

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Mohamed Chérif Messadia
Souk Ahras



جامعة محمد الشريف مساعدي
سوق أهراس

Mohamed Chérif Messadia University
Souk-Ahras

Faculté des Sciences et de la Technologie

Année : 2025

Département : Génie Civil

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

DEVELOPPEMENT D'UN MODELE D'EVALUATION DES RISQUES POUR LE RENOUVELLEMENT DES RESEAUX DE DISTRIBUTION D'EAU

Filière

Hydraulique

Spécialité

Hydraulique Urbain

Par

BARA AHLEM

DIRECTEUR DE MEMOIRE : BOUKHARI Sofiane PR

U.SOUK-AHRAS

Devant le jury

PRESIDENT: ZENATI Nour Eddine PR

U.SOUK-AHRAS

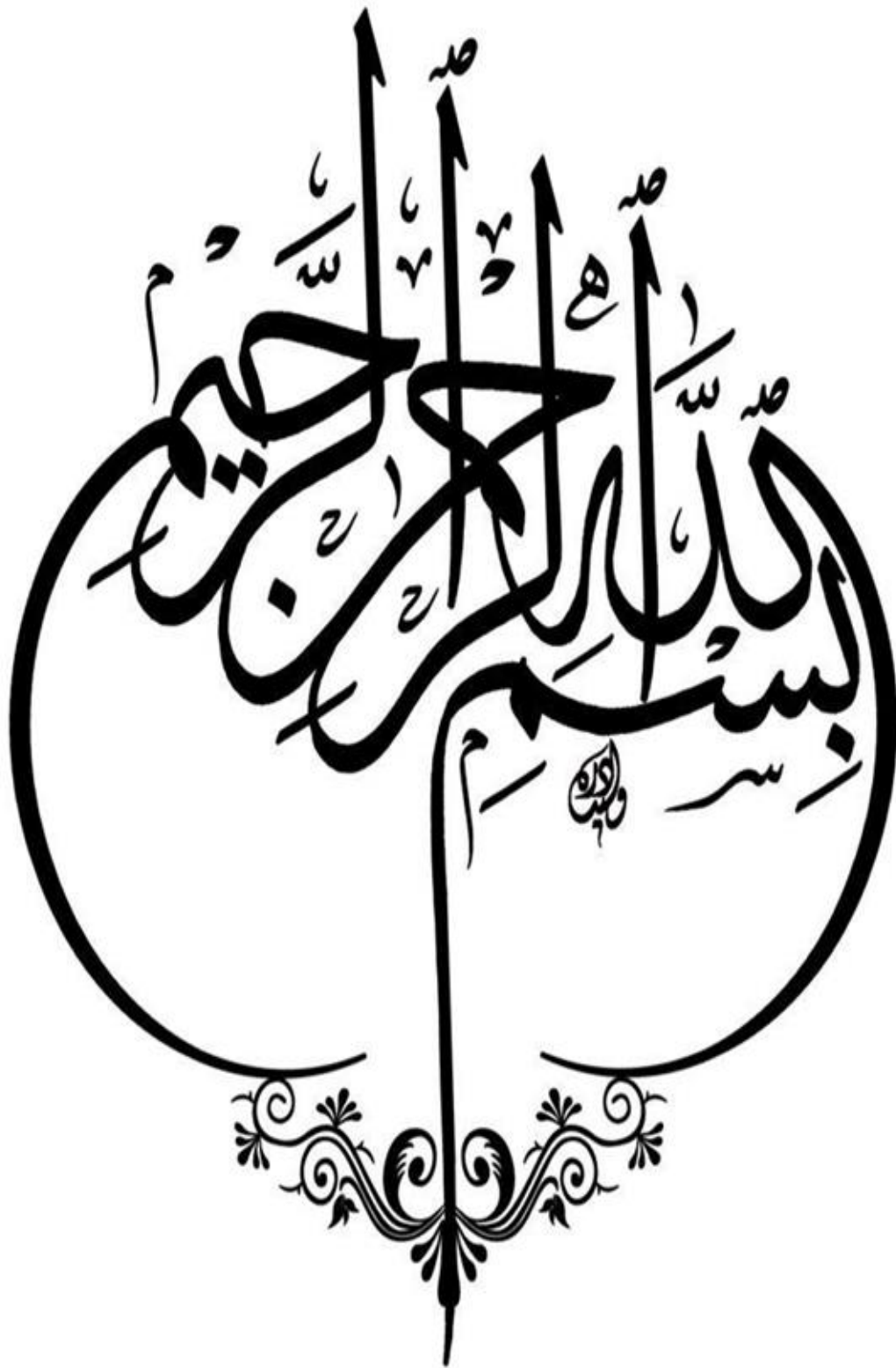
EXAMINATRICE 1 : MRAD Dounia PR

U.SOUK-AHRAS

EXAMINATEUR 2 : DAIRI Sabri MCA

U.SOUK-AHRAS

N°...../2025



شكر وعرّفان

قال الله تعالى " لئن شكرتم لأزيدنكم "

الشكر لله عز وجل الذي أنار لي الدرب، وفتح لي أبواب العلم وأمدني بالصبر والإرادة لإتمام هذه المذكرة، فله الحمد والشكر حمداً طيباً مباركاً يليق بجلاله.

فإن الوفاء يقتضي أن يُرد الفضل لأهله، لذلك أتقدم بجزيل الشكر والعرّفان إلى من كان له الفضل بعد الله في إخراج هذا البحث العلمي، الأستاذ المشرف البروفيسور **بوخاري سفيان**، الذي كان لي نعم الموجّه والداعم، فبفضل توجيهاته العلمية الدقيقة، وصبره الكبير، وملاحظاته القيّمة، تمكّنت من إنجاز هذا العمل. له مني كل الاحترام والتقدير، سائلة المولى أن يجزيه عني خير الجزاء.

وأتقدم بالشكر والعرّفان إلى الأساتذة "لجنة المناقشة" الذين تحملوا عناء قراءة وتفحص المذكرة كما أتوجه بجزيل الشكر والامتنان إلى **كافة أساتذتي الكرام** في قسم الهندسة المدنية – تخصص ري حضري – بجامعة محمد الشريف مساعديّة سوق أهراس، الذين لم يخلوا علينا بعلمهم وخبرتهم

كما أشكر السيد **لعلايبيّة عبد العزيز**، السيد **بولبدة مراد**، السيد **عقون بولعراس** السيدة **فقير هدى** وسارة **شيبوني** على المعلومات الهامة التي قدّموها لي فلهم مني خالص الامتنان والتقدير

ولا أنسى أن أتوجه بخالص الشكر والعرّفان إلى **زملائي في الدفعة**، الذين كانوا سنداً لي طوال مسيرتي الجامعية، والذين تقاسمت معهم سنوات من الجهد، التعب، والنجاح.

جزاكم الله عني كل خير، ووقفنا جميعاً لما فيه الخير والصلاح

إهداء

إلى من لم أره بعيني، لكنني أحسست به في روحي، إلى من ترك الدنيا قبل أن أنطق أولى كلماتي
إلى **روح أبي** الراحل، رحلت مبكراً، لكن حضورك لم يغادرني يوماً
كنت الحلم الذي رافقني، والدعاء الذي لم يغيب عن لساني كل نجاح في حياتي، هو رسالة وفاء لذكرك
وإلى من ملأ غيابك بحنانه إلى **روح أخي** الراحل، الذي كنت له الابنة والأخت، وكان لي الأب والصديق،
كنت السند، والقدوة، والملاجئ وقت الشدائد رحيلك جرح لا يندمل، لكنه علمني القوة والصبر
إليكما أهدي ثمرة هذا التخرج، فبذكراكما، وبما تركتاه في قلبي، مضيت في طريقي
إلى **أمي** الحبيبة، نبض القلب وسنده
أنتِ القوة التي أسندتني حين ضعفت، والنبض الذي بعث في الحياة كلما خفت وهجها
أنتِ النور الذي أضاء دربي في عتات الأيام، والدعاء الذي كان سلاحني في كل لحظة
لكِ وحدكِ، كل الحب، وكل الامتنان، وكل ما أنجزته هو بفضلكِ بعد الله
إلى من كانت أول من أمسكت بيدي وعلمتني الحروف، إلى من غرست في حب التعلم منذ نعومة أظفاري
إلى أختي الغالية **شدلية**، لكِ كل الامتنان والوفاء، بفضلكِ كانت البداية.
إلى أختي **هاجر** يا من كنتِ لي أمًّا ثانية، ومصدر قوة وصبر دعاؤك وصبرك كانا عونًا لا يُقدَّر بثمن
إلى أختي **ميادة** رفيقة القلب والفكر، ومصدر الدعم شكراً لوجودكِ الدائم، وحنانكِ الذي يعادل الدنيا
إلى ابنة أخي الحبيبة **وثام** لوجودكِ معنى خاص في قلبي، وأتمنى أن تكون هذه الخطوة مصدر إلهام لكِ يوماً
إلى **إخوتي** الأعمام جميعاً، وإلى أولادهم الأحبة لكم مني كل المحبة والامتنان
إلى من كنت أجد لديهما دوماً الحنان والدعم، إلى **خالتي** وزوجها **ربيع**، يا من كنتم عائلتي الثانية أهديكم هذا
التخرج عربون محبة وامتنان

إلى صديقتي العزيزات **سهيلة، إنصاف، أحلام وناهد** كنتن نِعَم الرفقة، ونعم الأمان في درب مليء بالتحديات
إلى من كان جازًا بالجوار، وأخًا بالمواقف والأخلاق، إلى **عمي عبد الرزاق بوشوشة** وزوجته الفاضلة شكرا
لقلوبكم النبيلة، ولوقوفكم الصادق إلى جانبي، فكنتم لي عونًا لا يُنسى
وإلى كل من ساندني ووقف إلى جانبي بكلمة، بدعاء، أو بابتسامة
أهدي هذا الإنجاز المتواضع، عربون وفاء وامتنان لا يُنسى

ملخص

أحد الاهتمامات الرئيسية لمديري مرافق المياه هو الحفاظ على الأداء الأمثل لأنابيب شبكة توزيع المياه. ويمكن تحقيق ذلك من خلال أعمال التجديد وإجراءات الصيانة وإدارة الضغط وعمليات التحسين الأخرى. ومن ثم، فإن تحديد المخاطر المرتبطة بخطوط الأنابيب يعد أمراً مفيداً عند التخطيط لأعمال التجديد هذه. في هذا المشروع الذي يمثل نهاية الدراسة، تم تطوير نموذج (Delphi) لتحديد استراتيجيات تجديد شبكات مياه الشرب في مدينة البوني (ولاية عنابة). يعتمد النموذج على طريقة هجينة وكشفت النتائج أن الضغط كان المعيار الفرعي الرئيسي الأكثر أهمية، يليه عمر أنابيب المياه الخبراء؛ البوني AHP-الكلمات المفتاحية: تجديد أنابيب مياه الشرب؛ دلفي؛ ضبابي

Abstract

One of the main concerns of water utility managers is maintaining the optimal performance of water distribution network pipes. This can be achieved through renewal work, maintenance actions, pressure management, and other improvement operations. Consequently, determining the risk associated with pipes is useful when planning these renewal works. In this final year project, a model is developed to determine a strategy for renewing drinking water pipes in the city of El Bouni (wilaya of Annaba). The model is based on a hybrid method (Delphi and Fuzzy-AHP). The results revealed that pressure was the most crucial major sub-criterion, followed by the age of the water pipes.

Keywords: renewal of drinking water pipes; Delphi; Fuzzy-AHP; Experts; El-Bouni.

Résumé

L'une des principales préoccupations des gestionnaires des services de l'eau est de maintenir la performance optimale des canalisations des réseaux de distribution d'eau. Ceci est peut-être réalisé par les travaux de renouvellement, les actions de maintenance, la gestion de la pression et d'autres opérations d'amélioration. En conséquence, la détermination du risque associé aux canalisations est utile lors de la planification de ces travaux de renouvellement. Dans ce projet de fin d'étude, un modèle est développé pour déterminer une stratégie de renouvellement des canalisations d'eau potable de la ville d'El Bouni (wilaya d'Annaba). Le modèle est basé sur une méthode hybride (Delphi et Fuzzy-AHP). Les résultats ont révélé que la pression était le sous-critère majeure le plus crucial, suivie de l'âge des conduites d'eau.

Mots-clés : renouvellement des canalisations d'eau potable ; Delphi ; Fuzzy-AHP ; Experts ; El-Bouni.

Sommaire

Résumé (trois langues)	i
Sommaires	ii
Liste des Figues	vi
Liste des Photos	viii
Liste des Tableaux	ix
Liste des Abréviations	x
Introduction Générale	1
Chapitre 1 Synthèse bibliographique	3
1.1. Définitions	3
1.2. Méthodes MCDM	3
1.3. Revue de la littérature	4
1.4. Tendances et défis identifiés	15
Chapitre 2 : Méthodes et matériels	9
2.1. Phase 1 : Estimation des besoins en eau	9
2.1.1. Estimation de la population future.....	10
2.1.2. Estimation du débit moyen journalier.....	10
2.1.3. Estimation du débit maximal journalier	10
2.1.4. Débit de pointe	11
2.2. Phase 2 : Simulation hydraulique du réseau de distribution	11
2.2.1. Étape 1 : Construction du Modèle.....	11
2.2.2. Étape 2 : Scénarios de Simulation.....	11
2.3. Phase 3 : Méthode Delphi	11
2.3.1. Étape 1 : Sélection des experts	12
2.3.2. Étape 2 : Premier tour de questionnaire	12
2.3.3. Étape 3 : Analyse des réponses	12
2.3.4. Étape 4 : Deuxième tour de questionnaire.....	12
2.3.5. Étape 5 : Itérations supplémentaires (3 ^e tour).....	12
2.4. Phase 5 : La méthode Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)	12

2.4.1. Étape 1 : Construction de la structure hiérarchique	13
2.4.2. Étape 2 : Construction de la matrice de comparaison floue	13
2.4.3. Étape 3 : Calculer la moyenne géométrique.....	14
2.4.4. Étape 4 : Calculer le poids flou	14
2.4.5. Étape 5 : Defuzzification.....	14
2.4.6. Étape 6 : Normalisation	14
2.4.7. Étape 7 : Vérifier la cohérence de la matrice de comparaison par paires	14
2.4.8. Étape 8 : Classement des Conduites	15
2.5. Phase 5 : Recommandations & Plan d'Action	15
2.5.1. Plan de Renouvellement.....	15
2.5.2. Monitoring.....	15
Chapitre 3 : Présentation de la zone d'étude	16
3.1. Zone d'étude	16
3.2. Gestion du service de l'eau à Annaba	17
3.3. Collecte des données.....	18
3.3.1. Distribution de l'eau dans la ville d'Annaba	18
3.3.2. Sectorisation du réseau de distribution d'eau	19
3.3.3. Réseau d'eau potable de la ville d'Annaba	20
3.3.4. Interventions sur les réseaux	20
Chapitre 4 : Résultats et Discussions	22
4.1. Analyse des données collectées.....	22
4.1.1. Les volumes d'eau potable	22
4.1.2. Les pertes d'eau dans le réseau	22
4.2. Estimation des besoins en eau	24
4.2.1. Estimation de la demande moyenne en eau potable.....	24
4.2.2. Besoin en eau pour les équipements.....	25
4.2.3. Etude de variations des débits	27
4.3. Résultats de la simulation hydraulique	29
4.4. Application de la méthode Delphi.....	33
4.4.1. Choix des critères et des sous-critères.....	33
4.4.2. 1 ^{er} tour de la méthode Delphi	34
4.4.3. 2 ^e tour de la méthode Delphi	37
4.5. Application de la méthode Fuzzy-AHP	39
4.6. Plan de renouvellement.....	60
Conclusion Générale	62
Références bibliographiques	64
Annexes	67

Liste des Figures

Figure 2.1 : Organigramme méthodologique	9
Figure 3.1 : Présentation de la zone d'étude	16
Figure 3.2 : Délimitation de la ville d'El Bouni.....	17
Figure 3.3 : Répartition par diamètres des conduites	20
Figure 4.1 : Les volumes d'eau potable (2020 – 2024).....	22
Figure 4.2 : Fuites réparées sur conduites (années 2020 - 2024) – ville d'El Bouni	23
Figure 4.3 : Le réseau d'AEP d'El Bouni sous EPANET	29
Figure 4.4 : Résultat des pressions par EPANET pour la ville d'El Bouni.....	31
Figure 4.5 : Problème de pression dans le réseau d'AEP de la ville d'El Bouni.....	31
Figure 4.6 : Résultat des pressions dans le réseau de la ville d'El Bouni	32
Figure 4.7 : Résultat des vitesses dans le réseau de la ville d'El Bouni.....	32
Figure 4.8 : Echelle de trois niveaux.....	35
Figure 4.9 : Critères retenus après le 1er tour de la méthode Delphi	35
Figure 4.10 : Scores moyens des sous-critères pour le critère « Physique »	36
Figure 4.11 : Scores moyens des sous-critères pour « Environnement de la conduite »	36
Figure 4.12 : Scores moyens des sous-critères pour le critère « Opérationnel ».....	36
Figure 4.13 : Scores moyens des sous-critères pour le critère « Socio-économique »	37
Figure 4.14 : Critères retenus lors du second tour de la méthode Delphi	37
Figure 4.15 : Structure hiérarchique.....	40
Figure 4.16 : Nombres triangulaires flous (NTF)	40
Figure 4.17 : Nombre des experts pour le groupe « ENS »	43
Figure 4.18 : Nombre des experts pour le groupe « DRE »	43
Figure 4.19 : Nombre des experts pour le groupe « ADE ».....	43
Figure 4.20 : Nombre des experts pour le groupe « BET »	43
Figure 4.21 : Nombre des experts pour le groupe « ENT »	43

Figure 4.22 : Nombre total des experts par wilaya	44
Figure 4.23 : Résultats de la pondération des critères par la méthode Fuzzy-AHP	49
Figure 4.24 : Résultats de la pondération des sous-critères (critère : Physique).....	52
Figure 4.25 : Résultats de la pondération sous-critères (Environnement de la conduite)	53
Figure 4.26 : Résultats de la pondération des sous-critères (critère : Opérationnel).....	55
Figure 4.27 : Résultats de la pondération des sous-critères (critère : Socio-économique)...	56
Figure 4.28 : Classement des poids globaux des sous-critères.....	58
Figure 4.29 : Plan de renouvellement des canalisations d'eau potable, ville d'El Bouni	62

Liste des Photos

Photo 3.1 : Fuites dans les réseaux de distribution.....	21
Photo 3.2 : Fuite sur une conduite en Acier.....	21
Photo 3.3 : Fuite sur un branchement	21
Photo 4.1 : Réparation des fuites (El Bouni)	23

Liste des Tableaux

Tableau 2.1. Échelle Linguistique de l'importance relative (Saaty 1980).	13
Tableau 2.2. Index aléatoire (RI)	15
Tableau 3.1. Synthèse des volumes pour la ville d'El Bouni.....	18
Tableau 3.2 : Caractéristiques des réservoirs d'eau (ville d'El Bouni) (Saou, 2018)	19
Tableau 3.3 : Les secteurs et Sous-secteurs de la ville d'El Bouni (Saou, 2018)	19
Tableau 3.4 : Réparation de type de matériau des conduites (ADE, 2024)	20
Tableau 4.1 : Détermination des besoins en eau sanitaire.....	25
Tableau 4.2 : Détermination des besoins scolaire	25
Tableau 4.3 : Détermination des besoins administratifs	26
Tableau 4.4 : Détermination des besoins sociaux culturels et sportifs.....	26
Tableau 4.5 : Détermination des besoins totaux	26
Tableau 4.6 : Résultat de calcul de la Consommation journalière	27
Tableau 4.7 : Résultat du calcul des débits spécifiques et débits en route	28
Tableau 4.8 : Extrait du résultat des caractéristiques du réseau de la ville d'El Bouni.....	30
Tableau 4.9 : Liste des critères sélectionnés	33
Tableau 4.10 : Liste des sous-critères sélectionnés.....	34
Tableau 4.11 : Echelle de Likert à 5 points.....	35
Tableau 4.12 : Résultat du second tour pour les sous-critères	38
Tableau 4.13 : Liste finale des critères et sous-critères.....	39
Tableau 4.14 : Nombre de questionnaires envoyés.....	41
Tableau 4.15 : Calendrier des réponses par les experts.....	42
Tableau 4.16 : Exemple d'une matrice de comparaison par paire floue	44
Tableau 4.17 : Calcul de la moyenne géométrique floue pour les quatre critères.....	45
Tableau 4.18 : Calcul des poids flous et poids normalisés.....	45
Tableau 4.19 : Indice aléatoire (RI)	46
Tableau 4.20 : Résultat des poids relatifs pour le groupe des enseignants.....	46
Tableau 4.21 : Résultat des poids relatifs pour le groupe des décideurs (DRE)	47
Tableau 4.22 : Résultat des poids relatifs pour le groupe des gestionnaires (ADE) ..	47
Tableau 4.23 : Résultat des poids relatifs pour le groupe des bureaux d'études.....	48
Tableau 4.24 : Résultat des poids relatifs pour le groupe entreprises de travaux	48

Tableau 4.25 : Résultat des poids relatifs pour tous les groupes.....	49
Tableau 4.26 : Matrice de comparaison par paire sous-critères (critères physique) ..	50
Tableau 4.27 : Résultat des poids pour le sous-critère « Physique » enseignants.....	51
Tableau 4.28 : Résultat final des poids flous sous-critères « critère : Physique ».....	51
Tableau 4.29 : Résultat des poids pour les sous-critères par le groupe de DRE	52
Tableau 4.30 : Résultat poids flous sous-critères « Environnement de la conduite »	53
Tableau 4.31 : Résultat des poids pour sous-critères « Opérationnel » par ADE	54
Tableau 4.32 : Résultat final des poids flous les sous-critères « Opérationnel ».....	54
Tableau 4.33 : Résultat des poids pour sous-critères « Socio-économique » BET	55
Tableau 4.34 : Résultat final des poids flous sous-critères « Socio-économique »....	56
Tableau 4.35 : Résultat final des poids relatifs critères et sous-critères par FAHP ...	56
Tableau 4.36 : Pondérations des poids globaux des sous-critères	57
Tableau 4.37 : Pondération avec 12 Experts	59
Tableau 4.38 : Pondération avec 06 Experts	59
Tableau 4.39 : Pondération avec 01 Expert.....	59
Tableau 4.40 : Classement par nombre des experts	59
Tableau 4.41 : Calcul des poids globaux des indicateurs	60
Tableau 4.42 : Exemple de calcul du seuil de renouvellement	61

Liste des Abréviations

ADE : Algérienne Des Eaux

AEP : Alimentation en Eau Potable

AHP : Processus Hiérarchique Analytique

CI : Indice de Cohérence

CR : Ratio de cohérence

DRE : Direction des Ressources en Eau

ELECTRE : ELimination Et Choix Traduisant la REalité

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

MCA : Analyse Multicritères

MCDM : méthodes de décision multicritères

ONS : Office National des Statistiques

PEHD : Polyéthylène Haute Densité

PVC : Polychlorure de Vinyle

RDE : Réseaux de Distribution d'Eau

RI : indice de cohérence aléatoire

ROMETHEE: Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations

SEP : Service Eau Potable

SIG : Système d'Information Géographique

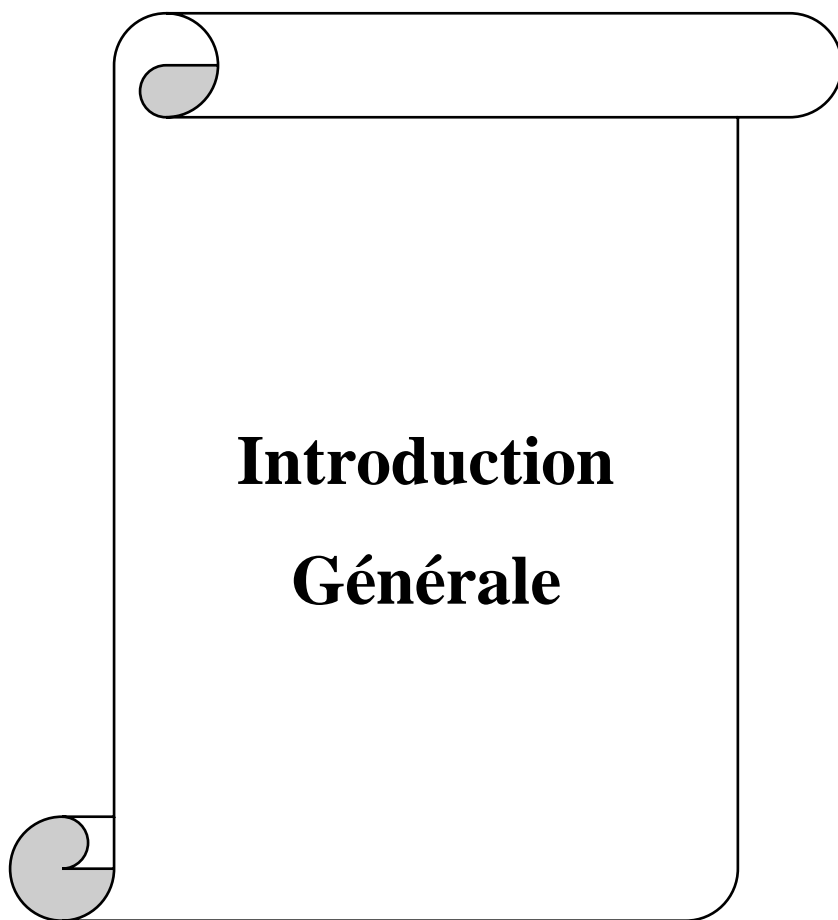
TFN : Nombre Flou Triangulaire

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

VD : Volume Distribué

VF : Volume Facturé

VP : Volume Produit



Introduction

Générale

Introduction générale

Les réseaux de distribution d'eau (RDE) représentent les équipements les plus essentielles et onéreuses du réseau d'alimentation en eau potable (AEP) (Nunes et al., 2023). La dégradation de ces installations constitue un enjeu crucial pour les gestionnaires des services de l'eau potable (SEP) (Li et al., 2023). Au fil du temps, ces détériorations peuvent engendrer des pannes qui diminuent l'efficacité hydraulique et induisent des frais de réparation considérables. (Bakhtiari et al., 2023). Ainsi, l'une des préoccupations majeures des gestionnaires des SEP est d'assurer des conditions idéales (en quantité et qualité) d'AEP (de Souza Batista et al., 2024). A cet effet, il est évident de mettre en place des plans de renouvellement des conduites d'eau (Abd Rahman et al., 2018).

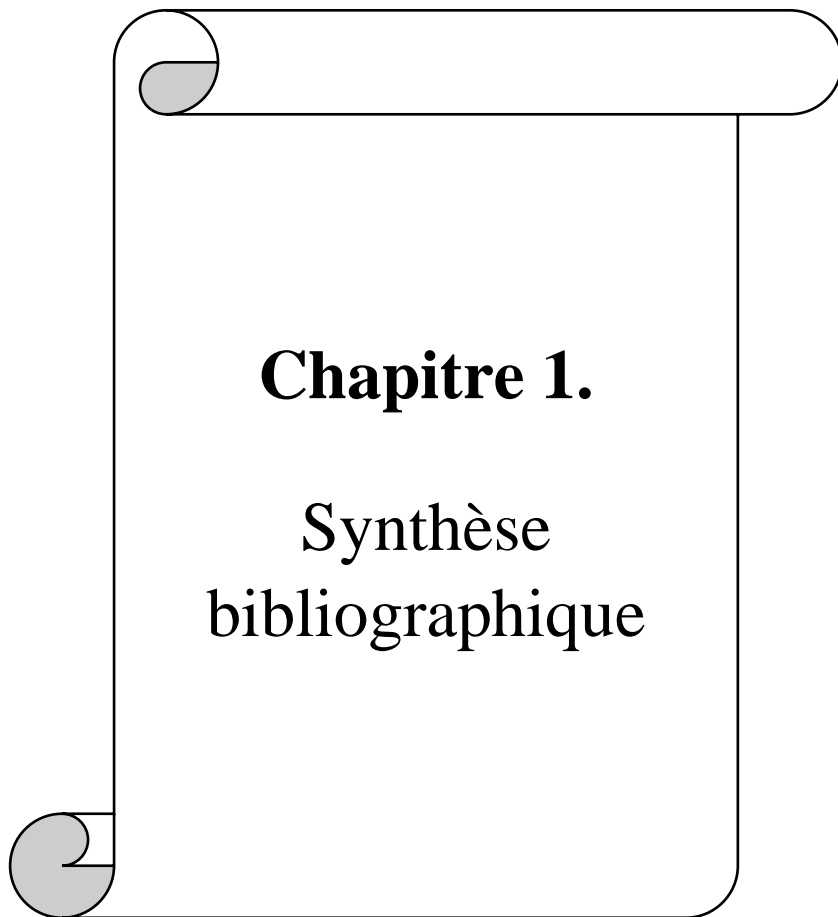
Le renouvellement des conduites d'eau est une approche fondamentale pour préserver la qualité des services rendus aux usagers et garantir l'application des normes de santé et de sécurité. (Orašnin et al., 2025). A travers le monde, les gestionnaires des SEP cherchent à développer des plans de renouvellement des RDE appropriés pour améliorer la performance technique et financier (Boukhari et al., 2024). D'après la littérature scientifique, de nombreuses études ont été réalisées pour identifier les stratégies de renouvellement les plus appropriées en utilisant des modèles déterministes, physiques et statistiques, et plus récemment, des modèles décisionnels basés sur le risque (Salehi et al., 2021). Les approches déterministes estiment le taux de pannes de conduits ou la date estimée de la prochaine panne en se basant sur les diverses propriétés des conduits et des facteurs environnementaux (Jyrkama et al., 2022). Les modèles physiques s'efforcent d'exposer les mécanismes structurels menant à la rupture des conduites, proposant souvent des représentations simplifiées des phénomènes de dégradation physique comme les fuites d'eau (Sitaropoulos et al., 2023). Des modèles statistiques ont été élaborés pour surmonter les défis liés à l'utilisation des modèles physiques et sont employés pour mesurer la dégradation structurelle des conduites d'eau en se basant sur des analyses de données passées. (Shahata et Zayed, 2012). Les recherches récentes concernant la hiérarchisation du renouvellement des

conduites d'eau ont progressé vers des modèles d'assistance à la prise de décision (Marques et Cunha, 2020) ainsi que des modèles d'évaluation du risque (D'Ercole et al., 2018).

L'objectif majeur de l'analyse des risques de défaillance dans les RDE est d'établir la programmation appropriée du remplacement des conduites (Sargaonkar et al., 2013). Toutefois, en raison de la complexité associée aux RDE, les modèles de décision multicritères (MCDM) ont été utilisés pour établir les stratégies de renouvellement des RDE (Salehi et al., 2018). Ainsi, de multiples études ont analysé des combinaisons de méthodes fondées sur les risques et les MCDM.

Dans cette étude, un modèle d'aide à la prise de décision a été développé pour le renouvellement des canalisations d'eau des RDE. Le modèle développé est basé sur l'application d'une méthodologie hybride (Delphi et Fuzzy-AHP). Enfin, le modèle développé a été testé pour le cas du réseau de distribution d'eau de la ville d'El Bouni (wilaya d'Annaba).

Ce projet de fin d'étude est composé de quatre chapitres. Après une introduction générale, le premier chapitre présente une revue de littérature sur les méthodes MCDM appliquées pour le renouvellement des canalisations d'eau des RDE. 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 du renouvellement des canalisations d'eau des RDE. Le chapitre 3 présente la 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). 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

1.1. Définitions

Définition du Renouvellement et de la Réhabilitation des réseaux de distribution d'eau potable

❖ Renouvellement des réseaux d'eau potable :

Le renouvellement consiste à remplacer intégralement ou partiellement des canalisations vétustes ou défectueuses par de nouvelles conduites, souvent avec des matériaux plus modernes et durables (PEHD, fonte ductile, etc.) (Da Silva & Souza, 2017). L'objectif du renouvellement est d'améliorer la performance hydraulique, réduire les fuites et garantir une meilleure qualité de l'eau (Elnaboulsi & Alexandre, 1998).

❖ Réhabilitation des réseaux d'eau potable

La réhabilitation vise à rénover ou remettre en état un réseau existant sans forcément le remplacer entièrement. L'objectif de la réhabilitation des RDE est de prolonger la durée de vie du réseau à moindre coût, réduire les pertes d'eau et éviter des travaux lourds (Hassoun Nedjar et al., 2023)

Le choix dépend de l'état du réseau, du budget et des objectifs à long terme.

1.2. Méthodes MCDM

L'analyse multicritères (*Multi-Criteria Analysis* : MCA, appelée aussi MCDM : *Multiple Criteria Decision Analysis*) est une approche structurée pour soutenir la prise de décision lorsqu'il s'agit de plus d'un critère unique et permet à chaque utilisateur d'accorder une importance relative à chaque critère. Les méthodes MCDM sont fortement utilisées dans le domaine de la gestion de l'eau

(Hajkowicz et Collins, 2007). D'après la littérature scientifique, il existe plusieurs méthodes MCDM qui ont été utilisées dans la gestion des ressources en eau : AHP (*Analytic Hierarchy Process*) (Saaty, 1980), TOPSIS (*Technique for Order by Similarity to Ideal Solution*) (Hwang et Yoon, 1981), ELECTRE (*Élimination Et Choix Traduisant la Réalité*) (Roy et al., 1971), PROMETHEE (*Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations*) (Brans, 1982).

L'application des méthodes MCDM au renouvellement des conduites d'eau potable représente une avancée majeure en matière de gouvernance urbaine. Elle permet d'optimiser l'allocation des ressources tout en tenant compte de la complexité des systèmes techniques et des attentes sociales.

1.3. Revue de la littérature

Plusieurs chercheurs ont utilisé une des méthodes MCDM pour la gestion des infrastructures d'eau potable. L'AHP est largement utilisée pour hiérarchiser les tronçons de conduites à renouveler en fonction de critères techniques (fuites, âge, matériau), économiques (coûts d'investissement et de renouvellement) et sociaux. D'autres études ont intégré l'AHP avec des données SIG pour évaluer la vulnérabilité des conduites (Marzouk & Osama, 2015). Dans les dernières années, la Fuzzy-AHP (AHP floue) est employée pour gérer les incertitudes et les subjectivités dans l'évaluation des critères.

Après examen de diverses études concernant la planification du renouvellement des conduites d'eau dans les réseaux de distribution d'eau, la majorité de ces recherches associaient des critères hydrauliques et mécaniques aux dysfonctionnements des conduites :

Orašanin et al., (2025) ont appliqué la méthode AHP pour la pondération des critères d'évaluation. Ensuite, ils ont utilisé une méthode hybride entre la technique d'optimisation multicritère VIKOR et l'approche d'optimisation multicritère TOPSIS pour choisir le meilleur projet.

Retima et al., (2025) ont appliqué des deux approches MCDM (AHP et Fuzzy-AHP) pour sélectionner les meilleures alternatives de la réduction des pertes en eau dans le réseau de distribution d'eau de la ville d'Annaba (Algérie). Six critères d'évaluation, vingt-six sous-critères et douze alternatives ont été choisis pour sélectionner les meilleures stratégies de réduction des pertes en eau. 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, le contrôle de la pression et la réparation rapide des fuites d'eau présentent les meilleures solutions pour réduire les pertes en eau dans les réseaux de distribution d'eau potable.

Jayakody et al., (2024) ont développé un modèle intégré d'allocation des fonds pour la maintenance des réseaux d'eau. Un modèle a été développé à partir d'une analyse AHP basée sur des avis d'experts recueillis par questionnaire afin d'optimiser l'allocation des fonds d'entretien pour les réseaux d'eau. Les résultats de l'analyse de compromis permettent d'identifier l'alternative d'intervention optimale, répondant aux exigences budgétaires et générant le bénéfice maximal.

Nunes et al., (2023) ont classé les tuyaux les plus susceptibles aux dégâts en proposant un modèle simplifié pour évaluer des risques dans les systèmes de distribution d'eau en eau. Une analyse de cas a ensuite été réalisée pour examiner les implications financières et les défis associés à l'indice de la qualité de l'eau. Les conclusions ont démontré que l'implémentation du système cité dans les réseaux de distribution d'eau de faible capacité, disposant de ressources financières restreintes, peut se révéler extrêmement bénéfique.

Hssoun Nedjar et al., (2023) ont développé un outil d'aide à la décision pour améliorer la planification de la réhabilitation des réseaux de distribution d'eau en utilisant la méthode AHP et le score d'urgence. L'AHP a été utilisée pour classer les indicateurs ayant une forte influence sur la détérioration des canalisations d'eau, et le score d'urgence a été calculé pour établir le programme de réhabilitation (court, moyen et long terme). Le modèle proposé a été testé pour le cas de la ville de Souk-Ahras (Algérie). Sur la base des avis de vingt-quatre experts, les pondérations relatives des trois critères physiques, opérationnels et environnementaux de la canalisation ont été calculées et se sont avérées égales respectivement à 35,40 %, 55,60 % et 9,00 %. Les deux indicateurs, le nombre de défaillances et la pression, se sont avérés avoir les pondérations globales les plus élevées. Les résultats de cet article peuvent être utilisés pour améliorer la prise de décision dans la planification de la réhabilitation des réseaux de distribution d'eau potable.

Vishwakarma, A., & Sinha, S. K. (2022) ont étudié et développé des techniques de modélisation de la probabilité de défaillance et des conséquences de la défaillance, fonctions essentielles à l'analyse des risques. Cependant, le développement de ces modèles ne s'est pas traduit par de

meilleurs systèmes d'aide à la décision basés sur les risques pour les services d'eau, car ils utilisent encore des aspects limités des résultats de leurs analyses de risques pour prioriser les canalisations à renouveler. Cette étude montre comment les méthodologies d'analyse des risques pour les canalisations d'eau potable pourraient être améliorées sur la base des modèles scientifiques actuels en matière de modélisation des risques. Les améliorations proposées peuvent aider les services des eaux à améliorer la résolution, la précision et la catégorisation des canalisations d'eau dans leurs modèles de risques, améliorant ainsi la fiabilité et l'utilité des modèles de risques pour la priorisation du renouvellement des canalisations d'eau.

La gestion des risques dans les réseaux d'AEP a été l'objet des études de Boryczko et al., (2021) ainsi que de Raspati et al., (2022). Boryczko et al., (2021) mettent l'accent sur le rôle crucial des démarches préventives et proposent une procédure pour élaborer des cartes des risques associées à l'approvisionnement en eau, en utilisant des simulations via le programme EPANET 2.0. Cependant, celle-ci suggère une approche qui utilise la forêt aléatoire (un algorithme de machine Learning) et l'outil d'analyse des faiblesses des équipements (un ensemble de méthodes pour évaluer la faiblesse des équipements) afin de catégoriser les conduites selon le degré des pertes et simplifier les choix de réhabilitation. Les deux recherches avaient pour objectif d'optimiser la gestion des systèmes de distribution d'eau et de réduire au minimum les ruptures et les urgences. Il est à souligner que ces deux études se fondent sur des éléments historiques du système d'AEP, comme le taux de défaillance et l'ancienneté des conduites.

Salehi et al. (2021) ont élaboré un modèle basé sur le risque pour définir les méthodes adéquates de rénovation des conduites dans les systèmes d'AEP. Ce modèle utilise une approche de prise de décision à critères multiples fondée sur la logique floue, au cours de laquelle l'analyse du risque de rupture d'une canalisation d'eau potable et de ses impacts associés se fait indépendamment. Le modèle développé est capable d'examiner jusqu'à 48 critères en même temps pour évaluer les éléments de risque de chaque conduite.

Roigé et al., (2020) ont présenté une méthodologie cohérente et transparente pour la priorisation des tronçons de canalisations à renouveler sur l'ensemble du réseau d'eau urbain d'Aigües de Barcelona (Espagne). L'indice de priorisation pour le renouvellement des canalisations permet d'évaluer l'impact des risques de chaque tronçon du RDE. Les tronçons présentant les indices de priorisation les plus élevés devraient donc être proposés comme prioritaires pour le

renouvellement. Les auteurs ont développé un outil décisionnel multicritère basé sur la méthode AHP et intègre plusieurs aspects économiques, environnementaux et sociaux.

Phan et al., (2019) ont élaboré un modèle hybride axé sur le risque pour déterminer l'ordre de rénovation des conduites d'eau potable. Les auteurs ont suggéré une méthode d'inférence floue pour combiner de multiples impacts urbains, en ayant recours à la connectivité algébrique afin d'évaluer l'impact de la défaillance de conduite sur l'efficacité du réseau. Ils ont pris en compte des facteurs tels que l'importance hydraulique, le coût de l'entretien et les impacts urbains tel que éléments décisionnels. Dans cette étude, il a été proposé d'inclure les impacts des casses de conduites sur l'état hydraulique du réseau dans les recherches à venir visant à élaborer des paramètres pour améliorer les implications économiques et les effets sur la santé publique.

D'Ercole et al., (2018) ont employé un logiciel combinant la simulation hydraulique à une analyse topologique pour résoudre des problèmes d'analyse complexes. Dans cette méthode, l'analyse des risques effectuée en associant la probabilité de défaillance de chaque canalisation aux répercussions en matière de demande d'eau et de manque de pression. Ces deux modèles reposent sur les données historiques du réseau, comme l'âge ou le matériau et le taux de défaillance.

Salehi et al., (2018) ont introduit un modèle hybride de prise de décision qui repose sur des évaluations de risque sans dépendre des informations sur les pannes opérationnelle (qui sont souvent incertaines et/ou manquantes). L'approche emploie des paramètres de développement (habituellement dérivés de la simulation hydraulique du réseau) pour examiner l'état hydraulique et mécanique des conduites dans le but de classer les interventions de renouvellement au sein des réseaux d'AEP. Toutefois, il est crucial de réviser fréquemment ces aspects en utilisant des éléments collectés sur le terrain.

Aşchilean (2017) a tenté de résoudre scientifiquement, grâce à la méthode AHP, un problème rencontré par les entreprises de distribution d'eau en milieu urbain, et de choisir la meilleure technologie de réhabilitation des canalisations d'eau. Cette étude présente le choix de la technologie pour la réhabilitation du réseau de distribution d'eau domestique à Cluj-Napoca (Roumanie). Les auteurs ont utilisé la méthode AHP afin de hiérarchiser les priorités en matière de réhabilitation du réseau. La méthode présentée dans cet article peut être utilisée pour les études de

faisabilité des réseaux de distribution d'eau. Elle peut également être utilisée pour la sélection d'autres types d'installations pour les bâtiments.

Yoo et al., (2014) ont développé un modèle pour prioriser les activités de renouvellement des conduites d'eau potable. L'analyse de ce modèle est fondée sur des indices hydrauliques, et le seul élément considéré dans l'ordre de priorité pour le remplacement des conduites était le taux de défaillance. Dans cette étude, un modèle MCDM axé sur les défaillances de conduites a été élaboré pour définir ces priorités.

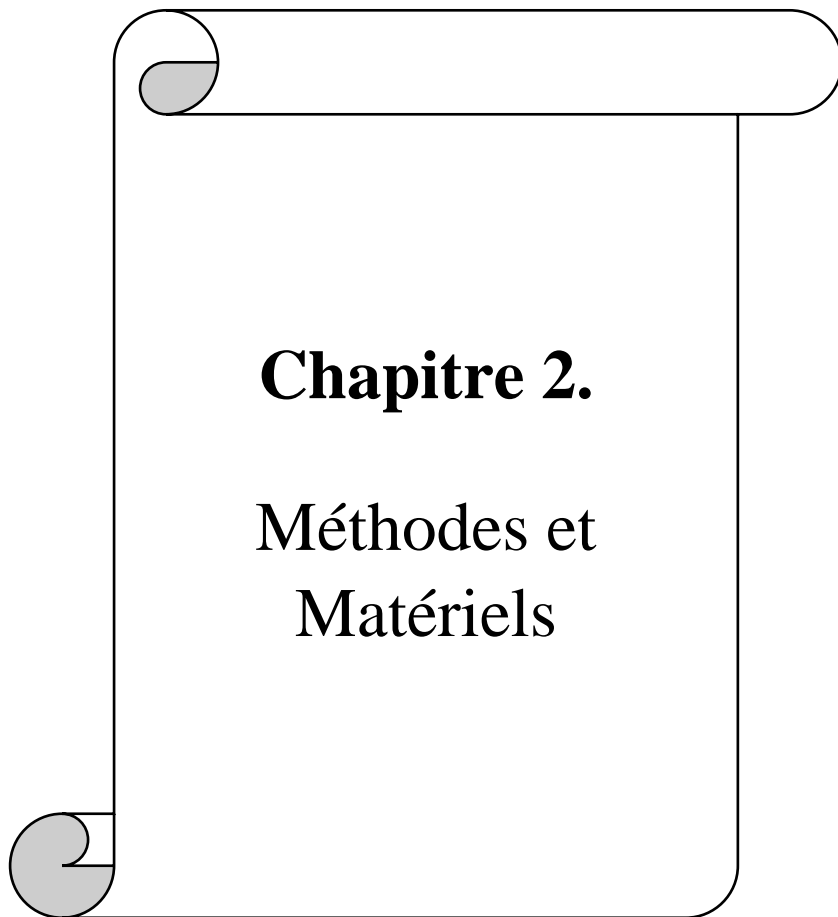
1.4. Tendances et défis identifiés

❖ Avantages :

- ✓ Les méthodes AHP/Fuzzy-AHP permettent une décision structurée intégrant des critères qualitatifs et quantitatifs.
- ✓ La Fuzzy-AHP est particulièrement utile pour les réseaux avec données incertaines (ex. : vieilles conduites sans historique précis).

❖ Limites :

- ✓ Subjectivité dans les pondérations des critères (nécessite l'avis d'experts).
- ✓ Complexité accrue avec l'utilisation de la méthode Fuzzy-AHP, nécessitant des outils informatiques (MATLAB, Python, logiciels dédiés).



Chapitre 2.

Méthodes et Matériels

L'organigramme méthodologique structuré pour l'application d'une méthode intégrée, combinant l'estimation des besoins en eau, simulation hydraulique, la méthode Delphi pour le choix des critères, et l'approche Fuzzy-AHP pour le calcul des poids pour le renouvellement des conduites d'eau potable est illustré dans la figure 2.1.

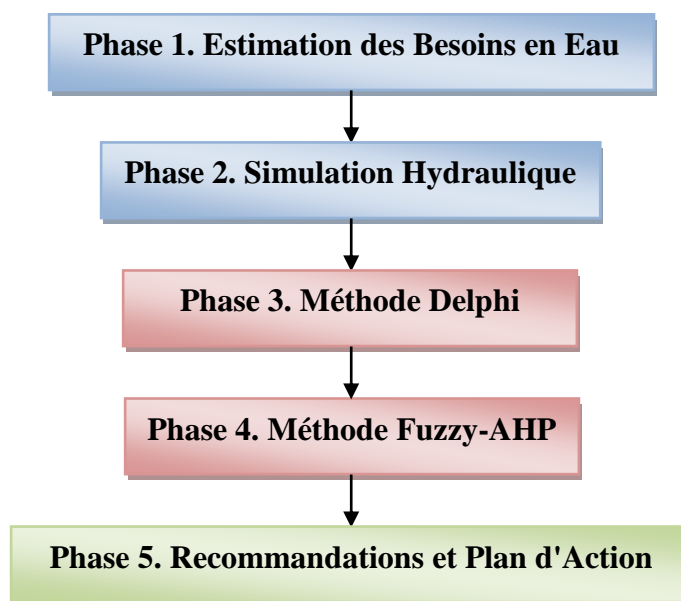


Figure 2.1. Organigramme méthodologique

2.1. Phase 1 : Estimation des besoins en eau

Les besoins en eau varient fortement selon les conditions locales et, dans une certaine mesure, en fonction du niveau de vie de la population. Cette consommation est généralement évaluée à partir de la consommation moyenne quotidienne, puis complétée par une analyse des fluctuations sur des périodes plus courtes, comme une journée ou une heure.

2.1.1. Estimation de la population future

Accroissement démographique de la population est le facteur essentiel pour l'évaluation des besoins en eau. Il définit par la formule suivante

$$P_f = P_0(1 + \tau)^n \quad (2.1)$$

Avec :

- P_f : Population future (habitant).
- P_0 : Population actuelle (habitant).
- τ : Taux d'accroissement (%).
- n : Nombre d'année à l'horizon (année).

2.1.2. Estimation du débit moyen journalier

La consommation moyenne journalière d'une agglomération consiste à calculer les besoins en eau potable des populations et des équipements qui existent ainsi que ceux projetés. Elle est déterminée par la formule suivante :

$$Q_{Jmoy} = \frac{(P_f \times D)}{1000} \quad (2.2)$$

Avec :

- Q_{Jmoy} : Consommation moyenne journalière en (m³/j).
- P_f : Population future (nombre de consommation).
- D : dotation moyenne en (l/j/hab.)

2.1.3. Estimation du débit maximal journalier

La consommation en eau quotidienne n'est pas constante, mais varie en présentant des maximums et des minimums. Pour tenir compte de cette variation, on doit considérer le coefficient dit : coefficient d'irrégularité maximum « K_{max} ». Il est utilisé comme élément de base dans les calculs de dimensionnement de l'adduction, les réservoirs de stockage et les stations de pompage.

Il est calculé par la formule suivante :

$$Q_{Jmax} = Q_{Jmoy} \times K_{max} \quad (2.3)$$

Avec :

- Q_{Jmax} : Débit maximum journalier (m³/j).
- Q_{Jmoy} : Débit moyen journalier (m³/j).
- K_{max} : Coefficient de variation journalière maximale (1.1 - 1.3)

2.1.4. Débit de pointe

Le débit de pointe est donné par la formule suivante :

$$Q_p = Q_{Jmax} \times K_p \quad (2.4)$$

Avec :

- Q_p : Débit de pointe (m^3/j).
- Q_{Jmax} : Débit maximum journalier (m^3/j).
- K_p : Coefficient de pointe.

Ensuite, on doit calculer les débits spécifiques, en route et débits en nœuds.

2.2. Phase 2 : Simulation hydraulique du réseau de distribution

La modélisation du réseau vise à décrire le comportement hydraulique des différents dispositifs du réseau. L'intérêt de cette étape est de reproduire ce qui se déroule en réalité dans le réseau à l'aide d'un modèle hydraulique.

Le modèle hydraulique permet la simulation du comportement d'un réseau d'eau potable. D'après la littérature scientifique, il existe plusieurs logiciels servant à la simulation hydraulique des systèmes de distribution d'eau potable. Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi le logiciel EPANET, suite à sa facilité d'utilisation et il est gratuit. Le logiciel EPANET permet une analyse hydraulique du réseau à partir des caractéristiques physiques des tuyaux et dynamiques des nœuds. Les étapes d'application sont comme suit :

2.2.1. Étape 1 : Construction du Modèle

- ✓ Digitalisation du réseau (EPANET).
- ✓ Paramètres : diamètres, matériaux, pression, débits.

2.2.2. Étape 2 : Scénarios de Simulation

- ✓ Évaluation des performances du réseau (pression, vitesse, fuites).
- ✓ Identification des conduites critiques

2.3. Phase 3 : Méthode Delphi

La méthode Delphi est une technique de communication structurée, souvent utilisée pour atteindre un consensus parmi un panel d'experts. L'objectif de cette phase est la sélection des Critères et sous-critères d'évaluation pour le renouvellement des conduites d'eau potable. Les étapes d'application sont :

- 2.3.1. Étape 1 : Sélection des experts.** Identifier un panel d'experts pluridisciplinaire (hydrauliciens, urbanistes, gestionnaires).
- 2.3.2. Étape 2 : Premier tour de questionnaire.** Soumettre un questionnaire ouvert aux experts pour recueillir leurs opinions sur les critères à considérer pour le renouvellement des conduites (par exemple, l'âge des conduites, le taux de fuite, les coûts, etc.).
- 2.3.3. Étape 3 : Analyse des réponses.** Analyser les réponses et identifier les points de consensus et de divergence.
- 2.3.4. Étape 4 : Deuxième tour de questionnaire.** Soumettre un deuxième questionnaire, cette fois plus structuré, en incluant les résultats du premier tour. Les experts sont invités à réévaluer leurs opinions à la lumière des réponses des autres participants.
- 2.3.5. Étape 5 : Itérations supplémentaires (3^e tour).** Répéter le processus jusqu'à ce qu'un consensus soit atteint ou que les opinions convergent suffisamment.

2.4. Phase 5 : La méthode Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)

Le processus de hiérarchie analytique (AHP) est l'une des méthodes MCDM les plus utilisées et aide à comprendre le problème et à choisir une décision qui correspond à l'objectif des spécialistes. Cela contribue à décomposer un problème complexe de décision avec les différents critères et indicateurs associés dans un système hiérarchique dans lequel les décisions complexes sont réduites à une série de comparaisons par paires entre les éléments de la hiérarchie des décisions (Saaty, 1980). L'AHP a été développée par Saaty en 1980, elle est largement appliquée dans plusieurs domaines et a été largement utilisée dans la gestion de l'eau (Hamchaoui et al., 2015), mais peu de recherches ont utilisé cette approche dans le cadre de l'évaluation des risques pour le renouvellement des réseaux de distribution d'eau.

La méthode AHP classique présente des limites lorsqu'il s'agit de prendre en compte la subjectivité et l'imprécision inhérentes aux jugements des décideurs. En effet, les décisions ne sont généralement pas binaires, et les évaluations verbales sont souvent floues (Saaty, 1980). Pour pallier cette faiblesse, Saaty a proposé une extension de la méthode, connue sous le nom de Fuzzy-AHP (FAHP) ou AHP Flou. Cette approche intègre la notion de flou dans les jugements, en remplaçant les valeurs précises (généralement comprises entre 1 et 9) par un nombre flou triangulaire, noté $\tilde{a} = (l, m, u)$ utilisé dans les comparaisons par paires. Ce vecteur

à trois paramètres permet de mieux modéliser l'incertitude des évaluations humaines. Le tableau 2.1 représente l'échelle linguistique floue.

Tableau 2.1 : Échelle Linguistique de l'importance relative (Saaty 1980).

Échelle linguistique	Saaty	Nombre flou triangulaire	L'inverse du nombre flou triangulaire
Importance égale de deux éléments	1	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Faible préférence (l'élément i par rapport à l'élément j)	3	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
Forte préférence (l'élément i par rapport à l'élément j)	5	(4, 5, 6)	(1/6, 1/5, 1/4)
Très forte préférence (l'élément i par rapport à l'élément j)	7	(6, 7, 8)	(1/8, 1/7, 1/6)
Préférence absolue (l'élément i par rapport à l'élément j)	9	(9, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/9)
Valeurs intermédiaires entre deux jugements (l'élément i par rapport à l'élément j)	2	(1, 2, 3)	(1/3, 1/2, 1)
	4	(3, 4, 5)	(1/5, 1/4, 1/3)
	6	(5, 6, 7)	(1/7, 1/6, 1/5)
	8	(7, 8, 9)	(1/9, 1/8, 1/7)

Les étapes à suivre pour l'utilisation de la méthode Fuzzy-AHP sont :

2.4.1. Étape 1 : Construction de la structure hiérarchique

La première phase consiste à diviser le problème en une structure hiérarchique, en premier lieu il faut définir le but du problème qui sera au sommet de cette hiérarchie, l'ensemble des sous-critères contribuant à atteindre l'objectif seront positionnés au sein des hiérarchies suivantes.

2.4.2. Étape 2 : Construction de la matrice de comparaison floue

Dans cette étape une comparaison par paire (deux-à-deux) effectuée par les experts à l'aide de l'échelle linguistique pour construire la matrice de comparaison floue \tilde{A} .

$\tilde{A} = \{\tilde{a}_{ij}\}$ présentée dans l'équation 2.5 de n critères.

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & \tilde{a}_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Où :

$\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}; m_{ij}; u_{ij})$ sont les vecteurs triangulaires flous (TFN)

2.4.3. Étape 3 : Calculer la moyenne géométrique

La moyenne géométrique de chaque ligne calculée après que les poids flous sont calculés par normalisation.

$$\tilde{r}_i = \left(\prod_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.6)$$

La moyenne géométrique de chaque ligne

$$\tilde{r}_i = (l_{i1} \times l_{i2} \times \dots \times l_{in})^{\frac{1}{n}} (m_{i1} \times m_{i2} \times \dots \times m_{in})^{\frac{1}{n}} (u_{i1} \times u_{i2} \times \dots \times u_{in})^{\frac{1}{n}} \quad (2.7)$$

2.4.4. Étape 4 : Calculer le poids flou

Le calcul du poids flou pour chaque critère, en combinant les 3 étapes suivantes :

- **Étape 4a** : Trouver le vecteur \tilde{r}_i pour chaque critère i .
- **Étape 4b** : Calculer la somme de tous les vecteurs \tilde{r}_i et trouver l'inverse de ces derniers.
- **Étape 4c** : Pour calculer le vecteur poids \tilde{w}_i de chaque critère i , on multiplie \tilde{r}_i par le vecteur somme inverse

$$\tilde{w}_i = r_i \otimes (r_{i1} \oplus r_{i2} \oplus \dots \oplus r_{in})^{-1} \quad (2.8)$$

$$\tilde{w}_i = (lw_i; mw_i; uw_i)$$

2.4.5. Étape 5 : Defuzzification

Le résultat de l'étape précédente est un vecteur \tilde{w}_i , et donc un nombre flou. Cette étape consiste alors à enlever le caractère flou (defuzzification) par la méthode du centre de gravité proposée par Chang 1996, en appliquant l'équation :

$$M_i = \frac{l_1 w_i + m_1 w_i + u_1 w_i}{3} \quad (2.9)$$

2.4.6. Étape 6 : Normalisation

M_i est un score non-flou, mais il faut le normaliser en utilisant l'équation

$$N_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (2.10)$$

2.4.7. Étape 7 : Vérifier la cohérence de la matrice de comparaison par paires

Dans cette étape nous devons vérifier la cohérence du résultat. Avant de vérifier la cohérence, il est souvent nécessaire de convertir la matrice floue en une matrice nette (équation 2.11).

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

A : est la matrice de décision, a_{ij} (priorité individuelle) les comparaisons entre les éléments i et j pour tout $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$.

La méthode AHP propose alors de valider la fiabilité du résultat en calculant le ratio de cohérence (CR) qui nous permettra de détecter les défauts dans notre calcul et notre évaluation. Le CR est calculé par l'équation (2.12).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2.12)$$

- ✓ RI : Index de cohérence aléatoire (RI) peut être déterminé par le tableau 2.2
- ✓ CI : indice de cohérence qui est calculé par l'équation (2.13).

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (2.13)$$

- ✓ n : le nombre des éléments (dimensions ou critères ou indicateurs).
- ✓ λ_{\max} : la principale valeur propre.

Tableau 2.2. Index aléatoire (RI)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

Source : adapté de Saaty (1980)

En règle générale, une valeur de CR inférieure à 10 % est considérée comme acceptable. Toutefois, si la valeur dépasse ce seuil, il est nécessaire de revoir les comparaisons par paires afin de réduire les incohérences.

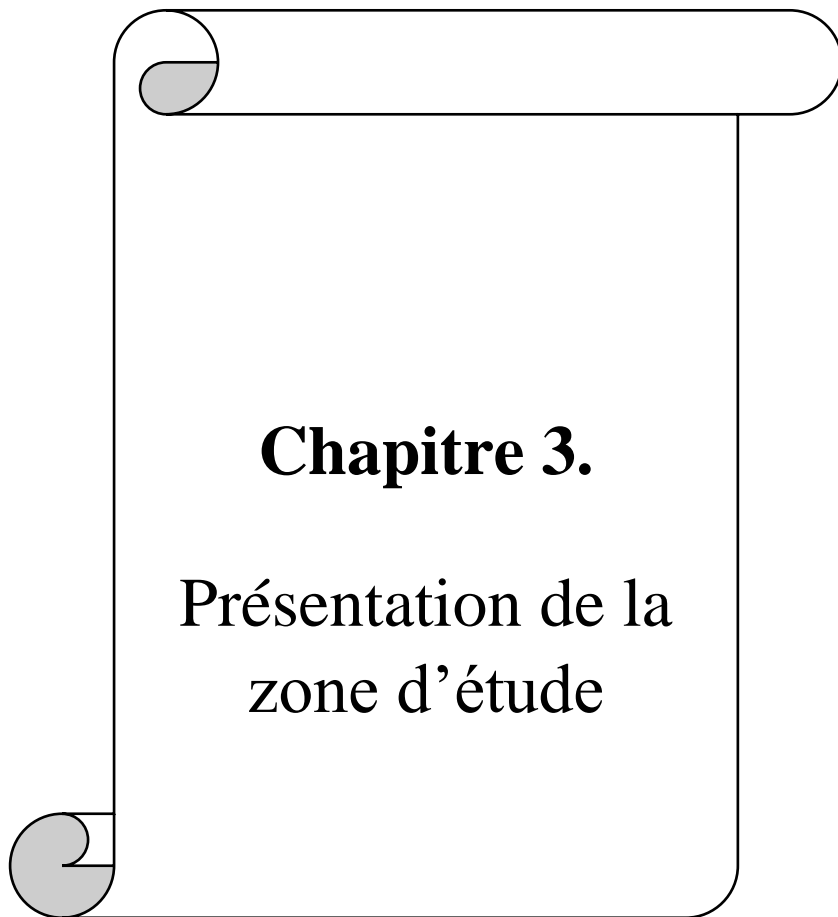
2.4.8. Etape 8 : Classement des Conduites

Score global par conduite → Priorisation des interventions

2.5. Phase 5 : Recommandations & Plan d'Action

2.5.1. Plan de Renouvellement : Calendrier et budget.

2.5.2. Monitoring : Mise à jour des données et réévaluation.



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'El Bouni (wilaya d'Annaba). La ville occupe une superficie de 95,18 Km². Géographiquement, la ville est positionnée entre 36° 50' 20" Nord, et 7° 39' 50" Est. Située à l'extrême Nord-Est de l'Algérie, El Bouni se trouve à environ 600 km de la capitale « Alger » (Figure 3.1). La ville a une population totale de 125265 habitants, avec 33232 abonnés (ADE, 2024).

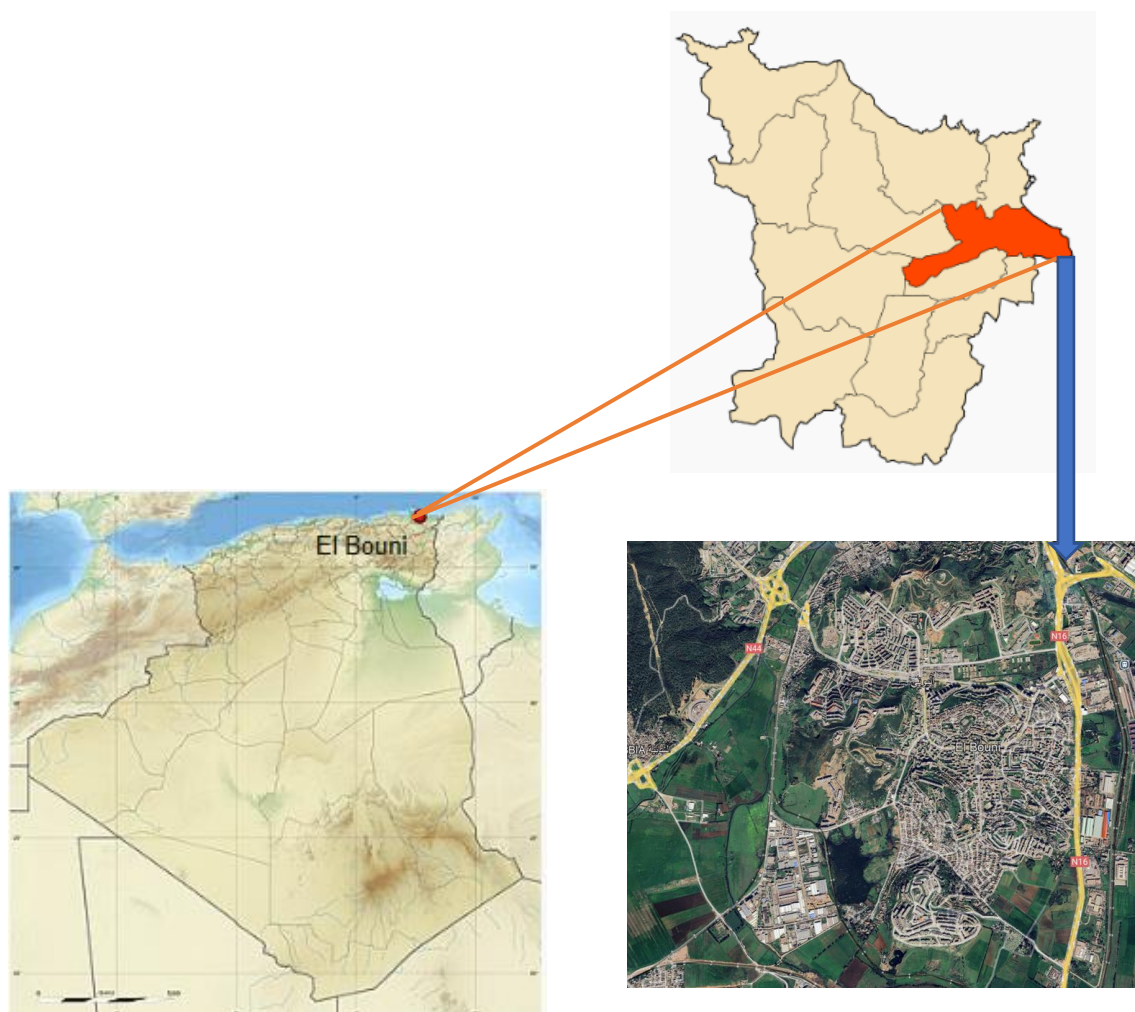


Figure 3.1. Présentation de la zone d'étude

Elle est délimitée comme suit (Figure 3.2) :

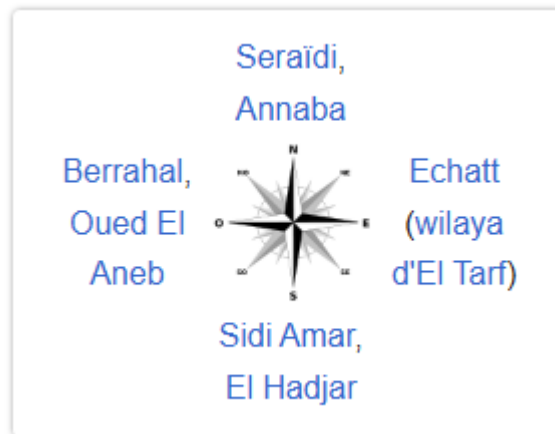


Figure 3.2. Délimitation de la ville d'El Bouni
Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/El_Bouni

3.2. Gestion du service de l'eau

La gestion des services d'eau dans la wilaya d'Annaba, a passé par quatre principale période :

- ❖ **Période coloniale :** Mise en place des infrastructures hydrauliques (Avant 1962)
- ❖ **Période postindépendance :** Expansion et modernisation (1962 - 2000)

Cette période a été marquée par 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)**

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. Ensuite, ce contrat a été résilié 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 une alimentation en eau potable efficace 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 durable (en termes : financier, technique et de gestion).
- Une absence totale de **rénovation** et de réhabilitation des installations de distribution d'eau potable.

3.3. Collecte des données

Les données collectées dans le cadre de l'analyse de l'approvisionnement en eau potable mettent en évidence des différences entre les quantités produites (volume produit : VP), distribuées (volume distribué : VD) et facturées (volume facturé : VF) (Tableau 3.1). L'écart global peut être attribué principalement aux fuites et aux fraudes ou erreurs de mesure. (Retima et al., 2025). Les taux de pertes d'eau dans le réseau de distribution de la ville d'El Bouni sont d'environ 40% (ADE, 2024).

Tableau 3.1. Synthèse des volumes pour la ville d'El Bouni

Année	2020	2021	2022	2023	2024
VP (m ³)	9 317 708	7 745 759	6 978 151	5 869 656	8 068 597
VD (m ³)	7 120 168	5 688 968	5 454 659	4 350 604	6 315 084
VF (m ³)	3 839 384	3 251 145	2 932 408	2 476 690	3 460 320
Taux perte (%)	41,21	41,97	42,02	42,19	42,89

Source : ADE, 2024

3.3.1. Distribution de l'eau dans la ville d'El Bouni

La ville est alimentée par la combinaison de ressources superficielles à partir des barrages de Cheffia et Mexa et de ressources souterraines provenant des champs de captage de Bouteldja, Salines et Pont Bouchet (ADE, 2024).

Au nouveau de stockage, la ville d'El Bouni est alimentée par 4 réservoirs de stockage. Tous ces réservoirs sont de type semi-enterré (ADE, 2024). Les caractéristiques des sont présentées dans le tableau 3.2 (source, ADE, 2024).

Tableau 3.2. Caractéristiques des réservoirs d'eau (ville d'El Bouni) (Saou, 2018)

Réservoirs	Caractéristiques
Réservoir de Boukhadra POS	<ul style="list-style-type: none"> • Altitude : 105 m • Volume : 5 000 m³ • Demande en eau à l'aval : 6 270 m³/j • La réalisation de réservoir : 2007 • Origin de l'eau : SP Boukhadra et nouvelle adduction de chaiba.
Réservoir de CAP 2*2500 m³	<ul style="list-style-type: none"> • Altitude : 100 m. • Volume : 5 000 m³. • Echéance de réalisation : 2010. • Origine de l'eau : piquage sur la nouvelle adduction de chaiba. • Demande en eau à l'aval : 4 427 m³/j. • La zone de service : Bouzarourah ; Bousedra
Réservoir 3 000 m³ : (Bouni)	<ul style="list-style-type: none"> • Altitude : 76 m. • Volume : 3 000 m³. • Demande en eau : 13 417 m³/j. • Echéance de réalisation : 2010. • Origine de l'eau : la SP Boukhadra et l'adduction nouvelle Chaiba. • La zone de service : El Bouni CHEF LIEU.
Réservoir 2*2000 m³ (SONATIBA)	<ul style="list-style-type: none"> • Altitude : 94 m • Volume : 4 000 m³ • Demande en eau : 10 401m³/j • Echéance de réalisation : 2010 • Origine de l'eau : La nouvelle SP Bouzarourah et l'adduction de Chaiba. • La zone de service : les quartiers de Bouni de l'étage moyen.

3.3.2. Sectorisation du réseau de distribution d'eau

La sectorisation est le découpage du réseau en secteurs qui seront éventuellement divisés en sous-secteurs. Chaque secteur ou sous secteur doit être isolé facilement du reste du réseau. La ville d'El Bouni comprend quatre secteurs, et 9 sous-secteurs (Tableau 3.3).

Tableau 3.3. Les secteurs et Sous-secteurs de la ville d'El Bouni (Saou, 2018)

Secteur	Sous-secteur	Linéaire Réseau (adduction + distribution)	Alimentation par
SONA 1	STEP 1	4808,63	Réservoir 2*2000 m ³
	STEP 2	3066,85	
	STEP 3	2484,01	
	STEP 4	962,02	
	STEP 5	5019,88	
SONA 2	STEP 1	8468,88	Réservoir 2*2000 m ³
CAPC	STEP 1	5730	Réservoir 3000m ³
	STEP 2	8192,72	
SONA-REF	STEP 1	6758,78	Station de pompage d'El Bouni

3.3.3. Réseau d'eau potable de la ville d'El Bouni

Les réseaux de distribution d'eau potable d'El Bouni comprennent presque 32 km de (ADE, 2024). Les matériaux constitutifs des canalisations sont les suivants (tableau 3.4). Ensuite, les diamètres de ces canalisations sont présentés en détail dans la figure 3.3. Le réseau de distribution est composé des conduites avec des diamètres entre 40 et 500 mm.

Tableau 3.4. Répartition de type de matériau des conduites (ADE, 2024)

Matériaux	Longueur	Pourcentage
PEHD	16694,17	52,32%
PVC	10918,86	34,22%
Acier	3260,98	10,22%
FD	1033,81	3,24%
Total	31907,82	100,00%

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.

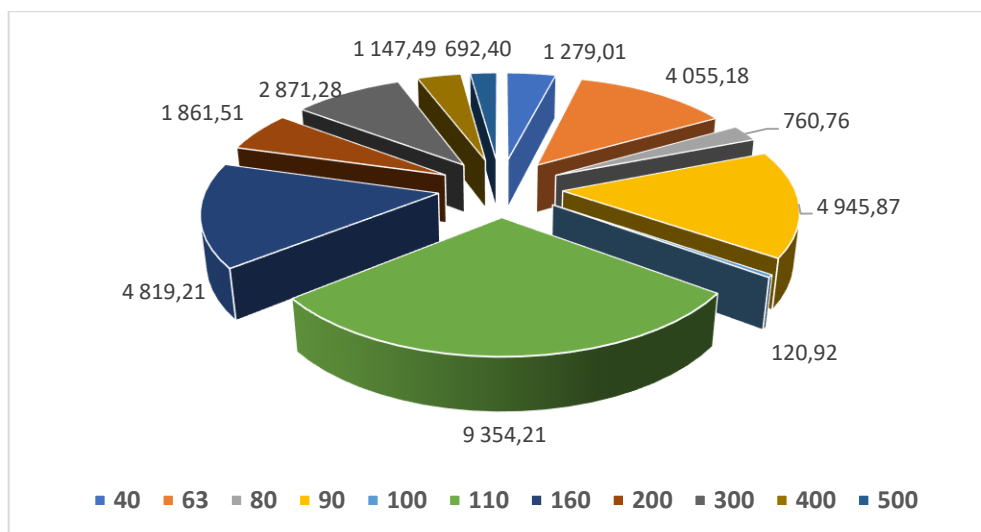


Figure 3.3. Répartition par diamètres des conduites

3.3.4. Interventions sur les réseaux

Il a été relevé sur les registres de l'ADE, 733 interventions ont été effectuées sur les réseaux de distribution de la ville d'El Bouni entre 2020-2024 (ADE, 2024). Les équipes d'entretien de l'ADE ont généralement effectuées des interventions pour réparer des fuites sur les conduites

(photos 3.1 et 3.2) et les branchements individuels des abonnés domestiques (photo 3.3) pour réduire les taux élevés des pertes d'eau dans les systèmes de distribution d'eau potable.



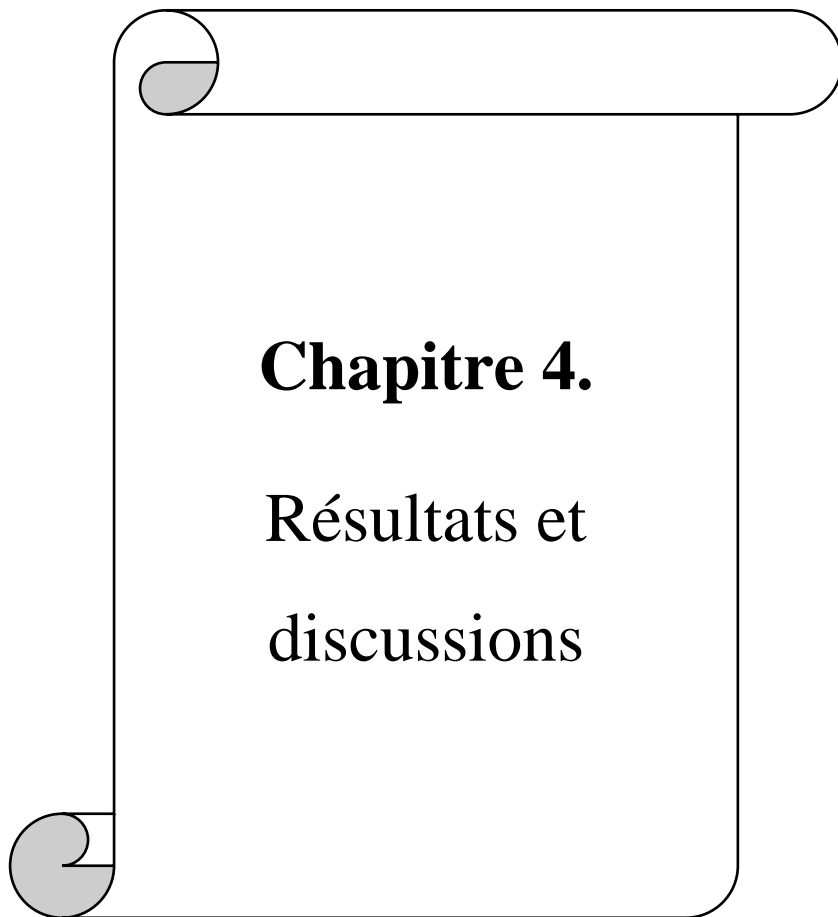
Photo 3.1. Fuites dans les réseaux de distribution



Photo 3.2. Fuite sur une conduite en Acier



Photo 3.3. Fuite sur un branchement



Chapitre 4.

Résultats et
discussions

Chapitre 4.

Résultats et discussions

4.1. Analyse des données collectées

4.1.1. Les volumes d'eau potable

La figure 4.1 présente les volumes mensuels de production, distribution et facturés pendant 5 ans (2020 – 2024) (source : ADE, 2024).

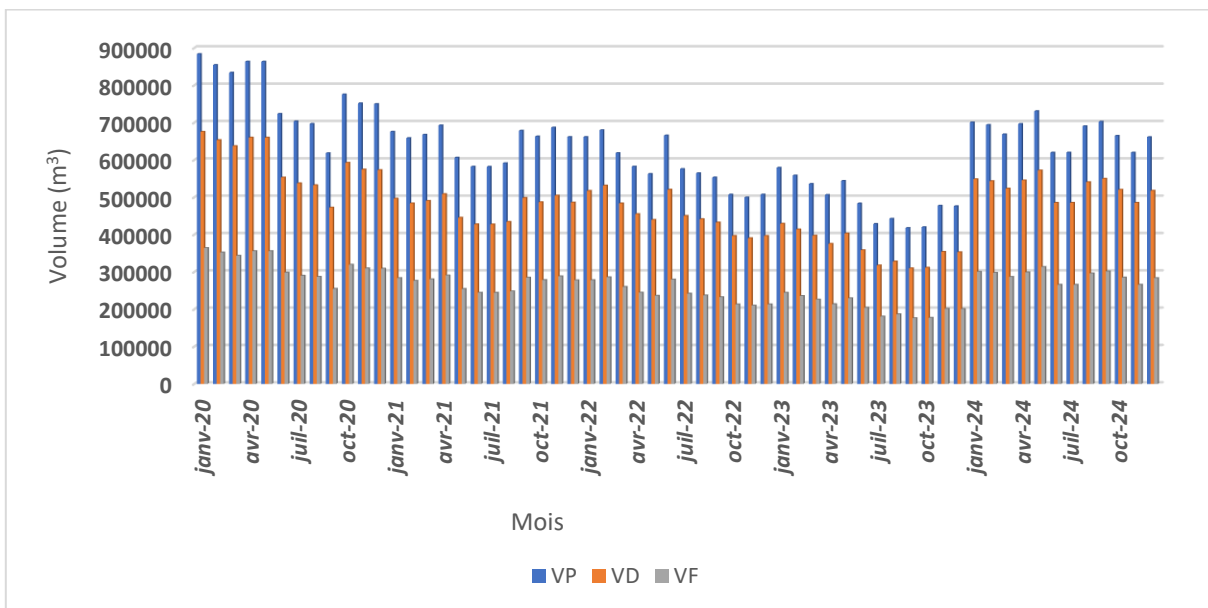


Figure 4.1. Les volumes d'eau potable (2020 – 2024)

4.1.2. Les pertes d'eau dans le réseau

La figure 4.2 illustre le nombre de réparation des fuites durant les années 2020 à 2024 pour le cas de la ville d'El Bouni.

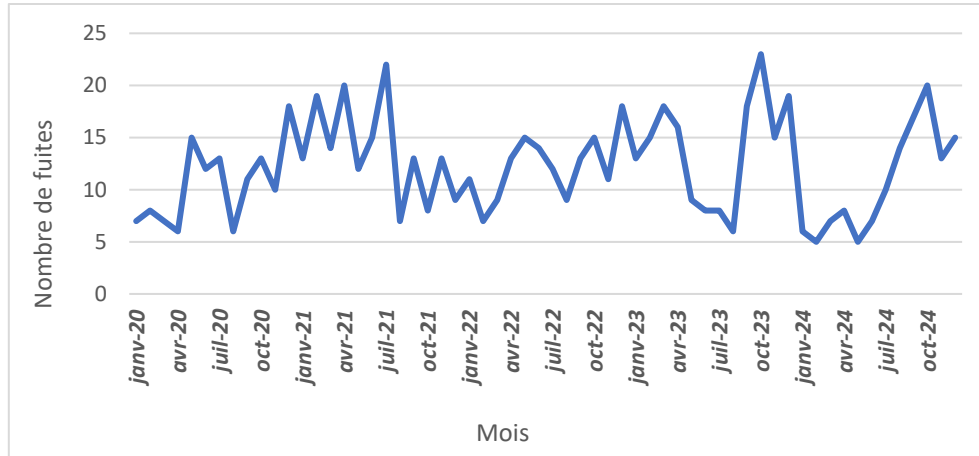


Figure 4.2. Fuites réparées sur conduites (années 2020 - 2024) – ville d'El Bouni



Photo 4.1. Réparation des fuites (El Bouni)

Les figures 4.1 et 4.2 montrent que :

- Production en baisse : Réduction du volume d'eau traité/distribué annuellement.
- Fuites en hausse : Augmentation du nombre de réparations de fuites.

Hypothèses explicatives :

1. Manque de précipitations dans les dernières années.
2. Dégradation accélérée du réseau : Canalisations vieillissantes entraînant plus de fuites, malgré une production réduite.
3. Stratégie de réduction des pertes : Efforts de détection accrus révèlent plus de fuites auparavant non signalées.
4. Manque d'une stratégie durable de l'entretien des réseaux de distribution d'eau potable.
5. Problème technique : Une pression mal régulée accélère la détérioration des canalisations d'eau (même avec moins d'eau produite).
6. Baisse des investissements passés : Absence de renouvellement des canalisations → accumulation de fuites.

4.2. Estimation des besoins en eau

Le besoin total en eau égal aux besoins domestiques plus les besoins d'équipements.

4.2.1. Estimation de la demande moyenne en eau potable (besoins domestiques)

Les besoins futurs en eau potable sont évalués sur la base de l'évolution de la population future de la zone d'étude et de la dotation.

❖ Estimation de la population

On peut calculer la population future à partir de la formule d'accroissement exponentielle :

$$P_f = P_0 * (1 + \tau)^n$$

- P_0 : population actuelle (125265 habitants d'après l'ADE, 2025) ;
- τ : taux d'accroissement annuel de la population (1,5% d'après l'ONS) ;
- n : nombre d'année (**25 ans**).

A.N : $P_f = 125265 * (1 + 0,015)^{25} = 181753$ habitants

❖ Estimation du débit moyen journalier

Le débit moyen journalier est défini comme étant le produit de la dotation journalière par le nombre d'habitants :

$$Q_{moyj} = P_f * (D/1000)$$

- D : Dotation journalière (160 l/j/hab, selon la DRE, 2025). On devise par 1000 pour convertir du litre vers m³.

A.N : $Q_{moyj} = P_f * (D/1000) = 181753 * (160/1000) = 29080,48 \text{ (m}^3\text{/j)}$

Le débit moyen journalier pour la catégorie domestique à l'horizon de 25 ans est de 29080,48 (m³/j).

4.2.2. Besoin en eau pour les équipements

Le besoin en eau pour les équipements regroupe les besoins en eau sanitaire, scolaire, administratifs, sociaux culturels et sportifs.

❖ *Besoin en eau sanitaire*

Le besoin en eau sanitaire est les quantités d'eau demandent par les polycliniques et le centre de santé de la commune El Bouni (Tableau 4.1).

Tableau 4.1. Détermination des besoins en eau sanitaire

Désignations	Consumation moyen journalière (m ³ /j)
Centre de Santé	26,25
Polyclinique	21,35
Hôpital	20,40
Total	68

Source : ADE, 2025

❖ *Besoin scolaire*

Tableau 4.2. Détermination des besoins scolaire

Désignations	Nombre	Consumation moyen journalière (m ³ /j)
Ecole primaire	8	165
CEM	3	75,54
Lycée	3	112,50
Total	14	1884,12

Source : ADE, 2025

❖ *Besoins administratifs*

Tableau 4.3. Détermination des besoins administratifs

Désignations	Consumation moyen journalière (m ³ /j)
Gendarmerie, Police	123,22
Siège APC	55,00
Siège Daïra	62,12
Total	240,34

Source : ADE, 2025

❖ *Besoins sociaux culturels et sportifs*

Tableau 4.4. Détermination des besoins sociaux culturels et sportifs

Désignations	Consumation moyen journalière (m ³ /j)
Centre culturel	16,00
Maison de jeune	8,00
Equipement sportif	48,55
Total	72,75

Source : ADE, 2025

Tableau 4.5. Détermination des besoins totaux

Type de besoins	Consumation moyen journalière (m ³ /j)	Consumation moyen journalière (l/s)
Domestiques	29080,48	336,6
Sanitaire	68,00	0,787
Scolaire	1884,12	21,807
Administratifs	240,34	2,782
Sociaux culturels et sportifs	72,75	0,842
Total	31345,69	362,818

❖ *Calcul des Pertes en eau*

En raison des pertes d'eau dans le réseau, on fait une majoration avec 30% la consommation journalière (ADE, 2025).

Consommation après majoration = Consommation moyen journalière + Majoration (30%)

A.N : Consommation après majoration = 31345,69 + 9403,71 = **40749,40 (m³/j)**

Tous les résultats du calcul de la consommation journalière sont présents dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6. Résultat de calcul de la Consommation journalière

Population actuelle (habitants)	Population future (habitants)	Débit moyen journalier (m ³ /j)	Majoration (30%) (m ³ /j)	Consommation après majoration (m ³ /j)
125265	181753	31345,69	9403,71	40749,40

4.2.3. Etude de variations des débits

Le réseau de distribution doit être en mesure de fournir, des pressions acceptables, des débits et des volumes d'eau requis, pour que ces performances soient satisfaisantes, en tout temps, au cours de sa durée de sa vie utile.

❖ Débit maximal journalier

$$Q_{Jmax} = Q_{Jmoy} \times K_{max}$$

Pour notre projet nous adoptons le coefficient de variation journalière maximale : $K_{max} = 1.3$

A.N : $Q_{j,max} = 40749,40 \times 1.3 = 52974,22 \text{ (m}^3\text{/j)}$

❖ Débit de pointe

$$Q_p = Q_{j,max} \times K_p$$

Pour notre projet nous adoptons le coefficient de pointe : $K_p = 1.6$ (DRE, 2024)

A.N : $Q_p = 52974,22 \times 1,6 = 84758,75 \text{ (m}^3\text{/j)}$

❖ Calcul du débit spécifique

Le débit spécifique (Q_{sp}) représente le débit nécessaire par unité de longueur du réseau. Le débit spécifique est déterminé par la relation suivante :

$$Q_{sp} = Q_{pte} / L_t$$

Avec :

- Q_{sp} : Débit spécifique en (l/s/ml) ;
- Q_{pte} : Débit de pointe en (l/s) = 981 (l/s)
- L_t : Longueur totale du réseau en (ml). $\sum L = 31907,82 \text{ ml}$

$$Q_{sp} = 981 / 31907,82 = 0,030744812 \text{ (l/s/ml)}$$

❖ **Calcul des débits route**

Le débit en route (Q_r) est le débit distribué le long d'un tronçon donné. Il dépend de la longueur du tronçon et du débit spécifique. Le débit en route est donné par la formule :

$$Q_r = L_n * Q_{sp}$$

- L_n : Longueur du tronçon en (m).
- Q_{sp} : Débit spécifique
- Q_r : Débit en route

❖ **Calcul des débits nodaux**

Pour déterminer les débits nodaux on a utilisé la formule suivante :

$$Q_n = Q_r * 0.50$$

Avec :

- Q_n : Débit nodal en (l/s) ;
- Q_r : débit route propre à chaque nœud (l/s).

Quelques résultats du calcul des débits spécifiques et débits en route sont présentés dans le tableau 4.7.

Tableau 4.7. Résultat du calcul des débits spécifiques et débits en route

Tronçon	Longueur (m)	Débit spécifique (l/s/ml)	Débit en route (l/s)
Pipe_23	102,909		3,164
Pipe_24	51,505		1,584
Pipe_25	55,286		1,700
Pipe_26	103,372		3,178
Pipe_27	17,196		0,529
Pipe_28	168,455		5,179
Pipe_29	33,099		1,018
Pipe_30	326,830	0,03074481	10,048
Pipe_31	55,0120		1,691
Pipe_32	53,324		1,639
Pipe_33	28,810		0,886
Pipe_34	46,623		1,433
Pipe_35	120,387		3,701
Pipe_36	72,440		2,227
Pipe_37	10,138		0,312

4.3. Résultats de la simulation hydraulique

Dans cette étude, la simulation hydraulique a été effectuée par le logiciel EPANET. L'exportation du réseau sous AUTO CAD vers le logiciel EPANET a été réalisée par le logiciel EPACAD. La figure 4.3 montre le réseau d'AEP de la ville d'El Bouni importé sous Epanet.

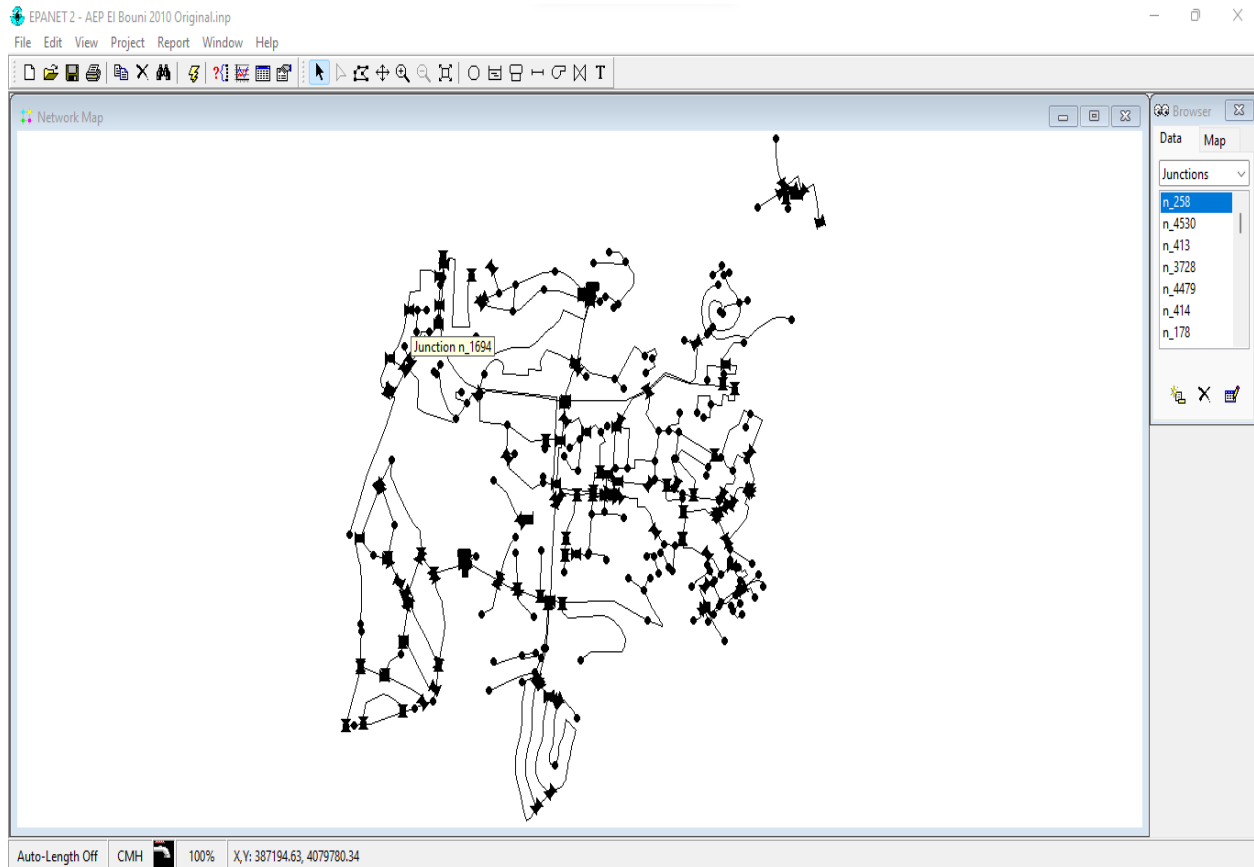


Figure. 4.3. Le réseau d'AEP d'El Bouni sous EPANET

Les détails concernant les longueurs et les diamètres des tronçons sont donnés dans le tableau 4.8. Après la saisie de tous les paramètres du réseau, on peut lancer la simulation. Une fois le calcul terminé, si le modèle ne comporte pas d'erreurs, le logiciel affiche le message suivant « La simulation a Réussi ». Le résultat final de la simulation hydraulique du réseau d'alimentation en eau potable pour le cas de la ville d'El Bouni est illustré sur la figure 4.4. La réussite de simulation dépend de bon saisie des données d'entrées de chaque élément de réseau et de dessin de réseau qui doit être proche à la réalité.

Tableau 4.8. Extrait du résultat des caractéristiques du réseau de la ville d'El Bouni

Node ID	Longueur (m)	Diamètre (mm)
Junc n_413	102,91	63
Junc n_3728	51,51	160
Junc n_4479	55,29	90
Junc n_414	103,37	63
Junc n_178	17,20	90
Junc n_4484	168,46	110
Junc n_1595	33,10	40
Junc n_1596	326,83	63
Junc n_1597	55,01	160
Junc n_1598	53,32	110
Junc n_1599	28,81	90
Junc n_1600	46,62	110
Junc n_1601	120,39	110
Junc n_1602	72,44	200
Junc n_1603	10,93	40
Junc n_1604	10,14	160
Junc n_1605	7,45	110
Junc n_1606	77,30	63
Junc n_1607	106,71	110
Junc n_1608	138,48	160
Junc n_1609	135,85	110
Junc n_1610	44,79	110
Junc n_1611	277,29	200
Junc n_1612	246,56	90
Junc n_1613	29,93	110
Junc n_1614	240,26	160
Junc n_1615	75,27	110
Junc n_1616	45,69	300
Junc n_1669	48,74	90
Junc n_1670	207,75	110
Junc n_1671	157,12	110
Junc n_1672	494,25	110
Junc n_1673	66,44	110
Junc n_1674	53,87	90
Junc n_1675	205,57	300
Junc n_1676	140,62	63
Junc n_1677	150,07	63
Junc n_1678	109,06	63

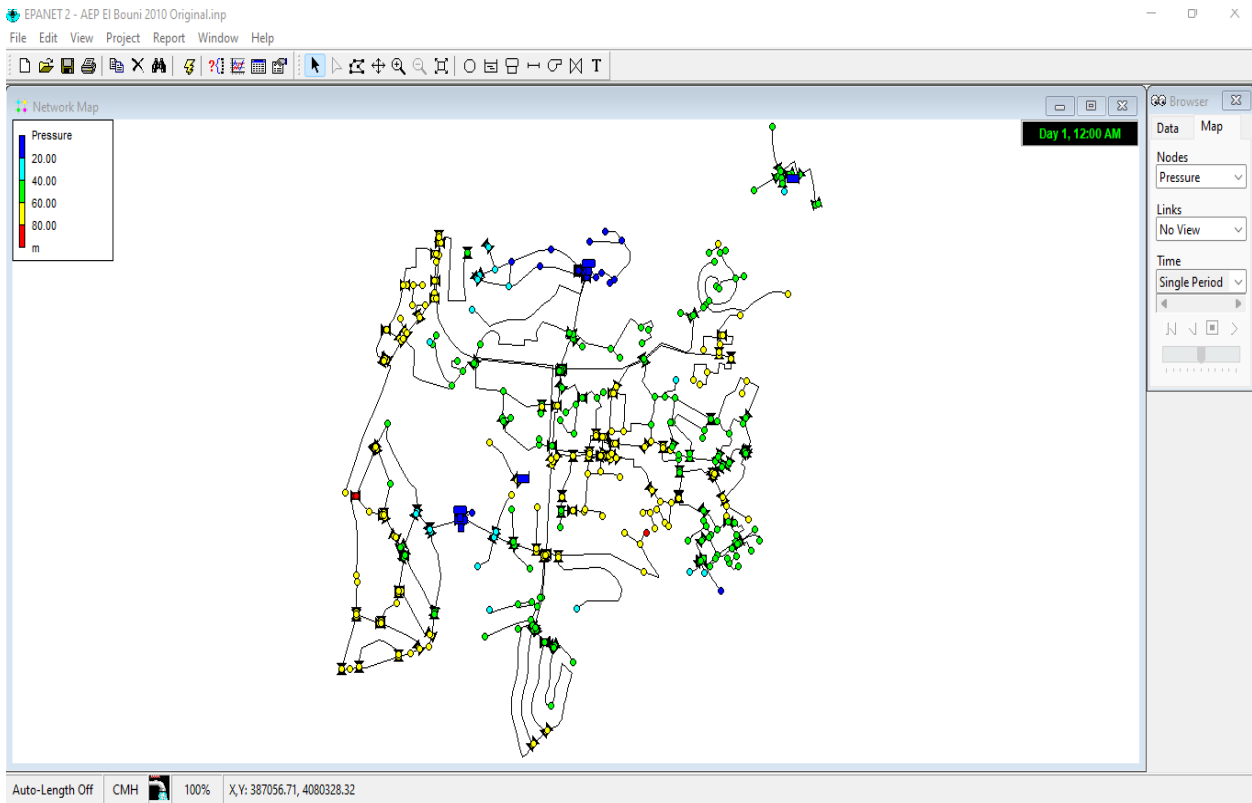


Figure 4.4. Résultat des pressions pour le réseau actuel par EPANET pour la ville d'El Bouni
Les résultats préliminaires de la simulation pour la totalité du réseau d'AEP d'El Bouni ont présentés beaucoup de problèmes (Figure 4.5).

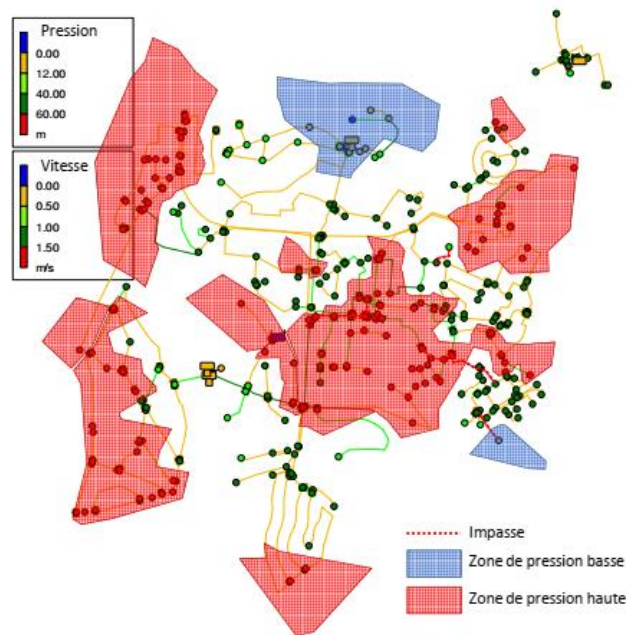


Figure 4.5. Problème de pression dans le réseau d'AEP de la ville d'El Bouni

Dans l'état actuel du réseau de distribution d'eau potable de la ville d'El Bouni, des vastes régions de ce réseau ont des hautes pressions supérieures à 6,0 bars (figure 4.6) se produisent en raison de la haute position des réservoirs R3000_CAPC et R2000_SONTIBA ainsi que des conditions topographiques.

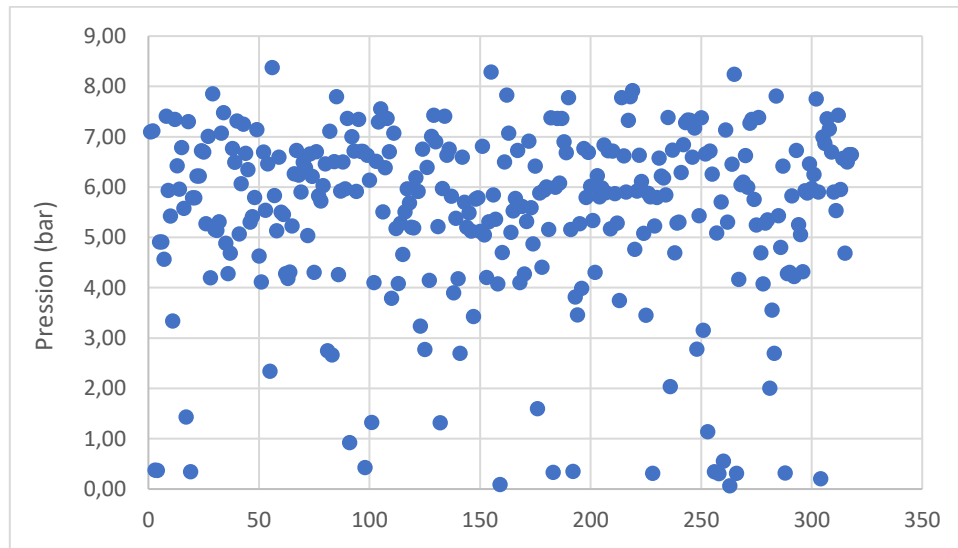


Figure 4.6. Résultat des pressions dans le réseau de la ville d'El Bouni

La représentation des vitesses dans les différents tronçons du réseau, montrée en figure 4.7, révèle qu'une grande majorité des canalisations acheminent des débits avec des vitesses hors normes (inférieures à 0.5m/s et supérieures à 1,5 m/s). Une des propositions pour améliorer le réseau est de changer les diamètres des conduites pour régler la vitesse selon les normes.

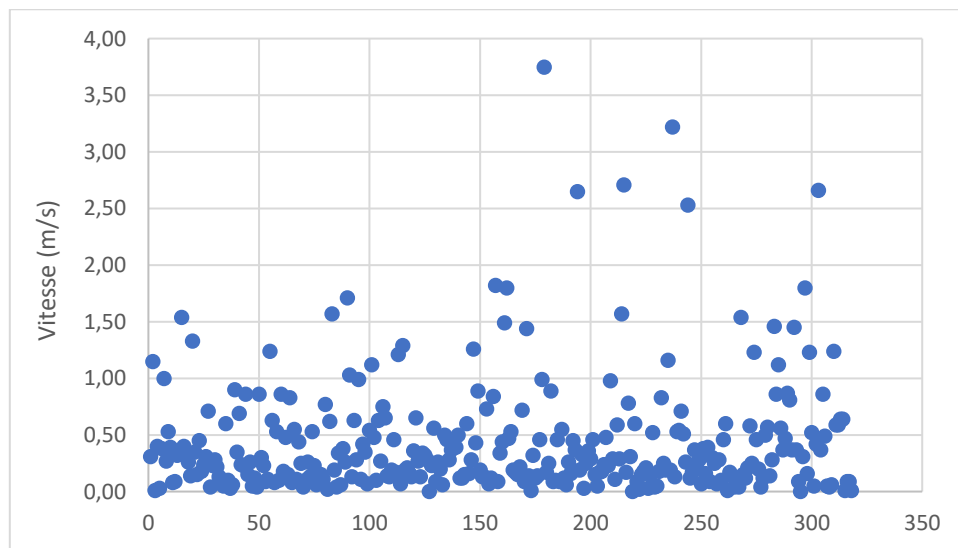


Figure 4.7. Résultat des vitesses dans le réseau de la ville d'El Bouni

4.4. Application de la méthode Delphi

L'objectif de la méthode Delphi utilisée dans cette étude est d'identifier les critères et les sous-critères suite à l'avis des experts.

4.4.1. Choix des critères et des sous-critères

La liste des critères et des sous-critères a été conçus suite à une revue de littérature. A cet effet, des articles pertinents dans le domaine de la gestion des réseaux de distribution d'eau potable ont été examinés. L'objectif de cette revue de la littérature est de faire le point sur les connaissances existantes sur les facteurs influents sur la dégradation des réseaux de distribution d'eau potable avant d'identifier les critères d'évaluation. Ensuite, une liste finale des critères principaux et sous-critères a été présentée dans le tableau 4.9 et le tableau 4.10.

Tableau 4.9. Liste des critères sélectionnés d'après la littérature scientifique

N°	Critères d'évaluations sélectionnés
1	Hydraulique
2	Mécanique
3	Physique
4	Opérationnel
5	Economique
6	Environnement de la conduite
7	Qualitative
8	Sécurité
9	Spatiale
10	Socio-économique

Dans cette première phase, 10 critères d'évaluation et 52 sous-critères ont été sélectionnés. Les deux listes vont être utilisées par les experts dans le premier tour de la méthode Delphi. La procédure de sélection des participants (d'experts) est l'une des caractéristiques clés des techniques Delphi. Dans cette étude, différents critères ont été utilisés pour sélectionner les experts prêts à participer dans le déroulement de la méthode Delphi. Ces exigences comprenaient le niveau d'études, l'expérience dans le secteur de la gestion des réseaux d'eau potable et l'engagement à participer.

Tableau 4.10. Liste des sous-critères sélectionnés

N°	Sous-critères	N°	Sous-critères
1	Type de couverture de chemin en haut du tuyau	26	Vitesse d'écoulement dans la canalisation
2	Longueur des canalisations	27	Débit du tuyau
3	Diamètre des canalisations	28	Invulnérabilité du tuyau dans l'installation
4	Profondeur des canalisations	29	Qualité d'entretien des canalisations
5	Rugosité des canalisations	30	Qualité de l'installation des tuyaux
6	Durée de vie des canalisations	31	Nombre de défaillances
7	Type de protection	32	Goût de l'eau dans la canalisation
8	Âge des canalisations	33	Couleur de l'eau dans la canalisation
9	Type de climat dans la zone du tuyau	34	Odeur de l'eau dans la canalisation
10	Matériau des conduites	35	Chlore résiduel dans la canalisation
11	Type de trafic	36	Corrosion de l'eau dans la canalisation
12	Capacité non flottante du tuyau	37	Qualité de l'eau dans la canalisation
13	Résistance à la chaleur du tuyau	38	Densité de clientèle dans la zone de la canalisation
14	Multiplicité des connexions dans le tuyau	39	Structure urbaine de la zone de la canalisation
15	Corrosion électrolytique du sol autour du tuyau	40	Potentiel de menace biologique dans la canalisation
16	pH du sol autour du tuyau	41	Distance moyenne de la canalisation aux bornes d'incendie
17	Potentiel redox du sol autour de la canalisation	42	Distance moyenne de la canalisation aux soupapes de surpression en amont
18	Tremblement de terre	43	Coûts d'investissement initial
19	Niveau de la nappe phréatique	44	Coûts d'exploitation
20	Type de sol	45	Coûts de de réparations
21	Facilité d'excavation du sol autour de la canalisation	46	Retour sur investissement
22	Facteur de litage du sol autour de la canalisation	47	Densité de population, Zone urbaine ou rurale
23	Climat	48	Niveau de réclamation
24	Pression hydraulique	49	Densité de la clientèle dans la zone de la canalisation
25	Température moyenne de l'air dans la zone de la canalisation	50	Structure urbaine de la zone de la canalisation
		51	Population couverte
		52	Distance moyenne de la canalisation aux agglomérations

Dans cette étude, nous avons utilisés deux tours de la méthode Delphi

4.4.2. 1^{er} tour de la méthode Delphi

Sur la base de l'analyse des résultats de la revue de la littérature, le questionnaire du premier tour Delphi a été élaboré. Les répondants ont été invités à évaluer le niveau d'importance des critères

principaux et des sous-critères issus de la revue de la littérature, à l'aide d'une échelle de type Likert à 5 points (tableau 4.11).

Tableau 4.11. Echelle de Likert à 5 points

1	2	3	4	5
Pas du tout d'accord	Je ne suis pas d'accord	Neutre	Accepter	Tout à fait d'accord

L'analyse des résultats obtenus lors de ce tour a permis d'identifier le niveau d'importance des critères. Pour chaque critère, la moyenne des notes attribuées par les experts lors du premier tour a été calculée et vérifiée par l'échelle de trois niveaux (figure 4.8) adapté pour cette étude.

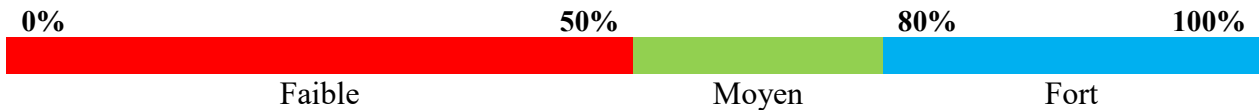


Figure 4.8. Echelle de trois niveaux

Pour avoir les réponses du premier tour de la méthode Delphi, il faut lister les critères retenus avec leur niveau d'accord par tous les experts dans un tableau récapitulatif des critères et sous-critères avec leurs scores moyens. Ensuite, il faut filtrer les scores moyens et éliminer les critères (figure 4.9) et les sous-critères (figures 4.10 à 4.13) qui ont un score moyen < 2,5 sur 5 = Niveau de consensus Faible (50%).

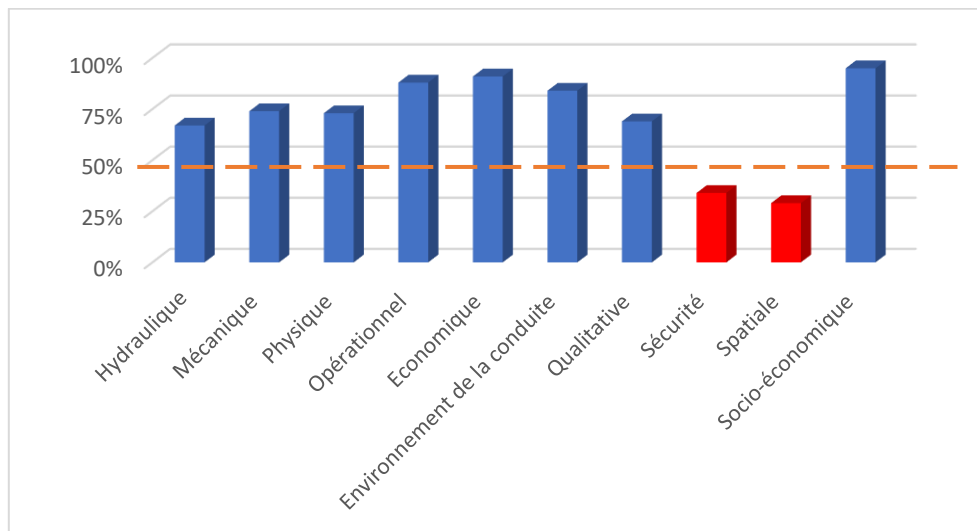


Figure 4.9. Critères retenus après le 1^{er} tour de la méthode Delphi

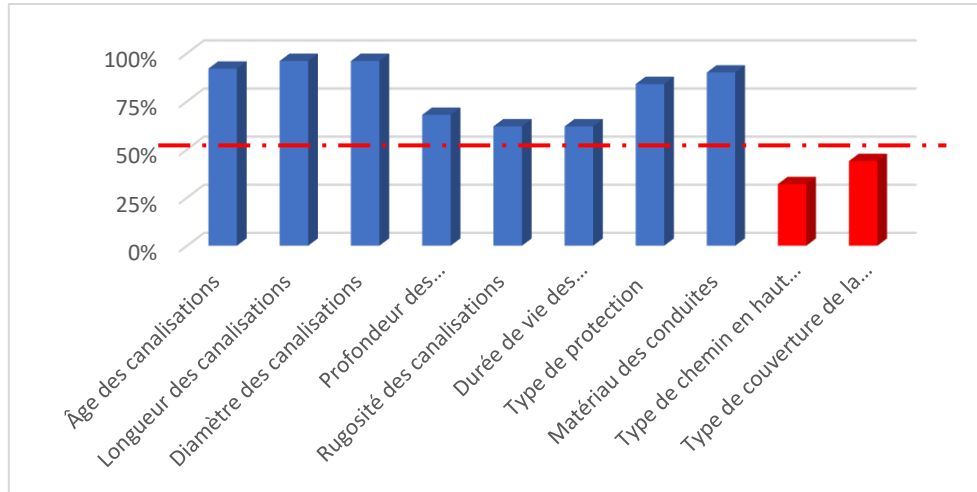


Figure 4.10. Scores moyens des sous-critères pour le critère « Physique ».

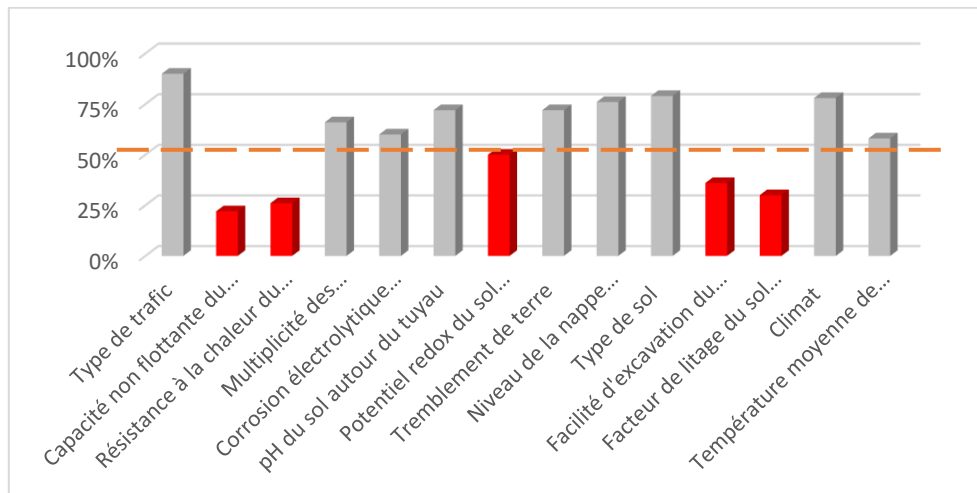


Figure 4.11. Scores moyens des sous-critères pour le critère « Environnement de la conduite ».

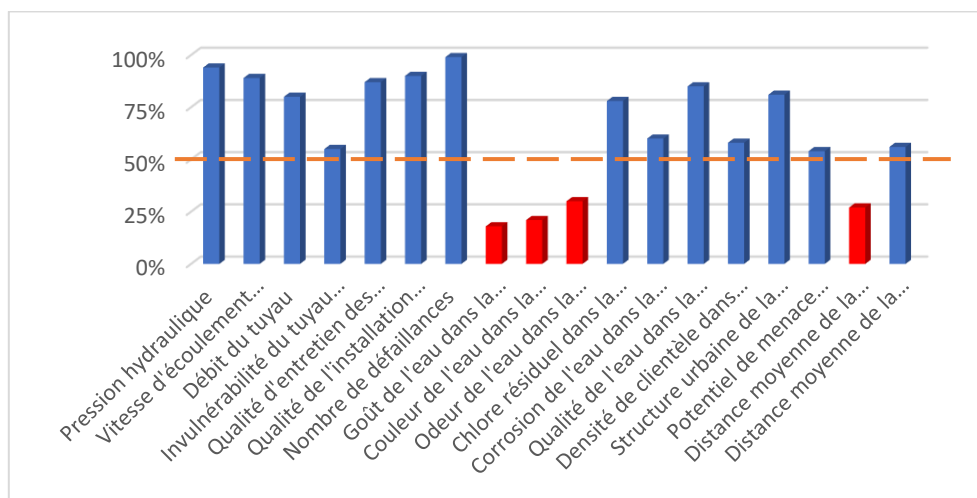


Figure 4.12. Scores moyens des sous-critères pour le critère « Opérationnel ».

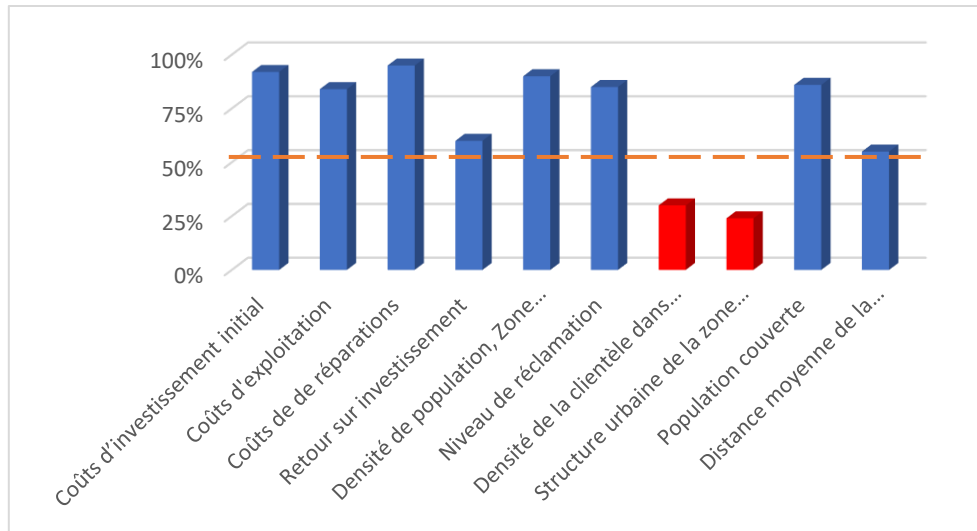


Figure 4.13. Scores moyens des sous-critères pour le critère « Socio-économique ».

L'analyse des résultats obtenus lors de cette phase a permis d'identifier 8 critères retenus et 13 sous-critères ont été éliminés pour le deuxième tour de la méthode Delphi.

4.4.3. 2^e tour de la méthode Delphi

Sur la base de l'analyse des résultats du premier tour, le questionnaire Delphi du second tour a été élaboré. Lors de ce second tour, les experts ont pu reconsidérer les notes attribuées lors du premier tour en utilisant la même échelle de Likert à 5 points. Le second tour a été réalisé avec les mêmes experts du premier tour. Le questionnaire distribué était similaire à celui du premier tour, avec quelques modifications tenant compte des enseignements du tour précédent (les critères et les sous-critères non retenus du premier tour ont été supprimés du nouveau questionnaire).

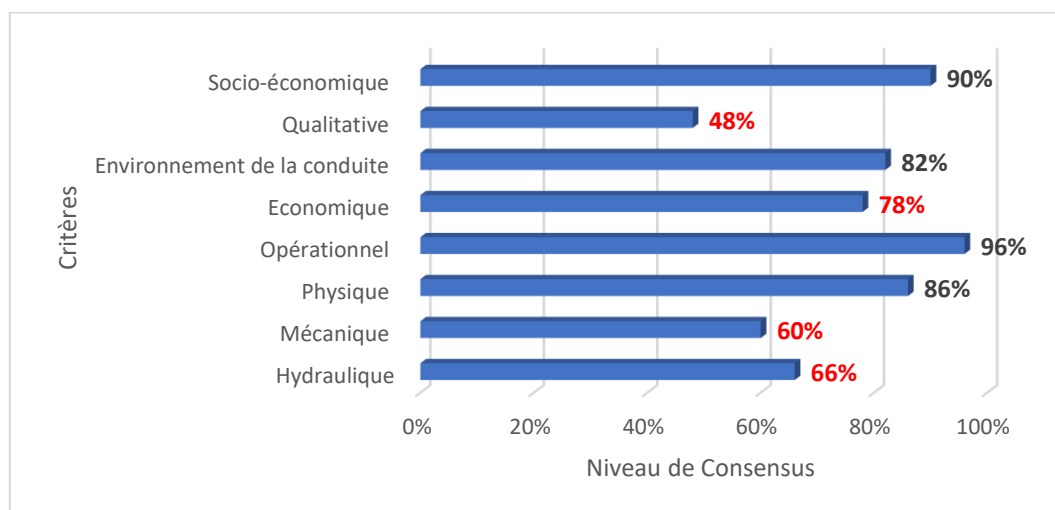


Figure 4.14. Critères retenus lors du second tour de la méthode Delphi

Tableau 4.12. Résultat du second tour pour les sous-critères

N°	Sous-critères	Moyenne (1-5)	Niveau de consensus
1	Âge des canalisations	4,4	Fort (88%)
2	Longueur des canalisations	4,6	Fort (92%)
3	Diamètre des canalisations	4,8	Fort (96%)
4	Profondeur des canalisations	3,3	Moyen (66%)
5	Rugosité des canalisations	2,4	Faible (48%)
6	Durée de vie des canalisations	2,1	Faible (62%)
7	Type de protection	4,1	Fort (82%)
8	Matériau des conduites	4,5	Fort (90%)
9	Type de trafic	4,2	Fort (84%)
10	Multiplicité des connexions dans le tuyau	2,2	Faible (44%)
11	Corrosion électrolytique du sol autour du tuyau	3,3	Moyen (66%)
12	pH du sol autour du tuyau	3,5	Moyen (70%)
13	Potentiel redox du sol autour de la canalisation	2,4	Faible (48%)
14	Tremblement de terre	4,7	Fort (94%)
15	Niveau de la nappe phréatique	4,2	Fort (84%)
16	Type de sol	4,5	Fort (90%)
17	Climat	4,0	Fort (80%)
18	Température moyenne de l'air dans la zone de la canalisation	2,8	Moyen (56%)
19	Pression hydraulique	4,9	Fort (98%)
20	Vitesse d'écoulement dans la canalisation	4,5	Fort (90%)
21	Débit du tuyau	3,8	Moyen (76%)
22	Invulnérabilité du tuyau dans l'installation	3,3	Moyen (66%)
23	Qualité d'entretien des canalisations	4,6	Fort (92%)
24	Qualité de l'installation des tuyaux	3,7	Moyen (74%)
25	Nombre de défaillances	4,9	Fort (98%)
26	Chlore résiduel dans la canalisation	3,2	Moyen (64%)
27	Corrosion de l'eau dans la canalisation	2,7	Moyen (54%)
28	Qualité de l'eau dans la canalisation	4,0	Fort (80%)
29	Densité de clientèle dans la zone de la canalisation	3,9	Moyen (78%)
30	Structure urbaine de la zone de la canalisation	1,9	Faible (38%)
31	Potentiel de menace biologique dans la canalisation	2,8	Moyen (56%)
32	Distance moyenne de la canalisation aux soupapes de surpression en amont	1,4	Faible (28%)
33	Coûts d'investissement initial	4,4	Fort (88%)
34	Coûts d'exploitation	3,6	Moyen (72%)
35	Coûts de réparations	4,5	Fort (90%)
36	Retour sur investissement	2,9	Moyen (58%)
37	Densité de population, Zone urbaine ou rurale	4,0	Fort (80%)
38	Niveau de réclamation	4,1	Fort (82%)
39	Densité de la clientèle dans la zone de la canalisation	2,4	Faible (48%)
40	Structure urbaine de la zone de la canalisation	2,0	Faible (40%)
41	Population couverte	4,3	Fort (86%)
42	Distance moyenne de la canalisation aux agglomérations	2,6	Moyen (52%)

Dans le second tour de la méthode Delphi, il faut filtrer les scores moyens (par exemple, les sous-critères qui ont un score moyen ≥ 4 = Niveau de consensus Fort). A cet égard, et après les deux tours de la méthode Delphi, la liste finale des critères et des sous-critères a été élaborée (tableau 4.13)

Tableau 4.13. Liste finale des critères et sous-critères

N°	Critères	Symbole	Sous-critères	Symbole
1	Physique	Phy	Matériau des conduites	Mat
2			Diamètre des conduites	Dia
3			Longueur de la conduite	Lon
4			Âge des canalisations	Age
5			Type de protection	Pro
6	Environnement de la conduite	Env	Type de sol	Sol
7			Type de trafic	Tra
8			Niveau de la nappe phréatique	NNP
9			Climat	Cli
10			Tremblement de terre	TT
11	Opérationnel	Ope	Pression hydraulique	Pre
12			Vitesse d'écoulement dans la canalisation	Vit
13			Nombre de défaillances	Def
14			Qualité de l'eau	Qea
15			Qualité d'entretien des canalisations	Qen
16	Socio-économique	Sec	Coût d'investissement initial	Cin
17			Coût de réparations	Cre
18			Densité de population, Zone urbaine ou rurale	DPZ
19			Niveau de réclamation	Nre
20			Population couverte	PC

4.5. Application de la méthode Fuzzy-AHP

Procédure de la méthode Fuzzy-AHP

Après l'identification des critères principaux et les sous-critères d'évaluation par la méthode Delphi de deux tours, la pondération de ces éléments sera réalisée par la méthode Fuzzy-AHP. Cette approche est basée sur plusieurs étapes :

Etape 1. Structure Hierarchique

Dans cette étape, les critères se classent dans le premier niveau de la Structure hiérarchique et les sous-critères dans le second niveau (figure 4.15).

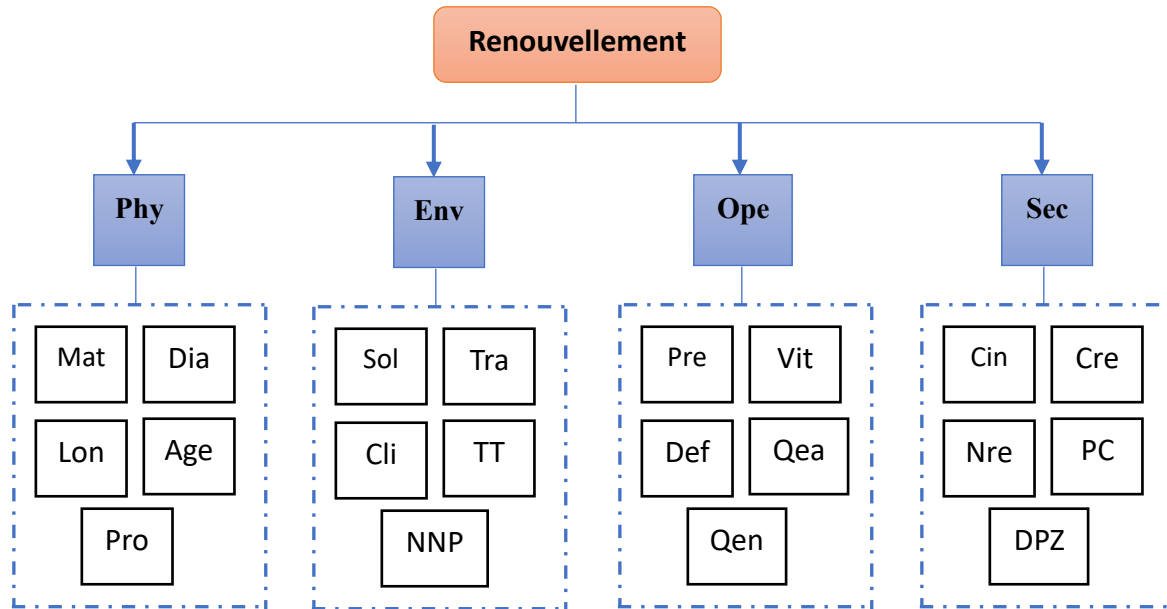


Figure 4.15. Structure hiérarchique

Etape 2. Matrice de comparaison par paire floue (Fuzzification)

Dans cette étape, on va utiliser l'Échelle floue d'importance relative (figure 4.16) pour l'élaboration de matrice des comparaisons par paire.

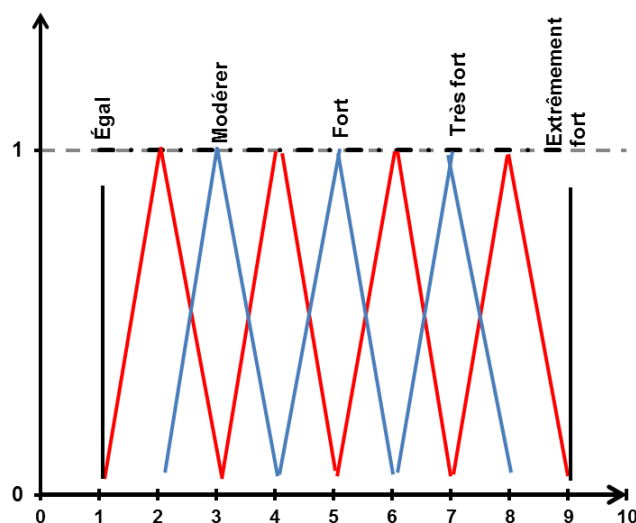


Figure 4.16. Nombres triangulaires flous (NTF)

La comparaison par paire est effectuée par les jugements des experts. Un questionnaire (annexe A1) a été envoyé aux vingt experts de chaque groupe (tableau 4.14) le 20 février 2025. Donc, au total cent questionnaires ont été envoyés pour tous les experts.

Tableau 4.14. Nombre de questionnaires envoyés

Groupe d'experts	Enseignants chercheurs	Décideurs (DRE)	Gestionnaires (ADE)	Bureaux d'études (BET)	Entreprises de travaux (ENT)
Local	10	10	10	10	10
National	10	10	10	10	10
Total	20	20	20	20	20

- Une première relance

Après 15 jours de l'envoi des questionnaires aux 100 experts, seulement 26 experts ont envoyés leurs réponses (moins de 30%). A cet effet, une deuxième relance a été effectuée en envoyant un e-mail de rappel aux experts qui n'ont pas encore répondu, en les remerciant par avance et en soulignant l'importance de leur participation : "*Cher(e) [Nom], nous vous remercions pour votre temps et votre expertise. Nous avons constaté que vous n'avez pas encore eu l'occasion de répondre à notre questionnaire. Votre avis est précieux pour nous, et nous serions ravis de recevoir votre contribution d'ici 15 jours. Merci encore !*". Dans cette nouvelle relance, le délai a été prolongé avec une extension du délai de 15 jours.

- Une deuxième relance

Pour les experts clés, un appel téléphonique peut encourager la participation. Avec cette mesure, le nombre de réponses à 37 réponses. Actuellement, le taux de réponse est de presque 40%, ce qui est déjà honorable pour une enquête auprès d'experts, mais une relance ciblée pourrait l'améliorer (une troisième relance).

- Troisième relance

Malgré ce rappel, nous n'avons toujours pas obtenu suffisamment de réponses après ces deux relances (tableau 4.15). A cet effet, nous avons appliqué une autre stratégie pour compléter le panel avec de nouveaux experts (entretiens face à face pour remplir les questionnaires). Dans la troisième relance, des entretiens face à face ont été organisés pour compléter les réponses manquantes et pour avoir le nombre souhaité des réponses (12 réponses par groupe d'expert). Cette mesure est une

excellente idée, surtout si les experts sont localement accessibles. Les démarches suivies dans cette phase sont comme suit :

1. Cibler les experts prioritaires : Identifiez le nombre des experts non-répondants par groupe d'expert (par exemple, si 12 experts étaient nécessaires par groupe, il est crucial d'ajouter un nombre des experts manquants par groupe pour voir une représentativité statistique homogène pour tous les groupes d'experts).
2. Contacter les experts sélectionnés pour cette mesure : cette procédure est essentielle pour avoir un rendez-vous avec les experts et pour éviter des déplacements inutiles qui peuvent gaspiller l'effort et le temps.
3. Remplir les questionnaires directement avec les experts ciblés.

Tableau 4.15. Calendrier des réponses par les experts

Experts	Questionnaires envoyés (20 Février 2025)	Première relance (07 Mars)	Deuxième relance (22 Mars)	Troisième relance (29 Mars)
Enseignements Universitaires (ENS)	20	8	10	12
Décideurs (DRE)	20	5	8	12
Gestionnaires (ADE)	20	5	8	12
Bureaux d'études (BET)	20	4	6	12
Entreprises de travaux (ENT)	20	4	5	12
Total	100	26	37	60

Le nombre des experts par groupe et par wilaya est présenté dans les figures 4.17 à 4.21. Ensuite, la figure 4.22 présente le nombre total des experts par wilaya.

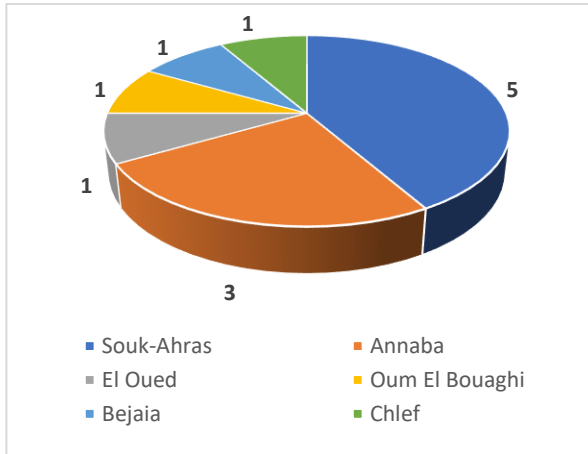


Figure 4.17. Nombre des experts pour le groupe « ENS »

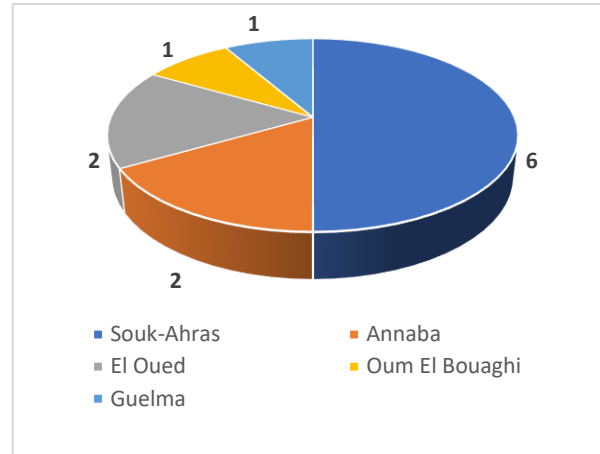


Figure 4.18. Nombre des experts pour le groupe « DRE »

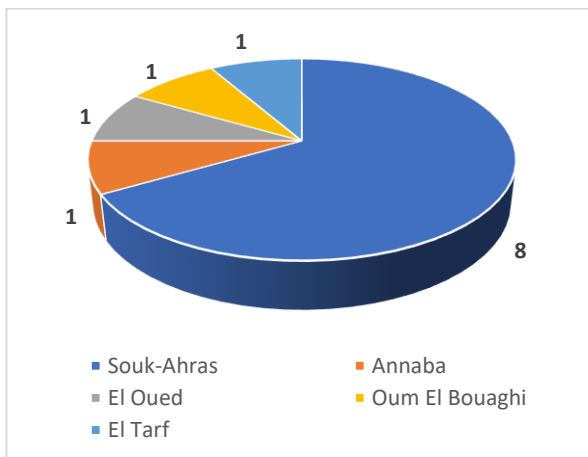


Figure 4.19. Nombre des experts pour le groupe « ADE »

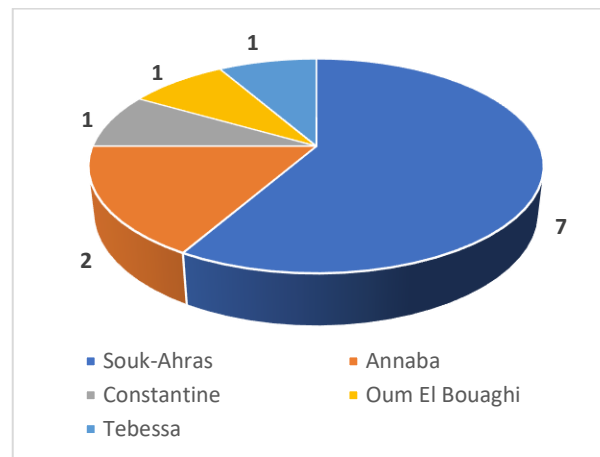


Figure 4.20. Nombre des experts pour le groupe « BET »

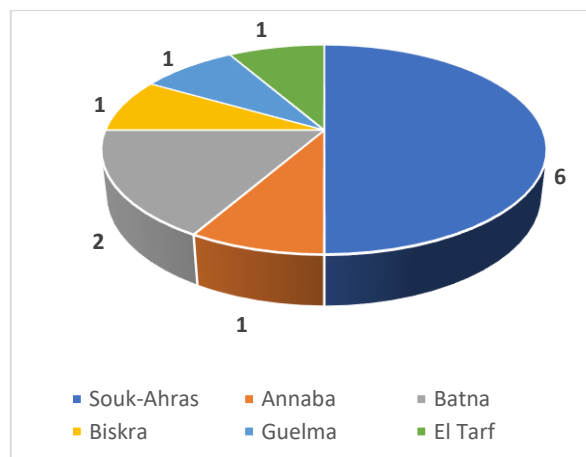


Figure 4.21. Nombre des experts pour le groupe « ENT »

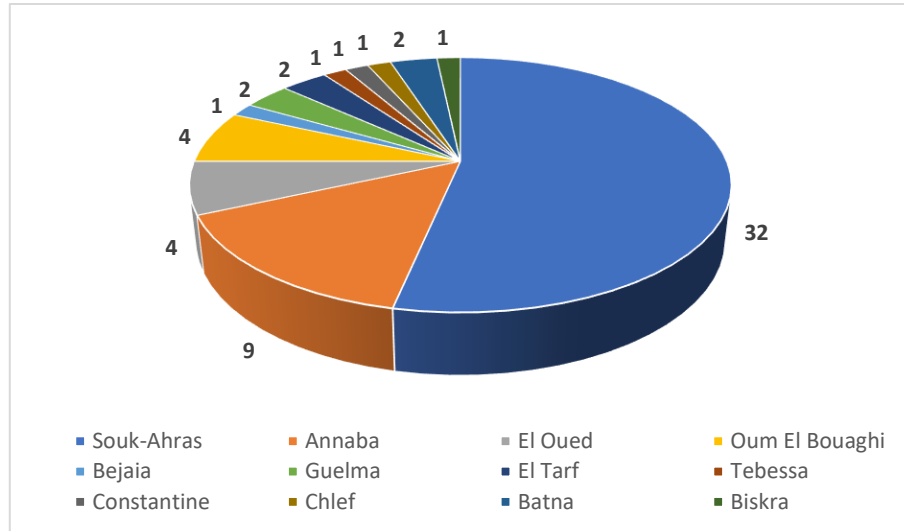


Figure 4.22. Nombre total des experts par wilaya

Dans cette étape, chaque expert est invité à remplir le questionnaire envoyé pour construire les matrices de décision floue (tableau 4.16). Ensuite, les poids flous ont été calculés pour chaque matrice floue. A la fin, il faut vérifier que l'indice de cohérence (CI) des matrices floues est < 10% (ajuster sinon).

Tableau 4.16. Exemple d'une matrice de comparaison par paire floue

	Phy			Env			Ope			Sec		
Phy	1	1	1	4	5	6	1/4	1/3	1/2	2	3	4
Env	1/6	1/5	1/4	1	1	1	1/8	1/7	1/6	1/3	1/2	1
Ope	2	3	4	6	7	8	1	1	1	5	6	7
Sec	1/4	1/3	1/2	1	2	3	1/7	1/6	1/5	1	1	1

Étape 3. Calcul de la valeur moyenne géométrique floue (\tilde{r}_i)

La moyenne géométrique est utilisée pour calculer les poids floue (méthode de Buckley, 1985). La moyenne géométrique floue est calculée à l'aide de la formule ci-dessous :

$$\tilde{r}_i = ((1 * 4 * 1/4 * 2)^{1/4}, (1 * 5 * 1/3 * 3)^{1/4}, (1 * 6 * 1/2 * 4)^{1/4}) = (1.189, 1.495, 1.861)$$

Le résultat des calculs de la moyenne géométrique floue pour les quatre critères est présenté dans le tableau 4.17.

Tableau 4.17. Calcul de la moyenne géométrique floue pour les quatre critères

	Moyenne géométrique floue		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Phy	1,189	1,495	1,861
Env	0,289	0,346	0,452
Ope	2,783	3,350	3,869
Sec	0,435	0,577	0,740
TOTAL	4,696	5,769	6,922
INVERSE	0,213	0,173	0,144
<i>Increasing order</i>	0,144	0,173	0,213

Etape 4. Calcul des Poids flous

$$w_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_i \oplus \tilde{r}_i \oplus \dots \oplus \tilde{r}_i)^{-1}$$

$$\tilde{A}_1 \oplus \tilde{A}_2 = (l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2)$$

$$\tilde{A}_1 \otimes \tilde{A}_2 = (l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) = (l_1 * l_2, m_1 * m_2, u_1 * u_2)$$

- **Dé-fuzzification**

La défuzzification est un processus permettant de convertir un nombre flou en une valeur unique et précise.

- **Poids normalisé**

Après avoir déterminé la valeur non floue, la normalisation permet de déterminer les pondérations locales de chaque critère. Les pondérations locales des critères principaux ont été ajoutées à 1,00.

Tableau 4.18. Calcul des poids flous et poids normalisés

	Poids flou			<i>Mi</i>	<i>Poids normalisé</i>
Phy	0,172	0,259	0,396	0,276	0,262
Env	0,042	0,060	0,096	0,066	0,063
Ope	0,402	0,581	0,824	0,602	0,573
Sec	0,063	0,100	0,158	0,107	0,102
				1,051	1,000

Etape 5. Vérification de la cohérence

La cohérence des préférences est évaluée après la comparaison des critères. Le ratio de cohérence évalue la manière dont les experts comparent leurs critères. Étant donné que le Fuzzy-AHP

comporte de nombreuses valeurs (l , m et u), seule la valeur médiane a été utilisée pour calculer le ratio de cohérence (Aliyev et al., 2020 ; Nasution et al., 2022 ; Shume & Mitikie, 2024). Le ratio de cohérence (CR) est calculé par la division de la valeur de l'indice de cohérence (CI) et de l'indice aléatoire (RI), il est déterminé par l'équation (4.1) :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4.1)$$

L'indice de cohérence (CI) est calculé à l'aide de la formule fournie par l'équation (4.2) :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4.2)$$

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 4.19.

Tableau 4.19. Indice aléatoire (RI) (source : Saaty, 1980)

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

Pour confirmer la cohérence des préférences, il était nécessaire de vérifier si son CR est inférieur à 0,10. Les résultats de chaque expert par groupe sont présentés dans les tableaux 4.20 à 4.24.

Tableau 4.20. Résultat des poids relatifs pour le groupe des enseignants

	Phy	Env	Ope	Sec		CR
Enseignant 1	0,181	0,157	0,616	0,045	1,000	7,32%
Enseignant 2	0,344	0,042	0,484	0,130	1,000	8,13%
Enseignant 3	0,262	0,063	0,573	0,102	1,000	2,53%
Enseignant 4	0,647	0,173	0,133	0,046	1,000	8,66%
Enseignant 5	0,515	0,098	0,303	0,083	1,000	7,14%
Enseignant 6	0,647	0,101	0,057	0,195	1,000	9,62%
Enseignant 7	0,290	0,121	0,523	0,066	1,000	9,67%
Enseignant 8	0,280	0,068	0,533	0,119	1,000	3,83%
Enseignant 9	0,532	0,094	0,300	0,074	1,000	9,75%
Enseignant 10	0,272	0,063	0,578	0,088	1,000	5,32%
Enseignant 11	0,543	0,105	0,061	0,291	1,000	6,74%
Enseignant 12	0,309	0,139	0,510	0,043	1,000	9,29%
<i>Moyenne</i>	0,402	0,102	0,389	0,107	1,000	

Tableau 4.21. Résultat des poids relatifs pour le groupe des décideurs (DRE)

	Phy	Env	Ope	Sec		CR
DRE 1	0,154	0,081	0,347	0,418	1,000	9,20%
DRE 2	0,535	0,070	0,278	0,117	1,000	9,52%
DRE 3	0,233	0,075	0,144	0,548	1,000	9,68%
DRE 4	0,149	0,083	0,348	0,420	1,000	5,65%
DRE 5	0,472	0,289	0,087	0,152	1,000	6,74%
DRE 6	0,351	0,095	0,300	0,254	1,000	6,94%
DRE 7	0,431	0,131	0,057	0,381	1,000	7,28%
DRE 8	0,363	0,280	0,238	0,120	1,000	6,41%
DRE 9	0,137	0,094	0,277	0,492	1,000	9,29%
DRE 10	0,158	0,099	0,268	0,475	1,000	9,06%
DRE 11	0,156	0,073	0,310	0,461	1,000	4,07%
DRE 12	0,248	0,081	0,117	0,554	1,000	7,73%
<i>Moyenne</i>	0,282	0,121	0,231	0,366	1,000	

Le critère « Physique » présente le poids le plus haut par le groupe des enseignants avec une valeur de 40,2% (tableau 4.20) et le critère « Socio-économique » présente le poids le plus haut par le groupe des décideurs (DRE) avec une valeur de 36,6% (tableau 4.21).

Tableau 4.22. Résultat des poids relatifs pour le groupe des gestionnaires (ADE)

	Phy	Env	Ope	Sec		CR
ADE 1	0,127	0,062	0,526	0,285	1,000	3,11%
ADE 2	0,204	0,053	0,603	0,140	1,000	8,33%
ADE 3	0,325	0,121	0,483	0,071	1,000	9,16%
ADE 4	0,237	0,094	0,538	0,132	1,000	5,11%
ADE 5	0,330	0,094	0,370	0,206	1,000	7,50%
ADE 6	0,215	0,110	0,631	0,044	1,000	9,36%
ADE 7	0,252	0,100	0,558	0,090	1,000	9,30%
ADE 8	0,234	0,063	0,562	0,141	1,000	8,55%
ADE 9	0,132	0,063	0,370	0,435	1,000	8,23%
ADE 10	0,148	0,104	0,469	0,279	1,000	8,11%
ADE 11	0,125	0,070	0,547	0,258	1,000	9,19%
ADE 12	0,141	0,063	0,562	0,234	1,000	8,55%
<i>Moyenne</i>	0,206	0,083	0,518	0,193	1,000	

Le critère « Opérationnel » présente le poids le plus haut par le groupe des gestionnaires (ADE) avec une valeur de 51,8% (tableau 4.22)

Tableau 4.23. Résultat des poids relatifs pour le groupe des bureaux d'études (BET)

	Phy	Env	Ope	Sec		CR
BET 1	0,116	0,080	0,311	0,493	1,000	8,82%
BET 2	0,539	0,110	0,295	0,056	1,000	8,79%
BET 3	0,229	0,119	0,597	0,055	1,000	9,15%
BET 4	0,232	0,084	0,627	0,057	1,000	8,93%
BET 5	0,222	0,164	0,544	0,070	1,000	9,44%
BET 6	0,632	0,210	0,084	0,074	1,000	8,53%
BET 7	0,152	0,060	0,438	0,350	1,000	8,39%
BET 8	0,164	0,063	0,287	0,486	1,000	9,57%
BET 9	0,151	0,067	0,291	0,491	1,000	7,45%
BET 10	0,258	0,070	0,125	0,547	1,000	9,19%
BET 11	0,124	0,081	0,293	0,503	1,000	8,25%
BET 12	0,126	0,071	0,492	0,311	1,000	7,06%
<i>Moyenne</i>	0,245	0,098	0,365	0,291	1,000	

Le critère « Opérationnel » présente le poids le plus haut par le groupe des bureaux d'études (BET) avec une valeur de 36,5% (tableau 4.23)

Tableau 4.24. Résultat des poids relatifs pour le groupe des entreprises de travaux (ENT)

	Phy	Env	Ope	Sec		CR
ENT 1	0,210	0,481	0,210	0,099	1,000	5,82%
ENT 2	0,462	0,308	0,086	0,144	1,000	9,41%
ENT 3	0,256	0,067	0,508	0,169	1,000	9,27%
ENT 4	0,492	0,269	0,135	0,104	1,000	7,97%
ENT 5	0,247	0,182	0,097	0,474	1,000	8,14%
ENT 6	0,271	0,505	0,148	0,076	1,000	4,24%
ENT 7	0,111	0,077	0,297	0,515	1,000	8,43%
ENT 8	0,104	0,421	0,116	0,359	1,000	6,98%
ENT 9	0,263	0,077	0,501	0,159	1,000	7,54%
ENT 10	0,121	0,069	0,499	0,310	1,000	9,68%
ENT 11	0,258	0,490	0,172	0,080	1,000	6,00%
ENT 12	0,263	0,509	0,152	0,075	1,000	7,66%
<i>Moyenne</i>	0,255	0,288	0,243	0,214	1,000	

Le critère « Environnement de la conduite » présente le poids le plus haut par le groupe des entreprises de travaux (ENT) avec une valeur de 28,8% (tableau 4.24)

Résultats de la priorisation des critères

Les éléments de la matrice de comparaison agrégée par paires des critères ont été calculés en combinant les données collectées auprès des 60 experts, comme indiqué dans le tableau 4.25. Ensuite, le poids final de chaque critère est calculé par la moyenne des poids calculés par chaque groupe.

Tableau 4.25. Résultat des poids relatifs pour tous les groupes

	Phy	Env	Ope	Sec	
Ens	0,402	0,102	0,389	0,107	
DRE	0,282	0,121	0,231	0,366	
ADE	0,206	0,083	0,518	0,193	
BET	0,245	0,098	0,365	0,291	
ENT	0,255	0,288	0,243	0,214	
Final	0,278	0,138	0,349	0,235	1,000

La figure 4.23 montre que parmi les quatre critères d'évaluation, le critère « Opérationnel » est le critère de sélection le plus important, avec une pondération de 0,349, suivi de « Physique », avec une pondération de 0,278. En revanche, « Environnement de la conduite » présente le critère le moins important, avec une pondération de 0,138. Selon les critères, le classement est le suivant : C3 > C1 > C4 > C2.

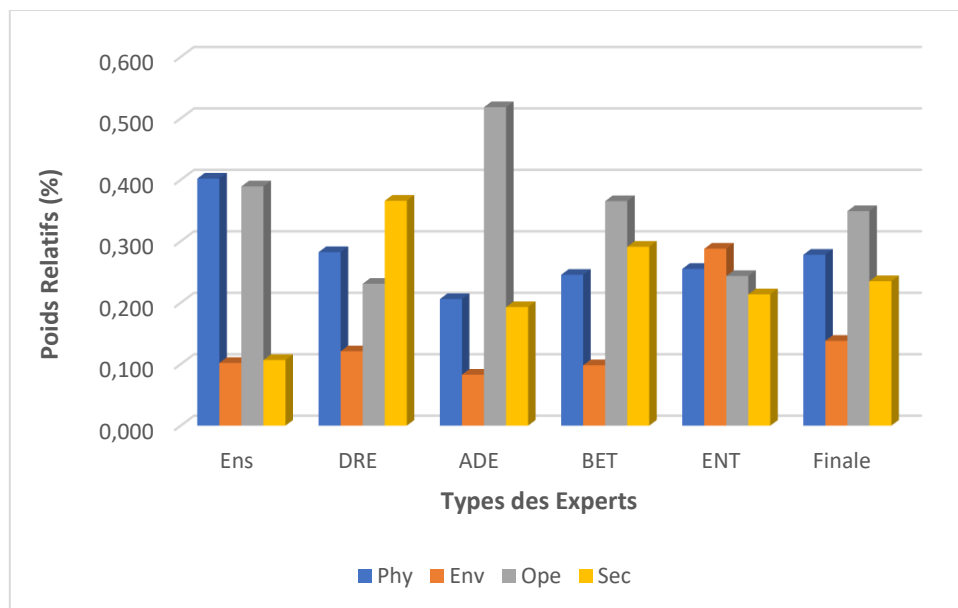


Figure 4.23. Résultats de la pondération des critères par la méthode Fuzzy-AHP

Calcul des poids relatifs des sous-critères

La section suivante présente les matrices de comparaison par paires agrégées et les résultats de l'analyse des pondérations et des classements de tous les sous-critères.

✓ **Sous-critères « Physique »**

Le tableau 4.26 présente la matrice de comparaison par paires agrégée des sous-critères (critères physique).

Tableau 4.26. Matrice de comparaison par paire floue des sous-critères (critères physique).

	Mat			Dia			Lon			Age			Pro		
Mat	1	1	1	2	3	4	4	5	6	1/4	1/3	1/2	3	4	5
Dia	1/4	1/3	1/2	1	1	1	2	3	4	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1
Lon	1/6	1/5	1/4	1/4	1/3	1/2	1	1	1	1/6	1/5	1/4	1/4	1/3	1/2
Age	2	3	4	4	5	6	4	5	6	1	1	1	2	3	4
Pro	1/5	1/4	1/3	1	2	3	2	3	4	1/4	1/3	1/2	1	1	1

Calcul de la moyenne géométrique floue

	Moyenne géométrique floue		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Mat	1,431	1,821	2,268
Dia	0,488	0,631	0,871
Lon	0,280	0,339	0,435
Age	2,297	2,954	3,565
Pro	0,631	0,871	1,149
TOTAL	5,128	6,615	8,288
INVERSE	0,195	0,151	0,121
Increasing order	0,121	0,151	0,195

Poids flous

	Poids flou			<i>M_i</i>	Poids normalisé
Mat	0,173	0,275	0,442	0,297	0,275
Dia	0,059	0,095	0,170	0,108	0,100
Lon	0,034	0,051	0,085	0,057	0,053
Age	0,277	0,447	0,695	0,473	0,439
Pro	0,076	0,132	0,224	0,144	0,133
				1,078	1,000

Les résultats des poids flous pour chaque groupe des experts ont été présentés dans les tableaux 4.27 à 4.37. Les autres tableaux ont été présentés dans l'annexe A2.

Tableau 4.27. Résultat des poids pour le sous-critère « Physique » par le groupe des enseignants

	Mat	Dia	Lon	Age	Pro		CR
Enseignant 1	0,350	0,082	0,045	0,184	0,338	1,000	4,66%
Enseignant 2	0,030	0,118	0,078	0,446	0,328	1,000	9,88%
Enseignant 3	0,275	0,100	0,053	0,439	0,133	1,000	7,04%
Enseignant 4	0,509	0,201	0,160	0,085	0,045	1,000	9,12%
Enseignant 5	0,169	0,055	0,065	0,473	0,238	1,000	9,07%
Enseignant 6	0,263	0,052	0,098	0,408	0,179	1,000	8,97%
Enseignant 7	0,153	0,051	0,036	0,462	0,299	1,000	9,25%
Enseignant 8	0,301	0,090	0,075	0,378	0,156	1,000	8,10%
Enseignant 9	0,305	0,090	0,053	0,403	0,149	1,000	7,83%
Enseignant 10	0,540	0,234	0,098	0,075	0,053	1,000	8,81%
Enseignant 11	0,435	0,300	0,107	0,085	0,073	1,000	9,36%
Enseignant 12	0,362	0,080	0,046	0,302	0,210	1,000	8,44%
<i>Moyenne</i>	0,308	0,121	0,076	0,312	0,184	1,000	

Le tableau 4.28 présente les pondérations des sous-critères du critère « Physique »

Tableau 4.28. Résultat final des poids flous pour les sous-critères « critère : Physique »

	Mat	Dia	Lon	Age	Pro	
Ens	0,308	0,121	0,076	0,312	0,184	
DRE	0,301	0,143	0,157	0,293	0,105	
ADE	0,242	0,152	0,082	0,351	0,173	
BET	0,329	0,134	0,093	0,271	0,174	
ENT	0,308	0,091	0,229	0,270	0,102	
Finale	0,297	0,129	0,128	0,299	0,147	1,000

Concernant les pondérations et le classement des sous-critères de critère « Physique », les sous-critères « Age de la conduite » et « Type de matériaux » sont les deux sous-critères les plus importants du critère « Physique », avec des pondérations respectives de 0,299 et 0,297. Selon le critère « Physique », le classement des sous-critères est Age > Mat > Pro > Dia > Lon.

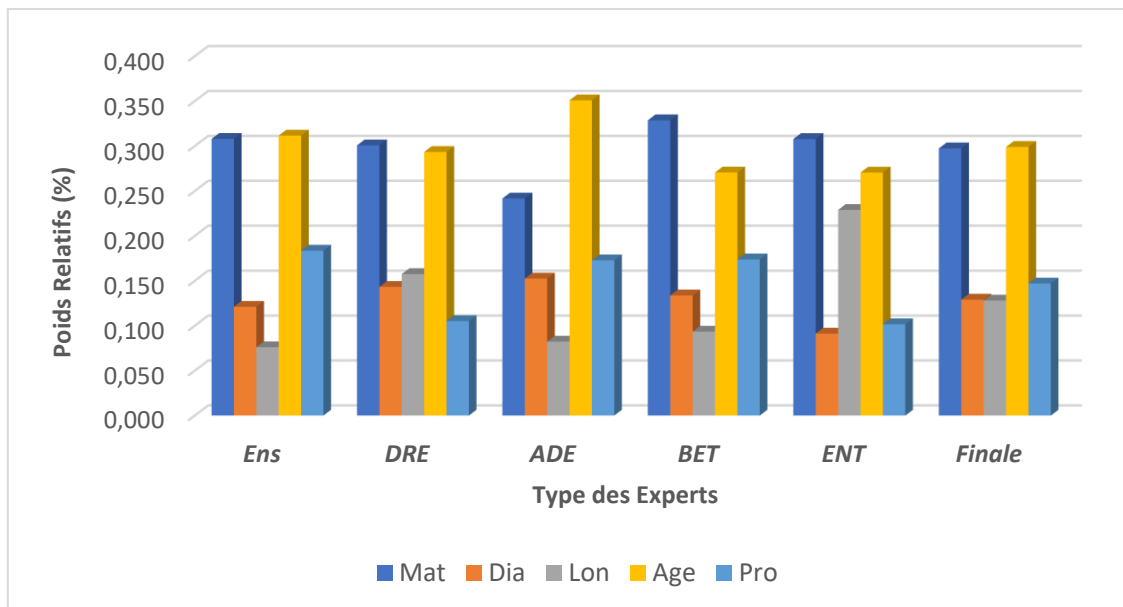


Figure 4.24. Résultats de la pondération des sous-critères (critère : Physique)

✓ **Sous-critère « Environnement de la conduite »**

Le tableau 4.29 présent le résultat des poids pour les sous-critères « critère : Environnement de la conduite » par le groupe de DRE. Les tableaux des autres groupes d'experts sont présentés dans l'annexe A2.

Tableau 4.29. Résultat des poids pour les sous-critères « Environnement de la conduite » par le groupe de DRE

	Sol	Tra	NNP	Cli	TT		CR
DRE 1	0,347	0,245	0,087	0,129	0,192	1,000	9,58%
DRE 2	0,122	0,079	0,240	0,048	0,511	1,000	8,80%
DRE 3	0,229	0,181	0,466	0,074	0,050	1,000	9,33%
DRE 4	0,099	0,052	0,291	0,154	0,403	1,000	9,42%
DRE 5	0,210	0,326	0,306	0,057	0,101	1,000	8,00%
DRE 6	0,153	0,405	0,281	0,059	0,102	1,000	7,44%
DRE 7	0,305	0,256	0,232	0,161	0,046	1,000	4,95%
DRE 8	0,306	0,335	0,180	0,116	0,062	1,000	6,80%
DRE 9	0,211	0,160	0,115	0,097	0,417	1,000	8,61%
DRE 10	0,351	0,228	0,181	0,118	0,122	1,000	9,91%
DRE 11	0,129	0,086	0,243	0,040	0,502	1,000	9,94%
DRE 12	0,355	0,225	0,087	0,130	0,202	1,000	7,06%
<i>Moyenne</i>	0,235	0,215	0,226	0,099	0,226	1,000	

Tableau 4.30. Résultat final des poids flous pour les sous-critères « critère : Environnement de la conduite ».

	Sol	Tra	NNP	Cli	TT	
Ens	0,326	0,244	0,166	0,088	0,176	
DRE	0,235	0,215	0,226	0,099	0,226	
ADE	0,169	0,190	0,161	0,099	0,381	
BET	0,245	0,143	0,101	0,086	0,426	
ENT	0,289	0,201	0,169	0,165	0,176	
Finale	0,253	0,199	0,164	0,107	0,277	1,000

Les pondérations des sous-critères pour le critère « Environnement de la conduite », les sous-critères « Tremblement de Terre » et « Type de Sol » sont les deux sous-critères les plus importants du critère « Environnement de la conduite », avec des pondérations respectives de 0,277 et 0,253. Selon le critère « Environnement de la conduite », le classement des sous-critères est TT > Sol > Tra > NNP > Cli. Tous les résultats sont illustrés à la figure 4.25.

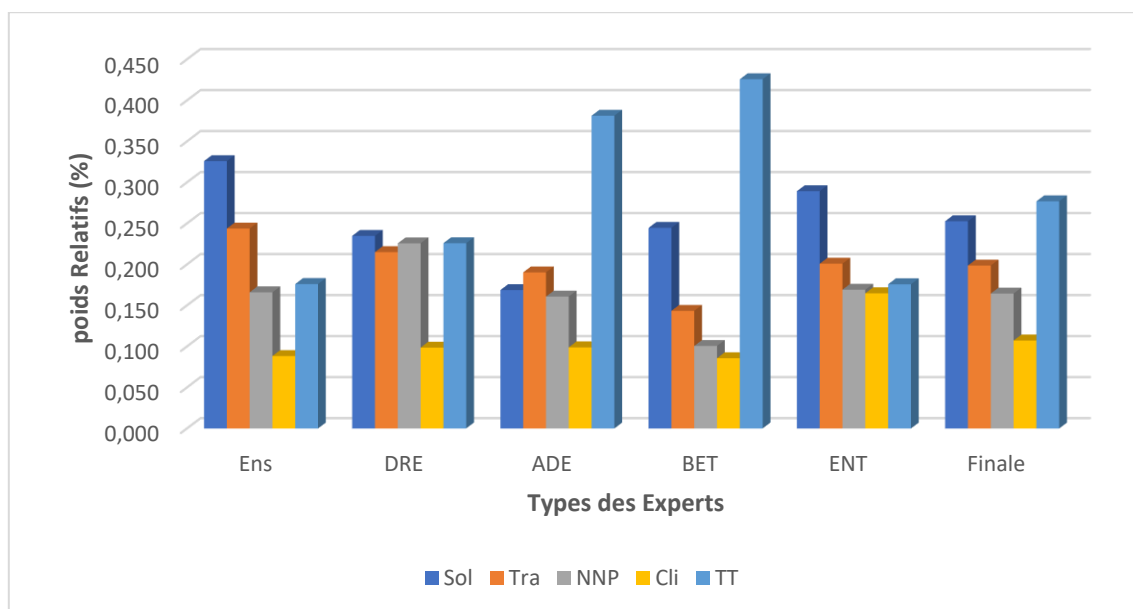


Figure 4.25. Résultats de la pondération des sous-critères (critère : Environnement de la conduite)

✓ **Sous-critère « Opérationnel »**

Le tableau 4.31 présent le résultat des poids pour les sous-critères « critère : Opérationnel » par le groupe de l'ADE. Les tableaux des autres groupes d'experts sont présentés dans l'annexe A2.

Tableau 4.31. Résultat des poids pour les sous-critères « Opérationnel » par le groupe de l'ADE

	Pre	Vit	Def	Qea	Qen		CR
ADE 1	0,444	0,096	0,220	0,053	0,187	1,000	9,78%
ADE 2	0,173	0,094	0,286	0,034	0,414	1,000	9,97%
ADE 3	0,522	0,236	0,079	0,113	0,050	1,000	9,91%
ADE 4	0,423	0,197	0,245	0,049	0,086	1,000	8,69%
ADE 5	0,472	0,107	0,219	0,054	0,148	1,000	9,77%
ADE 6	0,422	0,108	0,245	0,056	0,169	1,000	3,47%
ADE 7	0,396	0,100	0,329	0,046	0,130	1,000	5,28%
ADE 8	0,105	0,076	0,250	0,450	0,119	1,000	9,76%
ADE 9	0,377	0,168	0,285	0,059	0,110	1,000	9,80%
ADE 10	0,389	0,049	0,298	0,097	0,167	1,000	7,01%
ADE 11	0,352	0,048	0,329	0,104	0,167	1,000	5,61%
ADE 12	0,405	0,161	0,246	0,066	0,122	1,000	9,24%
<i>Moyenne</i>	0,373	0,120	0,253	0,099	0,156	1,000	

Tableau 4.32. Résultat final des poids flous pour les sous-critères « critère : Opérationnel ».

	Pre	Vit	Def	Qea	Qen	
Ens	0,354	0,126	0,206	0,116	0,198	
DRE	0,378	0,138	0,209	0,115	0,160	
ADE	0,373	0,120	0,253	0,099	0,156	
BET	0,374	0,174	0,188	0,163	0,101	
ENT	0,340	0,105	0,218	0,160	0,177	
Finale	0,364	0,132	0,215	0,130	0,159	1,000

Les pondérations des sous-critères pour le critère « Opérationnel », les sous-critères « Pression » et « Nombre de défaillances » sont les sous-critères les plus importants du critère « Opérationnel », avec des pondérations respectives de 0,364 et 0,215. Selon le critère « Opérationnel », le classement des sous-critères est Pre > Def > Qen > Vit > Qea. Tous les résultats sont illustrés à la figure 4.26.

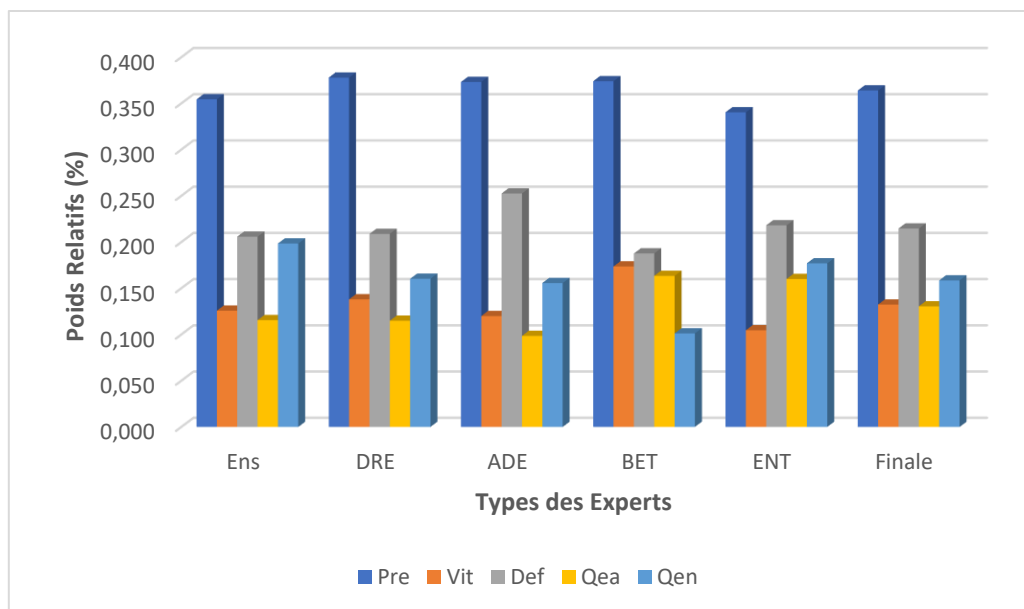


Figure 4.26. Résultats de la pondération des sous-critères (critère : Opérationnel)

✓ **Sous-critère « Socio-économique »**

Le tableau 4.33 présente le résultat des poids pour les sous-critères « critère : Socio-économique » par le groupe de DRE. Les tableaux des autres groupes d'experts sont présentés dans l'annexe A2.

Tableau 4.33. Résultat des poids pour les sous-critères « Socio-économique » par le groupe BET

	Cin	Cre	DPZ	Nre	PC		CR
BET 1	0,516	0,248	0,053	0,070	0,113	1,000	8,14%
BET 2	0,401	0,218	0,124	0,146	0,111	1,000	9,94%
BET 3	0,149	0,133	0,119	0,422	0,176	1,000	9,87%
BET 4	0,521	0,211	0,075	0,118	0,075	1,000	5,14%
BET 5	0,425	0,263	0,103	0,133	0,076	1,000	6,57%
BET 6	0,152	0,220	0,227	0,252	0,149	1,000	9,31%
BET 7	0,504	0,270	0,050	0,078	0,099	1,000	9,27%
BET 8	0,393	0,334	0,054	0,154	0,065	1,000	9,42%
BET 9	0,362	0,283	0,116	0,175	0,064	1,000	8,60%
BET 10	0,400	0,270	0,109	0,167	0,054	1,000	7,73%
BET 11	0,420	0,281	0,087	0,147	0,065	1,000	6,78%
BET 12	0,376	0,332	0,092	0,142	0,058	1,000	7,70%
<i>Moyenne</i>	0,385	0,255	0,101	0,167	0,092	1,000	

Tableau 4.34. Résultat final des poids flous pour les sous-critères « critère : Socio-économique »

	Cin	Cre	DPZ	Nre	PC
Ens	0,304	0,283	0,170	0,153	0,090
DRE	0,398	0,257	0,128	0,109	0,107
ADE	0,262	0,267	0,168	0,096	0,207
BET	0,385	0,255	0,101	0,167	0,092
ENT	0,297	0,277	0,141	0,119	0,165
Finale	0,329	0,268	0,142	0,129	0,132

1,000

Les pondérations des sous-critères pour le critère « Socio-économique », les sous-critères « Coût d'investissement initial », « Coût de réparation » sont les deux sous-critères les plus importants du critère « Socio-économique », avec des pondérations respectives de 0,329 et 0,268. Selon le critère « Socio-économique », le classement des sous-critères est Cin > Cre > DPZ > PC > Nre. Tous les résultats sont illustrés à la figure 4.27.

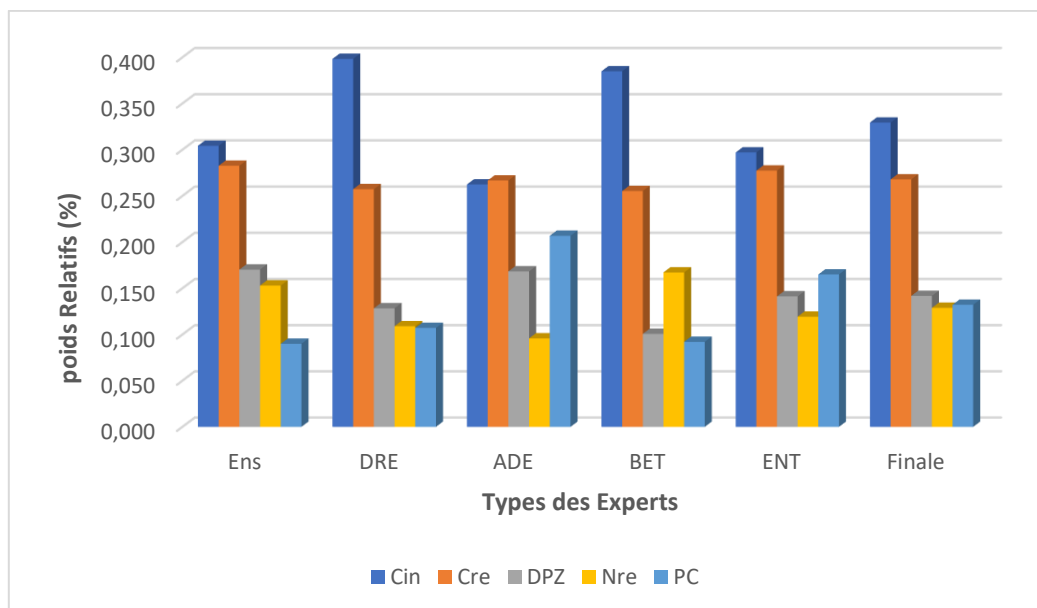


Figure 4.27. Résultats de la pondération des sous-critères (critère : Socio-économique)

Tableau 4.35. Résultat final des poids relatifs des critères et sous-critères par Fuzzy-AHP

Critères		Sous-critères			
Phy : 0,278	Mat : 0,297	Dia : 0,129	Lon : 0,128	Age : 0,299	Pro : 0,147
Env : 0,138	Sol : 0,253	Tra : 0,199	NNP : 0,164	Cli : 0,107	TT : 0,277
Ope : 0,349	Pre : 0,364	Vit : 0,132	Def : 0,215	Qea : 0,130	Qen : 0,159
Sec: 0,235	Cin : 0,329	Cre : 0,268	DPZ : 0,142	Nre : 0,129	PC : 0,132

Poids globaux

Dans un premier temps, de nombreux critères ont été identifiés dans la littérature, puis filtrés/affinés avec l'aide d'experts du domaine grâce à la méthode Delphi. Quatre critères et Vingt sous-critères ont été retenus.

La méthode Fuzzy-AHP a été utilisée pour obtenir les pondérations et les classements de chaque critère et sous-critère. Les critères ont donc été classés et pondérés en fonction de leur importance. Les pondérations finales (poids globaux) des sous-critères ont été obtenues en multipliant la pondération de chaque sous-critère par la pondération de sa catégorie respective. Le tableau 4.36 et la figure 4.28 présente les pondérations finales (poids globaux) des sous-critères.

Tableau 4.36. Pondérations des poids globaux des sous-critères

Critères	Poids relatifs	Sous-critères	Poids relatifs	Poids globaux	Classement
Physique	0,278	Mat	0,297	0,083	2
		Dia	0,129	0,036	12
		Lon	0,128	0,036	12
		Age	0,299	0,083	2
		Pro	0,147	0,041	10
Environnement de la conduite	0,138	Sol	0,253	0,035	14
		Tra	0,199	0,027	18
		NNP	0,164	0,023	19
		Cli	0,107	0,015	20
		TT	0,277	0,038	11
Opérationnel	0,349	Pre	0,364	0,127	1
		Vit	0,132	0,046	8
		Def	0,215	0,075	5
		Qea	0,130	0,046	9
		Qen	0,159	0,055	7
Socio-économique	0,235	Cin	0,329	0,077	4
		Cre	0,268	0,063	6
		DPZ	0,142	0,033	15
		Nre	0,129	0,030	17
		PC	0,132	0,031	16
				1,000	

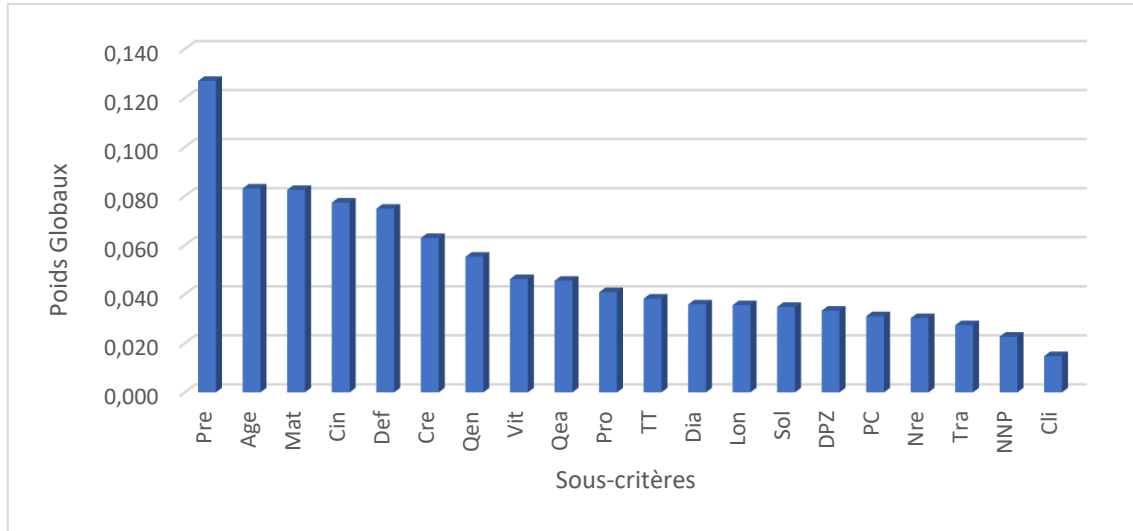


Figure 4.28. Classement des poids globaux des sous-critères

La figure 4.28 montre le classement général des sous-critères, qui est basé sur les pondérations finales obtenues (poids globaux). Le classement des sous-critères est : Pre > Age > Mat > Cin > Def > Cre > Qen > Vit > Qea > Pro > TT > Dia > Lon > Sol > DPZ > PC > Nre > Tra > NNP. Les résultats ont révélé que la pression était le sous-critère majeure le plus crucial, suivie de l'âge des conduites d'eau et du type de matériaux, le coût d'investissement initial, le nombre de défaillances, et le coût de réparations des fuites dans le réseau de distribution de la ville d'El Bouni. Sur la base des sous-critères, nous avons constatés que les gestionnaires des services d'eau potable de la ville d'El Bouni souffrent de problèmes techniques (physique et opérationnel) et des problèmes financiers (manque de ressources financières pour réparer les fuites d'eau et le renouvellement des tronçons vieillissants).

Comparaison de la pondération par rapport aux nombres d'Experts

Tableau 4.37. Pondération avec 12 Experts

	Phy	Env	Ope	Sec
Enseignant 1	0,181	0,157	0,616	0,045
Enseignant 2	0,344	0,042	0,484	0,130
Enseignant 3	0,262	0,063	0,573	0,102
Enseignant 4	0,647	0,173	0,133	0,046
Enseignant 5	0,515	0,098	0,303	0,083
Enseignant 6	0,647	0,101	0,057	0,195
Enseignant 7	0,290	0,121	0,523	0,066
Enseignant 8	0,280	0,068	0,533	0,119
Enseignant 9	0,532	0,094	0,300	0,074
Enseignant 10	0,272	0,063	0,578	0,088
Enseignant 11	0,543	0,105	0,061	0,291
Enseignant 12	0,309	0,139	0,510	0,043
<i>Moyenne</i>	0,402	0,102	0,389	0,107

Tableau 4.38. Pondération avec 06 Experts

Enseignant 1	0,181	0,157	0,616	0,045
Enseignant 2	0,344	0,042	0,484	0,130
Enseignant 3	0,262	0,063	0,573	0,102
Enseignant 4	0,647	0,173	0,133	0,046
Enseignant 5	0,515	0,098	0,303	0,083
Enseignant 6	0,647	0,101	0,057	0,195
<i>Moyenne</i>	0,433	0,106	0,361	0,100

Tableau 4.39. Pondération avec 01 Expert

Enseignant 1	0,181	0,157	0,616	0,045
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Tableau 4.40. Classement par nombre des experts

	Classement		
	12 Experts	06 Experts	01 Expert
Phy	1	1	2
Env	4	3	3
Ope	2	2	1
SEC	3	4	4

4.6. Plan de renouvellement

Le choix du plan de renouvellement des conduites d'eau est basé sur la pondération des indicateurs (tableau 4.41) et le calcul des seuils de renouvellement (seuil supérieur à 0,5)

Tableau 4.41. Calcul des poids globaux des indicateurs

Sous-critères	Poids globaux	Indicateurs	Poids relatifs	Poids globaux
Mat	0,083	Fonte	0,127	0,010
		PEHD	0,062	0,005
		PVC	0,260	0,022
		Acier	0,550	0,045
Dia	0,036	$\Phi < 100$	0,092	0,003
		$100 \leq \Phi \leq 200$	0,104	0,004
		$201 \leq \Phi \leq 300$	0,276	0,010
		$\Phi > 300$	0,529	0,019
Lon	0,036	0 - 50	0,122	0,004
		51 - 100	0,091	0,003
		101 - 200	0,254	0,009
		Plus de 200	0,532	0,019
Age	0,083	0 - 10	0,098	0,008
		11 à 20	0,186	0,015
		21 - 30	0,277	0,023
		Plus de 30	0,439	0,037
Pro	0,041	Non	0,091	0,004
		Interne	0,455	0,019
		Externe	0,455	0,019
Sol	0,035	Sol Corrosif	0,667	0,023
		Sol non Corrosif	0,333	0,012
Tra	0,027	Route Principale	0,655	0,018
		Route Secondaire	0,211	0,006
		Passage Piéton	0,133	0,004
NNP	0,023	Présente	0,750	0,017
		Absente	0,250	0,006
Cli	0,015	Gel	0,211	0,003
		Dégel	0,241	0,004
		Température élevée	0,548	0,008
TT	0,038	Faible	0,123	0,005
		Moyen	0,320	0,012
		Fort	0,557	0,021
Pre	0,127	$Pr < 2$	0,102	0,013
		$2 \leq Pr \leq 6$	0,366	0,047

		Pr > 6	0,532	0,068
Vit	0,046	V < 0,5	0,140	0,006
		0,5 ≤ V ≤ 1,5	0,286	0,013
		V > 1,5	0,574	0,027
Def	0,075	0	0,120	0,009
		1 ≤ D ≤ 3	0,272	0,020
		D > 3	0,608	0,046
Qea	0,046	Agressive	0,411	0,019
		Non Agressive	0,328	0,015
		Temps de séjour	0,261	0,012
Qen	0,055	Bon	0,103	0,006
		Moyen	0,174	0,010
		Mauvais	0,723	0,040
Cin	0,077	Non suffisant	0,702	0,054
		Moyen	0,227	0,018
		Suffisant	0,072	0,006
Cre	0,063	Non suffisant	0,643	0,040
		Moyen	0,283	0,018
		Suffisant	0,074	0,005
DPZ	0,033	Rurale	0,104	0,003
		Semi-Urbain	0,231	0,008
		Urbain	0,665	0,022
Nre	0,030	Forte	0,608	0,018
		Moyenne	0,272	0,008
		Faible	0,120	0,004
PC	0,031	Mauvaise	0,619	0,019
		Moyenne	0,284	0,009
		Bonne	0,096	0,003
			1,000	

Tableau 4.42. Exemple de calcul du seuil de renouvellement

Conduite	Mat	Dia	Lon	Age	Pro	Sol	Tra	NNP	Cli	TT
Pipe_30	PVC	63	326,83	35	Non	Corrosif	Principal	Présente	Dégel	Fort
		0,022	0,0033	0,019	0,037	0,004	0,023	0,018	0,017	0,004

Pre	Vit	Def	Qea	Qen	Cin	Cre	DPZ	Nre	PC
7,41	0,53	D > 3	Agressive	Mauvais	N suffisant	N suffisant	Urbain	Forte	Mauvaise
0,068	0,013	0,046	0,019	0,040	0,054	0,040	0,022	0,018	0,019

0,5067

A court terme, le total des canalisations à renouveler est de 9873,99 ml (6241,15 de PVC et 3632,84 d'Acier).

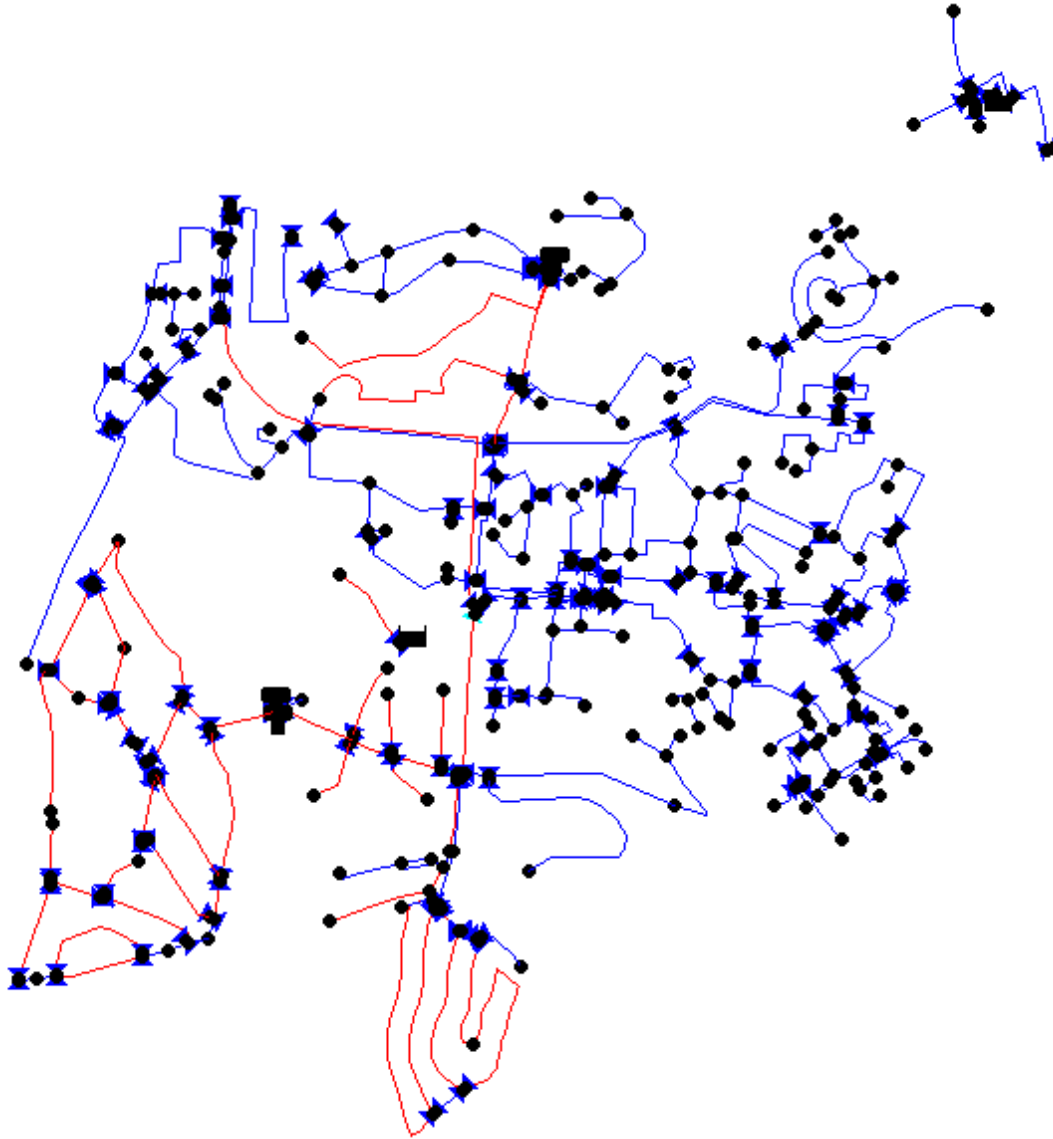


Figure 4.29. Plan de renouvellement des canalisations d'eau potable, ville d'El Bouni

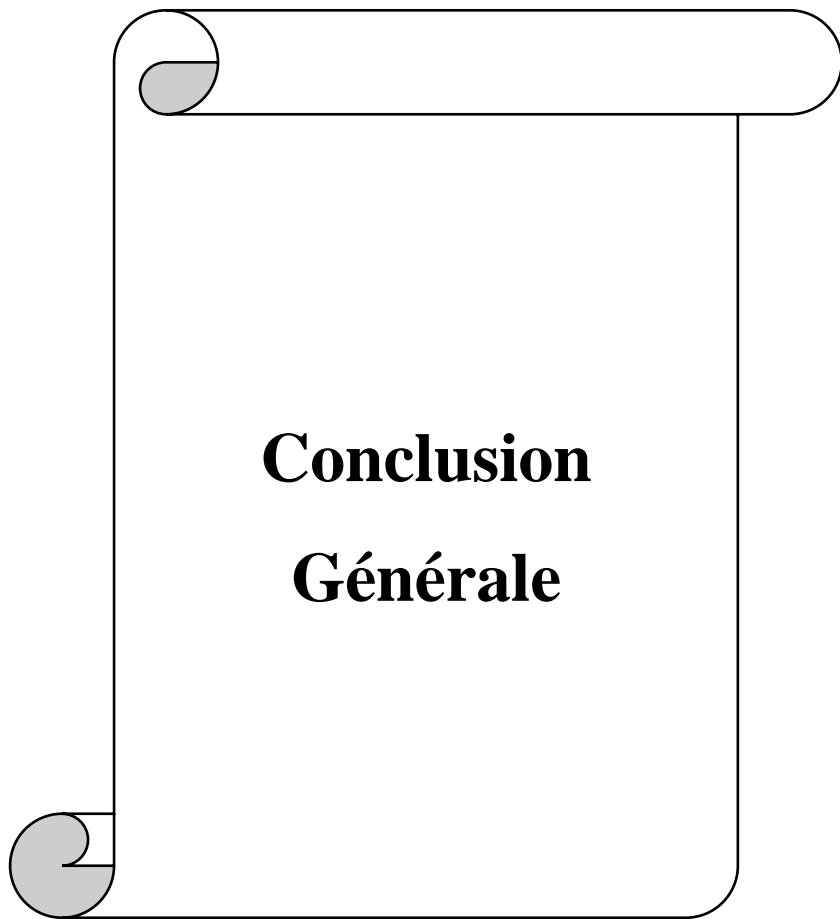
Recommandations Techniques :

a) *Court Terme* :

- Optimiser la pression : Installer des réducteurs de pression dans les zones à fuites récurrentes.
- Cibler les réparations : Prioriser les tronçons avec >3 fuites/an.

b) *Moyen et Long Terme* :

- Rénovation ciblée : Remplacer les canalisations en acier/amiante-ciment par des conduites en fonte ductile et les canalisations en PVC par du PEHD.
- Technologies intelligentes : Installer des capteurs de pression/débit en temps réel pour détection précoce.



**Conclusion
Générale**

Conclusion Générale

Notre projet de fin d'étude visait à développer un modèle décisionnel intégrant les deux méthodes Delphi et Fuzzy-AHP pour le renouvellement des canalisations d'eau potable. L'étude visait à démontrer comment ce modèle pourrait améliorer la procédure de sélection des facteurs de risque et fournir un cadre décisionnel pour les projets de renouvellement des conduites d'eau.

Cette étude a démontré l'efficacité des procédures décisionnelles multicritères pour la sélection des canalisations à renouveler dans le réseau de distribution d'eau potable. Différents critères et sous-critères ont été définis, et leur pondération relative a été déterminée avec succès à l'aide d'une approche intégrée entre la méthode Delphi et la méthode Fuzzy-AHP.

Les critères d'évaluation et les sous-critères ont été identifiés par la méthode Delphi avec deux tours. Au total, quatre critères et vingt sous-critères ont été sélectionnés par les experts dans les deux tours de l'approche Delphi. Ensuite, la méthode Fuzzy-AHP a été utilisée pour le calcul des poids flous de ces critères et sous-critères selon le jugement de soixante experts regroupés en cinq groupes.

Les résultats de notre étude ont montré que le classement général des sous-critères, qui est basé sur les poids globaux est comme suit, la pression était le sous-critère majeure le plus crucial, suivie de l'âge des conduites d'eau et du type de matériaux, le coût d'investissement initial, le nombre de défaillances, et le coût de réparations des fuites dans le réseau de distribution de la ville d'El Bouni. Sur la base des sous-critères, nous avons constatés que les gestionnaires des services d'eau potable de la ville d'El Bouni souffrent de problèmes techniques (physique et opérationnel) et des problèmes financiers (manque de ressources financières pour réparer les fuites d'eau et le renouvellement des tronçons vieillissants). A court terme, le total des canalisations à renouveler est de 9873,99 ml (6241,15 de PVC et 3632,84 d'Acier).

Le modèle proposé a permis de fournir des informations précises sur les canalisations (matériau et diamètre des tubes primaires et secondaires), identifiant les parties les plus vulnérables, sensibles et à haut risque du système.

Pour les grands réseaux de distribution d'eau, il est recommandé d'inclure d'autres critères pertinents et de collecter plus de données sur plusieurs années afin d'améliorer la précision des résultats. Ainsi, une analyse plus complète et plus précise de la situation du réseau et des mesures nécessaires pour garantir la qualité de l'eau distribuée peut être obtenue. De plus, pour les réseaux de distribution d'eau de petite et moyenne taille présentant des contraintes techniques et financières, ce modèle d'évaluation des risques peut s'avérer très avantageux car il utilise des outils informatiques librement accessibles (Epanet) et une méthodologie simple. De plus, il fournit les résultats essentiels à l'élaboration des calendriers de renouvellement des canalisations d'eau dans les réseaux de distribution d'eau potable.

Références Bibliographiques

1. Abd Rahman, N., Muhammad, N. S., & Wan Mohtar, W. H. M. (2018). Evolution of research on water leakage control strategies: Where are we now? *Urban Water Journal*, 15(8), 812–826.
2. ADE, (2024). Rapport Annuel d'exploitation, Unité d'Annaba
3. ADE, (2025). Rapport Semestriel d'exploitation, Unité d'Annaba
4. Aliyev, R., Temizkan, H., & Aliyev, R. (2020). Fuzzy analytic hierarchy process-based multi-criteria decision making for universities ranking. *Symmetry*, 12(8), 1351.
5. Aşchilean, I., Badea, G., Giurca, I., Naghiu, G. S., & Iloaie, F. G. (2017). Choosing the optimal technology to rehabilitate the pipes in water distribution systems using the AHP method. *Energy Procedia*, 112, 19-26.
6. Bakhtiari, P.H., Nikoo, M.R., & Gandomi, A.H. (2023). Chapter 4—Evolutionary Computation Techniques for Optimal Response Actions against Water Distribution Networks Contamination. In *Comprehensive Metaheuristics*; Mirjalili, S., Gandomi, A.H., Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, pp. 65–84. ISBN 978-0-323-91781-0.
7. Boryczko, K., Piegdoń, I., Szpak, D., & Żywiec, J. (2021). Risk Assessment of Lack of Water Supply Using the Hydraulic Model of the Water Supply. *Resources*, 10, 43
8. Boukhari, S., Mrad, D., & Dairi, S. (2024). Performance indicators and analytic hierarchy process to evaluate water supply services management in Algeria. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73 (5), 1013–1029.
9. Da Silva, W. T., & Souza, M. A. (2017). A decision support model to aid the management of crises in urban water supply systems (the uwc-model). *Urban Water Journal*, 14(6), 612–620.
10. Brans, J. P., & Vincke, P. (1982). Note—A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). *Management science*, 31(6), 647-656
11. Da Silva, W. T., & Souza, M. A. (2017). A decision support model to aid the management of crises in urban water supply systems (the uwc-model). *Urban Water Journal*, 14(6), 612–620.
12. D'Ercole, M., Righetti, M., Raspati, G.S., Bertola, P., & Maria Ugarelli, R. (2018). Rehabilitation Planning of Water Distribution Network through a Reliability—Based Risk Assessment. *Water*, 10, 277.
13. de Souza Batista, G., de Lacerda, M. C., Aragão, D. P., de Araújo, M. M. C., & Rodrigues, A. C. L. (2024). Modeling the decay of free residual chlorine in water distribution networks in Brazilian rural communities using artificial neural network. *Journal of Water Process Engineering*, 61, 105312.

13. Elnaboulsi, J., & Alexandre, O. (1998). Le renouvellement des réseaux urbains d'eau potable-Une approche économique d'optimisation. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, (15), p-3.
14. Hajkowicz, S., & Collins, K. (2007). A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management. *Water Resour Manage* 21, 1553–1566
15. 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.
16. Hwang, C.L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: A state of the art survey. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, pp. 162–173. ISBN 978-3-642-48318-9
17. Jayakody, J. A. N. N., Nasvi, M. C. M., Robert, D. J., Navaratnarajah, S. K., Kurukulasuriya, L. C., Giustozzi, F., ... & Setunge, S. (2024). Development of a Cross-Asset Model for the Maintenance of Road and Water Pipe Assets using AHP Method. *Civil Engineering Journal*, 10(2), 336-361.
18. Jyrkama, M.I., Pandey, M.D., & Li, M. (2022). Estimating Degradation Growth Rate and Time of Component Replacement from Limited Inspection Data Using Mixed-Effects Modelling. *Nucl. Eng. Des.* 388, 111618.
19. Li, Z., Liu, H., Zhang, C., & Fu, G. (2023). Generative Adversarial Networks for Detecting Contamination Events in Water Distribution Systems Using Multi-Parameter, Multi-Site Water Quality Monitoring. *Environ. Sci. Ecotechnol.* 14, 100231.
20. Marques, J., et Cunha, M. (2020). Upgrading Water Distribution Networks to Work under Uncertain Conditions. *Water Supply*, 20, 878–888.
21. Marzouk, M., & Osama, A. (2015). Fuzzy approach for optimum replacement time of mixed infrastructures. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 32(3), 269–280.
22. Nasution, S. M., Husni, E., Kuspriyanto, K., & Yusuf, R. (2022). Personalized route recommendation using FAHP-express. *Sustainability*, 14(17), 10831.
23. Nunes, R., Arraut, E., & Pimentel, M. (2023). Risk assessment model for the renewal of water distribution networks: A practical approach. *Water*, 15(8), 1509.
24. Orašanin, G., Simić, S., Košarac, A., Vasković, S., Milić, D., & Batinić, K. (2025). Water supply network renewal strategic planning utilizing the VIKOR method. *J. Urban Dev. Manag*, 4(1), 11-24.
25. Phan, H.C., Dhar, A.S., Hu, G., & Sadiq, R. (2019). Managing Water Main Breaks in Distribution Networks—A Risk-Based Decision Making. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 191, 106581
26. Raspati, G.S., Bruaset, S.; Bosco, C., Mushom, L., Johannessen, B., & Ugarelli, R. (2022). A Risk-Based Approach in Rehabilitation of Water Distribution Networks. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19, 1594
27. 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

28. Roigé, N., Pujadas, P., Cardús, J., & Aguado, A. (2020). Water network renewal strategy: A case study of Aigües De Barcelona. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Water Management* (Vol. 173, No. 2, pp. 59-68). Thomas Telford Ltd.
29. Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. *Theory and decision*, 31, 49-73
30. Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*; McGraw-Hill: New York, NY, USA
31. Salehi, S., Tabesh, M., & Jalili Ghazizadeh, M. (2018). HRDM Method for Rehabilitation of Pipes in Water Distribution Networks with Inaccurate Operational-Failure Data. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 144, 04018053.
32. Salehi, S., Jalili Ghazizadeh, M., Tabesh, M., Valadi, S., & Salamati Nia, S.P. (2021) A Risk Component-Based Model to Determine Pipes Renewal Strategies in Water Distribution Networks. *Struct. Infrastruct. Eng.* 17, 1338–1359
33. Saou, Y. (2018). Mémoire de master « *Modélisation de la demande en eau du réseau d'AEP cas de la ville d'El Bouni* ». Université Badji Mokhtar- Annaba.
34. Sargaonkar, A., Kamble, S., & Rao, R. (2013). Model study for rehabilitation planning of water supply network. *Computers, Environment and Urban Systems*, 39, 172–181
35. Shahata, K., et Zayed, T. (2012). Data Acquisition and Analysis for Water Main Rehabilitation Techniques. *Struct. Infrastruct. Eng.* 8, 1054–1066
36. Shume, H. A., & Mitikie, B. B. (2024). An integrated Delphi and Fuzzy AHP model for contractor selection: a case of Addis Ababa Design and Construction Works Bureau. *Cogent Engineering*, 11(1), 2357724.
37. Sitaropoulos, K., Salamone, S., & Sela, L. (2023). Frequency-Based Leak Signature Investigation Using Acoustic Sensors in Urban Water Distribution Networks. *Adv. Eng. Inform.* 55, 101905.
38. Vishwakarma, A., & Sinha, S. K. (2022). Development of a Risk Modeling Framework for Water Pipeline Renewal Prioritization. In *Pipelines*. 61-69.
39. Yoo D., Kang, D., Jun, H., & Kim, J. (2014). Rehabilitation priority determination of water pipes based on hydraulic importance. *Water*, 6(12),
40. 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

Annexes

Annexe A1. Comparaison par paires pour les critères

Physique					Environnement de la conduite				
-----------------	--	--	--	--	-------------------------------------	--	--	--	--

9	7	5	3	1	1/3	1/5	1/7	1/9	
	8	6	4	2		1/2	1/4	1/6	1/8

Physique					Opérationnel				
-----------------	--	--	--	--	---------------------	--	--	--	--

9	7	5	3	1	1/3	1/5	1/7	1/9	
	8	6	4	2		1/2	1/4	1/6	1/8

Physique					Socio-économique				
-----------------	--	--	--	--	-------------------------	--	--	--	--

9	7	5	3	1	1/3	1/5	1/7	1/9	
	8	6	4	2		1/2	1/4	1/6	1/8

Environnement de la conduite					Opérationnel				
-------------------------------------	--	--	--	--	---------------------	--	--	--	--

9	7	5	3	1	1/3	1/5	1/7	1/9	
	8	6	4	2		1/2	1/4	1/6	1/8

Environnement de la conduite					Socio-économique				
-------------------------------------	--	--	--	--	-------------------------	--	--	--	--

9	7	5	3	1	1/3	1/5	1/7	1/9	
	8	6	4	2		1/2	1/4	1/6	1/8

Opérationnel					Socio-économique				
---------------------	--	--	--	--	-------------------------	--	--	--	--

9	7	5	3	1	1/3	1/5	1/7	1/9	
	8	6	4	2		1/2	1/4	1/6	1/8

Annexe A2. Résultats de la pondération des poids par Fuzzy-AHP

	Mat	Dia	Lon	Age	Pro		CR
Enseignant 1	0,350	0,082	0,045	0,184	0,338	1,000	4,66%
Enseignant 2	0,030	0,118	0,078	0,446	0,328	1,000	9,88%
Enseignant 3	0,275	0,100	0,053	0,439	0,133	1,000	7,04%
Enseignant 4	0,509	0,201	0,160	0,085	0,045	1,000	9,12%
Enseignant 5	0,169	0,055	0,065	0,473	0,238	1,000	9,07%
Enseignant 6	0,263	0,052	0,098	0,408	0,179	1,000	8,97%
Enseignant 7	0,153	0,051	0,036	0,462	0,299	1,000	9,25%
Enseignant 8	0,301	0,090	0,075	0,378	0,156	1,000	8,10%
Enseignant 9	0,305	0,090	0,053	0,403	0,149	1,000	7,83%
Enseignant 10	0,540	0,234	0,098	0,075	0,053	1,000	8,81%
Enseignant 11	0,435	0,300	0,107	0,085	0,073	1,000	9,36%
Enseignant 12	0,362	0,080	0,046	0,302	0,210	1,000	8,44%
<i>Moyenne</i>	0,308	0,121	0,076	0,312	0,184	1,000	

	Mat	Dia	Lon	Age	Pro		CR
DRE 1	0,386	0,079	0,155	0,288	0,092	1,000	4,40%
DRE 2	0,118	0,038	0,050	0,481	0,313	1,000	9,53%
DRE 3	0,217	0,273	0,188	0,244	0,078	1,000	9,68%
DRE 4	0,492	0,223	0,152	0,076	0,058	1,000	9,20%
DRE 5	0,052	0,158	0,140	0,454	0,197	1,000	7,39%
DRE 6	0,345	0,349	0,121	0,100	0,085	1,000	9,15%
DRE 7	0,463	0,090	0,133	0,261	0,053	1,000	7,74%
DRE 8	0,500	0,088	0,157	0,197	0,058	1,000	9,10%
DRE 9	0,228	0,060	0,138	0,494	0,080	1,000	9,80%
DRE 10	0,152	0,155	0,319	0,291	0,082	1,000	9,43%
DRE 11	0,248	0,106	0,177	0,387	0,082	1,000	8,52%
DRE 12	0,408	0,100	0,159	0,249	0,084	1,000	5,66%
<i>Moyenne</i>	0,301	0,143	0,157	0,293	0,105	1,000	

	Mat	Dia	Lon	Age	Pro		CR
BET 1	0,432	0,090	0,126	0,182	0,170	1,000	9,60%
BET 2	0,252	0,084	0,029	0,436	0,199	1,000	8,43%
BET 3	0,375	0,120	0,065	0,310	0,130	1,000	4,41%
BET 4	0,228	0,115	0,057	0,246	0,354	1,000	7,22%
BET 5	0,299	0,059	0,052	0,356	0,233	1,000	4,24%
BET 6	0,391	0,107	0,124	0,225	0,153	1,000	8,17%
BET 7	0,283	0,107	0,066	0,395	0,149	1,000	8,01%
BET 8	0,308	0,273	0,193	0,134	0,092	1,000	7,67%
BET 9	0,417	0,121	0,067	0,262	0,133	1,000	5,53%
BET 10	0,285	0,351	0,187	0,112	0,065	1,000	7,89%
BET 11	0,231	0,088	0,028	0,434	0,219	1,000	9,39%
BET 12	0,440	0,089	0,127	0,155	0,189	1,000	6,81%
<i>Moyenne</i>	0,329	0,134	0,093	0,271	0,174	1,000	

	Mat	Dia	Lon	Age	Pro		CR
ADE 1	0,476	0,059	0,054	0,300	0,111	1,000	7,56%
ADE 2	0,150	0,035	0,050	0,432	0,333	1,000	9,47%
ADE 3	0,163	0,044	0,083	0,411	0,299	1,000	8,50%
ADE 4	0,060	0,061	0,137	0,449	0,293	1,000	9,53%
ADE 5	0,431	0,049	0,086	0,265	0,169	1,000	7,86%
ADE 6	0,108	0,265	0,089	0,413	0,125	1,000	8,22%
ADE 7	0,167	0,525	0,064	0,189	0,055	1,000	9,51%
ADE 8	0,128	0,214	0,052	0,273	0,333	1,000	5,70%
ADE 9	0,201	0,153	0,094	0,497	0,055	1,000	8,66%
ADE 10	0,253	0,093	0,050	0,433	0,171	1,000	9,88%
ADE 11	0,270	0,290	0,078	0,320	0,042	1,000	7,78%
ADE 12	0,493	0,042	0,150	0,227	0,088	1,000	8,70%
<i>Moyenne</i>	0,242	0,152	0,082	0,351	0,173	1,000	

	Mat	Dia	Lon	Age	Pro		CR
ENT 1	0,429	0,054	0,097	0,245	0,175	1,000	8,73%
ENT 2	0,171	0,047	0,042	0,415	0,325	1,000	6,73%
ENT 3	0,225	0,104	0,133	0,481	0,057	1,000	5,85%
ENT 4	0,187	0,106	0,415	0,229	0,063	1,000	8,27%
ENT 5	0,274	0,153	0,427	0,102	0,044	1,000	8,61%
ENT 6	0,247	0,119	0,486	0,095	0,052	1,000	8,89%
ENT 7	0,570	0,075	0,057	0,185	0,113	1,000	5,09%
ENT 8	0,122	0,106	0,410	0,304	0,058	1,000	8,26%
ENT 9	0,215	0,109	0,398	0,218	0,060	1,000	7,13%
ENT 10	0,269	0,097	0,116	0,467	0,051	1,000	6,94%
ENT 11	0,416	0,050	0,111	0,308	0,115	1,000	9,82%
ENT 12	0,570	0,074	0,055	0,195	0,106	1,000	7,60%
<i>Moyenne</i>	0,308	0,091	0,229	0,270	0,102	1,000	

	Sol	Tra	NNP	Cli	TT		CR
Enseignant 1	0,413	0,206	0,067	0,056	0,258	1,000	8,70%
Enseignant 2	0,114	0,493	0,175	0,056	0,162	1,000	9,74%
Enseignant 3	0,249	0,439	0,078	0,106	0,128	1,000	8,50%
Enseignant 4	0,503	0,194	0,159	0,083	0,061	1,000	8,40%
Enseignant 5	0,135	0,103	0,306	0,036	0,420	1,000	9,09%
Enseignant 6	0,486	0,093	0,235	0,134	0,052	1,000	9,40%
Enseignant 7	0,562	0,078	0,204	0,107	0,049	1,000	8,94%
Enseignant 8	0,180	0,429	0,067	0,114	0,210	1,000	6,71%
Enseignant 9	0,151	0,108	0,224	0,038	0,479	1,000	9,85%
Enseignant 10	0,230	0,432	0,069	0,111	0,158	1,000	9,13%
Enseignant 11	0,512	0,079	0,257	0,112	0,040	1,000	9,47%
Enseignant 12	0,377	0,271	0,150	0,106	0,096	1,000	9,75%
<i>Moyenne</i>	0,326	0,244	0,166	0,088	0,176	1,000	

	Sol	Tra	NNP	Cli	TT		CR
DRE 1	0,347	0,245	0,087	0,129	0,192	1,000	9,58%
DRE 2	0,122	0,079	0,240	0,048	0,511	1,000	8,80%
DRE 3	0,229	0,181	0,466	0,074	0,050	1,000	9,33%
DRE 4	0,099	0,052	0,291	0,154	0,403	1,000	9,42%
DRE 5	0,210	0,326	0,306	0,057	0,101	1,000	8,00%
DRE 6	0,153	0,405	0,281	0,059	0,102	1,000	7,44%
DRE 7	0,305	0,256	0,232	0,161	0,046	1,000	4,95%
DRE 8	0,306	0,335	0,180	0,116	0,062	1,000	6,80%
DRE 9	0,211	0,160	0,115	0,097	0,417	1,000	8,61%
DRE 10	0,351	0,228	0,181	0,118	0,122	1,000	9,91%
DRE 11	0,129	0,086	0,243	0,040	0,502	1,000	9,94%
DRE 12	0,355	0,225	0,087	0,130	0,202	1,000	7,06%
<i>Moyenne</i>	0,235	0,215	0,226	0,099	0,226	1,000	

	Sol	Tra	NNP	Cli	TT		CR
ADE 1	0,084	0,329	0,123	0,063	0,401	1,000	9,83%
ADE 2	0,135	0,098	0,238	0,044	0,485	1,000	8,06%
ADE 3	0,215	0,184	0,166	0,067	0,368	1,000	9,36%
ADE 4	0,134	0,144	0,187	0,291	0,243	1,000	8,53%
ADE 5	0,196	0,147	0,047	0,086	0,523	1,000	9,86%
ADE 6	0,224	0,111	0,048	0,074	0,544	1,000	5,91%
ADE 7	0,081	0,222	0,040	0,080	0,577	1,000	9,73%
ADE 8	0,234	0,104	0,399	0,185	0,078	1,000	7,08%
ADE 9	0,143	0,313	0,148	0,139	0,257	1,000	9,18%
ADE 10	0,367	0,216	0,198	0,059	0,161	1,000	9,99%
ADE 11	0,127	0,101	0,206	0,034	0,532	1,000	9,72%
ADE 12	0,084	0,314	0,130	0,065	0,407	1,000	9,22%
<i>Moyenne</i>	0,169	0,190	0,161	0,099	0,381	1,000	

	Sol	Tra	NNP	Cli	TT		CR
BET 1	0,217	0,216	0,085	0,070	0,412	1,000	9,34%
BET 2	0,190	0,106	0,046	0,046	0,612	1,000	8,84%
BET 3	0,156	0,143	0,106	0,068	0,528	1,000	8,74%
BET 4	0,550	0,153	0,143	0,037	0,117	1,000	4,02%
BET 5	0,126	0,062	0,066	0,120	0,625	1,000	9,90%
BET 6	0,324	0,169	0,217	0,217	0,072	1,000	9,50%
BET 7	0,287	0,252	0,120	0,065	0,276	1,000	9,36%
BET 8	0,212	0,206	0,104	0,221	0,257	1,000	9,77%
BET 9	0,204	0,110	0,047	0,049	0,590	1,000	4,39%
BET 10	0,223	0,126	0,065	0,049	0,537	1,000	7,38%
BET 11	0,200	0,088	0,044	0,046	0,622	1,000	9,65%
BET 12	0,246	0,090	0,163	0,040	0,461	1,000	9,74%
<i>Moyenne</i>	0,245	0,143	0,101	0,086	0,426	1,000	

	Pre	Vit	Def	Qea	Qen		CR
DRE 1	0,461	0,064	0,235	0,078	0,162	1,000	9,45%
DRE 2	0,254	0,082	0,290	0,030	0,345	1,000	6,87%
DRE 3	0,219	0,318	0,040	0,235	0,188	1,000	9,04%
DRE 4	0,197	0,087	0,358	0,066	0,292	1,000	9,00%
DRE 5	0,494	0,181	0,208	0,062	0,055	1,000	9,83%
DRE 6	0,490	0,221	0,081	0,139	0,069	1,000	5,84%
DRE 7	0,381	0,349	0,141	0,079	0,050	1,000	9,93%
DRE 8	0,290	0,032	0,449	0,091	0,138	1,000	9,26%
DRE 9	0,434	0,058	0,260	0,099	0,148	1,000	9,49%
DRE 10	0,412	0,050	0,183	0,200	0,155	1,000	9,58%
DRE 11	0,398	0,035	0,201	0,210	0,156	1,000	8,81%
DRE 12	0,505	0,180	0,060	0,089	0,166	1,000	6,78%
<i>Moyenne</i>	0,378	0,138	0,209	0,115	0,160	1,000	

	Pre	Vit	Def	Qea	Qen		CR
ENT 1	0,459	0,048	0,217	0,117	0,160	1,000	8,32%
ENT 2	0,219	0,078	0,245	0,038	0,421	1,000	9,41%
ENT 3	0,443	0,222	0,055	0,188	0,091	1,000	8,91%
ENT 4	0,454	0,057	0,211	0,122	0,156	1,000	8,78%
ENT 5	0,458	0,137	0,053	0,263	0,088	1,000	9,18%
ENT 6	0,229	0,104	0,048	0,239	0,380	1,000	8,88%
ENT 7	0,440	0,055	0,109	0,142	0,253	1,000	9,92%
ENT 8	0,349	0,071	0,278	0,099	0,203	1,000	9,46%
ENT 9	0,337	0,292	0,199	0,102	0,070	1,000	4,52%
ENT 10	0,329	0,064	0,311	0,198	0,098	1,000	7,57%
ENT 11	0,199	0,067	0,411	0,218	0,105	1,000	8,73%
ENT 12	0,169	0,059	0,479	0,194	0,099	1,000	9,84%
<i>Moyenne</i>	0,340	0,105	0,218	0,160	0,177	1,000	