الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محند أولحاج
-البويرة-
معهد التكنولوجيا

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Institut de Technologie

جامعة البويرة

Département de Génie de l'Eau

Mémoire de Fin d'Études

En vue de l'obtention du diplôme

de Master professionnelle en :

Hydraulique

Présenté par :

M. Jaavar El Houcein HACHEM

THÈME

OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE

Devant le jury composé de :

	Nom	Prénom	Grade	Qualité
M.	Salah Eddine	MOULAI	**MAA – Institut de Technologie (UAMOB)**	**Président du jury**
M^{me}.	Amina	REZIG	MCA – Institut de Technologie (UAMOB)	Examinateur
M.	Okba	FERGANI	MCB – Institut de Technologie (UAMOB)	Examinateur
M.	Saad	DAHMANI	MCA – Institut de Technologie (UAMOB)	Encadrant

Année Universitaire : 2025/2026

الملخص:

يهدف هذا العمل إلى دراسة التصميم الأمثل لشبكات توزيع مياه الشرب بهدف تقليل تكاليف الاستثمار مع ضمان الالتزام بالقيود الهيدروليكية. ولتحقيق هذا الهدف، تم الجمع بين الطريقة متعددة الخطية لحساب التدفقات والضغوط وخوارزمية الاستدلال الفوقي "اكتساب ومشاركة المعرفة" من أجل البحث عن التصميم الأمثل. كما تم تطوير برنامج بلغة (MATLAB) للتحليل الهيدروليكي والتحقق من صحة النتائج. وقد سمحت النتائج التي تم الحصول عليها بالوصول إلى تكلفة مثالية تبلغ 419000لوحدة تغذية لشبكة "الشبكتين الحلقتين"، وتكلفة قدرها 6076000دولار أمريكي لشبكة "هانوي"، وتكلفة قدرها 468357,281ليرة تركية لشبكة "الجاذبية المشتركة". كما تمت مقارنة النتائج مع دراسات سابقة ومنشورة، وتبرز هذه النتائج كفاءة ومتانة خوارزمية الاستدلال الفوقي "اكتساب ومشاركة المعرفة" من أجل البحث عن التصميم الأمثل لشبكات مياه الشرب، مما يضمن أداءً هيدروليكيًا ملائمًا.

كلمات مفتاحية :التصميم الأمثل، المحاكاة، شبكات توزيع مياه الشرب، التحسين الفوقي الاستدلالي، القيود الهيدروليكية.

Résumé :

Cette étude a pour objectif le dimensionnement optimal des réseaux de distribution d'eau potable afin de réduire les coûts d'investissement tout en garantissant le respect des contraintes hydrauliques de fonctionnement. Pour atteindre cet objectif, une combinaison entre la méthode multilinéaire pour le calcul des débits et des pressions et l'algorithme méta-heuristique Gaining-Sharing Knowledge (GSK) pour l'optimisation a été développée. Un programme a été élaboré sous MATLAB pour l'analyse hydraulique et l'optimisation du dimensionnement. Les résultats obtenus ont permis d'atteindre un coût optimal de 419000 unités monétaires pour le réseau Two-Loop, un coût de 6.076×10^6 USD pour le réseau Hanoi et un coût de 468 357.28 TL (livre turque) pour le réseau gravitaire combiné. Ces résultats ont été confrontés à ceux des études précédemment publiées, mettant en évidence l'efficacité et la robustesse de l'approche développée pour résoudre les problèmes de dimensionnement des réseaux d'eau potable, tout en garantissant des performances hydrauliques adéquates.

Mots-clés : Dimensionnement optimal, Simulation, Réseaux de distribution d'eau potable, Optimisation méta-heuristique, Contraintes hydrauliques.

Abstract

This study aims at the optimal design of drinking water distribution networks in order to reduce investment costs while ensuring compliance with hydraulic operating constraints. To achieve this objective, a combination of the multilinear method for the calculation of flow rates and pressures and the meta-heuristic algorithm Gaining-Sharing Knowledge (GSK) for optimization was developed. A program was developed in MATLAB for hydraulic analysis and design optimization. The results obtained made it possible to achieve an optimal cost of 419,000 monetary units for the Two-Loop network, a cost of 6.076×10^6 USD for the Hanoi network, and a cost of 468,357.28 TL (Turkish Lira) for the combined gravity network. These results were compared with those of previously published studies, highlighting the efficiency and robustness of the developed approach in solving the design problems of drinking water networks, while ensuring adequate hydraulic performance.

Keywords: Optimal design, Simulation, Drinking water distribution networks, Meta-heuristic optimization, Hydraulic constraints.

Remerciements

Nous exprimons notre grande reconnaissance à Dieu, pour nous avoir donné la force et le courage nécessaires à la réalisation de cette modeste œuvre.

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre gratitude envers tous ceux qui ont participé à sa concrétisation, notamment notre encadrant, M. Saad DAHMANI, pour son soutien et ses conseils précieux.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à M. Salah Eddine MOULAI, M. Okba FERGANI et M me. Amina REZIG pour avoir accepté D'examiner ce modeste travail.

On tient vraiment à remercier tous les enseignants, qui ont assuré pour la qualité du cours et les super compétences qu'ils nous ont transmis.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à l'unité CTH Bouira, et plus particulièrement à Monsieur Mokhnach Mohamed, pour son accueil lors du stage, son encadrement méticuleux, son soutien inestimable et ses efforts incessants.

Jaavar El Houcein HACHEM

Dédicace

À tous ceux qui, d'une façon ou d'une autre, par leur soutien, leurs encouragements et leur patience, m'ont aidé à réaliser avec succès ce projet jusqu'à sa conclusion.

À ma mère KHADIJATOU LEBAIT, qui est pour moi une source de vie, de tendresse et de bravoure. Je lui suis reconnaissant pour ces sacrifices et pour l'amour dont elle m'a constamment enveloppé.

À mon père El Houcein HACHEM, qui est toujours là pour me soutenir et me protéger. Que Dieu te garde en bonne santé et t'accorde une longue vie.

À mon cher frère HACHEM et mes chères sœurs ETAHRA et AMINETOU, pour leur soutien, leurs encouragements sincères et leurs précieux conseils qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours

Je dédie ce travail à mes chères tantes, à mes chers oncles, à mes cousins et à mes cousines, en témoignage de mon profond amour. Je remercie tous mes proches et mes êtres chers d'être ma force et ma plus belle source d'inspiration.

À mes amis, à mes collègues et à toutes les personnes qui ont partagé des moments précieux avec moi durant ces années.

Jaavar El Houcein HACHEM

Tableau 1.1 **Sommaire**

Liste des tableaux VII

Liste des figures VIII

Liste des abréviations IX

Introduction générale 1

Chapitre I: Généralités sur les réseaux de distribution d'eau potable 4

I Introduction 4

II Système de distribution d'eau potable 4

II.1 Les ouvrages de captage 5

II.2 Les stations de pompage 5

II.3 Les stations de traitement des eaux 5

II.4 Les réservoirs de stockage 6

II.5 L'adduction et la distribution 6

III Classification des réseaux d'alimentation en eau potable 7

III.1 Les réseaux ramifiés 7

III.2 Les réseaux maillés 7

III.3 Les réseaux étagés 8

III.4 Les réseaux à alimentations distinctes 8

IV Composants d'un réseau d'AEP 9

IV.1 Nœud 9

IV.2 Tronçon 9

IV.3 La conduite maîtresse ou principale 9

IV.4 Les vannes 10

IV.5 Ventouse 10

IV.6 Poteaux d'incendie 10

IV.7 Les pompes 10

V Paramètres hydrauliques 11
V.1 Diamètre des conduites 11
V.2 Limite de vitesse 11
V.3 Pressions 11
VI Calcul hydraulique 12
VI.1 Calcul de diamètres 12
VI.2 Calcul des pertes de charge totales 12
VII Problèmes rencontrés dans un réseau d'AEP 13
VIII La gestion du réseau d'AEP 14
IX Conclusion 14
Chapitre II: Introduction à l'optimisation 10
I Introduction 15
II Définition générale 15
III Optimisation combinatoire 16
IV Classification des problèmes d'optimisation selon le nombre d'objectifs 16
V Résolution d'un problème d'optimisation combinatoire 16
V.1 Les méthodes exactes 17
V.2 Les méthodes approchées 17
VI Conclusion 20
Chapitre III: Méthode d'optimisation basée sur l'acquisition et le partage de connaissances 14
I Introduction 21
II Définition de GSK 21
III Les éléments de base du GSK 21
IV Les opérateurs de GSK 23
IV.1 Initialisation de la population initiale 23
IV.2 Évaluation (Fitness ou valeur d'aptitude) 24

IV.3 La fonction objectif 24
IV.4 Tri de la population 24
IV.5 Calculer de D_{junior} et D_{senior} 25
IV.6 Phase Junior 26
IV.7 Phase senior 27
IV.8 Mise à jour des solutions 28
IV.9 Sélection 28
IV.10 Création de la nouvelle génération 29
V Les paramètres de l'algorithme GSK 29
VI Organigramme de l'algorithme GSK 30
VII Conclusion 31
Chapitre IV: Calcul des débits et des pressions par la Méthode Multilinéaire 14
I Introduction 32
II Équations gouvernant l'écoulement dans un réseaux de distribution d'Eau 32
II.1 La loi des nœuds 32
II.2 Loi des mailles 34
III Description de la méthode multilinéaire 35
III.1 Principe de linéarisation 35
III.2 Détermination du pas de discrétisation 36
III.3 Mise à jour du nombre de subdivisions 36
III.4 Détermination de la borne inférieure et supérieure de l'intervalle de recherche 36
IV Applications de la méthode multilinéaire aux réseaux de distribution d'eau 37
V Application de la méthode multilinéaire pour une formulation Q-H 39
VI La méthode du complément de Schur 41
VII Algorithme de la méthode de multilinéaire 43
VIII Exemple numérique de la méthode multilinéaire 43

IX Conclusion 47
Chapitre V: Optimisation de dimensionnement des réseaux d'AEP 30
I Introduction 48
II Formulation du problème d'optimisation 48
II.1 Variables de décision 49
II.2 Fonction objectif 49
II.3 Les contraintes et pénalité 49
III Processus du programme d'optimisation 51
IV Application aux réseaux de référence 52
IV.1 Réseaux à deux boucles « Two-loop » 52
IV.2 Réseaux urbain Hanoï « Hanoi » 55
IV.3 Réseau gravitaire combiné « Combined Gravity » 58
V Évaluation de la robustesse de l'approche proposée (ML + GSK) 63
VI Conclusion 64
Conclusion générale 65
Références bibliographiques : 66
Annexe 1 : Les caractéristiques des nœuds et des conduites du réseau (tow-loop) 68
Annexe 2 : Les caractéristiques des nœuds et des conduites du réseau (Hanoi) 69
Annexe 3 : Les caractéristiques des nœuds et des conduites du réseau (Combined Gravity) 71
Annexe 4 : Algorithme qui détail la programmation de la méthode multilinéaire 75
Annexe 5 : Algorithme qui détail la programmation de la fonction objectif du méthode GSK 78
Annexe 6 : Algorithme qui déterminent le déroulement de la méthode de GSK 79

Liste des tableaux

Tableau I-1: Pression demandée de réseau AEP (ABD ENNAFAA, 2024) 11
Tableau I-2 : Coefficient d'écoulement de Hazen-Williams (AZZEDINE & STITA, 2019)..... 13
Tableau III-1 : Example de calcul de nombre de dimension(D) pour chaque phase 26
Tableau IV-1: Les équations aux nœuds du figure ci-dessus (IV-2) 34
Tableau IV-2 : Les équations d'énergie dans les conduites de figure (IV-2) 35
Tableau IV-3 : Données hydrauliques relatives à l'exemple numérique..... 43
Tableau V-1 : Diamètre commerciale et cous unitaire (Tow-loop) (Batmaz & Kayaalp, 2022)..... 53
Tableau V-2 : Résultats de l'algorithme GSK pour le réseau (Tow-loop) 54
Tableau V-3 : Comparaison du coût obtenu par l'algorithme GSK avec les résultats des études antérieures (Tow-loop) 54
Tableau V-4 : Diamètre commerciale et cous unitaire (Hanoi) (Batmaz & Kayaalp, 2022) 56
Tableau V-5 : Résultats de l'algorithme GSK pour le réseau (Hanoi)..... 57
Tableau V-6 : Comparaison du coût obtenu par l'algorithme GSK avec les résultats des études antérieures (Hanoi) 58
Tableau V-7 : Diamètre commerciale et cous unitaire (Combined Gravitaire)..... 59
Tableau V-8 : Résultats de l'algorithme GSK pour le réseau (Combined Gravity)..... 61
Tableau V-9 : Tableau des essais de la robustesse de l'approche (ML + GSK)..... 63
Tableau V-10 : Les résultats statistiques des approche (ML + GSK) 64

Liste des figures

Figure I-1 : Schémas d'un système d'alimentation d'eau potable 4
Figure I-2 : Adduction gravitaire (MORARECH, 2016-2017) 6
Figure I-3 : Adduction par refoulement (MORARECH, 2016-2017) 6
Figure I-4 : Schéma explicatif d'un réseau ramifié (Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018) 7
Figure I-5 : Schéma explicatif d'un réseau maillé (Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018) 8
Figure I-6 : Réseau étagés (ABD ENNAFAA, 2024) 8
Figure I-7 : Composants Physiques d'un Système de Distribution d'Eau (ABD ENNAFAA, 2024) 9
Figure I-8 : Une vanne 10
Figure II-1: Classification des méthodes d'optimisation (MAQROT, 2019) 17
Figure II-2 : Schémas explicatifs des méthodes métaheuristique 18
Figure III-1: Les éléments de base de GSK (Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018)(Adopter de référence) 22
Figure III-2: Phase junior 27
Figure III-3 : Tri phase senior 27
Figure III-4 : Phase senior 28
Figure III-5 : Organigramme du processus d'optimisation par la méthode GSK 30
Figure IV-1: Débits entrant et sortants dans un nœud 33
Figure IV-2 : Exemple d'un réseau d'une seul maillé 33
Figure IV-3: Linéarisation de la fonction non linéaire 38
Figure V-1 : Schéma du réseau à deux boucles (Tow-loop) avant l'optimisation 52
Figure V-2 : Évolution du coût de la solution GSK appliquée au réseau à deux boucles. 53
Figure V-3 : Schéma du réseau (Hanoi) avant l'optimisation 55
Figure V-4 : Évolution du coût de la solution GSK appliquée au réseau de (Hanoi) 56
Figure V-5 : Schéma du réseau de (Combined Gravity) avant l'optimisation 59
Figure V-6 : Évolution du coût de la solution GSK appliquée au réseau de (Combined Gravity) 60

Liste des abréviations

- AEP : Alimentation en eau potable.
- RDE : Réseau de distribution d'eau.
- mm : millimètre (unité de diamètre).
- l/s : Litre par seconde (unité de débit).
- m^3 : Mètres cubes (volume).
- m/s : Mètre par seconde (vitesse).
- m : Mètre (hauteur, pression).
- Q : Débit (volume d'eau par unité de temps).
- h_l : Pertes de charge linéaires.
- h_s : Pertes de charge singulières.
- L : Longueur.
- R : Resistance de la conduite.
- D : Diamètre nominal.
- $C_{H\text{-}W}$: Coefficient de rugosité de Hazen-Williams.
- GSK : Gaining-Sharing Knowledge.
- PSO: Particle Swarm Optimization.
- BBO-IWO: Biogeography Based optimization and Invasive Weed Optimization.
- LB: Linear Programming.
- GAs : Genetic Algorithms, Gas.
- K : Le taux de connaissance qui est un nombre réel > 0.
- D : Taille de problème.
- G : Représente le numéro de génération.
- GEN : Représente le nombre maximal de générations.
- q_n : Le débit de demande soutiré au nœud n (m3/s).
- H : Charges aux nœuds (m).
- P : La pression au nœud (m.c.e).
- (m.c.e) : Mètre colonne d'eau (unité de pression).
- USD : United States Dollar.

Introduction générale

Dans l'ensemble des régions du monde, les systèmes de distribution d'eau potable requièrent des investissements substantiels de la part des autorités publiques. À titre d'information, selon les projections du « World Resources Institute », le coût mondial de la gestion durable de l'eau atteindra 1,04 Milliard de dollars par an d'ici l'année 2030. Cette analyse met en exergue l'importance cruciale d'une conception optimale, d'un entretien régulier et d'un renouvellement continu de ces réseaux. Ces pratiques sont essentielles pour assurer la pérennité et l'efficacité de ces investissements stratégiques (BOUZERD & CHIBANE , 2024).

Un réseau de distribution d'eau (RDE) est fait de plusieurs éléments : des réservoirs, des pompes, des conduites, et des vannes. Près de 80 % du budget d'un projet d'approvisionnement en eau sont utilisés pour la distribution de l'eau. Il faut donc concevoir un réseau de distribution d'eau qui soit à la fois économique et fiable. Pour améliorer le réseau d'eau, il faut concevoir un réseau fiable, efficace et pas cher qui répond aux besoins en eau tout en maintenant une pression suffisante.

C'est important pour préserver les ressources en eau, mais aussi pour réduire les besoins en énergie et les coûts de maintenance. On peut classer l'amélioration des (RDE) en plusieurs catégories : le design, le fonctionnement, la calibration, le niveau de service, le système de surveillance et le test du réseau. Ce papier rechercher la taille optimale des conduites dans un réseau de distribution d'eau avec une structure déjà fixée (ABDELOUAHAB, 2010).

Il existe plusieurs méthodes de simulation hydraulique pour calibrer les réseaux de distribution d'eau potable (notamment pour le calcul des débits, des vitesses et des pressions), telles que les méthodes de Hardy-Cross, de Newton-Raphson, l'algorithme du gradient global (utilisé par EPANET et WaterCAD) ou encore la méthode multilinéaire. Leurs performances en termes de précision et de nombre d'itérations nécessaires à la convergence, s'avèrent variables. Par ailleurs, peu de logiciels intègrent des méthodes d'optimisation pour le dimensionnement des nouveaux réseaux ou le renforcement des infrastructures existantes. Pourtant, face à l'augmentation constante des investissements requis pour l'alimentation en eau potable, les gestionnaires recherchent désormais des réseaux plus efficients et optimisés. L'optimisation du dimensionnement des réseaux d'AEP englobe plusieurs aspects, tels que l'optimisation de la topologie (la forme) du réseau, le coût de réalisation ou de réhabilitation, ou encore l'emplacement des vannes, … etc. Dans ce cadre, la présente étude a pour finalité de déterminer le diamètre optimal des tronçons afin de garantir les pressions réglementaires tout en minimisant les coûts de réalisation des réseaux.

Les variables de décision (les diamètres à attribuer à chaque conduite) sont discrètes. C'est pour ça que le problème est compliqué. Plusieurs recherches ont été faites à ce sujet. Au début, des méthodes classiques (comme les programmations linéaires ou non linéaires) ont été utilisées pour trouver des solutions. Mais ces méthodes simplifient tellement le modèle qu'elles donnent des résultats irréalistes (ABDELOUAHAB, 2010). Des méthodes ont récemment été créées pour résoudre des problèmes sans perdre le réalisme des modèles d'optimisation. Ces méthodes résolvent des modèles non linéaires en nombres entiers.

Ce travail s'appuie sur la synergie entre la méthode multilinéaire (ML) et l'algorithme de gain et de partage de connaissances (GSK, Gaining-Sharing Knowledge-Based Algorithm ((Ali Wagdy, Anas A, & Ali Khater , 2019)), afin d'optimiser les réseaux de distribution d'eau. La méthode multilinéaire est chargée du calcul des débits, des vitesses d'écoulement, des charges et des pressions pour chaque configuration de réseau évaluée. Quant à la recherche de la combinaison de diamètres (configuration) optimale parmi l'ensemble des variantes possibles, elle est prise en charge par l'algorithme d'optimisation GSK.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la performance de l'algorithme GSK pour ce type de problèmes d'optimisation combinatoire. Il s'agit de déterminer la combinaison de diamètres de conduites la plus économique, tout en garantissant le respect des contraintes de fonctionnement, notamment les pressions minimales requises au sein du réseau d'AEP. Cette approche hybride vise précisément à minimiser le coût global d'investissement tout en satisfaisant les exigences hydrauliques, offrant ainsi une solution de conception à la fois économique, précise et robuste.
Notons ici que cet algorithme n'a pas été exploité pour traiter ce type de problèmes d'optimisation auparavant.

L'évaluation des performances des méthodes d'optimisation s'appuie généralement sur l'utilisation de réseaux de distribution d'eau de référence (faisant de bancs d'essai, ou benchmarks en anglais). Dans le cadre de cette étude, trois réseaux classiques de la littérature scientifique ont été sélectionnés : le réseau à deux mailles (Two-Loop), le réseau de la ville de Hanoï (Vietnam) et le réseau gravitaire combiné (Turquie). Ces réseaux présentent des dimensions variées, allant de 8 à 70 tronçons. La solution optimale de chacun de ces réseaux étant déjà connue a priori à travers la littérature, ils

constituent un cadre idéal pour évaluer rigoureusement les performances de l'algorithme GSK et les comparer à celles d'autres métaheuristiques, telles que les algorithmes génétiques.

Pour réaliser ce travail, nous avons adopté le plan de travail ci-dessous :

- Chapitre I : Généralité sur les réseaux de distribution d'eau potable.
- Chapitre II : Introduction à l'optimisation.
- Chapitre III : Méthode d'optimisation basé sur l'acquisition et de partage de connaissances(GSK).
- Chapitre IV : Calcul des débits et des pressions par des méthodes multilinéaires.
- Chapitre V : Optimisation de dimensionnement des réseaux d'AEP.

  On clôture ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I: Généralités sur les réseaux de distribution d'eau potable

I Introduction

Ce chapitre vise à introduire certaines définitions essentielles que nous rencontrerons tout au long de ce travail, comme la définition du réseau d'approvisionnement en eau potable, les divers types de réseaux, etc.

II Système de distribution d'eau potable

Le système de distribution comprend un ensemble de structures et d'accessoires qui sont reliés de la source jusqu'aux utilisateurs, dans l'objectif de répondre aux besoins présents et à venir.

De la prise d'eau dans son milieu naturel jusqu'à l'arrivée au robinet du consommateur, l'eau requiert un grand nombre d'infrastructures pour sa distribution (Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018), à savoir :

- Les ouvrages de captage,
- Les stations de pompage,
- Les stations de traitement des eaux,
- Les réservoirs de stockage,
- L'adduction et la distribution,

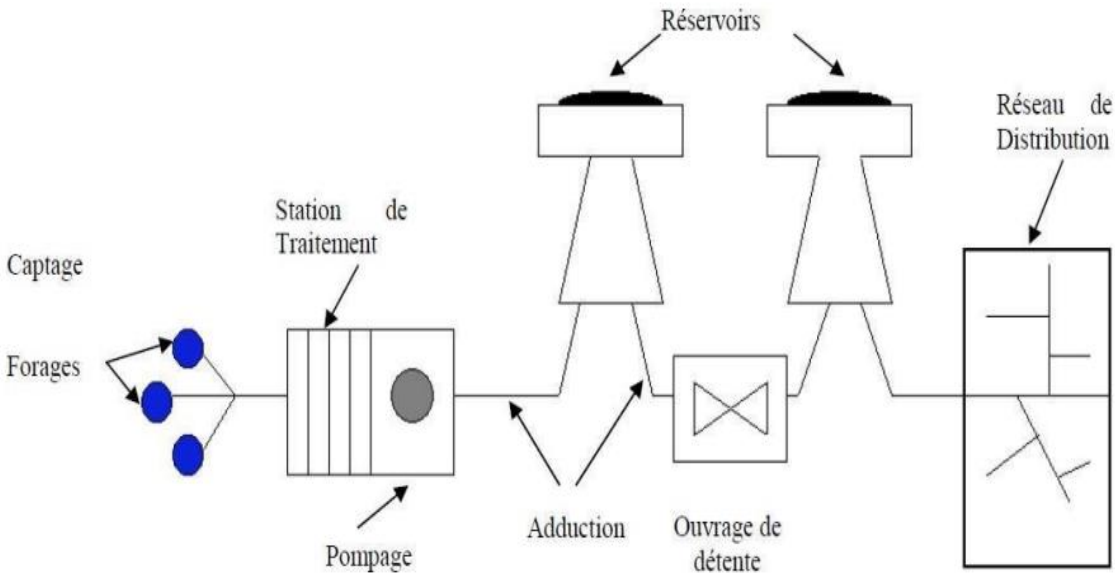


Figure *I-1* : Schémas d'un système d'alimentation d'eau potable *(AZZEDINE & STITA, 2019)*

II.1 Les ouvrages de captage

Il sert à collecter l'eau naturelle, cette eau peut provenir de sources souterraines (nappes phréatiques) ou superficielles (lacs, barrages et rivières). Généralement, l'eau brute est acheminée vers une station de traitement où elle est transformée en eau traitée, aussi appelée eau potable (MAZOUZ, 2018).

II.2 Les stations de pompage

Il s'agit de l'équipement de production dont la capacité dépend du réservoir ou des réservoirs de stockage. Elle se compose des ouvrages et du matériel suivant :

- Bâche d'aspiration,
- Chambre de télécontrôle et d'automatisation,
- Groupe électro-pompes,
- Autres équipements en amont et en aval des pompes (vannes, clapets, manomètres, etc.).

Dans certains cas, on prévoit plusieurs pompes, ce qui permet d'une part de réduire la consommation d'énergie électrique, car le flux généré est dispersé entre toutes les pompes, et d'autre part de garantir la continuité du fonctionnement en cas de défaillance de l'une d'elles (MAZOUZ, 2018).

II.3 Les stations de traitement des eaux

L'eau collectée a souvent besoin d'être traitée pour être rendue potable, un processus généralement effectué sur les eaux de surface. Ce traitement vise à supprimer les bactéries présentes dans l'eau et, dans certains cas, à améliorer sa qualité.

L'eau est généralement traitée en trois phases (MAZOUZ, 2018):

- ✓ La clarification : c'est le processus qui permet d'éliminer les particules colloïdales de l'eau en recourant à un filtre massif.
- ✓ La stérilisation : son but est d'obtenir une pureté microbiologique de l'eau. Pour ce faire, on recourt à des agents oxydants tels que le chlore et l'ozone.
- ✓ L'affinage : permet de supprimer les micropolluants.

II.4 Les réservoirs de stockage

Les réservoirs sont des ouvrages de contrôle pour la pression et le débit entre les phases de production et de consommation. Ces dispositifs permettent de stocker l'eau lorsque la demande est inférieure à l'offre et de la libérer lorsque la demande dépasse l'offre.

Dans les zones rurales ou pour des petites villes, si l'installation est bien réalisée, la capacité du ou des réservoirs varie autour du volume moyen quotidien d'eau utilisée.

Les réservoirs offrent non seulement une opération constante des groupes de pompage, mais aussi la possibilité d'exploiter pleinement le tarif nocturne de l'électricité (MAZOUZ, 2018).

II.5 L'adduction et la distribution

On classe généralement ce système de tuyauterie en deux types, l'adduction et la distribution.

II.5.1 Le système d'adduction d'eau

Et de conduites pour acheminer d'énormes volumes d'eau sur de vastes étendues, c'est au moyen de pipelines de grand diamètre, souvent situés entre des installations majeures. Par exemple, un transfert peut servir à acheminer l'eau d'une station de traitement (ou d'une source) vers les réservoirs de stockage en traversant plusieurs villes. Généralement, le système de transfert ne dessert pas les consommateurs individuels. Ce transport peut être effectué par :

- Gravite : lorsque le niveau de la station de traitement (ou de captage) dépasse celui du réservoir (figure ci-après).



Figure *I-2* : Adduction gravitaire (MORARECH, 2016-2017)

- Refoulement : si le niveau de la station d'épuration est plus bas que celui du réservoir (figure ci-après).



Figure *I-3* : Adduction par refoulement (MORARECH, 2016-2017)

II.5.2 Le réseau de distribution

Une étape intermédiaire pour livrer l'eau aux consommateurs.

Dans un réseau de distribution, les diamètres des conduites sont généralement inférieurs à ceux d'un système de transfert, et leur disposition suit généralement la configuration et le tracé des rues urbaines. Des coudes, des pièces en T, des raccords en croix et de nombreuses autres pièces spéciales sont utilisées pour connecter et réajuster les éléments de la tuyauterie. Les bouches d'incendie, les vannes d'isolement ou tout autre équipement sont directement connectés au réseau de distribution (MAZOUZ, 2018).

III Classification des réseaux d'alimentation en eau potable

Les réseaux peuvent être classés comme suit :

III.1 Les réseaux ramifiés

Le réseau ramifié, dans lequel les conduites ne comportent aucune alimentation en retour, présente deux avantages principaux. D'une part, il est économique, mais d'autre part, il est moins sûr et moins souple en cas de rupture. En effet, en cas d'accident sur la conduite principale, tous les abonnés en aval se verront privés d'eau (DUPONT, 1974).

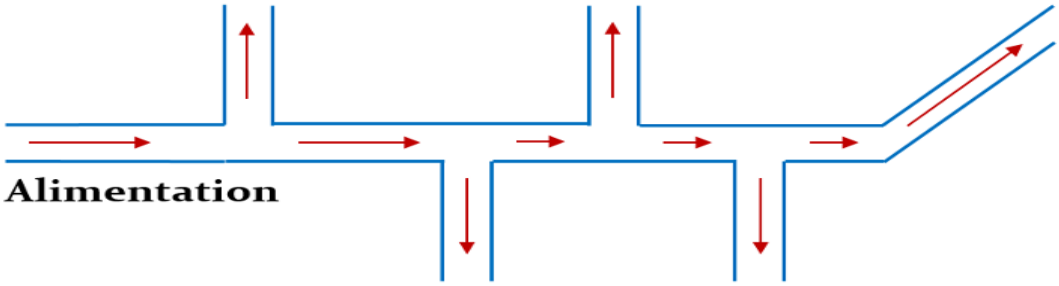


Figure *I-4* : Schéma explicatif d'un réseau ramifié (Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018)

III.2 Les réseaux maillés

Le réseau maillé permet une alimentation en retour et évite donc le problème signalé plus haut. On peut isoler la partie endommagée et continuer à alimenter les abonnés en aval. Il coûte plus cher à mettre en place, mais il est plus sûr, donc il est toujours mieux de l'utiliser plutôt qu'un réseau ramifié (DUPONT, 1974).

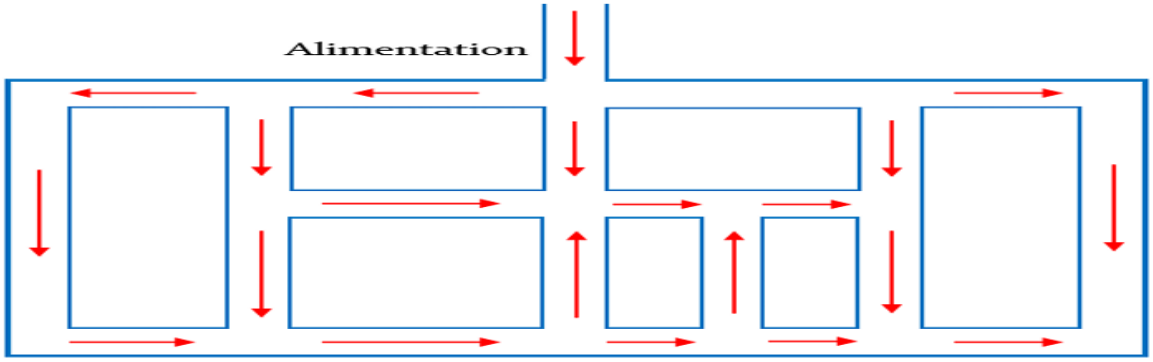


Figure *I-5* : Schéma explicatif d'un réseau maillé *(Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018)*

III.3 Les réseaux étagés

Les réseaux étagés sont des réseaux répartis en plusieurs niveaux d'altitude, alimentés séparément pour garantir une pression adaptée dans chaque zone.

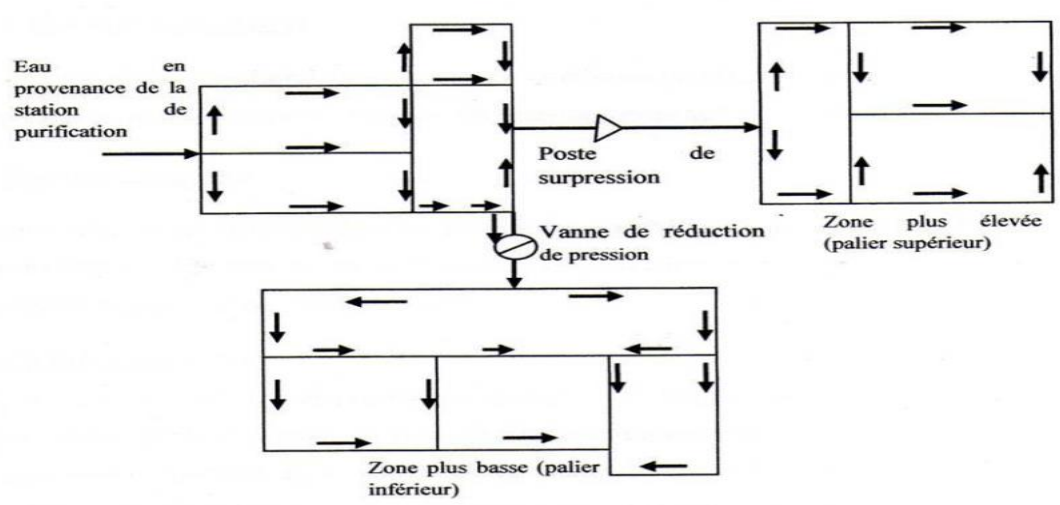


Figure *I-6* : Réseau étagés *(AZZEDINE & STITA, 2019)*

III.4 Les réseaux à alimentations distinctes

Les systèmes d'alimentation séparés fournissent, d'une part, de l'eau potable destinée à tous les besoins domestiques et, d'autre part, de l'eau non potable destinée aux activités industrielles ainsi qu'au nettoyage et à l'irrigation des rues et plantations. Ces réseaux sont justifiés uniquement dans les installations d'une importance extrême. À notre connaissance, Paris est le seul endroit qui dispose d'un réseau avec une double alimentation (DUPONT, 1974).

IV Composants d'un réseau d'AEP

Un réseau est une illustration schématique des divers points d'un réseau et de leurs connexions physiques (conduites, pompes, vannes). L'arrangement des nœuds et des conduites est déterminé par l'emplacement des consommateurs, l'existence de voies de circulation, d'obstacles naturels et d'autres réseaux (ABD ENNAFAA, 2024).

IV.1 Nœud

C'est le point de rencontre de plusieurs conduites (figure I-7 ci-après).

IV.2 Tronçon

C'est une portion de conduite comprise entre deux nœuds successifs (entre les Nœuds1 et 2 par exemple ; voir la figure I-7 ci-après).

IV.3 La conduite maîtresse ou principale

C'est la canalisation assurant la jonction entre le réservoir et le premier branchement de conduites secondaires (la conduite 3 par exemple sur la figure I-7).

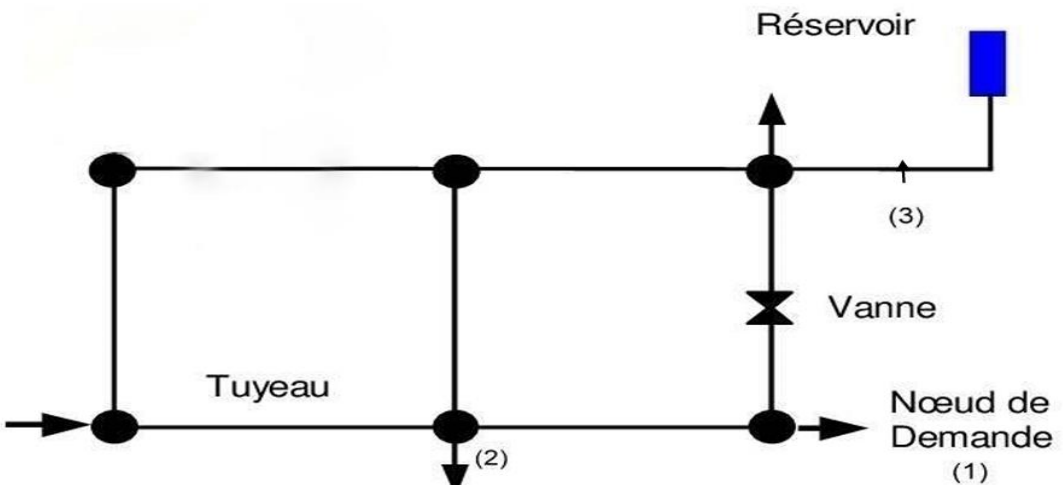


Figure *I-7* : Composants Physiques d'un Système de Distribution d'Eau (ABD ENNAFAA, 2024)

IV.4 Les vannes

Elles permettent de limiter la pression ou le débit en des points précis du réseau.



Figure *I-8* : Une vanne

IV.5 Ventouse

Il peut y avoir de l'air en trop dans les conduites. La poche d'air peut causer des problèmes :

- Diminution de la section.
- Arrêt des débits.
- Baisse de la pression.
- Coups de bélier.

L'évacuation de l'air se fait par l'intermédiaire d'une ventouse qui peut être manuelle ou automatique (ABD ENNAFAA, 2024).

IV.6 Poteaux d'incendie

On normalise leur diamètre à 100 ou 125 mm. Ils doivent être pourvus de conduites de diamètre identique, garantissant un débit minimum de 17 l/s sous une pression de :1 bar. L'agencement du réseau (réserve d'incendie) doit donner aux pompiers l'accès à une capacité de 120 m^3. Lorsque les poteaux d'incendie ne sont pas utilisés, ils sont dégelés par vidange de leur réservoir, actionnée par la fermeture de leur vanne. Dans certaines situations, ils peuvent apparaître sous la forme d'une prise d'eau pour incendie et/ou de lavage (ABD ENNAFAA, 2024).

IV.7 Les pompes

Une pompe est un équipement qui permet d'apporter de l'énergie au fluide. La pompe est généralement connectée à une bâche d'aspiration pour son fonctionnement. L'activation et la désactivation de la pompe

dépendent du niveau du réservoir ou d'une tranche horaire précise. Une pompe peut être décrite soit par une puissance constante (énergie), délivrée à l'eau au fil du temps sans tenir compte du débit et de la hauteur de refoulement, soit par une courbe spécifique qui illustre le lien entre la hauteur de refoulement et le débit fourni grâce à une fonction H=f(Q) (Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018).

V Paramètres hydrauliques

V.1 Diamètre des conduites

Lors de la sélection du diamètre des conduites, il est crucial de se conformer aux normes de diamètre tout en évitant les dimensions inférieures à (0,05m, soit Φ<50mm) (ABD ENNAFAA, 2024).

V.2 Limite de vitesse

En respectant l'intervalle des vitesses d'écoulement (0.5 à 1.5 m/s) (ABD ENNAFAA, 2024). Les vitesses d'écoulement faibles peuvent provoquer le dépôt de la matière en suspension tel que le sable. Par contre, les vitesses fortes amplifient le coup de bélier, l'abrasion des parois intérieurs des conduites, les vibrations ... etc, en réduisant la durée de vie de la robinetterie et les pièces spéciales.

V.3 Pressions

Il faut concevoir les réseaux de manière à répondre aux exigences de pression. Pour assurer la durabilité des canalisations dans le village, en particulier leurs joints, La pression dans un réseau d'AEP doit généralement être comprise entre 10 et 50 m.c.e. Une pression inférieure à 10 m.c.e. peut compromettre l'alimentation des usagers, tandis qu'une pression supérieure à 50 m.c.e. augmente le risque de fuites et de dégradations du réseau. (ABD ENNAFAA, 2024). Pour cette raison on prévoit les pressions maximales mentionné sur le tableau ci-dessous :

Tableau *I-1:* Pression demandée de réseau AEP *(*ABD ENNAFAA*,* 2024*)*

Bâtiment	Pression demandée (m)	Bâtiment	Pression demandée (m)
RDC	8-10	4ème Etage	24-27
1ère Etage	12-15	5ème Etage	30-35
2ème Etage	16-19	6ème Etage	33-36
3ème Etage	20-23	7ème Etage	37-40

VI Calcul hydraulique

VI.1 Calcul de diamètres

Dans le cas d'un écoulement gravitaire, le diamètre est déduit de l'équation :

$$Q = V \times S \text{.....Éq(I-1)}$$

On obtient :S= $\frac{Q}{v}$ et on a S=$\frac{\pi D^2}{4}$, donc :

$$D=\sqrt{\frac{Q\times 4}{\pi\times v}} \text{.....Éq (I-2)}$$

Avec :

- S : Surface de la conduite (m^2).
- Q : Débit du tronçon (m^3/s).
- V : Vitesse de dimensionnement (m/s).
- D : Diamètre nominal (mm).

VI.2 Calcul des pertes de charge totales

On identifie deux catégories de pertes de charge dans un système de distribution. Les pertes de charge régulières ou linéaires et des pertes de charge locales ou singulières.

$$h_t = h_l + h_s \text{.....Éq(I-3)}$$

Avec :

- h_l : Pertes de charge linéaires,
- h_s : Pertes de charge singulières,

VI.2.1 Pertes de charge linéaires hl

Les pertes de charge linéaire sont attribuées à la friction entre les courants d'eau en mouvement relatif, ainsi qu'à leurs interactions avec les parois intérieures tout au long de la conduite.

$$h_l = R\times Q^n \text{.....Éq(I-4)}$$

Dans notre domaine d'activité, pour déterminer la perte de charge dans les canalisations, nous nous référons à l'équation de « Hazen-Williams ».

- **Formule de Hazen-Williams :**

Cette formule est largement utilisée pour le calcul des pertes de charge dans les réseaux d'eau. Son expression est la suivante :

$$R = \frac{10.65}{C_{H-W}^{1.852}} \cdot \frac{L}{D^{4.8704}} \quad \text{..... Éq(I-5)}$$

- R : résistance de conduite ($m^{-5}s^2$),
- L : longueur de conduit en (m),
- D : Diamètre du conduite en (m),
- C_{H-W} : coefficient de rugosité de Hazen-Williams,

- Le coefficient de débit de Hazen-Williams est proportionnel au flux et est soumis à la rugosité du tuyau, une caractéristique qui peut changer avec le temps. Voici quelques exemples courants :

Tableau I-2 : Coefficient d'écoulement de Hazen-Williams (AZZEDINE & STITA, 2019)

Type de Matériau	C_{H-W}
Fonte revêtue	120
Béton	130
Plastic (PVC, PEHD)	150
Acier	110
Céramique	140

VI.2.2 Pertes de charge singulières hs

Elles sont produites par des singularités comme les coudes, les vannes, les clapets, les branchements, les diaphragmes, etc. Pour ce qui est des conduites d'eau potable, on estime que les pertes représentent entre 10% et 15% des pertes de charge linéaires.

VII Problèmes rencontrés dans un réseau d'AEP

Un réseau d'AEP peut rencontrer de multiples problèmes provenant de diverses sources : fuites, connexions illégales, dysfonctionnements de compteurs, soucis environnementaux, intrusion de polluants, baisse de pression, ruptures ou fractures sur les conduites et leurs accessoires, arrêts... et ainsi de suite. En plus de ces problèmes, il y a également des enjeux liés à la gestion du réseau. Ces divers soucis entraînent

le mécontentement des clients qui expriment leur insatisfaction en portant des réclamations auprès des services concernés (manque de quantité, qualité inférieure, coupure d'approvisionnement, etc.).

On peut regrouper les divers problèmes qui se présentent dans un réseau de distribution d'eau potable en trois grandes catégories (Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018) :

- Problèmes entraînant des ruptures et des cassures.
- Problèmes entraînant des fuites.
- Problèmes provoquant la détérioration de la qualité de l'eau.

VIII La gestion du réseau d'AEP

La responsabilité principale de la gestion d'un réseau d'AEP est de garantir les opérations de production, stockage et distribution. La gestion traditionnelle des réseaux comporte de nombreux inconvénients. Il est difficile de manipuler les supports cartographiques sur lesquels sont placés les objets qui symbolisent les réseaux. Cette gestion est aussi très restreinte, les données qui décrivent les réseaux illustrés sont inscrites sur le support en même temps que les éléments graphiques eux-mêmes. Cela peut entraîner une saturation du support, rendant certaines informations potentiellement illisibles (Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018).

IX Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'exposer les principes de base concernant les réseaux d'approvisionnement en eau potable, tout en soulignant les facteurs clés qui affectent leur fonctionnement hydraulique. Cela a également permis de saisir les fondamentaux nécessaires à l'étude et à la gestion des réseaux d'AEP.

Cette étude a exposé les divers composants d'un réseau de distribution et a détaillé les principes de fonctionnement ainsi que les méthodes de calcul hydraulique. On a aussi abordé les principales contraintes auxquelles on fait face lors de l'exploitation des réseaux, ce qui offre une perspective d'ensemble sur le comportement et la gestion des systèmes d'approvisionnement en eau potable.

Suite à l'exposé des principes généraux des réseaux d'AEP, le prochain chapitre se concentrera sur une initiation à l'optimisation, en soulignant les idées et techniques employées pour optimiser le rendement des réseaux hydrauliques.

Chapitre II: Introduction à l'optimisation

I Introduction

L'optimisation est un domaine crucial pour la résolution de problèmes complexes dans divers domaines scientifiques et techniques. Elle repose sur la quête optimale de solutions tout en respectant un ensemble de contraintes. Une introduction aux concepts d'optimisation et d'optimisation combinatoire sera donnée, suivie d'une classification des problèmes basée sur le nombre d'objectifs. Pour finir, nous aborderons les méthodes principales de résolution, y compris les méthodes approchées.

II Définition générale

L'optimisation est une discipline mathématique qui vise à modéliser, à analyser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes de recherche des solutions meilleures, bonnes, ou satisfaisantes pour un ou plusieurs objectifs, tout en respectant d'éventuelles contraintes. Actuellement, cette discipline combine ainsi deux domaines, mathématique et informatique pour aboutir à des méthodes systématiques et rigoureuses de résolution des problèmes (Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018).

L'optimisation peut être définie aussi comme « le processus de maximisation ou de minimisation d'une fonction objectif, souvent sous contraintes, afin de trouver la meilleure solution possible » (BOUZERD & CHIBANE , 2024).

Les problèmes d'optimisation peuvent être classés en différentes catégories selon la nature du problème, la présence de contraintes, la méthode de résolution...etc.

Tout d'abord, on distingue les problèmes à variables discrètes (ou problèmes d'optimisation combinatoire), et les problèmes à variables continues.

- **Problèmes d'optimisation Combinatoire** : Les variables d'optimisation ne peuvent pas simplement être attribuées n'importe quelles valeurs réelles, elles doivent être sélectionnées à partir d'un ensemble de valeurs préétabli (les diamètres normalisés des conduites, par exemple). Cela rend cette classe de problèmes particulièrement complexe à résoudre.
- **Problèmes à variables continues** : les variables d'optimisation sont définies sur un intervalle donné, et peuvent prendre toutes les valeurs de cet intervalle (NOËLIE, 2016).

III Optimisation combinatoire

L'optimisation combinatoire (ou discrète) est un domaine essentiel en recherche opérationnelle, mathématiques appliquées et informatique. Résoudre un problème dans ce domaine consiste à chercher la meilleure combinaison à partir d'un ensemble nombrable de permutations. Cette famille englobe une multitude de problèmes d'optimisation combinatoire complexes dérivés d'applications concrètes dans divers secteurs tels que l'industrie, la finance, la gestion, l'ingénierie, transport…etc.

Ces problèmes combinatoires visent à dénicher la solution optimale au sein d'un espace limité et discret de solutions faisables, qui adhèrent à un ensemble de conditions, également appelées contraintes.
L'évaluation d'une solution se fait à travers une fonction également appelée fonction objective. Une meilleure option (solution optimale) est une solution applicable qui minimise ou maximise, en fonction du contexte, la fonction cible (MAQROT, 2019).

IV Classification des problèmes d'optimisation selon le nombre d'objectifs

Le problème d'optimisation peut être :

- ✓ **Problème mono objectif :**

  Optimiser une fonction unique, telle que l'optimisation technico-économique du diamètre d'une conduite de refoulement.

- ✓ **Problème multi objectifs :**

  L'objectif est d'optimiser plusieurs fonctions simultanément, cependant, une contradiction existe entre ces dernières. Il est donc nécessaire de trouver un équilibre initialement entre les objectifs avant de s'atteler à la résolution du problème. Par exemple, augmenter la fiabilité tout en réduisant le coût d'une composition de service web simultanément (Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018).

V Résolution d'un problème d'optimisation combinatoire

Il existe une multitude de techniques de résolution dans le domaine de la recherche opérationnelle pour l'optimisation. On identifie deux principales catégories : les **méthodes exactes** qui assurent la complétude dans la résolution (optimalité) même si parfois elles exigent des temps de calcul exorbitants ; et les **méthodes approximatives** qui peuvent compromettre la complétude mais offrent fréquemment des solutions proches de l'idéal en un temps plus acceptable (MAQROT, 2019).

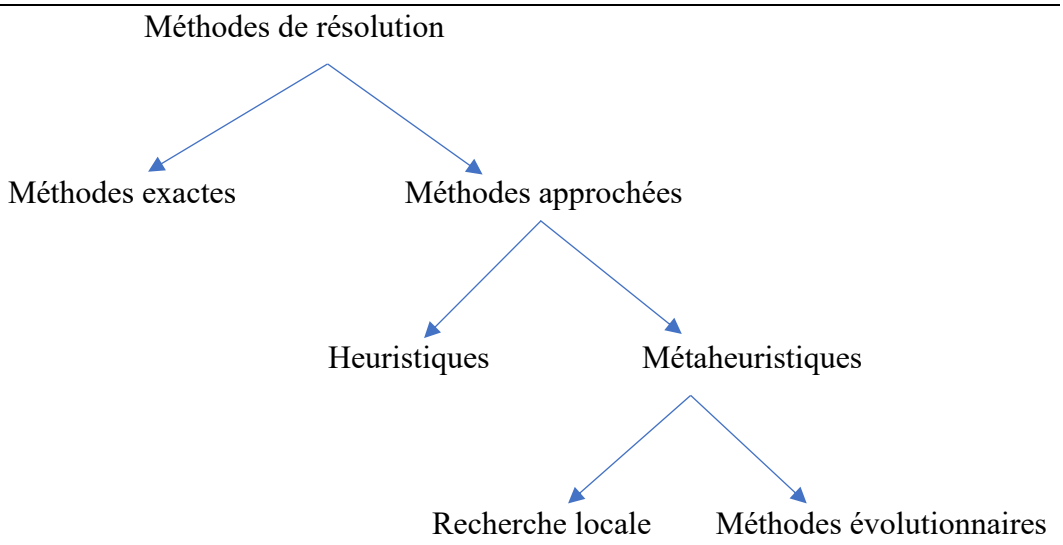


Figure *II-1*: Classification des méthodes d'optimisation *(MAQROT, 2019)*

V.1 Les méthodes exactes

Destinée à introduire des solutions optimales, pour ce faire, l'espace de recherche est minutieusement exploré afin de trouver la solution optimale si elle existe, ou à démontrer autrement l'inconsistance du problème (GUESSOUM, 2019/2020).

Les algorithmes exacts sont employés pour obtenir au moins une solution optimale à un problème qui peut s'avérer particulièrement coûteux en termes de temps de traitement (processing) et de mémoire, et par conséquent, peu adaptés aux applications nécessitant des solutions à plusieurs paramètres ou les problèmes avec environnement dynamiques (Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018).

V.2 Les méthodes approchées

Si le problème est trop complexe pour obtenir une réponse précise, nous visons une solution approximative pour économiser du temps et/ou de traitement. Ces méthodes investiguent une fraction de l'espace de recherche au lieu de la totalité de l'espace de recherche.

Au cours des ans, plusieurs méthodes exactes et approchées ont ´été proposées. On classe généralement ces méthodes en deux catégories : les méthodes heuristiques et les méthodes méta-heuristiques (GUESSOUM, 2019/2020).

V.2.1 Les méthodes heuristiques

L'heuristique, dérivée du grec ancien « eurisko » signifiant « je trouve », évoque l'art d'inventer et de réaliser des découvertes. Une heuristique (règle heuristique, méthode heuristique) est une directive d'évaluation, une tactique, un truc, une simplification ou tout autre genre de moyen qui restreint substantiellement la quête de solutions dans des domaines problématiques vastes. Les heuristiques n'assurent pas des solutions optimales. On peut dire de l'heuristique bénéfique qu'elle offre souvent des solutions satisfaisantes ou bonnes des problèmes d'optimisation complexes (Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018).

V.2.2 Les méthodes méta-heuristiques

Méta vient du mot grec ancien « au-delà ». Cela concerne beaucoup de problèmes en général.
Ce sont des alternatives aux techniques heuristiques quand on ne connaît pas la technique heuristique d'une problématique particulière.

Les métaheuristiques sont habituellement des algorithmes itératifs, qui avancent vers une optimisation globale. Elles fonctionnent à l'instar d'algorithmes de recherche, cherchant à comprendre les traits d'un problème en vue de dénicher une approximation de la solution optimale. On recense une vaste gamme de métaheuristiques, de la simple recherche locale à des algorithmes sophistiqués de recherche à l'échelle globale.
L'objectif des métaheuristiques est de parcourir l'espace de recherche de manière efficace pour identifier des solutions optimales (BOUZERD & CHIBANE , 2024).

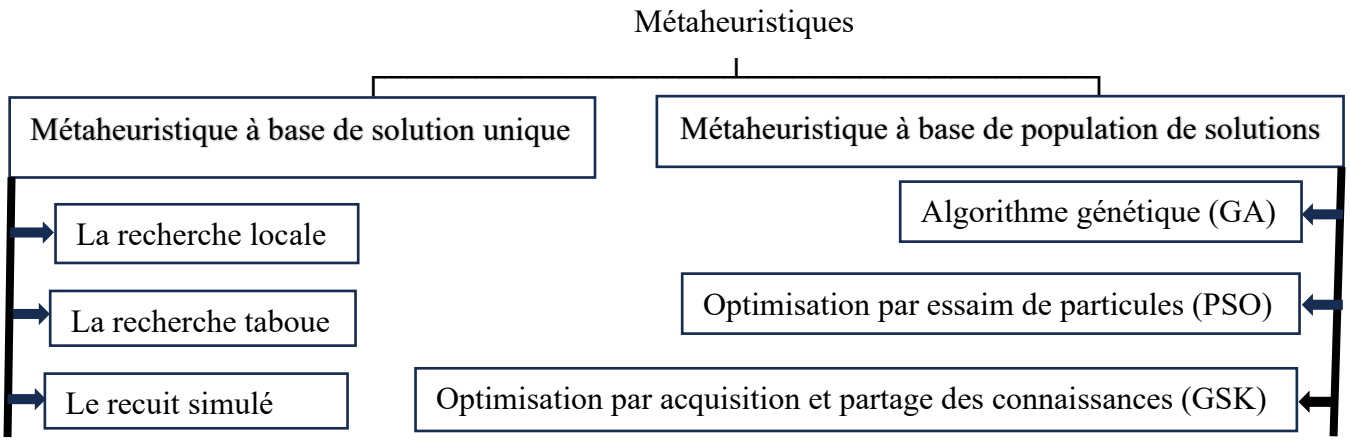


Figure *II-2* : Schémas explicatifs des méthodes métaheuristique *(GUESSOUM, 2019/2020)*

V.2.2.1 Recherche à base de solution unique

La méthodologie de recherche s'articule initialement autour d'une solution unitaire, fondée sur le concept de voisinage, et fait l'objet d'une amélioration itérative ultérieure.

V.2.2.2 Recherche à base de population de solutions

L'initiation de la recherche s'articule autour de la mise en œuvre d'un ensemble de solutions visant à l'extraction de la solution optimale globale.

Les bénéfices de l'exploration des solutions basées sur la population incluent l'accroissement de la diversité de l'espace de recherche (exploration ou diversification) et l'éventualité d'émergence de solutions de haute qualité (exploitation ou intensification). La distinction majeure entre l'intensification (ou l'exploitation) et la diversification (ou l'exploration) est que la phase d'intensification se focalise sur l'expérimentation du voisinage d'une solution sélectionnée.

Une phase de diversification stimule le processus de recherche à explorer des zones non encore explorées et à découvrir des solutions distinctes de celles trouvées dans divers emplacements (Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018). On retrouve diverses approches basées sur un ensemble de solutions, à commencer par les algorithmes génétiques (Genetic Algorithms, GAs), puis les algorithmes basés sur l'intelligence par essaims (Particle Swarm Optimization, PSO) et l'algorithme basé sur l'acquisition et le partage des connaissances…etc. Dans cette famille de méthodes, les plus populaires et plus utilisées sont les algorithmes génétiques et (Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018).

a. **Algorithme génétique (GA)** : L'algorithme génétique (AG) suggéré par HOLLAND puise son inspiration dans des processus biologiques comme les lois de Mendel et la théorie de l'évolution de Charles Darwin. Les algorithmes génétiques (GA) se servent d'opérateurs de sélection, de croisement et de mutation pour affiner progressivement un ensemble de solutions. Les GA préservent la diversité et diminuent le risque de convergence anticipée en privilégiant les solutions les plus adaptées tout en intégrant un élément d'aléatoire maîtrisé (Rodan, Al-Tamimi, & Al-Alnemer, 2025).
b. **Optimisation par essaim de particules (PSO)** : Kennedy et Eberhart (1995) ont proposé le PSO (Particle Swarm Optimization) en 1995 pour résoudre les problèmes d'optimisation continue (des valeurs réelles). L'optimisation par essaim de particules (PSO) est basée sur l'observation du comportement alimentaire collectif des oiseaux et des bancs de poissons. Elle héberge un ensemble de particules (candidats potentiels) qui balaient l'espace de recherche en révisant leurs vitesses et leurs emplacements, influencées à la fois par les

solutions proche-optimales individuelles et collectives. Au fur et à mesure des itérations, l'essaim se dirige vers les zones de haute qualité dans l'espace de recherche (Rodan, Al-Tamimi, & Al-Alnemer, 2025). Dans l'espérance de trouver la solution optimale globale du problème.

c. **Optimisation par acquisition et partage des connaissances (GSK) :** L'algorithme d'optimisation par acquisition et partage des connaissances (Gaining-Sharing Knowledge optimization algorithm, GSK) est proposé par (Ali Wagdy, Anas A, & Ali Khater , 2019).Il est fondé sur la philosophie d'acquérir et de partager des connaissances tout au long de la vie. Il repose sur deux phases essentielles :
   - La première, appelée phase débutant-intermédiaire ou phase junior, est consacrée à l'acquisition et au partage des connaissances.
   - La seconde, appelée phase intermédiaire-expert ou phase senior, est consacrée à l'approfondissement des connaissances (Ali Wagdy, Anas A, & Ali Khater , 2019).

VI Conclusion

La compréhension des concepts fondamentaux de l'optimisation est une étape essentielle pour étudier et résoudre les problèmes complexes rencontrés dans les systèmes réels. Les notions générales d'optimisation, l'optimisation combinatoire, la classification des problèmes en fonction du nombre d'objectifs et les principales méthodes de résolution ont permis de mieux comprendre les différentes approches utilisées dans ce domaine.

Cette étude a également mis en évidence l'importance de la classification des méthodes d'optimisation, notamment dans le cas des réseaux de distribution d'eau, qui sont caractérisés par des contraintes hydrauliques et économiques importantes. Dans ce contexte, le choix d'une méthode adaptée est essentiel pour améliorer les performances du réseau.

Par ailleurs, les méthodes approchées et les métaheuristiques apparaissent comme des outils efficaces pour traiter les problèmes complexes pour lesquels les méthodes classiques présentent certaines limites. Le prochain chapitre sera consacré à l'étude de l'algorithme d'optimisation basé sur l'acquisition et le partage des connaissances (GSK), ainsi qu'à ses principes de fonctionnement et à ses différentes étapes.

Chapitre III: Méthode d'optimisation basée sur l'acquisition et le partage de connaissances

I Introduction

L'optimisation des réseaux de distribution d'eau constitue une étape essentielle afin de réduire les coûts de réalisation tout en respectant les contraintes hydrauliques du réseau. Face à la complexité croissante des systèmes hydrauliques, plusieurs méthodes métaheuristiques ont été développées pour rechercher efficacement des solutions optimales.

Parmi ces méthodes, l'algorithme d'optimisation basé sur l'acquisition et le partage des connaissances (GSK) est une méthode inspirée du processus d'apprentissage humain, reposant sur deux phases principales :

- La phase junior dédiée à l'exploration et à l'acquisition des connaissances.
- La phase senior orientée vers l'exploitation et l'amélioration des solutions.

Dans ce chapitre, les principes fondamentaux de la méthode GSK seront présentés à travers sa définition, ses opérateurs, ses paramètres ainsi que l'organigramme décrivant les différentes étapes de son fonctionnement.

II Définition de GSK

L'algorithme d'optimisation par acquisition et partage des connaissances, connu sous l'acronyme **GSK** (Gaining-Sharing Knowledge based Algorithm), est une méthode stochastique d'optimisation globale inspirée du processus naturel d'acquisition et de transmission des connaissances au cours de la vie humaine. Cet algorithme a été introduit par **Ali Wagdy Mohamed, Anas A. Hadi** et **Ali Khater Mohamed** dans leur article intitulé : *Gaining-Sharing Knowledge Based Algorithm for Solving Optimization Problems: A Novel Nature-Inspired Algorithm* (Ali Wagdy, Anas A, & Ali Khater , 2019).

III Les éléments de base du GSK

L'algorithme d'optimisation basé sur l'acquisition et le partage des connaissances (GSK) simule le comportement humain d'apprentissage au cours de la vie humaine. Il repose sur l'interaction entre les individus à travers des mécanismes de coopération et de compétition. Avant de détailler cet algorithme, nous présentons ses éléments de base essentiels (Ali Wagdy, Anas A, & Ali Khater , 2019).

- **Espace de recherche** : Ensemble de toutes les solutions possibles du problème,

- **Personne** : Une solution candidate (possible) représentée comme une personne dans la population,
- **Vecteur de connaissance** : Représentation de personne (solution possible),
- **Domaine** : Une composante du vecteur représentant un domaine spécifique de connaissance,
- **Société de personne** : Ensemble des personne (solutions) évoluant dans l'espace de recherche,
- **Taux de connaissance :** Paramètre contrôlant la vitesse d'apprentissage,
- **Fitness** : Valeur qui mesure la qualité ou la performance d'une personne (solution), calculée au moyen d'une fonction objectif établie au départ exprimant l'objectif de l'optimisation.
- **Phase Junior** : Phase où la personne apprennent de leur entourage proche et explorent davantage,
- **Phase Senior** : Phase d'exploitation où l'individu suit les meilleures personnes.
- **La génération** : Une itération de l'algorithme avec mise à jour des solutions (Ali Wagdy, Anas A, & Ali Khater , 2019),

X_1

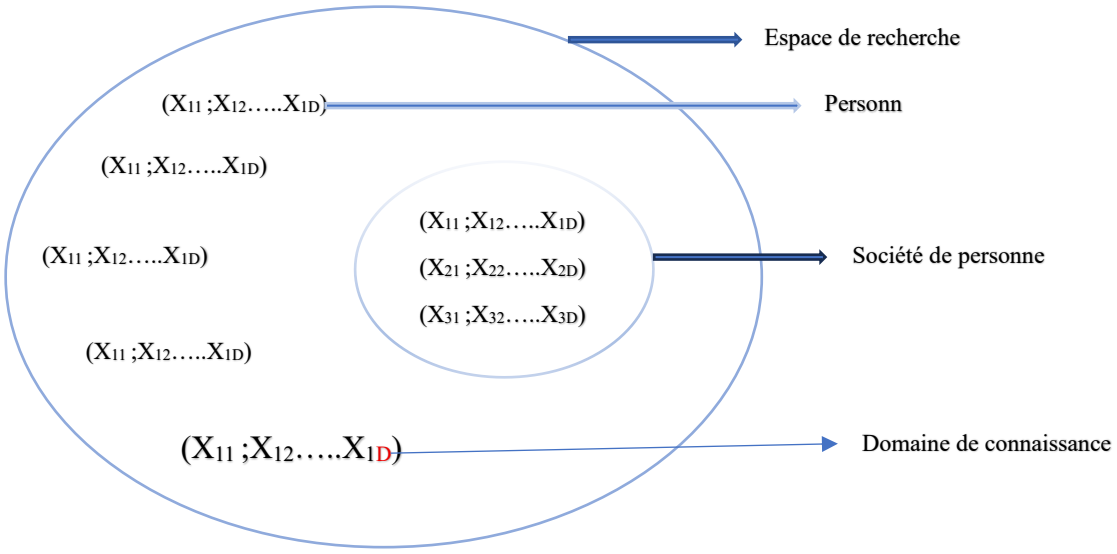


Figure *III-1*: Les éléments de base de GSK *(Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018)*(Adopter de référence)

IV Les opérateurs de GSK

Les opérateurs de l'algorithme GSK s'appuient sur le partage des connaissances entre les individus. Ils se basent sur des phases d'apprentissage inspirées du comportement humain. Ces opérateurs permettent de trouver le meilleur équilibre entre l'exploration et l'exploitation pour trouver des solutions optimales.

IV.1 Initialisation de la population initiale

Cette étape consiste à générer **une population initiale de solutions** dans l'espace de recherche. Ces solutions sont générées aléatoirement et constituent des solutions candidates au problème d'optimisation considéré, couvrant ainsi de manière uniforme différentes régions de l'espace de recherche.
Soit :

$$X_i, \quad i = 1, 2, 3, \ldots, N \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\text{Éq (III-1)}$$

$$X_{ij} = (X_{i1}, X_{i2}, \ldots, X_{iD}) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\text{Éq (III-2)}$$

Teles que :

- X_i : représente une solution candidate au problème d'optimisation. Dans l'algorithme GSK, X_i est assimilé à un individu traversant plusieurs phases d'apprentissage successives.
- Les éléments $\{x_{i1}, \ldots x_{iD}\}$: représentent les composants de la solution d'un problème d'optimisation multi-dimensionnel. Dans GSK, ces éléments peuvent être assimilés aux branches de connaissance (des modules, matières ou disciplines … etc).
- N : désigne la taille de la population de recherche, c'est-à-dire le nombre de solutions candidates amenées à évoluer au cours du processus d'optimisation.
- D (un entier) **:** Détermine les dimensions de l'espace de recherche.

Dans le cadre du problème d'optimisation du dimensionnement d'un réseau d'AEP, dont l'objectif est de déterminer la configuration de diamètres des conduites la plus économique tout en préservant les performances hydrauliques du réseau (pressions et vitesses d'écoulement adéquates, …), une population de N réseaux candidats, dont les diamètres sont générés d'une manière aléatoire. Ces diamètres doivent être générés dans les limites faisables $[D_{min}, D_{max}]$ définis au départ. Chaque réseau X_i peut constituer une solution optimale au problème. En effet, le paramètre D représente le nombre de conduites constituant le réseau.

IV.2 Évaluation (Fitness ou valeur d'aptitude)

Chaque solution est évaluée à l'aide d'une fonction objectif afin de mesurer sa qualité. Cette étape permet de comparer les performances des individus.

$$F_i = F_{objectif}(X_i),\ i=1, 2, \ldots\ldots\ldots\ldots, N \quad \text{Éq(III-3)}$$

Telles que :

- F_i : est la valeur de fitness (valeur d'aptitude) correspondante à la personne d'indice *i*. La fitness d'une personne exprime sa maîtrise totale (par exemple, la note totale ou la moyenne générale) exprimant sa compétence. Revenant à l'exemple de l'optimisation de dimensionnement des réseaux d'AEP, le fitness d'un réseau exprime le coût de réalisation de ce dernier.
- $F_{objectif}$: C'est la fonction objectif exprimant la finalité d'optimisation. Pour le problème d'optimisation de dimensionnement d'un réseau d'AEP, cette fonction exprime la manière de calculer le coût d'un réseau.

  L'évaluation de la valeur d'aptitude (fitness) ne peut être établie qu'avec une fonction objectif qui est décrite dans le titre suivant.

IV.3 La fonction objectif

Dans le domaine de l'optimisation mathématique, on utilise la notion de fonction objectif pour décrire une fonction qui permet d'identifier la solution optimale à un problème donné. En pratique, elle attribue une valeur à chaque solution candidate d'un problème d'optimisation. L'objectif de la problématique d'optimisation consiste donc à réduire ou à augmenter cette fonction jusqu'à atteindre un optimum, grâce à divers procédés (Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018). En effet, dans le cas de l'optimisation de dimensionnement d'un réseau d'AEP, cette fonction exprime le coût de réalisation à minimiser.

IV.4 Tri de la population

Les individus sont rangés en fonction de leurs valeurs d'aptitude, du meilleur au moins bon. Ce classement simplifie le processus d'apprentissage dans les phases ultérieures. Une fois que tous les individus ont été classés par ordre croissant en fonction de leur objectif, ils seront répartis en trois groupes :

- Les individus supérieurs (hautement qualifiés).
- Les individus de niveau moyen ou bon (individus qualifiés).

- Les individus de moindre qualité (moins qualifiés) (Ali Wagdy, Anas A, & Ali Khater , 2019).

$$\left\{ \text{X-Meilleur..., X-Moyen…, X-Mauvais} \right\}$$

Avec meilleur : (moins cher + contraintes respectées).

IV.5 Calculer de D_{junior} et D_{senior}

On détermine le nombre de dimensions à modifier dans les phases junior et senior. Cela permet de contrôler l'équilibre entre exploration et exploitation au cours des générations. Le nombre de dimensions D est déterminé par une formule qui tient compte de la façon dont on acquiert et partage les connaissances. Pendant le processus d'optimisation, le nombre de dimensions mises à jour par le schéma junior diminue, tout comme le nombre de dimensions mises à jour par le schéma senior (Ali Wagdy, Anas A, & Ali Khater , 2019).

IV.5.1 Calcule de D_{junior}

Correspond au nombre de dimensions mises à jour durant la phase junior de l'algorithme GSK. Il est généralement élevé au début afin de favoriser l'exploration de l'espace de recherche.

$$D_{junior} = \boldsymbol{D}\left(\mathbf{1} - \frac{\boldsymbol{G}}{\boldsymbol{GEN}}\right)^{\boldsymbol{k}} \quad \text{Éq (III-4)}$$

Avec :

- D : Taille de problème,
- G : Numéro de génération,
- GEN : Le nombre maximal de générations,
- K : Le taux de connaissance qui est un nombre réel > 0

IV.5.2 *Calcule* de $D_{senioir}$

Correspond au nombre de dimensions modifiées durant la phase senior. Il augmente progressivement au cours des générations afin de renforcer l'exploitation et améliorer les solutions trouvées.

$$D_{senioir} = D - D_{junoir} \quad \text{…… Éq (III-5)}$$

Avec :

- $D_{senioir}$: nombre de dimensions modifiées durant la phase senior,
- $D_{junioir}$: nombre de dimensions mises à jour durant la phase junior,
- D : Taille de problème,

Example : D = 100 et K 2

Tableau *III-1 : Example de calcul de nombre de dimension(D) pour chaque phase*

G	$\frac{G}{GEN}$	D : nombre de dimensions mises à jour à l'aide des deux schémas (junior et senior)
0	0	D(junior)=100, D(senior)=0
0.25GEN	0.25	D(junior) = 57, D(senior) = 43
0.5G	0.5	D(junior) = 25, D(senior) = 75
0.75	0.75	D(junior) = 7, D(senior) = 93
GEN	1	D(junior) = 0, D(senior) = 100

IV.6 Phase Junior

Dans cette phase, l'acquisition de connaissances par chaque individu s'effectue principalement auprès des personnes les plus proches et les plus dignes de confiance, appartenant à de petits groupes. Cette démarche est motivée par un désir de partage des connaissances avec des individus n'appartenant pas à un groupe ou ne faisant pas partie de celui-ci. Cette motivation est souvent guidée par la curiosité et le souhait de découvrir le monde qui nous entoure (Ali Wagdy, Anas A, & Ali Khater , 2019).

Ainsi, la miseà jour de chaque individu peut être calculée à l'aide du schéma junior comme suit :

- Classez tous les individus par ordre croissant en fonction de la valeur de leur fonction objective :

$$\{X_{meilleur}, X_{i-1}, X_i, X_{i+1}, X_{pire}\}$$

- Par la suite, pour chaque individu xi, choisissez deux individus distincts (les plus proches), l'individu le plus proche et le plus performant (xi−1), ainsi que l'individu le moins performant (xi+1), dans le

but de constituer la source des connaissances acquises. De plus, choisissez de façon aléatoire un autre individu (xr) en tant que source de connaissances partagées.

Dimensions Junior (en vert) Dimensions senior (en rouge)

X_{11}	X_{12}							X_{1D-1}	X_{1D}

Figure III-2: Phase junior

Notez que : dans cette phase, les meilleurs et les pires individus sont mis à jour en utilisant respectivement les deux meilleurs individus les plus proches et les deux individus les moins bons les plus proches.

- ✓ Si xi est le meilleur global, sélectionnez les deux meilleurs individus les plus proches comme suit : (xmeilleur, xmeilleur+1, xmeilleur+2).
- ✓ Si xi est le pire global, sélectionnez les deux individus les plus proches ayant déjà empiré c omme suit : (…. Xpire-2, Xpire-1, Xpire)

IV.7 Phase senior

Cette phase s'inscrit dans le cadre de l'exploitation des informations disponibles et des connaissances pertinentes issues des différentes catégories de personnes au sein d'une population donnée. Ces connaissances sont classées en trois catégories : les meilleures, les moyennes et les moins bonnes. Cette utilisation fait référence à l'impact et à l'influence des individus, qu'ils soient modèles ou délinquants, sur le sujet étudié.

Ainsi, la mise à jour des connaissances de chaque individu peut être calculée selon le système de hiérarchi sation des âges, comme suit :

- Après avoir trié tous les individus par ordre croissant selon leur fonction objective, ils seront divisé s en trois catégories : les meilleurs individus, les individus moyens ou meilleurs, et les pires indivi dus.

Les meilleurs Individus	les individus moyens	les pires Individus
$100_P\%(X_{p\text{-meilleur}})$	$N-(2\times 100_P\%)(x_m)$	$100_P\%(x_{p\text{-pires}})$

Figure *III-3 :* Tri phase senior

- Ensuite, pour chaque individu $\boldsymbol{x_i}$, le schéma senior proposé sélectionne deux vecteurs de manière aléatoire parmi les 100p%meilleurs et les 100p%moins performants de la population actuelle de

taille NPafin de constituer la partie d'acquisition. Le troisième vecteur est, quant à lui, choisi aléatoirement parmi les individus intermédiaires $N - (2 \times 100p\%)$pour former la partie de partage (Ali Wagdy, Anas A, & Ali Khater , 2019).

Dimensions Junior (en vert) Dimensions senior (en rouge)



Figure *III-4* : Phase senior

IV.8 Mise à jour des solutions

La mise à jour des solutions constitue une étape essentielle de l'algorithme GSK. Elle consiste à générer une nouvelle solution pour chaque individu en combinant les effets des phases junior et senior. Certaines dimensions sont modifiées de manière exploratoire, tandis que d'autres sont ajustées de façon plus précise. Ce mécanisme permet d'introduire de nouvelles informations tout en exploitant les connaissances acquises. Ainsi, chaque individu évolue progressivement vers une solution de meilleure qualité (Ali Wagdy, Anas A, & Ali Khater , 2019).

IV.9 Sélection

L'étape de sélection permet de décider si la nouvelle solution générée doit remplacer l'ancienne. Elle repose sur une comparaison entre les valeurs de fitness des deux solutions. Si la nouvelle solution est meilleure ou égale, elle est acceptée, sinon elle est rejetée. Ce processus garantit que la qualité des solutions ne se détériore pas au cours des itérations. Il assure également une amélioration progressive et stable de la population (Ali Wagdy, Anas A, & Ali Khater , 2019).

IV.10 Création de la nouvelle génération

La création de la nouvelle génération consiste à former une population mise à jour à partir des solutions sélectionnées. Les individus améliorés remplacent les anciennes solutions, tandis que les autres sont conservés. Cette étape permet de construire une nouvelle population plus performante que la précédente. Ensuite, le compteur de génération est mis à jour et le processus recommence (Ali Wagdy, Anas A, & Ali Khater , 2019).

V Les paramètres de l'algorithme GSK

Les paramètres les plus importants de l'algorithme GSK interviennent principalement dans les phases d'initialisation et d'apprentissage :

- La taille de la population (NP).
- Le taux de connaissance (k) : Paramètre qui contrôle la vitesse de transition entre la phase junior et la phase senior.
- Le pourcentage $\boldsymbol{p}$: Définit la proportion des meilleurs et des pires individus utilisés dans la phase senior.
- La dimension du problème (D) : Nombre de variables dans chaque solution (nombre de conduites).
- Le facteur de connaissance (KF) : Paramètre qui contrôle l'intensité de modification des solutions.
- Le facteur de partage (KR) : Contrôle la probabilité de mise à jour des dimensions.
- Le critère d'arrêt : pour la terminaison, ce critère peut être un fitness maximal (performance maximale ou seuil), ou le nombre des itérations maximales est atteint (Ali Wagdy, Anas A, & Ali Khater , 2019).

VI Organigramme de l'algorithme GSK

Le principe de fonctionnement de l'algorithme basé sur l'acquisition et le partage des connaissances résume dans l'organigramme au-dessous, commencent de générer une population, évalué cette population.

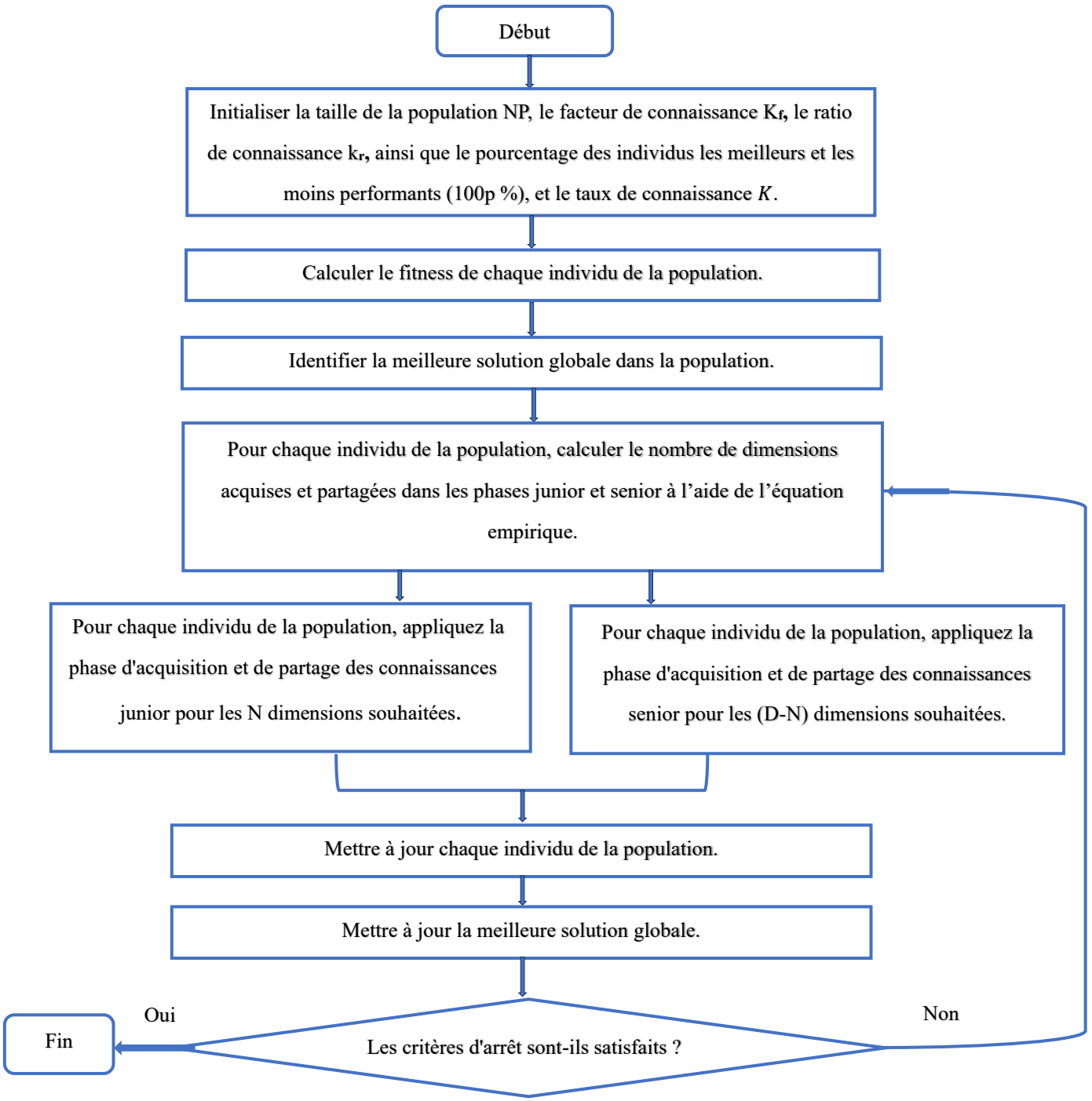


Figure *III-5 :* Organigramme du processus d'optimisation par la méthode GSK

VII Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de présenter la méthode d'optimisation basée sur l'acquisition et le partage des connaissances (GSK), ainsi que son rôle dans la résolution des problèmes d'optimisation.

Dans ce cadre, nous avons d'abord défini le principe général de la méthode GSK, puis décrit ses principaux opérateurs ainsi que ses paramètres de contrôle dans les phases junior et senior. Cette présentation permet de comprendre comment la méthode évolue et améliore progressivement les solutions. Nous avons ensuite présenté l'organigramme de l'algorithme afin d'offrir une vision globale et structurée de son déroulement, en reliant toutes les étapes entre elles et en illustrant la logique de recherche et d'amélioration utilisée. L'ensemble de ces éléments met ainsi en évidence l'efficacité du GSK dans l'exploration de l'espace de recherche et la convergence vers des solutions optimales.

Le chapitre suivant sera consacré au calcul des débits et des pressions par des méthodes multilinéaires appliquées aux réseaux hydrauliques étudiés.

Chapitre IV: Calcul des débits et des pressions par la Méthode Multilinéaire

I Introduction

Pour la modélisation des systèmes de distribution d'eau, il est crucial de calculer avec précision les débits et les pressions afin de refléter le comportement réel du système hydraulique. Dans ce contexte, ce chapitre est consacré à la description de la méthode Multilinéaire (ML) de calcul des débits et des pressions dans les réseaux de distribution d'eau potable. Cette méthode est basée sur la linéarisation des équations non linéaires, c'est-à-dire les équations reliant le débit et la perte de charge au niveau des conduites et des mailles. La méthode ML est récente (publiée en 2017) et présente plusieurs avantages, notamment la simplicité de mise en œuvre et la rapidité de convergence.

À cet effet, nous aborderons d'abord la définition de la méthode ainsi que les équations de l'écoulement dans les réseaux hydrauliques, puis son principe et sa formulation Q-H, la méthode du complément de Schur et l'algorithme associé. Nous terminerons par un exemple numérique illustrant son application concrète.

II Équations gouvernant l'écoulement dans un réseaux de distribution d'Eau

Dans un réseau d'AEP sous pression composé de conduites, de réservoirs, de pompes et de vannes, les inconnues sont les débits dans les conduites et les pressions (ou charges) aux nœuds. Ces inconnues sont obtenues par la résolution des équations de conservation de la masse aux nœuds (appelées aussi équations de continuité, ou loi des nœuds), ainsi que les équations de conservation d'énergie dans les conduites ou les mailles (ou loi des mailles) (Moosavian, 2017).

II.1 La loi des nœuds

La loi des nœuds repose sur le principe de conservation de la masse. Ainsi, elle peut être décrite comme la somme des débits entrants dans un nœud, qui est égale aux débits sortants.
Comme le montre le schéma ci-après, cette loi peut être expliquée de la manière suivante :

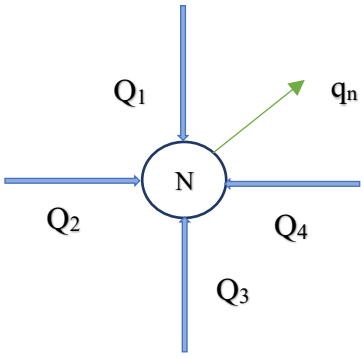


Figure *IV-1*: Débits entrant et sortants dans un nœud

Pour chaque nœud, la continuité doit être satisfaite.

$$\sum_{i=1}^{p}(\varepsilon_i Q_i) - q_n = 0 \text{.....Éq(IV-1)}$$

- Q_i : Le débit transporté par la conduite i en (m^3/s),
- q_n : Le débit de demande soutiré au nœud n (m^3/s),
- ε : Représente le symbole de débit et peut uniquement avoir comme valeurs 1, -1 ou 0. Par convention, on admet généralement que (Ben Ammar & Dahmani, 2017/2018):
  - $\varepsilon = 1$: Pour un débit entrant dans le nœud.
  - $\varepsilon = -1$: Pour un débit sortant par le nœud.
  - $\varepsilon = 0$: Pour un débit d'une conduite qui n'a aucune relation avec le nœud considéré.
- P : le nombre de conduites dans le réseau.

On prend l'exemple du réseau suivant :

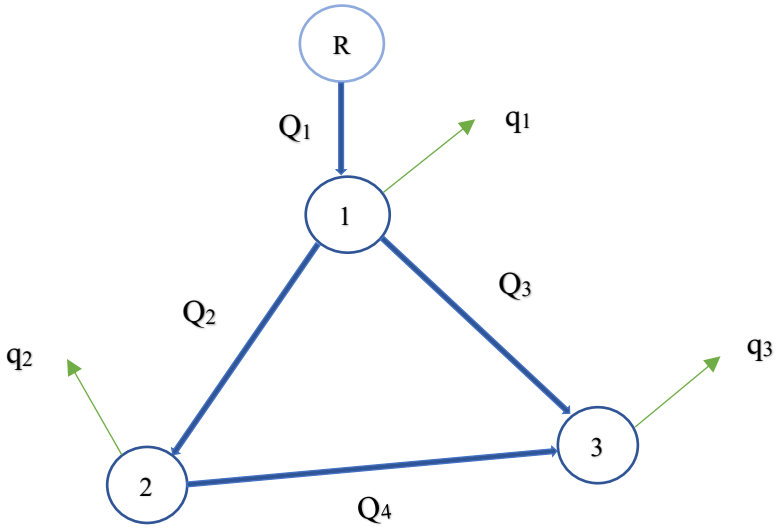


Figure *IV-2* : Exemple d'un réseau d'une seul maille

Les équations de conservation de la masse aux nœuds 1,2 et 3 est écrite comme suit :

Tableau IV-1: Les équations aux nœuds du figure ci-dessus (IV-2)

Nœud	Équation
1	$1\times Q_1 - 1\times Q_2 - 1\times Q_3 + 0\times Q_4 = q_1$
2	$0\times Q_1 + 1\times Q_2 + 0\times Q_3 - 1\times Q_4 = q_2$
3	$0\times Q_1 + 0\times Q_2 + 1\times Q_3 + 1\times Q_4 = q_3$

II.2 Loi des mailles

La perte de charge totale autour d'une boucle fermée doit être nulle, ou la perte de charge le long d'un parcours entre deux réservoirs à charge fixe doit correspondre à la différence de niveau d'eau entre ces réservoirs (Moosavian, 2017).

$$\sum_{k\in loop} hf_k = \Delta H, \forall l \in nl \text{ ……..Éq(IV-2)}$$

Avec

- ΔH : la différence de pression (charge) entre les deux extrémités d'un parcours, et ΔH = 0 si le parcours est fermé,
- nl : nombre des boucles,
- hf_k : est la perte de charge due aux frottements dans la conduite k en (m) qui est donnée par l'équation suivante :

$$hf_k = H_i - H_j = R_k Q_k^n \text{ ……Éq(IV-3)}$$

Avec

- H_i : charges aux nœuds de départ (m),
- H_j : charges aux nœuds de final (m),
- R_k : le coefficient de résistance de la conduite k ,
- Q : débit transporté dans un conduit en (m^3/s),
- n : est une constante dépendant de la formule de perte de charge utilisée,

Pour la formule de Hazen-Williams, la perte de charge dans une conduite s'exprime par la formule suivante :

$$hf_k = \frac{10.65}{C_{H-W}^{1.852}} \cdot \frac{L \times Q^{1.85}}{D^{4.8704}} \quad \text{..... Éq(IV-4)}$$

Exemple :

(Voire la figure IV-2)

Tableau IV-2 : Les équations d'énergie dans les conduites de figure (IV-2)

Tronçon	Équation
1	$hf_1 = H_R - H_1 = R_1 Q_1^n \Rightarrow R_1 Q_1^n + H_1 = H_R$
2	$hf_2 = H_1 - H_2 = R_2 Q_2^n \Rightarrow R_2 Q_2^n + H_2 - H_1 = 0$
3	$hf_3 = H_1 - H_3 = R_3 Q_3^n \Rightarrow R_3 Q_3^n + H_3 - H_1 = 0$
4	$hf_4 = H_2 - H_3 = R_4 Q_4^n \Rightarrow R_4 Q_4^n + H_3 - H_2 = 0$

III Description de la méthode multilinéaire

La méthode multilinéaire permet de résoudre des systèmes d'équations non linéaires, notamment les équations en débits (Q) et les équations débits-charges (Q-H).

Pour ce faire, les équations non linéaires de l'énergie sont linéarisées, ce qui transforme les équations de continuité et de perte de charge en un système linéaire pouvant être résolu. (Moosavian, 2017).

III.1 Principe de linéarisation

Considérons une fonction non linéaire f(x) ; $x \geq 0$, et sa fonction d'approximation linéaire :

$$g^{(1)}(x) = Ax + B \quad \text{.....Éq(IV-5)}$$

Dans l'intervalle (a ; b) avec :

- $A = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$ .....Éq(IV-6)
- $B = f(a) - a\frac{f(b) - f(a)}{b - a}$ .....Éq(IV-7)

En résolvant cette équation linéaire, c'est-à-dire $g^{(1)}(x)$, on obtient l'estimation initiale de f(x).

$$Ax + B = 0 \Rightarrow \; x^{(1)} = \frac{-B}{A} = \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\text{Éq(IV-8)}$$

III.2 Détermination du pas de discrétisation

L'intervalle de recherche est subdivisé en plusieurs segments afin d'améliorer la précision de l'approximation.

$$\Delta_x = \frac{b-a}{m} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\text{Éq(IV-9)}$$

Avec

- m : Le nombre de subdivisions,
- a : La borne inférieure,
- b : La borne supérieure.

Le paramètre « m » est une valeur prédéfinie qui détermine la précision de la solution. Une grande valeur de « m » est appropriée pour atteindre un degré élevé de précision pour le résultat final.

III.3 Mise à jour du nombre de subdivisions

Le paramètre de précision « m » peut être supposé constant à toutes les itérations ou mis à jour à chaque itération pour augmenter progressivement la précision par la formule suivante :

$$m^{(t+1)} = t \cdot m_{initial} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\text{Éq(IV-10)}$$

Avec

- $m^{(t+1)}$: valeur mise à jour de m à l'itération t,
- $m_{initial}$: valeur initiale de « m »,
- t : numéro de l'itération,

III.4 Détermination de la borne inférieure et supérieure de l'intervalle de recherche

Dans la méthode multilinéaire, les valeurs a et b sont mises à jour comme suit :

- $a = \left[\frac{x^{(t)}}{\Delta x} \right] \Delta x$ ……..……..Éq (IV-11)

- $b = \left[\frac{x^{(t)}}{\Delta x} + 1 \right] \Delta x$ ……..……..……Éq(IV-12)

Dans les équations (IV-11) et (IV-12), le symbole [] indique la partie entière. En insérant les nouvelles valeurs de a et b dans l'équation (IV-6) et (IV-7) et en résolvant l'équation linéaire suivant :

$$g^2(x) = Ax^{(2)} + B \text{ ……. Éq(IV-13)}$$

La valeur de $x^{(2)}$ est obtenue. Le processus est poursuivi jusqu'à ce que l'algorithme atteigne une précision souhaitée.

IV Applications de la méthode multilinéaire aux réseaux de distribution d'eau

La méthode multilinéaire proposée par (Moosavian, 2017) est appliquée pour linéariser les termes de perte de charge non linéaires dans l'équation d'énergie des réseaux d'AEP sous pression. Le système d'équations linéaire (aux nœuds) - non linéaire (aux mailles ou aux conduites) est converti en un système d'équations linéaire-linéaire et peut être résolu facilement. La solution obtenue constitue une bonne estimation pour la linéarisation successive des termes de perte de charge non linéaires, qui est basée sur cette solution avec un intervalle plus petit. Ces opérations se poursuivent jusqu'à atteindre la précision requise. Sur la Figure 1 ci-après, le terme non linéaire $f(Q_i) = R_i Q_i^n$ sur l'intervalle [0 ; $Q_{\max}$] peut être estimé par l'équation linéaire $g^{(1)}(Q)$ dans cet intervalle.

$$g^{(t)}(Q_i) = R_i Q_{\max}^{n-1} \left(Q_i^{(t)} \right) \text{ ……...Éq(IV-14)}$$

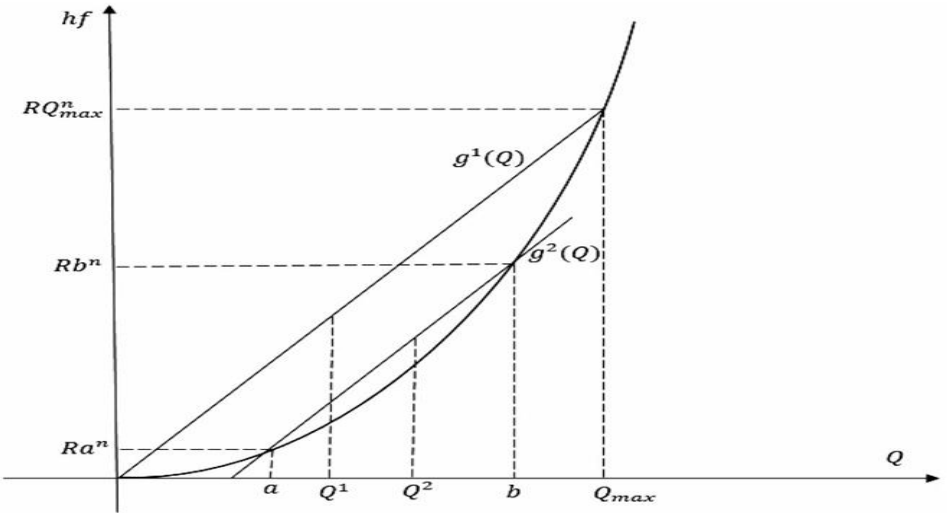


Figure IV-3*:* Linéarisation de la fonction non linéaire

Lors de la première itération, t = 1. Qmax = valeur constante, qui est déterminée en fonction du débit maximum possible à travers chaque conduite. Pour simplifier la procédure, on prend Qmax = la somme des consommations nodales dans le réseau. En résolvant le système linéaire d'équations, l'estimation initiale du débit $Q^{(1)}{}_i$ pour toutes les conduites est obtenue.

Dans l'étape suivante, pour augmenter la précision, l'intervalle [0 ; Qmax] est divisé en m intervalles de taille :

$$\Delta Q = \frac{Q_{\max}}{m} \quad \text{……Éq(IV-15)}$$

Ensuite, les valeurs de « a » et « b » aux deux extrémités de $Q^{(1)}{}_i$ sont déterminées par les conditions suivantes :

- $a_i = \left[\frac{Q_i}{\Delta Q}\right]\Delta Q$ ……..…..……Éq(IV-16)
- $b_i = \left[\frac{Q_i}{\Delta Q} + sign(Q_i)\right]\Delta Q$ ……..Éq(IV-17)

Dans la deuxième itération, une droite d'équation :

$g^{(2)}(Q_i) = A_i(Q)_i^2 + B_i$ ……Éq IV-18)

est tracée à travers les deux points [a_i ; f(a_i)] et (b_i ; f(b_i)) selon l'équation (IV-6) et (IV-7).

- $g^{(t)}(Q_i) = sign(Q_i^{(t)})\left[R_i(\frac{b_i^n - a_i^n}{b_i - a_i})Q_i^{(t)} - R_i(\frac{b_i^n - a_i^n}{b_i - a_i} \times a_i - a_i^n) \right]$ ..... Éq(IV-19)

  t > 1

- $A_i = sign(Q_i^{(t)})R_i\left(\frac{b_i^n - a_i^n}{b_i - a_i} \right)$ .....Éq(IV-20)

- $B_i = -sign(Q_i^{(t)})R_i\left(\frac{b_i^n - a_i^n}{b_i - a_i} \times a_i - a_i^n \right)$ .....Éq (IV-21)

Dans cette formulation, sign(Q_i) est défini par la formule suivante :

$$sign(Q_i) = \begin{cases} 1 & Q_i > 0 \\ 0 \Rightarrow & Q_i = 0 \\ -1 & Q_i < 0 \end{cases} \quad \text{..... Éq(IV-22)}$$

Pour déterminer comment les nœuds à charges nodales inconnues sont connectés aux conduites, ont défini une matrice d'incidence A_{12} de taille np × nn décrivant les informations topologiques du réseau ; nn et np sont respectivement le nombre de nœuds et de conduites (y compris les pompes), et les éléments de la matrice A_{12} sont définis comme suit :

$A_{12}(k, j) =$ { -1 Si le débit dans la conduite *k* de la boucle *l* est dans le sens horaire ; 0 Si la conduite *k* n'appartient pas à la boucle *l* ; 1 Si le débit dans la conduite *k* de la boucle *l* est dans le sens antihoraire }

V Application de la méthode multilinéaire pour une formulation Q-H

Le système d'équations Q-H contient les équations d'énergie aux conduits en termes de débits Q en relation avec les charges nodales (équation 3 déjà citée) et les équations de continuité en termes de Q. La forme linéaire des équations Q-H est définie par le système matriciel comme suit :

$$\begin{bmatrix} A & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B - A_{10}H_0 \\ q \end{bmatrix} \text{.....Éq(IV-23)}$$

Tels que :

- H0 = vecteur des charges nodales connues aux réservoirs et aux nœuds sources.

- La matrice linéarisée A et le vecteur B sont définis selon les équations (IV-19) et (IV-20).

Pour calculer les inconnues Q et H, il suffit d'écrire l'équation (IV-22) comme suit :

$$\begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -B - A_{10}H_0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{.....Éq(IV-24)}$$

Example (Voire les tableaux (IV-1) et (IV-2) définie à partir de la figure IV-2)

- A_{10} : Vecteur d'incidence du réservoir qui exprime la relation entre les tronçons et le réservoir. Pour le réseau décrit par la figure (IV-2), ce vecteur sera : A_{10} = [-1, 0, 0, 0], car seul le tronçon 1 qui est sortant du réservoir (donc, -1), mais pas de connexion entre le réservoir et les autres tronçons (2, 3 et 4), donc des coefficients [0, 0, 0].
- H_0 : La charge totale au niveau du réservoir (ou d'autre source d'eau du réseau, exprimé en m.e.c).
- B : Vecteur des éléments [B i] de l'équation IV-31.
- A : matrice diagonale.
- A_{12} : Matrice d'incidence nœuds-tronçons, exprimant la relation entre les nœuds et les conduites. Cette équation est formée par les coefficients des équations de la loi des nœuds (Eq. IV 11).
- A_{21} : Matrice transposée de la matrice A_{12}.

Example :

❖ $$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{np} \end{bmatrix} \text{ ..... Éq (IV-25)}$$

❖ $$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ ... \\ B_{np} \end{bmatrix} \text{.....Éq } (IV\text{-}26)$$

- Les matrices A, A_{12}, et A_{21} et donnent les résultats suivants pour l'exemple du réseau présenté sur la figure(IV-2):

$$\begin{bmatrix} A & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1Q_1^n & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & R_2Q_2^n & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & R_3Q_3^n & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & R_4Q_4^n & 0 & -1 & 1 \\ & & & & & & \\ & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{……Éq(IV-27)}$$

VI La méthode du complément de Schur

Dans l'équation (IV-24), la matrice inverse est obtenue selon la méthode du complément de Schur :

$$\begin{bmatrix} A & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \text{…… Éq (IV-28)}$$

Par conséquent, en supposant que D = A^{-1}, les éléments de la matrice (B) sont calculés par :

- $B_{11} = D - DA_{12}\left(A_{21}DA_{12}\right)^{-1}A_{21}D$ …….. Éq(IV-29)
- $B_{12} = DA_{12}\left(A_{21}DA_{12}\right)^{-1}$ ……Éq(IV-30)
- $B_{21} = B_{12}^T = \left(A_{21}DA_{12}\right)^{-1}A_{21}D$ ……. Éq (IV-31)
- $B_{22} = -\left(A_{21}DA_{12}\right)^{-1}$ ……Éq IV-32)

Les valeurs de (Q) et (H) sont calculées.

- $H = B_{21}\left(-B - A_{10}H_0\right) + B_{22}\left(q\right)$ ……Éq (IV-33)
- $Q = B_{11}\left(-B - A_{10}H_0\right) + B_{12}\left(q\right)$ ……. Éq(IV-34)

Lorsque l'équation (IV-33) est substituée dans l'équation (IV-34), le système d'équations devient :

- $H = \left(A_{21} D A_{12}\right)^{-1} \left[A_{21} D\left(-B - A_{10} H_O\right) - q\right]$ ……Éq (IV-35)
- $Q = \left[D - D A_{12}\left(A_{21} D A_{12}\right)^{-1} A_{21} D\right]\left(-B - A_{10} H_0\right) + D A_{12}\left(A_{21} D A_{12}\right)^{-1}\left(q\right)$ ……Éq (IV-36)

Les équations finale Q–H de la méthode est obtenu comme suivant :

- $H^{(t+1)} = V^{-1}\left[A_{21}\left(A^{(t)}\right)^{-1} C - q\right]$……..……Éq(IV-37)
- $Q^{(t+1)} = \left(A^{(t)}\right)^{-1} C - \left(A^{(t)}\right)^{-1} A_{12} H^{(t+1)}$ ……..……. ……... Éq(IV-38)
- $V = \left(A_{21}\left(A^{(t)}\right)^{-1} A_{12}\right)$ ……Éq (IV-39)
- $C = \left(-B^{(t)} - A_{10} H_0\right)$ ……...……Éq (IV-40)

Après la résolution du système d'équations pour H (Eq. IV-47), les débit Q (Eq. IV-48) sont mis à jour et utilisés à chaque itération pour mettre à jour les vecteurs [A] et [B] (Moosavian, 2017). Les détails de cet algorithme ML sont présentés ci-dessous.

Le critère de convergence peut considérer soit l'erreur sur l'estimation les débits, ou les charges nodales ou les deux en même temps. Si ce critère est atteint, le calcul itératif s'arrête :

$$\text{Erreur(Q)} = \frac{\Sigma_i^{NP}\left(\left|Q_i^{(t)} - Q_i^{(t-1)}\right|\right)}{\Sigma_i^{NP} Q_i^t} \leq \text{Tolérance}$$

$$\text{Erreur(H)} = \frac{\Sigma_j^{Nn}\left(\left|H_j^{(t)} - H_j^{(t-1)}\right|\right)}{\Sigma_j^{Nn} H_j^{(t)}} \leq \text{Tolérance}$$

Tels que :

- Erreur (Q) et Erreur (H) : les erreurs (la précision) de calcul des débits dans les conduites et les charges nodales, respectivement.
- Q_i^t : Le débit transporté par la conduite d'indice (1) à l'itération (t).
- H_j^t : La charge nodale du nœud d'indice (1) à l'itération (1).
- Np : Le nombre de conduites dans le réseau.
- Nn : Le nombre de nœud de demande dans le réseau.
- Tolérance : La précision de calcul voulue (exemple, Tolérance = 0.001, ou Tolérance =10^{-5} ...etc.).
- (t), (t-1) et (t+1): Indiquent l'itération courante (t), précédente (t-1) et suivante (t+1), respectivement.

VII Algorithme de la méthode de multilinéaire

Lecture des données :

Matrices A 12, et A 21, Matrice A 10, vecteur H 0 des charges constantes,

Vecteur q des demandes nodales.

Initialisation :

Choisir Q max = somme (q) ; (on utilise le débit maximal possible à travers chaque conduite)

1. Établir la matrice A et le vecteur B [Éq. (IV-25) et (IV-26)] ;
2. Calculer la matrice V et le vecteur C [Éq. (IV-39) et (IV-40)] ;
3. Résoudre le système linéaire pour H [Éq. (IV-37)] ;
4. Mettre à jour le vecteur inconnu Q à partir du vecteur connu H [Éq. (IV-38)];
5. Si la convergence n'est pas atteinte, retourner à l'étape 1 ;

Fin

VIII Exemple numérique de la méthode multilinéaire

Cette section détaille la résolution étape par étape la **méthode multilinéaire**. En utilisent l'exemple du réseau précèdent (voir figure IV-2), l'exemple suit le sens d'écoulement défini pour construire les matrices de calcul.

Tableau IV-3 : Données hydrauliques relatives à l'exemple numérique

N° de conduites	Diamètre (mm)	Résistance $R(m^{-5}s^2)$	Nœuds	Demande(m^3/s)	Charge(m)
1		1.5625	R	--	100
2		50	1	0.1	Inconnue
3		100	2	0.2	Inconnue
4		12.5	3	0.3	Inconnue

- On utilise les équations d'énergie dans les conduites comme on a fait dans l'exemple précèdent (voir tableau IV-2) pour la construction de la matrice A. Les termes « $R(m^{-5}\ s^2\ )$ » représentent les valeurs de la résistance hydraulique des tronçons. Ces valeurs sont calculées par la formule de Hazen-Williams.

$$A=\begin{bmatrix} R_1Q_{max} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2Q_{max} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3Q_{max} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4Q_{max} \end{bmatrix} \Rightarrow A=\begin{bmatrix} 1.5625\times0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 50\times0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100\times0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12.5\times0.6 \end{bmatrix}$$

$$\text{Donc } A=\begin{bmatrix} 0.9375 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 30 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 60 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7.5 \end{bmatrix} \quad \text{.....Éq (IV-41)}$$

- Pour la construction des matrices A_{12} et A_{21} on utilise les équations aux nœuds comme on a fait dans l'exemple précèdent (voir tableau IV-1). Le terme Q_{max} = la somme des demandes = 0.1+0.2+0.3 =0.6m³/s.

$$A_{12}^T = A_{21} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{.....Éq (IV-42)}$$

- La matrice ($A_{10}^T = A_{0.1}$) est ensuite calculée à l'aide de l'équation (IV-39) comme suit :

$$A_{10}^T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{.....Éq (IV-43)}$$

Cette équation définit la relation topologique entre le **réservoir** (nœud de référence) et les **conduites** du réseau :

- **Les valeurs -1** indiquent que le conduite 1 et directement connectées au réservoir et que l'écoulement "sort" du réservoir vers cette conduites. La valeur 0 indique que les autres conduites (2 à 4) n'ont aucun lien direct avec le réservoir.

- L'ordonnée à l'origine B_i est nulle lorsque l'intervalle de débit choisi pour la linéarisation commence à zéro ($B_i = 0$) $\Rightarrow$

$$B=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{.....Éq (IV-44)}$$

- La matrice **V** est ensuite calculée à l'aide de l'équation (IV-39) comme suit :

$$V=\left(A_{21}A^{-1}A_{12}\right)=\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \frac{1}{0.9375} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{30} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{60} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{7.5} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{.....Éq (IV-45)}$$

- La matrice **C** est calculée à l'aide de l'équation (IV-40) comme suit :

$$C=\left(-B-A_{10}H_0\right)=-\begin{bmatrix}0\\0\\0\\0\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}-1\\0\\0\\0\end{bmatrix}[100]=\begin{bmatrix}100\\0\\0\\0\end{bmatrix} \quad \text{……..……..Éq (IV-46)}$$

H_0 : Représente le vecteur des charges (ou d'altitudes piézométriques) constantes fournies pour le réservoir (ou les réservoirs) qui alimente le réseau. Les valeurs de ce vecteur doivent être connues.

- Par conséquent, **H** et **Q** peuvent être calculés à l'aide des équations (37) et (38) comme suit :

$$H=V^{-1}(A_{21}A^{-1}C-q)=\left\{\begin{bmatrix}1&-1&-1&0\\0&1&0&-1\\0&0&1&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{1}{0.9375}&0&0&0\\0&\frac{1}{30}&0&0\\0&0&\frac{1}{60}&0\\0&0&0&\frac{1}{7.5}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&0&0\\-1&1&0\\-1&0&1\\0&-1&1\end{bmatrix}\right\}^{-1}\times\left\{\begin{bmatrix}1&-1&-1&0\\0&1&0&-1\\0&0&1&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{1}{0.9375}&0&0&0\\0&\frac{1}{30}&0&0\\0&0&\frac{1}{60}&0\\0&0&0&\frac{1}{7.5}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-1\\0\\0\\0\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}0.1\\0.2\\0.3\end{bmatrix}\right\}$$

$$\Rightarrow H=\begin{bmatrix}99.4375\\89.7452\\88.8221\end{bmatrix} \quad \text{……..….Éq IV-47)}$$

$$Q=\left(A\right)^{-1}C-\left(A\right)^{-1}A_{12}H=\ Q=\begin{bmatrix}\frac{1}{0.9375}&0&0&0\\0&\frac{1}{30}&0&0\\0&0&\frac{1}{60}&0\\0&0&0&\frac{1}{7.5}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}100\\0\\0\\0\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\frac{1}{0.9375}&0&0&0\\0&\frac{1}{30}&0&0\\0&0&\frac{1}{60}&0\\0&0&0&\frac{1}{7.5}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&0&0\\-1&1&0\\-1&0&1\\0&-1&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}99.4375\\89.7452\\88.8221\end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow Q=\begin{bmatrix}0.6000\\0.3231\\0.1769\\0.1231\end{bmatrix} \quad \text{……..……Éq(IV-48)}$$

Lors de l'itération suivante, les matrices de coefficients (A) et (B) sont mises à jour en fonction des nouveaux débits $Q^{(t+1)}$. Il est supposé que le paramètre de précision reste constant et égal à 10 (m=10). Les nouvelles valeurs de (a_1) et (b_1) sont calculées à l'aide des équations (IV-16) et (IV-17).

$$a_1 = \left[\frac{mQ}{Q_{\max}}\right]\frac{Q_{\max}}{m} = \left[\frac{10\times 0.6}{0.6}\right]\frac{0.6}{10} = 0.6 \text{……Éq (IV-49)}$$

$$b_1 = \left[\frac{mQ}{Q_{\max}}+1\right]\frac{Q_{\max}}{m} = \left[\frac{10\times 0.6}{0.6}+1\right]\frac{0.6}{10} = 0.7 \text{ ……Éq (IV-50)}$$

Selon la formule de la pente de la droite équation (IV-20) et l'ordonnée à l'origine de la droite équation (IV-21), les coefficients (A_2) et (B_2) sont calculés.

$$A_1 = R_1\left(\frac{b_1^n - a_1^n}{b_1 - a_1}\right) = 1.5625\left(\frac{0.7^2 - 0.6^2}{0.7-0.6}\right) = 2.03125 \text{ ……..……Éq (IV-51)}$$

$$B_1 = -R_1\left(\frac{b_1^n - a_1^n}{b_1 - a_1}\times a_1 - a_1^n\right) = -1.5625\left(\frac{0.7^2 - 0.6^2}{0.7-0.6}\times 0.6 - 0.6^2\right) = -0.65625 \text{ ……Éq (IV-52)}$$

Pour toutes les conduites, les matrices (A) et (B) sont construites à l'aide des équations (IV-25 et IV-26).

$$A = \begin{bmatrix} 2.03125 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 35 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.75 \end{bmatrix} \text{ ……..……..Éq (IV-53)}$$

$$B = -\begin{bmatrix} 0.65625 \\ 6 \\ 2 \\ 0.25 \end{bmatrix} \text{ ……Éq (IV-54)}$$

À partir de ces nouvelles valeurs obtenues lors de la deuxième itération, les matrices (V) et (C) sont mises à jour ; ensuite, les solutions de (Q) et (H) sont obtenues.

$$H^{(t+1)} = V^{-1}\left\{A_{21}A^{-1}C - q\right\} = \begin{bmatrix} 99.4375 \\ 95.2441 \\ 95.1747 \end{bmatrix} \text{ ……Éq IV-55)}$$

$$Q^{(t+1)} = A^{-1}C - A^{-1}A_{12}H = \begin{bmatrix} 0.6000 \\ 0.2912 \\ 0.2088 \\ 0.0912 \end{bmatrix} \quad \text{……Éq IV-56)}$$

Les résultats obtenus montrent que l'algorithme multilinéaire atteint la solution finale en seulement deux itérations. Cela souligne l'efficacité et la rapidité de convergence de cette méthode pour résoudre les équations hydrauliques des réseaux de distribution d'eau. Grâce à la linéarisation progressive des équations non linéaires, la méthode permet d'obtenir des résultats précis avec un nombre réduit d'itérations. Des tests sur d'autres réseaux de tailles différentes confirmant la rapidité de cette méthode peuvent être trouvés dans (Moosavian, 2017).

IX Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de démontrer comment utiliser la méthode multilinéaire comme instrument pour le calcul des débits dans les conduites et des pressions aux intersections des réseaux de distribution d'eau, afin d'assurer une solution performante et stable des équations hydrauliques. Cette approche facilite donc la conversion d'un système complexe non linéaire en un problème plus simple à résoudre numériquement.

À la fin de ce chapitre, nous avons établi les équations régissant l'écoulement dans les réseaux d'eau, suivi de l'explication du principe de la technique multilinéaire ainsi que ses différentes formulations, incluant la formulation Q-H. Nous avons également exposé la méthode du complément de Schur ainsi que l'algorithme de résolution connexe, permettant ainsi de structurer la procédure de calcul. Finalement, l'exemple numérique a illustré l'efficacité et la précision de la technique dans un cas concret de réseau de distribution, en garantissant une détermination précise des débits dans les conduits et des charges aux nœuds avec une convergence satisfaisante.

Dans le chapitre suivant, nous traiterons l'optimisation du dimensionnement des réseaux de distribution d'AEP testées, en utilisant la méthode GSK pour réduire le coût du réseau, tout en utilisant la technique multilinéaire (ML) pour déterminer les débits dans les conduits et les charges aux nœuds, et donc, vérifier la satisfaction des exigences de fonctionnement hydraulique du réseau.

Chapitre V: Optimisation de dimensionnement des réseaux d'AEP

I Introduction

L'optimisation du dimensionnement des réseaux d'alimentation en eau potable (AEP) est une étape importante de la conception des systèmes hydrauliques, car elle permet d'assurer un fonctionnement efficace des réseaux tout en minimisant les coûts de réalisation ou de réhabilitation, … etc. Dans ce contexte, l'utilisation de méthodes d'optimisation est indispensable pour trouver les solutions les mieux adaptées aux contraintes hydrauliques et techniques.

Ce chapitre a pour objectif de présenter le processus d'optimisation appliqué aux réseaux d'AEP de test à l'aide de la méthode GSK, en définissant les variables de décision, la fonction objectif et les différentes contraintes du problème.

Pour atteindre cet objectif, nous présenterons d'abord la formulation du problème d'optimisation ainsi que le processus du programme développé, puis nous appliquerons cette approche à plusieurs réseaux de référence, notamment le réseau d'AEP à deux mailles « Two-Loop », le réseau d'AEP urbain de Hanoï, capitale du Vietnam, et le réseau gravitaire combiné « Combined Gravity », situé en Türkiye. Ces réseaux sont couramment utilisés dans la littérature afin d'évaluer et de comparer les performances des méthodes d'optimisation. Cela nous permettra également de comparer les résultats de la méthode GSK et d'analyser ses performances face aux autres techniques.

II Formulation du problème d'optimisation

Il est important de rappeler ici que la méthode GSK est responsable de l'optimisation, c'est-à-dire de la recherche de la meilleure combinaison de diamètres des conduites, garantissant à la fois le bon fonctionnement hydraulique du réseau (notamment les pressions requises aux nœuds) tout en minimisant le coût de réalisation du réseau. En effet, le rôle de la méthode multilinéaire (ML) est d'évaluer le fonctionnement hydraulique des réseaux candidats (proposés par la méthode GSK au cours du processus d'optimisation), afin de s'assurer que la solution optimale retenue soit conforme aux exigences de fonctionnement.

Ce travail vise à réduire le coût de réalisation (fourniture et travaux) de la section concernée du réseau d'AEP (les cas d'études), tout en essayant de se conformer aux contraintes techniques habituelles : des vitesses d'écoulement minimales et maximales à ne pas dépasser dans les conduites, ainsi que des pressions minimales et maximales exigées aux jonctions.

II.1 Variables de décision

Les variables de décision correspondent aux paramètres à optimiser dans le réseau. Plus précisément, il s'agit des diamètres des conduites, qui influencent directement le coût et le comportement hydraulique. Donc, la population de recherche est constituée d'un ensemble de réseaux, où chaque réseau est défini par un vecteur de diamètres choisis. Par conséquent, l'algorithme GSK prend des décisions sur les diamètres des tronçons constituant le réseau d'AEP.

$$X = (D_1, D_2 \ldots, D_i) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\text{Éq V-1)}$$

Avec : D_i représente le diamètre de la conduite i.

II.2 Fonction objectif

La fonction objectif définit le critère à réduire (à minimiser), habituellement le coût total du réseau, pour tous les réseaux analysés tout en respectant les contraintes de pression minimale. D'autres critères peuvent être considérés comme la vitesse minimale, vitesse maximale, et pression maximale exigées, … etc.
La fonction objectif considérée dans ce travail est la suivante:

$$f = \min \sum_{i}^{n} \left(C * D_i * l_i \right) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\text{Éq (V-2)}$$

Avec : ($D_i \times l_i$)

- f : La fonction objectif de la problématique,
- C : Le coût d'un mètre linéaire de tuyauterie,
- li : Longueurs des tronçons,
- i : numéro de la conduite.

II.3 Les contraintes et pénalité

Les contraintes définissent les conditions que doivent respecter les solutions, telles que les limites de pression aux nœuds, les vitesses d'écoulement, … etc.
D'une manière générale, les contraintes de fonctionnement couramment appliquées touchent les pressions aux nœuds et les vitesses d'écoulement aux conduites :

- En respectant les bornes de vitesses (contraintes) comme suit :

$$V_{min} < Vi < V_{max} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\text{Éq (V-3)}$$

Avec :

- V_{min} : La vitesse minimale d'écoulement à respecter (m/s).
- V_{max} : La vitesse maximale d'écoulement à ne pas dépasser (m/s).
- V_i : La vitesse d'écoulement dans le tronçon d'indice « i » en (m/s).

➢ En respectant les bornes de pressions (contraintes) comme suit :

$$P_{min} < P_j < P_{max} \quad \text{……..…….……Éq (V-4)}$$

Avec :

- P_{min} : La pression minimale au nœud à respecter (m.c.e).
- P_{max} : La pression maximale au nœud à ne pas dépasser (m.c.e).

Si les contraintes du réseau ne sont pas respectées, une pénalité est appliquée à la fonction objectif afin de défavoriser ou sanctionner les solutions non admissibles et d'orienter l'optimisation vers des configurations conformes aux exigences hydrauliques.

La pénalité considérée pour chaque nœud du réseau en cas de violation de la contrainte de pression minimale, est comme suite :

Pénalité au nœud j : $Pen_j = 0$, si $P_j \geq P_{min}$

Pénalité au nœud j : $Pen_j = 10^8 \text{ x } (P\ j - P\ min\ )^2$, si $P_j \leq P_{min}$

Donc, la fonction objectif devient :

$$f = \min \sum_i^n (C * D_i * D_i) + \sum \text{Pénalité}$$

Il est important de noter que dans la littérature, seule la contrainte de pression minimale est considérée comme contrainte active pour les trois réseaux de test (Two-Loop, Hanoi et Combined-Gravity). En effet, afin de permettre une comparaison rigoureuse avec les travaux déjà publiés, uniquement cette contrainte est prise en considération. Néanmoins, cela n'empêche pas la prise en compte d'autres contraintes dans de futurs travaux.

III Processus du programme d'optimisation

La recherche des diamètres optimaux du réseau, garantissant simultanément une répartition appropriée des vitesses d'écoulement et des pressions tolérables chez les abonnés tout en minimisant les coûts de réalisation possibles, passe par plusieurs étapes.

Le programme développé pour ce mémoire est illustré par l'architecture qu'il présente dans le chapitre III (titre VI), où l'organigramme détaillé résume toutes les opérations de calcul. Ensuite, ces différentes phases sont expliquées en détail pour mieux éclairer le processus de calcul.

- **Génération de la population initiale :**

  Cette étape consiste à générer une population initiale de N solutions candidates, réparties aléatoirement dans l'espace de recherche afin d'explorer différentes zones. Chaque solution Xi représente un individu composé de D variables Xij correspondant aux dimensions du problème.
  Dans le cas de l'optimisation du dimensionnement d'un réseau d'AEP, chaque solution correspond à un réseau potentiel dont les diamètres de conduites sont générés aléatoirement dans l'intervalle admissible [D_{min}, D_{max}). L'objectif est d'identifier, parmi ces configurations, celle qui minimise le coût tout en respectant les contraintes hydrauliques (pressions et vitesses).

- **Calculs des débits et des pressions :**

  Cette étape permet de calculer les débits, les vitesses d'écoulement dans les conduites et les pressions aux nœuds, selon la méthode multilinéaire programme en détail dans (l'annexe 4).
  Les détails de cette étape sont mentionnés dans (chapitre IV).

- **Evaluation des coûts :**

  L'évaluation des solutions consiste à mesurer la qualité de solution possible en réalisant une analyse hydraulique du réseau. Les pressions et les débits sont d'abord calculés, puis le coût total du réseau est déterminé en fonction des diamètres des conduites. Les contraintes hydrauliques, notamment les pressions minimales, sont également vérifiées. En cas de non-respect, une pénalité est appliquée. Cette étape permet de comparer les solutions et d'orienter l'optimisation vers les meilleures configurations.

- **Application de GSK**

  Cette méthode vise à optimiser le dimensionnement des réseaux de distribution d'eau en déterminant les diamètres des conduites de manière à minimiser le coût tout en respectant les contraintes hydrauliques. Les principes et le fonctionnement détaillé de cette méthode ont été présentés dans (chapitre III) précédent et en suit programme en détail dans (l'annexe 6).

IV Application aux réseaux de référence

L'évaluation des approches d'optimisation appliquées aux réseaux de distribution d'eau passe par leur application à des cas de référence reconnus. Cette section présente l'étude de plusieurs réseaux types présentant des niveaux de complexité variés. L'objectif est d'analyser la capacité de l'approche adoptée à fournir des solutions performantes tout en respectant les contraintes hydrauliques. Les résultats obtenus seront examinés afin d'apprécier leur qualité et leur cohérence. Cette démarche permet ainsi de valider l'efficacité de la méthode dans des conditions proches de la réalité.

IV.1 Réseaux à deux boucles « Two-loop »

Le réseau à deux boucles « two-loop » a été étudié pour la première fois par Alperovits et Shamir en 1977. Il se compose de 8 conduites, 6 nœuds et un réservoir. Chaque conduite a une longueur de 1000 mètres et le coefficient de Hazen-Williams est fixé à 130. Afin de simplifier et d'accélérer le processus de conception au début, un même diamètre initial est attribué à toutes les conduites. La pression minimale requise aux nœuds du réseau est fixée à 30 mètres (Batmaz & Kayaalp, 2022).

La conception du réseau sous EPANET avant optimisation est illustrée à la figure(V-1). Les caractéristiques des nœuds et des conduites du réseau sont détaillées dans (l'annexe 1).

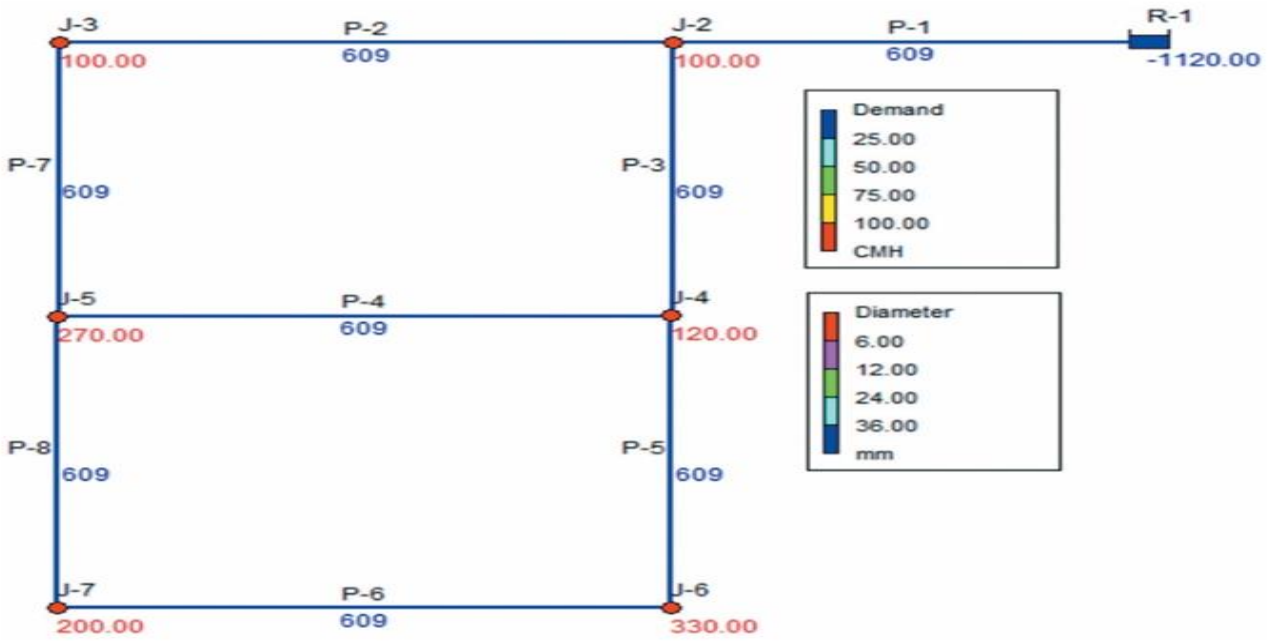


Figure *V-1 : Schéma du réseau à deux boucles (Tow-loop) avant l'optimisation*

Les diamètres commerciaux des conduites utilisés dans le réseau à deux boucle (Tow-loop) ainsi que les coûts unitaires correspondants sont présentés dans le tableau (V-1). Le nombre de combinaisons possibles de diamètres (nombre de solutions possibles) est : $14^8 = 1475789056$.

Tableau V-1 : Diamètre commerciale et cous unitaire (Tow-loop) *(Batmaz & Kayaalp, 2022)*

Diamètre(mm)	Coût unitaire (unités/m)
25.4	2
50.8	5
76.2	8
101.6	11
152.4	16
203.2	23
254	32
304.8	50
355.6	60
406.4	90
457.2	130
508	170
558.8	300
609.6	550

La figure suivante présente la courbe de convergence obtenue par l'algorithme GSK appliqué au réseau à deux boucles (Tow-loop). Les simulations ont été réalisées avec une taille de population de 70 individus et un nombre maximal de 500 itérations. L'objectif de l'optimisation est de minimiser le coût total du réseau tout en respectant la contrainte hydraulique imposant une pression minimale de 30 m aux nœuds du réseau. Les résultats montrent une convergence progressive de l'algorithme vers une solution optimale avec un coût final d'environ 419000 unités.

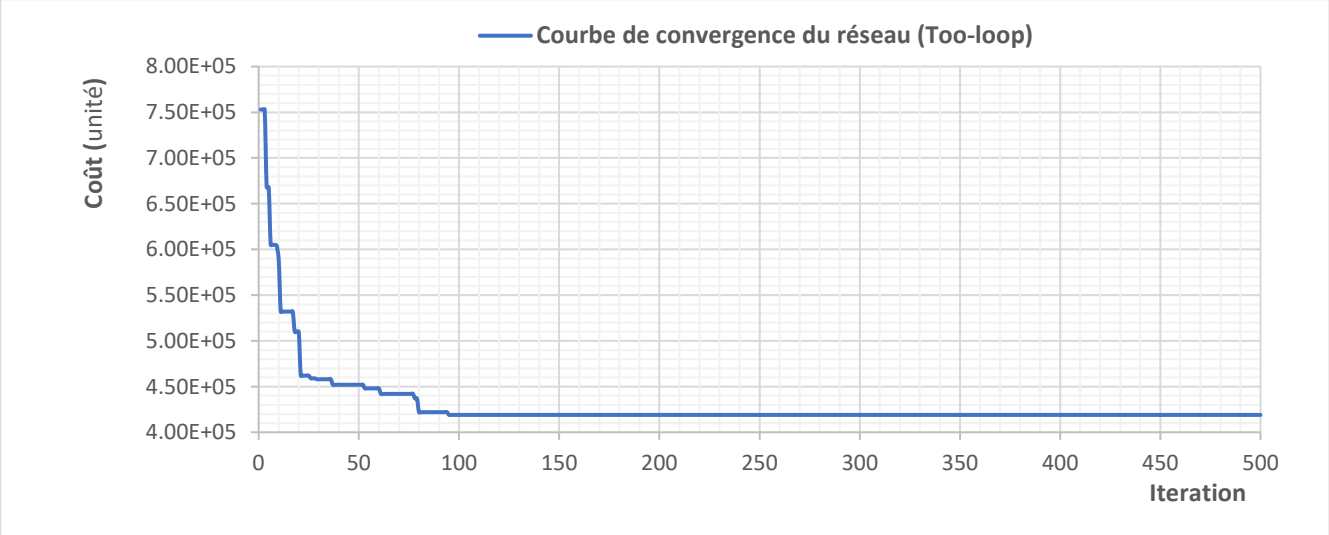


Figure V-2 : Évolution du coût de la solution GSK appliquée au réseau à deux boucles.

Le tableau suivant présente les résultats obtenus après l'application de l'algorithme GSK au réseau à deux boucles (Tow-loop). Il répertorie les diamètres optimaux des conduites et les charges de pression obtenues aux différents nœuds du réseau. Ces résultats permettent d'évaluer les performances hydrauliques du réseau optimisé, tout en vérifiant le respect des contraintes de pression imposées.

Tableau V-2 : Résultats de l'algorithme GSK pour le réseau (Tow-loop)

Identifiant de la conduite	Diamètre en (mm)	Longueur en (m)	Identifiant du *Nœud*	Charge de pression (m)
P-1	457.2	1000	R-1	Réservoir
P-2	254	1000	J-2	53.26
P-3	406.4	1000	J-3	30.49
P-4	101.6	1000	J-4	43.48
P-5	406.4	1000	J-5	33.84
P-6	254	1000	J-6	30.48
P-7	254	1000	J-7	30.61
P-8	25.4	1000		

Le tableau suivant présente une comparaison du coût obtenu par l'algorithme GSK avec ceux rapportés dans différentes études antérieures concernant le réseau à deux boucle (Tow-loop). Cette comparaison permet d'évaluer les performances de la méthode proposée en matière d'optimisation économique du réseau, tout en respectant les contraintes hydrauliques imposées. Les résultats montrent que l'algorithme GSK fournit des solutions compétitives, proches des meilleures valeurs publiées dans la littérature.

Tableau V-3 : Comparaison du coût obtenu par l'algorithme GSK avec les résultats des études antérieures (Tow-loop)

Études	Méthodes	Coût (Unités)
Alperovits et Shamir (1977)	LP	479,525
Savic et Walters (1997)	GA	419,000
Sedki et Ouazar (2012)	PSO-DE	419,000
Afshar (2009)	GA	419,000
Yilmaz, Büyükyildiz, et Kaan Baykan (2020)	ABC	429,000
Ezzeldin and Djebedjian (2020)	WOA	419,000
Sangroula et al. (2022)	SOP-WDN	419,000
Veli Batmaz et Necati Kayaalp (2022)	BBO-IWO	419,000
Cette étude	**GSK**	**419,000**

IV.2 Réseaux urbain Hanoï « Hanoi »

Le réseau de distribution d'eau de la ville de Hanoï (Hanoi), utilisé pour la première fois par Fujiwara et Ba Khang en 1990, puis adopté comme réseau de test par de nombreux chercheurs, est composé de 31 nœuds et de 34 conduites. L'altitude de tous les nœuds est de 0 mètre, tandis que celle du réservoir est de 100 mètres.

La pression minimale requise dans le système est de 30 mètres. Le coefficient de Hazen-Williams C_{HW} = 130 est adopté pour toutes les conduites.

Ce système, qui fonctionne entièrement par gravité, a été conçu pour obtenir la solution la plus économique possible tout en respectant les contraintes d'altitude et en utilisant des diamètres de conduites disponibles dans le commerce (Batmaz & Kayaalp, 2022).

La conception du réseau sous EPANET avant optimisation est illustrée à la figure(V-3). Les nœuds du réseau et les caractéristiques des conduites sont détaillés dans (l'annexe 2).

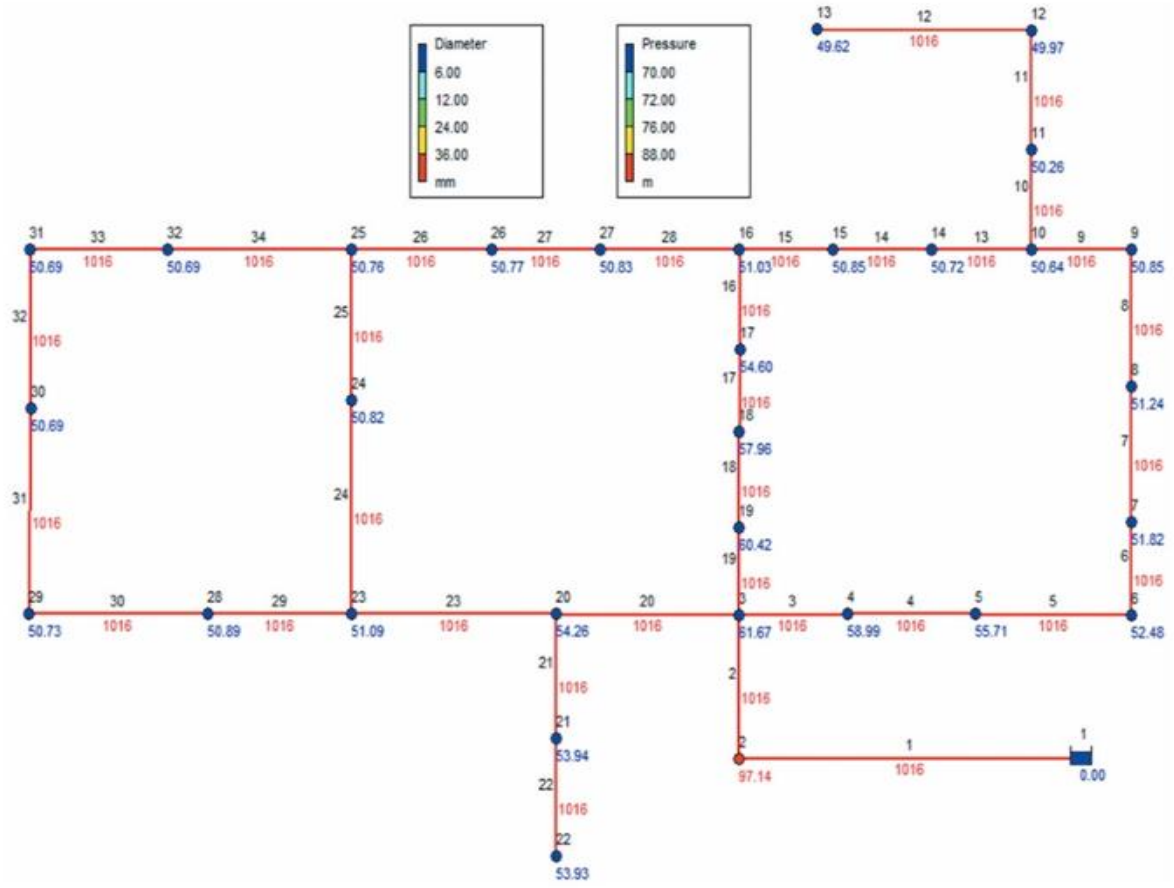


Figure V-3 : Schéma du réseau (Hanoi) avant l'optimisation

Les diamètres commerciaux des conduites utilisées dans le réseau (Hanoi), ainsi que les coûts unitaires correspondants, sont présentés dans le tableau (V-4). Le nombre de combinaisons possibles de diamètres (nombre de solutions possibles) dans ce cas, est : $6^{34} = 2.865118\times10^{26}$

Tableau V-4 : Diamètre commerciale et cous unitaire (Hanoi) *(Batmaz & Kayaalp, 2022)*

Diamètre(mm)	Coût unitaire (USD/m)
304.8	45.726
406.4	70.40
508.00	98.378
609.6	129.333
762.00	180.748
1016	278.280

La figure suivante illustre la courbe de convergence obtenue en appliquant l'algorithme GSK au réseau de Hanoi. Les simulations ont été réalisées avec une population de 100 individus et un nombre maximal d'itérations de 1 000. Les paramètres de l'algorithme adoptés sont les suivants : un facteur de connaissance KF = 0,4, un ratio de connaissance KR = 0,7 et un taux de connaissance K_rate = 15. L'optimisation vise à minimiser le coût total du réseau tout en respectant la contrainte hydraulique qui impose une pression minimale de 30 m aux différents nœuds. Les résultats montrent une convergence rapide de l'algorithme vers une solution optimale, avec un coût final d'environ $6{,}076\times10^{6}$USD.

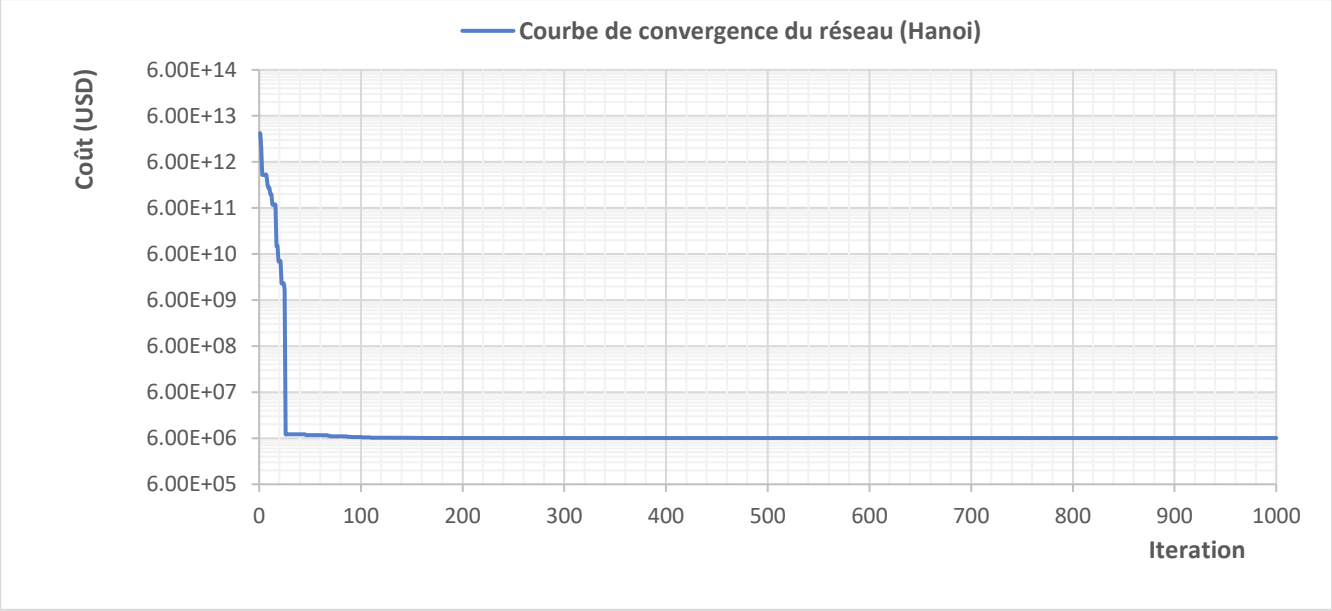


Figure V-4 : Évolution du coût de la solution GSK appliquée au réseau de (Hanoi)

Le tableau suivant présente les résultats obtenus après l'application de l'algorithme GSK au réseau (Hanoi). Il répertorie les diamètres optimaux des conduites et les charges de pression obtenues aux différents nœuds du réseau. Ces résultats permettent d'évaluer les performances hydrauliques du réseau optimisé, tout en vérifiant le respect des contraintes de pression imposées.

Tableau V-5 : Résultats de l'algorithme GSK pour le réseau (Hanoi)

Identifiant de la conduite	Diamètre en (mm)	Longueur en (m)	Identifiant du *Nœud*	Charge de pression (m)
P-1	1,016.00	100	R-1	0.00
P-2	1,016.00	1,350	J-2	97.145
P-3	1,016.00	900	J-3	61.731
P-4	1,016.00	1,150	J-4	56.963
P-5	1,016.00	1,150	J-5	51.053
P-6	1,016.00	450	J-6	44.817
P-7	1,016.00	850	J-7	43.354
P-8	1,016.00	850	J-8	41.601
P-9	1,016.00	800	J-9	40.206
P-10	762.00	950	J-10	39.174
P-11	609.60	1,200	J-11	37.617
P-12	609.60	3,500	J-12	34.195
P-13	508.00	800	J-13	30.01
P-14	406.40	500	J-14	35.39
P-15	304.80	550	J-15	33.475
P-16	304.80	2,730	J-16	30.766
P-17	406.40	1,750	J-17	31.741
P-18	508.00	800	J-18	46.988
P-19	609.60	400	J-19	59.114
P-20	1,016.00	2,200	J-20	50.634
P-21	508.00	1,500	J-21	41.304
P-22	304.80	500	J-22	36.149
P-23	1,016.00	2,650	J-23	44.511
P-24	762.00	1,230	J-24	38.864
P-25	762.00	1,300	J-25	35.23
P-26	508.00	850	J-26	31.478
P-27	304.80	300	J-27	30.391
P-28	304.80	750	J-28	38.912
P-29	406.40	1,500	J-29	30.058
P-30	304.80	2,000	J-30	30.336
P-31	304.80	1,600	J-31	30.619
P-32	406.40	150	J-32	33.083
P-33	406.40	860		
P-34	609.60	950		

Le tableau suivant compare le coût obtenu par l'algorithme GSK avec les résultats de diverses études antérieures concernant le réseau de Hanoi. Cette comparaison démontre que la méthode proposée est la plus efficace pour fournir le coût optimal. Ces résultats confirment l'efficacité supérieure du GSK pour minimiser les dépenses d'investissement tout en garantissant le respect rigoureux de l'ensemble des contraintes hydrauliques du réseau.

Tableau V-6 : Comparaison du coût obtenu par l'algorithme GSK avec les résultats des études antérieures (Hanoi)

Études	Méthodes	Coût ($\times 10^6$USD)
Savic and Walters (1997)	GA	6.195
Suribabu (2010)	DE	6.081
Vasan and Slobodan (2010)	DE	6.195
Cisty (2010)	GA-LP	6.057
Sedki and Ouazar (2012)	PSO-DE	6.081
Feifei, Zecchin, and Simpson (2013)	DE	6.081
Ezzeldin and Djebedjian (2020)	WOA	6.081
Sangroula et al. (2022)	SOP-WDN	6.081
Veli Batmaz et Necati Kayaalp (2022)	BBO-IWO	6.081
Cette étude	**GSK**	**6.076**

IV.3 Réseau gravitaire combiné « Combined Gravity »

Le réseau de distribution d'eau gravitaire combiné se compose de 57 nœuds, 70 conduites et d'un réservoir. La hauteur de pression minimale requise dans le système est de 20 mètres. Le coefficient de Hazen-Williams (C_{HW}) est pris égal à 100 pour l'ensemble des conduites. L'eau est acheminée par gravité vers les différents nœuds du réseau. Ce réseau comporte davantage de connexions ramifiées et maillées que les autres réseaux précédemment étudiés. Il a été choisi en raison des difficultés de convergence plus importantes qui apparaissent dans ce type de réseau (Batmaz & Kayaalp, 2022).

La conception du réseau sous EPANET avant optimisation est présentée à la figure 8. Les caractéristiques des nœuds et des conduites sont détaillées dans (l'annexe 3).

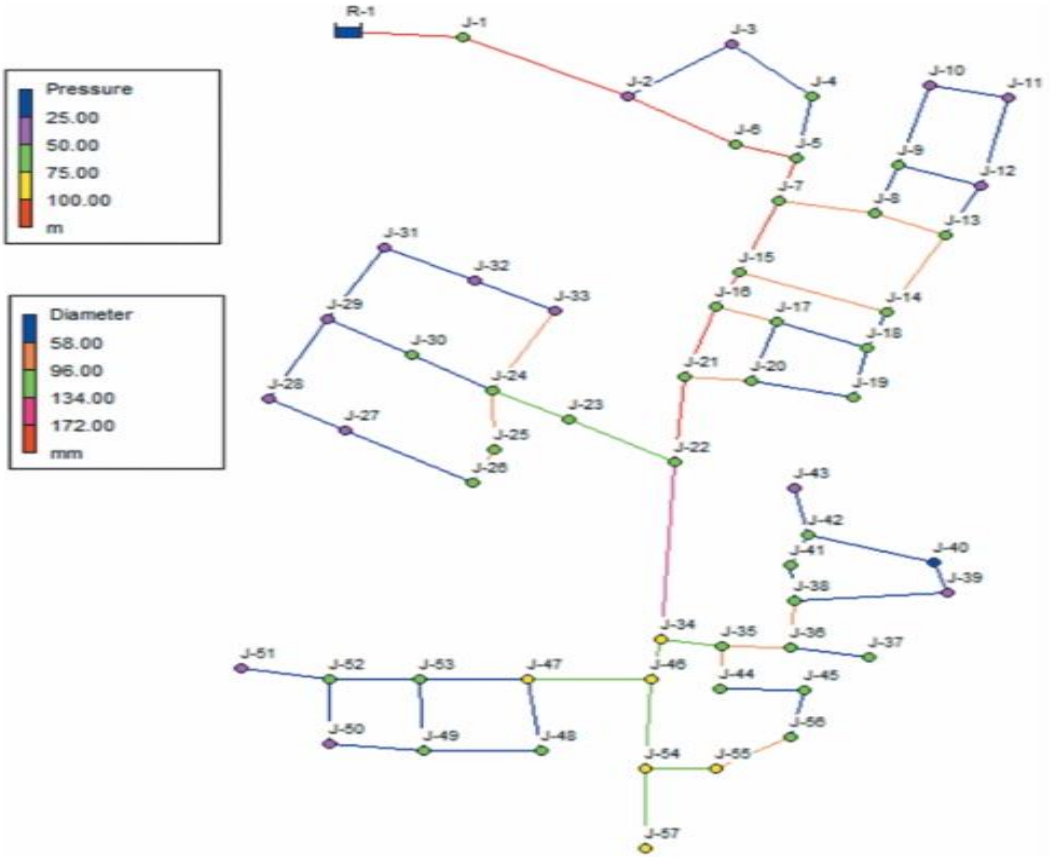


Figure V-5 : Schéma du réseau de (Combined Gravity) avant l'optimisation

Les diamètres commerciaux des conduites utilisées dans le réseau (Combined Gravity)), ainsi que les coûts unitaires correspondants, sont présentés dans le tableau (V-7). Le nombre de combinaisons possibles de diamètres (nombre de solutions possibles) dans ce cas, est : $7^{70} = 1.435036016\times10^{59}$

Tableau V-7 : Diamètre commerciale et cous unitaire (Combined Gravitaire)

Diamètre(mm)	Coût unitaire (TL/m)
25	4.50
50	15.80
80	34.20
100	66.48
125	84.60
150	146.80
200	238.40

La figure suivante illustre la courbe de convergence obtenue par l'algorithme GSK appliqué au réseau « Combined Gravity ». Pour ces simulations, une population de **100** individus a été utilisée, avec un nombre maximal d'itérations fixé à **1 500**. Les paramètres de contrôle adoptés sont les suivants :

- Facteur de connaissance KF = 0,4,
- Ratio de connaissance KR = 0,7,
- Taux de connaissance K_rate = 15.

Le processus d'optimisation a permis de minimiser le coût total du système tout en respectant une contrainte de pression minimale de 20 m à chaque nœud. Les résultats démontrent l'efficacité de l'algorithme, qui a permis d'obtenir un coût optimal de 468 357,281 TL (Livre Turque), grâce à une convergence stable vers la solution globale.

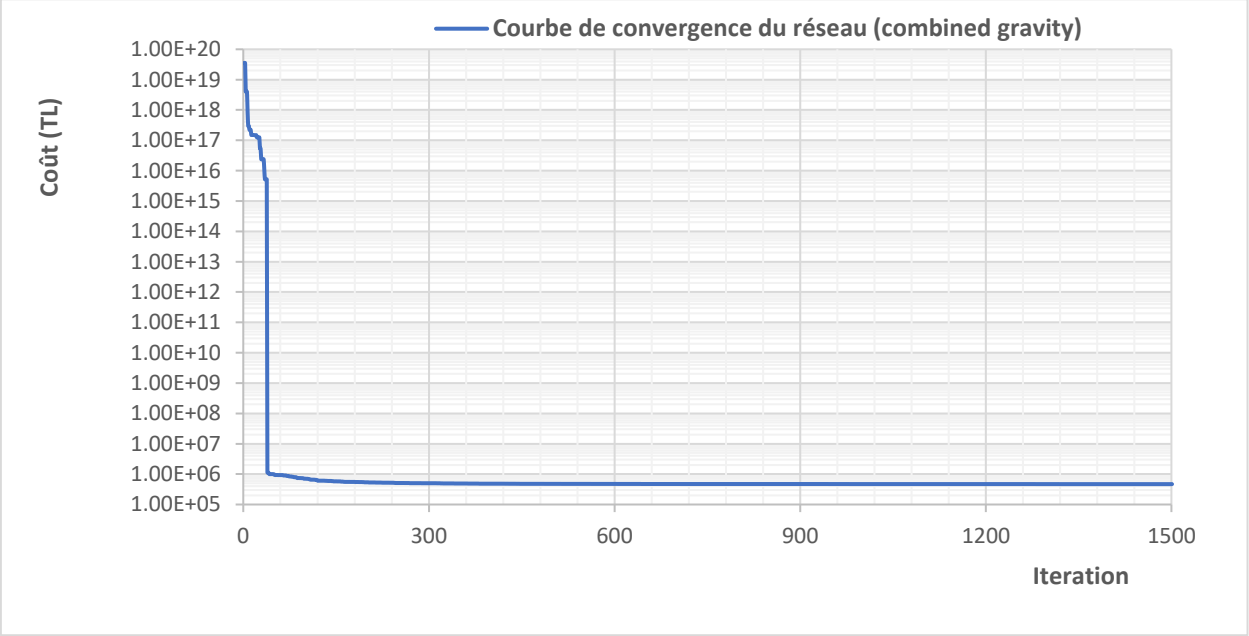


Figure V-6 : Évolution du coût de la solution GSK appliquée au réseau de (Combined Gravity)

Le tableau suivant présente les résultats obtenus à partir de l'application de l'algorithme GSK au réseau Combined Gravity. Il détaille les diamètres optimaux sélectionnés pour chaque conduite, ainsi que les charges de pression calculées aux différents nœuds du système. Ces données permettent de valider les performances hydrauliques du réseau optimisé et de confirmer que l'ensemble des contraintes de pression imposées (20 m) sont respectées.

Tableau V-8 : Résultats de l'algorithme GSK pour le réseau (Combined Gravity)

Identifiant de la conduite	Diamètre en (mm)	Longueur en (m)	Identifiant du *Nœud*	Charge de pression (m)
P-1	200	110.05	J-1	50.89
P-2	200	328.45	J-2	40.02
P-3	25	189.89	J-3	39.11
P-4	25	162.62	J-4	47.28
P-5	50	124.41	J-5	61.94
P-6	200	90.2	J-6	57.13
P-7	200	185.66	J-7	62.06
P-8	200	62.38	J-8	53.28
P-9	50	128.02	J-9	46.44
P-10	50	55.75	J-10	21.16
P-11	25	184.53	J-11	21.10
P-12	25	83.92	J-12	32.79
P-13	25	192.75	J-13	51.68
P-14	25	107.31	J-14	50.61
P-15	50	53.15	J-15	63.81
P-16	25	55.39	J-16	66.37
P-17	200	194.97	J-17	50.41
P-18	25	209.84	J-18	36.72
P-19	50	229.49	J-19	28.05
P-20	150	70.45	J-20	50.94
P-21	25	83.92	J-21	72.06
P-22	25	145.64	J-22	74.31
P-23	25	71.05	J-23	58.42
P-24	25	102.99	J-24	54.71
P-25	200	147.35	J-25	47.23
P-26	25	100.94	J-26	45.78
P-27	25	144.56	J-27	31.91
P-28	25	127.29	J-28	23.56
P-29	150	186.12	J-29	40.91
P-30	80	187.81	J-30	47.86
P-31	80	124.19	J-31	20.46
P-32	80	139.08	J-32	30.61
P-33	80	135.02	J-33	31.33
P-34	50	144.5	J-34	69.44
P-35	50	55.94	J-35	66.84
P-36	50	219.46	J-36	51.06
P-37	25	134.6	J-37	59.18
P-38	50	190.18	J-38	57.65

Suite du tableau (V-8) :

Identifiant de la conduite	Diamètre en (mm)	Longueur en (m)	Identifiant de la *Nœud*	Charge de pression (m)
P-39	50	166.4	J-39	25.12
P-40	25	145.19	J-40	20.12
P-41	50	53.16	J-41	55.76
P-42	50	189.83	J-42	49.95
P-43	150	363.63	J-43	44.07
P-44	80	92.25	J-44	48.24
P-45	80	100.29	J-45	30.27
P-46	25	107.16	J-46	58.58
P-47	80	97.48	J-47	49.40
P-48	80	68.08	J-48	42.71
P-49	80	42.52	J-49	35.53
P-50	50	128.01	J-50	23.09
P-51	50	183.96	J-51	20.74
P-52	25	73.94	J-52	30.20
P-53	50	230.45	J-53	39.66
P-54	80	83.85	J-54	46.31
P-55	25	88.5	J-55	35.32
P-56	25	88.66	J-56	26.63
P-57	25	79.61	J-57	31.14
P-58	25	174.45	R-1	0.00
P-59	80	182.84		
P-60	25	53.81		
P-61	80	226.02		
P-62	50	180.29		
P-63	50	144.6		
P-64	50	138.57		
P-65	50	133.2		
P-66	25	135.76		
P-67	25	141.1		
P-68	25	162.27		
P-69	25	140.17		
P-70	25	176.91		

Les résultats obtenus démontrent que l'approche proposée a permis d'atteindre un coût optimal de 468 357,281 TL, tandis que la méthode BBO-IWO a obtenu un coût de 470 927 TL (Livre Turque).

Par conséquent, malgré un écart relativement faible, l'algorithme GSK a réussi à produire une solution de meilleure qualité que la méthode BBO-IWO, tout en respectant l'ensemble des contraintes hydrauliques du réseau.

Ces résultats semblent indiquer que GSK possède les compétences nécessaires pour explorer efficacement l'espace de recherche et identifier des configurations plus économiques pour le dimensionnement des réseaux d'alimentation en eau potable.

V Évaluation de la robustesse de l'approche proposée (ML + GSK)

Afin d'évaluer la robustesse et la stabilité de l'approche proposée, dix essais indépendants ont été réalisés pour chaque réseau.

Tableau V-9 : Tableau des essais de la robustesse de l'approche (ML + GSK)

Réseau	Paramètres		Itération									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Two-loop	Population (70)	Coût	**419000**	**419000**	**420000**	**420000**	**420000**	**419000**	**420000**	**420000**	**419000**	**419000**
	Itération (500)											
Hanoi	Population (100)		**6071600**	**6097100**	**6159400**	**6097100**	**6224400**	**6071600**	**6097100**	**6159400**	**6097100**	**6224400**
	Itération (1000)											
	KF (0.4)											
	KR (0.7)											
	K_rat (15)											
Combined Gravity	Population (100)		**468357.3**	**471066**	**470927**	**474784**	**470927**	**471066**	**474784**	**470927**	**471066**	**468357.3**
	Itération (1500)											
	KF (0.4)											
	KR (0.7)											
	K_rat (15)											

Les coûts obtenus sont ensuite analysés à l'aide de quatre indicateurs statistiques : le coût minimal, le coût maximal, la moyenne et l'écart-type. Ces indicateurs permettent d'apprécier la qualité, la stabilité et la reproductibilité des solutions fournies par l'algorithme.

Tableau V-10 : Les résultats statistiques des approche (ML + GSK)

Réseau	Coût minimal	Coût maximal	Coût moyen : $m = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}$	Écart-type : $\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(X_i - m)}$
Two-loop	419000	419000	419500	527.046277
Hanoi	6071600	6224400	6129920	58406.74999
Combined Gravity	468357.3	474784	471226.16	2163.397794

VI Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de présenter l'optimisation du dimensionnement des réseaux d'alimentation en eau potable (AEP), à travers la formulation du problème d'optimisation et l'application du programme développé à plusieurs réseaux de référence.

Les variables de décision, la fonction objective et les contraintes hydrauliques ont ainsi été définies pour assurer un dimensionnement optimal et économique des réseaux. Le processus du programme d'optimisation a ensuite été présenté, puis appliqué aux réseaux Two-Loop, Hanoi et Combined Gravity confirmant ainsi l'efficacité et la robustesse de la méthode proposée.

Les résultats obtenus montrent que l'approche adoptée permet de réduire les coûts tout en respectant les contraintes de pression et de débit. Ce dernier chapitre constitue ainsi l'aboutissement du travail réalisé dans ce mémoire.

Conclusion générale

Ce travail c'est concentré sur l'optimisation du dimensionnement des réseaux de distribution d'eau potable (AEP), visant à réduire leur coût tout en maintenant les contraintes hydrauliques d'opération. Pour atteindre cet objectif, une approche combinant la méthode multilinéaire pour les calculs hydrauliques et l'algorithme méta-heuristique du partage de connaissance Gains-Sharing Knowledge (GSK) pour l'optimisation a été développée sous Octave/MATLAB.

Initialement, les concepts de base concernant les réseaux d'AEP et les méthodes d'optimisation ont été exposés. Par la suite, l'étude approfondie de l'algorithme GSK a permis d'exposer ses processus d'exploration et d'exploitation basés sur l'acquisition et le partage de connaissances. De plus, l'approche multilinéaire a servi à définir de manière efficace les débits et les pressions dans les systèmes de conduits, se convergé rapidement vers la solution hydraulique.

La méthode suggérée a été mise en œuvre sur trois réseaux standards. Pour le modèle Two-Loop, un coût optimal de 419 000 unités monétaires a été atteint, à la parité avec les résultats les plus performants dans la littérature. Concernant le réseau de Hanoi, un coût de $6{,}076 \times 10^6$ USD a été atteint, ce qui est inférieur à plusieurs solutions déjà publiées. Finalement, concernant le réseau Combined Gravity, le coût optimal déterminé est de 468 357,281 TL (Livre Turque), surpassant le résultat de référence de la méthode BBO-IWO (470 927 TL).

L'association de la méthode multilinéaire et de l'algorithme GSK pour l'analyse hydraulique et l'optimisation économique des réseaux d'AEP a prouvé son efficacité, comme en témoignent les résultats obtenus. Cette tâche a également contribué à renforcer les connaissances en hydraulique des réseaux, en programmation MATLAB et en optimisation méta-heuristique, tout en offrant des perspectives prometteuses pour de futures études dans le champ de l'optimisation des systèmes hydrauliques.

Références bibliographiques :

- Ali, R., Abdel-Karimi, A.-T., Loai, A.-A., Seyedali, M., & Peter, T. (2025, 02 12). Enzymeactionoptimizer:anovelbio-inspiredoptimization algorithm. *The Journal of Supercomputing*(67), 2-3.
- MORARECH, M. (2016-2017). *Hydrogéochimie-Eau potable et Assainissement liquide.* Rabat: Faculté des Sciences de Rabat Département des Sciences de la Terre.
- ABD ENNAFAA, L. M. (2024). *Simulation du réseau de distribution d'eau potable (AEP) à l'aide d'EPANET Cas de la ville nouvelle de Meniaa.* Ghardaïa: Université de Ghardaïa.
- ABDELOUAHAB, L. (2010). *CONTRIBUTION À L'OPTIMISATION DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION D'EAU.* Alger: Ecole Nationale Polytechnique.
- AhmedEwis, S., Alaa A, K., AhmedFarhan, M., & AliM, E.-R. (2024, 11 18). Growth Optimizer Algorithm for Economic Load Dispatch Problem: Analysis and Evaluation. 1.
- Ali Wagdy, M., Anas A, H., & Ali Khater , M. (2019). Gaining-sharing knowledge based algorithm for solving optimization problems: a novel nature-inspired algorithm. 1.
- AZZEDINE, C., & STITA, D. (2019). *simulation D'un Réseau d'Alimentation En Eau Potable (AEP) Par Epanet Et Water CAD Avec Son Implantation Sur Arc GIS.* Guelma: Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie Département de : Génie Civil & Hydraulique.
- Batmaz, V., & Kayaalp, N. (2022). Optimization of water distribution networks using hybrid BBO-IWO algorithm. *URBAN WATER JOURNAL*, 209-222.
- Ben Ammar , A., & Dahmani, M. (2017/2018). *Contribution à l'optimisation du dimensionnement des réseaux de .* BOUIRA: UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE.
- BOUZERD , S., & CHIBANE , L. (2024). *Contribution à l'optimisation d'un réseau de distribution d'alimentation en eau potable par algorithmes génétiques.* UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU. TIZI-OUZOU: UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.
- DUPONT, A. (1974). *HYDRAULIQUE URBAINE Tome 2 Ouvrages de transport Elévation et distribution des eaux.* paris.
- GUESSOUM, G. (2019/2020). *Planning de rotation des infirmières.* Guelma.

- HOUDA, C. N. (2021). *Utilisation des algorithmes méta-heuristiques dans Loptimisation numérique.* BISKRA.
- MAQROT, S. (2019). *Méthodes d'optimisation combinatoire en programmation mathématique. Application à la conception des systèmes de verger-maraîcher.* TOULOUSE.
- MAZOUZ, A. (2018). *Optimisation des réseaux D'AEP.* Biskra : Université Mohamed Khider de Biskra .
- Moosavian, N. (2017, May). Multilinear Method for Hydraulic Analysis of Pipe Networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1.
- Najiba, H., Joaquim, S., Maria, C., & Mahmoud, M. (2009, 07 1). Calcul et optimisation du réseau de distribution d'eau potable de la ville de Kairouan. *0018-6368 (Print) 1958-5551 (Online) Journal homepage, I*(1), 58.
- NOËLIE, D. (2016). *Développement d'une nouvelle méthode metaheuristique pour l'optimisation topologique des structures et des metamatériaux.* Montbéliard.
- Rodan, A., Al-Tamimi, A.-K., & Al-Alnemer, L. (2025). Enzymeactionoptimizer:anovelbio-inspiredoptimization algorithm. *The Journal of Supercomputing*, 6-7.

Annexes

Annexe 1 : Les caractéristiques des nœuds et des conduites du réseau (tow-loop)

- Tableau 1.1 : Données des nœuds pour le réseau à deux boucles(tow-loop)

Identifiant du nœud	Altitude (m)	Demande (m^3/h)
J-2	150	100.00
J-3	160	100.00
J-4	155	120.00
J-5	150	270.00
J-6	165	330.00
J-7	160	200.00
Réservoir R-1	210	−1120.00

- **Tableau 1.2** : Données des conduites pour le réseau à deux boucles(tow-loop)

Identifiant de la conduite	Identifiant du nœud de départ	Identifiant du nœud d'arrivée	Diamètre de la conduite avant optimisation (mm)	Longueur (m)
P-1	R-1	J-2	609.6	1,000
P-2	J-2	J-3	609.6	1,000
P-3	J-2	J-4	609.6	1,000
P-4	J-4	J-5	609.6	1,000
P-5	J-4	J-6	609.6	1,000
P-6	J-6	J-7	609.6	1,000
P-7	J-3	J-5	609.6	1,000
P-8	J-7	J-5	609.6	1,000

Annexe 2 : Les caractéristiques des nœuds et des conduites du réseau (Hanoi)

- **Tableau 2.1** : Données des nœuds pour le réseau de Hanoi (Hanoi)

Identifiant du nœud	Altitude (m)	Demande (m^3/h)
J-2	0	890
J-3	0	850
J-4	0	130
J-5	0	725
J-6	0	1,005
J-7	0	1,350
J-8	0	550
J-9	0	525
J-10	0	525
J-11	0	500
J-12	0	560
J-13	0	940
J-14	0	615
J-15	0	280
J-16	0	310
J-17	0	865
J-18	0	1,345
J-19	0	60
J-20	0	1,275
J-21	0	930
J-22	0	485
J-23	0	1,045
J-24	0	820
J-25	0	170
J-26	0	900
J-27	0	370
J-28	0	290
J-29	0	360
J-30	0	360
J-31	0	105
J-32	0	805
Réservoir R-1	100	-19,940

➢ **Tableau 2.2** : Données des conduites pour le réseau de Hanoï (Hanoi)

Identifiant de la conduite	Identifiant du nœud de départ	Identifiant du nœud d'arrivée	Diamètre de la conduite avant optimisation (mm)	Longueur (m)
P-1	J-1	J-2	1016	100
P-2	J-2	J-3	1016	1,350
P-3	J-3	J-4	1016	900
P-4	J-4	J-5	1016	1,150
P-5	J-5	J-6	1016	1,450
P-6	J-6	J-7	1016	450
P-7	J-7	J-8	1016	850
P-8	J-8	J-9	1016	850
P-9	J-9	J-10	1016	800
P-10	J-10	J-11	1016	950
P-11	J-11	J-12	1016	1,200
P-12	J-12	J-13	1016	3,500
P-13	J-10	J-14	1016	800
P-14	J-14	J-15	1016	500
P-15	J-15	J-16	1016	550
P-16	J-17	J-16	1016	2,730
P-17	J-18	J-17	1016	1,750
P-18	J-19	J-18	1016	800
P-19	J-3	J-19	1016	400
P-20	J-3	J-20	1016	2,200
P-21	J-20	J-21	1016	1,500
P-22	J-21	J-22	1016	500
P-23	J-20	J-23	1016	2,650
P-24	J-23	J-24	1016	1,230
P-25	J-24	J-25	1016	1,300
P-26	J-26	J-25	1016	850
P-27	J-27	J-26	1016	300
P-28	J-16	J-27	1016	750
P-29	J-23	J-28	1016	1,500
P-30	J-28	J-29	1016	2,000
P-31	J-29	J-30	1016	1,600
P-32	J-30	J-31	1016	150
P-33	J-32	J-31	1016	860
P-34	J-25	J-32	1016	950

Annexe 3 : Les caractéristiques des nœuds et des conduites du réseau (Combined Gravity)

➢ **Tableau 3.1** : Données des nœuds pour le réseau (Combined Gravity)

Identifiant du nœud	Altitude (m)	Demande (l/s)
J-1	62.48	0
J-2	68.48	1.08
J-3	65.77	0.89
J-4	48.81	0.76
J-5	42.95	0.37
J-6	48.9	1.11
J-7	42.07	0.82
J-8	41.51	0.42
J-9	43.83	0.24
J-10	56.74	0.48
J-11	57.12	0.33
J-12	59.47	0.35
J-13	41.21	0.63
J-14	40.85	1.41
J-15	38.33	1.13
J-16	35.17	0.82
J-17	30.42	0.58
J-18	40.4	0.68
J-19	45.6	0.61
J-20	29.91	0.35
J-21	28.34	1.18
J-22	24.82	1.11
J-23	27.1	0.63
J-24	28.16	1.39
J-25	24.71	0.11
J-26	23.74	0.11
J-27	33.35	0.96
J-28	42.72	1.65
J-29	37.71	0.56
J-30	32.41	0.87
J-31	46.8	0.68
J-32	41.78	0.78
J-33	41.81	1.06
J-34	19.06	0.52
J-35	21.47	0.13

(Suite)

Identifiant du nœud	Altitude (m)	Demande (l/s)
J-36	36.06	0.2
J-37	26.27	0.18
J-38	28.55	0.33
J-39	54.35	0.65
J-40	64.33	0.28
J-41	30.01	0.39
J-42	35.63	0.39
J-43	40.2	0.89
J-44	20.35	0.13
J-45	24.38	0.2
J-46	17.91	0.3
J-47	17.77	0.18
J-48	16.13	0.26
J-49	22.96	0.3
J-50	35.39	0.17
J-51	38.88	0.61
J-52	30.1	0.39
J-53	22.99	0.22
J-54	12.5	0.32
J-55	13.04	0.74
J-56	21.88	0.39
J-57	9.66	9.26
Réservoir R-1	115	-41.58

➢ **Tableau 3.2** Données des conduites pour le réseau gravitaire combiné (Combined Gravity)

Identifiant de la conduite	Identifiant du nœud de départ	Identifiant du nœud d'arrivée	Diamètre de la conduite avant optimisation (mm)	Longueur (m)
P-1	R-1	J-1	200	110.05
P-2	J-1	J-2	200	328.45
P-3	J-2	J-3	50	189.89
P-4	J-3	J-4	50	162.62
P-5	J-4	J-5	50	124.41
P-6	J-5	J-6	200	90.2
P-7	J-2	J-6	200	185.66
P-8	J-5	J-7	80	62.38
P-9	J-7	J-8	50	128.02
P-10	J-8	J-9	25	55.75
P-11	J-9	J-10	25	184.53
P-12	J-10	J-11	50	83.92
P-13	J-11	J-12	50	192.75
P-14	J-12	J-9	80	107.31
P-15	J-12	J-13	80	53.15
P-16	J-13	J-8	80	55.39
P-17	J-7	J-15	200	194.97
P-18	J-13	J-14	80	209.84
P-19	J-15	J-14	50	229.49
P-20	J-15	J-16	25	70.45
P-21	J-16	J-17	25	83.92
P-22	J-17	J-18	200	145.64
P-23	J-14	J-18	80	71.05
P-24	J-18	J-19	50	102.99
P-25	J-16	J-21	50	147.35
P-26	J-21	J-20	200	100.94
P-27	J-20	J-19	100	144.56
P-28	J-17	J-20	100	127.29
P-29	J-21	J-22	50	186.12
P-30	J-22	J-23	50	187.81
P-31	J-23	J-24	80	124.19
P-32	J-24	J-30	50	139.08
P-33	J-30	J-29	50	135.02
P-34	J-24	J-25	25	144.5
P-35	J-25	J-26	25	55.94

(Suite)

Identifiant de la conduite	Identifiant du nœud de départ	Identifiant du nœud d'arrivée	Diamètre de la conduite avant optimisation (mm)	Longueur (m)
P-36	J-26	J-27	50	219.46
P-37	J-27	J-28	50	134.6
P-38	J-28	J-29	80	190.18
P-39	J-29	J-31	100	166.4
P-40	J-31	J-32	80	145.19
P-41	J-32	J-33	25	53.16
P-42	J-33	J-24	80	189.83
P-43	J-22	J-34	50	363.63
P-44	J-34	J-35	50	92.25
P-45	J-35	J-36	50	100.29
P-46	J-36	J-37	25	107.16
P-47	J-36	J-38	50	97.48
P-48	J-38	J-41	125	68.08
P-49	J-41	J-42	80	42.52
P-50	J-42	J-43	50	128.01
P-51	J-42	J-40	50	183.96
P-52	J-40	J-39	80	73.94
P-53	J-39	J-38	125	230.45
P-54	J-34	J-46	100	83.85
P-55	J-35	J-44	100	88.5
P-56	J-44	J-45	100	88.66
P-57	J-45	J-56	50	79.61
P-58	J-56	J-55	50	174.45
P-59	J-46	J-54	50	182.84
P-60	J-54	J-55	25	53.81
P-61	J-54	J-57	25	226.02
P-62	J-46	J-47	25	180.29
P-63	J-47	J-53	25	144.6
P-64	J-53	J-52	25	138.57
P-65	J-52	J-51	25	133.2
P-66	J-52	J-50	25	135.76
P-67	J-50	J-49	150	141.1
P-68	J-49	J-53	200	162.27
P-69	J-49	J-48	200	140.17
P-70	J-48	J-47	80	176.91

Annexe 4 : Algorithme qui détail la programmation de la méthode multilinéaire

```
function [Q, H, iter]= mlsolver(a21,a01, h0, q,  d, Li)
  r = compute_r(d, Li);
    qmax=sum(q);
    a12=a21';
    a10=a01';
    nn = size(a21,1);
    np=size(a21,2);
    A = zeros(np,np);
    B =zeros(np,1);
   Qprev = zeros(np,1);
   errobj = 0.0001;
   n = 1.852; % n= 2.0
   m = 1000;
  dQ = qmax/m;
  iter = 0;
  itermax= 25;
  continu = true;
  while (continu)
  disp("----------------------------> Iter = "); disp(iter);
  if (iter == 0)
       for i = 1: np
          A(i,i) = r(i)*qmax;
          Qprev(i) = qmax;
       end
   else
 [A,B] = update_A_B(Qprev, r, dQ, n);
end
disp("A : "); disp(A);
Compute matrix V
V = a21* inv(A)*a12;
disp("V : "); disp(V);
```

```
Compute C:
C = a10*h0;
  for i= 1 : np
  C(i)= B(i)-C(i);
  end
C= C';
disp("C : "); disp(C);
Compute H:
invA = inv(A);
 invV = inv(V);
H=[a21*(invA*C)-q];
H=invV *H;
 disp("H : "); disp(H);
Compute Q :
  tmp1 = invA*C;
  tmp2 = invA*a12*H;
  Q =tmp1-tmp2;
  disp("Q : "); disp(Q);
   -------check convergence
  num = 0;
  den = 0;
    for i = 1 : np
      num =num+ abs(Q(i)-Qprev(i));
    den = den + abs(Q(i));
  end
 err = num/den;
if err<=errobj
    continu = false;
  end
disp("Err = "); disp(err);
Qprev = Q;

  iter = iter +1;
```

```
  if iter >= itermax
    continu = false ;
  end
end
end
```

- Coud pour calculer les matrices dans l'exemple numérique de méthode multilinéaire (1er Iteration)

```
clc;
clear;

% === Définition des matrices ===
H0 = [100];
A10 = [-1;
        0;
        0;
        0;];
B = -[0;
      0;
      0;
      0];
C = -B-A10*H0 ;

A21 = [1 -1 -1 0;
       0 1 0 -1;
       0 0 1 1];

A = [0.9375 0 0 0
      0 30 0 0
      0 0 60 0
      0 0 0 7.5];

A12 = [1 0 0;
       -1 1 0;
       -1 0 1;
```

```
          0 -1 1];
q = [0.1;
      0.2;
      0.3;];
   Calcul de V
V = A21 * (A \ A12);
   Calcul de H(t+1)
H = V \ (A21 * (A \ C) - q);
Q = A \ (C - A12 * H);
% === Affichage ===
disp('Matrice C:'); disp(C);
disp('Matrice V:'); disp(V);
disp('Matrice H:'); disp(H);
disp('Matrice Q:'); disp(Q);
```

Annexe 5 : Algorithme qui détail la programmation de la fonction objectif du méthode GSK

```
fit = zeros(1, pop_size);
for i = 1:pop_size
c1= 0;
  c2= 0;
   c3= 0;
 [c1, stand_d] = cost(x(i,:), Li);
 disp('stand_d: \n');
 disp(stand_d);
 disp('x: \n');
 disp(x);
 [Q, H, iter]= mlsolver(a21,a01, h0, q, stand_d, Li); % mlsolver(a21,a01, h0, q,  d, Li)
  Compute pressures
p = H-z;
 v = compute_v(Q, x);
  c2 = penality_p(p);
   c3 = penality_v(v);
```

```
  fit = c1 + c2 + c3;
  fit(i) = c1 + c2;
    fprintf('Cost + Penality = %d $; Pressure: \n', fit);
   disp(p');
end
end
```

Annexe 6 : Algorithme qui déterminent le déroulement de la méthode de GSK

```
%%%
```

```
Run_No= 1;
max_nfes = pop_size* max_iterations;
rand('seed', sum(100 * clock));
fprintf('Running %s algorithm \n',Alg_Name)
   %% Record the best results
   outcome = [];
   fprintf('\n-----------------------------------------------------\n')
   %fprintf('Function = %d\n', func)
   dim1=[];
   dim2=[];
   % Start initialization
   %% [problem_size, xmax, xmin] = define_boundaries(func); %%%% Initialize the boundaries
   for run_id = 1 : Run_No
     lu = [xmin ; xmax];
      run_funcvals = [];
       G_Max=max_nfes/pop_size;
%% Initialize the main population
      popold = repmat(lu(1, :), pop_size, 1) + rand(pop_size, problem_size) .* (repmat(lu(2, :) - lu(1, :),
pop_size, 1));
      pop = popold; % the old population becomes the current population
     fitness =  obj_function(pop, pop_size, a21,a01, h0, q, L, z); %% Calc_Fitx_2011(pop,func,pop_size);
      fitness = fitness';
      nfes = 0;
      bsf_fit_var = 1e+300;
 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% for out
      for i = 1 : pop_size
         nfes = nfes + 1;
         %%      if nfes > max_nfes; exit(1); end
         if nfes > max_nfes; break; end
         if fitness(i) < bsf_fit_var
            bsf_fit_var = fitness(i);
         end
      end
```

```
run_funcvals = [run_funcvals;bsf_fit_var];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% for out
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Parameter settings%%%%%%%%%%
% KF=0.5;% Knowledge Factor
% KR=0.9;%Knowledge Ratio
K=K_rate*ones(pop_size,1);%Knowledge Rate
g=0;
%% main loop
while nfes < max_nfes
   g=g+1;
   pop = popold; % the old population becomes the current population
    if(problem_size>1)
      D_Gained_Shared_Junior=ceil((problem_size)*(1-g/G_Max).^K);
      D_Gained_Shared_Senior=problem_size-D_Gained_Shared_Junior;
      [valBest, indBest] = sort(fitness, 'ascend');
      [Rg1, Rg2, Rg3] = Gained_Shared_Junior_R1R2R3(indBest);
      [R1, R2, R3] = Gained_Shared_Senior_R1R2R3(indBest);
      R01=1:pop_size;
      Gained_Shared_Junior=zeros(pop_size, problem_size);
      ind1=fitness(R01)>fitness(Rg3);
       if(sum(ind1)>0)
         Gained_Shared_Junior (ind1,:)= pop(ind1,:) + KF*ones(sum(ind1), problem_size) .*
(pop(Rg1(ind1),:) - pop(Rg2(ind1),:)+pop(Rg3(ind1), :)-pop(ind1,:)) ;
      end
      ind1=~ind1;
      if(sum(ind1)>0)
         Gained_Shared_Junior(ind1,:) = pop(ind1,:) + KF*ones(sum(ind1), problem_size) .*
(pop(Rg1(ind1),:) - pop(Rg2(ind1),:)+pop(ind1,:)-pop(Rg3(ind1), :)) ;
      end
      R0=1:pop_size;
      Gained_Shared_Senior=zeros(pop_size, problem_size);
      ind=fitness(R0)>fitness(R2);
      if(sum(ind)>0)
```

```
            Gained_Shared_Senior(ind,:) = pop(ind,:) + KF*ones(sum(ind), problem_size) .*
(pop(R1(ind),:) - pop(ind,:) + pop(R2(ind),:) - pop(R3(ind), :)) ;
            end
            ind=~ind;
            if(sum(ind)>0)
               Gained_Shared_Senior(ind,:) = pop(ind,:) + KF*ones(sum(ind), problem_size) .*
(pop(R1(ind),:) - pop(R2(ind),:) + pop(ind,:) - pop(R3(ind), :)) ;
            end
            Gained_Shared_Junior = boundConstraint(Gained_Shared_Junior, pop, lu);
            Gained_Shared_Senior = boundConstraint(Gained_Shared_Senior, pop, lu);
            D_Gained_Shared_Junior_mask=rand(pop_size, problem_size)<=(D_Gained_Shared_Junior(:,
ones(1, problem_size))./problem_size);
            D_Gained_Shared_Senior_mask=~D_Gained_Shared_Junior_mask;
            D_Gained_Shared_Junior_rand_mask=rand(pop_size, problem_size)<=KR*ones(pop_size,
problem_size);
D_Gained_Shared_Junior_mask=and(D_Gained_Shared_Junior_mask,D_Gained_Shared_Junior_rand_m
ask);
D_Gained_Shared_Senior_rand_mask=rand(pop_size, problem_size)<=KR*ones(pop_size,
problem_size);
D_Gained_Shared_Senior_mask=and(D_Gained_Shared_Senior_mask,D_Gained_Shared_Senior_rand_
mask);
            ui=pop;
 ui(D_Gained_Shared_Junior_mask) = Gained_Shared_Junior(D_Gained_Shared_Junior_mask);
            ui(D_Gained_Shared_Senior_mask) =
Gained_Shared_Senior(D_Gained_Shared_Senior_mask);
else
            D_Gained_Shared_Senior=problem_size;
            [valBest, indBest] = sort(fitness, 'ascend');
            [R1, R2, R3] = Gained_Shared_Senior_R1R2R3(indBest);
            R0=1:pop_size;
            Gained_Shared_Senior=zeros(pop_size, problem_size);
            ind=fitness(R0)>fitness(R2);
            if(sum(ind)>0)
```

```
            Gained_Shared_Senior(ind,:) = pop(ind,:) + 0.5*ones(sum(ind), problem_size) .*
(pop(R1(ind),:) - pop(ind,:) + pop(R2(ind),:) - pop(R3(ind), :)) ;
        end
        ind=~ind;
        if(sum(ind)>0)
            Gained_Shared_Senior(ind,:) = pop(ind,:) + 0.5*ones(sum(ind), problem_size) .*
(pop(R1(ind),:) - pop(R2(ind),:) + pop(ind,:) - pop(R3(ind), :)) ;
        end
        Gained_Shared_Senior = boundConstraint(Gained_Shared_Senior, pop, lu);

       D_Gained_Shared_Senior_mask=ones(pop_size, problem_size); % mask is used to indicate
which elements of will be Senior
        D_Gained_Shared_Senior_rand_mask=rand(pop_size, problem_size)<=0.9*ones(pop_size,
problem_size);%rand(pop_size, problem_size);
D_Gained_Shared_Senior_mask=and(D_Gained_Shared_Senior_mask,D_Gained_Shared_Senior_rand_
mask);
        ui=pop;
         ui(D_Gained_Shared_Senior_mask) =
Gained_Shared_Senior(D_Gained_Shared_Senior_mask);
      end
      children_fitness =  obj_function(ui, pop_size, a21,a01, h0, q, L, z); %%
Calc_Fitx_2011(ui,func,pop_size);
      children_fitness = children_fitness';
      for i = 1 : pop_size
        nfes = nfes + 1;
        if nfes > max_nfes; break; end
        if children_fitness(i) < bsf_fit_var
          bsf_fit_var = children_fitness(i);
          bsf_solution = ui(i, :);
        end
      end
[fitness, Child_is_better_index] = min([fitness, children_fitness], [], 2);
      popold = pop;
```

```
            popold(Child_is_better_index == 2, :) = ui(Child_is_better_index == 2, :);
            run_funcvals = [run_funcvals;bsf_fit_var];
           fprintf('Preocess : %1.2e %%, best-so-far = %1.8e \n', 100*nfes/max_nfes, bsf_fit_var)
        end
        fprintf('%d th run, best-so-far error value = %1.8e\n', run_id , run_funcvals(end))
        outcome(run_id) = run_funcvals(end);
         if (ConvDisp)
            run_funcvals=run_funcvals';
            dim1(run_id,:)=1:length(run_funcvals);
            dim2(run_id,:)=log10(run_funcvals);
        end
 end %% end 1 run
    format short
    disp('The best solution : best diameters ');
    [stand_D, CD_m] = standarize_diameters(bsf_solution);
    diameters = 1000*stand_D;
    disp(diameters);
    disp('The best cost (minimum) USD $:');
    disp( bsf_fit_var);
    save('Results_2_Loop.mat', 'run_funcvals');
    plot(run_funcvals)
    [Q, H, iter]= mlsolver(a21,a01, h0, q,  stand_D, L);
    disp('Les debits:');
    disp(Q);
    p=H-z;
   disp('Les pressions:');
   disp(p);
% fprintf('min:\t%e\n', min(outcome));
% fprintf('median:\t%e\n', median(outcome));
% fprintf('mean:\t%e\n', mean(outcome));
% fprintf('max:\t%e\n', max(outcome));%fprintf('std:\t%e\n', std(outcome)
```