systems using jointly gis and genetic algorithms application to the wds of valencia ».REDHISP Group.Polytechnic University of Valencia,Spain, 18 pages.

Maskit, M. &Ostfeld, A. (2014). « Leakage calibration of water distribution networks ; 16 th conference on water distribution system analysis (WDSA). Procedia Engineering 89, Page 664 – 671.

Merzouk,N.(2005). « Méthodologie de détection et de localisation des fuites dans un réseau d'eau potable dans les petites et moyennes collectivités. Proposition de deux modèles de localisation. Thèse de doctorat à l'université d'Artois. Spécialité génie civil.180 page

Misirdali, M. (2003).« A methodology for calculating hydraulic system reliability of water distribution networks».Thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences .The Middle East Technical University .pp106.

Motiee, H. &Mcbean, E. &Motiei, A., (2007).« Estimating physical unaccounted for water (UFW) in distribution networks using simulation models and GIS». Urban Water Journal, Vol 4:1,pp 43-52.

BIBLIOGRAPHIE

Nafi, A., (2006). « La programmation pluriannuelle du renouvellement des réseaux d'eau potable ». Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur, Strasbourg I, 232 pages.

Nicolini, M. & Giacomello, C. & Deb, K., (2011). « Calibration and Optimal Leakage Management for a Real Water Distribution Network ». Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 137, N°1, pp. 134-142.

Nicolini, M., (2011). « A methodology for monitoring and leakage reduction in water distribution systems ». Water Utility Journal, pp. 23-33.

Nouiri, I. & Lebdi, F., (2006). « Algorithme Génétique (AG) pour le choix optimal des stations d'appoint de chlore sur les réseaux d'eau potable ». Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, Vol. 19, n° 1, pp. 47-55.

Obaid, B., (2013). « Sustainable Improvement of Water Networks To achieve best decisions for rehabilitation plans using advanced GIS and statistical techniques ». Thèse de doctorat, université Johannes Gutenberg, 201 pages.

Ojo, O. & Oluwatope, A. & Oke, A. & Aderounmu, A., (2012). « Fuzzy-Based Simulation Model to Predict Flow Rate in Water Distribution Network System ». Springer-Verlag Berlin Heidelberg, CCIS 285, pp. 315–324,

Ormsbee, L. & Lingireddy, S., (1997). « Calibrating Hydraulic Network Models ». Journal of the American Water Works Association, Vol. 89, N° 2, pp 42-50.

Pasha, F., (2006). « Uncertainty Analysis And Calibration Of Water Distribution Quality Models ». Doctor of philosophy with a major in civil engineering, the university of Arizona, 221 pages.

Paola, F. & Giugni, M., (2012). « Leakages and pressure relation: an experimental research ». Drink Water Engineering and Science, Vol. 5 pp. 59–65.

Poinard, D. & Le Gauffre, P. & Laffrèchine, K. & Haidar, H., (2005). « Modélisation du vieillissement des réseaux d'eau potable ». Revue Européenne de Génie Civil, Vol. 9:3, pp 415-428.

Poulakis, Z. & Valougeorgis, D. & Papadimitriou, C., (2003). « Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework ». Probabilistic Engineering Mechanics, pp. 315–327.

Preis, A. & Allen, M. & Whittle, A., (2010). « On-Line Hydraulic Modeling of a Water Distribution System in Singapore ». Water Distribution Systems Analysis. American Society of Civil Engineers, 12 pages.

Preis, A. & Allen, M. E. & Whittle, A., (2011). « Efficient Hydraulic State Estimation Technique Using Reduced Models of Urban Water ». Networks Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 137, N°4, pp. 343-351.

BIBLIOGRAPHIE

- Rosich, A. & Puig, V.**, (2013). « Model-based Leakage Localization in Drinking Water Distribution Networks using Structured Residuals ». European Control Conference (ECC) 17-19, Zürich, Switzerland, pp. 410-415.
- Rossman, L.** (2003). « Manuel de l'utilisateur d'Epanet 2.0 – version française, 222 pages.
- Røstum, J.** (2000). « Statistical modelling of pipe failures in water networks ». PhD thesis, 2000:12, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. ISBN 82-7984-033-8, 132 pages.
- Savic, D. & Walters, G.**, (1995c). « Genetic Algorithm Techniques for Calibrating Network Models ». Report N° 95/12, Centre for Systems and Control Engineering, University of Exeter, 41 pages.
- Savic, D. & Walters, G.**, (1997). « Evolving sustainable water networks ». Hydrological Sciences Journal, Vol. 42:4, pp. 549-564.
- Savic, D. & Kapelan, Z. & Jonkergouw, P.**, (2009). « Quo vadis water distribution model calibration? ». Urban Water Journal, Vol. 6:1, pp. 3-22.
- Shau, H. & Lin, B. & Huang, W.**, (2005). « Genetic Algorithms For Design Of Pipe Network Systems ». Journal of Marine Science and Technology, Vol. 13, No. 2, pp. 116-124.
- Spiliotis, M. & Tsakiris, G.** (2012). « Water distribution network analysis under fuzzy demands ». Civil Engineering and Environmental Systems, Vol. 29:2, pp. 107-122.
- Sumer, D. & Lansey, K.**, (2009). « Water Distribution System Calibration And Assessment For Alternative Modeling Objectives ». Urban Water Journal, Vol. 6, Issue 4, pages 265-277.
- Tabesh, M. & Asadiyani Yekta, A. & Burrows, R.**, (2009). « An Integrated Model to Evaluate Losses in Water Distribution Systems ». Water Resource Manage, Vol. 23, pp. 477-492.
- Tabesh, M. & Moeini R.**, (2011). « Calibration of water distribution hydraulic models: A comparison between pressure dependent and demand driven analyses ». Urban Water Journal, Volume 8, N° 2, pp. S93-102.
- Todini, E.**, (2000). « Looped water distribution network design using a resilience index based heuristic approach ». Urban Water, Vol. N°2, pp. 115-122.
- Ulanicki, B. & Bounds, P. & Rance, J. & Reynolds, L.**, (2000). « Open and closed loop pressure control for leakage reduction ». Urban Water Journal, 10 pages.
- Vaillancourt, O.**, (2009). « Introduction aux algorithmes génétiques ». 48 pages.
- Vítkovský, J. & Simpson, A. & Lambert, M.**, (2000). « Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms ». Journal of Water Resources, planning and Management, Vol. 126(4), pp. 262-265.

BIBLIOGRAPHIE

Walski, T.&Defrank, N.&Voglino, T. & et Wood, R. &Whitman, E.,(2006).«Determining the Accuracy of Automated Calibration of Pipe Network Models ».8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA, 18 pages.

Wu, Z. &Walski, W.T.&Mankowski,R. & Herrin, G. &Gurrieri, R.&Tryby, M.,(2002). « Calibrating water distribution model via genetic algorithms ». AWWA IMTech Conference, April 14-17, Kansas City, Missouri, USA, 10 pages.

Wu, Z. &Walski, T., (2005).« Diagnosing error prone application of optimal model calibration».International Conference of Computing and Control in the Water Industry, Sept.,Exeter, UK, 7 pages.

Wu, Z., (2006).«Optimal Calibration Method for Water Distribution Water Quality Model ».Journal of Environmental Science and Health, Part A, Vol. 41:1,16pages.

Wu, Z. & Sage, P., (2006).«Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration ».ASCE 8th Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis, Cincinnati, Ohio, USA,11 pages.

Wu, Z. &Clark, C. (2009).«Evolving Effective Hydraulic Model for Municipal Water Systems». Water Resource Manage, Vol.2,pp. 117 – 136.

Zhiqiang, Y.&Yimei, T. & Zheng,Y.& Xinhua, Z. (2009).« Calibration of Pipe Roughness Coefficient Based on Manning Formula and Genetic Algorithm». Tianjin University and Springer-Verlag, pp.452-459.

ملخص

النماذج الهيدروليكية للإمداد بمياه الشرب أصبحت تستخدم بشكل متزايد عند مسيري المياه و المخططين والاستشاريين. لجعل النماذج الهيدروليكية مفيدة وفعالة يشترط أن يعدل قبل استخدامها. محاكاة شبكة المياه تستلزم ضبط بعض المعلمات الشبكة التشغيلية والمادية. الهدف تحقيق تقريب معقول بين الضغوط ومعدلات تدفق المحسوبة والمقاسة في الشبكة.

مهمة محاكاة النماذج الهيدروليكية مهمة ثقيلة جداً لمصممي النماذج، التغيير اليدوي (الإستهلاك، غلاظة الماء، معامل قناة شكة لمياه...) عملية الضبط المتعاقبة لمعرفة تأثير هذه التغييرات تستغرق وقتاً وقد لا تصل إلى صانع الهدف في وقت أمثل. وفي الواقع، في أغلب الأحيان النماذج الهيدروليكية ليست مضبوطة جيداً.

ولذلك المثير لتطوير أداة إجراء التغييرات الضرورية على الوجه أمثل، وإطلاق عدد كبير من عمليات الضبط أيضاً في الوقت الأمثل لمستخدمي النماذج الهيدروليكية. يمكن اقتران المحاكاة الهيدروليكية مع خوارزميات التحسين ولذلك جعل مهمة الضبط أكثر كفاءة وأقل مملّة.

إن هدفنا في هذه المذكرة عمل برنامج من متلاب، يسمح قبل وبعد إدخال نموذج هيدروليكي مع قياسات الضغط والتدفق، ضبط معلمات مختلفة من الشبكة. الخوارزميات المستعملة لتحسين قيم هذه المعلمات تكون الخوارزميات الجينية. الحاسبة الهيدروليكية المستخدمة ستكون المتلاب. و الاقتران مضمون من قبل المكتبة الوظيفية "أبنت تولكيت".

كلمات البحث : الخوارزميات الجينية، ضبط، الأبنت، المتلاب، نموذج هيدروليكي، خصائص الضبط، شبكة مياه الشرب.

Résumé :

Les modèles hydrauliques des réseaux d'alimentation en eau potable sont de plus en plus utilisés par les gestionnaires de services d'eau, les planificateurs, les consultants ... Pour rendre les modèles hydrauliques utiles et performants, il est nécessaire qu'ils soient calés avant d'être utilisés. Le processus de calage d'un modèle hydraulique consiste à ajuster certains paramètres opérationnels et physiques du réseau. L'objectif étant de réaliser un rapprochement raisonnable entre les pressions et les débits calculés et mesurés dans le réseau.

La tâche de calage d'un modèle hydraulique est une tâche très lourde pour le modélisateur, la modification manuelle des paramètres de calage (consommations aux nœuds, rugosités des conduites, états des vannes...) et les simulations successives pour voir l'impact de ces modifications prennent énormément de temps et le modélisateur peut ne pas atteindre son objectif dans un temps optimal. En effet, le plus souvent les modèles hydrauliques ne sont pas parfaitement calés.

L'élaboration d'un outil permettant d'effectuer les modifications nécessaires de façon optimale et de lancer un nombre important de simulations aussi en un temps optimal s'avère donc intéressante pour les utilisateurs des modèles hydrauliques. Le couplage des simulateurs hydrauliques avec des algorithmes d'optimisation peut donc rendre la tâche de calage plus performante et moins fastidieuse.

L'objectif de ce mémoire est donc de construire un outil sous MATLAB permettant, en ayant en entrée un modèle hydraulique avec des mesures de pressions et de débits, d'ajuster les différents paramètres du réseau. Les algorithmes utilisés pour l'optimisation des valeurs de ces paramètres seront les algorithmes génétiques. Le calculateur hydraulique utilisé est EPANET et le couplage est assuré par la bibliothèque de fonctions « *EPANET tool-kit programmer* »

Mots clés : Algorithmes Génétiques, Calage, EPANET, MATLAB, Modèle hydraulique, Paramètres de calage, Réseaux d'AEP.

Abstract :

Hydraulic models of drinking water supply networks have become increasingly used by water managers, planners, consultants... to make the hydraulic models useful and efficient, it is necessary that they be calibrated before being used. The timing of a hydraulic model process to adjust certain operational and physical network parameters. The objective is to achieve a reasonable approximation between pressures and flow rates calculated and measured in the network.

The spot of calibration of a hydraulic model is a very heavy spot for the modelisator, the manual modification of the parameters (consumption to the nodes, roughnesses of the conduits, states of the valves...) and successive simulations to see the impact as of these modifications enormously take time and the modelisator can not reach are objective in an optimal time. Indeed, generally the hydraulic models are not calibrated perfectly

Making a tool it possible to carry out the modifications necessary in an optimal way and to also launch a significant number of simulations in an optimal time thus proves interesting for the users of the hydraulic models. The coupling of the hydraulic simulators with algorithms of optimization can thus make the spot calibrate more powerful and less tiresome.

The objective being thus to build a tool under allowing MATLAB, by having in entry a hydraulic model with measurements of pressures and flows, to adjust the various parameters of the network. The algorithms used for the optimization of the values of these parameters will be the genetic algorithms. The hydraulic calculator used will be EPANET and the coupling will be ensured by the library of functions « *EPANET tool-kit to program* ».

Keywords: Calibrating, calibrating parameters, Epanet, hydraulic model, Genetic algorithms, Matlab, Water distribution systems.