

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University
Université Badji Mokhtar – Annaba
Faculté de Technologie



جامعة باجي مختار – عنابة

كلية التكنولوجيا

قسم الري

Département Hydraulique

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat En Sciences

Spécialité : Hydraulique

Par :

RETIMA Nadjib

Thème :

Application d'une méthode hybride ANN-MCDM pour la réduction des pertes d'eau dans les réseaux de distribution

Thèse soutenue le 12 Novembre 2025 devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	HAMMAR Yahia	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
02	BOUKHARI Sofiane	Prof.	Université Mohamed Chérif Messadia Souk Ahras	Rapporteur
03	LAOUACHERIA Fares	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Co-rapporteur
04	MRAD Dounia	Prof	Université Mohamed Chérif Messadia Souk Ahras	Examinatrice
05	DAIRA Sabri	MCA	Université Mohamed Chérif Messadia Souk Ahras	Examineur
06	BENAMARA Abdelwaheb	MCA	Université. Ziane Achour, Djelfa	Examineur

الملخص:

يمثل فقدان المياه في شبكات توزيع المياه تحدياً كبيراً لاستدامة الموارد المائية، حيث تؤثر على البيئة والصحة العامة. يمكن تحديد المعدلات المرتفعة في فقدان الماء إلى المنشآت القديمة، والضغط الشديد، والتسيير الغير فعال لشبكات التوزيع. ويعتبر تقليص هذه الخسائر من أبرز المشكلات التي يواجهها قطاع المياه الصالحة للشرب. تهدف الدراسة إلى تحليل البدائل المتاحة لتحسين وتقليص خسائر المياه في شبكة توزيع المياه بمدينة عنابة (الشرق الجزائري). تعتمد المنهجية على دراسة المعايير والمعايير الفرعية المؤثرة على إدارة فقدان المياه باستخدام طريقتين من طرق دعم اتخاذ القرارات متعددة المعايير (MCDM). الطريقتان المستخدمتان هما عملية التحليل الهرمي (AHP) وعملية التحليل الهرمي الضبابي (Fuzzy-AHP). تم اختيار ستة معايير تقييمية، ستة وعشرون معياراً فرعياً، واثنى عشر بديلاً لاختيار أفضل استراتيجيات لتقليص فقدان المياه. وتعتبر المعايير الاقتصادية (37.71%)، والتقنية (26.25%)، والتشغيلية (14.27%) من الأبعاد الأساسية التي يجب أخذها بعين الاعتبار خلال مرحلة اختيار البدائل الأفضل. أظهرت النتائج أن البدائل مثل إعادة تأهيل شبكات التوزيع، وإدارة والتحكم في الضغط، والإصلاح السريع للتسربات تعتبر الحلول الأفضل لتقليص خسائر المياه. بعد ذلك، تم تطوير إطار متكامل، باستخدام عملية التحليل الهرمي (AHP) والشبكة العصبية الاصطناعية (RNA)، للتنبؤ بخسائر المياه في شبكة توزيع المياه الصالحة للشرب في مدينة عنابة. من خلال تطبيق هذه الطريقة، يمكن لمسير قطاع المياه الصالحة للشرب تحسين القرارات بهدف تقليل من فقدان المياه...

كلمات مفتاحية: تقليل فقدان المياه ، أساليب اتخاذ القرار متعددة المعايير، عملية تحليلية هرمية، عملية تحليلية هرمية الضبابية، الشبكة العصبية الاصطناعية، عنابة.

Résumé :

Les pertes d'eau (PE) dans les réseaux de distribution d'eau représentent un défi majeur pour la durabilité des ressources en eau, affectant l'environnement et la santé publique. Les taux élevés des PE peuvent être attribués à des infrastructures vieillissantes, à une forte pression et à une gestion inefficace des réseaux de distribution. Leur réduction est l'un des problèmes les plus critiques auxquels sont confrontés les gestionnaires des services d'eau potable. L'étude vise à analyser les alternatives d'amélioration pour réduire les pertes en eau dans le réseau de distribution d'eau de la ville d'Annaba (Est algérien). La méthodologie appliquée repose sur l'examen des critères et sous-critères influant sur la gestion des PE à l'aide de deux méthodes d'aide à la décision multicritères (MCDM). Les deux approches MCDM utilisées sont le Processus Analytique Hiérarchique (AHP) et le Processus Analytique Hiérarchique Flou (Fuzzy-AHP). Six critères d'évaluation, vingt-six sous-critères et douze alternatives ont été retenus pour sélectionner les meilleures stratégies de réduction des PE. Les trois critères économiques (37,71 %), techniques (26,25 %) et opérationnels (14,27 %) sont essentiels à prendre en compte lors de la phase de sélection des meilleures alternatives. Les résultats ont montré que les alternatives, la réhabilitation des réseaux de distribution, la gestion et le contrôle de la pression et la réparation rapide des fuites d'eau constituent les meilleures solutions pour réduire les pertes d'eau. Ensuite, un cadre intégré, utilisant un processus hiérarchique analytique (AHP) et un réseau neuronal artificiel (RNA), a été développé pour la prédiction des PE dans le réseau de distribution d'eau potable de la ville d'Annaba. En appliquant cette méthode, les gestionnaires des services de l'eau potable peuvent optimiser les décisions afin de minimiser les pertes d'eau.

Mots-clés : Réduction des pertes d'eau ; MCDM ; AHP ; Fuzzy-AHP ; ANN ; Annaba.

Abstract:

Water losses (PE) in water distribution networks represent a major challenge for the sustainability of water resources, affecting both the environment and public health. High PE rates can be attributed to aging infrastructure, high pressure, and inefficient network management. Reducing these losses is one of the most critical issues faced by water service managers. This study aims to analyze improvement alternatives to reduce water losses in the water distribution network of Annaba city (eastern Algeria). The applied methodology is based on examining the criteria and sub-criteria influencing PE management using two multi-criteria decision-making (MCDM) methods. The two MCDM approaches used are the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy-AHP). Six evaluation criteria, twenty-six sub-criteria, and twelve alternatives were selected to determine the best strategies for reducing PE. The three essential criteria to consider in selecting the best alternatives are economic (37.71%), technical (26.25%), and operational (14.27%) aspects. The results showed that network rehabilitation, pressure management and control, and rapid leak repair are the most effective solutions for reducing water losses. Furthermore, an integrated framework was developed, combining the AHP method and an artificial neural network (ANN) for predicting PE in the drinking water distribution network of Annaba. By applying this method, water service managers can optimize decisions to minimize water losses.

Key words Reduction of water losses; MCDM; AHP; Fuzzy-AHP; ANN; Annaba

Dédicace

A

Mes parents

Ma femme et mes trois enfants

Mohamed Anes, Youcef et Ishak

Ma sœur et mes frères

Toute ma famille

Mes amis

Remerciements

Je remercie le bon Dieu le tout puissant qui m'a donné la force, le courage et la volonté d'aller jusqu'au bout de cette thèse.

En tout premier lieu, je tiens à remercier très chaleureusement le professeur **BOUKHARI Sofiane** qui a consacré son précieux temps pour m'aider à réaliser ce modeste travail et qui s'est toujours rendu disponible pour me renseigner et a contribué à l'avancement du travail.

Mes remerciements s'adressent également au Professeur LAOUACHERIA Fares pour avoir co-encadré ces travaux. Je vous remercie pour votre réactivité et vos réflexions, qui ont été très bénéfiques au cadrage de cette recherche.

Mes remerciements aux membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce travail,

Je tiens particulièrement à remercier tout le personnel de différentes administrations (DRE, ABH, ADE et APC), pour leurs collaborations dans la constitution des données nécessaires à cette étude,

Mes derniers remerciements et non les moindres, s'adressent à tous mes collègues de l'université de Badji Mokhtar Annaba spécialement le département d'Hydraulique.

Sommaire

Résumé (trois langues)	i
Sommaires	ii
Liste des Figures	vi
Liste des Photos	viii
Liste des Tableaux	ix
Liste des Abréviations	x
Introduction Générale	1
Chapitre 1 Synthèse bibliographique	4
1.1. Pertes d'eau	4
1.1.1. Types de pertes d'eau	4
1.1.2. Causes et impacts des Pertes d'eau	6
1.2. Méthodes existantes de réduction des pertes d'eau	7
1.3. Application des méthodes Multi-Criteria Decision-Making	8
1.4. Revue de la littérature	11
1.4.1. Méthode Analytic Hierarchy Process (AHP)	12
1.4.2. Méthode Fuzzy AHP (FAHP)	13
1.4.3. Analyse comparative des méthodes AHP et FAHP	13
1.4.4. Réseaux de neurones artificiels (ANN) pour la prédiction	15
1.4.5. Applications de la méthode AHP-ANN dans d'autres domaines	17
1.5. Justification de l'approche hybride AHP-ANN pour la réduction PE	18
1.5.1. Identification des pertes apparentes (fraudes et erreurs)	15
1.5.2. Gestion dynamique de la pression	16
1.5.3. Avantages des RNA par rapport aux méthodes traditionnelles	16
1.6. Synthèse d'une Revue de littérature	19
1.7. Limites des travaux existants et justification de l'approche hybride	21
1.8. Tendances futures et recommandations	22

Chapitre 2 : Méthodes et matériels	23
2.1. Cadre théorique	23
2.2. Simulation Hydraulique	25
2.3. Processus de hiérarchie analytique (AHP)	25
2.3.1. La sélection des critères d'évaluation, sous-critères et des alternatives	25
2.3.2. Construire la structure hiérarchique	26
2.3.3. Procédure de l'application de la méthode AHP	26
2.4. Processus de hiérarchie analytique floue (FAHP)	27
2.4.1. Calcul de la moyenne géométrique.....	29
2.4.2. Déterminer les poids flous	29
2.4.3. Défuzzifier les poids flous relatifs des critères.....	30
2.4.4. Normaliser le nombre flou	30
2.5. Réseaux de neurones artificiels	30
2.5.1. Construction des modèles ANN	31
2.5.2. Réseaux de neurones artificiels	32
2.5.3. Sélection des indicateurs d'entrée	32
2.5.4. Construction de la base de données	33
2.5.5. Conception des modèles ANN	34
Chapitre 3 : Présentation de la zone d'étude	38
3.1. Zone d'étude	38
3.2. Gestion du service de l'eau à Annaba	39
3.3. Collecte des données	41
3.3.1. Distribution de l'eau dans la ville d'Annaba	41
3.3.2. Sectorisation du réseau de distribution d'eau	43
3.3.3. Réseau d'eau potable de la ville d'Annaba	44
3.3.4. Vannes du réseau d'Annaba	47
3.3.5. Branchements et compteurs de distribution de Annaba	47
3.3.6. Interventions sur les réseaux	48
3.3.6.1. Identifiez les problèmes liés aux pertes d'eau dans la zone d'étude	52
3.3.6.2. Impacts économiques des pertes d'eau à Annaba	53
3.3.6.3. Impacts environnementaux des pertes d'eau à Annaba	53
3.3.6.4. Impacts sociaux des pertes d'eau à Annaba	53
Chapitre 4 : Résultats et Discussions	54
4.1. Collecte des données	54
4.1.1. Estimation des taux de pertes d'eau	54
4.1.2. Simulation hydraulique	56

4.2. Application de la méthode AHP	58
4.2.1. Sélection des critères, sous-critères et des alternatives	58
4.2.2. Construction de la structure hiérarchique	60
4.2.3. Résultat de l'application de la méthode AHP.....	60
4.3. Comparaison par paires à l'aide de la méthode AHP floue	63
4.4. Application de l'ANN	67
4.4.1. Mise en place de la structure ANN	73
4.4.2. L'architecture du réseau ANN	73
4.5. Résultats de la pondération des alternatives selon la méthode FAHP	82
Conclusion Générale	84
Références bibliographiques	86
Annexes	96

Liste des Figures

Figure 2.1 : Organigramme de la méthodologie proposée	24
Figure 2.2 : Représentation du nombre flou triangulaire (TFN)	28
Figure 2.3 : Exemple d'une fonction de combinaison	31
Figure 2.4 : Réseau de neurones artificiels	32
Figure 2.5 : Organigramme de conception d'un réseau de neurones.....	34
Figure 3.1 : Les communes de la wilaya d'Annaba	38
Figure 3.2 : Présentation de la zone d'étude	39
Figure 3.3 : Répartition de type de matériau des conduites	44
Figure 3.4 : Répartition par diamètres des conduites.....	45
Figure 3.5 : Schéma Synoptique de la distribution de l'eau, ville d'Annaba	46
Figure 3.6 : Etat des compteurs – ville de Annaba	48
Figure 3.7 : Interventions sur réseau – ville de Annaba, année 2022	48
Figure 3.8 : Fuites sur conduites selon la nature du matériau – ville d'Annaba	49
Figure 3.9 : Fuites réparées sur conduites (années 2020 - 2024) – ville d'Annaba ..	49
Figure 3.10 : Fuites réparées sur branchements (années 2020 - 2024)	50
Figure 3.11 : Total des Fuites réparées (années 2020 - 2024) – ville d'Annaba.....	50
Figure 4.1 : Calcul des pertes d'eau pour les années 2010 - 2018.....	55
Figure 4.2 : Différence entre l'Eau Facturée et l'ENF (année 2024).....	55
Figure 4.3 : Détail du ratio de l'ENF (année 2024)	55
Figure 4.4 : Réseau de distribution de la ville d'Annaba sur Epanet.....	56
Figure 4.5 : Simulation hydraulique sur Epanet	57
Figure 4.6 : Résultat des pressions sur Epanet	58
Figure 4.7 : Résultat des pressions sur Epanet	58
Figure 4.8 : Structure hiérarchique	60
Figure 4.9 : Priorité des critères avec la méthode FAHP	64
Figure 4.10 : Comparaison entre les deux méthodes AHP et F-AHP	65

Figure 4.11 : Poids relatifs des sous-critères par la méthode Fuzzy-AHP	66
Figure 4.12 : Poids global des sous-critères par la méthode Fuzzy-AHP	67
Figure 4.13 : Relation entre les Poids et les combinaisons dans le RNA	69
Figure 4.14 : Interface du logiciel MINITAB	74
Figure 4.15 : La structure du ANN	75
Figure 4.16 : Partie du programme Matlab	75
Figure 4.17 : Coefficients de corrélation du ANN maintenu	76
Figure 4.18 : Performance du ANN maintenu	78
Figure 4.19 : La simulation hydraulique du réseau étudié.....	78
Figure 4.20 : Résultat de la probabilité de défaillance	80
Figure 4.21 : Présentation de la prédiction de défaillance	81
Figure 4.22 : Emplacement de la prédiction des fuites	82

Liste des Photos

Photo 1.1. Fuites sur réseau d'adduction.....	5
Photo 1.2. Fuites sur réseau de distribution.....	5
Photo 1.3. Fuites sur un branchement.....	5
Photo 1.4. Fuites sur équipements de réseau.....	5
Photo 1.5. Branchements illicites.....	6
Photo 3.1. : Réservoir Casbah.....	43
Photo 3.2. : Réservoir Oued Forcha.....	43
Photo 3.3. : Réservoir Zaafrania.....	43
Photo 3.4. : Fuites dans les réseaux de distribution.....	51
Photo 3.5. : Fuite sur une conduite en Acier.....	51
Photo 3.6. : Fuite sur un branchement.....	51
Photo 3.7. : Fuite sur une vanne.....	51

Liste des Tableaux

Tableau 1.1. Comparaison entre les méthodes AHP et FAHP	13
Tableau 1.2. Différence entre RNA et les Méthodes traditionnelles	17
Tableau 1.3. Les études pour la réduction des PE	20
Tableau 2.2 : Indice aléatoire (RI)	27
Tableau 2.3 : Échelle de l'AHP et du nombre flou triangulaire (TFN)	27
Tableau 3.1 : Présentation des 12 communes de la wilaya d'Annaba	38
Tableau 3.2 : Les volumes.....	41
Tableau 3.3 : Classification des réservoirs d'eau (ville d'Annaba)	42
Tableau 3.4 : Différents matériaux du réseau d'eau de la ville d'Annaba	45
Tableau 3.5. : Etat des vannes sur le réseau de distribution de la ville d'Annaba	47
Tableau 4.1 : Calcul du bilan hydrique pour le cas de la ville d'Annaba.....	54
Tableau 4.2 : Quelques résultats de la simulation hydraulique	57
Tableau 4.3 : Les critères et sous-critères sélectionnés.....	59
Tableau 4.4 : Les alternatives retenues	59
Tableau 4.5 : Résultats de l'application de la méthode AHP pour les 6 critères.....	61
Tableau 4.6 : Résultats de l'application de la méthode AHP pour les 26 sous-critères.....	62
Tableau 4.7 : Matrice de comparaison par paires entre critères	64
Tableau 4.8 : Résultat de la méthode Fuzzy AHP de Buckley	64
Tableau 4.9 : Résumé des études connexes prédisant les facteurs de défaillance	68
Tableau 4.10 : Sous-critères et indicateurs.....	69
Tableau 4.11 : Poids des 7 Sous-Critères	70
Tableau 4.12 : Poids des 16 Indicateurs.....	70
Tableau 4.13 : Un extrait de 50 combinaisons	71
Tableau 4.14 : La meilleure configuration de notre RNA.....	74
Tableau 4.15 : Quelques Résultats de la probabilité de défaillance.....	78
Tableau 4.16 : Pondération et classement final des alternatives selon FAHP	83

Liste des Abréviations

ADE : Algérienne Des Eaux

AEP : Alimentation en Eau Potable

AHP : Processus Hiérarchique Analytique

CEMAGREF : Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural des Eaux et Forêts

CI : Indice de Cohérence

CR : Ratio de cohérence

CO₂ : Dioxyde de carbone

DRE : Direction des Ressources en Eau

ENF : eau non facturée

ELECTRE : ELimination Et Choix Traduisant la REalité

FAHP : Floue - Processus Hiérarchique Analytique (Fuzzy-AHP)

IBNET : Réseau international de comparaison des performances des services d'eau et d'assainissement

IP : les indicateurs de performance

IPSEP : L'Indice de Performance des Services d'Eau Potable

IWA : International Water Association

MAVT/MAUT : Multi-attribute Value/Utility Theory

MCDM : méthodes de décision multicritères

ODD : objectifs de développement durable

OMS : l'Organisation mondiale de la santé

PEHD : Polyéthylène Haute Densité

PE : Pertes d'eau

PVC : Polychlorure de Vinyle

RDE : Réseaux de Distribution d'Eau

RI : indice de cohérence aléatoire

RNA : réseau de neurone artificiel (ANN en anglais)

ROMETHEE : Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations

SAW : Simple additive Weighting

SEATA : Société des Eaux et de l'Assainissement d'Annaba et El-Tarf

SEP: Service Eau Potable

SNMG : le Salaire National Minimum Garanti

SONADE :

TOPSIS: Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

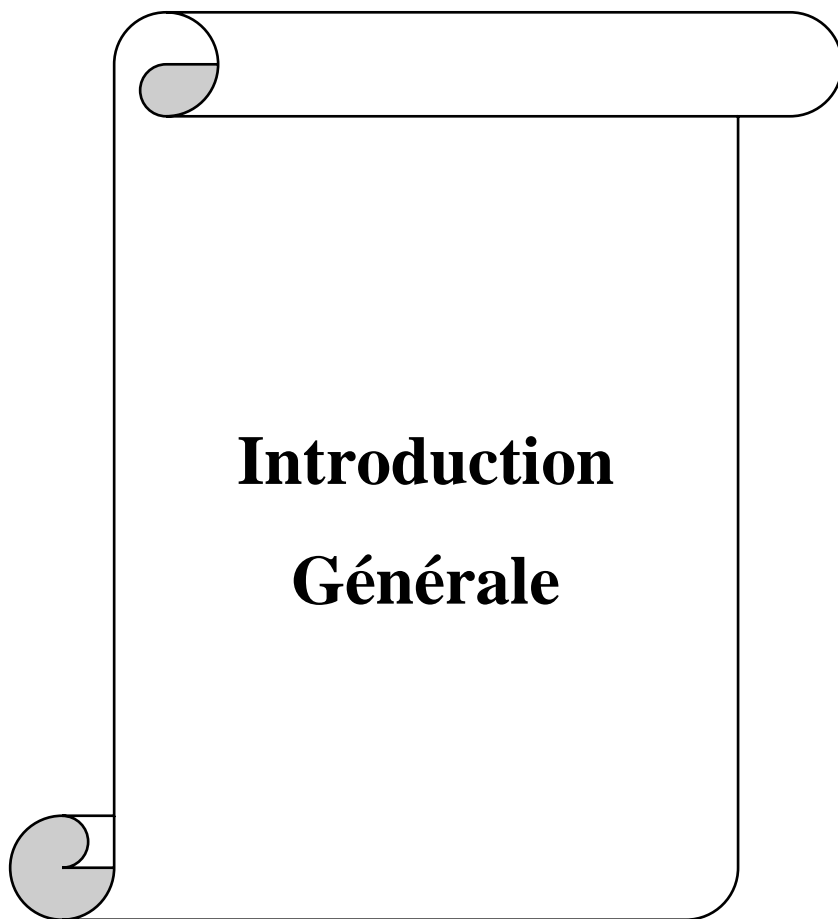
VD : volume distribué

VF : volume facturé

VP : volume produit

WB : la Banque mondiale

WPM : Weighted Product Méthode



Introduction

Générale

Introduction générale

L'eau potable constitue une ressource essentielle pour le développement durable de toutes sociétés. Les compagnies des eaux fournissent fréquemment des services intermittents dans la plupart des villes des pays en développement (Ghorpade et al., 2021). Les principales causes de cette discontinuité dans l'approvisionnement en eau potable sont la pénurie d'eau (Shabanzadeh-Khoshrody et al., 2023), l'insuffisance des ressources financières (Boukhari et al., 2023) et les pertes d'eau élevées dans les systèmes de distribution d'eau (Satpathy & Jha 2022). Cependant, la gestion des pertes en eau (PE) est devenue un enjeu majeur, surtout dans le contexte actuel de croissance démographique et d'urbanisation accélérée. Des niveaux élevés de PE peuvent influencer négativement la gestion quotidienne des services d'eau potable (Netshitanini et al., 2023) et peuvent entraîner des problèmes de santé en cas de maladies d'origine hydrique (Sambodja et al., 2020). Les pertes d'eau potable représentent un défi majeur pour la durabilité des ressources en eau, affectant tant l'environnement que la santé publique. Les taux élevés des PE peuvent être attribués à des infrastructures vieillissantes, à une forte pression et à une gestion inefficace des réseaux de distribution. Selon des études, jusqu'à 50% de l'eau distribuée peut être perdue avant d'atteindre les consommateurs, ce qui exacerbe la crise de l'eau dans de nombreuses régions des pays en développement (Hassoun Nedjar et al., 2023).

Pour résoudre cette problématique, plusieurs chercheurs ont utilisé des techniques de prise de décision multicritère (MCDM) pour résoudre les conflits entre les différents facteurs (Hajkowicz & Collins 2007). Dans ce cadre, les méthodes MCDM apparaissent comme un outil prometteur pour optimiser la gestion des ressources en eau. En effet, ces méthodes permettent d'évaluer et de prioriser différents critères, tels que l'efficacité économique, l'impact environnemental, et la faisabilité technique, facilitant ainsi des décisions éclairées (Arabameri, 2014). Par ailleurs, les études récentes montrent que la régulation du secteur de l'eau peut influencer significativement l'innovation technologique, un aspect crucial pour la mise en place de solutions durables (Ristic, 2019). La prise de décision multicritère (MCDM) joue un rôle crucial dans la gestion des ressources en eau, notamment dans la réduction des pertes d'eau

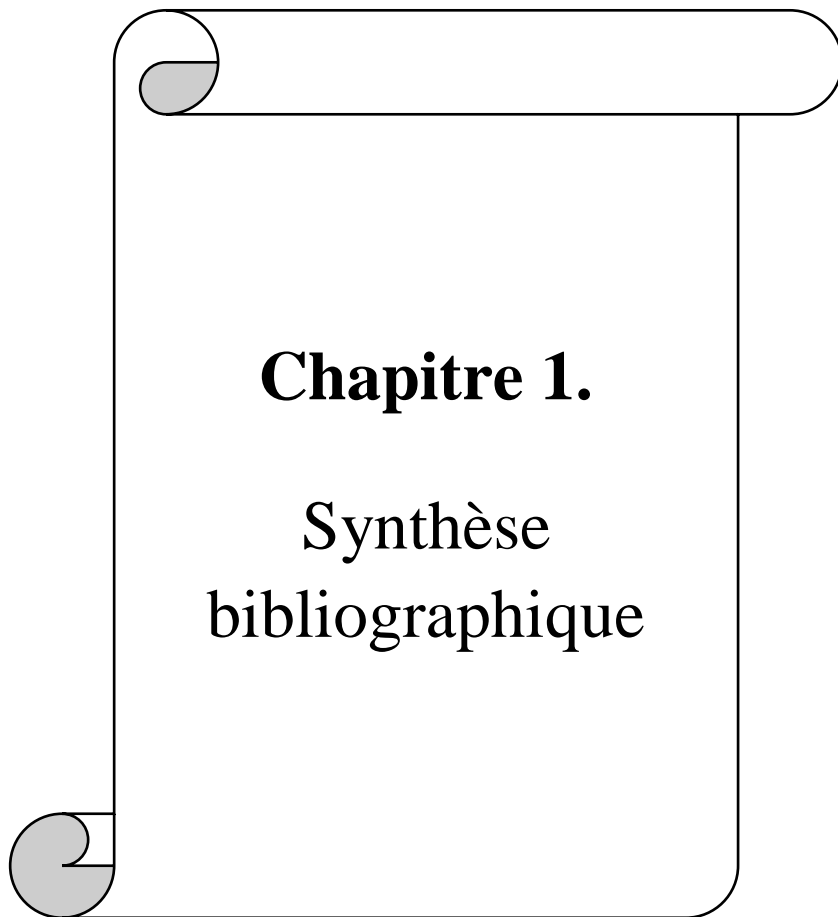
potable. Cette approche est particulièrement pertinente lorsque plusieurs parties prenantes, souvent aux intérêts divergents, sont impliquées dans la gestion de ressources partagées. En effet, les conflits liés à l'eau peuvent survenir à divers niveaux et nécessitent des méthodes systématiques pour leur résolution (Nandalal & Simonovic, 2002).

L'adoption de méthodes de prise de décision multicritères (MCDM) dans la gestion de l'eau a conduit à des mises en œuvre particulièrement réussies, illustrées par plusieurs études de cas pertinentes. Par exemple, des systèmes complexes de gestion des ressources en eau ont été évalués à l'aide de ces méthodes, permettant non seulement d'identifier les priorités en matière d'infrastructure, mais aussi de réconcilier les intérêts divergents parmi les parties prenantes locales et régionales. Ces études démontrent que l'application de la MCDM peut atténuer les conflits liés aux ressources hydriques en intégrant des critères divers tels que la viabilité économique, la durabilité environnementale et la justice sociale (Nandalal & Simonovic, 2002). De surcroît, les résultats issus de recherches récentes soulignent comment les méthodes MCDM facilitent la gestion des incertitudes inhérentes à la qualité de l'eau, garantissant ainsi des décisions éclairées pour la réduction des pertes d'eau potable (Carpitella, 2019). L'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP), développée par Saaty (1980), constitue un outil systématique et robuste pour la prise de décision. Son approche consiste à décomposer un problème complexe en une structure hiérarchique, facilitant ainsi son évaluation. En tant que l'une des méthodes multicritères les plus répandues, l'AHP se distingue par sa simplicité d'utilisation, puisqu'elle ne nécessite pas de modèles mathématiques complexes, et par sa capacité à traiter simultanément des données qualitatives et quantitatives (Hajkowicz & Collins, 2007). Cette méthode fournit un cadre précis pour la détermination des poids des critères, ce qui en fait une approche privilégiée pour l'analyse de décisions multiparamétriques. Enfin, des études comparatives, telles que celle de Hajkowicz & Collins (2007), ont démontré que l'AHP présente une robustesse supérieure face à la variabilité des poids attribués aux critères par rapport à d'autres méthodes. Par conséquent, l'AHP peut avoir certaines limites, en particulier dans l'évaluation de critères contradictoires avec des données imprécises et incertaines (Ali et al., 2023), et elle peut être subjective et ambiguë dans le processus en raison de sa dépendance au jugement d'experts. À cette fin, la théorie des ensembles flous peut résoudre ses lacunes. En intégrant la logique floue et la méthode AHP, les résultats de la méthode Fuzzy-AHP intègrent l'incertitude pour obtenir des résultats plus précis par rapport à la méthode AHP. Bien que la méthode Fuzzy-AHP présente plusieurs avantages par rapport à la méthode AHP classique, tels que la flexibilité, l'intégration de l'incertitude et une précision améliorée, elle est plus complexe et difficile à calculer. Cependant, des recherches supplémentaires doivent aborder l'application

de ces méthodes à la gestion ou à la réduction des pertes d'eau dans les réseaux de distribution d'eau.

La présente étude se concentrera sur l'application des méthodes MCDM pour réduire les pertes en eau potable dans le réseau de distribution de la ville d'Annaba, en intégrant divers paramètres cruciaux dans le processus décisionnel. L'objectif principal de cette étude est l'application des techniques MCDM pour identifier les critères qui peuvent influencer les PE et sélectionner les meilleures alternatives pour réduire les PE. À cette fin, deux approches MCDM ont été utilisées (AHP et Fuzzy-AHP). En intégrant divers critères et en prenant en compte les incertitudes liées à ces pertes, ces méthodes permettent de développer des stratégies ciblées pour la réduction des pertes d'eau (Vassoney, 2022). L'application d'une méthode intégrée entre les techniques MCDM s'est avérée influente dans la prise de décision (Štilić & Puška 2023). Ensuite, un cadre intégré, utilisant un processus hiérarchique analytique (AHP) et un réseau neuronal artificiel (RNA), a été développé pour la prédiction des PE dans le réseau de distribution d'eau potable de la ville d'Annaba. L'AHP a été utilisé pour calculer les pondérations relatives des sous-critères et des indicateurs. Sur la base de ces pondérations, l'état des conduites d'eau est évalué et intégré au RNA afin de prédire les possibilités de la détérioration des conduites d'eau. En appliquant cette méthode, les gestionnaires des services de l'eau potable peuvent optimiser les décisions afin de minimiser les pertes d'eau.

La thèse est composée de quatre chapitres. Le chapitre 1 présente une synthèse bibliographique sur les pertes d'eau dans les réseaux d'AEP et les méthodes MCDM appliquées pour la réduction des PE. Ensuite, une revue de littérature a été présentée. Le chapitre 2 a pour but d'identifier les données nécessaires pour le processus de décision, en suite nous décrivons l'approche élaborée dans le cadre de la réduction des PE dans les réseaux de distribution d'eau potable. Le chapitre 3 présente notre zone d'étude. Après une présentation détaillée de notre étude de cas, nous analysons les données sur la distribution de l'eau, les réseaux (longueur, diamètre et type de matériau), le fonctionnement du réseau de distribution d'eau potable et le nombre de fuites réparées dans les dernières années pour le cas de la ville d'Annaba. Dans le Chapitre 4, nous présentons et testons le modèle d'aide à la décision pour notre étude de cas. Ensuite, une conclusion générale est présentée.



Chapitre 1.

Synthèse
bibliographique

Chapitre 1.

Synthèse bibliographique

Ce chapitre visait à comprendre les pertes en eau et à explorer les possibilités de réduire les pertes dans les réseaux de distribution d'eau. Ensuite, ce chapitre passe en revue de la littérature la plus pertinente sur la gestion des pertes en eau.

1.1. Pertes d'eau

Les pertes d'eau (PE) dans les Réseaux de Distribution d'Eau (RDE) sont des défis majeurs auxquels les services d'eau sont confrontés dans le monde (Mutikanga et al., 2013). Ils sont considérés comme l'indice le plus pertinent d'inefficacité des RDE (Vilanova et al., 2015) car ils affectent la stabilité technique et l'âge opérationnel des RDE, ainsi que la qualité de l'eau et la qualité de l'offre de services d'eau (Al-washali et al., 2016). Les pertes d'eau correspondent à la différence entre le volume d'eau produit (injecté dans le réseau) et le volume d'eau facturé aux usagers. Elles se divisent en deux catégories : pertes apparentes et pertes réelles.

1.1.1. Types de pertes d'eau

Les pertes d'eau sont classées en deux composantes principales :

- **Pertes physiques ou réelles** : représentent le volume d'eau qui n'a pas été consommé, car il a été perdu lors du trajet entre la production de l'eau et les abonnés. Les principales composantes des pertes physiques en eau sont les suivantes :
 - Fuites d'eau sur les réseaux d'adduction (photo 1.1)
 - Fuites d'eau sur les conduites de distribution (photo 1.2)
 - Fuite sur les branchements individuels jusqu'au compteur du client (photo 1.3)
 - Fuites sur les équipements du réseaux (vannes, bouche d'incendie, ...) (photo 1.4)
 - Débordements des réservoirs de stockage de la compagnie d'eau



Photo 1.1. Fuites sur réseau d'adduction



Photo 1.2. Fuites sur réseau de distribution



Photo 1.3. Fuites sur un branchement



Photo 1.4. Fuites sur équipements de réseau

- **Pertes commerciales ou apparentes** : représentent l'eau qui a été consommée, mais dont le volume n'a pas été comptabilisé par la société de distribution. Les principales causes des pertes commerciales de l'eau sont :
 - Consommation non autorisée (branchement illicite) (photo 1.5)
 - Inexactitude du compteur client
 - Erreurs de lecture du compteur
 - Erreurs de traitement des données et de comptabilité



Photo 1.5. Branchements illicites

1.1.2. Causes et impacts des Pertes d'eau

Les causes des pertes physiques s'accroissent sous l'effet conjugué du vieillissement des réseaux, de la pression démographique et des contraintes environnementales, tandis que les pertes commerciales découlent d'erreurs de mesure, de fraudes ou de gestion inefficace des données (Liemberger et Wyatt, 2019).

❖ Causes des pertes physiques d'eau :

- Dysfonctionnement des vannes sur les réseaux
- Trafic intense
- Mauvaise qualité des conduites et des équipements hydrauliques
- Manque de support technique pendant la pose des conduites
- Forte pression
- Manque d'équipements de protection des conduites sur les réseaux (ventouse, anti-bélier,)

- ❖ Causes des pertes commerciales d'eau :
 - Connexions illégales :
 - Enlèvement du compteur durant la période de distribution
 - Connexion illégale sur le réseau de distribution
 - Reconnexion illégale par des personnes déconnectées
 - Installation d'un nouveau branchement (avec un Té ou un Coude avant le compteur)
 - Inexactitudes de relevés de comptage :
 - Compteurs de mauvaise qualité
 - Inversion des compteurs par les consommateurs
 - Mauvaise installation
 - Taille ou emplacement inappropriées des compteurs
 - Manque d'entretien et de remplacements appropriés.
 - Erreurs de traitement des données et leurs causes :
 - Mauvaise lecture
 - Mauvaise écriture
 - Corruption de lecteurs de compteurs (releveurs)
 - Fatigue des lecteurs de compteurs
 - Estimations dues à l'inaccessibilité des compteurs
 - Équipement défectueux (compteurs)

L'interaction entre ces deux types de pertes crée un cercle vicieux. D'un côté, les pertes physiques réduisent la pression dans le réseau, augmentant les risques de contamination et incitant les usagers à recourir à des raccordements non réglementés. De l'autre, les pertes apparentes privent les gestionnaires de revenus essentiels pour entretenir les infrastructures.

1.2. Méthodes existantes de réduction des pertes d'eau

Les méthodes existantes pour la réduction des PE dans les réseaux de distribution d'eau sont :

- Approches conventionnelles (détection des fuites, gestion de pression, etc.)
- Méthodes avancées (modélisation, intelligence artificielle)

A cet effet, il faut élaborer des stratégies durables de réduction des pertes en eau basée sur les actions suivantes :

- Analyse de la situation actuelle (diagnostic préliminaire du système, détermination du bilan d'eau, quantifier les pertes réelles, évaluation des pertes apparentes et calculer les indicateurs de performance pertinents) ;
- Identifier les mesures appropriées (sélectionner les méthodes pour la recherche et la réduction des PE, et fixer des objectifs à atteindre) ;
- Mettre en œuvre un programme de recherche et contrôle des pertes en eau (définir un plan d'action, et sélectionner les méthodes d'intervention) ;
- Actualisation de la base de données après chaque intervention (intégration dans des systèmes d'information de la gestion des pertes en eau et dans un SIG)

1.3. Application des méthodes Multi-Criteria Decision-Making

La pratique de la gestion des pertes d'eau est un processus de prise de décision qui vise à traiter un ensemble de stratégies potentielles. Ceci appelle à son tour à l'utilisation de la prise de décision multicritère (Multi-Criteria Decision-Making : MCDM) comme techniques utiles à cet égard.

Les techniques MCDM ont un grand potentiel pour évaluer des cas réels avec de multiples critères quantitatifs et/ou qualitatifs. Leur environnement de travail est caractérisé par une prise de décision risquée dans le but de trouver la ligne de conduite la plus appropriée ; politique ; choix ou action parmi les différentes alternatives disponibles (Kumar 2010). La pratique fréquente dans l'emploi des MCDM montre leur importance cruciale dans l'allocation des ressources limitées entre les options ou stratégies concurrentes (Diaby et al., 2013). Les mathématiques, l'économie, les systèmes d'information, les technologies informatiques, la théorie de la décision comportementale et le génie logiciel pourraient être parmi les principales sources de connaissances utilisées dans la MCDM (Behzadian et al., 2012).

Un grand nombre de techniques ont été développées pour résoudre les problèmes de MCDM, et leur croissance est largement motivée par la diversification des problèmes de la vie réelle qui a nécessité la prise en compte de divers objectifs et critères incohérents en plus de la volonté d'offrir des techniques de prise de décision consolidées qui utilisent les promotions contemporaines dans l'optimisation mathématique, le calcul scientifique et les technologies informatiques (Wiecek et al., 2008). De plus, la nécessité de développer des approches méthodologiques et des théories susceptibles de traiter les problèmes complexes rencontrés dans les domaines de l'ingénierie, de la science, de la gestion et d'autres activités humaines guident la croissance de MCDM (Behzadian et al., 2010). Dans son travail de base, MCDM

définit d'abord les principaux objectifs, nomme les critères requis, attribue des options ou des alternatives, transforme les échelles de critères en unités commensurables, identifie les poids des critères qui indiquent l'importance des critères, emploie des algorithmes mathématiques dans le but de classer les options/alternatives, et élit finalement les plus commodes (Ananda & Herath 2009). De leur point de vue commun, les techniques MCDM cherchent à travers une procédure de décomposition de l'évaluation globale des options/alternatives en un groupe d'évaluations en référence à un ensemble de critères pour la plupart incompatibles qui sont pertinents au problème de décision pour améliorer la prise de décision.

L'évaluation de la performance des options/alternatives sur chaque critère et la procédure d'obtention d'une évaluation globale en agréant les évaluations à travers les critères représentent la distinction majeure entre les différentes techniques MCDM (Durbach & Stewart 2012). Dans les méthodes MCDM, la matrice de performance sert de base à toute analyse utilisant plusieurs critères de décision. La matrice de performance est composée de colonnes et de lignes ; les colonnes représentent les critères d'évaluation qui doivent être utilisés pour évaluer la performance des options/alternatives, tandis que les lignes représentent les options/alternatives qui doivent être notées, classées ou classées (Diaby et al., 2013). Il existe divers protocoles utilisés par différentes techniques MCDM pour extraire les entrées, diverses structures pour les démontrer, différents algorithmes pour les fusionner et diverses approches pour utiliser et illustrer les sorties formelles dans le contexte de la prise de décision (Huang, 2022).

Les techniques MCDM sont des techniques confiantes et assurées (Rahman et al., 2015). Ils se sont avérés efficaces dans les approches participatives au sein de la prise de décision et dans des situations où, généralement, aucune solution inégalée n'est réalisable et où l'on prétend faire la distinction entre un ensemble de solutions potentielles.

Les méthodes MCDM se classent en trois catégories : (1) approches par fonctions d'utilité, (2) méthodes de distance, et (3) techniques de surclassement, selon des taxonomies récentes (Govindan et al., 2021).

Le **premier groupe** comprend la théorie de l'utilité multi-attributs (MAUT), la théorie de la valeur multi-attributs (MAVT) (Keeney & Raiffa 1993) et le processus hiérarchique analytique (AHP) (Saaty 1990). La principale distinction entre MAUT et MAVT est que le MAUT considère, explicitement, les fonctions d'utilité d'incertitude au lieu d'utiliser des fonctions de valeur. Alors que dans le cas de MAVT, les fonctions de valeur sont utilisées pour démontrer le niveau de satisfaction d'une option/alternative par rapport à un critère. La performance d'une

alternative résulte de l'agrégation de fonctions de valeur en un indice unique par critère, selon des méthodes MCDM récentes (Deveci et al., 2022). Les hypothèses de la méthode AHP sont basées sur l'évaluation des options/alternatives en employant des comparaisons par paires parmi les éléments du problème de décision dans une structure hiérarchique à plusieurs niveaux. L'évaluation de l'indice d'incohérence dans la méthode AHP est l'un des principaux avantages de cette méthode. Cette évaluation fournit une évaluation du niveau de divergences dans les préférences ou les jugements au cours du processus de comparaison par paires (Pohekar & Ramachandran 2004).

Dans le *deuxième groupe* de techniques basées sur la distance, la performance de l'option/alternative est évaluée en fonction de la distance par rapport à une alternative avec la meilleure ou la pire solution. La méthode technique pour l'ordre de préférence par similarité à la solution idéale (TOPSIS), qui a été développée par Hwang et Yoon (1981), est l'une des techniques les plus fréquemment utilisées. L'évaluation des alternatives en fonction de leur proximité avec la solution idéale et de leur éloignement de la pire solution, utilisant des distances euclidiennes (Hwang et Yoon, 1981).

Dans le *troisième groupe* de méthodes de surclassement qui sont également reconnues comme des techniques basées sur l'agrégation des préférences, l'évaluation est basée sur la comparaison des performances des options/alternatives par paires pour déterminer si une option/alternative est quelque peu aussi bonne qu'une autre (Cinelli et al., 2014). Les deux méthodes les plus courantes au sein de ce groupe sont : l'organisation de classement des préférences et la méthode d'évaluation de l'enrichissement (PROMETHEE) (Brans & Vincke 1985) et l'élimination et l'expression de la réalité des choix (ELECTRE) (Roy 1991). Les principales étapes de la méthode PROMETHEE consistent à : définir des fonctions de préférence pour chaque critère ; établissement de l'indice de préférence et des flux de préférence et classement des options/alternatives (Ananda & Herath 2009). La famille des méthodes ELECTRE, utilise la comparaison par paires pour évaluer les indices de concordance et de discordance. Il vérifie si la performance d'une option/alternative sur un critère est inférieure à une limite acceptable (Douplos & Zopounidis 2014). Plusieurs autres méthodes ELECTRE ont été développées pour traiter différents problèmes de prise de décision dans le monde réel tels que : ELECTRE I, II, III, IV et V.

Les techniques MCDM les plus couramment utilisées sont : l'AHP, MAUT, la technique d'évaluation multi-attributs simple (SMART), la théorie des ensembles flous, l'analyse d'enveloppement des données (DEA), Simple Additive Weighting (SAW), ELECTRE,

TOPSIS, PROMETHEE et Goal Programming (GP) (Velasquez & Hester 2013 ; Wang et al., 2016).

1.4. Revue de la littérature

De nombreuses méthodes et outils différents ont été développés pour gérer les PE dans les RDE. A titre d'exemple, les méthodes MCDM en tant qu'approches systématiques et transparentes ont un fort potentiel pour produire des décisions bien structurées dans ce domaine. Ils sont utilisés par plusieurs chercheurs comme outils d'aide à la décision dans la gestion des pertes en eau (Mutikanga et al., 2011 ; Fontana & Morais 2013 ; Morais et al., 2014).

Bien qu'il y ait un intérêt croissant pour la recherche et l'application de stratégies de gestion des pertes d'eau dans le monde, les progrès dans les pays en développement dans ce contexte sont retardés. En Algérie, les réseaux d'eau souffrent de dysfonctionnements intermittents et de pertes techniques/commerciales élevées (30-45%), aggravant la pénurie hydrique. Ces défis freinent l'accès équitable, notamment dans les zones arides, des ressources insuffisantes, et des données fiables rares (Sharma & Vairavamoorthy 2009) limitent l'application des outils développés de réduction et de gestion des pertes d'eau car ils ne sont pas en mesure de gérer parfaitement les conditions uniques et les caractéristiques des RD. En outre, le développement de lignes directrices ou d'outils d'aide à la décision permettant de sélectionner les stratégies adéquates pour des conditions locales spécifiques dans le contexte de la gestion des pertes en eau dans les RD n'est toujours pas suffisamment disponible aux niveaux pratiques dans les pays en développement et nécessite des recherches supplémentaires (Mutikanga et al., 2013).

Toute amélioration dans ce contexte permettra d'atténuer les impacts de la pénurie d'eau en équilibrant les écarts constatés entre les approvisionnements disponibles et les demandes croissantes grâce à l'investissement dans l'eau récupérée (van den Berg, 2015). D'après la littérature scientifique, un grand nombre de stratégies susceptibles de réduire les pertes d'eau dans les RD sont disponibles (l'utilisation de techniques avancées telles que la surveillance en ligne, les capteurs multiparamétriques, la gestion de la pression et des patrimoines, etc.).

Les conditions limites et locales qui englobent les caractéristiques des RD (c'est-à-dire les conditions opérationnelles et physiques), et la santé financière et les capacités techniques des services d'eau qui sont des indicateurs de la puissance des services d'eau à adopter, que des stratégies coûteuses et sophistiquées ou moins sophistiquées soient en outre vitales à cet égard (Zayoud, 2017). De plus, la complexité de cette pratique augmente en intégrant les multiples dimensions de la durabilité (c'est-à-dire les dimensions économiques, techniques, environnementales et socio-économiques). Cette intégration est inévitable pour générer des

stratégies plus durables caractérisées par la fiabilité, l'adéquation et l'abordabilité et pour s'orienter vers la tendance de la durabilité globale (Shmelev & Van Den Bergh, 2016) dans le contexte de la gestion des pertes en eau. En plus des problèmes mentionnés précédemment, les déficits financiers et les allocations budgétaires inadéquates parmi d'autres lacunes obligent les services d'eau dans les pays en développement à rechercher des techniques peu coûteuses dans le but d'évaluer les taux de pertes d'eau dans leurs RD.

Les méthodes de décision multicritères, telles que l'AHP et le Fuzzy AHP, sont couramment employées pour prioriser et sélectionner les meilleures alternatives visant à réduire les pertes d'eau potable (Abdelkader et al., 2024).

1.4.1. Méthode Analyse Hiérarchique des Processus (AHP)

L'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP) est une méthode d'aide à la décision multicritère qui structure les choix en hiérarchisant les critères et en effectuant des comparaisons par paires pour établir des priorités (Saaty, 1980). La méthode AHP a été appliquée dans le domaine de l'Énergie Renouvelable. Par exemple, l'AHP a été appliquée pour la sélection finale de la structure d'un système électrique hybride intégrant des sources d'énergie renouvelables et du stockage d'énergie électrique (Tomczewski et al., 2024) et pour l'évaluation de scénarios alternatifs dans la sélection du site de la centrale solaire pour la planification énergétique durable en Turquie (Yildiz et al., 2025). L'AHP a été appliquée aussi dans d'autre domaine, tel que, l'évaluation des risques de glissement de terrain (Kavus & Taskin, 2025). Ainsi que dans le domaine de la gestion des ressources en eau, par exemple, Ahmad et al., 2024 ont utilisé l'AHP et Fuzzy-AHP pour déterminer les zones potentielles de récupération des eaux de pluie au Pakistan (Ahmad et al., 2024). Une autre étude a appliqué l'AHP pour la priorisation des objectifs et des paramètres d'une gestion intégrée de l'eau en milieu urbain en Inde (Parween & Sinha, 2024). Son application dans la gestion des réseaux d'eau potable est illustrée par l'étude de Boutebba et al. (2014), qui ont proposé un prototype interactif combinant l'AHP avec des Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour optimiser la réhabilitation des infrastructures. Cependant, l'AHP présente des limites, notamment sa sensibilité aux jugements subjectifs des experts, pouvant influencer les pondérations des critères (Ennaouri, 2010). Pour pallier cette limitation, l'intégration de la logique floue est recommandée afin d'améliorer la fiabilité des décisions dans des environnements incertains. Zayoud et al., (2016) ont utilisé la méthode AHP avec quatre critères, dix sous-critères et dix alternatives pour prioriser les options de réduction des pertes d'eau pour le réseau d'approvisionnement en eau de la ville de Naplouse en Palestine. Zayoud (2017) a utilisé les deux méthodes AHP et F-AHP pour le contrôle et la

gestion des pertes d'eau dans les réseaux de distribution d'eau potable en Palestine. Ensuite, il a appliqué une méthode intégrée F-AHP et Fuzzy-TOPSIS pour la sélection de meilleurs alternatives et solutions pour la réduction des pertes d'eau.

1.4.2. Méthode Fuzzy AHP (FAHP)

Le Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) intègre la logique floue avec l'AHP pour traiter les incertitudes et les données imprécises. Cette approche utilise des nombres flous pour pondérer des critères qualitatifs et quantitatifs, offrant une flexibilité adaptée aux contextes complexes (Zadeh, 1965). Le Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) est une méthode efficace pour évaluer et prioriser les stratégies de réduction des eaux non facturées (ENF). Par exemple, une étude menée dans le bassin de Guelma, en Algérie, a utilisé un modèle hybride FAHP pour cartographier les zones d'altération, facilitant ainsi l'identification des secteurs nécessitant des interventions prioritaires (Amara et al., 2024). De plus, l'intégration de la géomatique et de l'analyse multicritère basée sur le FAHP a été appliquée pour évaluer la vulnérabilité aux inondations, démontrant la polyvalence de cette approche dans la gestion des ressources en eau. Cependant, l'interprétation des résultats issus du FAHP nécessite une expertise spécifique pour éviter des biais décisionnels et assurer la fiabilité des conclusions.

1.4.3. Analyse comparative des méthodes AHP et FAHP

Les méthodes multicritères (MCDM) telles que l'AHP et FAHP offrent des approches distinctes pour hiérarchiser les interventions de réduction des pertes d'eau. Leur efficacité varie selon le contexte opérationnel et la nature des données disponibles (Tableau 1.1.).

Tableau 1.1. Comparaison entre les méthodes AHP et FAHP

Critère	AHP	FAHP
Gestion des incertitudes	Limité (nécessite des données précises)	Optimal (logique floue intégrée)
Subjectivité	Élevée (pondérations expertes)	Élevée (estimations floues)
Complexité	Moyenne (matrices de comparaison)	Élevée (intervalles flous)
Adaptabilité	Contexte clair	Contexte imprécis ou incomplet

Pour maximiser l'efficacité des méthodes multicritères (MCDM) dans la réduction des pertes d'eau, trois axes d'amélioration sont proposés. Premièrement, l'hybridation des méthodes, comme l'association de l'AHP et du TOPSIS, permet de conjuguer la hiérarchisation structurée

des critères (AHP) et l'évaluation quantitative des alternatives (TOPSIS). Cette approche, testée avec succès à Singapour, a optimisé les investissements en ciblant les tronçons de réseau à fort taux de fuite (Chen et al., 2021). Deuxièmement, la sensibilisation des décideurs est cruciale : des formations sur l'interprétation des résultats flous (FAHP) renforcent l'appropriation des solutions. Ces recommandations favorisent une gestion équilibrée, alliant rigueur technique et pragmatisme opérationnel.

Dans le contexte de l'application des techniques MCDM pour résoudre les problèmes de perte d'eau dans les pays en développement, plusieurs études ont tenté d'étudier cette question :

- Mutikanga et al., (2011) ont utilisés la méthode PROMETHE II comme outil stratégique et méthode de planification à long terme pour la gestion des pertes d'eau dans la ville de Kampala située en Ouganda.
- Fontana et Morais (2013) ont appliqués la méthode PROMETHEE V pour aider les décideurs de services de l'eau à désigner un groupe d'options réalisables pour réhabiliter les réseaux d'approvisionnement en eau avec des fuites détectées.
- Morais et al., (2014) ont appliqués la méthode ELECTRE III (SMAA-TRI) pour évaluer la gestion des PE au Brésil. Dans cette étude, les auteurs ont utilisé 6 critères (pression, âge des canalisations, interférence, qualité de l'eau, type de consommation et population desservie) pour découper le réseau de distribution en zones où les pertes sont intenses et déterminer les secteurs avec les pertes les plus élevées.
- Trojan et Morais (2015) ont utilisés les méthodes ELECTRE II et ELECTRI TRI pour structurer un modèle de décision qui vise à soutenir les décideurs et les gestionnaires des services d'eau potable dans les activités de gestion de la maintenance et de réduction des pertes d'eau dans les systèmes d'alimentation en eau potable.
- Rossi et al., (2019) ont utilisés la Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) à Naples, où huit scénarios de sectorisation du réseau d'eau ont été analysés. Le scénario optimal (Découpage en 12 zones + régulateurs de pression) a atteint un indice de proximité de 0,91, réduisant les ENF de 22 % tout en optimisant les dépenses.
- Kadenge et al., (2020) ont développé un modèle intégré de trois méthodes de prise de décision multicritères (MAVT, SMARTER et COPRAS) et une technique d'optimisation numérique ILP pour optimiser la gestion des PE en Tanzanie.

En conséquence, la nomination de techniques MCDM qui ont un potentiel suffisant pour énoncer et structurer le problème de décision de la gestion des pertes en eau dans les systèmes d'alimentation en eau intermittente et compréhensible sera un enjeu essentiel dans cette recherche. De plus, et en raison du manque de ressources financières suffisantes et de budgets alloués, les services d'eau des pays en développement recherchent des outils peu coûteux pour gérer les pertes d'eau dans leurs systèmes.

La plupart des techniques déjà développées dans le domaine de la gestion des pertes en eau n'abordent pas complètement les caractéristiques exclusives des RD dans le monde en développement. Des dispositions spécifiques sont toujours nécessaires pour adopter les méthodes existantes tout en tenant compte des conditions limites et des caractéristiques uniques des RD en Algérie. Par conséquent, le développement de cadres appropriés pour gérer les pertes d'eau dans les systèmes d'alimentation intermittente en introduisant des techniques MCDM est l'objectif principal de cette recherche. Malgré le besoin crucial d'identifier les critères et de sélectionner des alternatives pour réduire les PE dans le RDE, le sujet n'a pas été abordé jusqu'à aujourd'hui dans le cas de l'Algérie.

1.4.4. Réseaux de neurones artificiels (ANN) pour la prédiction

L'ANN a été largement utilisé dans le domaine de l'énergie, notamment à la performance des systèmes d'énergies renouvelables (Parrales et al., 2022 ; Talaat et al., 2023), aux systèmes d'énergie solaire (Zayed et al., 2022 ; Lund & Bin, 2023), aux systèmes solaires thermiques à basse température (Diez et al., 2022), aux systèmes de dessalement de l'eau (Essa et al., 2022 ; Zgalmi et al., 2024).

Les réseaux de neurones artificiels (RNA ou ANN) démontrent une efficacité croissante dans la détection et la prévention des fuites d'eau, combinant une innovation technologique et une analyse prédictive. Deux approches émergentes illustrent cette tendance :

- Détection des fuites par réseaux de neurones convolutionnels (CNN) :

Zaman et al. (2022) ont appliqué des réseaux de neurones convolutionnels (CNN) à l'analyse des données de pression issues de capteurs IoT pour détecter les fuites dans les réseaux d'eau. En exploitant la capacité des CNN à reconnaître des schémas complexes, leur modèle a atteint une précision élevée dans l'identification des anomalies. Cette approche permet une localisation rapide des fuites, même en présence de fluctuations hydrauliques, offrant ainsi une alternative efficace aux méthodes traditionnelles de surveillance

- **Hybridation ANN-LSTM pour la prédiction des ruptures :**

Ces cas d'usage soulignent la polyvalence des ANN, capables de s'adapter à des données hétérogènes (acoustiques, temporelles, structurelles) pour améliorer la résilience des réseaux. Toutefois, leur déploiement à grande échelle requiert une standardisation des données et un calibrage précis des modèles.

1.4.4.1. Identification des pertes apparentes (fraudes et erreurs)

L'identification des pertes apparentes, incluant les fraudes et les erreurs de mesure, constitue un enjeu majeur dans la gestion des réseaux d'eau urbains. Ces pertes, bien qu'invisibles, représentent une part significative des inefficacités dans les systèmes hydriques. Selon Mutikanga et al., (2013), les erreurs de comptage dues à des compteurs mal étalonnés ou vétustes peuvent atteindre jusqu'à 5 % du volume total distribué. Par ailleurs, les fraudes, souvent liées à des branchements illégaux ou à des manipulations des compteurs, nécessitent des stratégies de détection avancées. Une étude réalisée par Britton et al. (2013) propose l'utilisation de techniques analytiques basées sur des algorithmes d'apprentissage automatique pour détecter les anomalies dans les données de consommation, permettant ainsi d'identifier les comportements suspects. Ces approches doivent être complétées par des inspections régulières sur le terrain pour garantir leur efficacité. Enfin, selon Al-washali et al., (2016), une meilleure gouvernance et une sensibilisation accrue des usagers aux impacts des fraudes contribuent à réduire ces pertes. Ces stratégies combinées offrent une voie durable pour minimiser les pertes apparentes.

1.4.4.2. Gestion dynamique de la pression

Les ANN génératifs optimisent la gestion de la pression en adaptant les paramètres hydrauliques aux variations de la demande horaire. Mounce et al. (2010) ont montré que l'utilisation d'un réseau de neurones artificiels pour l'ajustement dynamique de la pression permettait de détecter les anomalies et d'optimiser le fonctionnement des réseaux d'eau potable. En intégrant des paramètres influençant la variabilité des écoulements, cette approche contribue à la réduction des fuites et à l'amélioration de la résilience du réseau. Cette approche proactive combine analyse prédictive et adaptation contextuelle, offrant une solution rentable pour les environnements soumis à des stress hydriques et climatiques.

1.4.4.3. Avantages des ANN par rapport aux méthodes traditionnelles

Les ANN surpassent les approches classiques dans la gestion des pertes d'eau sur plusieurs aspects critiques. Les paramètres les plus courants à analyser et à mesurer pour la calibration

des modèles hydrauliques sont : la pression, le débit et le niveau d'eau dans les réservoirs (Rossman, 1999), tandis que les ANN exploitent des données massives pour des prédictions à 85–95 % (García et al., 2023). Le temps de traitement est réduit de plusieurs heures/jours à quelques secondes/minutes, permettant une analyse en temps réel (Chen et al., 2021). Contrairement aux méthodes nécessitant une recalibration manuelle, Les réseaux de neurones artificiels ajustent leurs paramètres de manière permanente grâce à l'apprentissage en temps réel, en incorporant activement des flux de données évolutifs (Heaton 2018). Enfin, les coûts sont optimisés grâce à la réutilisation de données existantes, évitant l'achat de capteurs spécialisés. Ces avantages positionnent les ANN comme des outils indispensables pour une gestion hydraulique résiliente.

Tableau 1.2. Différence entre ANN et les Méthodes traditionnelles

Critère	Méthodes traditionnelles	ANN
Précision	70–80 % (modèles hydrauliques)	85–95 % (données massives)
Temps de traitement	Heures à jours	Secondes à minutes (temps réel)
Adaptabilité	Requiert recalibration manuelle	Apprentissage continu (online)
Coût	Élevé (capteurs spécialisés)	Réduit (réutilisation des données)

De nombreuses recherches se sont concentrées sur le problème des PE dans les systèmes d'approvisionnement en eau, il s'agissait de recommandations et non d'un élément essentiel. Par conséquent, un manque de connaissances existe encore en ce qui concerne la gestion et la réduction des PE dans les pays en développement. La réduction des PE sera une première étape pour une transition progressive des services d'approvisionnement intermittents vers des services d'approvisionnement continus. Ceci est applicable par l'investissement dans l'eau récupérée qui a des coûts d'opportunité élevés pour atténuer la pénurie d'eau.

1.4.5. Applications de la méthode AHP-ANN dans d'autres domaines

Les méthodes hybrides AHP-ANN combinant l'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP) et les Réseaux de Neurones Artificiels (ANN) ont été appliquées dans divers domaines, notamment l'Énergie Renouvelable, la construction et la gestion des ressources en eau (les eaux souterraines, récupération des eaux de pluie).

La méthode hybride AHP-ANN a été utilisée pour développer un modèle de prédiction des facteurs de risque majeurs de la construction taiwanais. L'AHP a permis de calculer la pondération des facteurs de risque majeurs afin de vérifier leur influence sur la construction. L'ANN a été utilisé pour extraire les caractéristiques des facteurs de risque majeurs afin de

prédire la qualité d'un projet de construction (Lin et al., 2022). Une étude présente une méthodologie intégrée combinant l'AHP et l'ANN pour sélectionner les sites d'énergie houlomotrice (ou énergie des vagues) en Chine (Shao et al., 2024). A cet effet, la méthode intégrée AHP-ANN a été largement utilisée dans le domaine de l'Énergie. Des études ont utilisé l'AHP pour pondérer des critères comme l'ensoleillement, les coûts d'installation et les impacts environnementaux, tandis que les ANN prédisent la productivité énergétique potentielle. Cette approche est courante pour les parcs solaires et éoliens. Pour l'Optimisation des réseaux électriques : L'AHP évalue la criticité des nœuds du réseau (fiabilité, coût, maintenance), et les ANN prédisent les pannes ou les charges futures, améliorant ainsi la planification des infrastructures. Pour l'Audit énergétique : Des modèles hybrides AHP-ANN ont été appliqués pour prioriser les mesures d'efficacité énergétique dans les usines. L'AHP classe les équipements par criticité, et les ANN modélisent leur consommation pour identifier des gains potentiels. Khan et al., (2025) ont développé un modèle intégré AHP-ANN pour la production innovante d'hydrogène à partir de bio-huiles usagées par reformage du méthane à la vapeur (Khan et al., 2025).

Pour le cas de la gestion des ressources en eau. Des chercheurs ont utilisé l'algorithmes d'apprentissage automatique (Machine Learning : ML) et Fuzzy-AHP pour l'identification des zones au potentiel des eaux souterraines (Halder et al., 2024). Une autre étude vise à évaluer les zones potentielles de récupération des eaux de pluie (REP) en utilisant ML et l'AHP pour délimiter les zones potentielles de REP au Bangladesh (Hasan et al., 2025). Pour la gestion des barrages : L'AHP aide à arbitrer entre production d'électricité, irrigation et préservation écologique, tandis que les ANN prédisent les débits d'eau et la production énergétique en fonction des conditions climatiques. Dans l'Agriculture, par exemple, la sélection de cultures à faible empreinte hydrique (l'AHP pour le calcul des poids des facteurs, l'ANN pour modéliser les rendements sous contraintes climatiques). Plusieurs études ont démontré l'efficacité des approches hybrides AHP-ANN pour l'évaluation des risques d'inondation. Cette méthode a été appliquée aussi pour l'érosion hydrique (Marouf et al., 2025).

1.5. Justification de l'approche hybride AHP-ANN pour la réduction des pertes d'eau

La littérature scientifique dans le domaine de la réduction des PE en appliquant une approche hybride AHP-ANN est abondante.

- AHP : Structure les décisions multicritères (ex. : priorisation des tronçons à réhabiliter basée sur l'âge, la criticité, le coût).

- ANN : Apprend des schémas complexes à partir de données historiques (fuites, pression) pour prédire les risques futurs.
- **Réduction des biais et amélioration de la précision**
 - L'AHP affine les entrées de l'ANN en pondérant les variables clés (ex. : pression > âge dans certains contextes), évitant le bruit des données non pertinentes.
 - Les ANN compensent les limites de l'AHP en quantifiant des relations non perceptibles par les experts (ex. : corrélation entre température du sol et fréquence de fuites).
- **Adaptabilité aux contraintes du terrain**
 - Permet d'intégrer des données incomplètes (ex. : réseaux mal cartographiés) via des méthodes hybrides de pondération.
 - Facilite la mise à jour dynamique des modèles avec de nouvelles données (capteurs intelligent, rapports d'inspection).

1.6. Synthèse d'une revue de littérature

Une revue systématique de 45 articles scientifiques (2015–2023), sélectionnés via les bases de données *Scopus*, *Web of Science* et *Science Direct* avec les mots-clés « non-revenue water », « water loss reduction » et « urban water management », révèle quatre axes stratégiques dominants pour réduire les PE. Ces études, majoritairement empiriques et couvrant des contextes géographiques variés, identifient des solutions techniques, managériales et institutionnelles dont l'efficacité est validée par des données quantitatives.

▪ Détection et réparation des fuites

Les technologies de détection des fuites dans les réseaux hydrauliques combinent méthodes acoustiques, satellitaires et algorithmiques. Les capteurs acoustiques, testés par Colombo et al. (2009) sur des conduites en fonte à Milan, ont identifié 92 % des fuites, réduisant les pertes de 18 % annuellement. Les algorithmes de corrélation de bruit, évalués par Pudar et Liggett (1992), optimisent le temps d'intervention en croisant les signaux de multiples capteurs, diminuant les délais de 40 %. Toutefois, ces innovations requièrent un calibrage rigoureux et une expertise technique, freinant leur déploiement dans les régions aux ressources limitées (Farley & Trow, 2003). Une maintenance préventive des infrastructures, couplée à des formations ciblées, reste indispensable pour maximiser l'efficacité à long terme de ces solutions, notamment dans les contextes urbains vieillissants ou exposés à des contraintes environnementales sévères.

▪ Modernisation des systèmes de comptage et de facturation

La lutte contre les pertes apparentes passe par l'innovation technologique et la rigueur administrative. Kaya et al., (2020) ont annoncé que l'installation de compteurs intelligents (AMI) à Istanbul, ont permis de détecter 2000 branchements illicites et de réduire les pertes de 15%. À Lima, Guerrero et al., (2023) ont combiné des audits de terrain et des pénalités accrues pour fraude, diminuant les pertes apparentes de 30 % en quatre ans. Parallèlement, Chen et al., (2021) ont expérimenté la blockchain à Singapour pour sécuriser les données de consommation, éliminant 12% des erreurs de facturation. Ces résultats sont confirmés par Alvisi et al., (2019), qui soulignent que l'intégration de logiciels de gestion clientèle (CRM) améliore la traçabilité des données dans les municipalités italiennes.

▪ Gestion dynamique de la pression

L'ajustement de la pression hydraulique émerge comme une solution rentable pour limiter les fuites. Zerguini et al., (2023) ont démontré qu'une réduction nocturne de 1 bar diminuait les fuites de 18%, grâce à des régulateurs de pression intelligents. À Naples, Rossi et al., (2019) ont sectorisé le réseau en 12 zones indépendantes, isolant les fuites en moins de deux heures et économisant 4,6 millions de m³/an. Cependant, Farley et Trow (2018) mettent en garde contre les risques de sous-alimentation en eau dans les zones élevées, comme observé à Johannesburg, où une pression trop faible a provoqué des plaintes par les utilisateurs (+40 %).

▪ Renforcement institutionnel et participation citoyenne

La dimension humaine est cruciale pour pérenniser les stratégies. Par exemple, l'ADE (2021) a formé 200 techniciens algériens à l'utilisation de logiciels de modélisation hydraulique (EPANET), améliorant la rapidité des interventions de 40 %. À Amman, Al-Majali et al., (2022) ont associé des universitaires et des citoyens pour cartographier 95% du réseau, contre 60% auparavant. Enfin, García et al., (2021) ont lancé l'application « ReportaFuga » à Barcelone, mobilisant 10000 citoyens et réduisant le temps de détection des fuites de 72 à 24 heures.

Tableau 1.3. Les études pour la réduction des PE

Axe stratégique	Nombre d'études	Reduction des PE (moyenne)
Détection et réparation des fuites	20	12–25 %
Modernisation des systèmes de comptage et de facturation	12	5–8 %
Gestion dynamique de la pression	8	20–30 %
Renforcement institutionnel et participation citoyenne	5	10–15 %

▪ Synthèse critique et limites

Les limites majeures des stratégies de réduction des pertes d'eau incluent : (1) l'absence de données historiques dans 68 % des villes pour hiérarchiser les interventions (Banque mondiale, 2023), (2) l'échec de 62 % des projets faute de financements durables (UNESCO, 2022), et (3) les technologies intelligentes (IA, capteurs IoT) restent inaccessibles aux municipalités rurales des pays à faible revenu, aggravant les inégalités d'accès aux infrastructures modernes (UNESCO, 2022).

La revue de la littérature ci-dessus met en évidence plusieurs lacunes notables dans la recherche dans ce domaine. Premièrement, malgré l'adoption généralisée des méthodologies MCDM dans le contexte de la gestion des ressources en eau, tels que la réduction des pertes d'eau dans les réseaux de distribution, en particulier dans les pays en développement comme le cas de l'Algérie. Deuxièmement, les critères de décision actuels ne fournissent pas de cadre d'évaluation complet pour la réduction des PE. Relever ces défis implique de gérer les compromis entre les critères, de définir des seuils d'exclusion et de tenir compte de la nature qualitative et quantitative des critères de décision. Troisièmement, les méthodologies antérieures ont fait preuve d'une certaine subjectivité, souvent influencée par l'expertise ou l'expérience limitée des décideurs. Enfin, la tendance actuelle s'oriente vers l'utilisation des réseaux de neurones artificiels pour la prévision des PE.

1.7. Limites des travaux existants et justification de l'approche hybride

- **Méthodes traditionnelles peu adaptées aux données complexes**
 - Les approches conventionnelles (détection acoustique, inspections manuelles) sont souvent réactives (intervention après fuite) plutôt que prédictives, et peinent à intégrer des critères multicritères (âge des canalisations, pression, matériaux, etc.).
 - Les modèles statistiques classiques ne capturent pas les relations non linéaires entre les facteurs de pertes (ex. : interaction entre corrosion et mouvements de sol).
- **Subjectivité et manque de standardisation**
 - Les méthodes multicritères comme l'AHP seules dépendent fortement des jugements experts, introduisant des biais subjectifs dans la pondération des critères.
 - Les études reposant sur des questionnaires ou des audits ponctuels manquent de données longitudinales pour valider les modèles.

- **Problèmes de données et d'échelle**

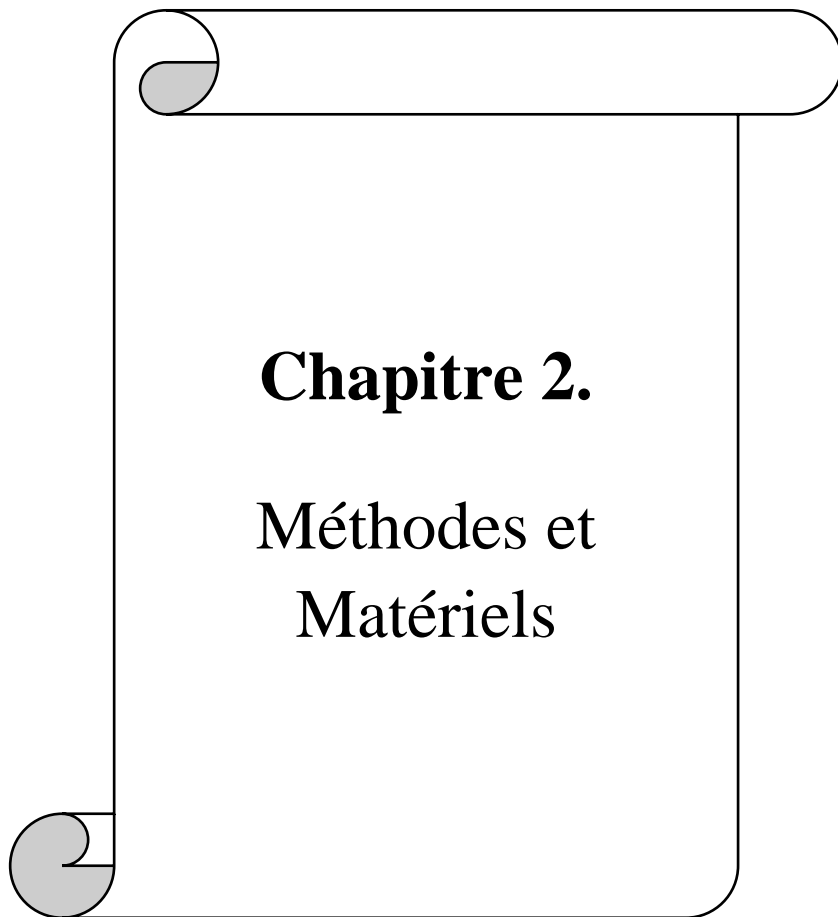
- Hétérogénéité des données : Les réseaux combinent des informations disparates (SIG, capteurs, historiques de fuites) difficiles à harmoniser.
- Couverture limitée : Les petites collectivités rurales manquent souvent de ressources pour instrumenter leurs réseaux ou mener des diagnostics complets.

- **Modèles isolés inefficaces pour la prédiction**

- Les ANN seuls, bien que performants pour la détection de motifs complexes, ignorent les priorités stratégiques (ex. : critères économiques ou réglementaires).
- Les outils de simulation hydraulique ne tiennent pas compte des dynamiques temporelles (ex. : évolution de la corrosion).

L'hybridation AHP-ANN surmonte les lacunes des approches isolées en :

- Unissant expertise humaine et puissance algorithmique pour une gestion patrimoniale proactive.
- S'adaptant aux spécificités locales (rural/urbain, climat) grâce à des critères ajustables.
- Alignant les objectifs techniques et réglementaires.



Chapitre 2.

Méthodes et matériels

2.1. Cadre théorique

Dans cette étude, une méthode hybride a été appliquée. Cette méthodologie combine entre les deux méthodes MCDM (AHP et Fuzzy AHP) et le modèle du réseau de neurone artificiel (RNA). Les méthodes AHP et Fuzzy-AHP ont été utilisées pour calculer la pondération des principaux critères et des sous-critères. Ensuite, Fuzzy-AHP a été utilisé pour sélectionner les alternatives les plus appropriées pour la réduction des pertes en eau. L'ANN a permis de prédire les relations entre les principaux risques liés aux pertes d'eau dans les réseaux de distribution. D'après la littérature scientifique, l'AHP est l'une des approches les plus populaires parmi les méthodes MCDM (Kahraman, 2024). Le choix de cette méthode repose sur sa facilité et sa capacité à décomposer le problème de décision complexe en sous-problèmes hiérarchisés par niveau d'évaluation. Par conséquent, l'application de l'AHP a été largement critiquée par plusieurs chercheurs pour son manque de valeurs numériques exactes pour exprimer l'ampleur des préférences des parties prenantes (Vasudevan & Natarajan, 2021). Pour remédier à cette anomalie, des études se sont concentrées sur l'adoption de la théorie des ensembles flous à l'AHP classique (Dağdır & Özkan, 2024) pour résoudre les problèmes d'incertitude (Demirel et al., 2008). La combinaison des théories floues et de l'AHP est couramment utilisée pour améliorer la fiabilité de la prise de décision (Zhang et al., 2018). Un ANN est une méthode d'apprentissage automatique qui permet de surmonter les inconvénients des outils statistiques, notamment leur incapacité à être utilisé pour l'exploration automatique de données. Le modèle intégré Fuzzy-AHP-ANN développé dans cette étude intègre les avantages de l'approche Fuzzy-AHP et d'un ANN. Ce modèle peut être utilisé pour élaborer des stratégies de gestion des risques et prévenir leur occurrence.

La méthodologie développée dans cette recherche a été conçue pour déterminer les poids des critères et sous-critères d'évaluation et pour choisir les meilleures solutions pour réduire les taux élevés de PE. Bien que la technique combinant Fuzzy-AHP et un RNA ait été utilisée dans d'autres études, elle est rarement utilisée pour prédire les risques des pertes d'eau dans les

réseaux de distribution. Ensuite, la méthodologie proposée a été appliquée pour évaluer et classer un ensemble des critères, sous-critères et alternatives comme stratégie de réduction de PE pour le cas de la ville d'Annaba (Algérie). La méthodologie proposée dans cette recherche est illustrée dans la figure 2.1.

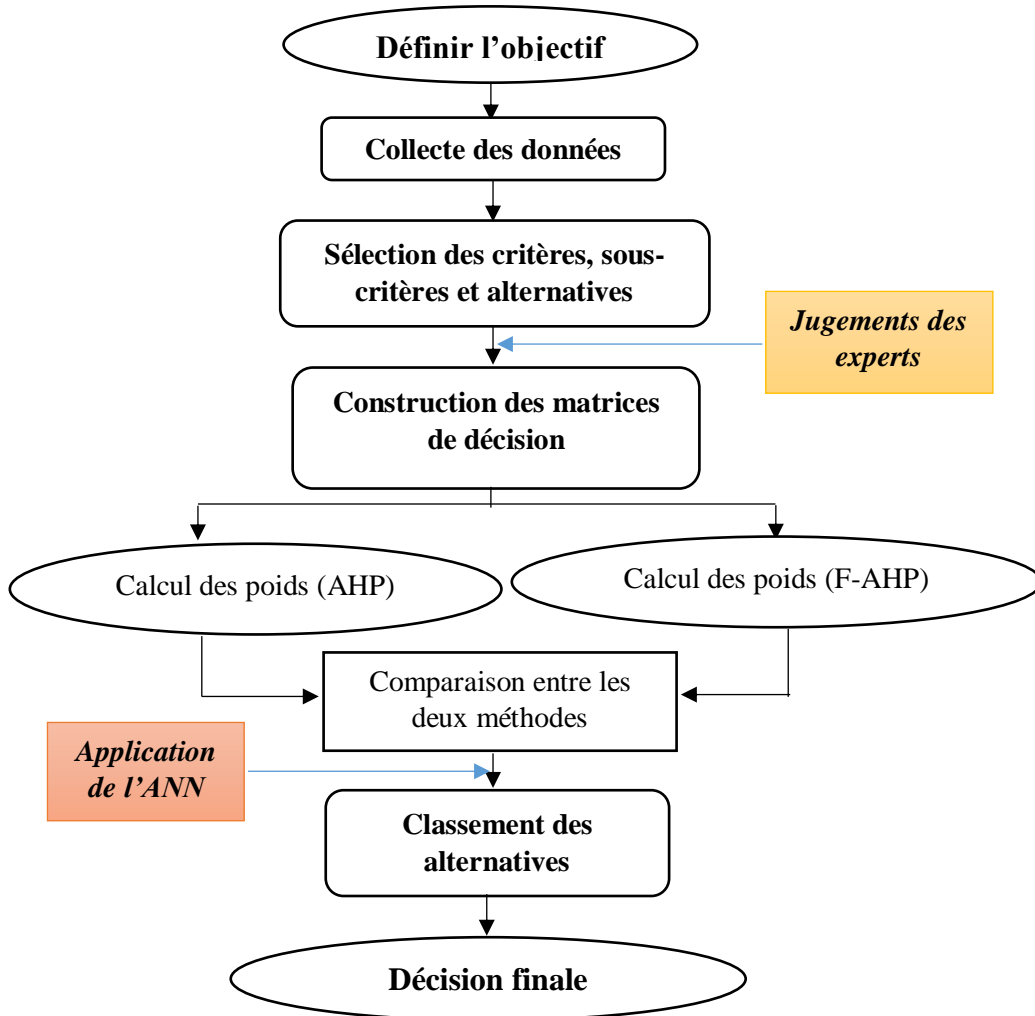


Figure 2.1. Organigramme de la méthodologie proposée

- **Étape 1.** Définir les objectifs : Le but de cette étape est l'identification de l'objectif de l'étude (problématique des PE et l'identification des objectifs de réduction des PE dans les réseaux de distribution d'eau) ;
- **Étape 2.** Collecter des données : Dans cette étape, deux objectifs doivent être atteints : i) collecter des données sur la distribution actuelle de l'eau potable et ii) simulation hydraulique du réseau actuel de distribution d'eau ;
- **Étape 3.** Sélectionner les critères, sous-critères et alternatives : Selon la littérature scientifique et les entretiens avec des experts, tous les critères, sous-critères et alternatives ont été identifiés ;

- **Étape 4.** Construire des matrices de décision (comparaison par paires par les experts) ;
- **Étape 5.** Application du modèle ANN : cette étape résoudre le problème de la prédiction des PE dans le réseau de distribution d'eau ;
- **Étape 6.** Classement des alternatives : Dans cette étape, les alternatives sont classées par la méthode Fuzzy-AHP ;
- **Étape 7.** Prise de décision.

2.2. Simulation Hydraulique

D'après la littérature scientifique, il existe plusieurs logiciels de modélisation des réseaux d'AEP, par exemple : PORTEAU (développé par le CEMAGREF de Bordeaux, 2001), PICCOLO (développé par SAFEGE, 1987), WaterCad (développé par la société américaine BENTLEY SYSTEMS) et EPANET (développé par (US Environmental Protection Agency).

Dans le cadre de cette recherche, le logiciel EPANET a été choisi suite à sa disponibilité en Open-source (gratuit) et sa facilité (Rossman, 2000). EPANET est un logiciel de simulation utilisé pour analyser le comportement hydraulique et la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution d'eau potable. Un réseau y est constitué de conduites, de nœuds (jonctions ou extrémités), ainsi que de divers équipements comme les réservoirs, pompes, vannes et clapets. Le programme permet d'estimer le débit circulant dans chaque conduite ainsi que la pression en différents points du réseau.

2.3. Processus de hiérarchie analytique (AHP)

2.3.1. La sélection des critères d'évaluation, sous-critères et des alternatives

Après l'identification de l'objectif de cette recherche, les critères d'évaluation, sous-critères et les alternatives pour résoudre efficacement le problème des PE dans les réseaux de distribution d'eau ont été sélectionnés. Cette étape a commencé par une vaste revue de la littérature pour identifier les éléments les plus pertinents et les plus utilisés dans des situations similaires à cette étude. Cette étape est basée sur le jugement d'experts qui ont une compréhension approfondie dans le domaine de la gestion des pertes d'eau.

Le nombre d'experts est variable pour chaque étude (Guillén-Mena et al., 2023). Dans cette étude, un panel d'experts a été soigneusement conçu pour admettre leurs avis de divers domaines liés à la réduction des PE dans le réseau de distribution d'eau. Trois groupes d'intérêt ont été constitués (chercheurs universitaires, décideurs et gestionnaires de services d'eau) :

- Le premier groupe était composé de chercheurs de différentes universités locales ayant des publications scientifiques sur la gestion du réseau d'eau potable.
- Le deuxième groupe comprenait des responsables de la direction des ressources en eau (DRE) de la wilaya d'Annaba ayant une expérience dans le développement de projets d'approvisionnement en eau potable.
- Le troisième groupe comprenait des gestionnaires de services d'eau potable (ADE) de la wilaya d'Annaba.

Au total, 120 invitations ont été envoyées par courrier électronique et lors de visites au bureau pour les responsables locaux. Plusieurs invitations n'ont pas eu de réponse ou ont été rejetées en raison de contraintes de temps. Au total, 30 experts ont participé à l'enquête, ce qui a donné lieu à un taux de réponse de 25%, et chaque groupe était composé de 10 experts. Selon la littérature scientifique, il existe plus d'une cinquantaine de critères et une vingtaine d'alternatives pour la réduction des PE (Alegre et al., 2006). Sur la base des réponses des experts, la sélection des critères, sous-critères et alternatives a été réalisée.

2.3.2. Construire la structure hiérarchique

La deuxième étape de la méthodologie proposée consiste à construire la structure hiérarchique à plusieurs niveaux (Mahmudah et al., 2024). Le premier niveau de cette structure descendante est consacré à l'objectif de recherche. Les critères et sous-critères qui serviront à évaluer les alternatives se trouvent dans les niveaux intermédiaires. Ensuite, les alternatives sont classées au dernier niveau de la structure. Après cette étape, les deux méthodes peuvent être appliquées.

2.3.3. Procédure de l'application de la méthode AHP

L'AHP est un outil puissant pour résoudre les problèmes complexes et se base généralement sur l'avis des experts pour effectuer des comparaisons par paires de chaque élément avec un autre élément (Ghorbani et al., 2022 ; Kang et al., 2024). L'AHP consiste à décomposer le processus de prise de décision en une hiérarchie de critères et de sous-critères, en attribuant des poids à chaque critère (Canco et al., 2021). L'AHP est un outil largement utilisé pour le processus de prise de décision car il suppose que les problèmes complexes peuvent être structurés hiérarchiquement et analysés de manière simple et complète (Tahmasebi-Birgani & Yazdandoost, 2018). Le jugement des experts s'appuie sur l'échelle numérique de Saaty pour construire les matrices de décision (Saaty, 1980). L'AHP a été appliquée pour calculer les poids relatifs des critères et sous-critères d'évaluation. Les procédures de calcul de la méthode AHP sont les suivantes :

- Construction de la matrice de décision :
- Normalisation de la matrice de décision :
- Calcul des poids relatifs :
- Vérification du ratio de cohérence

Ensuite, le ratio de cohérence (CR) et l'indice de cohérence (CI) seront calculés à l'aide des formules fournies dans les équations (1) et (2).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (2)$$

où :

- λ_{max} : la plus grande valeur propre de la matrice de comparaison,
- n : le nombre de critères comparés dans la matrice A,
- RI : l'indice aléatoire. Les valeurs de RI sont présentées dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1. Indice aléatoire (RI)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49	1.52	1.54

2.4. Processus de hiérarchie analytique floue (FAHP)

La méthode Fuzzy-AHP (appelée aussi F-AHP) est introduite en ajustant la technique AHP dans un environnement flou (Özkan et al., 2020). L'utilisation d'ensembles flous vise à atténuer les incertitudes des jugements d'experts dans la méthode AHP (Liu et al., 2020). Dans la méthode Fuzzy-AHP, l'échelle numérique de Saaty est convertie par l'échelle des nombres flous triangulaires (TFN) (Zhu et al., 1999). Le nombre TFN peut être représenté par (l, m, u) , où $l < m < u$. Les valeurs TFN sont présentées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2. Échelle de l'AHP et du nombre flou triangulaire (TFN)

Linguistic Variables	Saaty Scale	Fuzzy AHP Scale
Equally Important	1	(1, 1, 1)
Intermediate Equally to Moderately Important	2	(1, 2, 3)
Moderately Important	3	(2, 3, 4)
Intermediate Moderately to Strongly Important	4	(3, 4, 5)
Strongly Important	5	(4, 5, 6)
Intermediate Strongly to Very Strongly Important	6	(5, 6, 7)
Very Strongly Important	7	(6, 7, 8)
Intermediate Very Strongly to Extremely Important	8	(7, 8, 9)
Extremely Important	9	(9, 9, 9)

En utilisant l'algorithme de Buckley (méthode de la moyenne géométrique), les procédures de calcul sont les suivantes (Buckley, 1985) :

- Changer l'échelle AHP en échelle TFN dans les matrices de décision pour les critères et sous-critères ;

La signification des poids attribués aux critères de décision est évaluée par des comparaison par paires, comme le montre l'équation 3.

$$\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}] = \begin{matrix} & \mathbf{C}_1 & & \mathbf{C}_2 & & \dots & \mathbf{C}_n \\ \mathbf{C}_1 & (1, 1, 1) & & l_{12}, m_{12}, u_{12} & \dots & l_{1n}, m_{1n}, u_{1n} \\ \mathbf{C}_2 & \frac{1}{u_{21}}, \frac{1}{m_{21}}, \frac{1}{l_{21}} & & (1, 1, 1) & \dots & l_{2n}, m_{2n}, u_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{C}_n & \frac{1}{u_{in}}, \frac{1}{m_{in}}, \frac{1}{l_{in}} & & \frac{1}{u_{in}}, \frac{1}{m_{in}}, \frac{1}{l_{in}} & & (1, 1, 1) \end{matrix} \quad (3)$$

où l_{ij} , m_{ij} et u_{ij} représentent respectivement les valeurs minimales, les plus probables et les plus possibles d'un nombre flou en utilisant TFN (Zadeh, 1965). Par conséquent, les experts sont capables de donner des jugements d'intervalle au lieu de valeurs fixes (Kabir & Sumi, 2014). L'extension floue d'AHP, qui utilise de nombres flous triangulaires (TFN) organisés en matrice de comparaison floue par paires, est adéquate pour traiter les évaluations hiérarchiques des problèmes de décision floue (Calabrese et al., 2013).

La fonction d'appartenance pour un nombre flou triangulaire \tilde{A} représenté sur la figure 2.2 sur l'espace $\mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$ avec une base symbolisée par (l, m, u) peut être spécifiée comme suit :

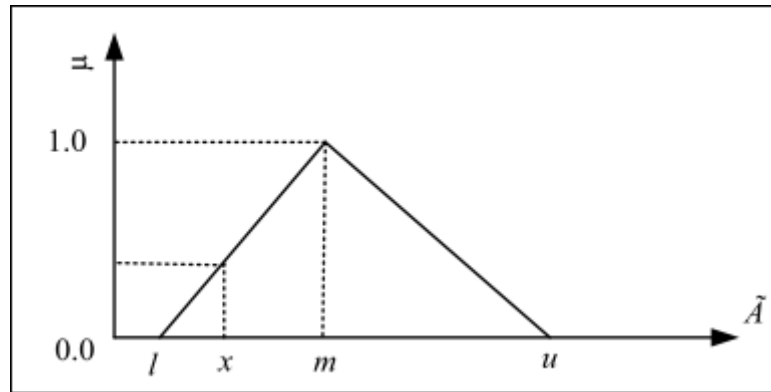


Figure 2.2 Représentation du nombre flou triangulaire (TFN) avec la base notée (l, m, u) .

$$A_{Aj} = \begin{cases} 0, & x \leq l \\ \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x \leq m \\ \frac{x-u}{m-u}, & m \leq x \leq u \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (4)$$

Les paramètres (l, m, u) sont liés respectivement aux valeurs les plus faibles possibles, les plus préférables et les plus élevées possibles. Ils décrivent les cas flous où ($l < m < u$).

Dans le cas où il existe deux nombres flous triangulaires $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ et $\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3)$, les règles opérationnelles associées seront les suivantes :

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} = (a_1, a_2, a_3) \oplus (b_1, b_2, b_3) = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3) \quad (5)$$

$$\tilde{A} \otimes \tilde{B} = (a_1, a_2, a_3) \otimes (b_1, b_2, b_3) = (a_1 b_1, a_2 b_2, a_3 b_3) \quad (6)$$

$$\tilde{A}^{-1} = (1/a_3, 1/a_2, 1/a_1) \quad (7)$$

Le symbole \oplus indique la sommation étendue des deux nombres flous triangulaires, tandis que \otimes indique la multiplication étendue de ces deux nombres.

2.4.1. Calcul de la moyenne géométrique

La méthode proposée par Buckley (1985) est utilisée pour consolider les préférences des experts concernant les critères de décision, comme illustré dans l'équation 8.

$$\tilde{r}_i = \left(\prod_{j=1}^n (\tilde{a}_{ij}) \right)^{1/n} \quad (8)$$

où, \tilde{r}_i représente la moyenne géométrique des valeurs de comparaison floues. Ce processus est effectué pour déterminer les poids flous associés aux critères

2.4.2. Déterminer les poids flous

Les poids flous (\tilde{w}_i) seront calculés à l'aide de la formule fournie dans l'équation (9).

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_{i1} \oplus \tilde{r}_{i2} \oplus \dots \oplus \tilde{r}_{in})^{-1} \quad (9)$$

Pour déterminer le poids flou de chaque critère, le processus comporte trois étapes :

- ❖ Calculer la somme vectorielle de chaque critère \tilde{r}_i

$$\sum_1^n \tilde{r}_i = \tilde{r}_{i1} \oplus \tilde{r}_{i2} \oplus \dots \oplus \tilde{r}_{in} \quad (10)$$

- ❖ Déterminez la puissance (-1) du vecteur de sommation, remplacez le TFN et réorganisez-le par ordre croissant.

$$\left(\sum_i^n \tilde{r}_i \right)^{-1} = (\tilde{r}_{i1} \oplus \tilde{r}_{i2} \oplus \dots \oplus \tilde{r}_{in})^{-1} \quad (11)$$

Multipliez chaque \tilde{r}_i par les valeurs de cet ordre croissant du vecteur inversé pour calculer le poids flou relatif du critère i .

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_{i1} \oplus \tilde{r}_{i2} \oplus \dots \oplus \tilde{r}_{in})^{-1} = l\tilde{w}_i, m\tilde{w}_i, u\tilde{w}_i \quad (12)$$

Ici, \tilde{w}_i signifie les poids flous relatifs des critères de décision, où $l\tilde{w}_i$ représente la valeur minimale possible, $m\tilde{w}_i$ est la valeur la plus probable et $u\tilde{w}_i$ est la valeur maximale possible d'un nombre flou.

2.4.3. Défuzzifier les poids flous relatifs des critères

Déterminer les vecteurs de poids des critères : Les éléments des vecteurs de poids [\tilde{w}_i] sont calculés sur la base de l'équation (13).

$$w_i = \frac{f_i}{n} \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (13)$$

Comme \tilde{w}_i reste représenté comme TFN, la défuzzification de \tilde{w}_i est réalisée en utilisant la méthode du Centre de l'Aire (Equation. 14).

$$M_i = \frac{l\tilde{w}_i \oplus m\tilde{w}_i \oplus u\tilde{w}_i}{3} \quad (14)$$

où M_i représente le poids relatif non flou attribué à chaque critère.

2.4.4. Normaliser le nombre flou

Pour normaliser M_i , la matrice M_i subit une transformation en matrice $F = [f_i]$, où les éléments de la matrice F sont calculés conformément à l'équation (15).

$$f_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (15)$$

où, f_i représente les poids non flous normalisés.

2.5. Réseaux de neurones artificiels

Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA, appelé en anglais *Artificial Neural Networks ANN*) sont des modèles de l'intelligence artificielle (IA) qui présentent un grand potentiel novateur.

Les ANN ont été appliqués dans la prédiction des défaillances (Krenek et al., 2016). Par exemple, il est utilisé pour modéliser le taux de défaillance et estimer le temps de remplacement optimal des conduites d'eau dans un système de distribution d'eau (Jafar et al., 2010). L'ANN est conçu pour classer les canalisations selon leur prédisposition aux défaillances, en fonction de variables d'entrée physiques et opérationnelles (Robles-Velasco et al., 2021).

Dans cette étape, diverses combinaisons d'entrées (poids des critères avec chaque niveau de sous-critères) sont étudiées (figure 2.3) pour obtenir la plus grande précision.

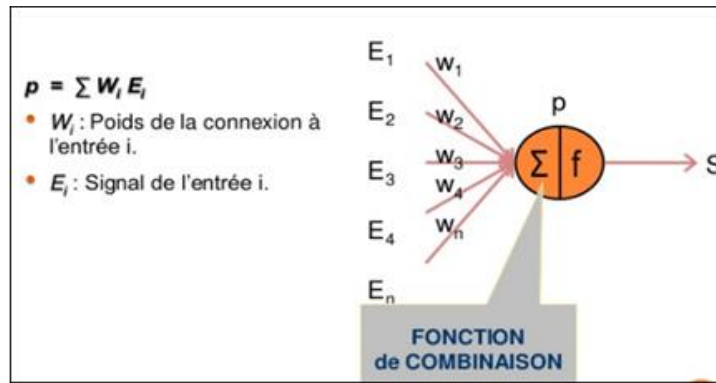


Figure 2.3. Structure standard d'un RNA

- i. L'ensemble de données d'origine (c'est-à-dire l'ensemble du réseau) est divisé en 10 dossiers de taille égale en utilisant la méthode de validation croisée et ils sont alloués comme : 70 % des données (c'est-à-dire sept dossiers) pour l'apprentissage, 20 % des données pour la validation (soit 2 dossiers) et les 10% restants pour le test. Le modèle est initialement ajusté sur un ensemble de données d'apprentissage qui est un ensemble d'exemples utilisés pour ajuster les paramètres (c'est-à-dire les poids des connexions entre les neurones) du réseau (James et al., 2013). L'ensemble de données de validation fournit une évaluation impartiale de l'ajustement d'un modèle sur l'ensemble de données d'apprentissage tout en ajustant les hyper-paramètres du modèle (c'est-à-dire le nombre d'unités cachées dans le réseau de neurones) (James et al., 2013). Il est également utilisé pour la régularisation par arrêt anticipé : arrêtez l'entraînement lorsque l'erreur sur le jeu de données de validation augmente, car c'est un signe de sur-apprentissage du jeu de données d'entraînement (Asnaashari et al., 2013). L'échantillon de test fournit une évaluation impartiale de l'ajustement final du modèle.
- ii. La sortie réelle du modèle doit être identifiée.

2.5.1. Construction des modèles ANN

Les recherches sur les réseaux de neurones artificiels (RNA) ont commencé dans les années 1940. L'avancée des connaissances en neurosciences et l'accès à des outils de simulation ont permis aux scientifiques d'explorer le fonctionnement de groupes de neurones formels interconnectés. Ces premiers réseaux étaient capables d'effectuer des opérations logiques de base. Jusqu'aux années 1980, le développement des RNA fut freiné par les limites du perceptron. En 1982, Hopfield relança l'intérêt pour ce domaine en établissant un lien entre les réseaux de neurones et certains systèmes physiques. Aujourd'hui, les RNA connaissent un essor important et sont utilisés dans de nombreux domaines d'application.

2.5.2. Réseaux de neurones artificiels

L'approche RNA constitue une approche alternative inspirée du processus des systèmes nerveux biologiques (Kakoudakis et al., 2017). L'ANN peut reconnaître des modèles et apprendre de leurs interactions avec l'environnement. Le réseau à réaction multicouche est largement utilisé.

- Les ANN sont adaptatives et peuvent gérer des systèmes complexes.
- L'architecture d'ANN comprend un certain nombre de nœuds (neurones) ou d'unités organisés en couches d'entrée et de sortie ainsi qu'un certain nombre de couches cachées (figure 2.4).
- Les ANN sont flexibles et « apprennent » grâce à un processus itératif d'ajustement de leurs poids (Alvisi et Franchini, 2010).
- L'apprentissage le plus courant est l'apprentissage supervisé, qui fournit une valeur de réponse pour chaque ensemble de valeurs d'entrée et nécessite une valeur cible (d'entrée) connue que la réponse essaie de « deviner ».
- La différence entre la réponse et la cible réelle donne la valeur d'erreur.
- Les poids du réseau sont ajustés de manière itérative en fonction de la valeur d'erreur afin de minimiser l'erreur (Wilson et al., 2017 ; Motiee et Ghasemnejad, 2019).

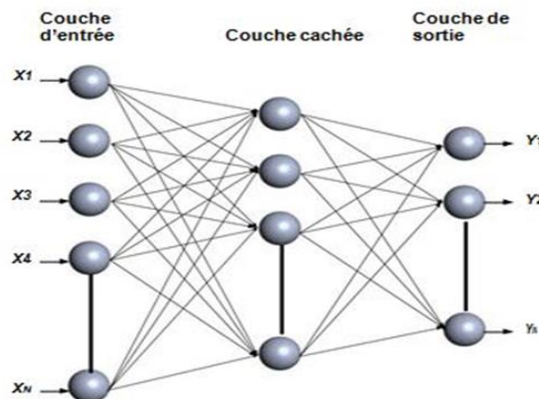


Figure 2.4. Réseau de neurones artificiels (Dawood et al., 2018)

2.5.3. Sélection des indicateurs d'entrée

La base de données sur le réseau considéré dans cette étude a été construite en collectant les données disponibles sur l'historique de défaillance, les caractéristiques des tuyaux, la pression hydraulique, le type de trafic. Les indicateurs (critères) ont été classés en trois catégories : physiques (matériaux, longueur, diamètre et âge), environnemental (type de trafic) et

opérationnels (pression et ancienne défaillance). Les statistiques descriptives de cette base de données sont présentées dans le chapitre suivant.

Une étude préliminaire basée sur la méthode AHP a permis d'analyser l'influence des indicateurs d'entrée sur la défaillance du réseau d'eau. Cette analyse a montré que le nombre de défaillances précédentes et la pression ont une influence majeure sur l'apparition de nouvelles défaillances : une canalisation qui a subi une défaillance présente un risque élevé de défaillance future. L'influence de la longueur, du diamètre et de l'âge du réseau est également significative, tandis que le type de matériau et le type de trafic ont un faible impact sur la défaillance.

Un réseau de neurones est un modèle mathématique de traitement distribué, constitué d'unités de calcul non linéaires (neurones) interconnectées, fonctionnant en parallèle et reliées par des coefficients appelés poids.

Les réseaux de neurones artificiels sont constitués de processeurs simples, fortement interconnectés, opérant en parallèle, où chaque unité produit une sortie unique à partir des données qu'elle reçoit.

2.5.4. Construction de la base de données

La base de données a été construite à l'aide des données collectées au sein de l'ADE locale :

- Nous avons utilisé le Système d'Information Géographique (*ArcGis*) pour collecter les caractéristiques des conduites d'eau : Longueur, Diamètre, Types de Matériaux et l'âge de la conduite (date de pose ou date de mise en service de la conduite)
- Nous avons utilisé le modèle hydraulique Epanet pour calculer la pression dans le réseau de notre zone d'étude.
- Le Type de Trafic est caractérisé par : Trafic Elevé et Non-élevé selon l'emplacement de la conduite (rue principale, etc.),
- Le nombre des anciennes défaillances est collecté dans la base de données d'entretien de réseau (registre + fiches de réparation,etc.)

Pour l'étalonnage du modèle, l'ensemble de données a été traité à l'aide de deux analyses. Dans le premier, l'ensemble de données a été divisé en trois sous-ensembles : le premier sous-ensemble (70% de la base de données) a été utilisé pour former les réseaux (phase d'apprentissage), la seconde partie (20% de la base de données) a été utilisée pour tester le Modèles ANN afin de déterminer quand arrêter la phase de formation (phase de test), et la dernière partie a été utilisée pour valider le modèle sur des données non impliquées dans le processus de formation (phase de validation).

2.5.5. Conception des modèles ANN

Les réseaux de neurones permettent de modéliser des fonctions non linéaires dépendant de plusieurs paramètres. Leur mise en œuvre implique (figure 2.5) :

- La sélection des variables d'entrée et de sortie les plus significatives, c'est-à-dire celles qui influencent directement le phénomène étudié.
- La réunification des données indispensables à l'apprentissage et à la validation des performances du réseau de neurones.
- La définition du nombre optimal de neurones cachés pour une modélisation efficace.
- La phase d'apprentissage du réseau.
- L'analyse des performances du réseau après l'apprentissage.

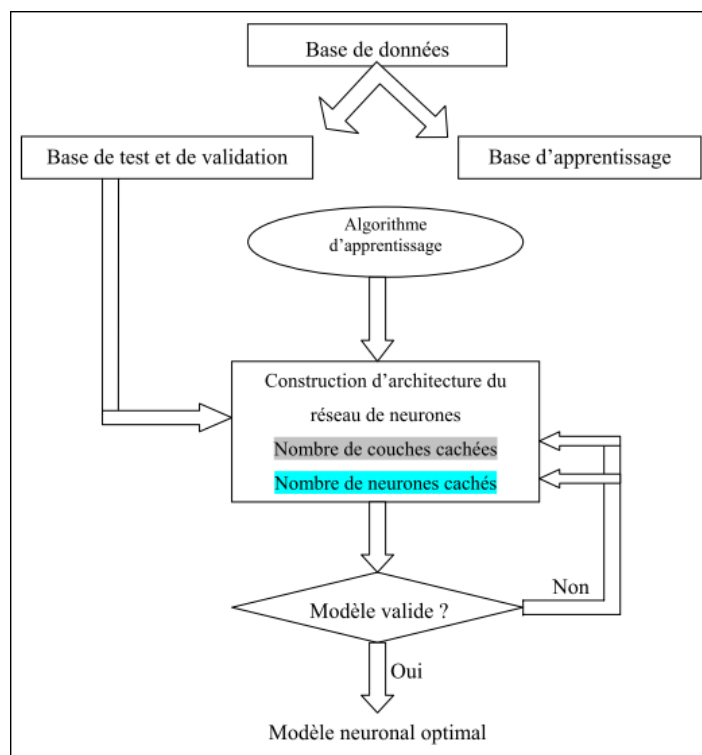


Figure 2.5. Organigramme de conception d'un réseau de neurones

- *Détermination des entrées/sorties du réseau de neurones*

Pour toute conception de modèle, la sélection des entrées doit prendre en compte deux points essentiels :

- Premièrement, la dimension intrinsèque du vecteur des entrées doit être aussi petite que possible, en d'autres termes, la représentation des entrées doit être la plus compacte possible, tout en conservant pour l'essentiel la même quantité d'information, et en gardant à l'esprit que les différentes entrées doivent être indépendantes.

- Deuxièmement, les variables d'entrée doivent être sélectionnées pour leur pertinence explicative vis-à-vis du phénomène modélisé, en garantissant un impact mesurable sur la variable de sortie.
 - *Choix et préparation des échantillons*

La conception d'un réseau de neurones repose initialement sur la sélection et la préparation rigoureuse des jeux de données. La structure de ces derniers détermine l'architecture du modèle (nombre d'entrées, de sorties), les méthodes d'apprentissage et les phases de test et validation. Une étape critique consiste à identifier les variables explicatives significativement corrélées au phénomène cible, assurant ainsi leur contribution effective aux prédictions du système.

Lorsqu'un phénomène cible dépend de nombreuses variables d'entrée, une exploration exhaustive de l'espace paramétrique par maillage systématique est impraticable. Une méthodologie sélective s'impose alors, restreignant les expérimentations aux données influençant significativement l'apprentissage. La planification expérimentale optimise cette sélection, assurant une représentativité adéquate. Pour les modèles linéaires, ces techniques sont bien établies, tandis que leur application aux systèmes non linéaires reste complexe, en raison des interactions paramétriques et de la sensibilité aux conditions initiales

Le développement d'une application fondée sur des réseaux de neurones requiert deux jeux de données distincts : l'un dédié à l'entraînement du modèle, l'autre à son évaluation et à la quantification de ses performances.

Il est important de souligner qu'aucun critère universel ne définit quantitativement cette répartition. Toutefois, chaque jeu de données doit assurer une représentativité proportionnelle des classes et reproduire fidèlement leur distribution observée en pratique, c'est-à-dire respecter les fréquences réelles d'occurrence des catégories dans le contexte étudié.

- *Elaboration de la structure du réseau*

L'architecture d'un réseau de neurones est déterminée par les spécificités des données traitées. Une sélection préalable du modèle s'impose, tel qu'un perceptron standard, un réseau de Hopfield, un TDNN, un réseau de Kohonen ou un ARTMAP, selon les besoins applicatifs.

Pour un MLP, par exemple, la configuration requiert de définir simultanément le nombre de couches cachées et celui des neurones par couche.

- *Nombre de couches cachées :*

Mis à part les couches d'entrée et de sortie, il faut décider du nombre de couches intermédiaires ou cachées. Sans couche cachée, le réseau n'offre que de faibles possibilités d'adaptation.

Toutefois, des travaux théoriques ont établi qu'un perceptron multicouche à une seule couche cachée, dotée d'un nombre adéquat de neurones, peut approximer toute fonction continue avec une précision arbitraire.

- *Nombre de neurones cachés :*

Chaque neurone peut prendre en compte des profils spécifiques de neurones d'entrée.

L'augmentation du nombre de neurones favorise un surajustement aux données d'entraînement, mais réduit la robustesse prédictive. Identifier le nombre optimal de neurones cachés permet un compromis entre précision et généralisation, garantissant une modélisation fiable.

À ce jour, aucun cadre théorique ne permet de prédire précisément le nombre de neurones cachés requis pour atteindre une performance spécifique, compte tenu des architectures existantes. Une approche empirique, basée sur l'optimisation itérative de la structure du réseau, s'avère donc indispensable pour concilier complexité et capacité de généralisation.

- *Apprentissage*

L'apprentissage constitue un problème d'optimisation visant à déterminer les poids synaptiques optimaux via un échantillon. La rétropropagation, méthode privilégiée, exploite un algorithme de gradient, moins gourmande en ressources computationnelles que d'autres approches pour calculer les dérivées nécessaires à l'ajustement des paramètres.

L'amélioration des algorithmes d'optimisation passe par l'emploi de méthodes d'ordre deux, efficaces en convergence mais coûteuses en calculs. Leurs limitations, liées aux exigences de dérivées secondes continues et de matrices hessiennes définies positives, sont contournées par des approches corrigées, telles que les méthodes de Quasi-Newton ou de Newton modifiée, qui préservent l'efficacité tout en atténuant les contraintes numériques initiales.

Les études comparatives révèlent que les poids issus de la rétropropagation présentent une amplitude inférieure à ceux obtenus par Quasi-Newton, suggérant une convergence locale autour des valeurs initiales, accentuant ainsi la sensibilité de cette méthode à l'initialisation (Thibault, 1991). Cette limitation explique l'adoption croissante des méthodes de type Quasi-Newton dans la modélisation récente, notamment pour leur capacité à explorer un espace paramétrique étendu, réduisant les risques de stagnation dans des minima locaux. Ces avantages motivent leur utilisation privilégiée dans nos travaux ultérieurs.

○ *Validation et Tests*

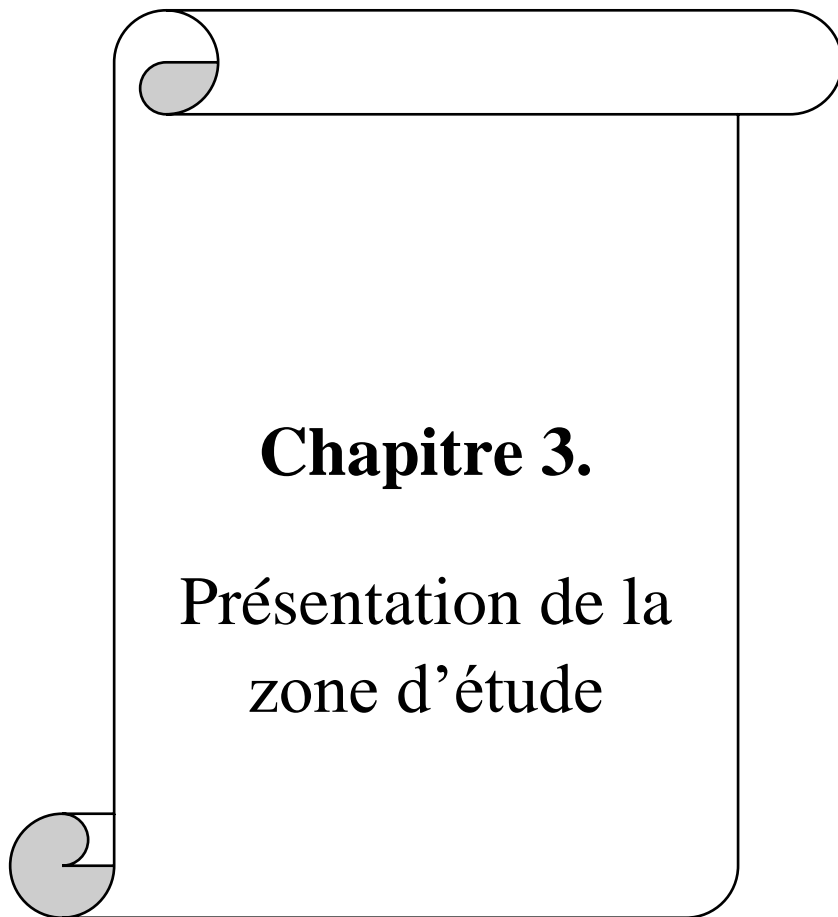
Les tests évaluent la robustesse hors échantillon et la capacité de généralisation du modèle, tandis que la validation intervient durant l'entraînement pour ajuster les hyperparamètres. Après développement, une phase de test indépendante est requise pour confirmer la fiabilité prédictive du réseau neuronal face à de nouvelles données.

Cette phase finale vise à évaluer la fiabilité du réseau en testant sa performance sur des données indépendantes de l'entraînement. Une validation rigoureuse se manifeste par un taux élevé de prédictions précises sur l'ensemble de validation, attestant ainsi sa capacité à généraliser les motifs appris.

Si les performances prédictives du modèle sont insuffisantes, une révision de son architecture ou une adaptation du jeu de données d'entraînement s'avère nécessaire.

En résumé et d'après la littérature scientifique, nous avons remarqués que les relations suivantes ont pu être mises en évidence :

- Une augmentation de pression est un bon indicateur de la fonction de risque lorsque la canalisation n'a pas eu de casse antérieure,
- Un âge assez faible à la deuxième défaillance indique une forte probabilité de futures casses,
- La période au cours de laquelle a été posée la canalisation est importante dans la détermination de la probabilité de défaillance.
- Chaque défaillance qui a déjà eu lieu triple la probabilité d'apparition d'une nouvelle casse.
- Un tronçon plus long a tendance à avoir proportionnellement moins de défaillances qu'un tronçon plus court, un tronçon étant homogène par le diamètre et séparé d'un autre tronçon par des particularités hydrauliques (pompes, vannes, croisements avec d'autres canalisations, ...).
- Le risque de première casse diminue avec l'âge de la canalisation jusqu'à un âge d'environ 30 ans, puis augmente brutalement.



Chapitre 3.

Présentation de la
zone d'étude

Chapitre 3.

Présentation de la zone d'étude

3.1. Zone d'étude

Cette étude a été réalisée pour le cas de la ville d'Annaba (chef-lieu de la wilaya d'Annaba). La wilaya d'Annaba occupe une superficie de 1412 Km², est limitée au Nord par la mer méditerranée, l'Ouest par la wilaya de Skikda, au Sud par la wilaya de Guelma, et l'Est par la wilaya d'El Taref. La wilaya d'Annaba est répartie en 12 communes importantes (tableau 3.1) et la (figure 3.1).

Tableau 3.1. Présentation des 12 communes de la wilaya d'Annaba

Code ONS	Commune	Superficie (km ²)	Code ONS	Commune	Superficie (km ²)
23 01	Annaba	49	23 07	Cheurfa	98
23 02	Berrahal	180	23 08	Seraïdi	138
23 03	El Hadjar	63	23 09	Aïn Berda	138
23 04	Eulma	161	23 10	Chetaïbi	134
23 05	El Bouni	93	23 11	Sidi Amar	42
23 06	Oued El Aneb	190	23 12	Treat	126

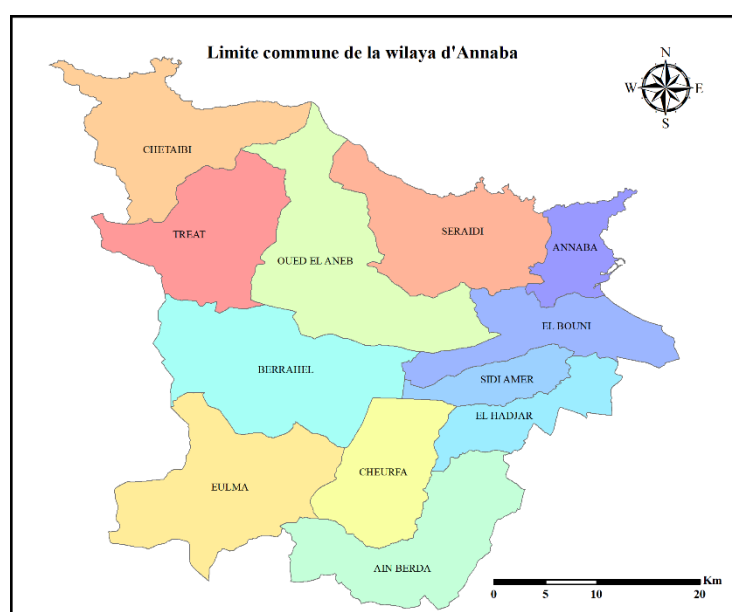


Figure 3.1. Les communes de la wilaya d'Annaba

à l'urbanisation rapide (Remini, 2010). Cette période a été marquée par une politique d'investissement dans le secteur de l'eau avec :

- ✓ La modernisation du réseau dans les années 1970-1980, remplaçant les anciennes canalisations en fonte par du PVC.
- ✓ La construction de barrages, tels que Cheffia, pour sécuriser l'approvisionnement en eau potable.
- ✓ L'introduction d'une gestion centralisée sous l'égide de la Société Nationale des Eaux.

❖ **Période de gestion déléguée et réforme du secteur (2000 - 2011)**

Dans les années 2000, l'Algérie a adopté une approche de gestion déléguée pour moderniser le service de l'eau et améliorer la qualité de distribution. En 2001, la création de l'Algérienne des eaux et de l'Office National d'Assainissement. Ensuite, En 2007, un contrat a été signé avec Gelsen-Wasser, une société allemande pour la création de la Société d'Eau et d'Assainissement d'Annaba et d'El Tarf (SEATA), pour gérer les services d'eau et d'assainissement à Annaba et El Tarf (Oussedik, 2015). L'objectif était d'introduire des standards internationaux, d'améliorer le rendement du réseau et de limiter les pertes d'eau. Cependant, cette initiative a été confrontée à plusieurs défis :

- ✓ Résistance institutionnelle et difficultés d'adaptation des cadres locaux.
- ✓ Problèmes d'infrastructures vétustes nécessitant des investissements lourds.
- ✓ Résiliation du contrat en 2011 en raison de résultats jugés insatisfaisants.

❖ **Période actuelle : défis et nouvelles stratégies (2011 - Présent)**

Depuis 2011, la gestion du service de l'eau à Annaba est redevenue publique sous la supervision de l'Algérienne des Eaux (ADE). Toutefois, plusieurs défis majeurs persistent :

- ✓ Pénuries d'eau récurrentes dues à une baisse des précipitations et aux effets du changement climatique (Zeroual, 2022).
- ✓ Vieillesse des infrastructures : un taux de perte en eau élevé (jusqu'à 50%), aggravé par les fuites non réparées.
- ✓ Investissements dans le dessalement : lancement du projet de transfert d'eau dessalée depuis la station de Koudiet Eddraouch.
- ✓ Nouvelles approches de gestion : adoption de systèmes intelligents de détection des fuites et de modélisation hydraulique pour optimiser la distribution.

Malgré les différents changements qui ont été effectués au niveau de secteur de l'eau on constate que les gestionnaires de ce service trouvent toujours des difficultés pour assurer l'alimentation en eau potable pour les abonnés et tous sa à cause de :

- De nombreuses restructurations n'ont pas réussi à stabiliser une organisation capable d'établir un système financier, technique et de gestion efficace financière, technique et de gestion politique.
- Un manque de concentration sur la composante gestion par rapport à la composante investissement dans le domaine de l'eau.
- Une absence totale de rénovation et de réhabilitation des installations de distribution d'eau potable.

3.3. Collecte des données

Les données collectées en 2024 dans le cadre de l'analyse de l'approvisionnement en eau potable mettent en évidence des différences entre les quantités produites, distribuées et facturées (Tableau 3.2). Le volume produit (VP), représentant la quantité totale d'eau extraite et traitée, s'élève à 70000 m³/jour. Le volume distribué (VD), correspondant à l'eau délivrée aux usagers via le réseau de distribution, atteint 54800 m³/jour (ADE, 2024). Enfin, le volume facturé (VF), reflétant la consommation mesurée et facturée aux usagers, est de 28390 m³/jour (ADE, 2024). L'écart global peut être attribué principalement aux fuites et aux fraudes ou erreurs de mesure. La plupart des quartiers d'Annaba sont alimentés par une distribution intermittente avec une fréquence de 3 à 6 heures tous les trois jours (ADE, 2024). Les taux de PE dans le réseau de distribution de la ville d'Annaba sont d'environ 40% (ADE, 2024).

Tableau 3.2. Les volumes

Année	2020	2021	2022	2023	2024
VP (* 10 ³)	26 567 011	26 030 878	25 467 176	26 060 085	25 560 630
VD (* 10 ³)	20 301 300	19 118 700	19 907 100	19 315 800	20 005 650
VF (* 10 ³)	10 947 000	10 926 000	9 702 000	9 996 000	10 362 000
Taux perte (%)	41,21	41,97	38,10	38,36	40,54

3.3.1. Distribution de l'eau dans la ville d'Annaba

La distribution de l'eau s'organise en 2 étages où sont situés les réservoirs de stockage : étage bas où les réservoirs (photos 3.1 – 3.3) le desservant se situent aux cotes 50 -70 m et étage haut aux cotes 100 – 120 m. 67% du volume des réserves contribuent à l'alimentation gravitaire de l'étage bas (ADE, 2024). L'alimentation de la ville d'Annaba s'organise en deux branches :

- ❖ La 1^{ère} branche côté mer couvrant l'ancien tissu urbain, amène l'eau jusqu'à la station centrale dont la fonction principale est de refouler l'eau dans les réservoirs en altitude : Santons (1^{er} étage cote 60 m) puis Casbah (2^{ème} étage cote 100 m environ) jusqu'à Toche,
- ❖ La deuxième branche côté versant, plus récente, amène l'eau jusqu'aux réservoirs de la Plaine Ouest (1^{er} étage cote 55 m) et Zaafrania, Oued Forcha (2^{ème} étage 100 -120 m)

Une classification des volumes d'eau des réservoirs en fonction des cotes d'eau est présentée dans le tableau 3.3 (source, ADE, 2024).

Tableau 3.3. Classification des réservoirs d'eau (ville d'Annaba)

Site	Vol [m ³]	Cote Z [m]
Bâche Zaafrania	500	28,4
Belaïd Belgacem	100	14,6
Casbah 1	1 250	96,3
Casbah 2	1 250	96,3
Casbah 3	1 000	96,5
Chaiba ADL	5 000	72,0
Elysa 1	100	6,3
Hippone	9 000	22,5
Maison Coop	100	33,7
Plaine Ouest 4	5 000	53,2
Plaine Ouest 3	5 000	53,2
Plaine Ouest 2	5 000	52,8
Plaine Ouest 1	5 000	52,8
Réservoir Elysa 2	100	59,6
Réservoir Forcha 2	2 000	95,7
Réservoir Sidi Achour 1	2 000	138,1
Réservoir Sidi Achour 2	2 000	138,1
Réservoirs Toche 1	1 000	76,1
Réservoirs Toche 2	2 000	79,1
Rizi Amor	100	5,0
Santons 5	5 000	54,2
Santons 6	5 000	54,2
Santons 1	2 100	54,8
Santons 2	2 100	54,8
Santons 3	2 250	53,1
Santons 4	2 250	53,1
Sidi Harb ancien	60	34,8
Station Centrale 1	1 250	5,0
Station Centrale 2	1 250	2,4
Station Oued Forcha 1	500	15,7
Station Sidi Achour	200	7,8
Tours Belvédères	100	88,1
Zaafrania 1 Réservoir 1	5 000	77,2
Zaafrania 1 Réservoir 2	5 000	77,2
Zaafrania 2 Réservoir 1	1 000	123,4
Zaafrania 2 Réservoir 2	1 000	123,4



Photo 3.1. Réservoir Casbah



Photo 3.2. Réservoir Oued Forcha



Photo 3.3. Réservoir Zaafrania

Les autres photos des réservoirs sont présentées dans l'annexe A1.

3.3.2. Sectorisation du réseau de distribution d'eau

Le réseau de distribution de la ville d'Annaba est divisé en 7 secteurs (ADE, 2024) :

- Le secteur Central est alimenté directement par les réservoirs Santons, Casbah, Maison Coop et Tours Belvédères et indirectement par la Station Centrale.

- Le secteur Littoral est alimenté directement par les réservoirs Toche et par les réservoirs et station Sidi Aïssa. Indirectement ce secteur est alimenté par tous les réservoirs / stations de l'axe côté mer.
- Le secteur Nord est alimenté directement par les réservoirs de Rizi Amor, Maison COOP, Zaafrania (Bâche, I et II) et réservoir Elysa. Le réservoir Zaafrania Haut alimentera également ce secteur.
- Le secteur Ouest est alimenté par Plaine Ouest, Oued Forcha, Elysa, Sidi Harb et Belaïd Belgacem.
- Le Secteur 8 Mai est alimenté par les réservoirs Plaine Ouest et par la Station Centrale.
- Le secteur Sud-Ouest est alimenté par la station et les réservoirs de Sidi Achour et par les réservoirs Plaine Ouest.
- Le secteur Est Seybouse est alimenté par un piquage sur la conduite DN 1 250.

3.3.3. Réseau d'eau potable de la ville d'Annaba

Les réseaux d'eau potable d'Annaba comprennent 238 km (ADE, 2024). Les matériaux constitutifs des canalisations sont présentés dans la Figure 3.3. Ensuite, les diamètres de ces canalisations sont présentés en détail dans la figure 3.4. Le réseau de distribution de la ville d'Annaba est composé de conduites avec des diamètres entre 40 et 600 mm. Tous les résultats ont été présentés dans Le Tableau 3.4

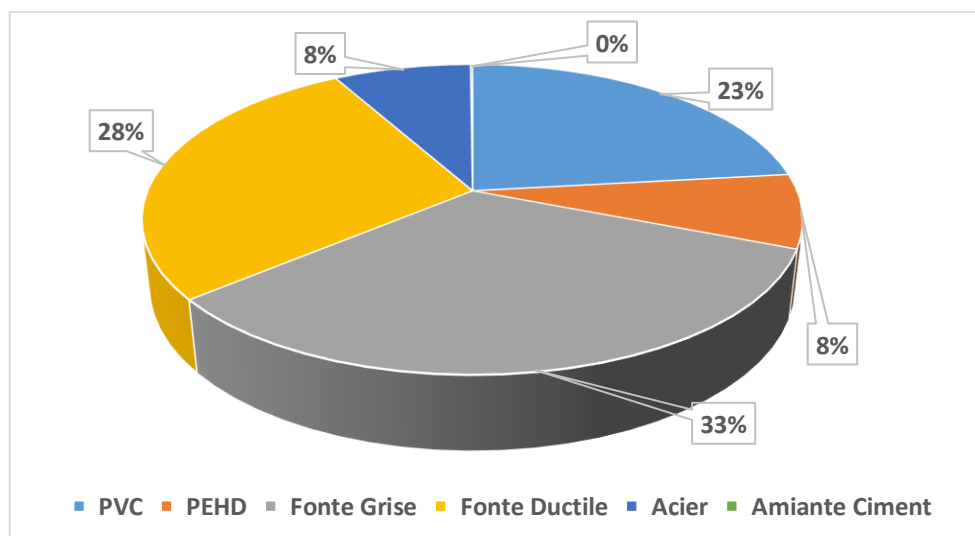


Figure 3.3. Répartition de type de matériau des conduites

À travers la figure 3,3, nous remarquons que l'opération de distribution de l'eau potable dépendait en grande partie des anciennes conduites, ce qui est dû à leur non-renouvellement en

raison de la résiliation du contrat avec l'entreprise Société des Eaux et de l'Assainissement d'Annaba et El-Tarf, (SEATA), en plus du gel de toutes les opérations de la Direction des ressources en eau de 2016 à 2022. En ce qui concerne les conduites PEHD situés dans la zone d'étude, ils ont été mis en place par des opérations réalisées par la commune d'Annaba.

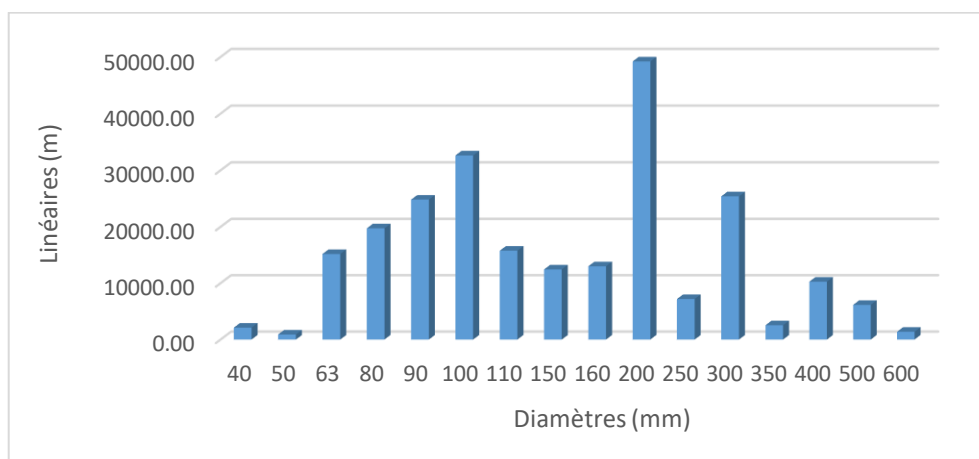


Figure 3.4. Répartition par diamètres des conduites

Tableau 3.4. Différents matériaux du réseau d'eau de la ville d'Annaba (source : ADE, 2024)

DN	Matériaux						Total
	PVC	PEHD	Fonte Grise	Fonte Ductile	Acier	Amiantement	
40	729,06	1271,89			116,20		2117,15
50			26,69	229,53	640,21		896,44
63	6598,18	4229,36	952,43	0,00	3400,11		15180,08
80			17696,02		2041,10		19737,13
90	16906,21	7928,79					24835,00
100			27294,50	1665,40	3663,71		32623,61
110	13499,97	2270,17					15770,14
150			8872,13	2036,15	1539,22		12447,50
160	11642,69	1362,14					13004,82
200	5006,13	1201,01	6551,68	33113,01	3040,53	289,04	49201,40
250	1083,21	7,90	3741,69	2215,89	143,49		7192,17
300		66,89	7679,79	16432,22	1234,11		25413,02
350		20,74	857,39	1270,06	391,63		2539,82
400			4782,81	5272,19	218,38		10273,38
500			352,10	4457,82	1344,94		6154,86
600				20,52	1355,71		1376,22
Total	55465,44	18358,90	78807,23	66712,78	19129,36	289,04	238762,76

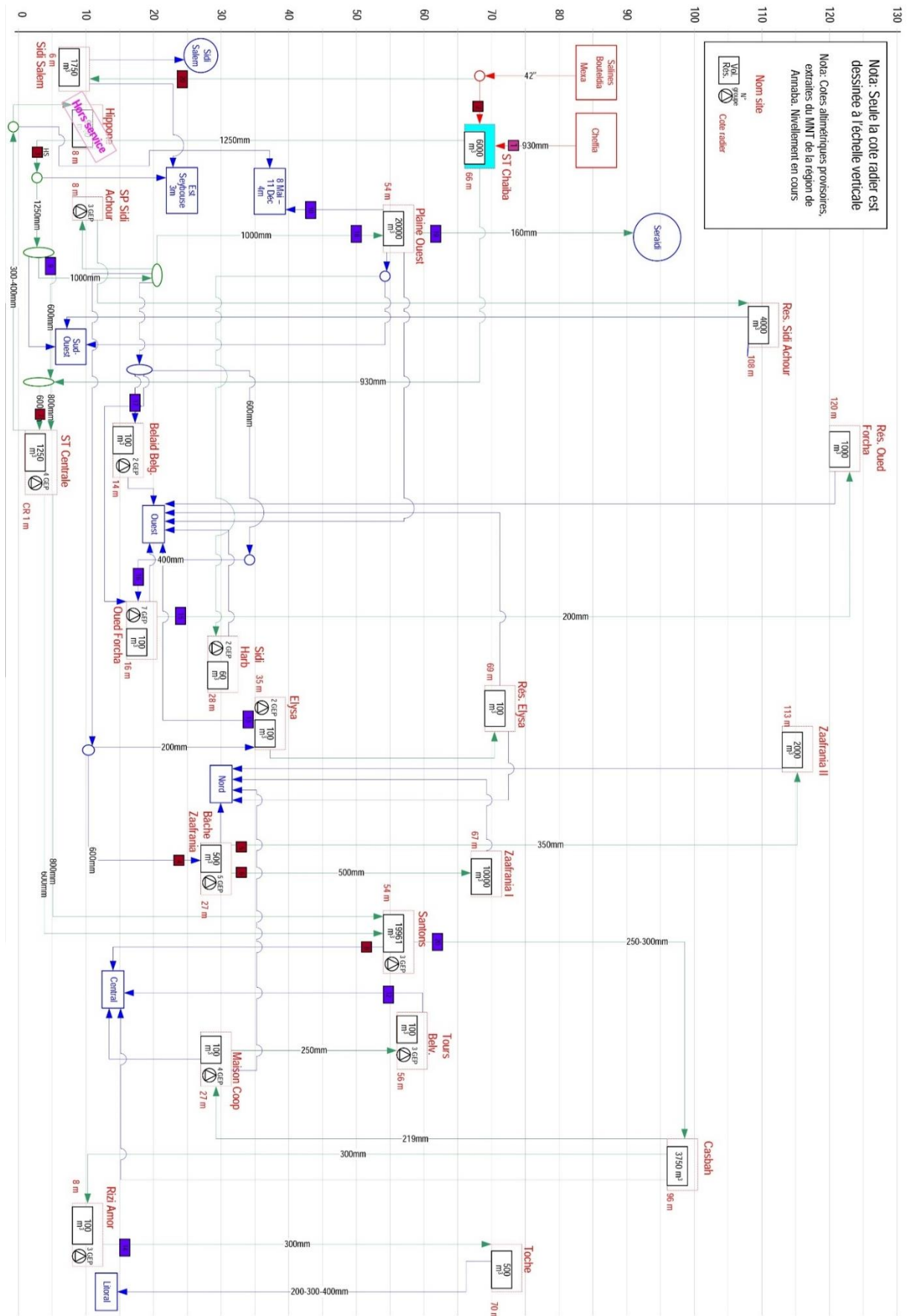


Figure 3.5. Schéma Synoptique de la distribution de l'eau, ville d'Annaba

3.3.4. Vannes du réseau d'Annaba

Les vannes du réseau d'Annaba ont été identifiées :

- ✓ En partie sur la base de l'étude de reconnaissance SONADE 1975 qui avait établi les carnets de description et de localisation sur environ 500 nœuds pour le centre-ville
- ✓ D'après les recensements de l'exploitant (ADE).

Les vannes situées hors des sites des gros ouvrages sont enterrées, même celles équipant des grosses canalisations. Dans la campagne de diagnostic pour Annaba, 1252 vannes ont été inventoriées pour l'ensemble des zones dont les réseaux ont été identifiées (Tableau 3.5).

Tableau 3.5. Etat des vannes sur le réseau de distribution de la ville d'Annaba (source, ADE, 2024)

Diamètre	Etat		
	Bon	Indéterminée	Total
40	1	21	22
60	10	92	102
80	10	314	324
100	17	292	309
150	2	68	70
160	5	42	47
200	7	209	216
250		28	28
300	2	66	68
350		8	8
400		25	25
450		1	1
500		20	20
600		12	12
Total Inventorié	54	1198	1252

3.3.5. Branchements et compteurs de distribution de Annaba

Le réseau d'Annaba dont la gestion commerciale est couverte par les secteurs 1 et 2 dessert plus de 62 000 abonnés (ADE, 2024).

Depuis 1990 les services d'ADE posent en moyenne 300 branchements par an (300 à 500 sur l'ensemble des agglomérations desservies). Sur l'ancien tissu urbain d'Annaba il aurait été recensé 14'000 branchements en plomb en 1996, les autres branchements sont en cuivre et en PVC (20%) (ADE, 2024). Sur les quartiers périphériques plus récents les branchements sont en acier galvanisé et en PVC (50%) (ADE, 2024). Plus de 92% de ces branchements relient les abonnés ménages au réseau AEP.

Le comptage est toutefois déficient car selon les sources ADE (fichiers commerciaux) 64% des branchements auraient des compteurs en état de marche (Figure 3.6), le reste des branchements, n'étant pas équipés de compteurs ou ces derniers étant défectueux, exigeraient une facturation forfaitaire établie sur des quotas de consommation (ADE, 2024). Les branchements sans compteur alimentent à 99% les abonnés ménages. Néanmoins, on constate pour les autres catégories de consommateurs que près de 50% des branchements ne sont pas équipés de dispositifs de comptage.

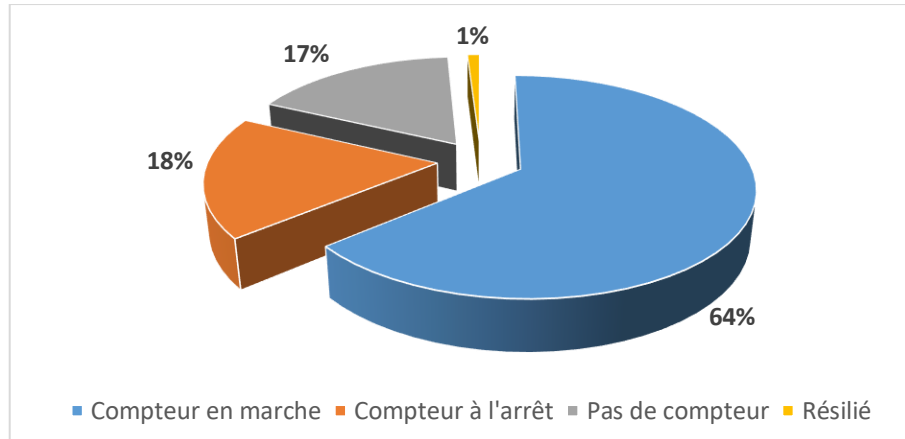


Figure 3.6. Etat des compteurs – ville de Annaba

3.3.6. Interventions sur les réseaux

Il a été relevé sur les registres de l'ADE, 2095 interventions ont été effectuées sur les réseaux des secteurs 1 et 2 d'Annaba pour l'année 2024 (ADE, 2024) (voir photos 3.4 – 3.7). 36 % de ces interventions sont pour des réparations de fuites de conduites (Figure , 50 % pour des réparations de fuites sur des branchements et les autres interventions sont sur les vannes.

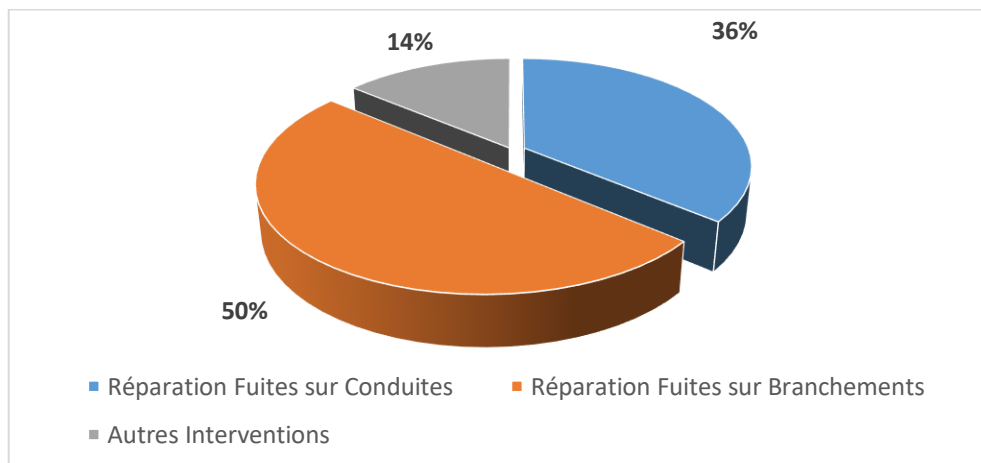


Figure 3.7. Interventions sur réseau – ville de Annaba, année 2022

L'analyse des interventions sur conduites montre un grand nombre de fuites sur conduites PVC (600 interventions) ainsi que pour l'acier (243 interventions), confirmant l'état précaire des canalisations de ces natures de matériau (Figure 3.8) (ADE, 2024).

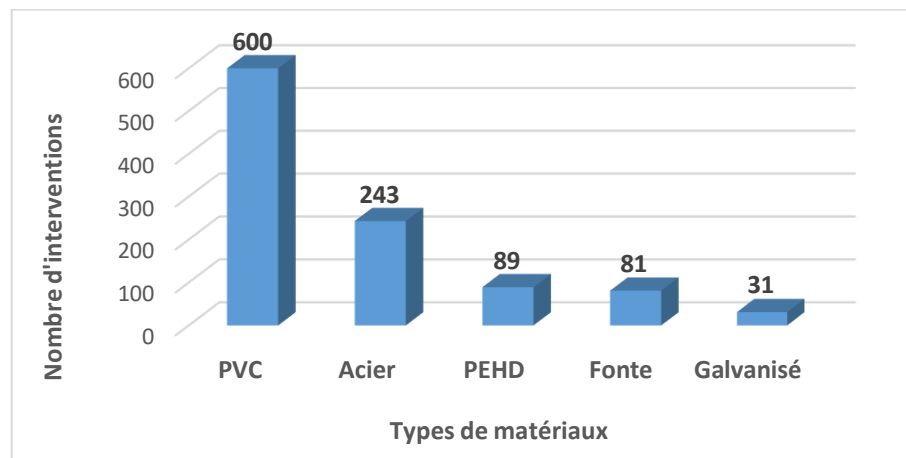


Figure 3.8. Fuites sur conduites selon la nature du matériau – ville d'Annaba

Les équipes d'entretien de l'ADE Annaba ont généralement effectués des interventions pour réparer des fuites sur les conduites (figure 3.9) et les branchements individuels des abonnés domestiques (figure 3.10) pour réduire les taux élevés des pertes d'eau dans les systèmes de distribution d'eau potable. La figure 3.11 illustre le nombre de réparation des fuites durant les années 2020 à 2024 pour le cas de la ville d'Annaba.

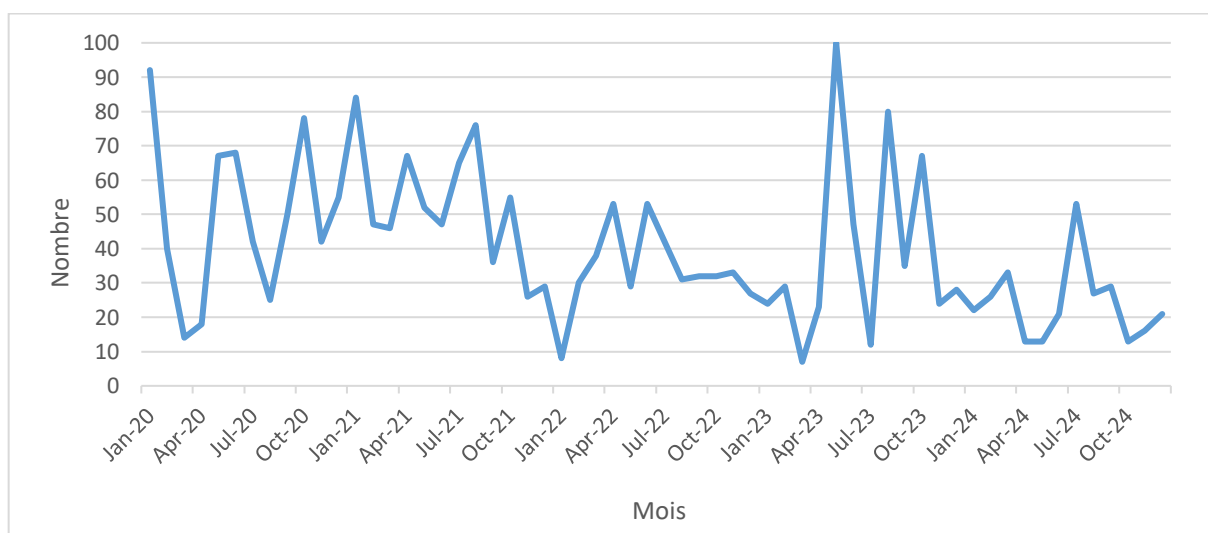


Figure 3.9. Fuites réparées sur conduites (années 2020 - 2024) – ville d'Annaba

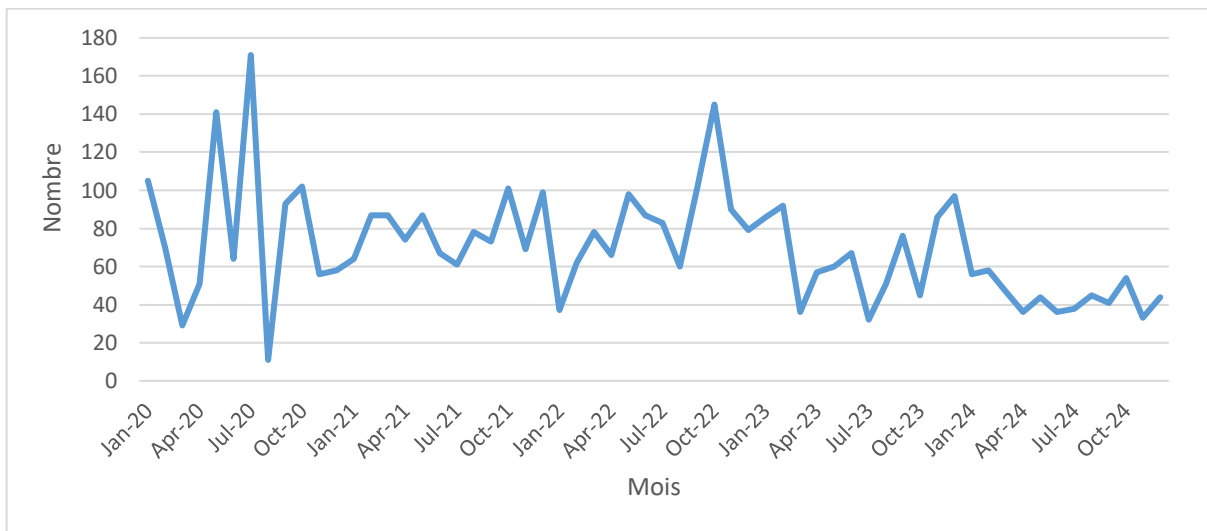


Figure 3.10. Fuites réparées sur branchements (années 2020 - 2024) – ville d'Annaba

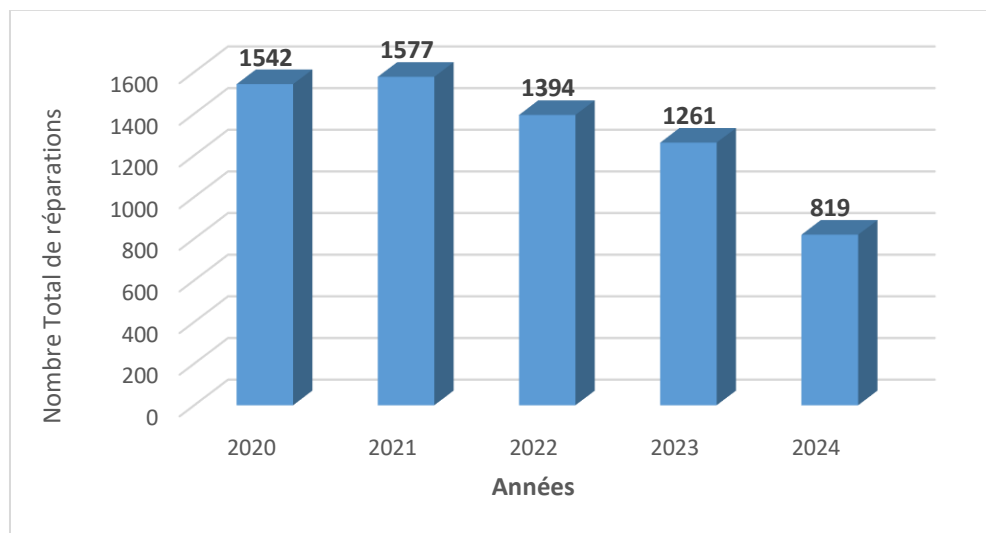


Figure 3.11. Total des Fuites réparées (années 2020 - 2024) – ville d'Annaba

Le nombre total de réparations des fuites sur les conduites de distributions et des branchements individuels est diminué de presque 50% entre l'année 2020 (1542) et 2024 (819 réparations) suite aux travaux de réhabilitation des réseaux de distribution d'eau dans plusieurs quartiers de la ville d'Annaba.



Photo 3.4. Fuites dans les réseaux de distribution



Photo 3.5. Fuite sur une conduite en Acier



Photo 3.6. Fuite sur un branchement



Photo 3.7. Fuite sur une vanne



3.3.6.1. *Identifiez les problèmes liés aux pertes d'eau dans la zone d'étude*

Les pertes d'eau dans une région peuvent être attribuées à plusieurs facteurs, notamment les fuites, les fraudes et une mauvaise gestion des infrastructures. Voici un aperçu des problèmes courants associés à ces pertes :

Fuites d'eau : Elles résultent principalement de l'usure des canalisations, de joints défectueux ou d'une installation mal réalisée. En plus de provoquer une hausse de la consommation, elles peuvent causer des dégâts matériels, comme des infiltrations dans les murs, favorisant ainsi l'apparition de moisissures nocives pour la santé.

Le réseau de distribution d'eau potable à Annaba est confronté à des pertes importantes, pouvant atteindre jusqu'à 50 % des volumes produits. Cette situation résulte principalement du vieillissement des infrastructures, caractérisé par la présence de canalisations en amiante-ciment, en fonte grise ou en acier, matériaux particulièrement sensibles à la corrosion et aux fissures. Le manque de maintenance préventive constitue un obstacle majeur à l'efficacité des interventions, compromettant ainsi la gestion optimale des ressources en eau et accentuant les pertes dans le réseau.

Fraudes et branchements illégaux dans le réseau de distribution d'eau : Elles se manifestent par des raccordements clandestins au réseau d'eau ou par la manipulation des compteurs afin de réduire illégalement la consommation enregistrée. Ces pratiques illégales engendrent des pertes financières pour les gestionnaires du réseau et peuvent altérer la qualité de l'eau distribuée.

À Annaba, les branchements illégaux sont répandus dans de nombreux quartiers, contribuant à l'augmentation des pertes d'eau et à la baisse de pression dans le réseau. Par ailleurs, certains usagers manipulent leurs compteurs pour réduire leur consommation enregistrée, causant des pertes financières importantes pour les gestionnaires de l'ADE. Ces pratiques perturbent le fonctionnement du réseau et rendent la gestion des ressources en eau plus difficile.

Défaillances dans la gestion des infrastructures : Une maintenance insuffisante du réseau de distribution favorise l'apparition et la persistance des fuites. De plus, une planification inadaptée des ressources hydriques peut mener à des projets inefficaces et à une distribution inégale de l'eau.

Le réseau de distribution souffre d'un manque d'entretien régulier, ce qui entraîne l'aggravation des fuites et des interruptions fréquentes du service. Bien que la ville d'Annaba soit divisée en secteurs pour une gestion améliorée (District Metered Areas - DMA), certaines zones ne sont pas encore entièrement couvertes, rendant difficile l'identification des pertes. En outre, les

systèmes de contrôle utilisés pour collecter et traiter les données de consommation d'eau et des pertes sont insuffisants, ce qui limite la réactivité face aux anomalies.

Impact environnemental et sanitaire : Le gaspillage de l'eau accentue la pression sur les ressources disponibles et peut entraîner une contamination des sols et des nappes phréatiques. Sur le plan sanitaire, les infiltrations favorisent le développement de moisissures, présentant un risque pour la santé des habitants.

3.3.6.2. Impacts économiques des pertes d'eau à Annaba

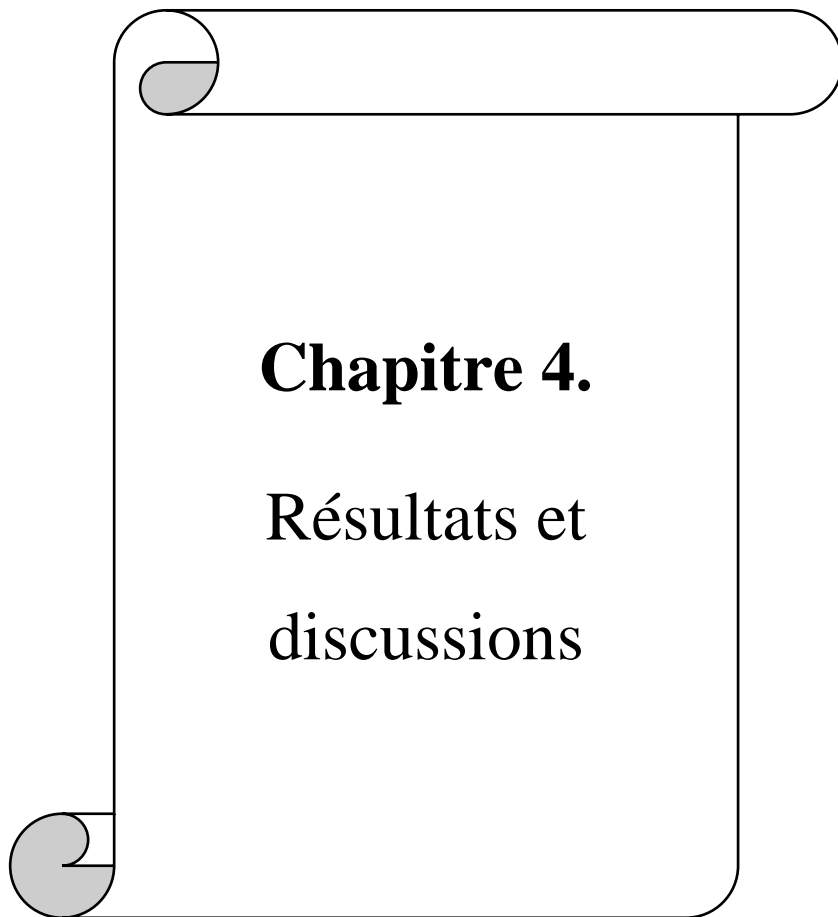
Les fuites dans le réseau de distribution d'eau entraînent des pertes financières considérables pour les gestionnaires, représentant jusqu'à 50 % des volumes produits (ADE, 2024). Cette situation engendre des coûts élevés liés à la production et à la distribution, sans générer de revenus correspondants. En outre, la maintenance et le remplacement des conduites endommagées nécessitent des investissements importants. Par ailleurs, les fraudes et les branchements illégaux réduisent les recettes de l'ADE. Enfin, les coupures fréquentes d'eau ont un impact direct sur l'économie locale, affectant la productivité des industries et des commerces, qui dépendent d'un approvisionnement constant en eau pour leurs activités.

3.3.6.3. Impacts environnementaux des pertes d'eau à Annaba

La ville d'Annaba subit de plein fouet les conséquences environnementales des pertes d'eau dans son réseau de distribution. Ce phénomène exacerbe la pression sur des ressources hydriques déjà fragiles et limitées dans la région. Pour pallier ces déficits, l'augmentation des volumes d'eau à pomper et à traiter se traduit par une surconsommation d'énergie, générant un surplus d'émissions de gaz à effet de serre. Parallèlement, les fuites chroniques provoquent des infiltrations dans le sous-sol, susceptibles d'entraîner une dégradation de la qualité des sols et une contamination des nappes phréatiques, engendrant ainsi des impacts environnementaux négatifs et durables.

3.3.6.4. Impacts sociaux des pertes d'eau à Annaba

Les fuites importantes dans le réseau de distribution d'eau à Annaba affectent directement la qualité du service, entraînant une baisse de la pression et des coupures fréquentes dans certains quartiers. Ces interruptions de service créent des inégalités d'accès à l'eau, particulièrement dans les zones situées en hauteur ou à l'extrémité du réseau, qui souffrent davantage des pertes. De plus, les coupures régulières et le manque d'eau potable génèrent un mécontentement parmi les habitants, pouvant conduire à des tensions sociales et des protestations. Enfin, une gestion inefficace de l'eau augmente les risques sanitaires en favorisant la contamination du réseau, ce qui peut entraîner l'apparition de maladies liées à une eau de mauvaise qualité.



Chapitre 4.

Résultats et
discussions

Chapitre 4.

Résultats et discussions

4.1. Collecte des données

4.1.1. Estimation des taux de pertes d'eau

Les pertes d'eau sont la composante essentielle de l'eau non facturée (ENF) (appelé en anglais, *Non-revenue water : NRW*). L'estimation de ENF est effectuée par le calcul du bilan hydrique (Tableau 4.1), en calculant les volumes des PE et les volumes d'eau autorisés et non-facturés (Alegre et al., 2006).

Tableau 4.1. Calcul du bilan hydrique pour le cas de la ville d'Annaba

Eau Facturée	Consommation autorisée	Consommation autorisée facturée	Eau facturée exportée (Vente en gros)		41%
			Consommation facturée mesurée		
			Consommation facturée non mesurée		
Eau non Facturée	Pertes en eau	Consommation autorisée non facturée	Consommation non facturée mesurée	1%	4%
			Consommation non facturée non mesurée	3%	
		Pertes apparentes	Consommation non autorisée	9%	15%
			Sous-comptage des compteurs et erreurs de manipulation des données	6%	
		Pertes réelles (Figure 4.1)	Fuites sur les conduites d'adduction et de distribution	29%	40%
			Fuite et débordements dans les réservoirs d'eau	2%	
Fuites sur branchements jusqu'au point de comptage	9%				
Volume introduit				59%	100%

D'après le tableau 4.1, nous avons trouvé que le ratio de l'ENF égale à 59% pour l'année 2024. Le détail de ce ratio est présenté dans les figures 4.2 et 4.3.

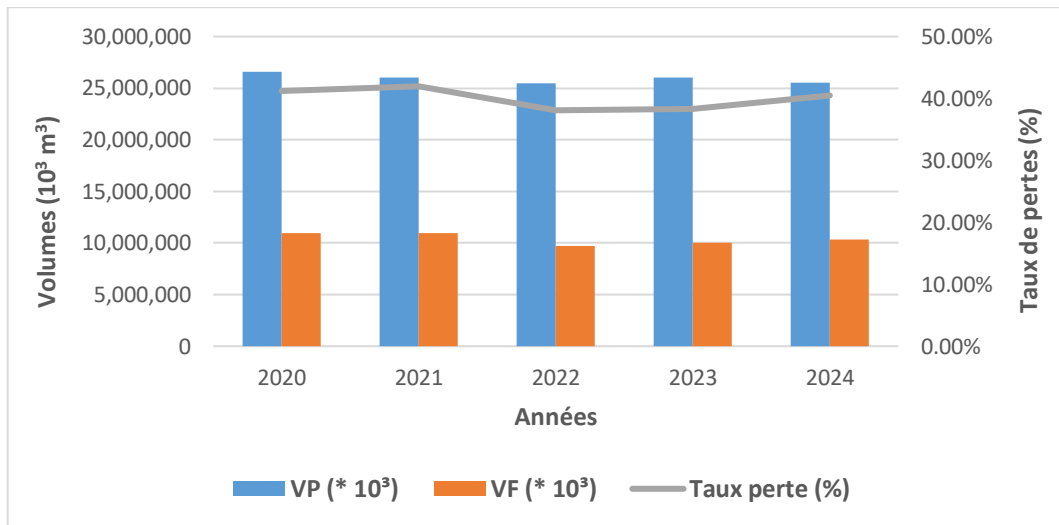


Figure 4.1. Calcul des pertes d'eau pour les années 2010 - 2018

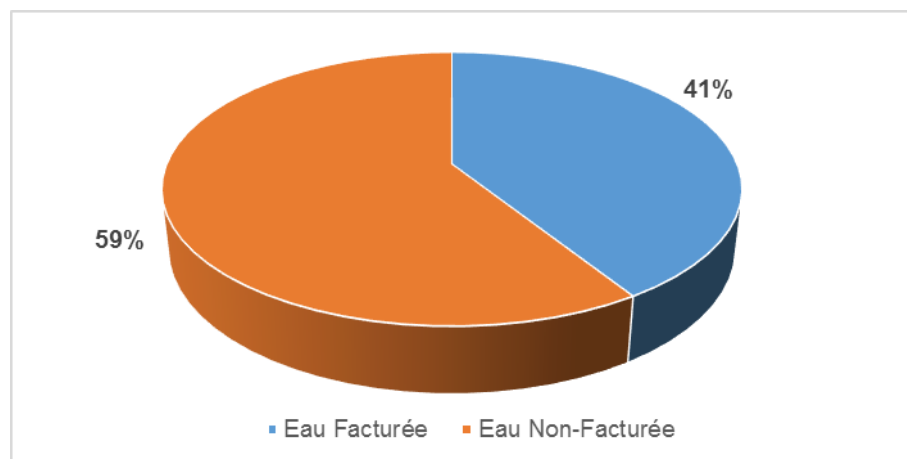


Figure 4.2. Différence entre l'Eau Facturée et l'ENF (année 2024)

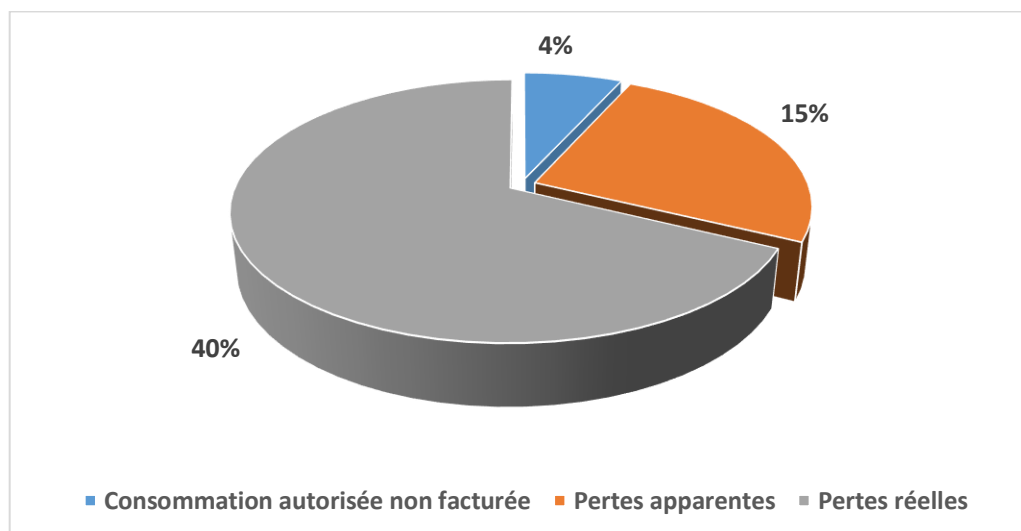


Figure 4.3. Détail du ratio de l'ENF (année 2024)

4.1.2. Simulation hydraulique

La simulation hydraulique est un outil très puissant qui permet d'évaluer le fonctionnement actuel et futur d'un système d'Alimentation en Eau Potable (AEP), pour déterminer ses points faibles (par exemple, vitesse, pression ...), et de planifier les améliorations nécessaires.

La construction du modèle hydraulique commence par la conversion du plan du réseau sur AUTOCAD dans un fichier EPANET (Figure 4.4) en utilisant le logiciel EPACAD. Ensuite, nous devons suivre les étapes de l'utilisation d'EPANET pour simuler un système de distribution d'eau :

- Saisir les propriétés des éléments du réseau ;
- Sélectionner un ensemble d'options pour la modélisation hydraulique ;
- Lancer une simulation hydraulique ;
- Visualiser les résultats de la simulation.

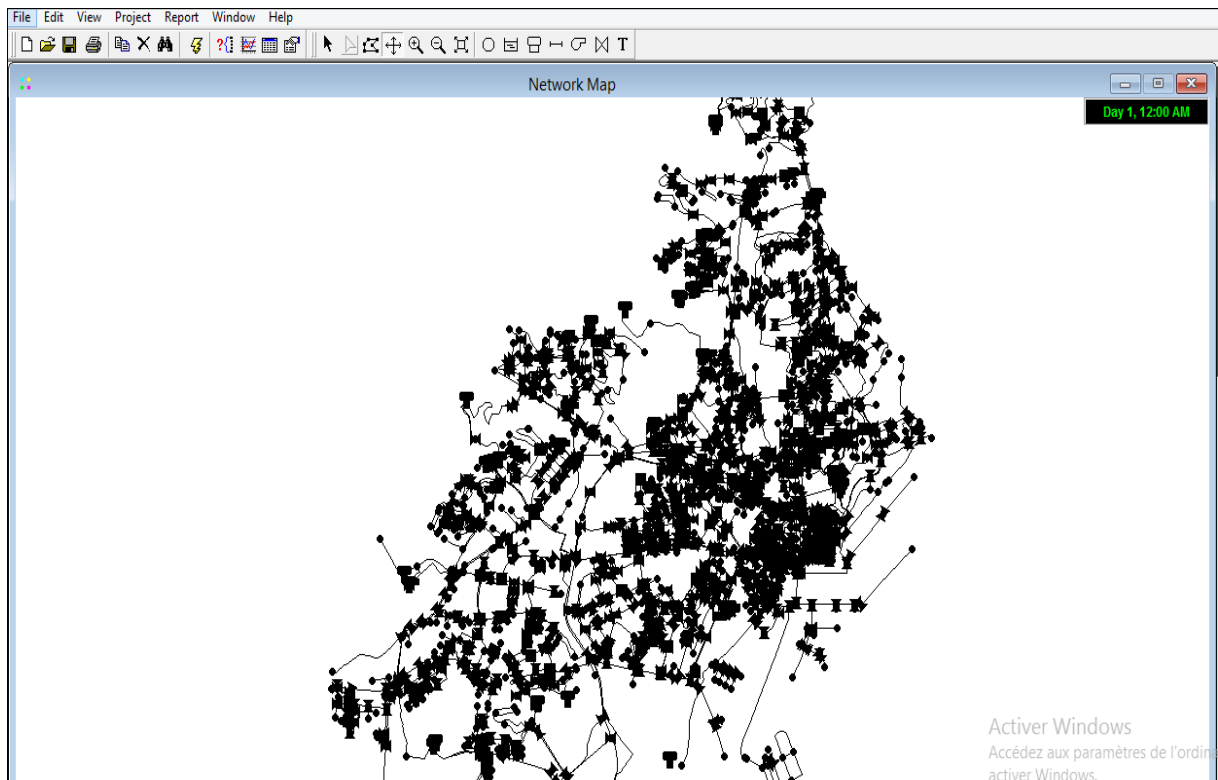


Figure 4.4. Schéma du réseau de distribution de la ville d'Annaba sur Epanet

La simulation hydraulique du fonctionnement du réseau de distribution d'eau de la ville d'Annaba sur EPANET est présentée dans la figure 4.5.

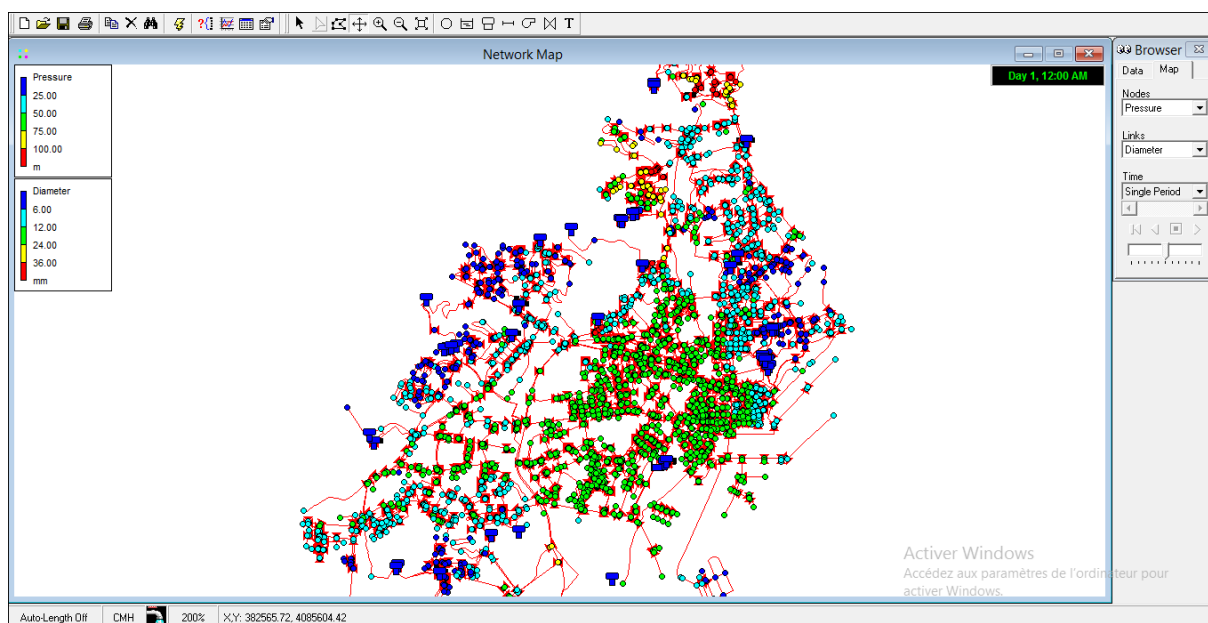


Figure 4.5. Simulation hydraulique sur Epanet

Les résultats de la simulation hydraulique (3890 nœuds) sont exposés dans l'annexe A2. Le tableau 4.2 présente quelques résultats de la simulation hydraulique sur Epanet.

Tableau 4.2. Quelques résultats de la simulation hydraulique

Link ID	Longueur m	Diameter mm	Roughness mm	Debit m ³ /h	Vitesse m/s
Pipe cnd_1_dist	382,395	100	2	1,73	0,06
Pipe cnd_2_dist	20,692	80	2	0,12	0,01
Pipe cnd_3_dist	67,935	100	2	4,19	0,15
Pipe cnd_4_dist	21,798	100	2	4,22	0,19
Pipe cnd_5_dist	92,458	110	2	94,75	2,77
Pipe cnd_6_dist	115,607	80	2	9,55	0,53
Pipe cnd_7_dist	60,81	160	2	92,55	1,28
Pipe cnd_8_dist	197,713	100	2	45,74	1,62
Pipe cnd_9_dist	73,19	80	2	1,85	0,18
Pipe cnd_10_dist	32,958	80	2	0,43	0,02
Pipe cnd_11_dist	166,594	150	2	1,07	0,02
Pipe cnd_12_dist	10,24	300	1,5	162,63	0,64
Pipe cnd_13_dist	37,169	90	2	9,45	0,41
Pipe cnd_14_dist	44,935	100	2	21,81	0,77
Pipe cnd_15_dist	55,382	200	2	37,45	0,33
Pipe cnd_16_dist	87,188	90	2	9,23	0,41
Pipe cnd_17_dist	7,428	200	2	19,09	0,17
Pipe cnd_18_dist	140,5	300	1,5	71,16	0,28
Pipe cnd_19_dist	7,935	200	2	103,73	0,92
Pipe cnd_20_dist	67,066	160	2	15,57	0,22
Pipe cnd_23_dist	18,572	500	1,5	146,75	0,21
Pipe cnd_24_dist	22,967	300	1,5	34,07	0,13

D'après la simulation hydraulique du système de distribution de la ville d'Annaba par le logiciel Epanet, la pression moyenne est entre 4 à 6 bars (figure 4.6). Les résultats de la simulation ont montré que 52% des nœuds (2025 sur 3890 nœuds) ont des pressions entre 4 à 6 bars, 31% ont des pressions entre 0 à 4 bars (Annaba est une ville côtière plate) et 17% des nœuds ont des pressions plus de 6 bars (présente l'emplacement des réservoirs et les quartiers dans la zone haute de la ville) (figure 4.7).

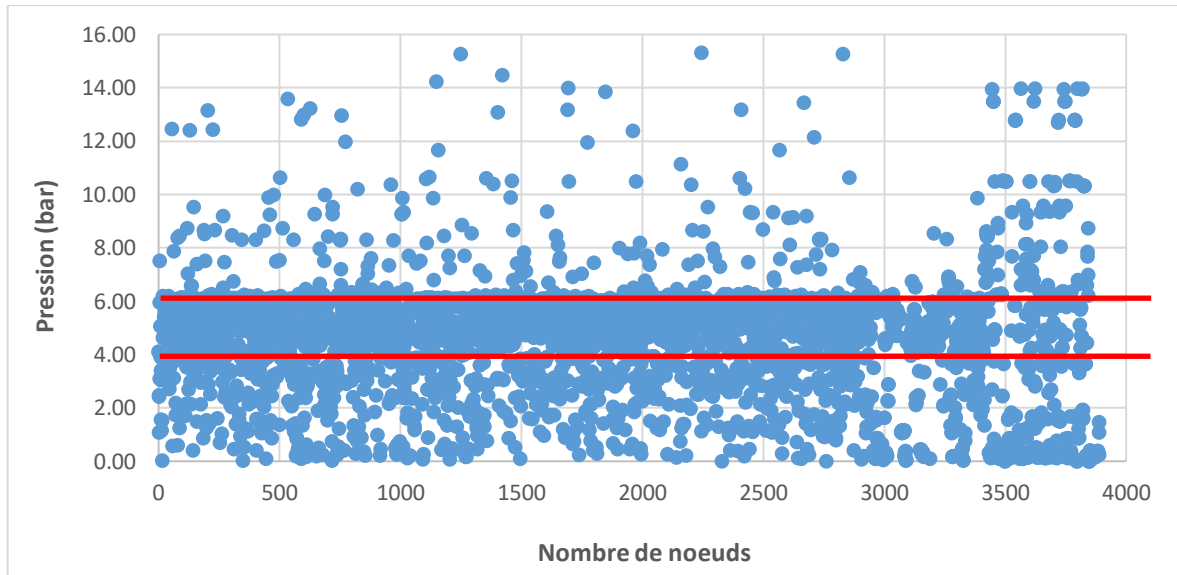


Figure 4.6. Résultat des pressions sur Epanet

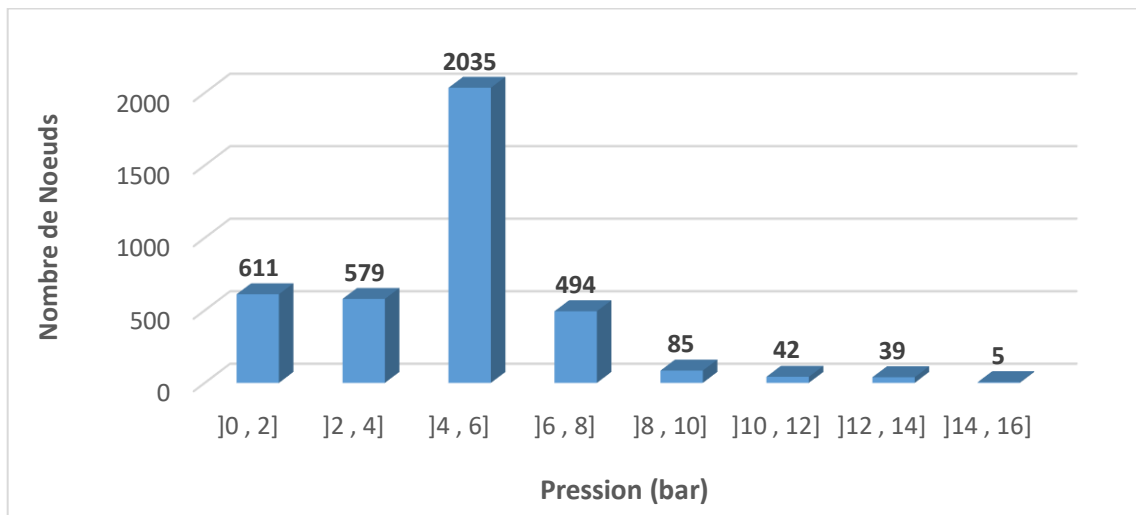


Figure 4.7. Résultat des pressions sur Epanet

4.2. Application de la méthode AHP

4.2.1. Sélection des critères, sous-critères et des alternatives

La sélection des critères, sous-critère et alternatives a effectuée sur la base d'une vaste recherche documentaire et des entretiens avec des experts dans le domaine de la gestion des

services d'eau potable et de parties prenantes en fonction des conditions locales de la zone d'étude (Retima et al., 2025). Sur la base de cette recherche, 6 critères, 26 sous-critères (tableau 4.3) et 12 alternatives (tableau 4.4) ont été sélectionnés.

Tableau 4.3. Les critères et sous-critères sélectionnés

Critères	Sous-critères	Symbole
Économique	Tarif social de l'eau	E1
	Coûts d'investissement	E2
	Coûts d'exploitation	E3
	Génération de revenus	E4
	Subventions gouvernementales	E5
Technique	Taux de pertes commerciales	T1
	Taux de pertes physiques	T2
	Âge des canalisations	T3
	Type de matériaux	T4
	Diamètre des canalisations	T5
Opérationnel	Capacités de maintenance	O1
	Qualité du personnel d'entretien du réseau	O2
	Approvisionnement intermittent	O3
	Pression	O4
	Vitesse	O5
Social	Urbanisation et accès croissant à l'eau	S1
	Qualité de l'eau distribuée	S2
	Plaintes des abonnés	S3
	Abordabilité des tarifs de l'eau	S4
Environnement des Canalisations	Type de sol	EC1
	Type de trafic routier	EC2
	Profondeur des canalisations	EC3
Capacité de Gestion	Organisation du service de l'eau	CG1
	Gouvernance	CG2
	Décentralisation de la gestion du service	CG3
	Sous-traitance privée	CG4

Tableau 4.4. Les alternatives retenues

		Variables	Symbole
Réduction des pertes d'eau	Réduction des pertes commerciales	Lutte contre les branchements illégaux	Alt1
		Identification des compteurs sous-enregistrés	Alt2
		Installation de nouveaux compteurs d'eau	Alt3
		Païement en ligne des factures d'eau	Alt4
		Formation du personnel de relève	Alt5
		Campagnes de sensibilisation	Alt6
	Réduction des pertes physiques	Utilisation des nouvelles technologies	Alt7
		Réparation rapide des fuites d'eau	Alt8
		Réhabilitation des réseaux de distribution	Alt9
		Maintenance préventive des équipements	Alt10
		Détection des fuites non visibles	Alt11
		Gestion et contrôle de la pression	Alt12

4.2.2. Construction de la structure hiérarchique

Dans cette étude, la structure hiérarchique est composée de trois niveaux (Figure 4.8) :

- Le niveau zéro présente l'objectif principal de l'étude ;
- Le premier niveau présente les 6 critères et les 26 sous-critères ;
- Les 12 alternatives sont présentées au dernier niveau.

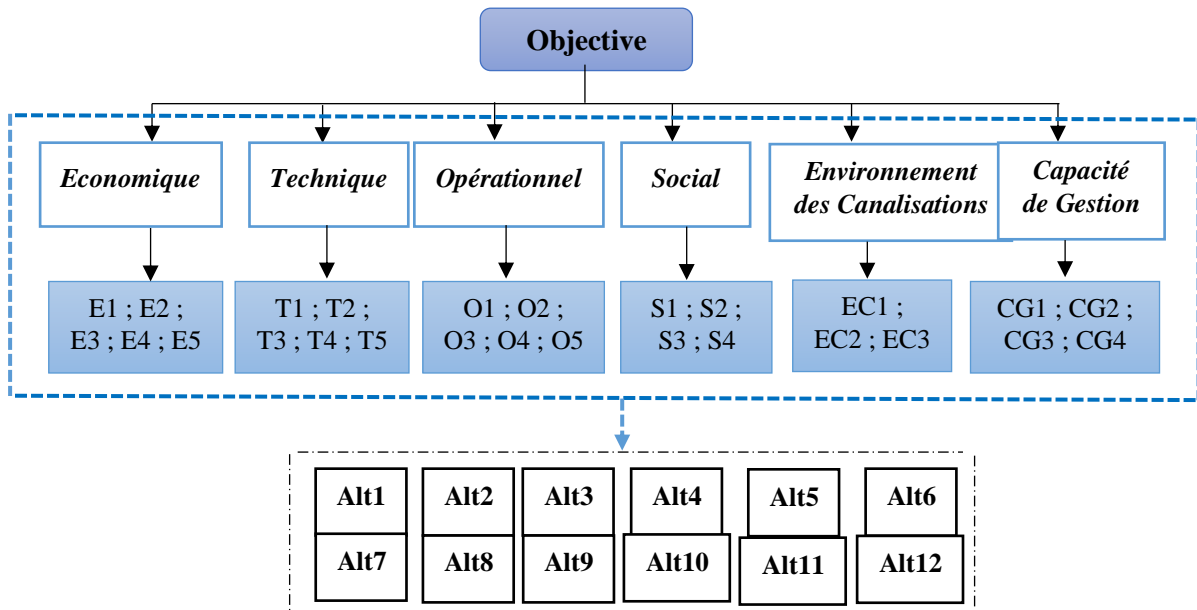


Figure 4.8 Structure hiérarchique

Dans cette étape, les procédures des deux approches MCDM (AHP et Fuzzy-AHP) ont été appliquées. A cet effet, les comparaisons par paires ont été réalisées par les 30 experts sélectionnés pour le cas de cette recherche. Ces experts ont été invités pour remplir les questionnaires afin d'établir les matrices de décision pour chaque niveau. Pour cette démarche, deux questionnaires ont été remplis. Le premier questionnaire a été utilisé pour effectuer des comparaisons par paires des 6 critères et de 26 sous-critères, tandis que le second était dédié au classement des meilleures Alternatives.

4.2.3. Résultat de l'application de la méthode AHP

Après la collecte des questionnaires remplis par les experts, la matrice de comparaisons par paires pour les 6 critères a été établie. Ensuite, la matrice normalisée a été calculée en divisant chaque cellule par la somme de sa colonne. Les poids relatifs des critères ont été déterminés en calculant la moyenne de chaque ligne de la matrice normalisée. Finalement, la cohérence doit être vérifiée (Tableau 4.5).

Matrice de décisions (comparaison par paires entre les 6 critères)

	C.1	C.2	C.3	C.4	C.5	C.6
C.1	1	2	4	6	7	3
C.2	1/2	1	3	4	5	3
C.3	1/4	1/3	1	3	5	2
C.4	1/6	1/4	1/3	1	3	1/3
C.5	1/7	1/5	1/5	1/3	1	1/5
C.6	1/3	1/3	1/2	3	5	1
Σ	2,393	4,117	9,033	17,333	26,000	9,533

Matrice de comparaison par paires normalisée

0,418	0,486	0,443	0,346	0,269	0,315
0,209	0,243	0,332	0,231	0,192	0,315
0,104	0,081	0,111	0,173	0,192	0,210
0,070	0,061	0,037	0,058	0,115	0,035
0,060	0,049	0,022	0,019	0,038	0,021
0,139	0,081	0,055	0,173	0,192	0,105

Tableau 4.5. Résultats de l'application de l'AHP pour les 6 critères

Poids (Wight)	Contrôle de cohérence
$w = \begin{Bmatrix} 0,379 \\ 0,254 \\ 0,145 \\ 0,063 \\ 0,035 \\ 0,124 \end{Bmatrix}$	$n = 6$ $\lambda_{\max} = 6,6099$ $CI = 0,1220$ $RI = 1,25$ $CR = 9,76 \%$ $CR < 0,1$, la cohérence est acceptée

Les résultats de l'application de la méthode AHP ont montré que les critères économiques (37,9%), techniques (25,4%) et opérationnels (14,5%) ont les plus grands poids que les autres critères (capacité de gestion, sociaux et environnement des canalisations).

Les poids relatifs des sous-critères ont été obtenus en utilisant les mêmes procédures que les poids relatifs des critères. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6. Résultats de l'application de la méthode AHP pour les 26 sous-critères

<i>Économique</i>						
	E.1	E.2	E.3	E.4	E.5	
E.1	1	1/7	1/6	1/4	1/3	$w = \begin{cases} 0,044 \\ 0,392 \\ 0,274 \\ 0,194 \\ 0,096 \end{cases}$
E.2	7	1	2	2	4	
E.3	6	1/2	1	2	3	
E.4	4	1/2	1/2	1	3	
E.5	3	1/4	1/3	1/3	1	
						$n = 5$ $\lambda_{\max} = 5,1625$ $CI = 0,0406$ $RI = 1,12$ $CR = 3,63 \%$ $CR < 0,1$, la cohérence est acceptée
<i>Technique</i>						
	T.1	T.2	T.3	T.4	T.5	
T.1	1	1/3	3	2	4	$w = \begin{cases} 0,251 \\ 0,404 \\ 0,180 \\ 0,110 \\ 0,055 \end{cases}$
T.2	3	1	2	3	6	
T.3	1/3	1/2	1	2	4	
T.4	1/2	1/3	1/2	1	2	
T.5	1/4	1/6	1/4	1/2	1	
						$n = 5$ $\lambda_{\max} = 5,4410$ $CI = 0,1103$ $RI = 1,12$ $CR = 9,84 \%$ $CR < 0,1$, la cohérence est acceptée
<i>Opérationnel</i>						
	O.1	O.2	O.3	O.4	O.5	
O.1	1	2	5	2	4	$w = \begin{cases} 0,376 \\ 0,312 \\ 0,081 \\ 0,160 \\ 0,071 \end{cases}$
O.2	1/2	1	5	3	4	
O.3	1/5	1/5	1	1/3	2	
O.4	1/2	1/3	3	1	2	
O.5	1/4	1/4	1/2	1/2	1	
						$n = 5$ $\lambda_{\max} = 5,3463$ $CI = 0,0866$ $RI = 1,12$ $CR = 7,73 \%$ $CR < 0,1$, la cohérence est acceptée
<i>Social</i>						
	S.1	S.3	S.3	S.4		
S.1	1	2	3	5	$w = \begin{cases} 0,456 \\ 0,324 \\ 0,152 \\ 0,068 \end{cases}$	$n = 4$ $\lambda_{\max} = 4,1667$ $CI = 0,0556$ $RI = 0,89$ $CR = 6,24 \%$ $CR < 0,1$, la cohérence est acceptée
S.2	1/2	1	3	5		
S.3	1/3	1/3	1	3		
S.4	1/5	1/5	1/3	1		

Environnement de canalisation

	EC.1	EC.2	EC.3		
EC.1	1	1	3	$w = \begin{cases} 0,443 \\ 0,387 \\ 0,170 \end{cases}$	n = 3 $\lambda_{\max} = 3,0251$ CI = 0,0125 RI = 0,52 CR = 2,41 % < 0,1, la cohérence est acceptée
EC.2	1/3	1	2		
EC.3	1/2	1/2	1		

Capacité de gestion

	CG.1	CG.2	CG.3	CG.4		
CG.1	1	3	2	4	$w = \begin{cases} 0,461 \\ 0,151 \\ 0,281 \\ 0,107 \end{cases}$	n = 4 $\lambda_{\max} = 4,1939$ CI = 0,0646 RI = 0,89 CR = 7,26 % < 0,1, la cohérence est acceptée
CG.2	1/3	1	1/3	2		
CG.3	1/2	3	1	2		
CG.4	1/4	1/2	1/2	1		

- Les sous-critères « Coûts d'investissement (E2) » et « Coûts d'exploitation (E3) » ont le score le plus élevé avec des poids relatifs de 39,2 % et 27,4 % du critère « économique »
- Les sous-critères « Taux de pertes physiques (T2) » et « Taux de pertes commerciales (T1) » ont le score le plus élevé avec des poids relatifs de 40,4 % et 25,1 % des critères « techniques »
- Les sous-critères « Capacités de maintenance (O1) » et « Qualité du personnel de maintenance du réseau (O2) » ont le score le plus élevé avec des poids relatifs de 37,6 % et 31,2 % des critères « opérationnels »
- Les sous-critères « Urbanisation et accroissement de l'accès à l'eau (S1) » et « Qualité de l'eau distribuée (S2) » ont le score le plus élevé avec des poids relatifs de 45,6 % et 32,4 % des critères « sociaux »
- Pour le « milieu canalisation » critères, le sous-critère « Type de sol (EC1) » a le poids le plus élevé (44,3%) par rapport aux autres sous-critères.
- Les sous-critères « Organisation du service d'eau (CG1) » et « Décentralisation de la gestion du service (CG3) » ont le score le plus élevé avec des poids relatifs de 46,1% et 28,1% du critère « Capacité de gestion ».

4.3. Comparaison par paires à l'aide de Fuzzy-AHP

En utilisant la méthode Fuzzy-AHP, la matrice de comparaisons par paires entre critères (Tableau 4.7) a été renseignée à l'aide de l'échelle TFN.

Tableau 4.7. Matrice de comparaison par paires entre critères

	C.1	C.2	C.3	C.4	C.5	C.6
C.1	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)	(3, 4, 5)	(5, 6, 7)	(6, 7, 8)	(2, 3, 4)
C.2	(1/3, 1/2, 1)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(4, 5, 6)	(2, 3, 4)
C.3	(1/5, 1/4, 1/3)	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(4, 5, 6)	(1, 2, 3)
C.4	(1/7, 1/6, 1/5)	(1/6, 1/5, 1/4)	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
C.5	(1/8, 1/7, 1/6)	(1/3, 1/2, 1)	(1/6, 1/5, 1/4)	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 1, 1)	(1/6, 1/5, 1/4)
C.6	(1/4, 1/3, 1/2)	(1/4, 1/3, 1/2)	(1/3, 1/2, 1)	(2, 3, 4)	(4, 5, 6)	(1, 1, 1)

La pondération moyenne géométrique et la pondération floue ont été dérivées à l'aide de l'approche Fuzzy-AHP de Buckley (tableau 4.8). La normalisation de la valeur nette est la pondération de priorité finale utilisée pour déterminer le classement des critères de décision.

Tableau 4.8. Résultat de la méthode Fuzzy AHP de Buckley

Critères	Moyenne géométrique			Poids Floue			M_i	Normalisation
	l	m	μ	l	m	μ		
C.1	2,376	3,166	3,870	0,226	0,387	0,626	0,413	0,377
C.2	1,587	2,117	2,798	0,151	0,259	0,452	0,288	0,262
C.3	0,858	1,165	1,513	0,082	0,142	0,245	0,156	0,143
C.4	0,391	0,490	0,637	0,037	0,060	0,103	0,067	0,061
C.5	0,229	0,269	0,330	0,022	0,033	0,053	0,036	0,033
C.6	0,742	0,970	1,348	0,071	0,119	0,218	0,136	0,124
Total	6,184	8,178	10,497				1,096	1,000
Inverse	0,162	0,122	0,095					
Ordre croissant	0,095	0,122	0,162					

Le calcul des poids des critères a donné les résultats suivants, les 3 critères économiques (37,71%), techniques (26,25%) et opérationnels (14,27%) sont essentiels à considérer lors de la phase de sélection des meilleures alternatives de réduction des PE car ces critères impactent significativement les risques d'augmentation des taux élevés de PE dans les RDE (Figure 4.9).

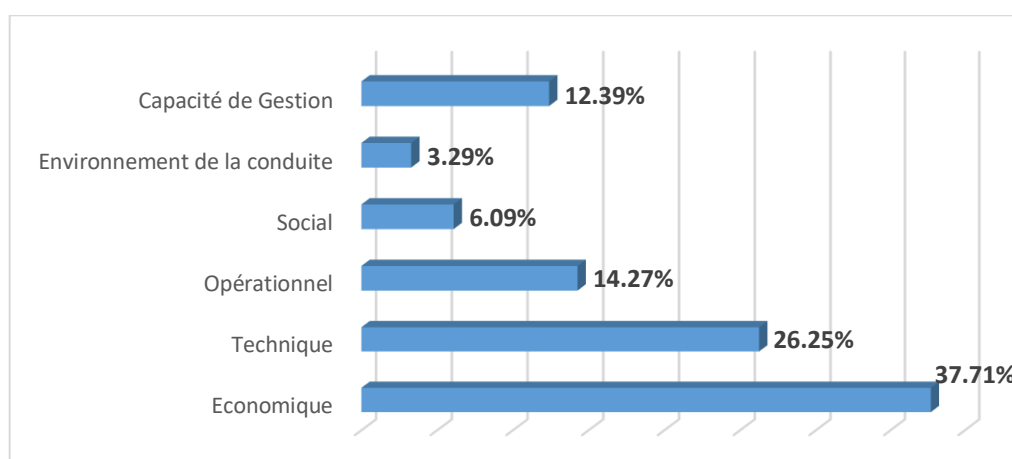


Figure 4.9. Priorité des critères avec la méthode FAHP

La figure 4.9 montre que le critère économique (37,71%) est le plus influent parmi les autres critères, car il constitue l'aspect le plus critique de toute stratégie de réduction des PE pour les gestionnaires des services publics (Zyoud et al., 2016). Les compagnies de l'eau en Algérie (ADE) souffrent d'une insuffisance financière (Boukhari et al., 2024a) et elles n'ont pas les moyens financiers de supporter une augmentation des coûts d'exploitation pour réduire les PE (Boukhari et al., 2024b). L'analyse des résultats privilégie les critères économiques et techniques car le volume élevés des taux de PE affecte directement l'augmentation des coûts réels de la production de l'eau potable (par exemple, coût du traitement et coût énergétique) et la stabilité financière des compagnies de l'eau et incluent aussi sur la performance technique du système de distribution.

Les résultats de cette recherche confirment les résultats d'autres études sur la réduction des PE dans les réseaux de distribution d'eau potable. A titre d'exemple, Kadenge et al., 2020 ont démontré que le critère de génération de revenus a le plus grand poids (37,04 %) et la qualité de l'eau a le plus petit poids (2,04%). Les résultats de l'étude de Zayoud et al., (2016) ont montré que les critères ont les poids relatifs sont : économique (46,1%), environnemental (24,5 %), socio-économique (19,2%) et technique (10,2%). Les résultats de l'étude de Mutikanga et al., (2013) ont dévoilé que les poids des critères ont les pondérations suivantes : technique (30,4%), économique (28,2%), environnemental (15,8%), santé publique (15,8%) et socio-économique (9,8%).

Ensuite, les résultats des poids relatifs des 6 critères calculés par les deux méthodes MCDM (AHP et F-AHP), ont été comparées (Figure 4.10). Cette figure montre que les deux méthodes appliquées ont une grande importance pour les critères économiques et techniques dans le cas de la réduction des PE.

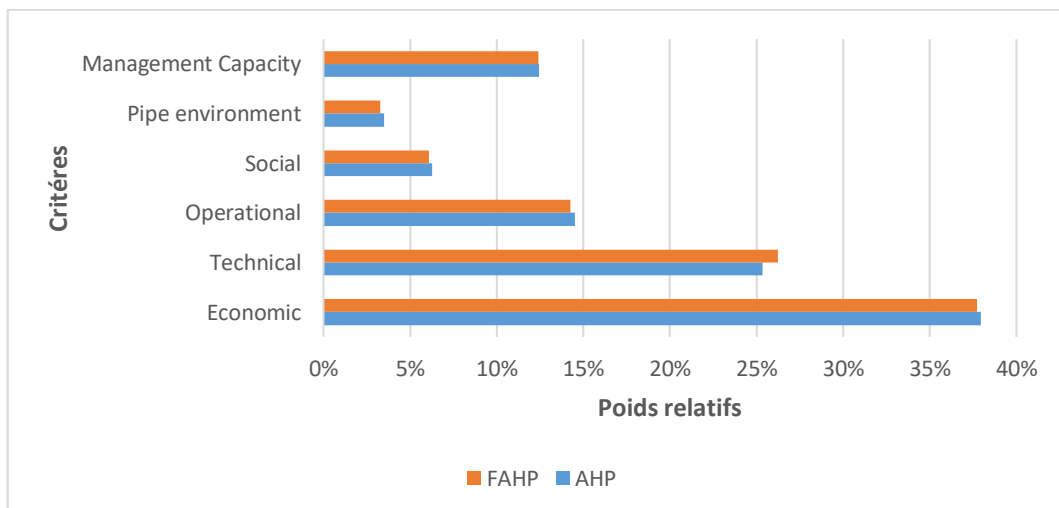


Figure 4.10 Comparaison entre les deux méthodes AHP et F-AHP

Le classement des critères est resté presque le même dans les deux méthodes (AHP et Fuzzy-AHP) avec des changements mineurs dans le calcul de quelques poids (pour le cas du critère économique, le poids calculé par la méthode AHP est de 37,94% et il est égal à 37,71% pour le cas de la méthode Fuzzy-AHP). À cet effet, les résultats obtenus par les deux méthodes (AHP et F-AHP) sont presque similaires. En utilisant les mêmes étapes de calcul des poids des critères, la Figure 4.11 présente les résultats de la pondération des sous-critères selon la méthode Fuzzy-AHP.

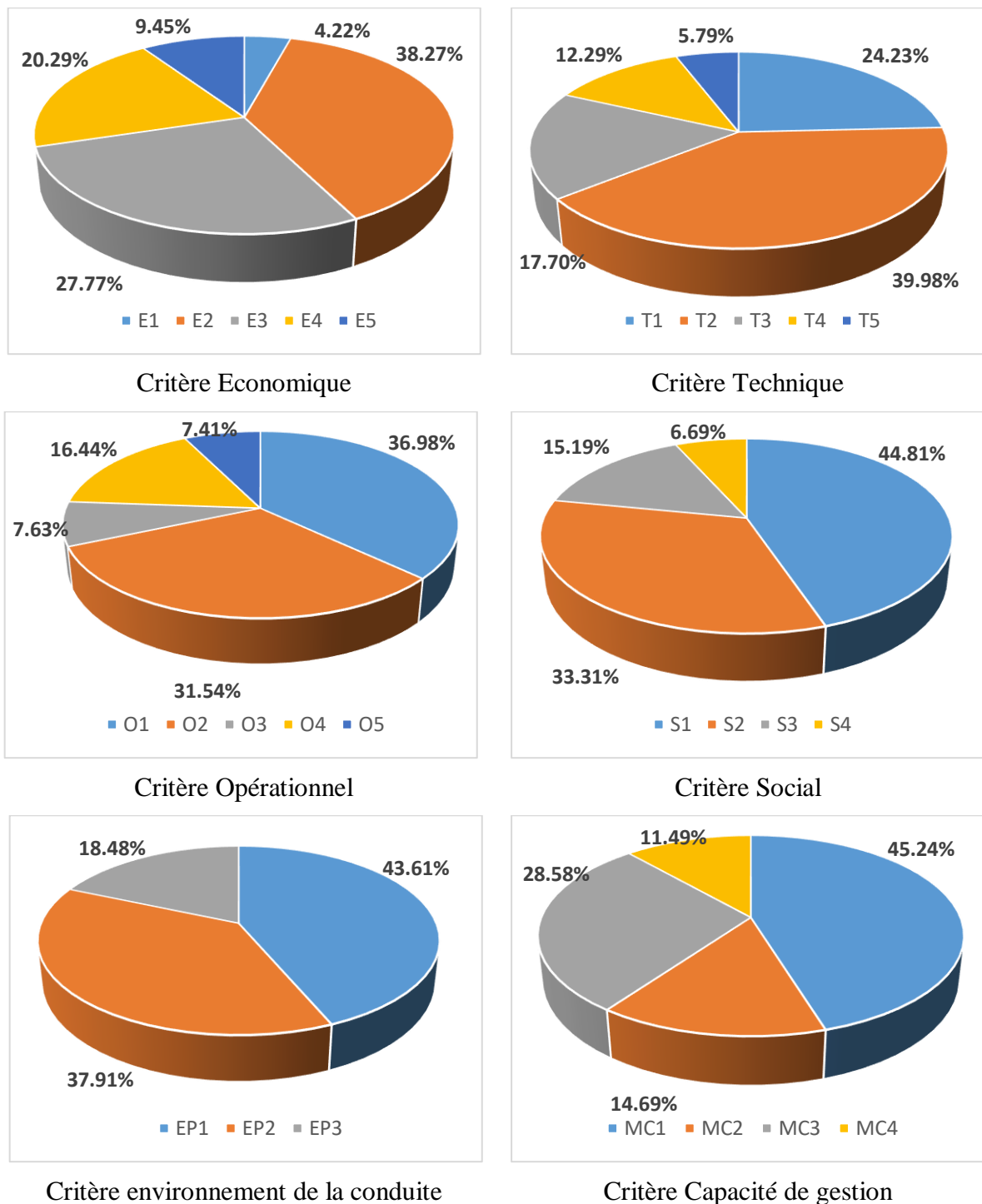


Figure 4.11 Poids relatifs des sous-critères par la méthode Fuzzy-AHP

Les poids globaux des sous-critères sont présentés dans la figure 4.12.

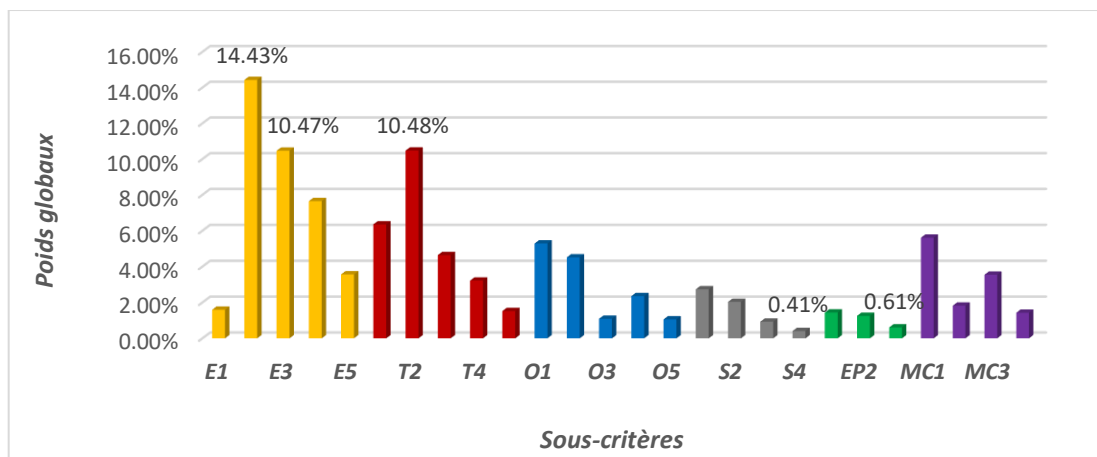


Figure 4.12 Poids global des sous-critères par Fuzzy-AHP

Les résultats ont montré que les trois sous-critères, Coûts d'investissement (14,43 %), Taux de pertes physiques (10,48 %) et Coûts d'exploitation (10,47 %), sont prioritaires que les autres sous-critères.

4.4. Application de l'ANN

L'application de l'ANN a pour but de prédire les PE. Dans cette étape, nous avons utilisé seulement les sous-critères qui ont des données quantitatives et une grande influence sur l'existence et le développement des PE dans les RDE pour le cas de la ville d'Annaba.

Plusieurs modèles basés sur le modèle ANN et avec des différents facteurs (tableau 4.9) ont été développés pour prédire les pertes dans conduites d'eau (Taiwo et al., 2025). Ces modèles permettent de quantifier la détérioration structurelle des conduites d'eau en analysant différents niveaux de données historiques. Ces derniers temps, les ANN sont devenues des modèles populaires et utiles pour la classification, le clustering, la reconnaissance de formes (Barradas et al., 2025) et la prédiction dans de nombreuses disciplines (Sarkar et al., 2025) et gérer les processus dynamiques non linéaires complexes (Wang et al., 2025).

Tableau 4.9. Résumé des études connexes prédisant les **facteurs** de défaillance des conduites d'eau

Facteurs	Les études						
	Yan et Vairavamorthy (2003)	Geem (2003)	Al-Barqawi et Zayed (2006)	Al-Barqawi et Zayed (2008)	Asnaashari et al., (2013)	Harvey et al., (2014)	Dawood et al., 2021
Âge	X	X	X	X	X	X	X
Diamètre	X	X		X	X	X	X
Longueur			X		X	X	
Matériaux	X	X	X	X	X		
Épaisseur de la conduite							X
Trafic routier	X			X			
Type de sol	X		X	X	X	X	
Surface de la route			X				
Environnement de la conduite	X						
État du lit		X					
Protection cathodique		X		X	X	X	
Revêtement en mortier de ciment					X	X	
Température		X					
La largeur de la tranchée		X					
Profondeur de la tranchée			X				
Défaillances antérieures			X	X	X	X	X
Facteur C			X	X			
Pression	X			X			X
Type de service				X			
Installation de canalisations							X
Qualité de l'eau							X
Pratiques d'exploitation et d'entretien							X
Niveau nappe phréatique				X			

D'après le tableau 4.9, sept facteurs indépendants sont utilisés, à savoir la longueur, le diamètre, l'âge, le matériau de la conduite, type de trafic routier, la pression et le nombre de défaillances, afin de déterminer l'importance des différents facteurs influençant le taux de défaillance des conduites. Les sous-critères et leurs indicateurs sont présentés dans le tableau 4.10.

Tableau 4.10. Sous-critères et indicateurs

Sous-Critères	Indicateurs	
Longueur (L)	L1	< 200 m
	L2	≥ 200 m
Diamètre (D)	D1	≤ 100 mm
	D2	> 100 mm
Age de la conduite (A)	A1	≤ 10 ans
	A2	> 10 ans
Matériaux (M)	M1	A-Ciment
	M2	Acier
	M3	Plastic
Type de trafic (TT)	TT1	Non Elevé
	TT2	Elevé
Pression (P)	P1	< 2 bars
	P2	2 à 6
	P3	> 6
Nombre de défaillance (DEF)	DEF1	0
	DEF2	≥ 1

Après le calcul des poids (w_{nj}) des entrées (sous-Critères et indicateurs) plusieurs combinaisons ont été faites avant de joindre la sortie du modèle (figure 4.13).

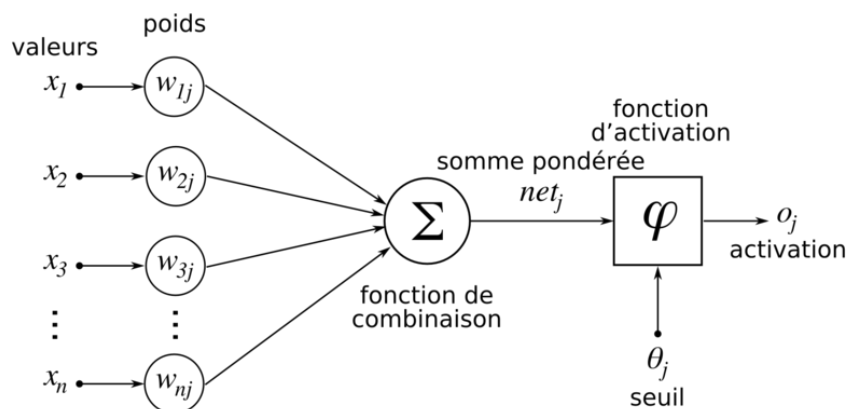


Figure 4.13. Relation entre les Poids et les combinaisons dans le RNA

Nous avons calculé les poids pour les sept sous-critères (tableau 4.11) et les 16 indicateurs (tableau 4.12) à l'aide de la méthode AHP.

	L	D	A	M	TT	P	DEF
L	1,00	0,14	0,17	0,50	2,00	0,50	0,33
D	7,00	1,00	0,33	3,00	2,00	0,33	0,25
A	6,00	3,00	1,00	3,00	9,00	1,00	3,00
M	2,00	0,33	0,33	1,00	3,00	0,33	0,50
TT	0,50	0,50	0,11	0,33	1,00	0,11	0,14
P	2,00	3,00	1,00	3,00	9,00	1,00	2,00
DEF	3,00	4,00	0,33	2,00	7,00	0,50	1,00
	21,50	11,98	3,28	12,83	33,00	3,78	7,23

Tableau 4.11. Poids des 7 Sous-Critères

Critères	Poids
L	0,055
D	0,133
A	0,289
M	0,078
TT	0,029
P	0,242
DEF	0,173
1,000	

Tableau 4.12. Poids des 16 Indicateurs

Sous-Critères	Poids	Indicateurs	Poids-Ind	
L	5,53%	L1	< 200 m	1,66%
		L2	≥ 200 m	3,87%
D	13,26%	D1	≤ 100 mm	5,31%
		D2	> 100 mm	7,95%
A	28,87%	A1	≤ 10 ans	7,22%
		A2	> 10 ans	21,65%
M	7,84%	M1	A-Ciment	1,96%
		M2	Acier	2,74%
		M3	Plastic	3,14%
TT	2,92%	TT1	Non Elevé	0,58%
		TT2	Elevé	2,34%
P	24,24%	P1	< 2	1,22%
		P2	2 à 6	8,48%
		P3	> 6	14,54%
DEF	17,34%	DEF1	0	0,87%
		DEF2	≥ 1	16,47%
			100,00%	100,00%

Diverses combinaisons d'entrées (c'est-à-dire toutes les combinaisons possibles des 7 critères (de 1 à 7) avec les 16 Sous-critères (de 1 à 16)), sont étudiées pour obtenir la plus grande précision.

Combinaison = **L** (L1, L2) + **D** (D1, D2) + **A** (A1, A2) + **M** (M1, M2, M3) + **TT** (TT1, TT2) + **P** (P1, P2, P3) + **DEF** (DEF1, DEF2)

Exemple de quelques combinaisons :

- **Combinaison 1** = L1 + D1 + A1 + M1 + TT1 + P1 + DEF1
- **Combinaison 2** = L1 + D1 + A1 + M1 + TT1 + P1 + DEF2
- **Combinaison 3** = L1 + D1 + A1 + M1 + TT1 + P1 + DEF1
- **Combinaison 4** = L1 + D1 + A1 + M1 + TT1 + P2 + DEF1
- **Combinaison 5** = L1 + D1 + A1 + M1 + TT1 + P3 + DEF1

Nous avons effectué toutes les combinaisons manuellement et ensuite, nous avons vérifiés notre travail à l'aide du logiciel MINITAB.

MINITAB est développé par le Département de Statistique de l'Université de Pennsylvanie (U.S.A.). MINITAB est un logiciel statistique de pointe utilisé pour l'amélioration de la qualité et l'amélioration par les statistiques : statistique descriptive, analyse de la variance, méthodes relatives à la corrélation et à la régression simple et multiple, séries chronologiques, tests d'indépendance, méthodes non paramétriques, analyse en composantes principales, analyse discriminante, contrôle statistique de la qualité, plans expérimentaux, etc. (Claustrioux et Delvaux, 1994).

Un extrait de 50 combinaisons sur les 288 combinaisons est présenté dans le tableau 4.13.

Tableau 4.13. Un extrait de 50 combinaisons

L	D	A	M	TT	P	DEF	SOMME
1,66	5,31	21,65	2,74	2,34	14,54	16,47	64,71
1,66	5,31	21,65	2,74	2,34	1,22	16,47	51,39
3,87	5,31	21,65	3,14	0,58	1,22	0,87	36,64
1,66	7,95	21,65	1,96	0,58	8,48	0,87	43,15
3,87	5,31	7,22	2,74	0,58	14,54	0,87	35,13
1,66	7,95	21,65	1,96	2,34	1,22	0,87	37,65
1,66	5,31	7,22	3,14	0,58	8,48	0,87	27,26
3,87	5,31	21,65	1,96	2,34	1,22	0,87	37,22
3,87	5,31	21,65	1,96	2,34	14,54	0,87	50,54
1,66	7,95	21,65	2,74	0,58	8,48	16,47	59,53
3,87	7,95	7,22	1,96	0,58	8,48	0,87	30,93
3,87	7,95	7,22	3,14	0,58	8,48	0,87	32,11
1,66	7,95	21,65	2,74	0,58	14,54	0,87	49,99
1,66	7,95	21,65	1,96	0,58	1,22	0,87	35,89
3,87	7,95	7,22	2,74	0,58	1,22	16,47	40,05

1,66	7,95	7,22	2,74	0,58	14,54	16,47	51,16
1,66	5,31	21,65	2,74	0,58	1,22	16,47	49,63
1,66	7,95	7,22	3,14	2,34	14,54	0,87	37,72
1,66	5,31	21,65	1,96	0,58	8,48	16,47	56,11
3,87	5,31	21,65	1,96	2,34	1,22	16,47	52,82
1,66	5,31	21,65	2,74	0,58	1,22	0,87	34,03
1,66	7,95	7,22	2,74	0,58	14,54	0,87	35,56
3,87	5,31	7,22	3,14	0,58	14,54	16,47	51,13
1,66	5,31	21,65	3,14	0,58	8,48	16,47	57,29
3,87	7,95	7,22	3,14	0,58	1,22	16,47	40,45
1,66	5,31	7,22	2,74	0,58	8,48	16,47	42,46
1,66	5,31	21,65	1,96	0,58	1,22	16,47	48,85
1,66	7,95	21,65	3,14	0,58	14,54	0,87	50,39
3,87	7,95	21,65	1,96	0,58	1,22	16,47	53,70
3,87	7,95	7,22	2,74	0,58	1,22	0,87	24,45
3,87	5,31	7,22	1,96	2,34	8,48	16,47	45,65
1,66	5,31	7,22	1,96	2,34	1,22	0,87	20,58
1,66	5,31	21,65	3,14	0,58	1,22	16,47	50,03
3,87	5,31	7,22	2,74	0,58	8,48	16,47	44,67
1,66	7,95	7,22	1,96	2,34	14,54	16,47	52,14
3,87	7,95	21,65	1,96	2,34	14,54	16,47	68,78
3,87	5,31	7,22	3,14	0,58	1,22	0,87	22,21
1,66	7,95	7,22	2,74	2,34	14,54	0,87	37,32
3,87	5,31	21,65	3,14	0,58	14,54	16,47	65,56
1,66	5,31	7,22	3,14	2,34	1,22	16,47	37,36
1,66	7,95	21,65	2,74	0,58	1,22	16,47	52,27
1,66	7,95	7,22	2,74	2,34	1,22	16,47	39,60

MAX	MIN
69,96	18,82

Design Summary			
Factors :	7	Replicates :	1
Base runs :	288	Total runs :	288
Base blocks :	1	Total blocks :	1
Number of levels: 2; 2; 2; 3; 2; 3; 2			

4.4.1. Mise en place de la structure ANN

La détermination de l'architecture du réseau est une tâche fondamentale dans le développement du modèle ANN. Il nécessite la sélection du nombre optimal de couches et du nombre de nœuds dans chacune des couches. Il n'y a pas de théorie unifiée pour la détermination d'une architecture ANN optimale, mais elle est généralement réalisée en fixant le nombre de couches et en choisissant le nombre de nœuds dans chaque couche. Il y a toujours deux couches représentant les variables d'entrée et de sortie dans n'importe quel réseau neuronal. Le choix du nombre de couches intermédiaires (masquées) est l'élément le plus crucial de la structure ANN. Comme l'ont montré des recherches antérieures (Shahin et al., 2002), une couche cachée est suffisante pour approximer toute fonction continue, à condition que des poids de connexion suffisants soient donnés.

Plusieurs études au cours de la dernière décennie ont documenté l'influence des paramètres des conduites et du sol sur la défaillance des conduites principales. L'importance du diamètre, de la longueur, de l'âge, du matériau et de l'historique des défaillances ainsi que du type de sol pour prédire le taux de défaillance a été largement établie.

Par conséquent, les sept variables d'entrée (7 nœuds) et un nœud de sortie sont répertoriés comme suit :

Probabilité de défaillance = RNA₇₋₉₋₁ {L D A M TT P DEF}

Dans l'équation, l'étiquette 7-9-1 indique qu'il y a 7 entrées et 1 sortie, avec 9 nœuds cachés.

4.4.2. L'architecture du réseau ANN

Pour la détermination de la couche d'entrée de notre réseau de neurone artificiel, le tableur MINITAB a été choisi, (figure 4.14). Grâce à sa fonctionnalité « plan d'expérience » (Design Of Experiment « DOE »), nous avons établi les différentes combinaisons de nos facteurs, qui ont servi par la suite à la couche d'entrée du réseau. La couche de sortie représente le taux de défaillance en fonction des différentes combinaisons des facteurs.

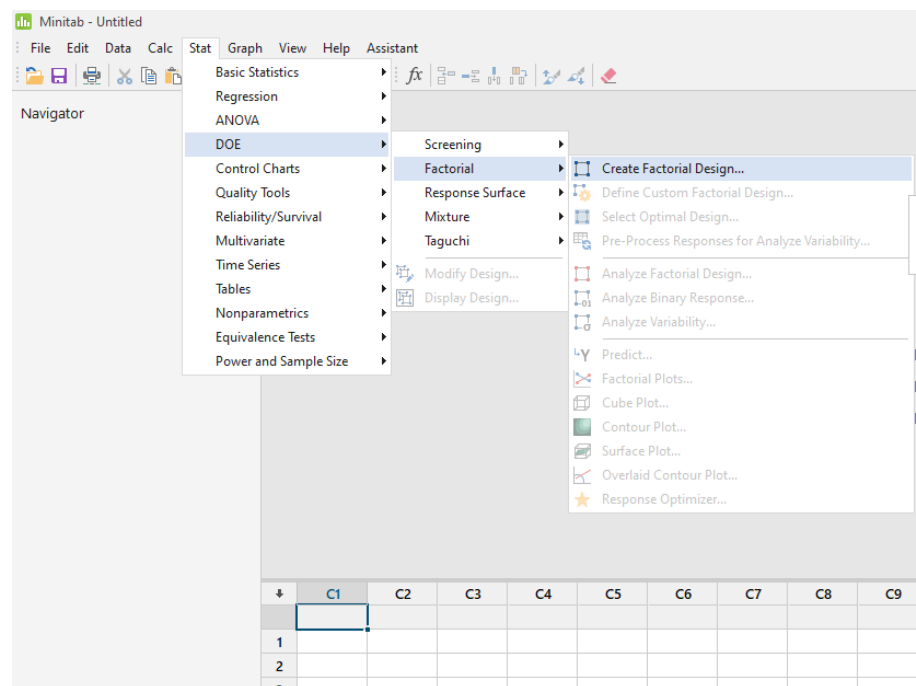


Figure 4.14. Interface du logiciel MINITAB

Cependant pour la couche cachée, l'architecture (7-9-1) représenté sur la figure 4.15 a été choisie suite à sa performance, sa configuration est représentée dans le tableau 4.14. Nous avons utilisé Levenberg-Marquardt comme algorithme d'apprentissage car il converge rapidement vers les cibles par rapport aux autres algorithmes.

Tableau 4.14. La meilleure configuration de notre RNA

Type de réseau	Rétro-propagation du gradient d'erreur (Feed forward backpropagation network)
Algorithme d'apprentissage	Levenberg–Marquardt (trainlm)
Fonction de transfert pour la couche cachée	Fonction non linéaire (tansig)
Fonction de transfert pour la couche de sortie	Fonction linéaire (purelin)
Fonction de performance	Erreur quadratique moyenne « MSE (Mean square error) »
Nombre de neurones de la couche d'entrée	07
Nombre de neurones de couche cachée	09
Nombre de neurones de la couche de sortie	01

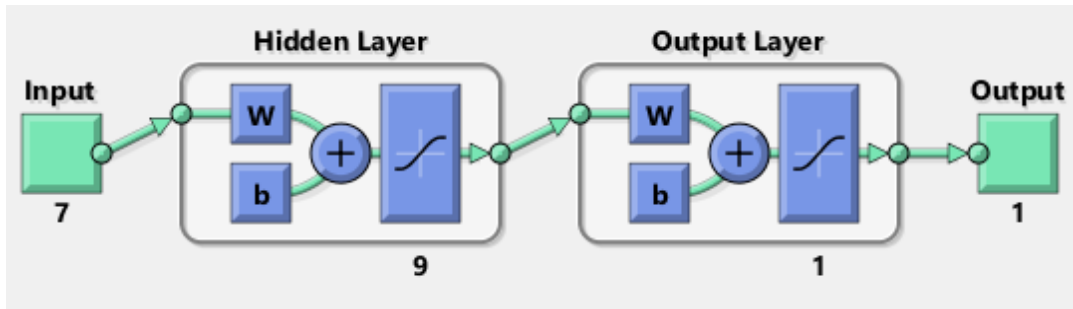


Figure 4.15. La structure du ANN

Le nombre de neurones d'entrée et de sortie était déjà fixé. Pour chaque ensemble de neurones cachés, le réseau a été formé en mode batch pour minimiser l'erreur quadratique moyenne au niveau de la couche de sortie. Le modèle a ensuite été testé pour ses propriétés de généralisation afin de prédire le taux de défaillance.

Cette section montre les résultats de la prévision de défaillances dans les réseaux de distribution d'eau potable obtenus par les diverses combinaisons de données d'entraînement en utilisant la technique ANN. Tous les calculs ont été effectués à l'aide de MS Excel 2019, et le programme de réseaux de neurones artificiels a été développé à l'aide de MATLAB 2019 (figure 4.16). Le modèle ANN a été développé en utilisant ANN Toolbox dans le logiciel MATLAB (Toolbox de MATLAB® R2019). Il a été appliqué à l'aide d'un algorithme de rétro-propagation avec un taux d'apprentissage adaptatif lors de la recherche des meilleurs paramètres pour la construction d'un modèle final permettant de prédire la défaillance des conduites.

```

583
584 - [E,N]=size(T);
585 - P0=P(1:288,:);
586 - T0=T(1:288,:);
587 - [p0n,minP0,maxP0,t0n,minT0,maxT0] = premmx(P0,T0);
588 - PIn=(p0n)';
589 - TIn=(t0n)';
590 - P1=PIn(1:288,:);
591 - t1=1:288;
592 - T1=TIn(1:288,:);
593 - T10=T(1:288,:);
594
595 % TEST
596 - [R] = size(P1n);
597 %itrat = [5:8:R 1:28:R];
598 - test.P = P1n(244:288,:);
599 - test.T = T1n(244:288,:);
600 %val.P = P1n(37:54,:);
601 %val.T = T1n(37:54,:);
602 - net = newff(minmax(P1),[7 9 1],('tansig' 'tansig' 'purelin' ),'trainlm');
603 - net.trainParam.epochs =100;
604 - net.trainParam.goal= 0.00000001;
605 - net = init(net);
606 - [net,tr]=train(net,P1,T1,[],[],test);

```

Figure 4.16. Partie du programme Matlab

Le modèle ANN a été réalisé en utilisant des données aléatoires avec 70% utilisés pour la formation, 20% pour les tests et les 10% restants utilisés pour la validation. Une fois la formation et les tests terminés, les 10 % restants des données ont été exécutés lors de la validation. La validation a été effectuée à l'aide de l'architecture ANN créée à partir de la formation et des tests.

Cependant, l'apprentissage du réseau de neurone artificiel (7-9-1) avec les fonctions d'activation (tansig et purelin) et l'algorithme de Levenberg-Marquardt, a donné des résultats très satisfaisants. Les courbes de la figure 4.17 et de la figure 4.18 confirment la puissance de notre RNA.

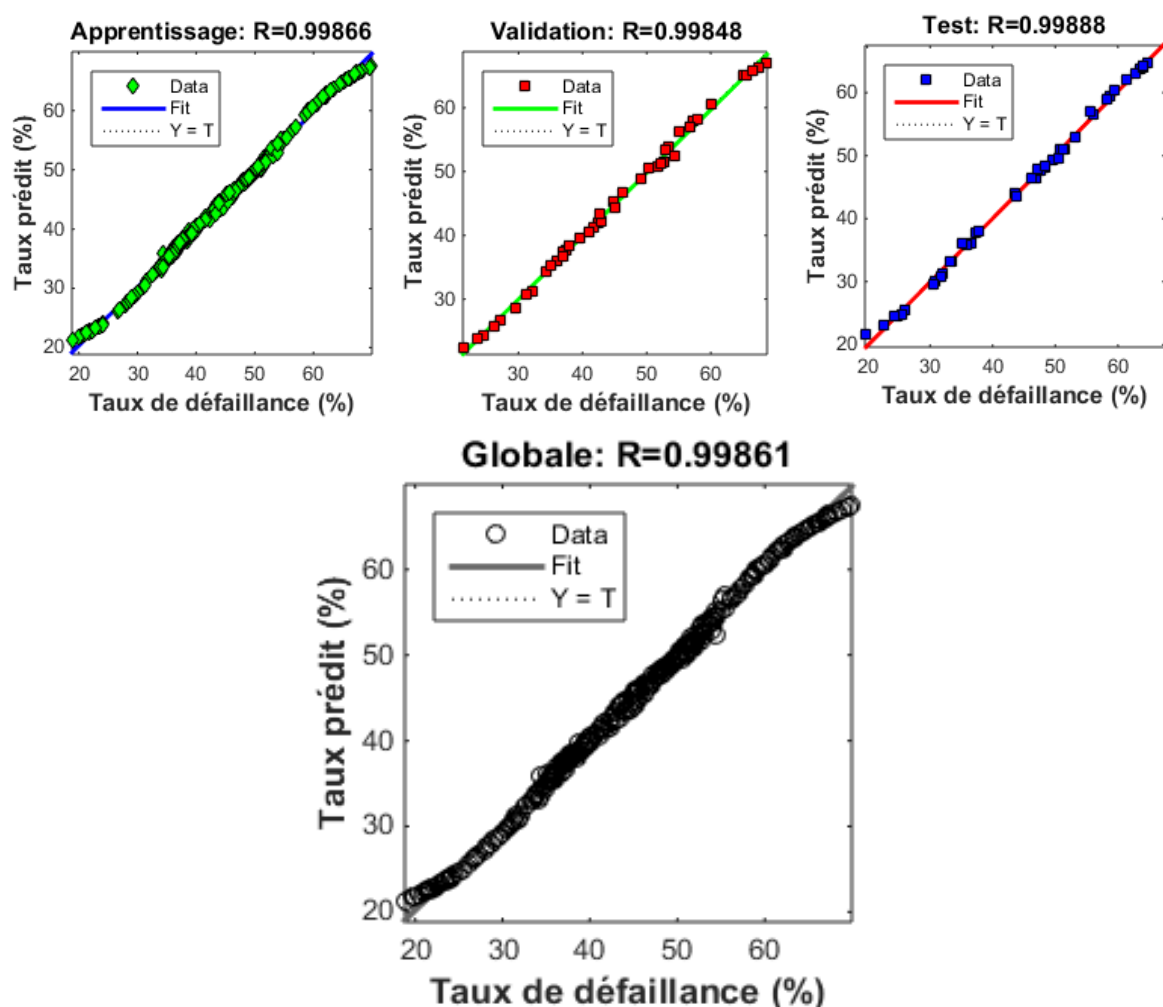


Figure 4.17. Coefficients de corrélation du ANN maintenu.

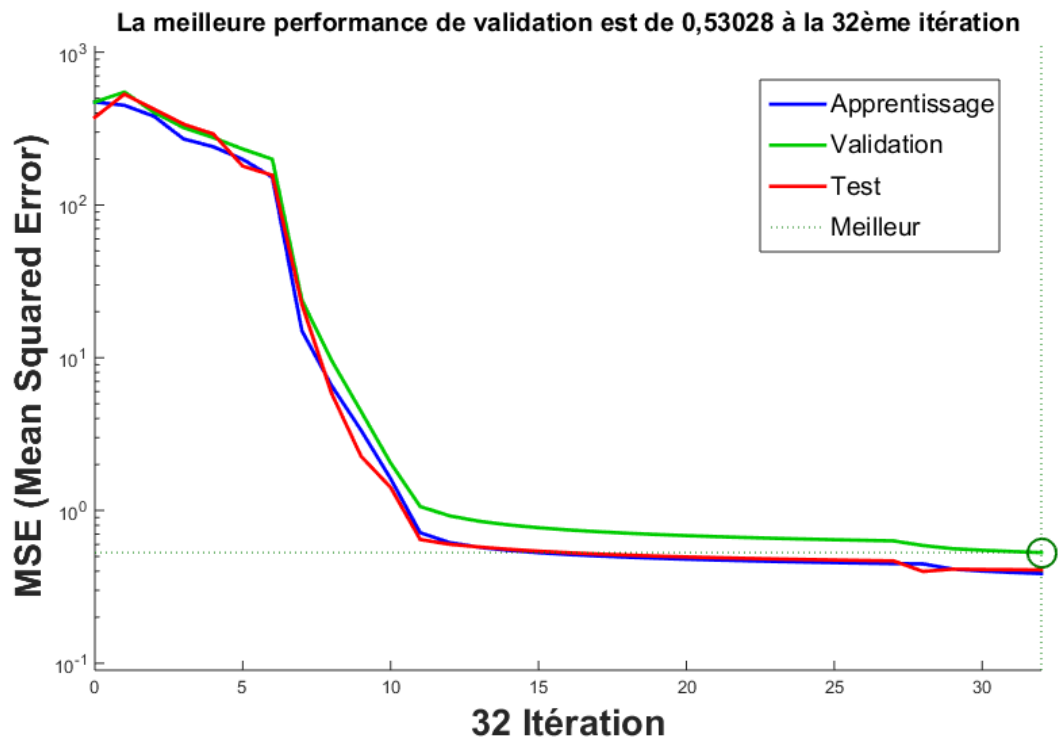


Figure 4.18. Performance du ANN maintenu.

Les résultats du ANN (7-9-1) sont très satisfaisants, car le MSE est très proches de zéro et tous les coefficients de corrélation sont très proches de cent pour cent, ce qui démontre et confirme que notre ANN est un outil d'aide à la décision très puissant.

Ensuite, et après avoir entraîné le modèle de prédiction des pertes d'eau dans les canalisations en utilisant diverses quantités de données historiques, les prédictions des modèles ont été testées sur un ensemble de données de test indépendant de 10 ans. L'application de notre programme a été testée sur une étude de cas d'un quartier de la ville d'Annaba (figure 4.19). Le réseau de distribution Ce quartier dessert environ 4611 abonnés et avec un linéaire estimé à 17251 m.

La figure 4.19 illustre quelques résultats du modèle hydraulique. Les nœuds en rouge sont les nœuds qui présentent une pression plus de 6 bars donc une pression qui dépasse les limites de bon fonctionnement du réseau.



Figure 4.19. La simulation hydraulique du réseau étudié (Epanet2®)

Nous avons utilisé une grande variété de variables susceptibles d'affecter les défauts dans les conduites d'AEP, telles que la longueur, le diamètre de la conduite, l'âge, le type de matériaux, la pression, et de nombreuses autres caractéristiques potentiellement importantes.

Quelques résultats de notre étude sont exposés dans le tableau 4.15 et le reste des résultats sont présentés dans l'Annexe A3.

Tableau 4.15. Quelques Résultats de la probabilité de défaillance

ID Conduite	Longueur (m)	Diamètre (mm)	Age	Type Matériaux	Type de Trafic	Pression	Nombre de Fuite	Probabilité de Défaillance
948	250,90	200	41	PVC	Elevé	4,34	1	63,89
	3,87	7,95	21,65	3,13	2,34	8,48	16,47	
949	66,34	200	41	PVC	Elevé	3,34	0	46,08
	1,66	7,95	21,65	3,13	2,34	8,48	0,87	
950	17,03	63	41	PVC	Non Elevé	3,29	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
951	112,03	63	41	PVC	Non Elevé	3,54	1	57,28
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	

952	24,59	63	41	PVC	Non Elevé	3,99	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
953	72,75	63	41	PVC	Non Elevé	3,24	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
954	26,94	63	41	PVC	Non Elevé	3,94	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
956	75,70	63	41	PVC	Non Elevé	3,64	1	57,28
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
959	6,55	90	41	PVC	Non Elevé	3,69	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
960	177,00	200	41	PVC	Non Elevé	3,59	0	44,32
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
961	83,89	90	41	PVC	Non Elevé	3,29	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
963	67,57	63	41	PVC	Non Elevé	3,79	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
964	69,30	63	36	PVC	Non Elevé	4,09	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
965	85,22	63	36	PVC	Non Elevé	4,39	1	57,28
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
966	36,87	63	36	PVC	Non Elevé	3,99	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
967	47,78	63	36	PVC	Non Elevé	4,39	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
968	39,29	63	41	PVC	Non Elevé	3,24	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
969	49,56	63	41	PVC	Non Elevé	3,54	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
970	35,76	63	36	PVC	Non Elevé	3,54	1	57,28
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
971	75,40	63	36	PVC	Non Elevé	4,29	1	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	

972	79,93	63	36	PVC	Non Elevé	4,19	1	57,28
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
973	21,02	63	36	PVC	Non Elevé	4,59	1	57,28
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
974	44,55	90	36	PVC	Non Elevé	4,19	1	57,28
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
975	6,38	90	36	PVC	Non Elevé	4,69	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
976	22,50	63	36	PVC	Non Elevé	4,64	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
977	52,29	63	36	PVC	Non Elevé	4,14	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	

D'après AWWA (*American Water Works Association*, 2012) si le pourcentage dépasse les 50% donc il peut avoir un risque d'une défaillance dans cette conduite d'AEP. Les résultats illustrés dans la figure 4.20 montre qu'il y a plusieurs conduites d'AEP ont dépassés le seuil de 50%, donc il y a un grand risque de défaillance à court terme.

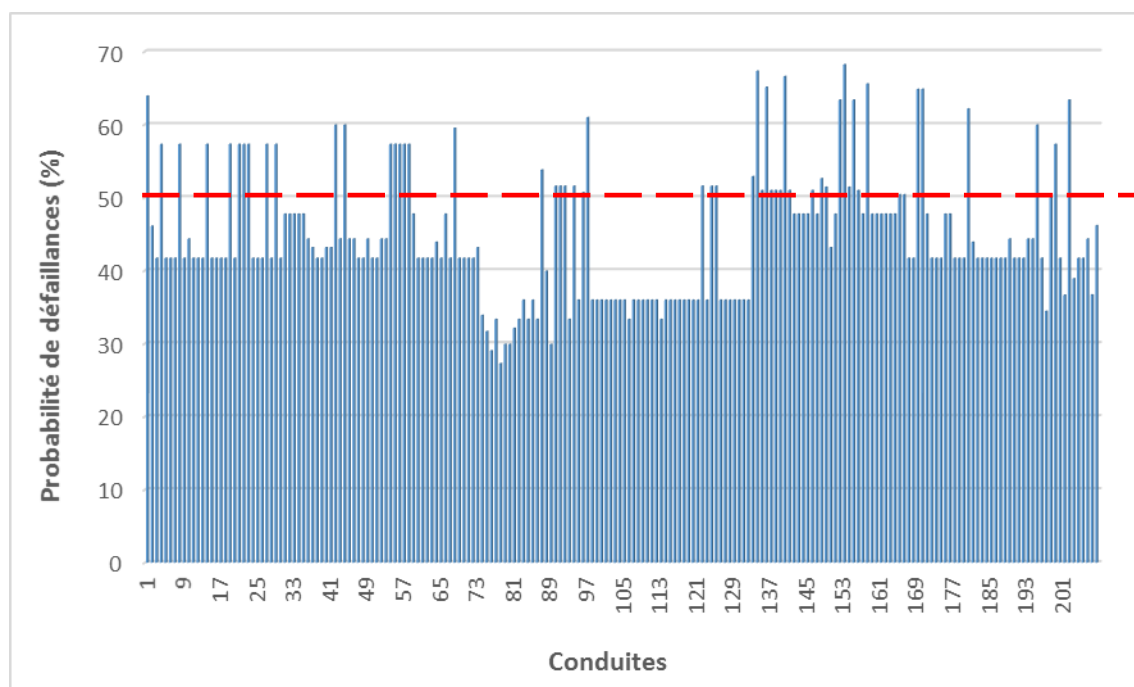


Figure 4.20. Résultat de la probabilité de défaillance

Dans l'ensemble, si on compare la figure 4.21 et 4.22, nous montrons le rôle important que joue les anciens enregistrements de rupture (anciennes défaillances) dans le développement de modèles de prédiction de défaillance dans les conduites d'AEP. Par exemple, les résultats de prédiction de défaillance (figure 4.21) est presque identique que l'emplacement des fuites réparées sur le réseau choisi pour l'année 2024 (figure 4.22). Donc, la réparation des fuites dans le réseau a un rôle majeur dans la probabilité d'une nouvelle défaillance, car une fuite c'est le point faible du réseau.

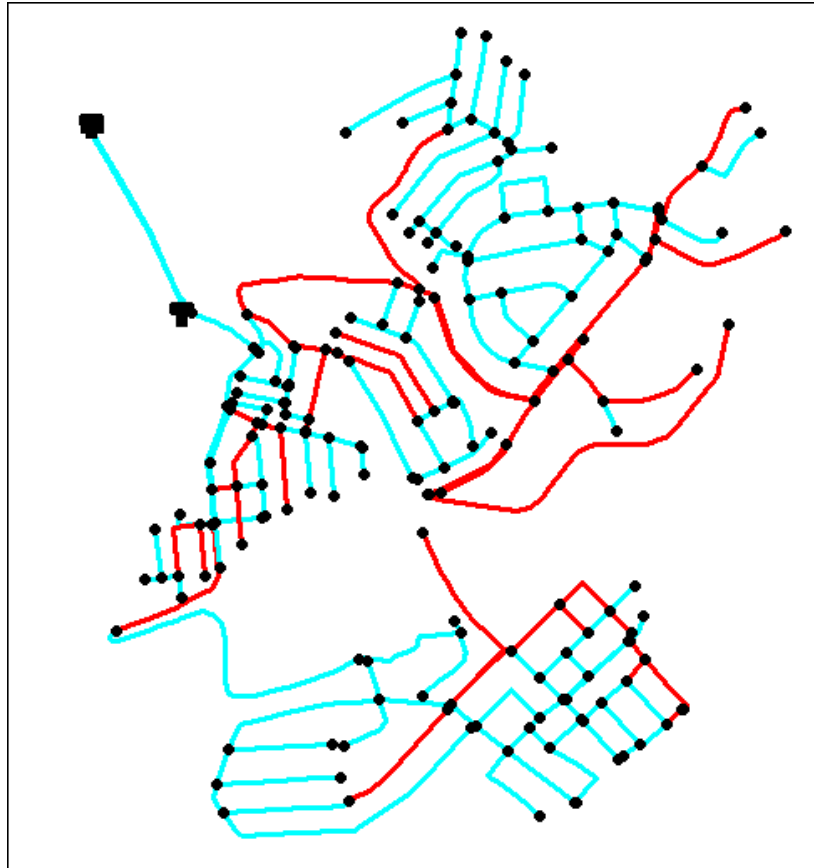


Figure 4.21. Présentation de la prédiction de défaillance dans un quartier de la ville d'Annaba

La figure 4.22 présente le nombre total de la prédiction de défaillance dans le réseau de distribution du quartier choisi de la ville d'Annaba qui est de 55 défaillances. On peut donc conclure que la défaillance des conduites dépend principalement du nombre des anciennes défaillances et la pression dans le réseau.

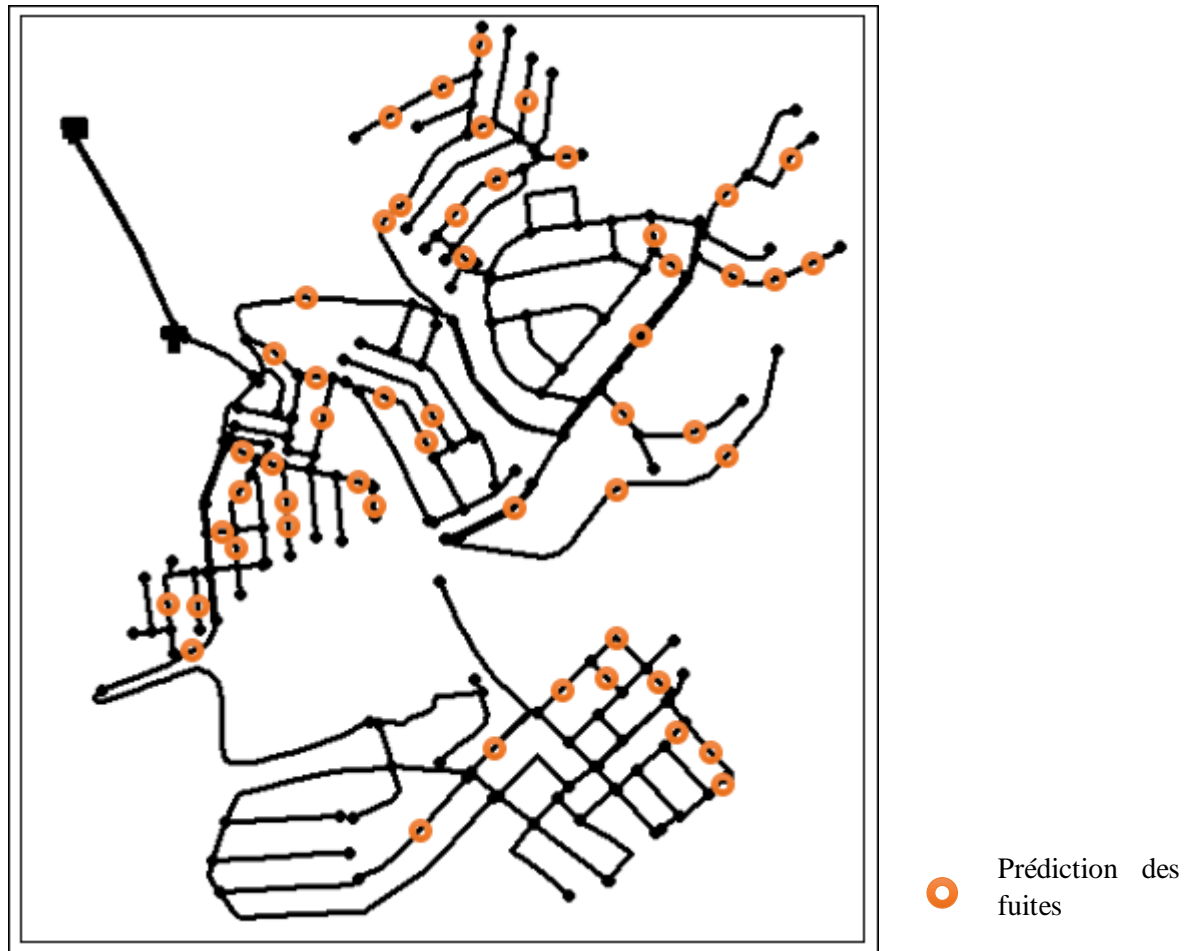


Figure 4.22. Emplacement de la prédiction des fuites

4.5. Résultats de la pondération des alternatives selon la méthode FAHP

Les meilleures alternatives pour la prédiction des pertes d'eau dans le réseau de distribution d'eau potable sont choisies en calculant les poids à l'aide de la méthode Fuzzy-AHP. Cette approche a été appliquée pour la sélection des alternatives, car nous avons trouvé presque les mêmes résultats de pondération des critères lors de l'application des deux méthodes (AHP et Fuzzy-AHP). Les étapes de calcul sont similaires à celles des critères et des sous-critères dans le premier niveau de la structure hiérarchique. Les résultats de la pondération et le classement final sont présentés dans le Tableau 4.16.

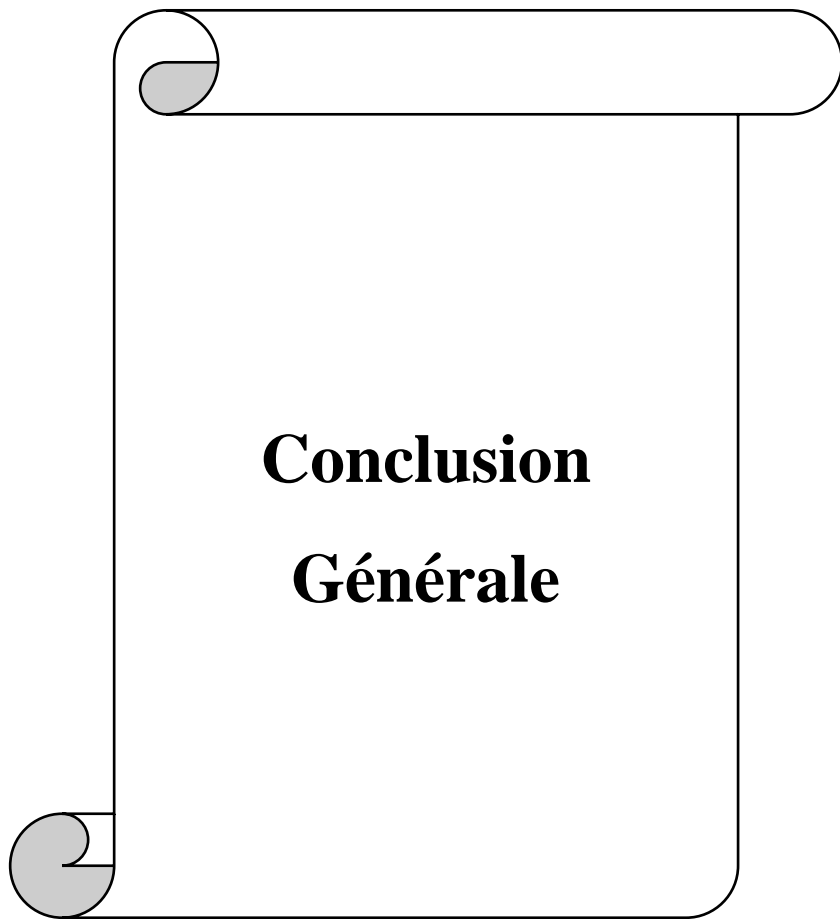
Tableau 4.16. Pondération et classement final des alternatives selon la méthode FAHP

Alternatives	Moyenne géométrique			Poids flou			M_i	Normalisation	Rang
	l	m	μ	l	m	μ			
Alt.1	0,794	1,059	1,487	0,037	0,065	0,126	0,076	0,068	7
Alt.2	0,481	0,640	0,853	0,022	0,040	0,073	0,045	0,040	8
Alt.3	0,412	0,533	0,728	0,019	0,033	0,062	0,038	0,034	9
Alt.4	0,224	0,270	0,384	0,010	0,017	0,033	0,020	0,018	12
Alt.5	0,347	0,465	0,655	0,016	0,029	0,056	0,034	0,030	10
Alt.6	0,269	0,349	0,479	0,012	0,022	0,041	0,025	0,022	11
Alt.7	0,976	1,476	2,029	0,045	0,091	0,173	0,103	0,091	6
Alt.8	1,381	2,027	2,759	0,064	0,125	0,235	0,141	0,125	3
Alt.9	2,994	3,874	4,714	0,138	0,239	0,401	0,260	0,230	1
Alt.10	1,033	1,421	2,084	0,048	0,088	0,177	0,104	0,092	5
Alt.11	1,040	1,490	2,136	0,048	0,092	0,182	0,107	0,095	4
Alt.12	1,806	2,579	3,337	0,083	0,159	0,284	0,176	0,156	2
Σ	11,756	16,182	21,644				1,128	1,000	
<i>Inverse</i>	0,085	0,062	0,046						
<i>Increasing order</i>	0,046	0,062	0,085						

Selon le tableau 4.16, les alternatives « Réhabilitation des réseaux de distribution (Alt9) », « Gestion et contrôle de la pression (Alt12) » et « Réparation rapide des fuites d'eau (Alt8) » présentent les meilleures solutions pour réduire les PE. Pour le cas des alternatives, Kadenge et al., (2020) ont constaté que l'alternative la plus préférable est le remplacement des canalisations détériorées (7,33 %) tandis que l'alternative la moins préférable est le zonage du réseau (5,51%). D'autre part, Zyoud et al., (2016) ont montré que les trois options, « gestion de la pression », « création de zones de comptage de district » et « utilisation de techniques avancées », ont reçu une priorité élevée dans le classement des alternatives.

Sur la base des résultats de cette étude, certaines recommandations pratiques aux gestionnaires des services de l'eau potable devraient être envisagées :

- Utilisation d'équipements spécialisés pour localiser les fuites ;
- Mise en œuvre de programmes de maintenance préventive pour identifier et réparer les fuites avant qu'elles ne deviennent graves ;
- Installation des réducteurs de pression à des endroits stratégiques pour réduire la pression dans des zones spécifiques du réseau ;
- Division du réseau en zones avec des niveaux de pression contrôlés ;
- Remplacement des canalisations vieillissantes ou endommagées par des matériaux plus durables.



**Conclusion
Générale**

Conclusion Générale

La réduction des pertes d'eau potable représente un défi crucial pour la durabilité des ressources en eau et la préservation de l'environnement. L'application de méthodes de décision multicritères (MCDM) offre une approche systématique qui permet d'évaluer les diverses dimensions de cette problématique, allant des aspects économiques aux considérations sociales et environnementales. En intégrant ces critères dans le processus décisionnel, il est possible de sélectionner des solutions qui non seulement minimisent les pertes d'eau, mais favorisent également un développement durable à long terme.

Cette étude vise à fournir une méthodologie d'aide à la décision pour identifier les critères, les sous-critères critiques et les meilleures alternatives pour réduire les PE dans le réseau de distribution d'eau de la ville d'Annaba (Algérie). La méthodologie développée intègre deux méthodologies MCDM (AHP et Fuzzy-AHP). La pondération des critères est souvent abordée à l'aide du processus de hiérarchie analytique (AHP) en raison de sa simplicité. Cependant, l'AHP s'appuie fortement sur un jugement subjectif, conduisant à une fiabilité limitée. Plusieurs chercheurs ont tenté de surmonter ces problèmes en intégrant l'AHP à d'autres méthodologies, notamment la théorie floue,

L'évaluation est basée sur 6 critères, 26 sous-critères et 12 alternatives. Tous ces éléments ont été choisis lors d'une discussion, réunissant trente experts dans le domaine de la gestion des services d'eau potable. Globalement, les résultats concluent que deux critères importants (économique et technique) doivent être considérés comme critères principaux pour diminuer les taux élevés de PE. En comparant les sous-critères, il a été constaté que le calcul des pondérations globales des sous-critères indiquait que les coûts d'investissement (14,43%), le taux de pertes physiques (10,48%) et les coûts d'exploitation (10,47%) sont les sous-critères les plus influents sur l'augmentation des taux des pertes d'eau. Ensuite, les poids des alternatives ont été calculés par la méthode Fuzzy-AHP pour classer les meilleures solutions parmi les douze alternatives proposées par les différents experts.

Ensuite, un cadre intégré entre AHP et le réseau de neurone artificiel (ANN) a été développé pour but de prédire les PE. Dans cette étape, nous avons utilisé seulement sept sous-critères et

16 indicateurs qui ont des données quantitatives et une grande influence sur l'existence et le développement des PE dans les réseaux de distribution d'eau potable pour le cas de la ville d'Annaba.

En conclusion, bien que cette étude se soit focalisée sur la recherche des meilleures alternatives adaptées à la réduction des taux élevés de PE dans le RDE de la ville d'Annaba, il convient de noter que les critères et alternatives considérés pourraient être appliqués à toutes les autres villes algériennes. Pour les travaux futurs, d'autres méthodes MCDM peuvent être combinées à la méthodologie proposée dans cette étude pour augmenter la précision des résultats obtenus et combler ses lacunes. Par exemple, l'intégration de l'analyse des meilleures et pires solutions idéales (TOPSIS) ou la méthode VIKOR. Ainsi, la composition de cette méthodologie avec un système d'information géographique (SIG) permet de prendre des décisions plus complètes et mieux visibles. Les résultats peuvent être présentés de manière visuelle et facile à comprendre à l'aide du SIG. Par conséquent, l'élargissement de nombreux critères et sous-critères non abordés dans la présente étude pourrait influencer le choix des meilleures alternatives pour la réduction de PE. Une analyse comparative entre les résultats obtenus avec ceux des autres méthodes MCDM permettrait d'améliorer la compréhension de la robustesse et de la fiabilité des différentes méthodologies. De plus, l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle pourrait améliorer l'exactitude et la précision du processus de prise de décision.

Les tendances futures dans la gestion des pertes d'eau s'orientent vers des solutions innovantes basées sur les technologies numériques. La détection prédictive des fuites, comme l'explique Farah et Shahrour (2024), repose sur des algorithmes d'apprentissage automatique capables d'identifier les anomalies avant qu'elles ne causent des dommages majeurs. Cette approche nécessite un investissement dans des infrastructures de capteurs et une gestion efficace des données pour garantir leur fiabilité. Par ailleurs, l'optimisation dynamique des réseaux, abordée par Alvisi. et al., (2021), permet de réduire les pertes physiques en ajustant la pression en temps réel, tout en préservant l'intégrité des conduites. Enfin, Velayudhan, et al., (2022) ont considéré l'IoT comme un outil important pour la surveillance et l'automatisation qui permet un contrôle précis des données sur les ressources en eau. Pour maximiser ces avancées, il est recommandé de renforcer la formation des professionnels aux outils numériques, d'encourager les collaborations entre chercheurs et gestionnaires de réseaux, et d'investir dans des infrastructures robustes et interopérables. Ces actions contribueront à une gestion plus durable et résiliente des ressources hydriques.

Références bibliographiques

1. Abdelkader, E. M., Zayed, T., & Elshaboury, N. (2024). A novel hybrid fuzzy analytical hierarchy process–game theory model for prioritizing factors affecting the deterioration of water pipelines. *Applied Water Science*, 14(12), 1-26.
2. ADE, (2024). Rapport Annuel d'exploitation, Unité d'Annaba
3. Ahmad, R., Gabriel, H. F., Alam, F., Zarin, R., Raziq, A., Nouman, M., ... & Liou, Y. A. (2024). Remote sensing and GIS based multi-criteria analysis approach with application of AHP and FAHP for structures suitability of rainwater harvesting structures in Lai Nullah, Rawalpindi, Pakistan. *Urban Climate*, 53, 101817.
4. Al-Barqawi, H., & Zayed, T. (2006). Condition rating model for underground infrastructure sustainable water mains. *J. Perform. Constr. Facil.*, 202, 126–135
5. Al-Barqawi, H., & Zayed, T. (2008). Infrastructure management: Integrated AHP/ANN model to evaluate municipal water mains' performance. *Journal of Infrastructure Systems*, 14(4), 305-318.
6. Al-washali, T., Sharma, S., & Kennedy, M. (2016). Methods of assessment of water losses in water supply systems: a review. *Water Resources Management*, 30, 4985-5001.
7. Alegre, H., Baptista, J. M., Cabrera Jr, E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., ... & Parena, R. (2016). *Performance indicators for water supply services*. IWA publishing.
8. Ali, Z., Dahri, N., Vanclooster, M., Mehmandoostkotlar, A., Labbaci, A., Ben Zaied, M., & Ouessar, M. (2023). Hybrid Fuzzy AHP and Frequency Ratio Methods for Assessing Flood Susceptibility in Bayech Basin, Southwestern Tunisia. *Sustainability*, 15(21), 15422.
9. Asnaashari, A., McBean, E. A., Gharabaghi, B., & Tutt, D. (2013). Forecasting watermain failure using artificial neural network modelling. *Canadian Water Resources Journal*, 38(1), 24-33.
10. Alvisi, S., & M. Franchini. (2010). Comparative Analysis of Two Probabilistic Pipe Breakage Models Applied to a Real Water Distribution System. *Civil Engineering and Environmental Systems* 27 (1): 1–22
11. Alvisi, S., Franchini, M., & Todini, E. (2020). Extending the global-gradient algorithm to solve pressure-control valves. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(8), 04020055.
12. Amara, B. N., Aissa, D. E., Abbes, K., & Saadi, S. (2024). Application of hybrid fuzzy Analytic Hierarchy Process AHP model for mapping alteration zones in Guelma basin; Eastern of Algeria. In *2024 IEEE Mediterranean and Middle-East Geoscience and Remote Sensing Symposium (M2GARSS)* (pp. 196-200). IEEE.
13. Ananda, J., & Herath, G. (2009). A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning. *Ecological economics*, 68(10), 2535-2548.

14. Arabameri, A. (2014). Zoning Mashhad Watershed for artificial recharge of underground aquifers using topsis model and GIS technique. *Global Journal of human-social science: B Geography, Geo-Sciences. Environ. Disaster Manag*, 14, 45-53.
15. Asnaashari, A., E. A. McBean, B. Gharabaghi, and D. Tutt. (2013). Forecasting Watermain Failure Using Artificial Neural Network Modelling. *Canadian Water Resources Journal* 38 (1): 24–33
16. AWWA. (2012). Buried No Longer: Confronting America's Water Infrastructure Challenge. 37.
17. Barradas, N. P., Vieira, A., Felizardo, M., & Matos, M. (2025). Nuclide identification of radioactive sources from gamma spectra using artificial neural networks. *Radiation Physics and Chemistry*, 112692.
18. Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A., & Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European journal of Operational research*, 200(1), 198-215.
19. Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with applications*, 39(17), 13051-13069.
20. Boudoukha, A. (2014). Gestion des ressources en eau en Algérie : état des lieux et perspectives. *Revue des Sciences de l'Eau*, 27(2), 159-172
21. Boukhari, S., Mrad, D., Dairi, S., Khoualdia, T. & Djebbar, Y. (2023). Utilizing a combined delphi-fahp-topsis technique to assess the effectiveness of the water supply service in Algeria. *Socio-Economic Planning Sciences*, 101736.
22. Boukhari, S, Kertous, M., Nassiri, A., & Maliki, S. B. (2024a). Estimation of willingness to pay for improved water supply service: case of Algerian households. *Water Supply*, 24 (6), 2024–2038.
23. Boukhari, S., Mrad, D., & Dairi, S. (2024b). Performance indicators and analytic hierarchy process to evaluate water supply services management in Algeria. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73 (5), 1013–1029.
24. Boutabba, K., Bouziane, M. T., & Bouamrane, A. (2014). Aide à la décision pour l'optimisation de la Gestion des réseaux d'alimentation en eau potable. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, (20).
25. Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). Note—A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). *Management science*, 31(6), 647-656.
26. Britton, T. C., Stewart, R. A., & O'Halloran, K. R. (2013). Smart metering: enabler for rapid and effective post meter leakage identification and water loss management. *Journal of Cleaner Production*, 54, 166-176.
27. Buckley, J.J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis, *Fuzzy Sets and Systems*, 17(3): 233-247.
28. Calabrese A., Costa R. & Menichini T. (2013). Using Fuzzy AHP to manage Intellectual Capital assets: An application to the ICT service industry. *Expert Systems with Applications* 40(9), 3747-55.
29. Canco, I., Kruja, D., & Iancu, T. (2021). AHP, a Reliable Method for Quality Decision Making: A Case Study in Business. *Sustainability* 13: 13932.

30. Carpitella, S. (2019). Multi-criteria decision methods to support the maintenance management of complex systems (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
31. Chen, W., et al. (2021). Hybrid LSTM-ANN Models for Pipe Failure Prediction. *Journal of Hydrology*, 603, 126931.
32. Cinelli, M., Coles, S. R., & Kirwan, K. (2014). Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological indicators*, 46, 138-148.
33. Claustrioux J.J., & Delvaux A. (1994). Traitement de données par le logiciel Minitab. *Notes Stat. Inform. (Gembloux)* 94/1, 20 p.
34. Colombo, A. F., Lee, P., & Karney, B. W. (2009). A selective literature review of transient-based leak detection methods. *Journal of hydro-environment research*, 2(4), 212-227.
35. Dağdır, B. D., & Özkan, B. (2024). A comprehensive evaluation of a company performance using sustainability balanced scorecard based on picture fuzzy AHP. *Journal of Cleaner Production* 435: 140519.
36. Dawood, T., Zhu, Z., & Zayed, T. (2018). Computer Vision–Based Model for Moisture Marks Detection and Recognition in Subway Networks. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 32(2), 04017079.
37. Dawood, T., Elwakil, E., Novoa, H. M., & Delgado, J. F. G. (2021). Toward urban sustainability and clean potable water: Prediction of water quality via artificial neural networks. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125266.
38. Demirel, T., Demirel, N. Ç., & Kahraman, C. (2008). Fuzzy analytic hierarchy process and its application. *Fuzzy multi-criteria decision making: Theory and applications with recent developments*: 53-83.
39. Deveci, M., Mishra, A. R., Gokasar, I., Rani, P., Pamucar, D., & Özcan, E. (2022). A decision support system for assessing and prioritizing sustainable urban transportation in metaverse. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 31(2), 475-484.
40. Diaby, V., Campbell, K., & Goeree, R. (2013). Multi-criteria decision analysis (MCDA) in health care: a bibliometric analysis. *Operations research for health care*, 2(1-2), 20-24.
41. Diez, F. J., Chico-Santamarta, L., Correa-Guimaraes, A., Martínez-Rodríguez, A., & Navas-Gracia, L. M. (2022). Neural simulation of a solar thermal system in low temperature. In *Artificial Neural Networks for Renewable Energy Systems and Real-World Applications* (pp. 69-112). Academic Press.
42. Doumpos, M., & Zopounidis, C. (2014). *Multicriteria analysis in finance*. New York: Springer.
43. Durbach, I. N., & Stewart, T. J. (2012). Modeling uncertainty in multi-criteria decision analysis. *European journal of operational research*, 223(1), 1-14.
44. Edwards, S. C. (2024). *Path Planning, Estimation, and Control in the Presence of Intermittent State Feedback*. University of Florida.
45. Ennaouri, I. (2010). *Modélisation de la dégradation hydraulique et structurale des réseaux sanitaires et pluviaux* (Doctoral dissertation, École Polytechnique de Montréal).

46. Essa, F. A., Abd Elaziz, M. E., Shanmugan, S., & Elsheikh, A. H. (2022). Artificial neural network and desalination systems. In *Artificial Neural Networks for Renewable Energy Systems and Real-World Applications* (pp. 159-187). Academic Press.
47. Farley, M., & Trow, S. (2003). *Losses in water distribution networks*. IWA publishing.
48. Farah, E., & Shahrour, I. (2024). Water Leak Detection: A Comprehensive Review of Methods, Challenges, and Future Directions. *Water*, 16(20), 2975.
49. Fontana, M. E., & Morais, D. C. (2013). Using Promethee V to select alternatives so as to rehabilitate water supply network with detected leaks. *Water resources management*, 27, 4021-4037.
50. García, J., Leiva-Araos, A., Diaz-Saavedra, E., Moraga, P., Pinto, H., & Yepes, V. (2023). Relevance of Machine Learning Techniques in Water Infrastructure Integrity and Quality: A Review Powered by Natural Language Processing. *Applied Sciences*, 13(22), 12497.
51. Geem, Z. (2003). Window-based decision support system for the water pipe condition assessment using artificial neural network. *Conf. Proc., World Water and Environmental Resources Congress, ASCE, New York*, 23–26
52. Ghorbani, M. K., Hamidifar, H., Skoulikaris, C., & Nones, M. (2022). Concept-based integration of project management and strategic management of rubber dam projects using the SWOT–AHP method. *Sustainability* 14(5): 2541.
53. Ghorpade, A., Sinha, A. K., & Kalbar, P. P. (2021). Drivers for intermittent water supply in India: critical review and perspectives. *Frontiers in Water* 3: 696630.
54. Govindan, K., Aditi, Dhingra Darbari, J., Kaul, A., & Jha, P. C. (2021). Structural model for analysis of key performance indicators for sustainable manufacturer–supplier collaboration: A grey-decision-making trial and evaluation laboratory-based approach. *Business Strategy and the Environment*, 30(4), 1702-1722.
55. Guillén-Mena, V., Quesada-Molina, F., Astudillo-Cordero, S., Lema, M., & Ortiz-Fernández, J. (2023). Lessons learned from a study based on the AHP method for the assessment of sustainability in neighborhoods. *MethodsX*, 11, 102440.
56. Hajkovicz, S., & Collins, K. (2007). A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management. *Water Resour Manage* 21, 1553–1566.
57. Halder, S., Karmakar, S., Maiti, P., Roy, M. B., & Roy, P. K. (2024). Application of machine learning and Fuzzy AHP for identification of suitable groundwater potential zones using field based hydrogeophysical and soil hydraulic factors in a complex hydrogeological terrain. *Groundwater for Sustainable Development*, 27, 101329.
58. Harvey, R., McBean, E. A., & Gharabaghi, B. (2014). Predicting the timing of water main failure using artificial neural networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(4), 425-434.
59. Hasan, M. M., Talha, M., Akter, M. M., Ferdous, M. T., Mojumder, P., Roy, S. K., & Nasher, N. R. (2025). Assessing the performance of machine learning and analytical hierarchy process (AHP) models for rainwater harvesting potential zone identification in hilly region, Bangladesh. *Journal of Asian Earth Sciences*: X, 13, 100189.
60. Hassoun Nedjar, N., Djebbar, Y., & Djemili, L. (2023). Application of the analytical hierarchy process for planning the rehabilitation of water distribution networks. *Arab Gulf Journal of Scientific Research*, 41(4), 518-538. <https://doi.org/10.1108/AGJSR-07-2022-0110>

61. Heaton, J., Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2018). Deep learning: The mit press 2016 800 pp isbn: 0262035618. Genetic programming and evolvable machines, 19(1-2), 305-307.
62. Huang, Q. (2022). Selecting sustainable renewable energy-powered desalination: an MCDM framework under uncertain and incomplete information. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1-18.
63. Huang, H., Zhang, L., Liu, Z., & Sutherland, J. W. (2011). Multi-criteria decision making and uncertainty analysis for materials selection in environmentally conscious design. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 52, 421-432.
64. Hwang, C. L., Yoon, K., Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey*, 58-191.
65. Jafar, R., Shahrour, I., & Juran, I. (2010). Application of Artificial Neural Networks (ANN) to model the failure of urban water mains. *Mathematical and Computer Modelling*, 51(9-10), 1170-1180.
66. James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning* (Vol. 112, No. 1). New York: springer.
67. Kabir G. & Sumi R. S. (2014). Power substation location selection using fuzzy analytic hierarchy process and PROMETHEE: A case study from Bangladesh. *Energy* 72, 717-30.
68. Kadenge, M. J., Masanja, V. G., & Mkandawile, M. J. (2020). Optimisation of water loss management strategies: multi-criteria decision analysis approaches.
69. Kadengea, M. J., Mkandawile, M., & Masanja, V. G. (2020). Multi-criteria decision making and numerical optimization approaches for optimizing water loss management strategies in water distribution system a case of urban water supply and sanitation authorities in Tanzania. *I.J. Mathematical Sciences and Computing*, 1, 10-24.
70. Kahraman, C. (2024). Proportional picture fuzzy sets and their AHP extension: Application to waste disposal site selection. *Expert Systems with Applications* 238: 122354.
71. Kakoudakis, K.; Behzadian, K.; Farmani, R.; Butler, D. (2017). Pipeline failure prediction in water distribution networks using evolutionary polynomial regression combined with K-means clustering. *Urban Water J.* 2017, 14, 737–742
72. Kang, Y. O., Yabar, H., Mizunoya, T., & Higano, Y. (2024). Optimal landfill site selection using ArcGIS Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) and Analytic Hierarchy Process (AHP) for Kinshasa City. *Environmental Challenges* 14: 100826.
73. Kavus, B. Y., & Taskin, A. (2025). Assessment of landslides induced by earthquake risk of Istanbul: A comprehensive study utilizing an integrated DFS-AHP and DFS-EDAS approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 191, 109285.
74. Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1993). *Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs*. Cambridge university press.
75. Khan, F., Khan, O., Parvez, M., Almujiabah, H., Pachauri, P., Yahya, Z., ... & Ağbulut, Ü. (2025). Innovative hydrogen production from waste bio-oil via steam methane reforming: An advanced ANN-AHP-k-means modelling approach using extreme machine learning weighted clustering. *International Journal of Hydrogen Energy*, 105, 1080-1091.

76. Krenek, J., Kuca, K., Blazek, P., Krejcar, O., & Jun, D. (2016). Application of artificial neural networks in condition based predictive maintenance. *Recent developments in intelligent information and database systems*, 75-86.
77. Kumar, D. (2010). *Multicriterion analysis in engineering and management*. PHL Learning Private Limited, Delhi, 266.
78. Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and sustainable energy reviews*, 69, 596-609.
79. Liemberger, R., & Wyatt, A. (2019). Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Supply*, 19(3), 831-837.
80. Lin, C. L., Fan, C. L., & Chen, B. K. (2022). Hybrid analytic hierarchy process–artificial neural network model for predicting the major risks and quality of Taiwanese construction projects. *Applied Sciences*, 12(15), 7790.
81. Liu, Y., Eckert, C. M., & Earl, C. (2020). A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements. *Expert Systems with Applications* 161: 113738.
82. Lund, P., & Bin, D. U. (2023). Application of Artificial Neural Network in Solar Energy. *Artificial Neural Networks-Recent Advances, New Perspectives and Applications*. 1-17. InTech Open.
83. Mahmudah, R.S., Putri, D.I., Abdullah, A.G., Shafii, M.A., Hakim, D.L., Setiadipura, T. (2024). Developing a Multi-Criteria Decision-Making model for nuclear power plant location selection using Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Fuzzy VIKOR methods focused on socio-economic factors. *Cleaner Engineering and Technology* 19: 100737.
84. Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K., Khalifah, Z., Zakwan, N., & Valipour, A. (2015). Multiple criteria decision-making techniques and their applications—a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic research-Ekonomska istraživanja*, 28(1), 516-571.
85. Marouf, Z., Derdous, O., Benmamar, S., & Tachi, S. E. (2025). Water Erosion Susceptibility Assessment Using RUSLE, AHP and ANN: A Comparative Study in the Cheliff Basin—Algeria. *Eurasian Soil Science*, 58(3), 1-13.
86. Morais, D.C., de Almeida, A.T. & Figueira, J.R. (2014). A Sorting Model for Group Decision Making: A Case Study of Water Losses in Brazil. *Group Decis Negot* 23: 937–960.
87. Motiee, H.; & Ghasemnejad, S. (2019). Prediction of pipe failure rate in Tehran water distribution networks by applying regression models. *Water Sci. Technol. Water Supply* 2019, 19, 695–702.
88. Mounce, S. R., Boxall, J. B., & Machell, J. (2010). Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(3), 309-318.
89. Mutikanga, H. E., Sharma, S. K., & Vairavamoorthy, K. (2011). Multi-criteria decision analysis: a strategic planning tool for water loss management. *Water resources management*, 25, 3947-3969.
90. Mutikanga, H. E., Sharma, S. K., & Vairavamoorthy, K. (2013). Methods and tools for managing losses in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(2), 166-174.

91. Nandalal, K. D. W., & Simonovic, S. P. (2002). State-of-the-art report on systems analysis methods for resolution of conflicts in water resources management. Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario.
92. Netshitanini, M., Adeeyo, A. O., & Edokpayi, J. N. (2023). Determinants and Evaluation of Onsite Water Loss Due to Leakages in a Selected Institution in South Africa. *Water* 15(2): 217.
93. Nguyen, B., Zhang, X., Ferencz, A., Takken, T., Senger, R., & Coteus, P. (2018, March). Analytic model for power MOSFET turn-off switching loss under the effect of significant current diversion at fast switching events. In 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) (pp. 287-291). IEEE.
94. Oussedik, M. (2015). L'impact de la gestion déléguée sur le service de l'eau en Algérie. *Revue Maghrébine d'Environnement et de Développement Durable*, 6(1), 45-60.
95. Özkan, B., Dengiz, O., & Turan, İ. D. (2020). Site suitability analysis for potential agricultural land with spatial fuzzy multi-criteria decision analysis in regional scale under semi-arid terrestrial ecosystem. *Scientific Reports* 10(1): 1-18.
96. Parrales, A., Reyes-Téllez, E. D., Ajbar, W., & Hernández, J. A. (2022). Artificial neural network applied to the renewable energy system performance. In *Artificial Neural Networks for Renewable Energy Systems and Real-World Applications* (pp. 11-43). Academic Press.
97. Parween, S., & Sinha, R. C. (2024). An Analytical Hierarchy Process Approach for Prioritization of Objectives and Parameters for an Integrated Urban Water Management. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(4), 1566-1579.
98. Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 8(4), 365-381.
99. Pudar, R. S., & Liggett, J. A. (1992). Leaks in pipe networks. *Journal of hydraulic engineering*, 118(7), 1031-1046.
100. Rahman, S., Alali, A. S., Baro, N., Ali, S., & Kakati, P. (2024). A Novel TOPSIS Framework for Multi-Criteria Decision Making with Random Hypergraphs: Enhancing Decision Processes. *Symmetry*, 16(12), 1602.
101. Remini, B. (2010). La politique de l'eau en Algérie : un demi-siècle de défis. *Sécheresse*, 21(3), 187-195.
102. Retima, N., Boukhari, S., Laouacheria, F., & Benouara, N. (2025). Application of MCDM methods for the reduction of water losses: case of the city of Annaba (Algeria). *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 1-16.
103. Ristic, B. (2019). How does regulation affect innovation and technology change in the water sector in England and Wales? (Doctoral dissertation, Imperial College London).
104. Robles-Velasco, A., Ramos-Salgado, C., Muñuzuri, J., & Cortés, P. (2021). Artificial neural networks to forecast failures in water supply pipes. *Sustainability*, 13(15), 8226.
105. Rossi, M., Marcarelli, G., Antonella, F., & Lucadamo, A. (2019). An AHP model to evaluate the influence of calendar effects on investment choice. In *Business Management Theories and Practices in a Dynamic Competitive Environment*. EuroMed Press.

106. Rossman, L.A. (2000). EPANET 2.0 User Manual. Water Supply and Water Resources Division, National Risk management Laboratory, USEPA, Cincinnati, OH.
107. Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. *Theory and decision*, 31, 49-73.
108. Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*; McGraw-Hill: New York, NY, USA.
109. Saaty, T. L. (1990). An exposition of the AHP in reply to the paper "remarks on the analytic hierarchy process". *Management science*, 36(3), 259-268.
110. Sambodja, K. H., Samadikun, B. P., & Syafrudin, S. (2020). Potential Risk Analysis of Water Loss in Water Distribution Networks. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 448(1): 012049. IOP Publishing
111. Satpathy, S., & Jha, R. (2022). Intermittent water supply in Indian cities: considering the intermittency beyond demand and supply. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 71(12): 1395-1407.
112. Sarkar, S., Mondal, H., & Kundu, P. K. (2025). Artificial Neural Network prediction on negative and positive activation energy of magnetohydrodynamic nanofluid flow with multiple slips. *Hybrid Advances*, 100452.
113. SEATA, (2010). Annual report on the operation of drinking water services in the wilaya of Annaba
114. Shabanzadeh-Khoshrody, M., Azadi, H., Ahangarkolae, S. S., Fauconnier, M. L., Grahić, J., & Sklenička, P. (2023). Water shortage and optimal pattern of field cropping cultivation: Addressing economic and environmental concerns in Qazvin Plain, Iran. *Journal of Cleaner Production* 399: 136512.
115. Shahin, M. A., Maier, H. R., & Jaksa, M. B. (2002). Predicting settlement of shallow foundations using neural networks. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 128(9), 785-793.
116. Shao, M., Han, Z., Sun, J., Gao, H., Zhang, S., & Zhao, Y. (2024). A novel framework for wave power plant site selection and wave forecasting based on GIS, MCDM, and ANN methods: A case study in Hainan Island, Southern China. *Energy Conversion and Management*, 299, 117816.
117. Sharma, S. K., & Vairavamoorthy, K. (2009). Urban water demand management: prospects and challenges for the developing countries. *Water and Environment Journal*, 23(3), 210-218.
118. Shmelev, S. E., & Van Den Bergh, J. C. (2016). Optimal diversity of renewable energy alternatives under multiple criteria: An application to the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 679-691.
119. Štilić, A., & Puška, A. (2023). Integrating Multi-Criteria Decision-Making Methods with Sustainable Engineering: A Comprehensive Review of Current Practices. *Eng*, 4(2): 1536-1549.
120. Tahmasebi Birgani, Y., & Yazdandoost, F. (2018). An integrated framework to evaluate resilient-sustainable urban drainage management plans using a combined-adaptive MCDM technique. *Water Resources Management* 32: 2817-2835.
121. Talaat, M., Elkholy, M. H., Alblawi, A., & Said, T. (2023). Artificial intelligence applications for microgrids integration and management of hybrid renewable energy sources. *Artificial Intelligence Review*, 56(9), 10557-10611.

122. Taiwo, R., Zayed, T., Bakhtawar, B., & Adey, B. T. (2025). Explainable deep learning models for predicting water pipe failures. *Journal of environmental management*, 379, 124738.
123. Thibault, J. (1991). Feed forward neural networks for the identification of dynamic processes. *Chemical Engineering Communications*, 105(1), 109–128.
124. Tomczewski, A., Mikulski, S., & Szymenderski, J. (2024). Application of the Analytic Hierarchy Process Method to Select the Final Solution for Multi-Criteria Optimization of the Structure of a Hybrid Generation System with Energy Storage. *Energies* (19961073), 17(24).
125. Trojan, F., & Morais, D. C. (2015). Maintenance management decision model for reduction of losses in water distribution networks. *Water Resources Management*, 29, 3459-3479.
126. van den Berg, C. (2015). Drivers of non-revenue water: A cross-national analysis. *Utilities policy*, 36, 71-78.
127. Vassoney, E. (2022). Multi-criteria decision-making (MCDM) for the sustainable management of water withdrawals in Alpine watercourses.
128. Vasudevan, M., & Natarajan, N. (2021). An investigation on the adaptability of residential rainwater harvesting system in Tamil Nadu—techno-economic considerations and the way forward. *Water Supply* 21(5): 1927-1938.
129. Velasquez, M., & Hester, P. T. (2013). An analysis of multi-criteria decision making methods. *International Journal of Operations Research*, 10(2), 56-66.
130. Velayudhan, N. K., Pradeep, P., Rao, S. N., Devidas, A. R., & Ramesh, M. V. (2022). IoT-enabled water distribution systems—A comparative technological review. *IEEE Access*, 10, 101042-101070.
131. Vilanova, M. R. N., Magalhães Filho, P., & Balestieri, J. A. P. (2015). Performance measurement and indicators for water supply management: Review and international cases. *Renewable and sustainable energy reviews*, 43, 1-12.
132. Wang, P., Zhu, Z., & Wang, Y. (2016). A novel hybrid MCDM model combining the SAW, TOPSIS and GRA methods based on experimental design. *Information sciences*, 345, 27-45.
133. Wang, Z., Kong, F., Chan, W., & Yue, S. (2025). Study on the effect of wind direction on the thermal performance of cavity receiver for trough solar system: Artificial neural network approach based on genetic algorithm. *Energy*, 320, 135287.
134. Wiecek, M. M., Ehrgott, M., Fadel, G., & Figueira, J. R. (2008). Multiple criteria decision making for engineering. *Omega*, 36(3), 337-340.
135. Wilson, D., Fillion, Y., & Moore, I. (2017). State-of-the-art review of water pipe failure prediction models and applicability to large-diameter mains. *Urban Water Journal*, 14(2), 173-184.
136. Yan, J. M., & Vairavamoorthy, K. (2003). Fuzzy approach for pipe condition assessment. *Conf. Proc. Int. Conf. on Pipeline Engineering and Construction*, ASCE, New York, 466–476.
137. Yildiz, O. A., Cebi, S., & Yildiz, O. (2025). Multicriteria decision support for sustainable energy planning: an evaluation of alternative scenarios for the solar power plant site selection. *Environment, Development and Sustainability*, 1-35.

138. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*. 8(3), 338-353.
139. Zayed, M. E., Zhao, J., Li, W., Sadek, S., & Elsheikh, A. H. (2022). Applications of artificial neural networks in concentrating solar power systems. In *Artificial neural networks for renewable energy systems and real-world applications* (pp. 45-67). Academic Press.
140. Zeroual, A. et al. (2022). Impact du changement climatique sur la disponibilité en eau en Algérie : Cas du bassin hydrographique de la Seybouse. *Revue des Sciences de l'Eau*, 35(1), 99-114.
141. Zerguini, S. et al. (2023). Hybrid ANN Models for Pressure Management. *Environmental Science & Technology*.
142. Zgalmi, A., Ben Rhouma, A., & Belhadj, J. (2024). Artificial Neural Network-Based Real-Time Power Management for a Hybrid Renewable Source Applied for a Water Desalination System. *Electronics*, 13(13), 2503.
143. Zhang, Z., Wen, J., Wang, X., Zhao, C. (2018). A novel crowd evaluation method for security and trustworthiness of online social networks platforms based on signaling theory. *Journal of Computational Science* 26: 468–477.
144. Zhu, K. J., Jing, Y., & Chang, D. Y. (1999). A discussion on extent analysis method and applications of fuzzy AHP. *European journal of operational research*, 116(2), 450-456.
145. Zyoud, S. H., Shaheen, H., Samhan, S., Rabi, A., Al-Wadi, F., & Fuchs-Hanusch, D. (2016). Utilizing analytic hierarchy process (AHP) for decision making in water loss management of intermittent water supply systems. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development* 6(4): 534-546.
146. Zyoud, S. H., & Fuchs-Hanusch, D. (2017). An integrated decision-making framework to appraise water losses in municipal water systems. *International Journal of Information Technology & Decision Making* 19(05): 1293-1326.

Annexes

Annexe A1. Photos des réservoirs d'eau (ville d'Annaba)



Réservoir Site Casbah



Station Centrale



Station 8 mars



Station Sidi Harb ancien



Station Sidi Harb nouveau



Station Maison Coop



Station Elysa



Site Plaine Ouest



Réservoir Oued Forcha



Réservoir Sidi Achour



Réservoir Sidi Aissa



Réservoir Toche



Annexe A2. Résultats de la simulation hydraulique par EPANET

N	Link ID	Longueur	Diamètre	Rugosité	Débit	Vitesse
		(m)	(mm)	(mm)	(m ³ /h)	(m/s)
1	Pipe cnd_1_dist	382,395	100	2	1,73	0,06
2	Pipe cnd_2_dist	20,692	80	2	0,12	0,01
3	Pipe cnd_3_dist	67,935	100	2	4,19	0,15
4	Pipe cnd_4_dist	21,798	100	2	2,13	0,18
5	Pipe cnd_5_dist	92,458	110	2	94,75	2,77
6	Pipe cnd_6_dist	115,607	80	2	9,55	0,53
7	Pipe cnd_7_dist	60,81	160	2	92,55	1,28
8	Pipe cnd_8_dist	197,713	100	2	45,74	1,62
9	Pipe cnd_9_dist	73,19	80	2	1,85	0,11
10	Pipe cnd_10_dist	32,958	80	2	0,43	0,02
11	Pipe cnd_11_dist	166,594	150	2	1,07	0,02
12	Pipe cnd_12_dist	10,24	300	1,5	162,63	0,64
13	Pipe cnd_13_dist	37,169	90	2	9,45	0,41
14	Pipe cnd_14_dist	44,935	100	2	21,81	0,77
15	Pipe cnd_15_dist	55,382	200	2	37,45	0,33
16	Pipe cnd_16_dist	87,188	90	2	9,23	0,41
17	Pipe cnd_17_dist	7,428	200	2	19,09	0,17
18	Pipe cnd_18_dist	140,5	300	1,5	71,16	0,28
19	Pipe cnd_19_dist	7,935	200	2	103,73	0,92
20	Pipe cnd_20_dist	67,066	160	2	15,57	0,22
21	Pipe cnd_21_dist	59,52	150	2	15,57	0,22
22	Pipe cnd_22_dist	22,49	500	1,5	15,57	0,22
23	Pipe cnd_23_dist	18,572	500	1,5	146,75	0,21
24	Pipe cnd_24_dist	22,967	300	1,5	34,07	0,13
25	Pipe cnd_25_dist	19,063	200	2	180,83	1,6
26	Pipe cnd_26_dist	1,401	160	2	180,83	2,51
27	Pipe cnd_28_dist	1,068	150	2	15,57	0,22
28	Pipe cnd_29_dist	0,609	100	2	15,57	0,22
29	Pipe cnd_30_dist	1,086	150	2	15,57	0,22
30	Pipe cnd_31_dist	495,556	150	2	15,57	0,22
31	Pipe cnd_32_dist	136,605	150	2	1,58	0,02
32	Pipe cnd_33_dist	42,139	110	2	15,02	0,44
33	Pipe cnd_34_dist	66,546	80	2	4,22	0,23
34	Pipe cnd_35_dist	158,108	100	2	21,08	0,75
35	Pipe cnd_36_dist	190,777	90	2	0,86	0,04
36	Pipe cnd_37_dist	149,142	80	2	0,21	0,01
37	Pipe cnd_38_dist	58,179	100	2	0,33	0,25
38	Pipe cnd_2385_dist	10,201	200	2	46,09	0,41
39	Pipe cnd_39_dist	37,585	200	2	6,62	0,06
40	Pipe cnd_40_dist	216,099	350	1,5	0,39	0,15

41	Pipe cnd_41_dist	112,039	300	1,5	74,6	0,29
42	Pipe cnd_42_dist	10,271	63	2	1,41	0,13
43	Pipe cnd_43_dist	20,932	80	2	2,2	0,12
44	Pipe cnd_44_dist	61,512	200	2	6,66	0,06
45	Pipe cnd_45_dist	76,077	63	2	2,59	0,23
46	Pipe cnd_46_dist	39,135	100	2	6,32	0,22
47	Pipe cnd_47_dist	132,123	100	2	1,25	0,04
48	Pipe cnd_48_dist	86,296	90	2	2,65	0,12
49	Pipe cnd_49_dist	58,981	216	2	27,61	0,21
50	Pipe cnd_50_dist	87,432	100	2	13,96	0,49
51	Pipe cnd_51_dist	48,52	80	2	2,92	0,16
52	Pipe cnd_52_dist	35,35	90	2	0,98	0,04
53	Pipe cnd_53_dist	76,542	80	2	12,5	0,69
54	Pipe cnd_54_dist	29,466	50	2	9,99	1,41
55	Pipe cnd_55_dist	169,826	80	2	1,76	0,1
56	Pipe cnd_56_dist	184,281	350	1,5	36,34	0,1
57	Pipe cnd_57_dist	51,721	110	2	3,57	0,1
58	Pipe cnd_58_dist	7,24	350	1,5	232,75	0,67
59	Pipe cnd_59_dist	167,512	200	2	3,57	0,03
60	Pipe cnd_60_dist	154,097	200	2	10,6	0,09
61	Pipe cnd_61_dist	66,111	200	2	9,27	0,08
62	Pipe cnd_62_dist	220,041	100	2	4,1	0,15
63	Pipe cnd_63_dist	364,531	200	2	60,43	0,53
64	Pipe cnd_64_dist	41,453	200	2	8,58	0,08
65	Pipe cnd_65_dist	124,891	400	1,5	35,02	0,08
66	Pipe cnd_66_dist	135,409	100	2	11,66	0,41
67	Pipe cnd_67_dist	233,689	90	2	3,52	0,15
68	Pipe cnd_68_dist	30,793	200	2	3,63	0,03
69	Pipe cnd_69_dist	56,993	216	2	38,42	0,29
70	Pipe cnd_70_dist	75,118	110	2	9,75	0,28
71	Pipe cnd_71_dist	64,111	90	2	4,62	0,22
72	Pipe cnd_72_dist	25,863	100	2	2,36	0,29
73	Pipe cnd_73_dist	504,747	500	1,5	232,75	0,33
74	Pipe cnd_74_dist	60,284	160	2	17,13	0,24
75	Pipe cnd_75_dist	59,455	80	2	1,51	0,08
76	Pipe cnd_76_dist	73,395	150	2	112,27	1,76
77	Pipe cnd_77_dist	78,537	150	2	6,65	0,15
78	Pipe cnd_78_dist	11,117	80	2	4,32	0,24
79	Pipe cnd_79_dist	67,169	200	2	9,48	0,08
80	Pipe cnd_80_dist	70,221	150	2	37,15	0,58
81	Pipe cnd_81_dist	39,937	80	2	7,81	0,43
82	Pipe cnd_82_dist	65,407	250	1,5	10,47	0,06
83	Pipe cnd_83_dist	60,394	100	2	4,62	0,16
84	Pipe cnd_84_dist	13,062	80	2	13,37	0,74
85	Pipe cnd_85_dist	5,765	300	1,5	133,12	0,52

86	Pipe cnd_86_dist	60,893	80	2	2,81	0,16
87	Pipe cnd_87_dist	25,48	90	2	1,96	0,09
88	Pipe cnd_88_dist	679,93	400	1,5	349,4	0,77
89	Pipe cnd_89_dist	66,592	200	2	8,13	0,07
90	Pipe cnd_90_dist	25,139	63	2	1,73	0,15
91	Pipe cnd_91_dist	23,735	90	2	7,23	0,32
92	Pipe cnd_92_dist	19,918	90	2	7,08	0,31
93	Pipe cnd_93_dist	24,964	300	1,5	190,82	0,75
94	Pipe cnd_94_dist	12,884	250	1,5	10,48	0,06
95	Pipe cnd_95_dist	48,886	100	2	0,66	0,02
96	Pipe cnd_96_dist	203,894	160	2	17,71	0,24
97	Pipe cnd_97_dist	442,399	200	2	55,37	0,49
98	Pipe cnd_98_dist	113,651	80	2	1,32	0,07
99	Pipe cnd_99_dist	92,213	100	2	16,46	0,58
.
.
.
2633	Pipe cnd_390_Add	12,729	250	1,5	210,02	1,19
2634	Pipe cnd_391_Add	12,647	250	1,5	210,7	1,19
2635	Pipe cnd_392_Add	8,723	300	1,5	143,23	0,56
2636	Pipe cnd_393_Add	99,895	300	1,5	143,23	0,56
2637	Pipe cnd_394_Add	14,951	250	1,5	236,83	1,34
2638	Pipe cnd_1083_Add	28,35	200	2	187,38	1,66
2639	Pipe cnd_395_Addu	13,693	250	1,5	4023,12	2,77
2640	Pipe cnd_401_Addu	27,23	400	1,5	207,82	0,46
2641	Pipe cnd_402_Addu	27,649	400	1,5	206,24	0,46
2642	Pipe cnd_410_Addu	40,201	600	0,5	5948,01	5,84
2643	Pipe cnd_411_Addu	12,67	250	1,5	1125,64	6,37
2644	Pipe cnd_412_Addu	12,509	250	1,5	1132,86	6,41
2645	Pipe cnd_425_Addu	7,021	600	0,5	13107,08	2,88
2646	Pipe cnd_426_Addu	0,826	150	2	1083,8	7,04
2647	Pipe cnd_427_Addu	5,653	200	2	198,85	1,76
2648	Pipe cnd_428_Addu	1,364	250	1,5	691,34	3,91
2649	Pipe cnd_429_Addu	3,833	600	0,5	1407,18	1,38
2650	Pipe cnd_430_Addu	1,67	300	1,5	790,6	3,11
2651	Pipe cnd_431_Addu	2,401	400	1,5	3280,75	7,25
2652	Pipe cnd_432_Addu	1,732	250	1,5	1234,15	6,98
2653	Pipe cnd_433_Addu	2,31	400	1,5	1020,45	2,26

Annexe A3. Résultats après l'application de RNA

ID Conduite	Longueur (m)	Diamètre (mm)	Age	Type Matériaux	Type de Trafic	Pression	Nombre de Fuite	Probabilité de Défaillance
978	28,36	90	36	PVC	Non Elevé	4,94	1	57,28
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
979	36,20	90	36	PVC	Non Elevé	5,44	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
980	120,10	63	36	PVC	Non Elevé	4,81	2	57,28
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
981	88,31	63	36	PVC	Non Elevé	5,59	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
982	35,61	90	36	PVC	Non Elevé	6,19	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
983	87,02	63	36	PVC	Non Elevé	6,49	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
984	48,83	90	36	PVC	Non Elevé	6,49	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
985	3,28	90	36	PVC	Non Elevé	6,49	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
986	41,83	63	36	PVC	Non Elevé	6,24	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
987	102,26	200	41	PVC	Non Elevé	3,04	0	44,32
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
988	2,21	300	46	AC	Non Elevé	2,44	0	43,15
	1,66	7,95	21,65	1,96	0,58	8,48	0,87	
990	3,71	90	46	PVC	Non Elevé	2,49	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
991	85,00	50	46	PVC	Non Elevé	3,09	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
992	63,70	300	51	AC	Non Elevé	2,49	0	43,15
	1,66	7,95	21,65	1,96	0,58	8,48	0,87	
993	108,36	300	51	AC	Non Elevé	2,14	0	43,15
	1,66	7,95	21,65	1,96	0,58	8,48	0,87	
994	85,02	160	36	PVC	Non Elevé	3,09	1	59,92
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
995	3,30	160	36	PVC	Non Elevé	3,74	0	44,32
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
996	44,18	110	36	PVC	Non Elevé	3,94	1	59,92
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
997	56,27	160	31	PVC	Non Elevé	3,89	0	44,32
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
998	3,03	160	31	PVC	Non Elevé	3,99	0	44,32
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
999	4,31	63	31	PVC	Non Elevé	3,99	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	

1000	69,79	63	31	PVC	Non Elevé	3,74	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1001	23,54	110	31	PVC	Non Elevé	4,09	0	44,32
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1002	3,94	63	31	PVC	Non Elevé	4,24	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1003	68,65	63	31	PVC	Non Elevé	3,94	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1004	20,02	110	31	PVC	Non Elevé	4,74	0	44,32
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1005	34,95	110	31	PVC	Non Elevé	5,29	0	44,32
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1006	103,56	63	31	PVC	Non Elevé	4,79	1	57,28
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
1007	18,27	63	31	PVC	Non Elevé	4,44	1	57,28
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
1008	21,05	63	31	PVC	Non Elevé	4,79	1	57,28
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
1009	18,42	63	31	PVC	Non Elevé	5,54	1	57,28
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
1010	146,02	63	31	PVC	Non Elevé	5,54	2	57,28
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
1011	78,30	63	31	PVC	Non Elevé	6,19	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1012	27,69	63	31	PVC	Non Elevé	5,94	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1013	30,35	63	31	PVC	Non Elevé	5,44	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1014	1,18	50	31	PVC	Non Elevé	5,19	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1015	2,04	50	31	PVC	Non Elevé	5,19	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1016	195,75	63	31	PVC	Non Elevé	5,79	0	43,89
	3,87	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1017	83,18	50	31	PVC	Non Elevé	5,34	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1018	43,81	63	31	PVC	Non Elevé	6,44	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1019	86,42	50	31	PVC	Non Elevé	5,59	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1020	196,06	63	31	PVC	Non Elevé	5,19	1	59,49
	3,87	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
1021	118,51	63	31	PVC	Non Elevé	4,89	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1022	85,38	63	31	PVC	Non Elevé	4,64	0	41,68

	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1023	58,03	63	31	PVC	Non Elevé	4,49	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1024	64,98	63	31	PVC	Non Elevé	4,29	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1025	34,31	300	46	AC	Non Elevé	4,04	0	43,15
	1,66	7,95	21,65	1,96	0,58	8,48	0,87	
1027	496,91	200	9	PEHD	Elevé	5,14	0	33,86
	3,87	7,95	7,22	3,13	2,34	8,48	0,87	
1028	16,58	200	9	PEHD	Elevé	5,14	0	31,65
	1,66	7,95	7,22	3,13	2,34	8,48	0,87	
1029	155,59	63	9	PEHD	Elevé	5,74	0	29,01
	1,66	5,31	7,22	3,13	2,34	8,48	0,87	
1030	20,28	63	9	PEHD	Non Elevé	6,29	0	33,31
	1,66	5,31	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1031	121,57	63	9	PEHD	Non Elevé	5,59	0	27,25
	1,66	5,31	7,22	3,13	0,58	8,48	0,87	
1032	57,07	125	9	PEHD	Non Elevé	5,19	0	29,89
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	8,48	0,87	
1033	106,83	160	9	PEHD	Non Elevé	5,94	0	29,89
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	8,48	0,87	
1034	247,55	125	9	PEHD	Non Elevé	5,69	0	32,10
	3,87	7,95	7,22	3,13	0,58	8,48	0,87	
1035	150,59	90	9	PEHD	Non Elevé	6,34	0	33,31
	1,66	5,31	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1036	52,65	125	9	PEHD	Non Elevé	6,69	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1037	181,37	90	9	PEHD	Non Elevé	7,69	0	33,31
	1,66	5,31	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1038	47,17	125	9	PEHD	Non Elevé	7,39	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1039	185,90	90	9	PEHD	Non Elevé	7,64	0	33,31
	1,66	5,31	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1040	198,87	125	9	PEHD	Non Elevé	7,29	1	53,76
	3,87	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	16,47	
1041	436,51	125	9	PEHD	Elevé	7,59	0	39,92
	3,87	7,95	7,22	3,13	2,34	14,54	0,87	
1042	103,61	160	9	PEHD	Non Elevé	5,94	0	29,89
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	8,48	0,87	
1048	121,96	110	9	PEHD	Non Elevé	6,69	1	51,55
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	16,47	
1052	98,22	110	9	PEHD	Non Elevé	7,34	1	51,55
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	16,47	
1053	103,09	110	9	PEHD	Non Elevé	8,34	1	51,55
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	16,47	

1054	52,30	63	9	PEHD	Non Elevé	8,49	0	33,31
	1,66	5,31	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1055	57,81	110	9	PEHD	Non Elevé	8,04	1	51,55
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	16,47	
1057	44,00	110	9	PEHD	Non Elevé	8,04	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1058	43,45	63	9	PEHD	Elevé	8,54	1	50,67
	1,66	5,31	7,22	3,13	2,34	14,54	16,47	
1087	274,86	300	46	AC	Non Elevé	3,19	1	60,96
	3,87	7,95	21,65	1,96	0,58	8,48	16,47	
1156	57,14	110	9	PEHD	Non Elevé	6,74	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1157	53,71	110	9	PEHD	Non Elevé	7,09	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1158	43,20	110	9	PEHD	Non Elevé	7,39	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1159	47,57	110	9	PEHD	Non Elevé	7,44	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1160	46,68	110	9	PEHD	Non Elevé	6,89	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1161	49,19	160	9	PEHD	Non Elevé	7,24	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1162	133,61	110	9	PEHD	Non Elevé	7,24	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1163	58,47	160	9	PEHD	Non Elevé	7,39	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1164	142,81	63	9	PEHD	Non Elevé	7,64	0	33,31
	1,66	5,31	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1165	45,78	110	9	PEHD	Non Elevé	6,99	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1166	21,25	110	9	PEHD	Non Elevé	6,84	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1167	41,03	110	9	PEHD	Non Elevé	6,89	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1168	128,16	110	9	PEHD	Non Elevé	7,19	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1169	123,24	160	9	PEHD	Non Elevé	7,29	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1170	42,48	110	9	PEHD	Non Elevé	6,84	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1171	61,24	63	9	PEHD	Non Elevé	7,09	0	33,31
	1,66	5,31	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1172	39,15	110	9	PEHD	Non Elevé	6,99	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1173	2,12	160	9	PEHD	Non Elevé	7,39	0	35,95

	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1174	2,80	110	9	PEHD	Non Elevé	7,19	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1175	50,62	110	9	PEHD	Non Elevé	7,24	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1176	77,64	110	9	PEHD	Non Elevé	8,14	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1177	125,25	110	9	PEHD	Non Elevé	7,69	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1178	34,25	125	9	PEHD	Non Elevé	8,54	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1179	36,59	125	9	PEHD	Non Elevé	8,64	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1180	42,28	110	9	PEHD	Non Elevé	8,44	1	51,55
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	16,47	
1181	85,77	110	9	PEHD	Non Elevé	8,34	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1182	31,34	110	9	PEHD	Non Elevé	8,74	1	51,55
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	16,47	
1183	95,81	125	9	PEHD	Non Elevé	8,84	1	51,55
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	16,47	
1184	47,90	110	9	PEHD	Non Elevé	7,94	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1185	37,94	110	9	PEHD	Non Elevé	7,44	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1186	83,79	110	9	PEHD	Non Elevé	7,69	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1187	77,12	110	9	PEHD	Non Elevé	6,99	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1188	28,61	110	9	PEHD	Non Elevé	7,24	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1189	49,71	110	9	PEHD	Non Elevé	8,09	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1190	5,38	110	9	PEHD	Non Elevé	6,89	0	35,95
	1,66	7,95	7,22	3,13	0,58	14,54	0,87	
1191	324,78	63	9	PEHD	Elevé	6,94	1	52,88
	3,87	5,31	7,22	3,13	2,34	14,54	16,47	
1192	586,59	75	17	PEHD	Elevé	7,79	2	67,31
	3,87	5,31	21,65	3,13	2,34	14,54	16,47	
1193	137,66	150	46	AC	Elevé	6,49	0	50,97
	1,66	7,95	21,65	1,96	2,34	14,54	0,87	
1194	126,43	63	26	PVC	Elevé	6,94	1	65,10
	1,66	5,31	21,65	3,13	2,34	14,54	16,47	
1195	2,56	150	46	AC	Elevé	6,79	0	50,97
	1,66	7,95	21,65	1,96	2,34	14,54	0,87	

1196	75,06	150	46	AC	Elevé	6,80	0	50,97
	1,66	7,95	21,65	1,96	2,34	14,54	0,87	
1197	79,38	150	46	AC	Elevé	7,45	0	50,97
	1,66	7,95	21,65	1,96	2,34	14,54	0,87	
1198	80,51	150	46	AC	Elevé	7,46	1	66,57
	1,66	7,95	21,65	1,96	2,34	14,54	16,47	
1199	48,58	150	46	AC	Elevé	7,46	0	50,97
	1,66	7,95	21,65	1,96	2,34	14,54	0,87	
1200	48,71	90	17	PEHD	Non Elevé	6,79	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1201	88,94	90	17	PEHD	Non Elevé	6,86	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1202	41,90	90	17	PEHD	Non Elevé	7,06	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1203	57,02	90	17	PEHD	Non Elevé	7,31	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1204	35,38	150	46	AC	Elevé	7,31	0	50,97
	1,66	7,95	21,65	1,96	2,34	14,54	0,87	
1205	86,59	90	17	PEHD	Non Elevé	6,94	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1206	276,82	250	17	PEHD	Non Elevé	6,96	0	52,59
	3,87	7,95	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1207	228,25	300	46	AC	Non Elevé	6,96	0	51,42
	3,87	7,95	21,65	1,96	0,58	14,54	0,87	
1208	26,05	300	46	AC	Non Elevé	4,34	0	43,15
	1,66	7,95	21,65	1,96	0,58	8,48	0,87	
1209	122,03	90	17	PEHD	Non Elevé	6,99	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1210	150,37	50	17	PEHD	Non Elevé	7,59	1	63,34
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	16,47	
1211	210,35	250	17	PEHD	Non Elevé	7,59	1	68,19
	3,87	7,95	21,65	3,13	0,58	14,54	16,47	
1212	184,25	125	46	AC	Non Elevé	7,89	0	51,42
	3,87	7,95	21,65	1,96	0,58	14,54	0,87	
1213	56,69	90	17	PEHD	Non Elevé	7,69	1	63,34
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	16,47	
1214	31,00	125	46	AC	Elevé	8,34	0	50,97
	1,66	7,95	21,65	1,96	2,34	14,54	0,87	
1215	104,61	63	26	PVC	Non Elevé	9,14	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1216	214,82	63	26	PVC	Non Elevé	3,11	3	65,55
	3,87	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	16,47	
1217	85,34	90	17	PEHD	Non Elevé	6,99	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1218	43,71	90	17	PEHD	Non Elevé	6,04	0	47,74

	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1219	25,71	90	17	PEHD	Non Elevé	9,49	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1220	46,86	90	17	PEHD	Non Elevé	7,19	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1221	65,69	90	17	PEHD	Non Elevé	7,74	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1222	52,14	90	17	PEHD	Non Elevé	6,11	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1223	5,13	110	17	PEHD	Non Elevé	8,39	0	50,38
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1224	70,90	110	17	PEHD	Non Elevé	8,24	0	50,38
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1225	47,65	90	17	PEHD	Non Elevé	5,09	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1226	43,24	90	17	PEHD	Non Elevé	5,24	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1227	99,52	125	41	AC	Non Elevé	8,49	1	64,81
	1,66	7,95	21,65	1,96	0,58	14,54	16,47	
1228	115,65	125	41	AC	Non Elevé	8,64	1	64,81
	1,66	7,95	21,65	1,96	0,58	14,54	16,47	
1229	121,40	63	26	PVC	Non Elevé	9,04	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1230	160,50	90	17	PEHD	Non Elevé	5,49	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1231	65,39	90	17	PEHD	Non Elevé	5,49	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1232	81,80	90	17	PEHD	Non Elevé	5,79	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1233	58,92	90	17	PEHD	Non Elevé	6,79	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1234	109,39	90	17	PEHD	Non Elevé	6,89	0	47,74
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	0,87	
1235	168,78	90	17	PEHD	Non Elevé	5,44	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1236	5,89	90	17	PEHD	Non Elevé	5,89	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1237	66,90	90	17	PEHD	Non Elevé	5,94	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1238	310,82	110	26	PVC	Non Elevé	3,69	2	62,13
	3,87	7,95	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
1239	197,96	63	26	PVC	Non Elevé	3,54	0	43,89
	3,87	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1240	23,54	63	26	PVC	Non Elevé	4,54	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	

1241	147,78	63	26	PVC	Non Elevé	4,24	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1242	18,70	90	26	PVC	Non Elevé	4,44	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1243	35,57	63	26	PVC	Non Elevé	4,79	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1244	29,61	63	26	PVC	Non Elevé	4,39	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1245	151,00	90	26	PVC	Non Elevé	4,24	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1246	27,91	90	26	PVC	Non Elevé	3,89	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1247	11,48	110	26	PVC	Non Elevé	3,69	0	44,32
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1248	58,86	63	26	PVC	Non Elevé	4,19	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1249	106,16	63	26	PVC	Non Elevé	3,89	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1250	105,47	63	26	PVC	Non Elevé	3,59	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1251	25,04	110	26	PVC	Non Elevé	3,64	0	44,32
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1252	38,61	110	26	PVC	Non Elevé	3,44	0	44,32
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1253	38,91	110	26	PVC	Non Elevé	3,24	1	59,92
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
1254	123,35	63	26	PVC	Non Elevé	2,99	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1255	63,50	63	26	PVC	Non Elevé	1,59	0	34,42
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	1,22	0,87	
1256	40,15	63	26	PVC	Non Elevé	1,99	1	50,02
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	1,22	16,47	
1257	40,09	63	26	PVC	Non Elevé	2,69	1	57,28
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	16,47	
1258	77,17	63	26	PVC	Non Elevé	2,14	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1259	181,86	63	26	PVC	Non Elevé	1,69	0	36,63
	3,87	5,31	21,65	3,13	0,58	1,22	0,87	
1260	4,92	90	17	PEHD	Non Elevé	8,09	2	63,34
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	14,54	16,47	
1265	311,15	400	51	Acier	Non Elevé	1,94	0	38,88
	3,87	7,95	21,65	2,74	0,58	1,22	0,87	
1272	3,94	90	41	PVC	Non Elevé	2,49	0	41,68
	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
1273	32,10	63	41	PVC	Non Elevé	4,34	0	41,68

	1,66	5,31	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
457	1,16	200	41	PVC	Non Elevé	3,49	0	44,32
	1,66	7,95	21,65	3,13	0,58	8,48	0,87	
2	10,00	300	51	Acier	Non Elevé	1,94	0	36,67
	1,66	7,95	21,65	2,74	0,58	1,22	0,87	
3	312,00	300	51	Acier	Non Elevé	2,09	0	46,14
	3,87	7,95	21,65	2,74	0,58	8,48	0,87	