

Higher National School of Hydraulic

The Library

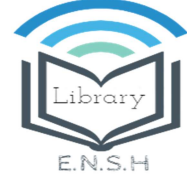
Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Calage des réseaux d'AEP via les algorithmes génétiques  
application sur le réseau de Mohammadia (w. Alger).

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0003-14

APA Citation ( APA توثيق ):

Khedimallah, Abderrahmane (2014). Calage des réseaux d'AEP via les algorithmes  
génétiques application sur le réseau de Mohammadia (w. Alger)[Thèse de master, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات، الدوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI Abdellah-

DEPARTEMENT HYDRAULIQUE URBAINE

## MEMOIRE DE MASTER

*En vue de l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique*

**Option: Systèmes d'Alimentation en Eau Potable**

**THEME DU PROJET :**

**CALAGE DES RESEAUX D'AEP VIA LES ALGORITHMES  
GENETIQUES  
APPLICATION SUR LE RESEAU DE MOHAMMADIA(W.ALGER)**

**PRESENTE PAR :**

M<sup>r</sup> KHEDIMALLAH ABDERRAHMANE

**Devant les membres du jury**

<b>Nom et Prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
M <sup>me</sup> B.TOUAIBIA	Professeur	Présidente
M <sup>r</sup> M.K MIHOUBI	M.C.A	Examinateur
M <sup>me</sup> D.DJODAR	M.A.A	Examinatrice
M <sup>me</sup> N.SAIL	M.A.A	Examinatrice
M <sup>r</sup> M.HASSANE	M.C.B	Promoteur

**Juin - 2014**

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*Avant tout à mes chers parents SALIMA et ALI, Qui m'ont soutenu  
durant toutes ces années de formation.*

*A mes sœurs IBTISSEM et RANIA mes frères BORHANE, CHOVAIB  
et les enfants de ma sœur  
MOATEZ et FADI.*

*A toute la famille KHEDIMALLAH,  
BOUKHALFA,  
TOUMI.*

*A tous mes amis sans exception et d'une façon spéciale a : Hatem,  
Rida, Abdelaziz, Mostafa, Maroine, Abderrezak,  
Rida, Sadik, yacine, Oussama, Fatah.*

**Abderrahmane Khedimallah**



# Remerciements

*Avant tout, je remercie le bon Dieu qui a illuminé mon chemin et qui m'a donné la force, ainsi que la bonne volonté pour achever le cursus universitaire et ce modeste travail.*

*Je tiens en premier lieu à exprimer ma profonde gratitude à mes promoteurs Monsieur HASSANE MOUHAMED et YOUNES BOUNAH pour leur aide, leur conseils instructifs et précieux, leur confiance, leur encouragements et qui ont bien voulu m'encadrer pour l'élaboration et le suivi de ce projet de fin d'étude.*

*Je remercie Madame B.TOUAIBIA, Monsieur M.K MIHOUBI, M.M BOUKHELIFA, M.A ZEROIL pour leurs conseils ainsi que pour leurs disponibilités à chaque fois que je les sollicite.*

*Je profite de l'occasion pour remercier tous mes enseignants de l'ENSH de la première année jusqu'à maintenant.*

*Je tiens aussi à exprimer mes vifs remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de mon travail.*

*Mon respect aux membres du jury qui me feront l'honneur d'examiner mon travail: Monsieur M.K MIHOUBI, Madame B.TOUAIBIA, D.DJOUVAR et N.SAIL*

**Abderrahmane Khedimallah**



# TABLE DES MATIERES

## Chapitre I : MODELISATION DES RESEAUX D'AEP

Introduction .....	1
I.1 Méthodes utilisées .....	2
I.1.1 Méthode de HARDY CROSS .....	2
I. 1.1.1 Méthode des mailles : .....	2
I.1.1.2 Méthode des nœuds : .....	2
I.1.1.3 Commentaires.....	2
I.1.2 Méthode de linéarisation de l'équation de perte de charge.....	3
I.1.2.1 Principe.....	3
I.1.2.2 Commentaires.....	3
I.1.3 Méthode de NEWTON RAPHSON .....	3
I.1.3.1 Principe : .....	3
I.1.3.2 Méthode des mailles .....	4
I.1.3.3 Méthode des nœuds .....	4
I.1.3.4 Commentaires.....	4
I.2 Méthodes optimisation .....	5
I.2.1 Recherche locale et recherche globale .....	5
I.2.2 Quelques méthodes classiques d'optimisation locale. ....	5
a) Méthodes des conduites équivalentes .....	5
b) Méthode des longueurs équivalentes.....	6
c) Méthode des diamètres équivalents de DEB et SARKAR .....	7
d) Méthode de Featherston et El Jumaily .....	8
e) Méthode de l'arbre minimal Laby (1963) .....	9
f) Méthodes Basées sur la Programmation mathématique.....	10
g) Méthode de Morgan et Goulter (1985) .....	10
h) Méthodes primales .....	10
i) Méthode de Alperovits et Shamir .....	11
j) Méthodes de programmation non linéaire utilisant la notion de dualité .....	11
k) Méthode de Jacoby (1968) : .....	11
l) Méthode de LANSEY et MAYS .....	12
I.2.3 Les méthodes d'optimisation globale.....	12
I.2.3.1 Classification des méthodes d'optimisation globale.....	12
I.2.3.2 Principe d'un algorithme stochastique d'optimisation globale.....	14
I.2.3.3 Les principaux métaheuristiques modernes.....	15
II.2.3.4 La méthode de recherche tabou .....	15

I.2.3.5 Les algorithmes génétiques .....	16
Conclusion.....	16

## **Chapitre II : Construction des modèles hydrauliques des réseaux d'AEP**

Introduction.....	17
II. La modélisation hydraulique du réseau AEP .....	17
II.1 Modèle pour le dimensionnement du réseau .....	17
a) Modèle pour l'analyse du fonctionnement hydraulique et diagnostic .....	17
b) Modèle pour la gestion du réseau .....	18
c) Modèle pour la mesure de la qualité de l'eau .....	18
II.1.2 Précision du modèle et représentation du réseau AEP .....	18
II.1.3 Présentation de l'interface du Logiciel EPANET .....	19
II.1.4 Présentation de la barre d'outils.....	20
II.2 Les étapes de la modélisation d'un réseau d'AEP.....	20
II.2.1 La collecte des données.....	20
II.2.2 Schématisation du réseau (selon EPANET).....	21
II.2.3 La repartition des demandes .....	26
II.2.4 Détermination des coefficients de rugosité des conduites .....	28
II.2.5 Le calage de modèle.....	28
Conclusion .....	29

## **Chapitre III : Calage des modèles hydrauliques des réseaux d'AEP**

Introduction.....	30
III. Le Calage .....	30
III.1 Le but du calage des modèles hydrauliques des réseaux d'AEP.....	30
III.2 La méthodologie de calage des modèles de réseaux d'AEP .....	31
III.2.1 Le calage en volume .....	31
III.2.2 Le calage en niveaux .....	31
III.2.3 Le calage en pression.....	32
III.3 Le choix de la période de mesure.....	32
III.4 Les différents modèles (approches) de calage .....	33
III.4.1 Les modèles itératifs .....	33
III.4.2 Les modèles explicites (ou modèles hydrauliques de simulation) .....	33
III.4.3 Les modèles implicites (ou modèles d'optimisation) .....	34
Conclusion .....	35

## Chapitre IV : Les Algorithmes génétiques

Introduction.....	36
IV.1 Historique.....	36
IV.2.Principes généraux .....	38
IV.3 Description détaillée .....	39
IV.3.1 Génération de la population initiale et codage des individus.....	39
IV.3.1.1 Codage binaire.....	40
IV.3.1.2 Codage réel.....	40
IV.3.1.3 Codage de Gray.....	40
IV.3.2 La sélection des individus.....	41
IV.3.2.1 La sélection par tournoi.....	41
IV.3.2.2 La sélection par roulette .....	41
IV.3.2.3 La sélection par rang .....	41
IV.3.3 L'opération de croisement .....	41
IV.3.3.1 Opération de croisement simple .....	42
IV.3.3.2 Opération de croisement uniforme .....	42
IV.3.4 L'opération de mutation.....	43
IV.4 Fonctionnement des algorithmes génétiques .....	43
IV.5 Domaines d'application .....	44
IV.5.1 Algorithmes génétiques dans le domaine de l'eau .....	44
Conclusion .....	45

## Chapitre V : Méthodologie et conception de l'outil

Introduction.....	46
V.1 Présentation d'EN2Toolkit .....	46
V.1.1 Les fonctions de EN2Toolkit .....	47
V.2 Formulation du problème.....	47
V.2.1 Les hypothèses.....	47
V.2.2 Formulation de la fonction fitness .....	48
V.2.3 La contrainte .....	48
V.2.4 La formulation de la fonction fitness .....	49
V.3 Description du programme.....	49
V.3.1 Les données d'entrées .....	49
V.3.2 Les fonctions.....	50
V.3.3 Processus d'optimisation par les algorithmes génétiques .....	50
V.3.4 Les paramètres de sortie.....	51
V.3.5 L'organigramme Du Principe .....	51

Conclusion .....	52
------------------	----

## **Chapitre VI : Application et interprétation des résultats**

Introduction.....	53
VI.1 Présentation de la zone d'étude et le Réseau d'AEP de la Ville de mohammadia .....	53
VI.2 Positionnement des points de mesure .....	53
VI.2.1 ville mohammadia.....	53
VI.3 Situation initial (avant le calage) .....	54
VI.3.1 Réseau Mohammadia.....	54
VI.4 Résultats obtenus après le calage.....	57
VI.4.1 Les résultats obtenus pour le reseau Mohammadia.....	57
VI.4.1.1 <i>L' evolution de la fonction fitness</i> .....	57
VI.4.1.2 <i>Résultats de calage</i> .....	58
VI.5 Analyse et interprétation des résultats .....	60
VI.5.1 reseau Mohammadia .....	61
Conclusion .....	62



## **LISTE DES TABLEAUX**

**Tableau VI.1** : Moyennes et écarts type des différences entre les pressions mesurées et simulées...56

**Tableau VI.2** : Ecart types et les erreurs moyennes des pressions des points de mesures.....60

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **Chapitre VI : Application et interprétation des résultats**

<b>Tableau VI.1</b> : Moyennes et écarts type des différences entre les pressions mesurées et simulées...	56
<b>Tableau VI.2</b> : Ecart types et les erreurs moyennes des pressions des points de mesures.....	60

## **LISTE DES FIGURES**

### **Chapitre I : MODELISATION DES RESEAUX D’AEP**

<b>Figure I.1</b> Courbe de variation du rapport de charges en fonction de la longueur .....	9
--	---

### **Chapitre II : Construction des modèles hydrauliques des réseaux d’AEP**

<b>Figure II.1</b> : Modélisation du réseau AEP : prise en compte de l’aspect hydraulique et structurelle. .	19
<b>Figure II.2</b> :Exemple de la barre d’outils Epanet. ....	20
<b>Figure II.3</b> :Composantes physiques d’un système de distribution d’eau.....	22
<b>Figure II.4</b> :Exemple de courbe de consommation journalière. ....	25
<b>Figure II.5</b> :Les surfaces nodales.....	27
<b>Figure II.6</b> :Les immeubles servis par les nœuds correspondants.....	28

### **Chapitre IV : Les Algorithmes génétiques**

<b>Figure IV.1</b> : Les principales étapes d’un algorithme génétique .....	39
<b>Figure IV.2</b> :Exemple d’un codage binaire.....	40
<b>Figure IV.3</b> :Exemple d’un codage réel.....	40
<b>Figure IV.4</b> :Procédure de croisement dans le cas d’un codage binaire.....	42
<b>Figure IV.5</b> :Procédure de croisement uniforme dans le cas d’un codage entier. ....	43
<b>Figure IV.6</b> :Opération de mutation .....	43

### **Chapitre V : Méthodologie et conception de l’outil**

<b>Figure V.1</b> :L’organigramme du principe de fonctionnement.....	51
--	----

## Chapitre VI : Application et interprétation des résultats

<b>Figure VI.2 :</b> Positionnement des points de mesure de reseau Mohammadia .....	54
<b>Figure VI.3 :</b> Variations des pressions mesurées et simulées du nœud 80 .....	54
<b>Figure VI.4 :</b> Variations des pressions mesurées et simulées du nœud 57 .....	54
<b>Figure VI.5 :</b> Variations des pressions mesurées et simulées du nœud 6 .....	55
<b>Figure VI.6 :</b> Variations des pressions mesurées et simulées du nœud 41 .....	55
<b>Figure VI.7 :</b> Variations des pressions mesurées et simulées du nœud 47 .....	55
<b>Figure VI.8 :</b> Variations des pressions mesurées et simulées du nœud 48 .....	55
<b>Figure VI.9 :</b> Corrélation entre les pressions simulées et les pressions mesurées avant le calage. ....	57
<b>Figure VI.10 :</b> L'évolution de la fonction fitness au cours de calage de modèle de réseau Mahammadia.....	58
<b>Figure VI.11 :</b> Variation des pressions apres le calage.....	59
<b>Figure VI.12 :</b> Corrélation les pressions simulées et mesurées après le calage de modèle de mohammadia .....	60
<b>Figure VI.13 :</b> Localisation des points qui présentent une augmentation remarquable de base.....	61
<b>Figure VI.14 :</b> coefficients de rugosité sur l'ensemble des conduites de reseau mohammadia.....	62
<b>Figure VI.15 :</b> reparation des coefficients de perte de charge singuliere pour l'ensemble des conduites de reseau mohammadia.....	62

## ملخص

الأداة التي نقترحها تعتمد على مبدأ دمج برنامج الحساب Matlab مع برنامج المحاكاة الهيدروليكي Epanet . وهذا الاقتراح مضمون بواسطة مكتبة الربط الديناميكية (DLL) الذي يسمح لنا بالدخول إلى معالم النموذج الهيدروليكي Epanet من برنامج حساب Matlab، كما تقدم هذه المكتبة القدرة على تشغيل المحاكاة الهيدروليكية، وكذلك التعديلات على معالم النموذج الهيدروليكي في حين تبقى على Matlab. من هناك، قمنا بتطوير برنامج في Matlab يقوم بالوصول إلى نموذج الهيدروليكية وبإجراء تغييرات على معالم المعايرة من خلال الخوارزميات الجينية.

هذه التغييرات هي في الواقع إعادة إحداث معايير جديدة والتي تكون مشروطة من قبل دالة الهدف (التي يجب أن تكون صغيرة قدر الإمكان) والقيود الخطية، وتستمر عملية إعادة الإحداث حتى تتكيف معالم المعايرة مع البيئة الجديدة للنموذج الذي يتم توفيرها من قبل بيانات القياس التي تم حقتها في هذا البرنامج. وعليه، فإننا نحصل على نموذج معايرة مضبوط مع القيم المحاكاة يتزامن مع القيم المقاسة، مع هامش خطأ مسموح به.

إن استخدام نموذج غير مطابق لا يعتبر من الممارسات الهندسية الجيدة، لأنه سوف يؤدي بدون شك إلى نتائج غير دقيقة، والتي تؤدي إلى قرارات سيئة.

**كلمات دلالية:** نموذج هيدروليكي، Epanet، Matlab، ضبط، مكتبة الارتباط الحيوي، خوارزمية وراثية، ضبط.

## Resumé

L'outil que nous proposons se base sur le principe de couplage du logiciel de calcul Matlab avec le logiciel de simulation hydraulique Epanet. Ce couplage est assuré par le biais de la bibliothèque de liens dynamiques (DLL) qui nous permet d'accéder aux paramètres du modèle hydraulique sous Epanet à partir du logiciel de calcul Matlab. Cette bibliothèque nous offre aussi la possibilité de lancer des simulations hydrauliques ainsi que d'apporter des modifications aux paramètres du modèle hydraulique tout en restant sur Matlab. A partir de là, nous avons 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. Ainsi, nous obtenons un modèle calé dont les valeurs simulées vont coïncider avec les valeurs mesurées avec une marge d'erreur tolérée.

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 engendreront de mauvaises décisions.

**Mots clés :** Modèle hydraulique, Epanet, Matlab, bibliothèque de liens dynamiques, algorithmes génétiques, calage.

## Abstract

The tool we have proposed is based on the principle of coupling calculation software with Matlab software simulation hydraulic Epanet. This coupling is provided through the dynamic link library (DLL) that allows us to access the parameters of the hydraulic model in Epanet from calculation software Matlab. The library also offers us the opportunity to launch hydraulic simulations and those changes to the hydraulic model parameters while remaining on Matlab. From there, we developed a program in Matlab that accesses the hydraulic model and makes changes to the calibration parameters through genetic algorithms.

These changes are in effect a regeneration of new parameters that are conditioned by the objective function (which must be as small as possible) and the linear constraint, this regeneration is continued until the calibration parameters adapt to the new environment the model that is provided by the measurement data injected into the program. And thus a calibrated model with simulated values will coincide with the values measured with a permissible error margin is obtained.

The use of a non-calibrated model is not good engineering practice, since it will undoubtedly lead to inaccurate results that cause bad decisions.

**Keywords:** hydraulic model, Epanet , Matlab , dynamic link library, genetic algorithms, the calibration.

## INTRODUCTION GENERALE

L'eau est devenue un facteur primordial pour le développement durable dans tous les secteurs économiques et sociaux. Le renforcement des ressources en eau et leur affectation optimale faciliteront les conditions de satisfaction des besoins de cette ressource vitale.

Les abonnés des entreprises de distribution d'eau attendent de celles-ci d'être alimentés en eau potable. Les livraisons en eau doivent couvrir les besoins individuels des abonnés et le prix doit être raisonnable. Un réseau de distribution d'eau potable est le moyen par lequel cette ressource est acheminée.

Le but principal de chaque système de distribution est de fournir l'eau aux consommateurs quand il est nécessaire, avec la quantité requise et la qualité appropriée.

Evidemment, un modèle mathématique qui peut simuler le comportement du réseau d'AEP aussi étroitement que possible est d'une grande importance pour chaque autorité de gestion des réseaux d'AEP.

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 nous basant sur une approche d'optimisation par les algorithmes génétiques 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.

Dans le chapitre I, nous présentons les différents modèles mathématiques utilisés dans l'analyse des réseaux d'AEP et les modèles d'optimisation, leurs intérêts et leurs limites d'application.

Dans le chapitre II : nous montrons les différentes utilisations des modèles de réseaux d'AEP ainsi que les étapes et la méthodologie suivie pour les construire.

Dans le chapitre III : nous allons voir le calage des modèles des réseaux d'AEP, la méthodologie de calage.

Dans le chapitre IV : Les algorithmes génétiques et leurs principes d'opération, ainsi que leurs applications dans le domaine de l'AEP.

En suite , Dans le chapitre V : nous montrons la méthodologie pour la conception de l'outil de calage . Ainsi qu'une description d'EN2Toolkit.

Enfin Dans le chapitre VI : nous présentons une application de l'outil de calage pour un réseau de distribution de la ville Mohammadia (w.Alger) suivie d'une interprétation des résultats obtenus et terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

**Modélisation des réseaux  
d'AEP**

**Introduction**

Durant les dernières décennies, beaucoup d'ingénieurs et chercheurs ont focalisé leurs attentions sur le développement des techniques de gestion et d'analyse des réseaux de distribution d'eau potable. Plusieurs modèles d'optimisation permettant de minimiser le coût total du réseau ont été ainsi développés, sans perte des performances requises.

A la fin du siècle dernier l'ingénieur Bresse a proposé une formule simple, utilisée comme approche préliminaire pour une estimation du diamètre en fonction du débit véhiculé, dans une conduite d'un réseau donné .Pendant les années cinquante, les études ont été orientées vers une généralisation du problème, par la recherche d'une solution économique pour l'ensemble du réseau. Développée par (Tong et Col ,1961), améliorée par (Raman ,1966) puis modifiée par (Deb et Sarkar ,1971), l'approche du réseau équivalent fut le pas initial dans l'optimisation des réseaux. Bien qu'elle souffre de rigueur et de justifications acceptables. Elle a été basée essentiellement sur la méthode de HARDY- CROSS comme modèle d'analyse.

D'autres approches ont été développées par la suite, fondées sur des bases mathématiques rigoureuses, en utilisant les techniques de la programmation mathématique et la théorie des graphes. Ces approches sont généralement très lourdes à mettre en œuvre, mais elles améliorent sensiblement la solution du problème d'optimisation des réseaux d'alimentation en eau potable. Ces dernières années, de nouvelles techniques utilisant les algorithmes évolutionnaire tel que les algorithmes génétiques ont été appliqués pour l'optimisation des réseaux de distribution d'eau.

C'est quoi un modèle mathématique ?

Les modèles mathématiques, d'une façon très générale, sont constitués:

- d'un ensemble de variables, choisies pour représenter l'objet étudié ;
- d'un ensemble de relations mathématiques entre ces variables, choisies pour représenter son fonctionnement.

Ces relations, qui doivent permettre de calculer les variables de sortie en fonction des variables d'entrée,font aussi intervenir d'autres paramètres. Cette imitation recouvre deux fonctions essentielles, complémentaires et indispensables :

- l'une de représentation simplifiée de la réalité, perçue d'un certain point de vue par le modélisateur à travers un filtre conceptuel : un modèle est donc une interprétation et non une simple reproduction,

- l'autre, d'instrument d'étude de cette réalité, conçu pour répondre à un certain objectif guidant l'ensemble des choix faits au cours de la modélisation : un modèle est donc aussi une représentation orientée et sélective.

**I.1 Méthodes utilisées**

**I.1.1 Méthode de HARDY CROSS**

**I. 1.1.1 Méthode des mailles :**

Le principe est de choisir, pour une distribution de diamètre initiale, une distribution des débits dans les tronçons du réseau, de manière à satisfaire l'équation de continuité aux nœuds (I.1), tout en vérifiant l'équation de conservation d'énergie pour chaque maille (I.2). Si celle-ci n'est pas vérifiée, une correction du débit ( $\Delta Q$ ) pour chaque maille est appliquée. (Belkacemi,2003)

Equation des nœuds  $\sum Q_{ij}+q_i=0$  (I.1)

Equation de mailles  $\sum J_i=0$  (I.2)

Avec:  $J_{ij}=R_{ij}Q_{ij}^\alpha$  (I.3)

L'expression de la correction ( $\Delta Q$ ) pour chaque maille est :

$$Q^{it} = \frac{\sum_{i=1}^n j_{ij}^{it}}{\alpha \sum_{i=1}^n \left(\frac{j_{ij}^{it}}{Q_{ij}^{it}}\right)} \quad (I.4)$$

Une fois la répartition des débits pour chaque tronçon est déterminée, une éventuelle correction sur les diamètres portant sur la vérification de la contrainte de vitesse est imposée. Le processus itératif s'arrête lorsque la contrainte de vitesse est vérifiée sur tous les tronçons du réseau.

**I.1.1.2 Méthode des nœuds :**

Une formulation analogue à celle présentée précédemment à été développée. Cette méthode dite «méthode des nœuds» consiste à choisir une distribution des charges aux nœuds, satisfaisant l'équation de mailles, tout en vérifiant l'équation des nœuds. Si elle n'est pas vérifiée, une correction de la charge est appliquée. L'expression de la correction ( $\Delta H$ ) pour un coefficient  $\alpha=2$  est :

$$H^{it} = \frac{2(\sum_{i=1}^n Q_{ij}^{it} +q_i)}{n \left(\frac{Q_{ij}^{it}}{j_{ij}^{it}}\right)} \quad (I.5)$$

**I.1.1.3 Commentaires**

La méthode de HARDY CROSS constitue le pas initial dans le dimensionnement des réseaux d'alimentation en eau potable. Néanmoins elle présente certains inconvénients:

- Pour la convergence du processus itératif, une distribution initiale des débits plus au moins proche de la solution est exigée. Ce qui justifie le nombre important d'itérations.
- Les expressions des corrections ( $\Delta Q$ ), ( $\Delta H$ ) correspondant respectivement aux méthodes des mailles et des nœuds, manquent de rigueur mathématique, ce qui influe sur la précision des résultats.
- Pour la méthode des mailles elle ne peut s'appliquer que dans le cas des réseaux maillés, contrairement à la méthode des nœuds qui peut être appliquée même sur des réseaux ramifiés.
- Elles ne peuvent s'appliquer que sur de nouveaux réseaux (réseaux neuf).



### I.1.2 Méthode de linéarisation de l'équation de perte de charge

#### I.1.2.1 Principe

Proposée par (Wood et Charles ,1972) reprise par (Lejeune et col ,1972), la méthode de linéarisation consiste à résoudre, par un processus itératif, un système d'équation linéaire composé des équations de continuité aux nœuds d'une part et des équations de mailles linéarité d'autre part. La linéarisation de la perte de charge par rapport au débit donne un aspect laminaire au régime d'écoulement.

Les équations de mailles (I.1, I.2) deviennent :

$$\text{Pour chaque maille} \quad \sum R_{ij} Q_{ij} = 0 \quad (I.6)$$

$$\text{Pour chaque nœud} \quad \sum Q_{ij} = q_i \quad (I.7)$$

Le problème revient donc à résoudre le système linéaire suivant :

$$AQ = B \quad (I.8)$$

A : une matrice composée de (m) lignes relatives aux équations de mailles (I.6), contenant les valeurs des résistances hydrauliques ( $R_{ij}$ ) des tronçons participant dans la maille, plus ( $n^2$ ) lignes relatives aux équations de continuité aux nœuds (I.7) portant des valeurs de  $\pm 1$  suivant le sens du débit.

B : un vecteur de m composantes nulles relatives aux équations de mailles, et ( $n^2$ ) composantes portant les valeurs ( $q_i$ )

La solution ( $Q_k$ ) obtenu à l'itérations (k)du système précédent, constitue un paramètre permettant la correction de la résistance ( $R_{ij}$ )<sub>k</sub> par une nouvelle valeur ( $R_{ij}$ )<sub>k+1</sub> tel que :

$$(R_{ij})_{k+1} = (R_{ij})_k (Q_{ij})_k \quad (I.9)$$

Un nouveau système linéaire à résoudre est ainsi formulé. Le processus itératif s'arrête lorsque la différence des débits obtenus entre deux itérations devient négligeable.

#### I.1.2.2 Commentaires

La linéarisation des équations de perte de charge simplifie énormément le problème, du fait qu'on se ramène à résoudre successivement des systèmes d'équations linéaires, mais l'hypothèse erronée d'un écoulement laminaire affecte la précision des résultats obtenus. Néanmoins, Cette méthode peut fournir une répartition initiale des débits pour les autres méthodes d'équilibrage.

### I.1.3 Méthode de NEWTON RAPHSON

#### I.1.3.1 Principe :

De point de vue mathématique, La méthode de NEWTON RAPHSON est une méthode d'optimisation d'un programme mathématique non linéaire sans contraintes, avec la fonction objective à minimiser représentée par l'expression d'équilibre énergétique sur l'ensemble des mailles, et les

débits comme variables de décisions. Ceci pour la méthode des mailles. Pour la méthode des nœuds, la fonction objective à minimiser est formulée à partir de l'équation de continuité aux nœuds, avec les charges aux nœuds comme variables de décision.

**I.1.3.2 Méthode des mailles**

La fonction objective est dans ce cas :

$$\text{Min}F(Q)=\sum R_{ij}Q^2_{ij} \tag{I. 10}$$

$R_{ij}$  : la résistance hydraulique de la conduite (ij).

Démarrant d'une répartition initiale des débits, le procédé de NEWTON RAPHSON, conduit à la résolution d'un système linéaire à chaque itération déterminant ainsi la correction du débit.

$$\Delta Q^k = J^{-1}F(Q^k) \tag{I. 11}$$

$J = F(Q^k)$  : est la matrice Jacobienne du système à l'itération  $k$ , dont les éléments sont composés de la dérivée de l'équation de perte de charge par rapport au débit. Le processus itératif s'arrête lorsque la correction ( $\Delta Q$ ) devient négligeable.

**I.1.3.3 Méthode des nœuds**

Le programme mathématique qui en découle consiste à minimiser sur l'ensemble des tronçons connectés à un nœud  $i$  la fonction suivante:

$$\text{Min} F(H_i) = \sum Q_{ij} + q_i = \sum R_{ij}^{-1/\alpha} (H_i - H_j)^{1/\alpha} + q_i \tag{I. 12}$$

$H_i, H_j$  : côtes piézométriques aux nœuds  $i$  et  $j$ .

Démarrant d'une répartition initiale des charges aux nœuds, le processus itératif commence. A chaque itération ( $k$ ) une correction ( $\Delta H^k$ ) sur les charges aux nœuds est apportée.

$$\Delta H^k = J^{-1}f(H^k) \tag{I.13}$$

$J = F(Q^k)$  : est la matrice jacobéenne du système à l'itération  $k$ , dont les éléments sont composés de la dérivée de l'équation de continuité par rapport à la charge aux nœuds. Le processus itératif s'arrête lorsque la correction ( $\Delta H$ ) devient négligeable.

**I.1.3.4 Commentaires**

En raison du fondement mathématique assez rigoureux de la méthode d'une part, et le développement des techniques numériques d'autre part, la méthode de Newton Raphson est la plus

susceptible pour mieux représenter le problème d'équilibrage. La méthode des nœuds est la plus suggérée pour traiter tous les cas de figure des réseaux qui se présentent (maillés ou ramifiés).

## I.2 Méthodes optimisation

### I.2.1 Recherche locale et recherche globale

Dans tout ce manuscrit, le terme "d'optimisation globale" fait référence à la recherche des optima globaux de la fonction objective. De ce point de vue, la méthode d'optimisation globale vise la détermination des optima globaux du problème, en évitant le piègeage dans l'un de ses optima locaux.

Cette dénomination présente néanmoins une certaine ambiguïté, car on rencontre souvent dans la littérature la dénomination de "méthode locale", qui fait cette fois référence au mécanisme de recherche, lorsqu'il procède par voisins successifs.

Ainsi, le recuit simulé est une méthode de **recherche locale** (la solution testée est une voisine de la solution courante), qui sera de notre point de vue une méthode **d'optimisation globale** (la méthode est en principe capable de déterminer les optima globaux de la fonction objective).

Nous pouvons partager les méthodes en deux catégories. Celles qui permettent de déterminer un minimum local, ces méthodes sont appelées méthodes locales, et celles qui s'efforcent de déterminer un optimum global, ces méthodes sont appelées méthodes de recherche globale.

Ces méthodes ne s'excluent pas mutuellement. Afin d'améliorer les performances d'une recherche, plusieurs auteurs (Glov,89) combinent les deux types d'algorithmes. Une recherche globale permet de bien explorer l'espace de recherche ; cette phase est appelée "diversification"; et une recherche locale permet de bien exploiter une "zone prometteuse"(susceptible de contenir un minimum global), localisée lors de l'exploration du domaine de recherche ; cette phase est appelée "intensification".

Nous présentons dans ce chapitre quelques méthodes classiques d'optimisation locale Puis nous décrivons trois métaheuristiques d'optimisation globale : le recuit simulé, la méthode de recherche tabou et les algorithmes génétiques.

### I.2.2 Quelques méthodes classiques d'optimisation locale.

Le principe d'une méthode d'optimisation locale est le suivant : à partir d'une solution de départ  $x_0$ , considérée temporairement comme étant la valeur minimale  $x_{min}$ , on engendre par transformations élémentaires une suite finie de voisins.

#### a) Méthodes des conduites équivalentes

Ces méthodes sont basées essentiellement sur la méthode de Hardy Cross comme modèle d'analyse. Elles consistent à remplacer le réseau réel, par un réseau fictif, dit équivalent, dont toutes les conduites portent un diamètre unique fixe, avec des longueurs inconnues.

Les longueurs « équivalentes » sont déterminées en résolvant le système d'équations non linéaire obtenu en annulant le gradient de la fonction coût.

**b) Méthode des longueurs équivalentes**

**b.1) Principe**

Développée initialement par Tong et Al, la longueur équivalente, est définie comme étant la longueur d'une conduite de diamètre égal à 200 mm, avec un coefficient de HAZEN- WILLIAMS CHW, égal à 100, et qui donne la même perte de charge que pour une conduite véhiculant le même débit, de diamètre  $D$  et de longueur  $L$ . (Shamir,1974)

$$Le = L \left( \frac{100}{CHW} \right)^{1.85} \left( \frac{200}{D} \right)^{4.86} \tag{I.14}$$

$Le$  : Longueur équivalente (m).

$L, D$  : Longueur et diamètre réels respectivement.

En introduisant l'équation (I.12) dans la formule de Hazen- William, on obtient la relation suivante :

$$Le = \frac{\Delta H}{0.19Q^{1.85}} \tag{I.15}$$

La condition de convergence qui en découle pour chaque maille :

$$\sum Le_i = 0 \tag{I.16}$$

$\sum Le_i$  = Ensemble du tronçon appartenant à la maille (mp).

Avec des contraintes à respecter pour chaque maille et chaque nœud :

$$\text{Pour chaque noeud } \sum Q = 0 \tag{I.17}$$

$$\text{Pour chaque maille } \sum \Delta H = 0 \tag{I.18}$$

Une correction sur les débits est effectuée à chaque fois que la condition (I.14) n'est pas satisfaite.

L'expression du facteur de correction pour une maille, peut être déduite après un calcul mathématique se basant sur la minimisation de la fonction comprenant la somme des longueurs équivalentes, afin de satisfaire la condition (I. 15). Soit :

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n Le_i}{1.85 \sum_{i=1}^n \left( \frac{Le_i}{Q_i} \right)} \tag{I.19}$$

Le calcul des diamètres optimaux pour chaque conduite, se fait à partir des valeurs des longueurs équivalentes obtenues, et en connaissant les longueurs et les coefficients de Hazen Williams réels.

$$Di = 200 \left( \frac{Li}{Le_i} \right)^{0.21} \left( \frac{100}{CHWi} \right)^{0.38} \tag{I.20}$$

Afin d'avoir une solution techniquement réalisable, il sera nécessaire d'adopter pour les diamètres commerciaux les plus proches des diamètres optimaux calculés.

Des modifications ont été apportées à cette méthode par V.Raman et S.Raman, faisant intervenir les débits dans l'expression de la condition de convergence ainsi que celle du facteur de correction.

La condition de convergence pour chaque maille devient :

$$M \frac{Le_i}{Q_i} = 0 \quad (I.21)$$

La valeur du facteur de correction, obtenue de la même manière que celle développée précédemment :

$$Q = \frac{\sum \frac{Le_i}{\Delta Q_i}}{2.85(\sum \frac{Le_i}{Q_i^2})} \quad (I.22)$$

Ces méthodes permettent de déterminer directement les dimensions à donner aux conduites, contrairement à la méthode de **HARDY CROSS** où les dimensions sont déterminées par essais successifs nécessitant un calcul hydraulique de tout le réseau à chaque essai.

Une des inconvénients de ces techniques, est qu'elles sont restreintes aux nouveaux réseaux composés d'un réservoir et d'un réseau maillé pour lequel l'eau s'écoule par gravité.

### c) Méthode des diamètres équivalents de DEB et SARKAR

#### c.1) Principe

Le diamètre équivalent est défini comme étant le diamètre d'une conduite de (100m) de longueur et de coefficient de Hazen-Williams égal à (100), et qui donne, pour un même débit, la même perte de charge que la conduite réelle.

$$De = D \left( \frac{CHW}{100} \right)^{0.381} \left( \frac{100}{L} \right)^{0.206} \quad (I.23)$$

De : Diamètre équivalent en (m).

D : Diamètre (m).

CHW : Coefficient de Hazen-Williams

L : Longueur de la conduite.

Après une introduction de cette équation dans la formule de Hazen-Williams, et une transformation de la fonction coût par introduction des multiplicateurs de Lagrange, Deb et Sarkar déterminent une fonction objective reliant le coût d'une conduite à sa longueur et son diamètre équivalent, soit :

$$C_{ci} = K(0.73)m \frac{Q_i^{0.381}}{\Delta H_i^{0.206m}} \quad (I.24)$$

Cci : Coût d'une conduite

m, k : Constantes

On cherche donc à minimiser pour chaque maille, le coût des conduites équivalentes qui composent le réseau, tout en respectant les charges et les consommations données aux nœuds. D'où la condition de convergence qui correspond à la dérivée nulle.

$$Q = \frac{A' - \sum (\frac{Dei}{Qi})^m}{(0.381m-1) \sum_i (\frac{Dei}{Qi^2})^m} \quad (I.25)$$

Avec :

$$(\frac{Dei}{Qi})^m = \frac{(\frac{dcc}{dQi})}{0.381mk} = A' \quad (I.26)$$

Le processus itératif est arrêté si la condition (I.23) est satisfaite, ce qui permet de déduire les valeurs des diamètres réels en fonction des conduites équivalentes.

$$Di = Dei (\frac{Li}{100})^{0.206} (\frac{100}{CHW})^{0.381} \quad (I.27)$$

### c.2) Commentaires

Bien que cette méthode propose une formule générale de la fonction coût, comprenant le coût des conduites, du réservoir ainsi que celui de la pompe d'adduction et de l'entretien, elle souffre de contradictions, du fait que la fonction coût est inversement proportionnelle aux longueurs des conduites, de même, La condition à satisfaire conduit à une maximisation du coût plutôt qu'à une minimisation, ce qui semble illogique.

## d) Méthode de Featherston et El Jumaily

### d.1) Principe

Cette méthode est basée sur un modèle de simulation pour le calcul hydraulique, et sur l'hypothèse que la solution la plus économique correspond à une perte de charge unitaire unique et constante sur tout le réseau, pour la correction des diamètres. Le processus itératif s'arrête lorsque la valeur de la fonction coût est minimale.

Dans les systèmes d'irrigation, WU (1975) a pu montrer que pour une conduite simple composée de tronçons de diamètres différents, amenant de l'eau à des conduites secondaires, la courbe de charge optimale entre le point d'entrée et le point de sortie de la conduite est une courbe concave qui donne au milieu de la conduite une charge inférieure de 15% à celle obtenue avec une ligne droite (voir Figure I.1) (Featerstone et als ,1983).

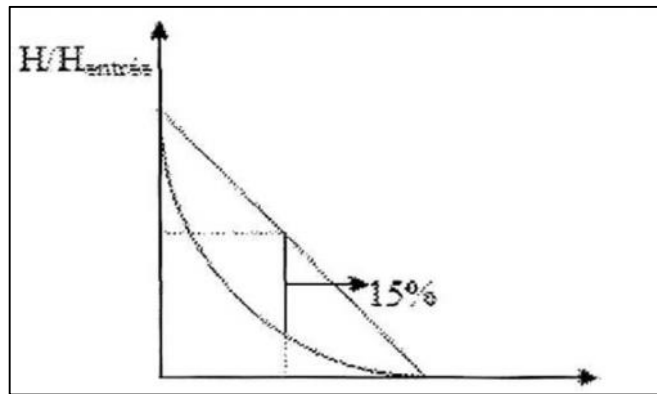


Figure I.1 : Courbe de variation du rapport de charges en fonction de la longueur

## d.2) Commentaires

La méthode développée par Featherston et El Jumaily, est applicable à des réseaux composés d'un réservoir alimenté par une pompe d'adduction et d'un réseau de conduites maillé ou ramifié.

## e) Méthode de l'arbre minimal

### e.1) Principe

Cette méthode profite du fait qu'une ossature principale ramifiée  $R'$  de longueur minimale est associée à un réseau maillé  $R$  dont les diamètres sont fixés, pour des appels aléatoires des débits aux nœuds. Elle tient en compte de l'incidence de la longueur sur les prix, ainsi que la nécessité d'introduire dans le calcul d'optimisation, les paramètres hydrauliques et économiques des tronçons fermant les mailles.

Théoriquement chaque sens de circulation est possible, et seul un tirage au hasard permet une approche de l'optimum. Ceci a conduit Laby d'envisager, dans le cas d'un seul réservoir une procédure de calcul qui s'est révélée efficace par confrontation avec les résultats fournis par les méthodes classiques.

Suite à une extraction d'un réseau ramifié  $R'$  de longueur minimale à partir du réseau global, une distribution des débits aux prises ( $Q_p$ ) est déterminée à partir de la méthode de Clément, basée sur la répartition probabiliste de l'ouverture des prises. Une optimisation de l'arbre est effectuée et qui consiste à minimiser une fonction coût du réseau ramifié, exprimée en fonction de la perte de charge, tout en respectant la pression minimale aux nœuds par une technique appropriée.

Plusieurs distributions de diamètres des tronçons maillants sont fixées.

A chacune d'entre elles, correspond une séquence d'optimisation, correspondent aux étapes suivantes.

1. Etant donnée une distribution de diamètres fixe, une procédure d'équilibrage est lancée en considérant des appels aléatoires aux nœuds. Une distribution de débits de tous les tronçons du réseau est ainsi obtenue.

2. Pour une distribution de débits fixe sur tout le réseau, une procédure d'optimisation est lancée. Elle consiste à minimiser une fonction coût tout en sachant les pressions minimales aux nœuds à ne pas dépasser. Une nouvelle distribution des diamètres est ainsi obtenue pour tous les tronçons, avec leurs longueurs respectives. (*Lebdi,1985*)

### **f) Méthodes Basées sur la Programmation mathématique**

#### **f.1) Méthodes heuristiques avec une programmation linéaire itérative**

Elles sont Basées sur la programmation linéaire comme modèle d'optimisation, et sur les méthodes heuristiques comme modèle de correction. Par faute de justifications valables des méthodes heuristiques, ces méthodes souffrent de rigueur et d'instabilité.

Parmi les travaux les plus significatifs dans cet axe d'investigation, ceux de Bhave et Morgan et Goulter.

#### **g) Méthode de Morgan et Goulter**

La procédure de résolution de la méthode de Goulter et Morgan est basée sur la décomposition du problème d'optimisation en deux sous problèmes. Le premier est un programme linéaire formulé dans l'hypothèse d'une répartition fixe des débits avec la taille des diamètres économiques les plus proches de la répartition des diamètres en cours comme variable de décision. Le deuxième est un problème d'équilibrage qui consiste à déterminer une nouvelle répartition des débits démarrant des résultats du premier problème.

Le processus itératif s'arrête lorsque les critères d'optimalité sont vérifiés.

Le programme linéaire qui en découle consiste à minimiser une fonction objective sujette aux contraintes de pression assurant une pression adéquate aux nœuds et aux contraintes de longueurs assurant que les longueurs remplacées ne dépassent pas les longueurs réelles des conduites.

Le modèle d'équilibrage consiste à déterminer la répartition des débits aux conduites à partir des résultats obtenus du programme linéaire.

Le processus itératif s'arrête lorsque le changement dans les dimensions des conduites devient négligeable.

La méthode est applicable à l'étude d'une nouvelle installation ainsi qu'au cas d'extension.

L'avantage majeur de cette méthode est que les contraintes hydrauliques pour chaque itération sont respectées. (*Morgan et al,1985*)

#### **h) Méthodes primales**

Dans cette catégorie de méthodes, le problème d'optimisation des réseaux de distribution est décomposé en deux sous programmes mathématiques. Un programme linéaire pour la sélection des



diamètres candidats, et un programme non linéaire pour l'exploitation des résultats obtenus. Elle englobe les travaux de plusieurs chercheurs., Alperovits et Shamir, Fujiwara et col.

**i) Méthode de Alperovits et Shamir**

Développée en premier lieu par U. Shamir en 1977, la méthode du gradient du programme linéaire (LPG) a reçu beaucoup d'intérêt ces dernières années et à fait l'objet de plusieurs publications apportant des critiques, modifications ou améliorations.

Le principe de base de la méthode du gradient du programme linéaire (LPG) est la décomposition et la résolution du problème d'optimisation des réseaux de distribution d'eau en deux étapes. La première étape consiste à formuler et résoudre un programme linéaire, découlant de l'hypothèse d'une répartition des débits fixe, par une technique d'optimisation linéaire appropriée. La deuxième étape consiste à formuler et résoudre un programme non linéaire avec contrainte transformée par la suite en un programme linéaire sans contraintes par le biais de la dualité lagrangienne.

Le programme qui en découle est résolu en utilisant la méthode du gradient projeté comme il à été proposé par (Alperovits et Shamir ,1977) ou par la méthode quasi-Newton comme il à été suggéré par (Fujiwara et Col ,1987).

**j) Méthodes de programmation non linéaire utilisant la notion de dualité**

Elles consistent à ramener le problème initial, à la résolution d'une suite de problèmes d'optimisation sans contraintes. Contrairement aux méthodes primales, les méthodes duales sont plus robustes et la convergence globale est souvent plus facile à obtenir, mais elles présentent l'inconvénient de ne fournir une solution primale réalisable qu'en fin de convergence. Nous citons à titre indicatif, les travaux de (Jacoby ,1968), (Shamir ,1974).

**k) Méthode de Jacoby****k.1) Principe**

Le Modèle proposé par Jacoby utilise comme variable de décision trois paramètres : Le diamètre, le débit ainsi que les pertes de charge.

Le programme mathématique qui en découle, consiste à minimiser une fonction objective comprenant le coût des conduites et celui des opérations de pompage, tout en respectant les contraintes physiques ainsi hydrauliques (bornes de la vitesse et la pression en chaque nœud).

Après une transformation par la dualité Lagrangienne du programme non linéaire avec contrainte, en un programme mathématique duale sans contraintes, le problème revient à minimiser une fonction objective exprimée en fonction de deux paramètres (débit, diamètre) ou (diamètre, perte de charge) soit:

$$F = \sum(k_1 d_i^3 + k_2 d_i^2 + k_3 d_i + k_4) + \frac{c_{pg} \Delta H_p \Delta t}{n_p} q_p + \sum_{j=1} a_j \left( \sum \frac{\Delta H_i d_i^5}{k_i} + q_j \right) + \sum_{k=1}^m b_k (\sum h_i)_i \quad (I.28)$$

$a_j$  et  $b_k$  : Des multiplicateurs de Lagrange

Cette méthode quoiqu'elle puisse être appliquée à de grands réseaux, elle présente l'inconvénient d'atteindre la convergence difficilement d'une part, et de générer une fonction objective non linéaire d'autre part.

### I) Méthode de LANSEY et MAYS

En 1990, Lansey et Mays ont présenté une nouvelle méthode d'optimisation des réseaux de distribution d'eau potable, utilisant un couplage des techniques de programmation non linéaire et des techniques de simulation. Lansey et Mays utilisent la méthode du gradient réduit généralisé, qui consiste à réduire la complexité du problème par la résolution implicite des équations de masse et d'énergie.

La formule générale du problème d'optimisation pour la conception du réseau de distribution d'eau pourra être déclarée mathématiquement en termes de pressions aux nœuds H et les divers paramètres de décision D.

Où les paramètres de décision D définissent la dimension pour chaque composante dans le système tel que le diamètre des conduites. (Lansey et al, 1989)

L'objectif est de : Minimiser le coût  $F(h, D)$

### I.2.3 Les méthodes d'optimisation globale.

#### I.2.3.1 Classification des méthodes d'optimisation globale.

Dans la littérature, les méthodes développées pour résoudre des problèmes d'optimisation globale sont réparties, selon les auteurs, en différentes classes . Pour Goldberg, selon les critères de robustesse, les méthodes d'optimisation sont subdivisées en trois types : les méthodes déterministes, les méthodes énumératives, et les méthodes stochastiques utilisant un processus aléatoire guidé.

$f$  est continue et dérivable en tout point du domaine  $S$  des solutions, ou  $f$  possède une constante de Lipchitz  $L$ , c'est-à-dire :

$$(x_1, x_2) \in X^2, |f(x_1) - f(x_2)| \leq L \|x_1 - x_2\| \quad (I.29)$$

Les méthodes déterministes se divisent en deux classes principales : les méthodes d'exploration directe et les méthodes d'exploration indirecte.

Les méthodes indirectes cherchent à atteindre les extrema locaux en résolvant les systèmes d'équations, souvent non linéaires, obtenus en annulant le vecteur gradient de la fonction étudiée. La recherche d'un extremum hypothétique commence par la restriction de l'espace de recherche aux points de pente nulle dans toutes les directions.

Les méthodes d'exploration directes recherchent les optima locaux en se déplaçant dans une direction qui dépend du gradient de la fonction. Pour trouver un minimum local, on peut emprunter la direction de la plus forte pente.

Ces méthodes présentent deux inconvénients majeurs :

- en pratique, un grand nombre de fonctions à optimiser ne sont pas dérivables et souvent même pas continues. Il est difficile de savoir si la fonction à étudier satisfait ou non à de telles conditions ;
- ces méthodes ne convergent vers l'optimum global que lorsque le point de départ de l'algorithme est proche de cet optimum.

**a. Les méthodes énumératives** Sont de principe simple ; dans un espace de recherche fini, ou infini mais discrétisé, un algorithme énumératif évalue la valeur de la fonction à optimiser en chaque point de l'espace solution. L'utilisation d'un tel algorithme est intéressante lorsque le nombre de points n'est pas très important. Mais en pratique beaucoup d'espaces de recherche sont trop vastes pour que l'on puisse explorer toutes les solutions une par une et tirer une information utilisable.

Ces méthodes présentent deux inconvénients majeurs :

- elles sont inadaptées aux problèmes de grande dimension ;
- elles ne sont pas guidées par un raisonnement ou un processus intelligent, qui conduit la recherche vers des sous-espaces, susceptible de contenir une bonne solution, sans balayer tout l'espace des solutions.

**b. Les méthodes stochastiques** qui sont des méthodes où l'approche de l'optimum est en partie ou entièrement guidée par un processus stochastique. Les procédures purement aléatoires, qui explorent et mémorisent le meilleur élément trouvé, ne sont pas non plus efficaces et robustes. On leur préfère les méthodes dites pseudo aléatoires; ces méthodes utilisent un choix aléatoire comme outil pour guider une exploration "intelligente" de l'espace des solutions.

Ces méthodes présentent un inconvénient majeur : on ne peut garantir leur convergence que d'une manière asymptotique (ou pas du tout...).

En résumé, les méthodes d'exploration traditionnelles, déterministes ou énumératives, ne sont pas efficaces pour tout type de problème. Lorsqu'on veut résoudre un problème difficile, dès que la dimension du problème est grande, ces méthodes peuvent avoir des temps de calcul déraisonnables, et on a alors recours aux méthodes stochastiques.

**I.2.3.2 Principe d'un algorithme stochastique d'optimisation globale**

La plupart des algorithmes stochastiques sont itératifs et comportent trois éléments principaux : un mécanisme de perturbation, un critère d'acceptation et un critère d'arrêt. Ils sont appliqués à partir d'un ou plusieurs points de la fonction objectif choisis aléatoirement.

**1. Perturbation aléatoire**

- toutes les coordonnées du vecteur solution courant, ou une partie seulement, sont perturbées, plusieurs coordonnées à la fois ou une par une ;
- la transformation suit une loi de distribution particulière dans un voisinage du point courant, par exemple une loi de distribution uniforme ;
- le ou les nouveaux points sont générés selon une loi qui dépend des points précédents et/ou des valeurs précédentes de la fonction objective, ou ne dépend que du point courant, etc.

**2. Critère d'acceptation**

- le ou les nouveaux points sont acceptés selon une certaine loi de probabilité ;
- le ou les nouveaux points sont acceptés selon certaines conditions ;
- le ou les meilleurs points sont conservés pour l'étape suivante, une recherche locale est effectuée à partir du ou des nouveaux points, etc.

**3. Critères d'arrêt**

- ils peuvent être liés à la qualité du minimum obtenu :
- la procédure est arrêtée quand il n'y a plus d'amélioration de la solution après un certain nombre d'itérations ,
- elle s'arrête quand les perturbations ne dépassent plus un certain seuil ,
- ils peuvent être liés à des coûts de calcul ; la procédure s'arrête après :
- un nombre maximal d'évaluations de la fonction objectif,
- un nombre d'itérations fixées,
- un certain temps de calcul fixé, etc.

**I.2.3.3 Les principaux métaheuristiques modernes.**

Parmi les différentes méthodes stochastiques d'optimisation globale, nous allons uniquement nous intéresser aux heuristiques "modernes" . Le mot "heuristique" vient du grec heurem (découvrir) et qualifie tout ce qui sert à la découverte, à l'invention et à la recherche. Pour l'algorithmique, les heuristiques sont des méthodes qui cherchent à approcher une solution optimale; on les appelle parfois méthodes approchées.

Une heuristique peut être conçue pour résoudre un type de problème donné, ou bien être conçue comme une méthode générale, qui peut être adaptée à divers problèmes d'optimisation: dans le second cas, elle est désignée sous le terme de "métaheuristique".

Les métaheuristiques sont à l'origine dédiées aux problèmes combinatoires (Char,96), où les paramètres ne peuvent prendre que des valeurs discrètes ; par exemple, dans le cas du problème du voyageur de commerce, la permutation de deux villes voisines est un moyen d'engendrer les tournées voisines d'une tournée donnée et la distance entre deux configurations peut être considérée comme le nombre minimal de transformations élémentaires nécessaires pour passer de l'une à l'autre. Cette distance, ainsi définie, induit une *topologie* dans l'espace des configurations. Pour l'optimisation d'une fonction continue, ces méthodes d'optimisation peuvent être adaptées moyennant des transformations plus au moins aisées, en inventant une nouvelle topologie. Chaque paramètre doit être *discrétisé* de façon individuelle. La difficulté majeure réside dans la détermination de la taille optimale du pas de discrétisation et de sa direction (résultant des variables sur lesquelles on agit) (Siar,98).

Le choix de la loi de discrétisation est un compromis entre deux situations extrêmes :

- si le pas est trop petit, on n'explore qu'une région limitée de l'espace des configurations, et l'algorithme risque d'être piégé dans un minimum local ;
- si le pas est trop grand, la recherche devient quasiment aléatoire.

La meilleure solution peut consister à élaborer une topologie adaptative.

Les heuristiques comportent souvent plusieurs paramètres contrôlant les différents opérateurs et l'influence du ou des processus stochastiques. L'efficacité d'une heuristique dépend du choix de ses paramètres de contrôle. Ce réglage est complexe, surtout quand le nombre de paramètres est élevé et quand la plage de variation de chacun de ces paramètres est étendue.

Les différents paramètres sont généralement corrélés, ce qui rend encore plus difficile leur réglage. Enfin pour un jeu de paramètres de contrôle donnés, l'aspect stochastique fait que les résultats varient d'une exécution à l'autre.

#### II.2.3.4 La méthode de recherche tabou

La recherche tabou *RT* est une métaheuristique originalement développée par Glover,1986) et indépendamment par (Hansen ,1986), sous l'appellation de "*steepest ascent mildest descent*". Elle est basée sur des idées simples, mais elle est néanmoins très efficace.

Cette méthode combine une procédure de recherche locale avec un certain nombre de règles et de mécanismes permettant à celle-ci de surmonter l'obstacle des optima locaux, tout en évitant de cycler (Char,1996) et (Reev,1995). Elle a été appliquée avec succès pour résoudre de nombreux problèmes difficiles d'optimisation combinatoire : problèmes de routage de véhicule (Gend,1994), problèmes

d'affectation quadratique (Skor,1990), problèmes d'ordonnancement (Widm,1989), problèmes de coloration de graphes (Hert,1987), etc.

### **I.2.3.5 Les algorithmes génétiques**

Les principes fondamentaux de ces algorithmes ont été exposés par (Holland,1975).

Ces algorithmes s'inspirent du fonctionnement de l'évolution naturelle, notamment la sélection naturel, et la procréation selon les règles de Mendel.

La sélection naturelle, que Darwin appelle l'élément "propulseur" de l'évolution, favorise les individus d'une population qui sont le mieux adaptés à un *environnement*. La sélection est suivie de la procréation, réalisée à l'aide de croisements et de mutations au niveau du patrimoine génétique des individus (ou "génotype"), constitué d'un ensemble de gènes.

Ainsi deux individus "parents", qui se croisent, transmettent une partie de leur patrimoine génétique à leurs descendants. Le génotype de l'enfant fait que celui-ci est plus ou moins bien adapté à l'environnement. S'il est bien adapté, il a une plus grande chance de procréer dans la génération future.

Au fur et à mesure des générations, on sélectionne les individus les mieux adaptés, et l'augmentation du nombre des individus bien adaptés fait évoluer la population entière.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre on a vu les différentes méthodes d'optimisation, on a opté pour l'algorithme génétique comme solution pour caler notre réseau d'AEP et on va le programmer par le logiciel Matlab.

## Chapitre II

# **Construction des modèles hydrauliques des réseaux d'AEP**

## Introduction

De nos jours les modèles hydrauliques sont devenus un outil primordial pour la gestion des systèmes de distribution d'eau. Leur utilisation pour la simulation des conditions d'écoulement dans un réseau d'AEP est d'une utilité très variée. Un modèle peut être utilisé pour assurer la quantité et la qualité adéquates d'eau pour la communauté, pour évaluer les alternatives de planification et de conception, pour évaluer les performances du système et pour vérifier la stratégie de fonctionnement pour une meilleure gestion de l'infrastructure de distribution d'eau, aussi bien que pour pouvoir réaliser des études de vulnérabilité pour évaluer les risques qui peuvent affecter l'approvisionnement en eau.

Un modèle est construit à partir des données qui décrivent les éléments du réseau (les conduites, les nœuds, les vannes, les pompes, les bâches et les réservoirs), ces données sont assemblées d'une manière systématique pour prédire les débits et les charges ou les pressions dans un réseau de distribution d'eau.

## II. La modélisation hydraulique du 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)

On distingue plusieurs types de modèles :

### II.1 Modèle pour le dimensionnement du réseau

Le modèle permet de vérifier pour une configuration donnée du réseau, la satisfaction des exigences des abonnés en termes 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, 2006)

#### a) Modèle pour l'analyse du fonctionnement hydraulique et diagnostic

Ce modèle cherche à décrire le fonctionnement d'un réseau existant, par la détermination de l'état des conduites à travers la mesure de la rugosité des conduites et la demande des abonnés. Pour un réseau, des données liées à la topologie du réseau, les types des conduites, la typologie des consommateurs ainsi que des mesures de pression et débits en des points du réseau sont supposés connus. Un calage du modèle permet de déterminer certains paramètres inconnus: rugosité, consommation afin de s'approcher le plus possible du fonctionnement réel du réseau.



**b) Modèle pour la gestion du réseau**

Ce modèle servira à décrire le comportement des sources d'approvisionnement, des zones de stockage et des stations de pompage. L'intérêt de ce type de modèle est d'optimiser l'exploitation des sources d'eau et de minimiser les coûts d'exploitation du réseau en régulant le pompage et le stockage de l'eau dans la journée. Ce modèle ne retient que les conduites de grand diamètre servant au transport et à la distribution de l'eau.

**c) Modèle pour la mesure de la qualité de l'eau**

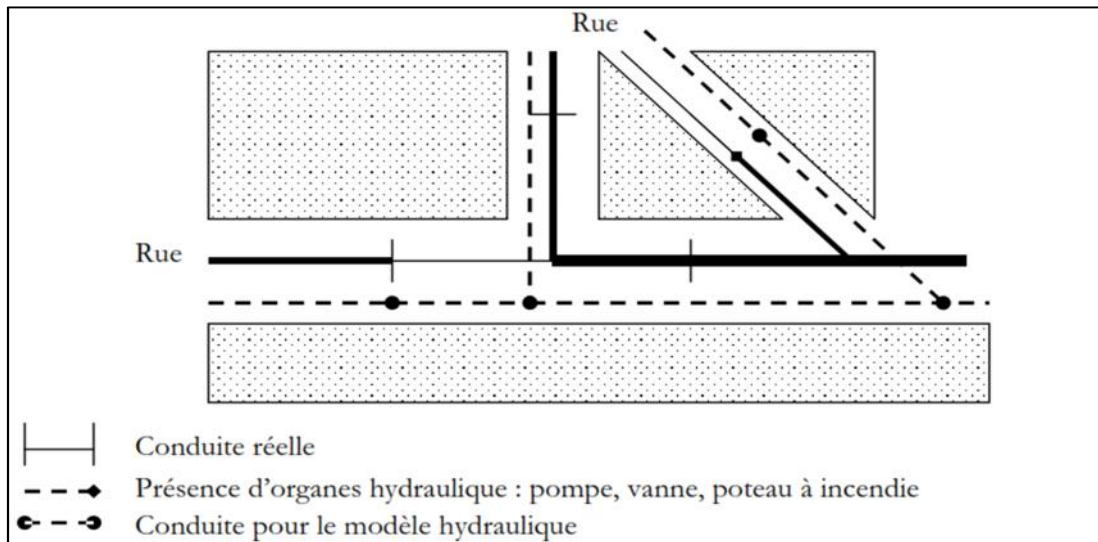
Ce modèle cherche à décrire les temps de séjour (stagnation de l'eau) de l'eau dans le réseau. En effet des temps de séjour important altèrent la qualité de l'eau dans le réseau. L'objet du modèle est de mesurer l'évolution d'un produit à titre d'exemple le chlore dans le réseau et d'en mesurer les concentrations à des points précis du réseau.

**II.1.2 Précision du modèle et représentation du réseau AEP**

La modélisation du fonctionnement du réseau doit décrire le comportement réel du réseau. En fonction de l'utilisation du modèle, un niveau de détail doit être défini. Le modèle ne considérera que certaines conduites du réseau et certains abonnés seront rassemblés sur des nœuds afin de simplifier la modélisation. Il n'existe pas de règles précises pour la simplification de réseau, mais certaines sont fréquemment utilisées :

- Suppression des conduites de petits diamètres ou de petites longueurs
- Suppression des conduites en antenne
- Suppression des nœuds intermédiaires
- Agglomération de plusieurs abonnés en un même nœud.
- Concaténation de conduites de même diamètre et même matériau
- Distinction entre abonnés de nature différente : domestique, industriel, autres.

L'autre aspect à prendre en compte est la définition des conduites. L'étude du fonctionnement du réseau et la détérioration hydraulique n'utilisent pas la même définition de la conduite. (Nafi, 2006)



**Figure II.1:** Modélisation du réseau AEP (prise en compte de l'aspect hydraulique et structurelle).

La Figure II.1 illustre la distinction entre le réseau tel qu'il existe réellement et la modélisation hydraulique. Cette modélisation doit être attentive à l'étude de la détérioration structurelle des conduites qui s'articule sur une définition plus détaillée des conduites qui correspond plus au réseau réel. Nous devons trouver un niveau de description du réseau assurant un compromis entre l'étude de la détérioration structurelle et hydraulique. Cela nécessite l'adaptation des données disponibles et une définition appropriée des conduites du réseau.

### II.1.3 Présentation de l'interface du Logiciel EPANET

EPANET est un logiciel de simulation du comportement hydraulique et qualitatif de l'eau sur de longues durées dans les réseaux sous pression.

Un réseau est un ensemble de tuyaux, nœuds (jonctions de tuyau), pompes, vannes, bâches et réservoirs. EPANET calcule le débit dans chaque tuyau, la pression à chaque nœud, le niveau de l'eau dans les réservoirs, et la concentration en substances chimiques dans les différentes parties du réseau, au cours d'une durée de simulation divisée en plusieurs étapes.

Le logiciel est également capable de calculer les temps de séjour et de suivre l'origine de l'eau. EPANET a pour objectif une meilleure compréhension de l'écoulement et de l'usage de l'eau dans les systèmes de distribution. Il peut être utilisé pour différents types d'application dans l'analyse des systèmes de distribution. En voici quelques exemples: définition d'un programme de prélèvement d'échantillons, calage d'un modèle hydraulique, simulation du chlore résiduel, et estimation de l'exposition de la population à une substance.

EPANET offre une aide à la recherche de stratégies alternatives pour gérer le réseau, comme par exemple:

- utilisation en alternance des différentes ressources du système,
- modifier le régime de pompage ou de marnage des réservoirs,

- préciser l'usage des stations de rechloration (ou autres retraitements) en réseau,
- planifier l'entretien et le remplacement de certaines canalisations.

### II.1.4 Présentation de la barre d'outils

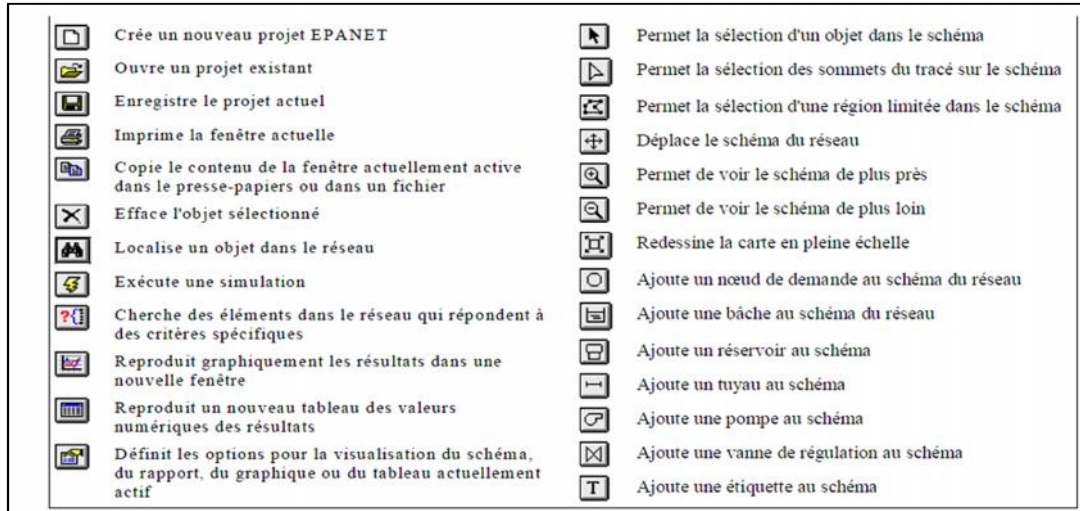


Figure II.2 : Exemple de la barre d'outils Epanet.

## II.2 Les étapes de la modélisation d'un réseau d'AEP

La modélisation hydraulique est une nécessité en particulier pour les réseaux des grandes villes à croissance rapide. Non seulement pour la surveillance quotidienne du système, mais aussi pour les investissements futurs.

Tout le modélisateur doit se prononcer sur l'objectif, afin de disposer d'un modèle efficace et fiable, les étapes de la modélisation sont régies par un but. Par exemple, dans un modèle de détection de fuites, même les tuyaux avec des diamètres très petits, tels que 50 mm, doivent être pris en compte et peuvent être une source de fuite. (Misirdali, 2003)

### II.2.1 La collecte des données

Afin de disposer d'un modèle hydraulique d'un réseau de distribution d'eau, le maximum d'informations et de données doivent être recueilli. À partir d'enquêtes de terrain, les frontières de zone, les caractéristiques de tuyaux, de matériaux, diamètres, l'emplacement des vannes, l'emplacement des citernes, des volumes et des élévations de pompes. Les lieux et les caractéristiques peuvent être inclus à un modèle.

A partir des cartes d'utilité, les dessins et autres documents qui décrivent la longueur, la matière, l'âge, le diamètre et l'emplacement des tuyaux peuvent être utilisés conjointement avec l'enquête de terrain. Cette dernière joue un rôle important car elle n'est pas la seule source pour obtenir les informations et les données les plus précises, mais aussi elle donne la possibilité de vérifier les résultats de l'analyse.

Pendant les enquêtes de terrain, la mauvaise gestion comme vannes d'isolement ouvertes entre les zones fermées et vannes d'isolement oubliées dans les zones où les connexions supplémentaires et des segments de tuyaux non tirées peut être observé et corrigé. La correction et la recherche de ces erreurs conduisent également à un travail précis et efficace avec le modèle.

Après la collecte des données, les étapes pour d'autres études peuvent être prises. Il est important d'avoir des informations précises sur le système.

Plusieurs sources sont normalement disponibles, notamment :

- Carte cadastrale, numérisée ou pas, avec les informations sur les conduites, matériaux, diamètres, l'emplacement d'autres éléments comme les réservoirs, stations de pompage et vannes ;
- Carte topographique avec les courbes d'altitude ou disponibles sous la forme de modèle numérique d'élévation (modèle altimétrique numérique);
- Carte numérisée sous la forme de dessin assisté par ordinateur (information graphique) ou sous la forme de système d'information géographique (information graphique et non-graphique) ;
- Registre de données de gestion opérationnelle, comme par exemple, les débits ou taux de production des stations de traitement ou de pompage, l'information volumétrique des consommations des abonnés ou l'information des niveaux des réservoirs ;
- Système de gestion de base de données des abonnés, avec les informations de consommation volumétrique ou de facturation (SIG).

### II.2.2 Schématisation du réseau (selon EPANET)

EPANET modélise un système de distribution d'eau comme un ensemble d'arcs reliés à des nœuds. Les arcs représentent des tuyaux, des pompes, et des vannes de contrôle. Les nœuds représentent des nœuds de demande, des réservoirs et des bâches. La figure ci-dessous indique les liaisons entre les différents objets formant le réseau. (*Manuel de l'utilisateur d'Epanet 2.0 – 2003*)

La figure ci-dessous indique les liaisons entre les différents objets formant le réseau.

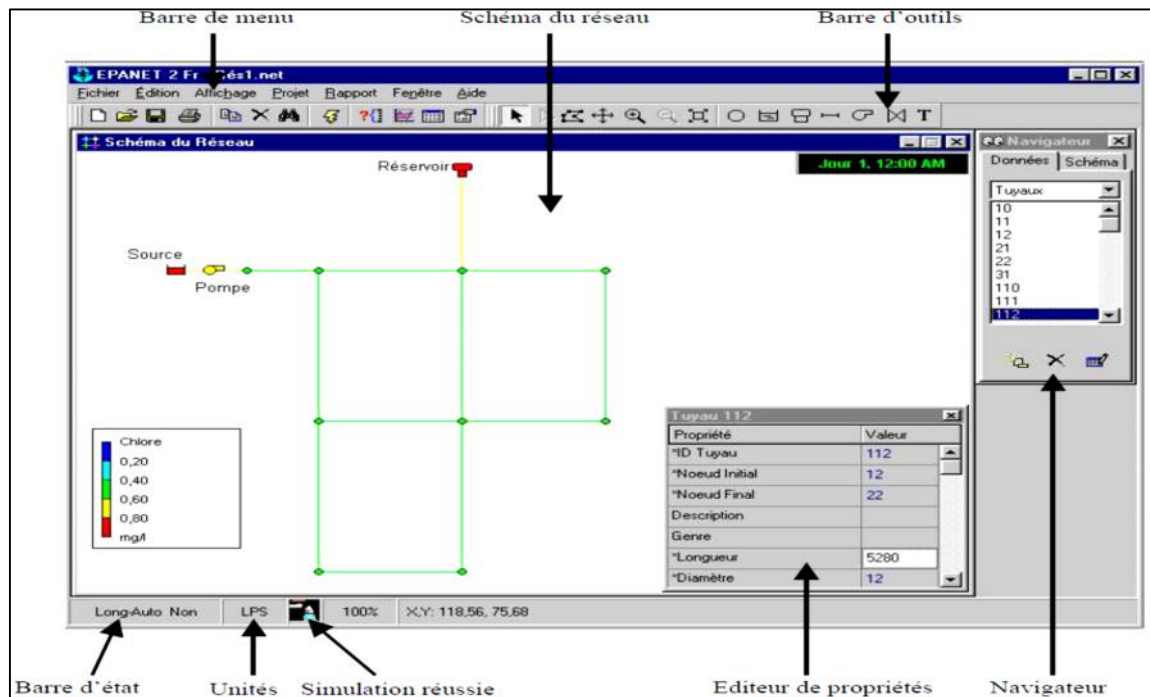


Figure II.3 : Composantes physiques d'un système de distribution d'eau.

### II.2.2.1 Les composantes physiques d'un système de distribution

#### a) Nœuds de demande

Les nœuds de demande sont les points du réseau où les arcs se rejoignent. Ce sont des points d'entrée ou de sortie d'eau et peuvent également ne pas avoir de débit. Les données d'entrée minimales exigées pour les nœuds de demande sont:

- L'altitude ;
- La demande de base ;
- La qualité de l'eau.

Les résultats calculés aux nœuds de demande, à chacun des intervalles de temps d'une simulation sont:

- la charge hydraulique (ou hauteur piézométrique): énergie interne par poids spécifique de fluide ou bien somme de l'altitude avec la hauteur de pression.

Cette définition de la charge est différente de celle utilisée en hydraulique urbaine qui prend en compte le facteur vitesse de l'eau sous forme d'énergie cinétique ( $v^2/2g$ ).

- la pression.
- la qualité de l'eau.

Les nœuds de demande peuvent également:

- avoir une demande qui varie dans le temps;
- être affectés de demandes de différents types (domestique, industrielle,...);
- avoir des demandes négatives, ce qui indique que l'eau entre dans le réseau à ce point;
- être le point d'injection d'une substance entrant dans le réseau.

b) *Bâches infinies*

Les Bâches infinies sont des nœuds représentant une source externe de capacité infinie. Elles sont utilisées pour modéliser des éléments tels que les lacs, les fleuves, les couches aquifères souterraines ou les arrivées de réseaux extérieurs.

Les données de base pour une bâche sont la charge totale (égale au niveau de la surface de l'eau si la bâche infinie n'est pas sous pression) et la qualité initiale de l'eau dans le cas où l'on exécuterait une analyse de qualité de l'eau.

c) *Réservoirs*

Les réservoirs sont des nœuds avec une capacité de stockage, dont le volume d'eau stocké peut varier au cours du temps. Les données de base pour des réservoirs sont les suivantes:

- L'altitude du radier ;
- Le diamètre (ou sa forme s'il n'est pas cylindrique) ;
- Les niveaux initial, minimal et maximal de l'eau ;
- Eventuellement la qualité initiale de l'eau.

Les principaux éléments calculés dans la simulation sont les suivants:

- la charge (altitude de l'eau)
- la pression (niveau de l'eau)
- la qualité de l'eau.

Le niveau dans les réservoirs doit rester entre les niveaux minimal et maximal.

EPANET arrête la sortie d'eau si un réservoir est à son niveau minimal et arrête l'arrivée s'il est à son niveau maximal. Les réservoirs peuvent également servir de source pour une substance entrant dans le réseau.

d) *Les tuyaux*

Les tuyaux sont des arcs qui transportent l'eau d'un point du réseau à l'autre. EPANET suppose que tous les tuyaux sont pleins à tout instant. L'eau s'écoule de l'extrémité qui a la charge hydraulique la plus élevée (altitude + pression, ou énergie interne par poids d'eau) à celle qui a la charge hydraulique la plus faible. Les données de base pour les tuyaux sont:

- les nœuds initial et final;
- le diamètre;
- la longueur;
- le coefficient de rugosité (pour déterminer la perte de charge);
- l'état (ouvert, fermé, ou avec un clapet anti-retour).

Le paramètre d'état permet à des tuyaux de contenir implicitement des vannes de sectionnement et de contrôler les clapets anti-retour (qui permettent l'écoulement dans une direction unique).

- Coefficients de réaction dans la masse d'eau et aux parois (pour l'analyse de qualité).

e) Les pertes de charge singulières

Des pertes de charge singulières (également appelées « pertes locales ») sont provoquées notamment par la croissance de la turbulence qui se produit au niveau des coudes, des tés et des vannes. L'importance d'inclure ou non de telles pertes dépend du genre de réseau et de l'exactitude exigée. Pour les prendre en compte, il faut assigner au tuyau un coefficient de perte de charge singulière. La perte singulière est le produit de ce coefficient avec la charge cinétique du tuyau, c'est-à-dire, Où :

$$h_l = K \left( \frac{v^2}{2g} \right) \quad (\text{II.1})$$

- $K$  est le coefficient de perte de charge singulière ;
- $v$  est la vitesse d'écoulement ;
- $g$  est l'accélération de la pesanteur.

f) Les pompes

Les pompes sont des arcs qui ajoutent de l'énergie à un fluide et augmentent ainsi sa charge hydraulique. Les principaux paramètres d'entrée pour une pompe sont :

- Ses nœuds d'aspiration et de décharge ;
- Sa courbe caractéristique (la combinaison des charges hydrauliques et des débits que la pompe peut fournir à sa vitesse nominale).

g) Les vannes

Les vannes sont des arcs qui limitent la pression ou le débit en un point précis du réseau. Leurs principaux paramètres d'entrée sont:

- Les nœuds d'entrée et de sortie ;
- Le diamètre ;
- La consigne de fonctionnement ;
- L'état de la vanne.

Les différents types de vannes qu'offre EPANET sont:

- Vanne stabilisatrice aval (en anglais PRV)
- Vanne stabilisatrice amont (en anglais PSV)
- Vanne brise-charge ou réducteur de pression (en anglais PBV)
- Vanne régulatrice de débit ou limiteur de débit (en anglais FCV)
- Vanne diaphragme (en anglais TCV)
- Vanne d'usage général (en anglais GPV)

### II.2.2.2 Les composantes non physiques

En plus des composants physiques, EPANET utilise trois 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.

#### a) Courbes

Les courbes en général sont des objets qui contiennent des couples de données ayant une relation entre elles. Deux objets ou plus peuvent partager la même courbe. Dans EPANET, on peut appliquer les types de courbes suivants:

- Courbe caractéristique
- Courbe de rendement
- Courbe de volume
- Courbe de perte de charge.

#### b) Les courbes de modulation

Une courbe de modulation est un ensemble de multiplicateurs qui peuvent être appliqués à une valeur de base pour lui permettre d'évoluer au cours du temps. L'intervalle de temps utilisé pour chacune des courbes de modulation a la même valeur fixe (toutes les périodes ont la même durée).

Durant cette période la valeur du paramètre ne change pas; elle reste égale au produit de sa valeur nominale et du multiplicateur de la courbe de modulation pour cette période de temps.

On peut citer des courbes de modulation à :

- la demande d'un nœud ;
- au niveau d'une bêche ;
- à la vitesse de rotation d'une pompe ;
- à la qualité de l'eau dans une source ;
- au prix de l'énergie.

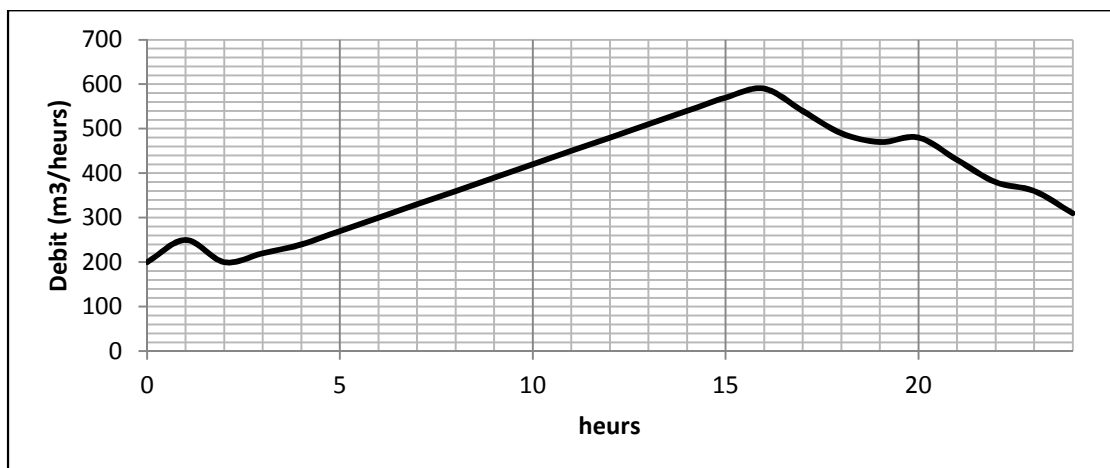


Figure II.4 : Exemple de courbe de consommation journalière.



### II.2.3 La répartition des demandes

La répartition des demandes est habituellement l'une des tâches les plus importantes et les plus critiques dans la modélisation hydraulique d'un réseau. Bien que dans la réalité l'alimentation des consommateurs se fait par les conduites, les logiciels de modélisation attribuent la consommation aux nœuds. Cette méthode admet que ces nœuds sont situés aux points de jonction des conduites. Le taux de consommation dans les nœuds dépend des facteurs suivants :

- La population servée (caractéristiques sociales des utilisateurs) ;
- L'heure ;
- Les conditions climatiques ;
- Type d'utilisation.

Bien que la demande totale soit calculée, il est très difficile de répartir convenablement les demandes aux nœuds. Alors pour cela on se sert des données collectées pour calculer la demande totale et on va assigner à chaque nœud un pourcentage (poids) pour répartir la demande totale sur tous les nœuds.

#### II.2.3.1 La répartition par la méthode des poids W

Les pourcentages (poids) nodaux sont généralement obtenus par la relation suivante :

$$W_i = \frac{1}{2} \frac{\sum_j^n l_j}{L_{tot}} \quad (II.2)$$

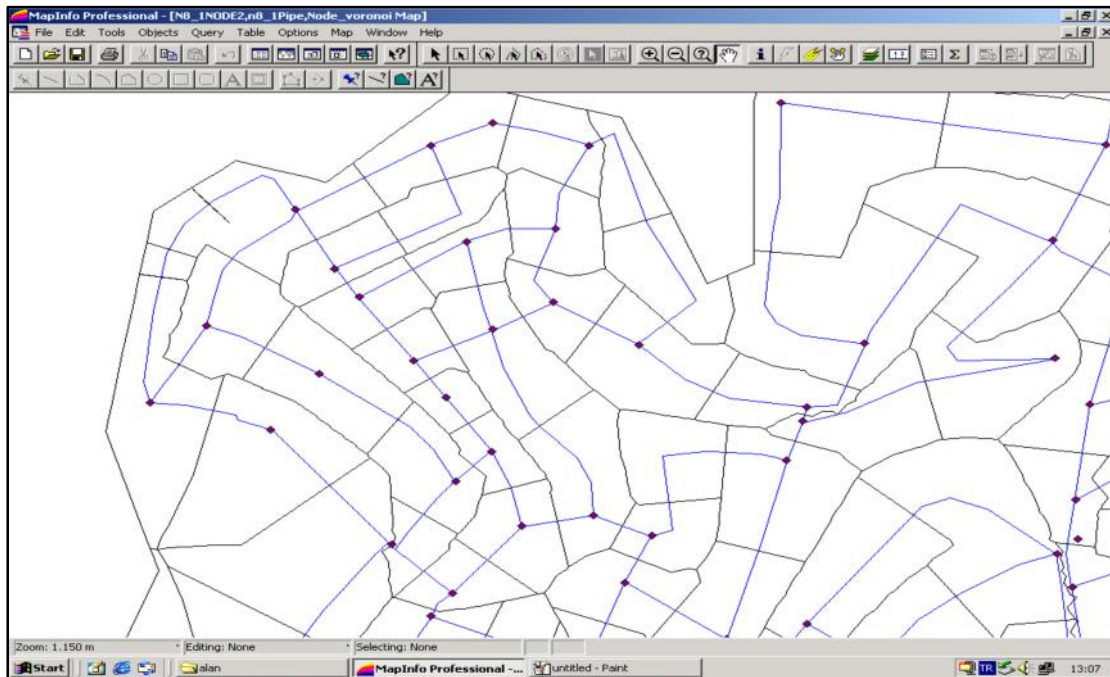
Où :

- $W_i$  : le pourcentage ou poids de nœud  $i$  ;
- $l_j$  : longueur de la conduite  $j$  connectée au nœud  $i$  ;
- $n$  : nombre de conduites connectées au nœud  $i$  ;
- $L_{tot}$  : longueur totale de réseau.

Il existe d'autres approches plus réalistes pour déterminer la demande aux nœuds, elles sont basées sur la répartition spatiale des consommations. (*Misirdali,2003*)

#### II.2.3.2 Distribution spatiale des consommations

Cette méthode est basée sur la détermination des surfaces alimentées par chaque nœud, en faisant ceci on peut déterminer le nombre ainsi que la catégorie des consommateurs ce qui nous permet d'avoir des pourcentages de consommation (poids) plus réalistes. Après avoir déterminé les surfaces des nœuds, les pourcentages (poids) nodaux peuvent être déterminés en utilisant ces surfaces. Une approche consiste à l'utilisation directe des pourcentages des surfaces comme étant des poids nodaux, mais cette approche a beaucoup d'inconvénients car il y aura des surfaces qui ne contiennent aucun immeuble.



**Figure II.5 :** Les surfaces nodales.

La meilleure méthode pour avoir des poids nodaux fiables est d'associer à ces surfaces les registres de consommation des abonnés. Les immeubles qui sont à l'intérieur des surfaces peuvent être déterminés (voire la figure suivante). En suite en utilisant les registres de consommation, on peut déterminer la consommation moyenne de chaque immeuble. Et en intégrant les consommations des immeubles avec les surfaces nodales, les pourcentages (poids) nodaux de consommation respectifs des nœuds seront déterminés.

L'avantage principal de cette approche c'est qu'à la manière dont laquelle les poids nodaux sont déterminés, les consommations sont directement intégrées dans le modèle. En plus de ça si la surface contient d'autres types d'utilisateurs (exemple : commercial, industriel) leur consommation peut être comptabilisée dans les poids nodaux sans aucune approximation.

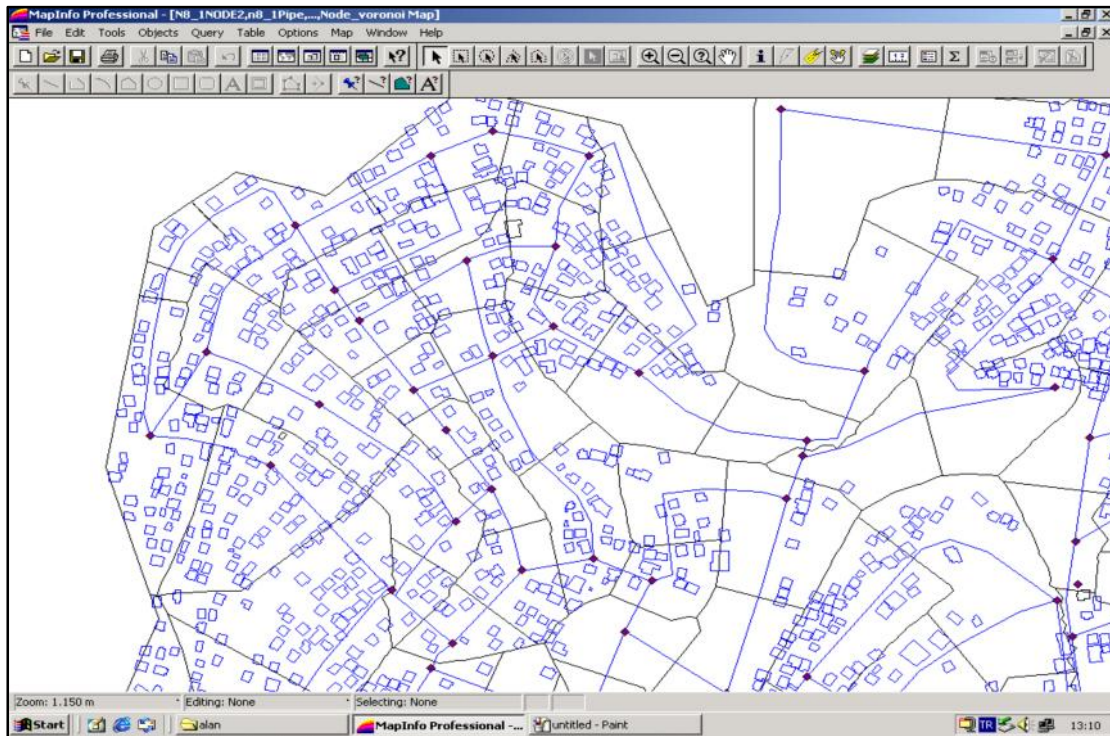


Figure II.6 : Les immeubles servis par les nœuds correspondants.

**II.2.4 Détermination des coefficients de rugosité des conduites** l'un des paramètres les plus incertains dans la modélisation hydraulique est le coefficient de rugosité des conduites. Ce coefficient ne dépend pas seulement du type de matériau mais aussi de l'âge de la conduite, les caractéristiques de l'eau ainsi que la vitesse moyenne de l'écoulement. Une bonne estimation de ce paramètre est exigée soit pour la modélisation du réseau ou pour le calage des modèles existants. D'autre part, laisser ce paramètre comme étant incertain va nous permettre d'avoir des résultats beaucoup plus réalistes lors de calculs de réhabilitation.

**II.2.5 Le calage de modèle :** La dernière étape de la modélisation est le calage qui est le processus d'ajustement des paramètres de modèle jusqu'à ce que les grandeurs simulées aillent étroitement coïncider avec les valeurs mesurées sur le terrain. Le calage est un processus important qui devrait être effectué pour établir la crédibilité du modèle et le placer comme un repère pour prévoir les problèmes potentiels liés à l'exploitation du système de distribution et découvrir ses erreurs.

**Conclusion**

L'utilisation des ordinateurs de nos jours pour simuler des situations est devenue une pratique standard en ce qui nous concerne pour la conception des réseaux d'AEP, du fait que ces outils moderne soulagent beaucoup lors des programmes de calculs itératifs ennuyants et fatigant .ces simulations donnent la possibilité aux opérateurs de se focaliser sur les décisions de conception. Outre, le fait que les modèles peuvent expliquer beaucoup plus la complexité des systèmes réels que des calculs manuels, ils donnent à l'opérateur une grande confiance sur le bon fonctionnement du réseau une fois mis en application. En définitive, la facilité et la vitesse avec lesquelles des modèles peuvent être employés donnent à l'utilisateur la capacité d'explorer beaucoup plus de variantes sous une large gamme de conditions, ayant pour résultat des conceptions plus rentables et plus robustes.

**Chapitre III**

**Calage des modèles**

**hydrauliques des réseaux**

**d'AEP**

### Introduction

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)

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.

Si l'entrée de modèle est correcte, alors les pressions et les débits simulés coïncideront avec les valeurs observées. Cependant, les données employées au départ pour décrire le réseau ne sont habituellement pas parfaites, alors quelques valeurs doivent être changées pour que les résultats simulés conviennent à ceux mesurés.

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

#### III.1 Le but du calage des modèles hydrauliques des réseaux d'AEP

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.

**-L'établissement de la crédibilité du modèle** : Les données et les hypothèses sur lesquelles sont fondées 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 de 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, puisque 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 un réseau). Pour analyser l'impact des changements apportés.

**-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 de calage d'un modèle et en rassemblant et 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.

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

Le calage d'un modèle est réalisé en quatre étapes successives

- a) le calage en volume (débits de consommation, de transit, de pompage...);
- b) le calage en niveau (réservoirs);
- c) le calage en pression;
- d) le calage en qualité (éventuel). (*Liratni, 2001*)

#### III.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).

#### III.2.2 Le calage en niveaux

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).

### **III.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 radiers de réservoir, ...).

### **III.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 et continuité des mesures, la représentativité des mesures.

Le cycle de 24 h 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).



**III.4 Les différents modèles (approches) de calage :** depuis les années 70 nombreuses procédures de calage des réseaux de distribution d'eau ont été développées par (*Dragan et als, 2009*).

Généralement, les modèles de calage peuvent être groupés dans trois catégories :

- (1) - les procédés itératifs (d'essai-et-erreur)
- (2) - les modèles explicites (ou modèles hydrauliques de simulation)
- (3) - les modèles implicites (ou modèles d'optimisation).

#### **III.4.1 Les modèles itératifs**

Les modèles itératifs de calage sont basés en gros sur une procédure d'essai-et-erreur spécifiquement développée (Rahal et al. 1980, Walski 1983, 1986, Bhave 1988). 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 (Bhave1988). 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.

#### **III.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 (Ormsbee and Wood 1986, Boulos and Wood 1990, Boulos and Ormsbee 1991, Ferreri et al. 1994). 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.

### III.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. Principe : l'outil d'optimisation pose/actualise les paramètres et les passer 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. La fonction objective généralisée pour le calage peut être exprimée comme suit :

$$\text{Min } f(x) = \sum_{i=1}^n w_i |y_i^{obs} - y_i(x)|^p \quad (\text{III.1})$$

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 :

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

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

$$\sum H_f - \Delta H = 0 \quad (\text{III.4})$$

Où :

$Q_{in}$  : le débit d'entrée des nœuds,  $Q_{out}$  : le débit de sortie des nœuds,  $Q_e$  : la demande dans les nœuds,  $E_p$  : l'énergie transmise au fluide par la pompe,  $\Delta H$  : 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.

$$x^{\min} < x < x^{\max}$$

Où :  $x^{\min}$  et  $x^{\max}$  sont les limites supérieures et inférieures. 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.

**Conclusion**

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 (telle que le recuit simulé et les algorithmes génétiques), ou une combinaison des méthodes globales et locales. 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.

Chapitre IV

**Les Algorithmes  
génétiques**

## Introduction

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

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

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

Les algorithmes génétiques présentent l'avantage d'explorer l'espace des solutions réalisables à partir d'un ensemble de solutions créées de manière aléatoire. A l'aide d'opérations spécifiques, l'algorithme génétique va générer de nouvelles solutions à partir de l'ensemble de solutions de départ, connu sous le nom de population. L'exploration de l'espace des solutions s'articule sur des mécanismes adaptés du domaine de la génétique. Ces algorithmes se basent sur le principe d'évolution des espèces, d'adaptation et de sélection naturelle. Les solutions réalisables ou acceptables sont assimilées à des individus qui vont résister et s'adapter à leur environnement. Seuls les meilleurs individus survivront. Par analogie les meilleures solutions seront celles ayant une plus forte probabilité d'être choisies tout au long du processus de recherche de solutions.

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

On les retrouve aussi bien en théorie des graphes qu'en compression d'images numérisées ou encore en programmation automatique, en économie,... etc.

### IV.1 Historique

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

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

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

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

D'autre part, le fondateur de la génétique John Mendel (1865) expliqua les lois de transmission des caractères à travers des générations dans le cadre d'une reproduction. Ces caractères héréditaires codés dans des **gènes** sont localisés dans le **génome** qui est le patrimoine génétique de chaque **individu**. La combinaison de deux **parents** du génome par des mécanismes de croisement et mutation fait engendrer deux **enfants** « individu » distincts possédant des traits propre à chaque parent. Ces deux théories ont fait inciter les chercheurs qui ont développé, pour la résolution des problèmes d'optimisation, des méthodes basées sur les principes cités dessus.

C'est à partir du 20<sup>ème</sup> siècle que la mutation génétique a été mise en évidence.

Les problèmes de traitement de l'information sont alors résolus de manières figés : lors de sa phase de conception, le système reçoit toutes les caractéristiques nécessaires pour les conditions d'exploitations connues au moment de sa conception, ce qui empêche une adaptation à des conditions d'environnement inconnues, variables ou évolutives. Les chercheurs en informatique étudient donc des méthodes pour permettre aux systèmes d'évoluer spontanément en fonction de nouvelles conditions : c'est **l'émergence de la programmation évolutionnaire**.

Dans les années 1960, John Holland étudie les systèmes évolutifs et, en 1975, il introduit le premier modèle formel des algorithmes génétiques (*the canonical genetic algorithm AGC*) dans son livre «*Adaptation in Natural and Artificial Systems*». Il expliqua comment ajouter de l'intelligence dans un programme informatique avec les croisements (échangeant le matériel génétique) et la mutation (source de la diversité génétique). (Radet, 2004)

Il faut attendre les travaux de (Goldberg, 1994) qui permettront de vulgariser l'utilisation des algorithmes génétiques et leur utilisation dans des problèmes d'optimisation concrets suite à la disponibilité d'ordinateurs puissants, permettant l'implémentation de ces algorithmes sur des problèmes de taille réelle. (Goldberg utilise les algorithmes génétiques dans le cadre de sa thèse pour l'optimisation de débits de pipelines de gaz). (Nafi, 2006)

Goldberg ajouta à la théorie des algorithmes génétiques les idées suivantes :

- un individu est lié à un environnement par son code d'ADN.
- une solution est liée à un problème par son indice de qualité.

## IV.2 Principes généraux

Un algorithme génétique recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données.

Pour l'utiliser, on doit disposer des cinq éléments suivants :

1. Un principe de codage de l'élément de population. Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. La qualité du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques. Les codages binaires ont été très utilisés à l'origine. Les codages réels sont désormais largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs pour l'optimisation de problèmes à variables réelles.
2. Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.
3. Une fonction à optimiser. Celle-ci retourne une valeur de  $\mathbb{R}^+$  appelée *fitness* ou fonction d'évaluation de l'individu.
4. Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'états.
5. Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

Le principe général du fonctionnement d'un algorithme génétique est représenté sur la figure IV .1 :

(Alliot et al,2005)

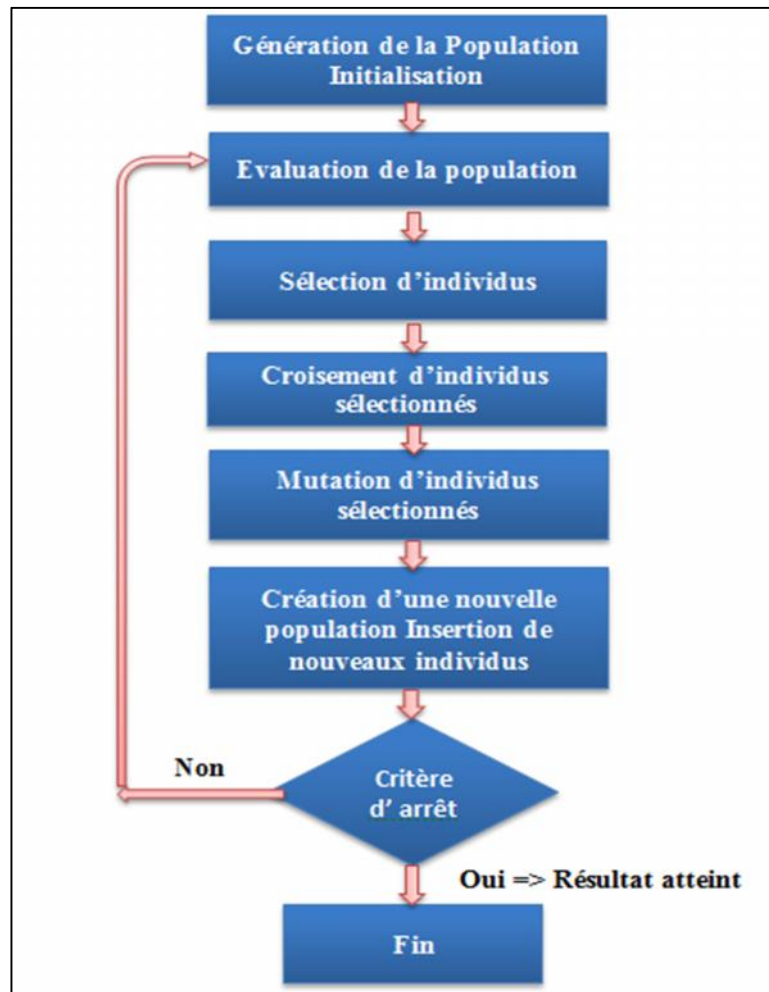


Figure IV.1 : Les principales étapes d'un algorithme génétique

- Le nombre de générations que l'on souhaite exécuter peut être fixe a priori. C'est ce que l'on est tenté de faire lorsque l'on doit trouver une solution dans un temps limite.
- L'algorithme peut être arrêté lorsque la population n'évolue plus ou plus suffisamment rapidement.

### IV.3 Description détaillée

#### IV.3.1 Génération de la population initiale et codage des individus

La génération de la population initiale que va utiliser l'algorithme génétique, pour explorer l'espace des solutions possibles dépend de la nature du codage utilisé et du nombre de solutions initiales. La taille de la population détermine la robustesse de l'algorithme, en effet plus la population est grande, les solutions sont distinctes et favorise donc l'exploration des solutions acceptables. En fonction des variables de décision considérées dans le problème, la génération de chromosome se base sur une fonction *Random* permettant de générer des variables de manière aléatoires, la génération doit respecter les domaines d'acceptabilité des décisions. (Nafi, 2006)

Il y a trois principaux types de codage utilisables, et on peut passer de l'un à l'autre facilement :

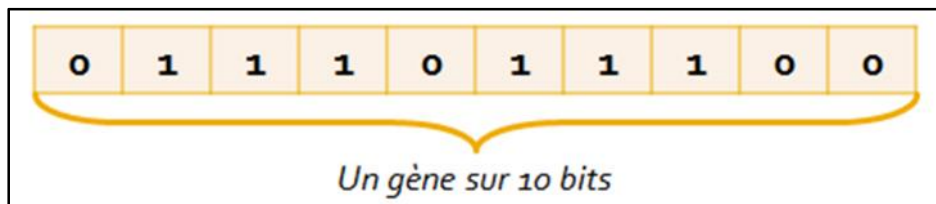


### IV.3.1.1 Codage binaire

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

■ Exemple :

- un gène est codé sur 32 bit (entier long),
- un chromosome est représenté par un tableau de gènes.
- un individu est représenté par un tableau de chromosomes.

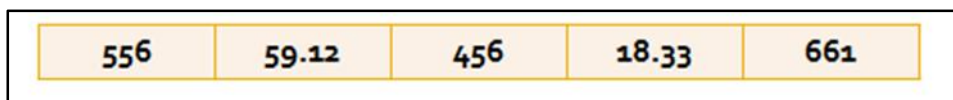


**Figure IV.2 :** Exemple d'un codage binaire. (Radet, 2004)

### IV.3.1.2 Codage réel

Dans ce codage le génome est un vecteur réel et l'espace de recherche est un sous-ensemble de  $\mathbf{R}$ . 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 Scheffel 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.

Exemple :



**Figure IV.3 :** Exemple d'un codage réel. (Radet, 2004)

### IV.3.1.3 Codage de Gray

Dans le cas d'un codage binaire on utilise souvent la distance de "Hamming" comme mesure de la dissimilarité 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.

### IV.3.2 La sélection des individus

Cette étape permet de déterminer les individus à reproduire pour former la nouvelle population de solution. Le choix des individus se base sur leur efficacité relative dans la population. La probabilité de sélectionner un individu donné est souvent traduite par le rapport entre la valeur de sa fonction d'adaptation et la somme de toutes les fonctions d'adaptation de la population. Il existe plusieurs techniques de sélection, nous en développons trois : La sélection par tournoi (*tournament*), la sélection par roulette (*wheel*) et la sélection par rang (*ranking*).

#### IV.3.2.1 La sélection par tournoi

A partir de la population de taille  $m$ , un tournoi qui consiste à sélectionner  $m$  chromosomes de  $m$  pairs. Pour chaque pair, le vainqueur est déterminé par la valeur de la fonction d'adaptation. Ainsi  $m$  individus seront sélectionnés pour la reproduction.

#### IV.3.2.2 La sélection par roulette

En fonction de la valeur d'adaptation une proportion est calculée exprimant le rapport entre la valeur de la fonction d'adaptation d'un individu donné et la somme des valeurs sur l'ensemble de la population. On assimile le processus de l'élection à une sorte de roulette de casino où chaque individu est représenté sur la roulette à l'aide de la proportion calculée. Ensuite la bille est lancée et permet donc de choisir un chromosome. Plus la proportion est grande, plus le chromosome associé a de chance d'être tiré. L'expérience est reproduite selon la taille de la population.

#### IV.3.2.3 La sélection par rang

Il s'agit de classer la population suivant la fonction d'adaptation, chaque individu de la population se voit accorder un rang. Plus l'individu est bon, plus son rang est élevé. Le principe de la sélection par rang est similaire que la sélection par roulette, la différence est que la proportion est calculée sur les rangs et non sur la valeur de la fonction d'adaptation. L'ensemble des individus est représenté sur un segment de droite dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1.

Un tirage aléatoire en général selon une loi uniforme) de nombres compris entre 0 et 1. La valeur du nombre aléatoire détermine l'individu à sélectionner.

### IV.3.3 L'opération de croisement

La procédure des élections permet d'identifier les individus à reproduire, *les parents*. Le mécanisme de reproduction est assuré par les opérations de croisement et de mutation. L'opération de croisement doit permettre d'améliorer la performance de la population considérée et de générer de

meilleures solutions, *les enfants*. L'opération de croisement est tributaire de la nature du codage utilisé. Elle est effectuée sur une paire d'individus sélectionnés de la population, *les parents*.

Cette opération est caractérisée par une probabilité de croisement  $P_c$  et le nombre de points de croisement. Nous présentons certains opérateurs.

#### IV.3.3.1 Opération de croisement simple

Le croisement entre deux individus est conditionné par la probabilité de croisement et le nombre de points de croisement. Le croisement permet de générer deux nouveaux individus dont la structure a été modifiée à partir d'individus de la population. Pour le codage binaire, il s'agit d'abord de déterminer le point de croisement. Chaque chromosome est caractérisé par une longueur déterminée par le nombre de bits le constituant. En fonction du nombre de points de croisement voulu, on génère un ou plusieurs nombres aléatoires comprise entre 1 et la longueur du chromosome considéré.

Les points de croisement seront les positions qui correspondent aux nombres générés aléatoirement. Le croisement simple peut, être adapté au codage réel, entier ou alphabétique en utilisant la même procédure.

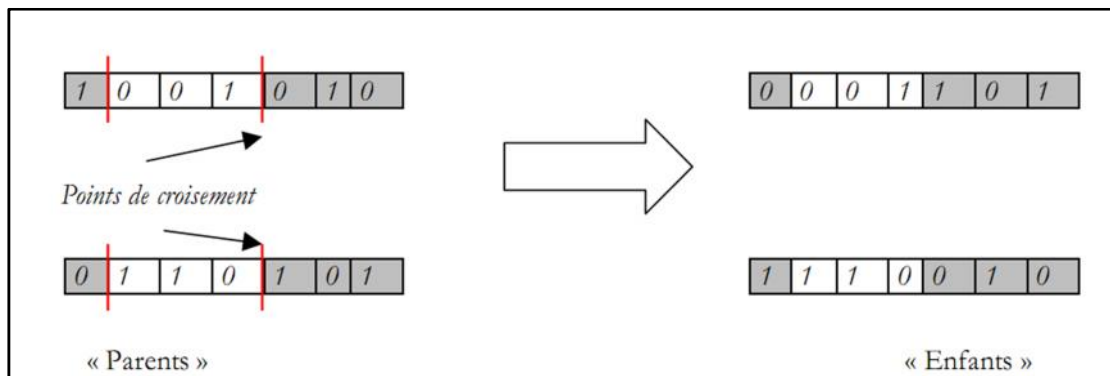


Figure IV.4 : Procédure de croisement dans le cas d'un codage binaire. (Radet, 2004)

#### IV.3.3.2 Opération de croisement uniforme

Cette opération consiste à considérer pour un chromosome donné un masque formé d'un vecteur aléatoire binaire. Le codage utilisé représente une variable de décision lui correspondant un nombre binaire, réel, entier ou alphabétique. En fonction de la valeur de la composante du vecteur binaire associé à la position sur le chromosome, la valeur du code associé à cette position peut avoir l'une des deux valeurs des parents considérés. Le deuxième chromosome (enfant) généré sera constitué par symétrie par rapport au premier chromosome. En fonction de la position du code, si la valeur est associée au premier parent, alors la valeur de la même position pour le second enfant sera associée au deuxième parent.

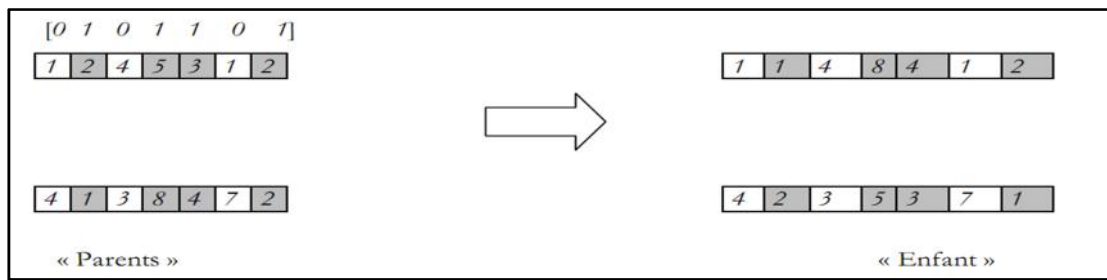


Figure IV.5 : Procédure de croisement uniforme dans le cas d'un codage entier. (Radet, 2004)

IV.3.4 L'opération de mutation

Cette opération a pour but de créer du désordre dans la population afin de limiter les risques de convergence prématurée vers des optimums locaux. L'opération de mutation est tributaire du codage utilisé et de la probabilité de mutation  $P_m$ , qui conditionne la mutation ou non d'un individu. (Simpson et al, 1994) propose de choisir la probabilité de mutation avec  $1/m \leq P \leq (1/m+1)$

Pour un codage binaire, la mutation consiste à générer un nombre aléatoire compris entre 1 et la longueur du chromosome. La position du code à muter correspond à la valeur du nombre aléatoire généré.

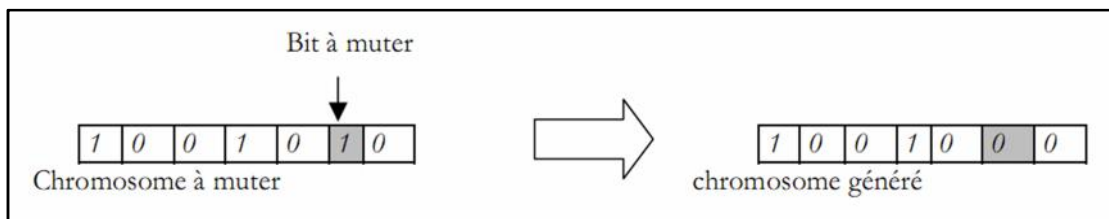


Figure IV. 6 : Opération de mutation. (Radet, 2004)

IV.4 Fonctionnement des algorithmes génétiques

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

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

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

- La fonction qui s'occupe de représenter le problème en codant chaque information caractérisant une solution possible selon un codage bien particulier, chaque information représente alors un gène et toutes les valeurs que peuvent prendre cette caractéristique représentent les allèles possibles pour ce

gène, et en concaténant tous ces gènes pour obtenir un chromosome qui lui représente une solution dans son intégralité.

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

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

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

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

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

#### **IV.5 Domaines d'application**

Les algorithmes génétiques peuvent être particulièrement utiles dans les domaines suivants :

- Optimisation : optimisation de fonctions, planifications, etc ...
- Apprentissage : classification, prédiction, robotique, etc ...
- Programmation automatique : programmes LISP, automates cellulaires, etc ...
- Etude du vivant, du monde réel : marchés économiques, comportements sociaux, systèmes immunitaires, etc ...

##### **IV.5.1 Algorithmes génétiques dans le domaine de l'eau**

Les algorithmes génétiques dans le domaine de l'alimentation en eau potable (AEP) concernent les domaines suivants :

- Utilisation pour le dimensionnement des réseaux d'AEP ;
- Utilisation pour la réhabilitation des réseaux d'AEP ;
- Recherche des fuites dans les réseaux d'AEP ;
- Optimisation des emplacements des stations de chloration dans les systèmes d'AEP;
- Détection des sources de pollution dans les réseaux d'AEP ;
- Optimisation du fonctionnement des stations de pompage ;
- Calage automatique des modèles hydrauliques des réseaux AEP.
- Choix optimal d'une extension. *(Daim, 2013)*

**Conclusion**

En conclusion nous avons passé en revue l'historique des Algorithmes génétiques depuis leur découverte par Darwin et leur évolution au cours des temps les principes de leur application et leur domaine d'utilisation. Nous allons les utiliser pour notre cas dans le cadre du calage des modèles hydrauliques d'un réseau d'AEP. Devant la complexité du problème accentué par l'inexistence de modèle mathématique pouvant donner la différence de pression en fonction des différents paramètres de calage à savoir la demande de base, l'exposant de fuite le coefficient de décharge, la rugosité, utilisation des AG s'avère donc indispensable.

Pour notre cas, le détail de leur application sera abordé dans le chapitre suivant.

Chapitre V

**Méthodologie et  
conception de l'outil**

**Introduction**

L'outil qu'on a proposé se base sur le principe de couplage du logiciel de calcul Matlab avec le logiciel de simulation hydraulique Epanet. Ce couplage est assuré par le biais de la bibliothèque de liens dynamiques (DLL) « EN2Toolkit », qui nous permet d'accéder aux paramètres du modèle hydraulique sous Epanet à partir du logiciel de calcul Matlab, cette bibliothèque nous offre aussi la possibilité de lancer des simulations hydrauliques ainsi que d'apporter des modifications aux paramètres du modèle hydraulique tout en restant sur Matlab. À partir de là, on a élaboré un programme sous Matlab qui accède au modèle hydraulique 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 conditionnée 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.

**V.1 Présentation d'EN2Toolkit**

EN2Toolkit (EPANET Programmer's Toolkit) est une bibliothèque de liens dynamiques (DLL) de fonctions qui permet aux développeurs de personnaliser le moteur de calcul EPANET pour leurs propres besoins. Les fonctions peuvent être intégrées dans des applications de Windows écrit en C / C ++, Delphi, Pascal, Visual Basic, ou tout autre langage qui peut appeler des fonctions dans une DLL Windows comme c'est le cas de Matlab Il s'agit d'une bibliothèque de fonctions sous forme d'un fichier de type ".dll" (Dynamic Links Library ou bibliothèque de liens dynamiques).

Ce type de fichier est connu dans le monde informatique par son rôle primordial dans l'échange dynamique des données (Dynamic Data Exchange ou DDE). Cela se fait en mettant des fonctions externes pouvant être exploitées par des logiciels autres que l'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 typique 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 d'ENSolveH (qui sauvegarde automatiquement les résultats dans un fichier ou bien l'utilisation de la série des fonctions ENOpenH - ENInitH - ENrunH - ENnextH - ENcloseH pour une simulation hydraulique, qui donne un accès aux résultats le long de la simulation avec la série de fonctions d'ENgetxxx.

-Effectuer une simulation de la qualité de l'eau en utilisant la fonction d'ENSolveQ (qui sauvegarde automatiquement les résultats dans un fichier ou bien l'utilisation de la série des fonctions ENOpenQ - ENInitQ - ENrunQ - ENnextQ - ENcloseQ pour une simulation hydraulique, qui donne un accès aux résultats le long de la simulation avec la série de fonctions d'ENgetxxx.

-Utiliser la fonction ENreport pour écrire un fichier de rapport.

-Appeler la fonction ENclose pour fermer tous les fichiers.

### **V.1.1 Les fonctions de EN2Toolkit**

Le tableau résume les différentes fonctions d'EN2Toolkit, leur syntaxe et leurs rôles dans un programme .voir (annexe I)

## **V.2 Formulation du problème**

Les données nécessaires pour l'accomplissement des calculs par l'outil dont 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.

### **V.2.1 Les hypothèses**

Les hypothèses sur lesquelles repose l'outil de calcul sont les suivantes :

- Il faut supposer avant tout que les données disponibles au niveau du service d'eau notamment le SIG (Système d'Information Géographique) 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 la sortie du réservoir) effectuées sur le terrain sont fiables.

### V.2.2 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 :

$$F(X) = \frac{1}{J} \left( \sum_{j=1}^J \left( \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |P_{mes} - P_{sim}| \right) \right) \quad (V.1)$$

Où :

- J : nombre totale des nœuds mesures ;
- T : durée total de simulation ;
- X : vecteur qui contient les variables de décision ;
- P<sub>mes</sub> : La pression mesurée ;
- P<sub>sim</sub> : 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.

### V.2.3 La contrainte

Pour la formule de la fonction fitness présentée 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 :

$$Q_{totale\_mesuré} = Q_{total\_simulé} \quad (V.2)$$

Formulation du système linéaire qui régit cette contrainte :

Nous avons :

$$Q_{\text{totale\_mesuré}} := \sum_i^I q_i \tag{V.3}$$

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

En divisant des deux membres de l'équation (V.3) par  $Q_{\text{total\_mesuré}}$  on aura l'équation suivante :

$$\sum_i W_i = 1 \tag{V.4}$$

Ou :  $W_i = \frac{q_i}{Q_{\text{total\_mesuré}}}$  ;

À partir de là, on formule le système linéaire sous la forme AX=b comme suit :

$$(1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1) \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_I \end{pmatrix} = 1 \tag{V.5}$$

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.

**V.2.4 La formulation de la fonction fitness**

On a traité le problème d'optimisation des paramètres par une seule méthode :

La méthode repose sur l'utilisation d'une seule fonction fitness (V.1) 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 (V.5) 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.

**V.3 Description du programme**

**V.3.1 Les données d'entrées**

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

- Le modèle du réseau : il est lu à partir d'un fichier en extension (Reseau .inp).
- 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).

### V.3.2 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 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.

### V.3.3 Processus 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.

En mode commandes, 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 ;
- **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 ;
- **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 « $A*X \leq b$  » 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 « $A*X = b$  » 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.

**V.3.4 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.

**V.3.5 L'organigramme du principe**

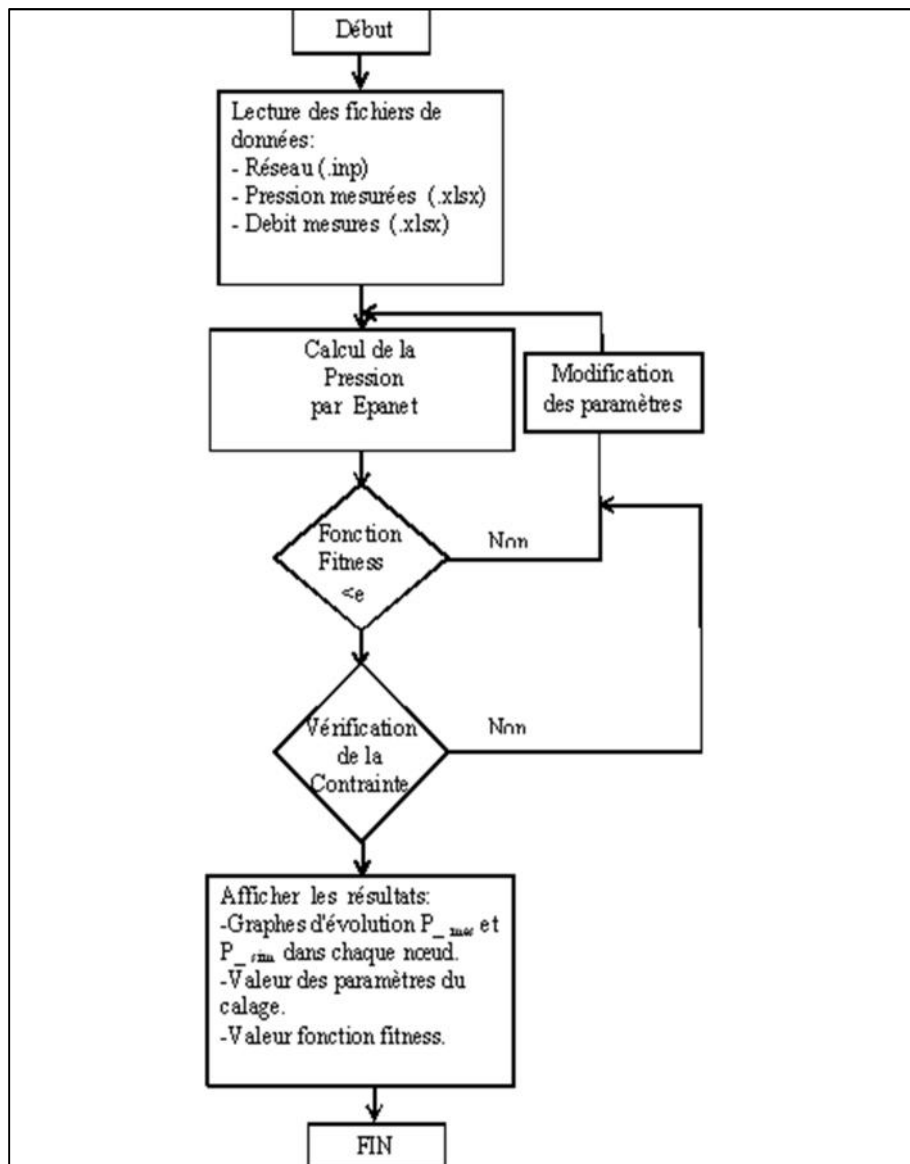


Figure V.1: L'organigramme du principe de fonctionnement.

**Conclusion**

L'outil de calcul qu'on a élaboré est d'une importance capitale, car il nous débarrasse de l'ennui de calage manuel qui prend énormément du temps et surtout dans le cas d'un réseau de grande taille, et ainsi il nous offre la possibilité de se focaliser sur les décisions à prendre.

Et si de plus on dispose d'un outil informatique puissant, l'opération de calage ne prendra que quelques minutes et ceci va nous permettre d'explorer beaucoup plus d'alternatives.

L'élaboration de cette outil nous a pris énormément du temps car la manipulation de la bibliothèque de liens dynamiques (DLL) EN2Toolkit est d'une difficulté exceptionnelle.

Chapitre VI

**Application et  
interprétation des  
résultats**

**Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons mettre en application l'outil pour le calage des modèles hydrauliques de la ville de Mohammadia wilaya d'Alger.

Nous commencerons par une brève présentation de la zone d'étude. Ensuite nous passerons à la représentation de l'état initial du modèle (avant le calage) Et pour terminer, nous afficherons les différents résultats obtenus (après le calage) avec les interprétations qui leur correspondent.

**VI.1 Présentation du Réseau d'AEP de la Ville de mohammadia**

Le remplissage du reservoir de Mohammadia se fait à partir du réservoir de Borj el Kiffan de capacité de 5000 m<sup>3</sup>. ce dernier est alimenté à partir d'un piquage pratiqué sur la chaine SPIK (adduction Station de traitement de Boudouaou vers la bache de Tafoura).

Le reseau de la ville de Mohammadia est mis sous pression par le réservoir 2500 m<sup>3</sup> (côte du radier : 65 m NGA, côte de trop-plein : 67 m NGA) .Le réservoir est alimenté, par une conduite principale de diamètre 300 mm, la totalité de la ville de Mohammadia se situe entre 3 m et 50m NGA d'altitude. La pression de service du réseau ne dépasse pas les 55 m. Le réseau de distribution présente une longueur de 30 km environ. (Voir annexe II) .

Pour notre travail, il sera suffisant d'opter pour une référence de pression au lieu du réservoir pour éviter des éventuelles vidanges de ce dernier qui peuvent causer des problèmes pendant la simulation; cette référence de pression peut être obtenue dans *EPANET* par l'installation d'une bache infinie et de lui attribuer une charge totale égale à la côte du trop plein du réservoir.

**VI.2) Positionnement des points de mesure****VI.2-1) ville Mohammadia**

Le schéma ci-dessous représente les différents points de mesure de pression disponible pour le reseau Mohammadia. Concernant les mesures de débits il n'ya qu'une seule mesure correspondant à la conduite principale de 200 mm qui alimente le réseau de distribution.



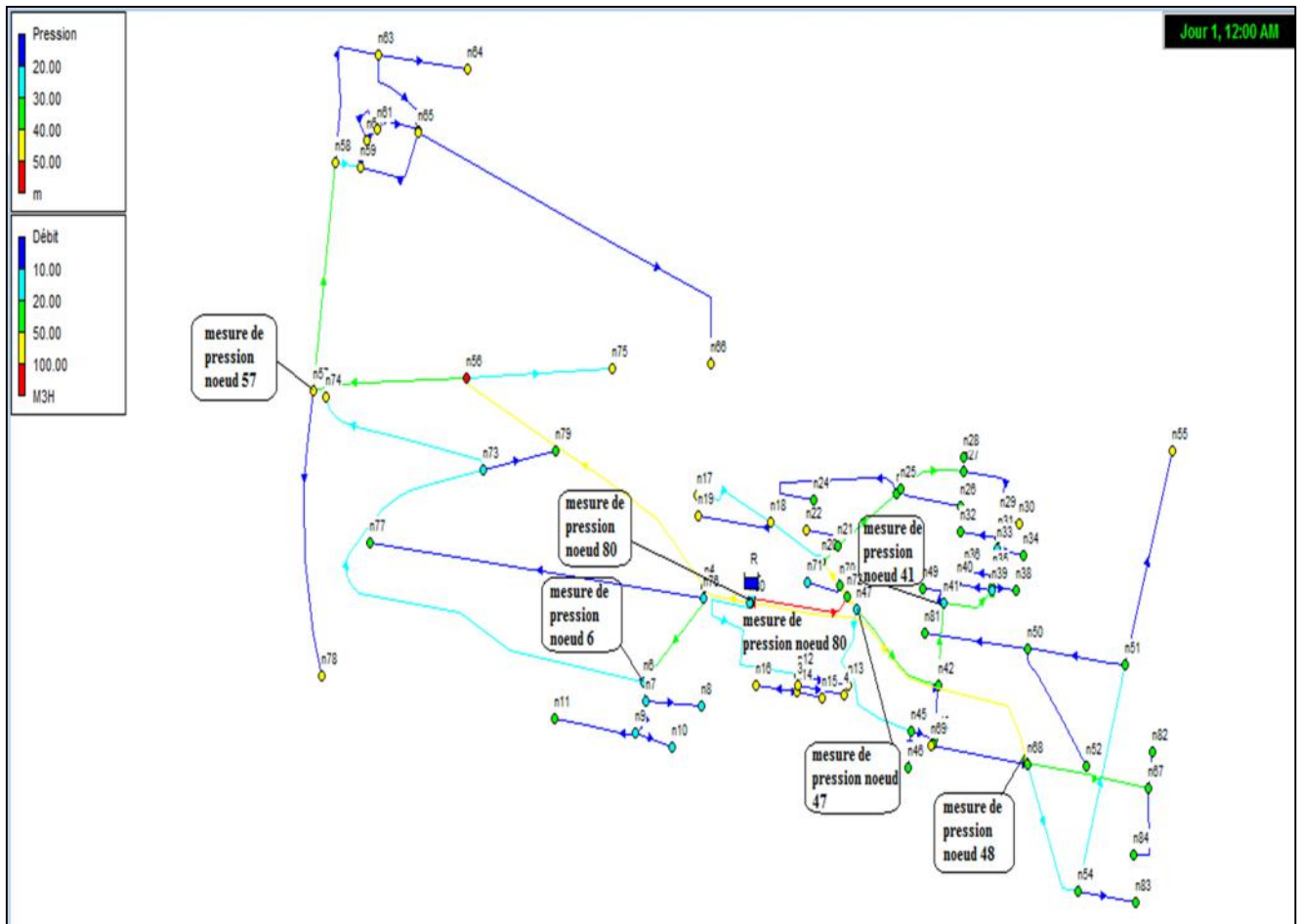


Figure VI.2 : Positionnement des points de mesure de reseau Mohammadia.

VI.3 Situation initiale (avant le calage)

VI.3.1 Réseau Mohammadia

Les figures (VI.3), (VI.4), (VI.5)(VI.6), (VI.7), et (VI.8) représentent les variations des pressions aux différents points de mesure :

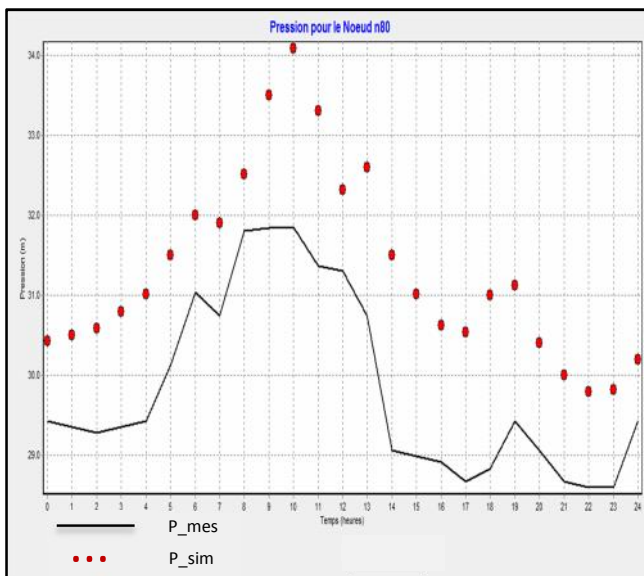


Figure VI.3 :Variations des pressions mesurées et simulées du noeud 80.

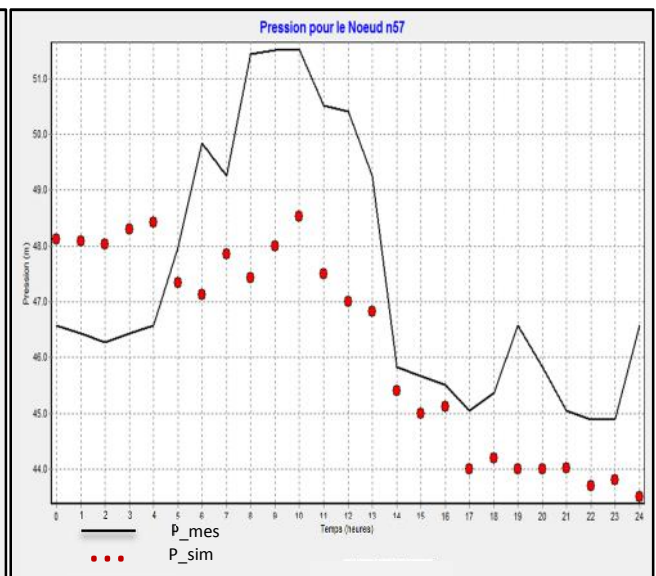
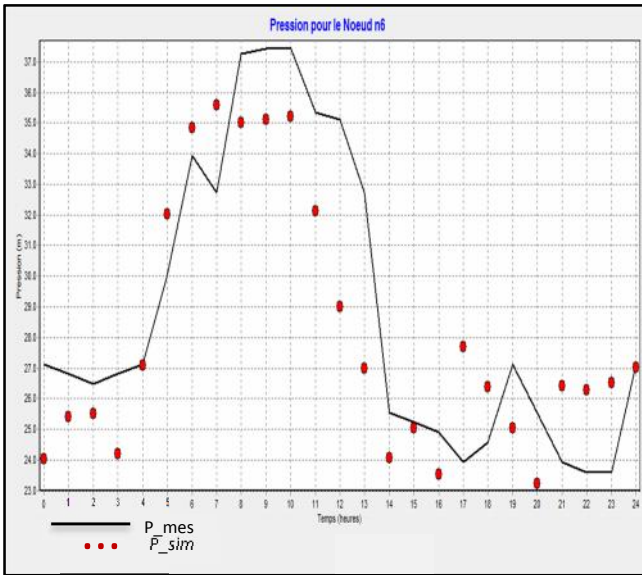
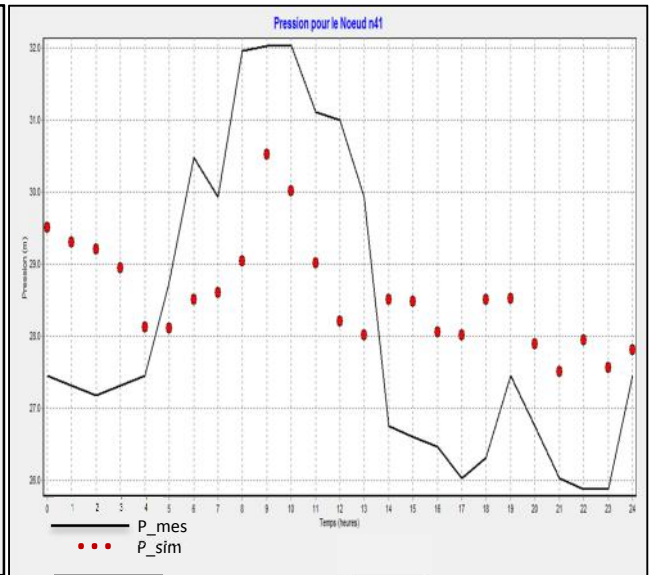


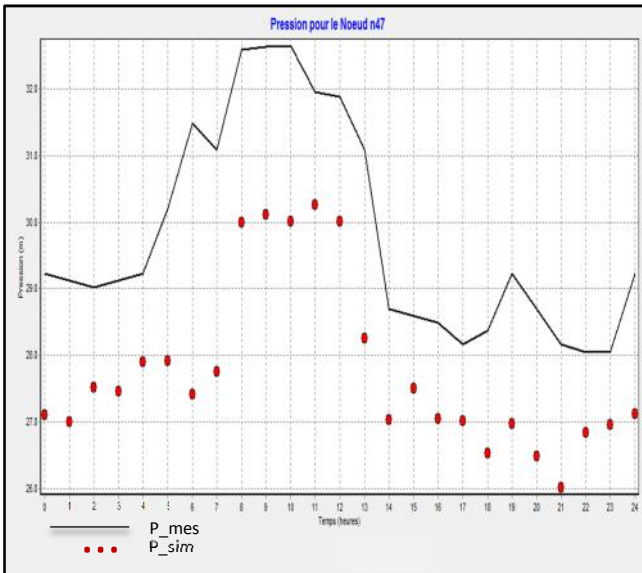
Figure VI.4 :Variations des pressions mesurées et simulées du noeud 57.



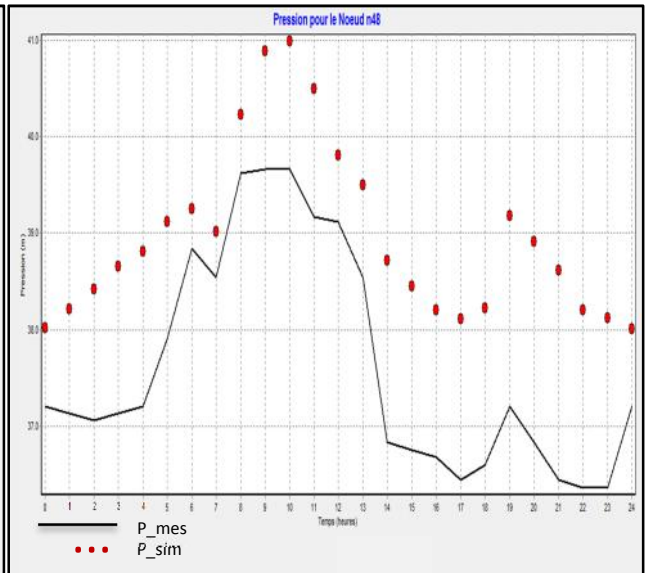
**Figure VI.5 :** Variations des pressions mesurées et simulées du nœud 6.



**Figure VI.6 :** Variations des pressions mesurées et simulées du nœud 41.



**Figure VI.7 :** Variations des pressions mesurées et simulées du nœud 47.



**Figure VI.8 :** Variations des pressions mesurées et simulées du nœud 48.

**Commentaire :**

Les figures au dessus montrent les écarts entre les pressions mesurées (réel) et les pressions simulées dans les nœuds de mesures avant le calage pour minimiser ce dernier on va caler notre réseau pour que les deux courbe vont superposer (pression simulée doit être égale à la pression mesurée).

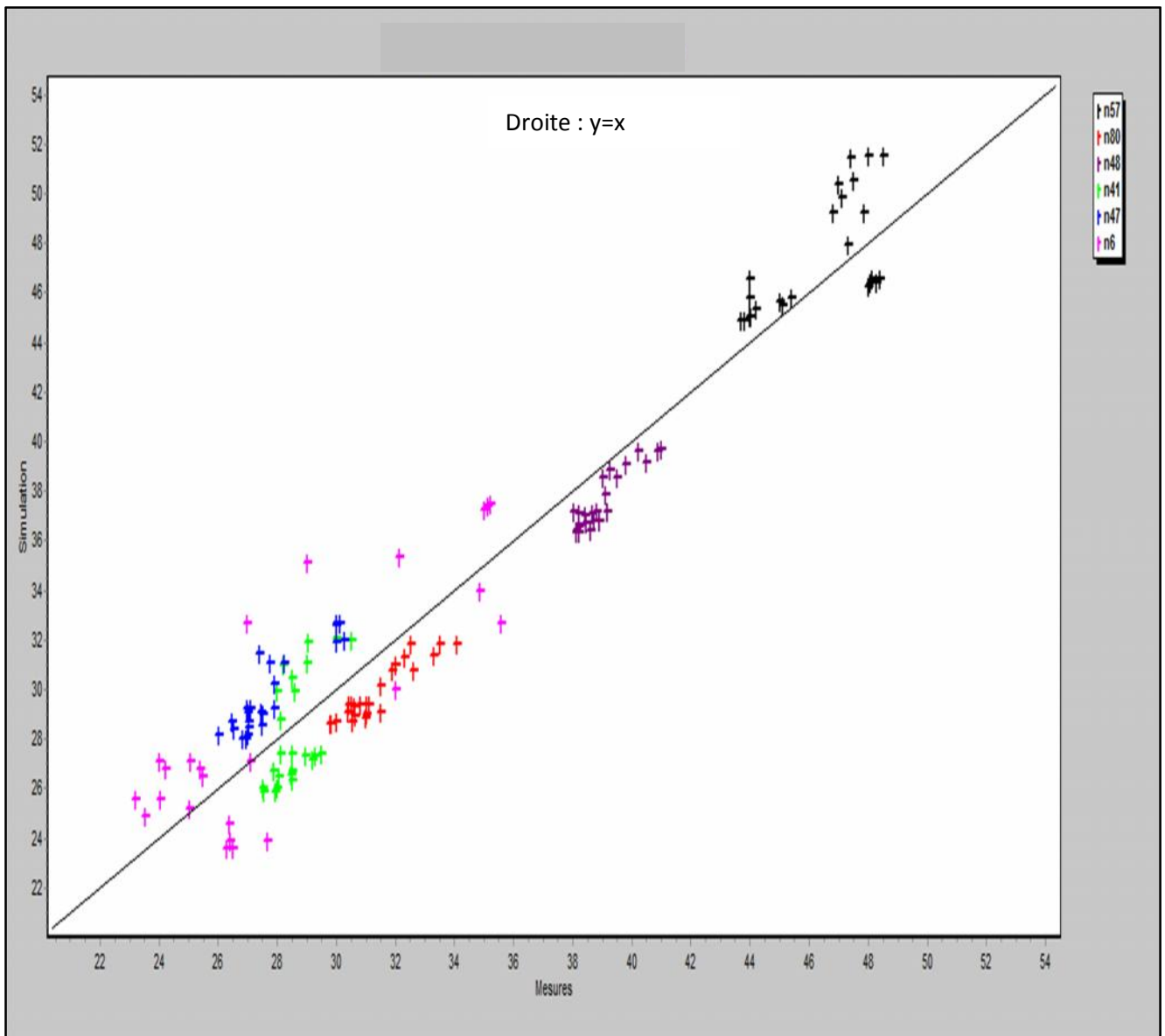
Le tableau VI.1 représente les moyennes et les écarts type des différences entre les pressions mesurées et simulées pour chaque nœud de mesure pendant la durée de la simulation (24 heures).

**Tableau VI.1** : Moyennes et écarts type des différences entre les pressions mesurées et simulées :

Point de Mesure	Nombre Obs	Moyen Obs	Moyen Sim	Erreur Moy
n57	24	46.32	47.44	1.840
n80	24	31.37	29.86	1.511
n48	24	39.01	37.64	1.369
n41	24	28.59	28.25	1.767
n47	24	27.79	29.82	2.030
n6	24	28.18	28.93	2.370
Réseau	144	33.54	33.66	1.814

L'erreur moyenne de tous les nœuds est de : 1,814 m.

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



**Figure VI.9** : Les pressions simulées et les pressions mesurées avant le calage réseau de Mohammadia.

**Commentaire :** la figure VI.9 montre la corrélation entre les pressions simulées et les pressions mesurées avant le calage pour le réseau de Mohammadia. On voit que le nuage des points est un peu dispersé par rapport à la droite ( $y=x$ ) sur l'axe des (x) on a les pressions mesurées et sur l'axe des (y) on a les pressions simulées.

La corrélation entre Valeurs Moyennes: 0.982

#### VI.4 Résultats obtenus après le calage

Dans cette partie, nous présentons les résultats de calage obtenus pour le réseau de Mohammadia.

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 à l'entrée du réseau.

##### VI.4.1 Les résultats obtenus pour le réseau Mohammadia

###### VI.4.1.1 L'évolution de la fonction fitness

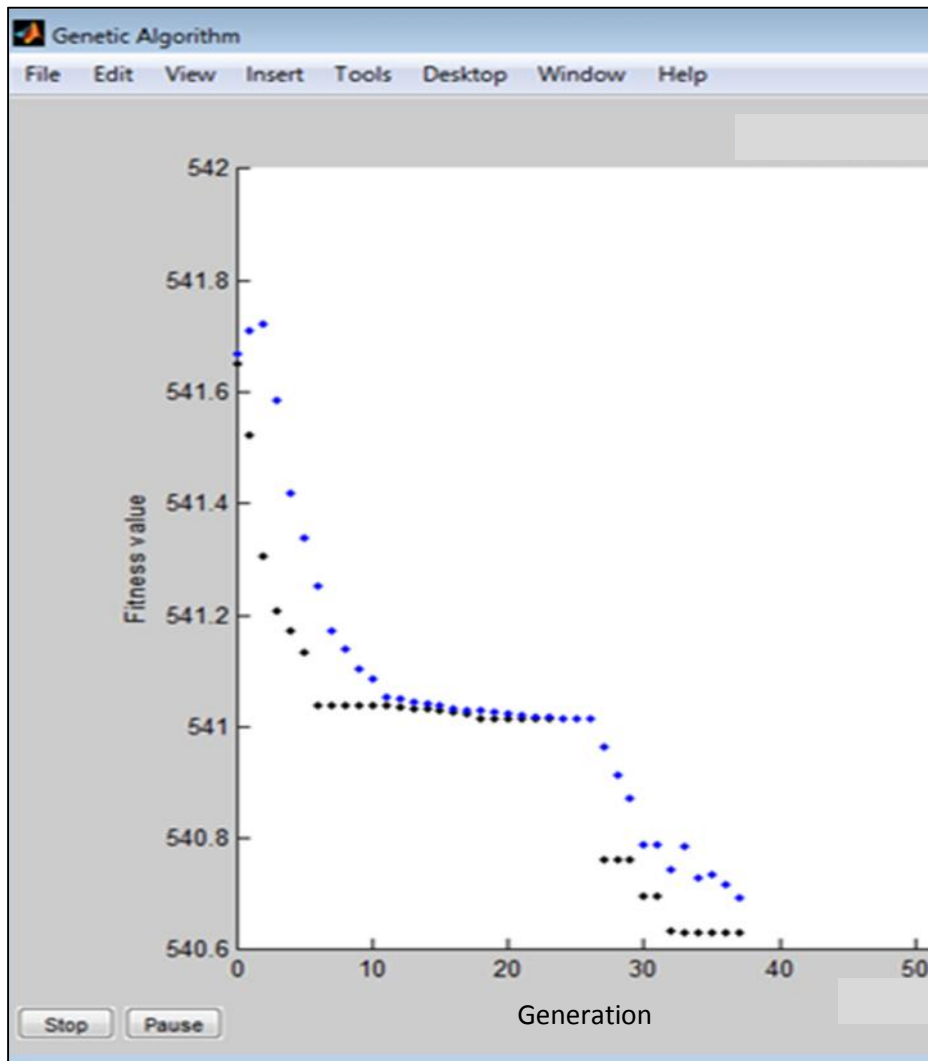


Figure VI.10 : l'évolution de la fonction fitness au cours de calage de modèle de réseau Mohammadia

**Commentaire**

Le graphe VI.10 montre l'évolution de la fonction fitness lors de l'exécution de programme. on voit 3 phases. Pour la première et la troisième phases : la population initiale converge rapidement vers la solution ça veut dire que la population est bonne. Les opérations de croisement et de mutation sont entraînées d'améliorer la population pour trouver le bon résultat. Contrairement à la deuxième phase la fonction fitness reste presque dans la même valeur (entre les générations 7-26). Les opérations de croisement et de mutation n'ont pas trouvé une bonne population pour améliorer la fonction fitness.

**VI.4.1.2 Résultats de calage**

Les graphes ci-dessous représentent les variations des pressions aux différents points de mesure après le calage on voit que les pressions simulées et les pressions mesurées sont superposées on a minimisé l'écart ( $P_{sim} - P_{mes} \approx 0$ ). Dans ce cas là on a un réseau calé.

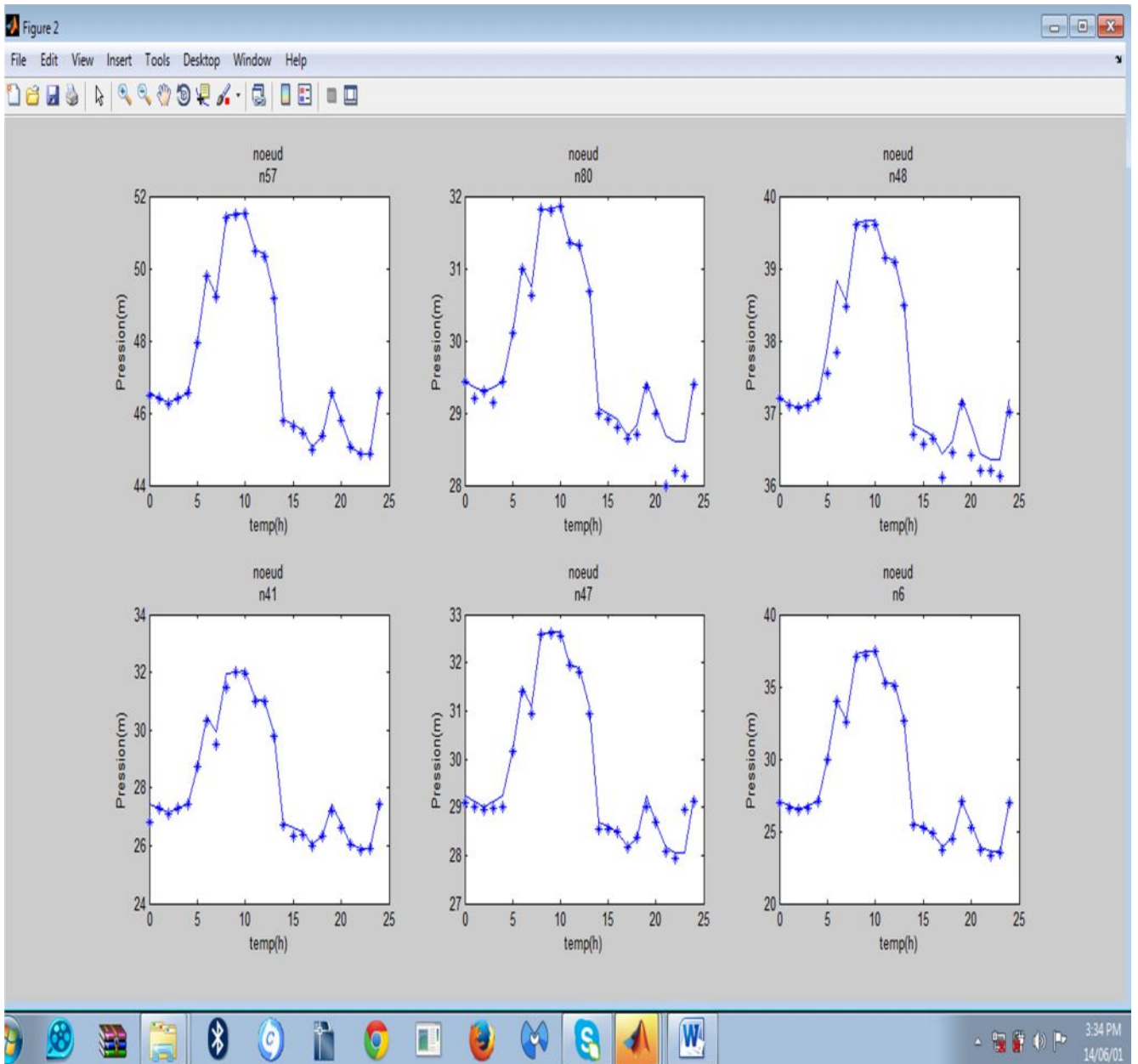
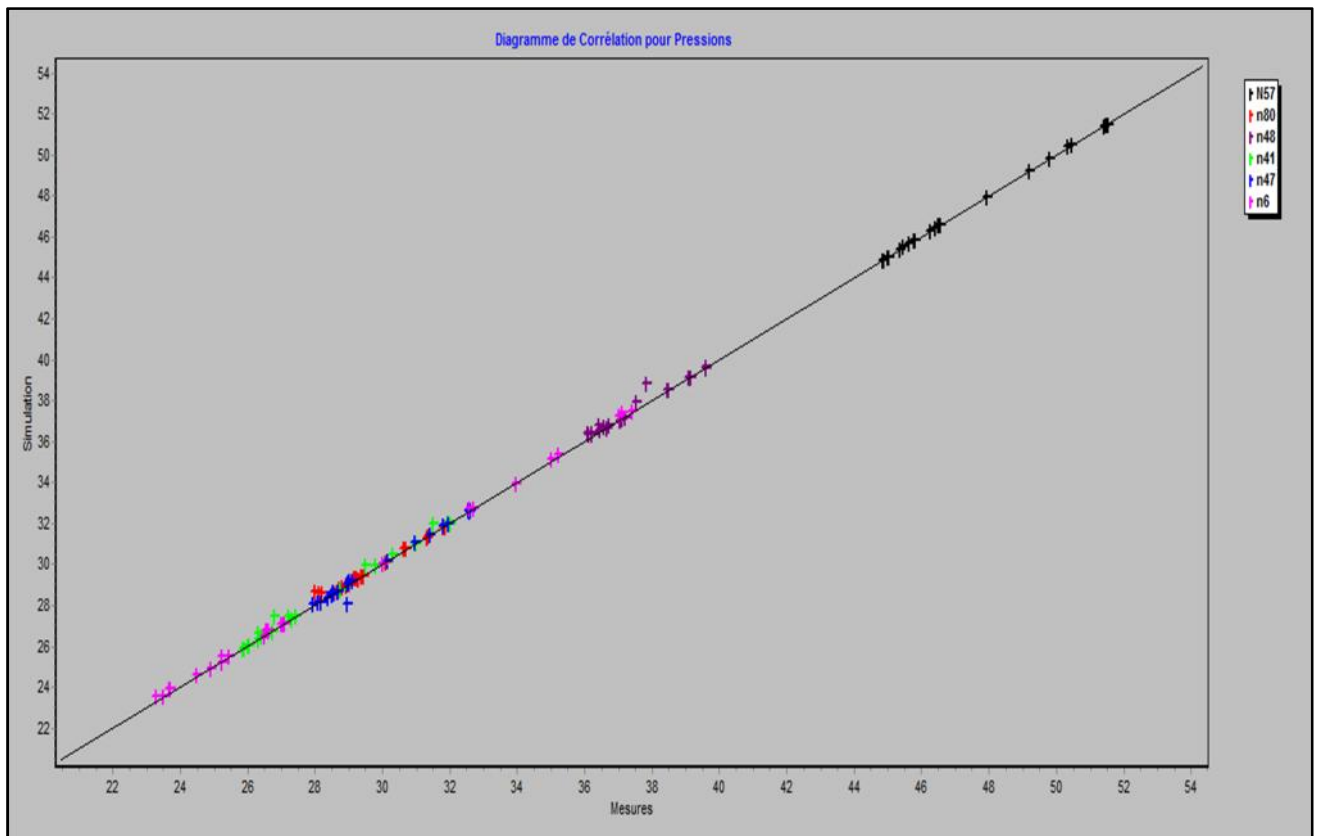


Figure VI.11: Variation des pressions après le calage.

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



**Figure VI.12** : Corrélation entre les pressions simulées et mesurées après le calage du modèle de Mohammadia.

**Commentaire :**

La figure au dessus montre la Corrélation entre les pressions simulées et mesurées après le calage du modèle de Mohammadia ,et on voit que les resultat obtenue son bonne et on a une amelioration remarquable.Tous les points sont sur la droite  $y=x$  La corrélation entre Valeurs Moyennes: 1

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

**Tableau VI.2** : Ecarts types et les erreurs moyennes des pressions des points de mesurés.

Point de Mesure	Nombre Obs	Moyen Obs	Moyen Sim	Erreur Moy
N57	24	47.41	47.44	0.03
n80	24	29.74	29.86	0.117
n48	24	37.48	37.64	0.155
n41	24	28.13	28.25	0.126
n47	24	29.78	29.82	0.117
n6	24	28.8	28.93	0.125
Réseau	144	33.56	33.66	0.112

L'erreur moyenne de tous les nœuds est de 0.112m.

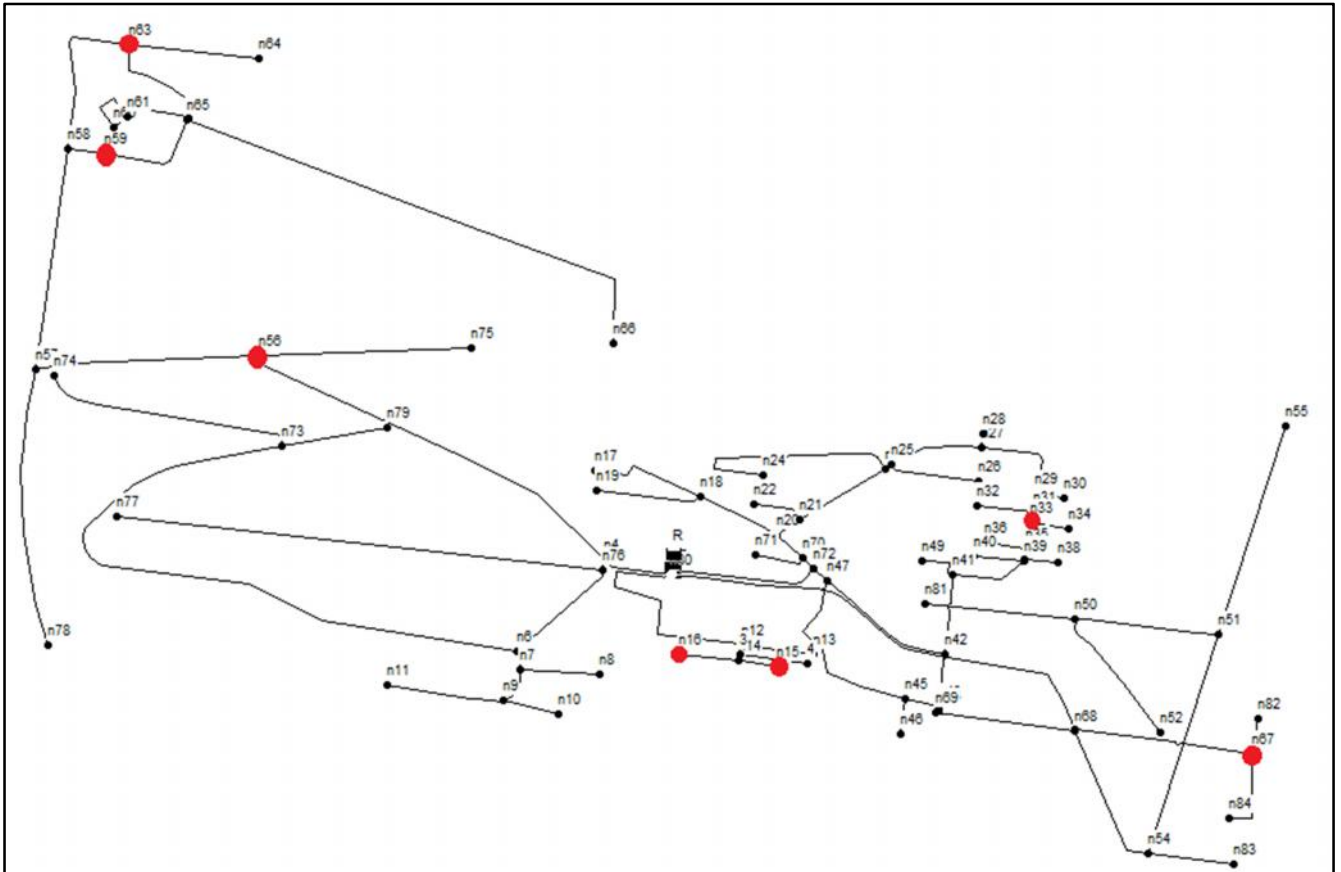
**VI.5 Analyse et interprétation des résultats**

Dans cette partie du travail, nous allons donner les interprétations des différents résultats obtenus pour notre application.

## VI.5.1 Réseau Mohammadia

Après avoir calé le modèle hydraulique du réseau Mohammadia, nous avons constaté une redistribution des demandes de base, et qu'il y a des nœuds qui ont subits 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.

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 VI.13 :** Localisation des points qui présentent une augmentation remarquable de la demande de base.

Après le calage de modèle du réseau Mohammadia, nous avons eu des coefficients de rugosité qui varient de 0,01 jusqu'à 1,5 et la figure VI.14 montre les pourcentages des différents coefficients sur l'ensemble des conduites du réseau qui sont de l'ordre de 93 conduites.



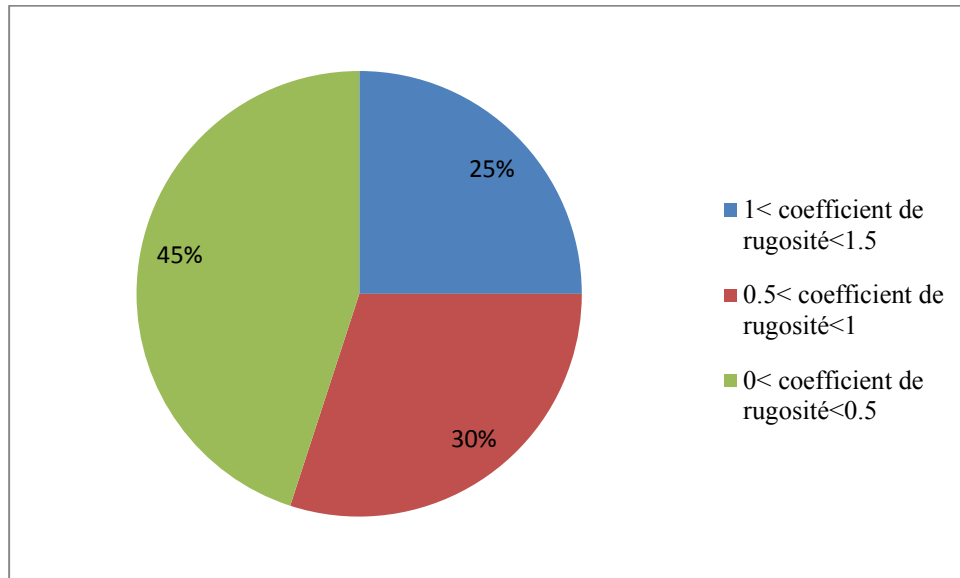


Figure VI.14 :coefficients de rugosité sur l'ensemble des conduites de réseau Mohammadia.

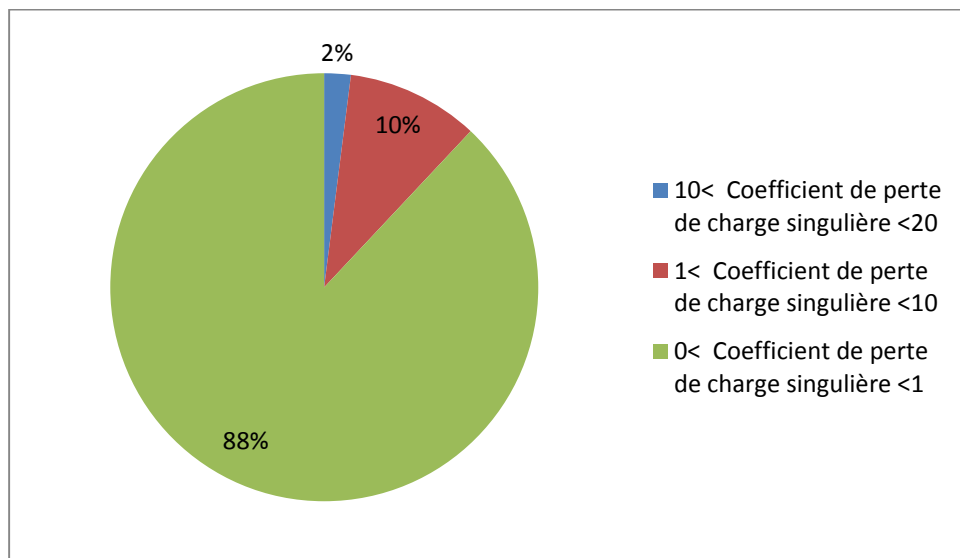


Figure VI.15 :répartition des coefficients de perte de charge singulière pour l'ensemble des conduites de réseau Mohammadia.

**Conclusion**

D'après les résultats obtenus dans l'application, on peut affirmer que l'outil de calage élaboré à donné des résultats performants vu qu'il nous a aide à connaitre la rugosité des conduites et la localisation des points présentant une augmentation de la demande qui nous donne une idée ou se situe les fuites. Il nous permet aussi :

On cas de l'extention de ce reseau, l'utilisation de ce model permettra de voire quel sera son comportement ;

On cas d'une cassure sur des conduites ,le modele nous permettra de determiner les variations des debit et les pressions dans le reseau ;

En fin le calage réalisé nous permettra de mieux gerer le reseau.

## Conclusion générale

Ce travail nous a permis d'élaborer un outil de calage de pression dans les réseaux d'alimentation en eau potable, qui se basant sur la méthode d'optimisation par les algorithmes génétiques.

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 du réseau en extension (.xlsx). 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 d'un réseau d'AEP offrant ainsi un moyen de contourner le calage manuel qui est à la fois ennuyeux, fatiguant et surtout lent dans le cas des modèles de grande taille.

L'utilisation de cette approche est d'une très grande importance, car en plus du calage, elle peut nous servir comme un outil d'aide pour la localisation des fuites comme nous avons présenté dans le chapitre VI.

Les résultats obtenus par cette approche sont conditionnés par la représentativité du modèle hydraulique et la fiabilité des mesures effectuées sur le terrain.

Il est à signaler que l'insertion d'un grand nombre de points de mesures dans le calage est d'un intérêt majeur pour mieux se rapprocher de la réalité et de faire un calage fiable du modèle hydraulique en question. Dans le cas contraire, l'algorithme génétique va nous conduire à des résultats qui n'ont pas de sens physiques.

Pour finir, ce présent travail constitue un bon départ pour la réalisation d'un outil solide pour le calage des modèles d'un réseau d'AEP. Pour parvenir à un outil de calage complet et efficace, il est nécessaire que d'autres travaux succèdent au notre, comme 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.

Nous proposons enfin comme perspectives de se pencher dans des futures projets similaires sur le calage en utilisant d'autres paramètres comme la vitesse, et pourquoi pas la qualité de l'eau.

## Références Bibliographiques

- Alperovits, T., & Shamir, U. (1977). Water Resources Research: "Design of optimal water distribution Systems". Vol 13.N° 6.p.885- 900. U.S.A and Canada.
- Belkacemi,L.(2003). Contribution à l'optimisation des réseaux de distribution d'eau en optent la méthode des Algorithmes génétiques. 128 p. *Projet de fin d'études* : ENP : Alger .
- Dragan, A. [et.al.].(2009). *Quo vadis water distribution model calibration*: "Urban Water Journal".19 p.
- Douaibia, R.(2009). Analyse du dysfonctionnement du système de distribution d'eau potable de l'étage de Birtouta.101p. Mem. Fin d'etu : ENP : Alger.
- Enrique, C. Antonio,F.(1994). improving efficiency and reliability in water distribution systems .395 p.
- Featerstone, R.E., & EL-Jumaily, K.K.(1983)"Optimal diameter selection for pipe networks". Journal of Hydraulic Engineering. ESCE.
- Guesmia, A. (2008).Modélisation d'un réseau de distribution d'eau potable en modulation de *pression*. 128 p. *Projet de fin d'études* : ENP : Alger.
- Guesmia, A. (2011) Amélioration du diagnostic des réseaux d'alimentation en eau potable. 89 p. Mém. Mag. : ENP : Alger.
- Jean-Marc Alliot., Nicolas Durand. (2005) « Algorithmes génétiques ». March 14.
- Kapelan,Z. (2002) Calibration of water distribution system hydraulic model . 335 p .thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering University of EXETER.
- Lansey, K.E., & Mays, L.W. (1989). " Optimisation model for water distribution System design", Journal of Hydraulic Engineering. ESCE: Vol 115: N° 19 :150,route de Fervey CH-1211 Geneva 2 Switzerland.
- Lebdi,F.(1985)." Recherche d'une méthode d'optimisation des réseaux maillés sous pressions". Th. Doct : Institut Nationale Polytechnique : Toulouse.
- Liratni, M. (2001).guide méthodologique pour le diagnostic des réseaux de distribution d'eau potable.99 p.
- Misirdali,M.(2003).a methodology for calculating hydraulic system reliability of water distribution networks .106p.Thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences: The Middle East Technical University.
- Morgan, D.R., & Goolter, I.C.(1985). "Optimal urban water distribution design", Water Resources Research: vol 21:N° 5: p.642- 652:U.S.A.
- Nicolini, M. Giacomello, C. Kalyanmoy, D.(2011).Calibration and Optimal Leakage Management for a Real Water Distribution Network. Journal of Water Resources Planning and Managemen. 9 p :U.S.A .  
departement 1801 alexander bell drive, reston

Nafi, A.(2006). La programmation pluriannuelle du renouvellement des réseaux d'eau potable.232 p. Thèse de Doctorat : Université Louis Pasteur : Strasbourg I.

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

Shamir,U. (1974)."*Optimal design and operation of water distribution Systems*". Water Resources research, vol 10: N 1:U.S.A.

Tabesh, M., Jamsab, M. & Moeini,R .(2011). "*Calibration of water distribution hydraulic models; a comparison between pressure dependent and demand driven analyses*". Urban Water Journal .p5. pramukh arcad,India.

Zabot,M.(2008).Modélisation des réseaux d'alimentation en eau par les méthodes heuristiques et métaheuristiques .95 p . Projet de fin d'études : ENP : Alger .

# **Annexes**

**Annexe I :**

**Tableau V.1 :** Fonctions d'EN2Toolkit.

ENopen	Syntaxe générale	int ENopen( char* f1, char* f2, char* f3)
	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.
	Arguments	f1: nom du fichier Epanet d'entrée (le réseau .inp) f2: nom du fichier de rapport de sortie (.rpt) f3: nom du fichier binaire optionnel de sortie.
ENgetnodetype	Syntaxe générale	int ENgetnodetype (int index, int typecode)
	Syntaxe sous Matlab	calllib('epanet2', 'ENgetnodetype', int index, int typecode).
	Description	avoir la valeur d'un paramètre pour un nœud spécifié.
	Arguments	Index: l'index du nœud considéré. typecode: le code du type  Typecode 0 : nœud de consommation 1 : réservoir 2 : bête d'eau
ENgetnodevalue	Syntaxe générale	int ENgetnodevalue (int index, int paramcode, float value)
	Syntaxe sous Matlab	calllib('epanet2', 'ENgetnodevalue', Int index, paramcode, float value).
	Description	avoir la valeur d'un paramètre pour un nœud spécifié.
	Arguments	Index: l'index du nœud considéré. paramcode: le code du paramètre Value: la valeur du paramètre  paramcode 0 : élévation 1 : demande de base 2 : courbe de modulation 3 : coefficient de décharge 11 : pression
ENgetlinktype	Syntaxe générale	int ENgetlinktype (int index, int typecode)
	Syntaxe sous Matlab	calllib('epanet2', 'ENgetlinktype', int index, int typecode).
	Description	avoir la valeur d'un paramètre pour un arc spécifié.

	Arguments	Index: l'index de l'arc considéré. typecode: le code du type Typecode 1 : conduite 2 : pompe 3 : vanne de réduction de pression
ENgetnodevalue	Syntaxe générale	int ENgetlinkvalue (int index, int paramcode, float value)
	Syntaxe sous Matlab	calllib('epanet2', 'ENgetlinkvalue', Int index,paramcode, float value).
	Description	avoir la valeur d'un paramètre pour un arc spécifié.
	Arguments	Index: l'index de l'arc considéré. typecode: le code du type  Paramcode 0 : longueur 1 : diamètre 3 : coefficient de perte de charge singulière 5 : coefficient de rugosité 8 : débit 9 : vitesse
Ensetnodevalue	Syntaxe générale	int ENgetlinkvalue (int index, int paramcode, float value)
	Syntaxe sous Matlab	calllib('epanet2', 'ENgetlinkvalue', Int index, paramcode, float value).
	Description	avoir la valeur d'un paramètre pour un arc spécifié.
	Arguments	l'index du nœud considéré. paramcode: le code du paramètre Value: la valeur du paramètre  Paramcode 0 : élévation 1 : demande de base 3 : coefficients émetteurs
Ensetnodetype	Syntaxe générale	int ENsetoption( int optioncode, float value )
	Syntaxe sous Matlab	calllib('epanet2', 'ENsetoption', int optioncode, float value).
	Description	modifier la valeur d'une option particulière d'analyse
	Arguments	Index: l'index du nœud considéré. paramcode: le code du paramètre Value: la valeur du paramètre
ENclose	Syntaxe générale	int ENclose( void )

	Syntaxe sous Matlab	calllib ('epanet2','ENclose');
	Description	fermer l'Epanet toolkit
ENSolveH	Syntaxe générale	int ENSolveH( void )
	Syntaxe sous Matlab	calllib('epanet2','ENSolveH');
	Description	lancer une simulation hydraulique complète avec des résultats pendant toutes les périodes.
ENsaveH	Syntaxe générale	int ENsaveH( void )
	Syntaxe sous Matlab	calllib ('epanet2','ENsaveH');
	Description	transférer les résultats de la simulation hydraulique du fichier binaire d'hydraulique au fichier binaire de sortie (sauvegarde des résultats).



**Annexe II : Figure VI.1 : Schéma représentatif de la zone d'étude.**

