

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj
Faculté des Mathématiques et de l'Informatique



MÉMOIRE DE MASTER

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Master en Recherche Opérationnelle

Domaine : Département de Mathématique

Filière : MATHÉMATIQUES APPLIQUÉE

Option : Méthodes Et Outils pour la recherche Opérationnelle

THÈME

*Etude du problème d'optimisation de la distribution d'eau
Cas de la ville de Bordj Bou Arréridj*

Présenté par :
Houda TAIAR
Anfel BEN ABBES

Soutenu publiquement le : 14 / 06 / 2025

Devant le jury composé de :

Président : Mr MAACHE Salah
Examineur : Mr SAHA Adel
Encadrant : Mr. FILLALI Ferhat, Université de Bordj Bou Arreridj, Encadrant

Année Universitaire 2024 / 2025

Remerciements

Nous tenons avant tout à exprimer notre profonde gratitude envers Dieu tout- puissant, qui nous a accordé la force, la persévérance et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nos remerciements les plus sincères vont à notre encadreur M. Fillali pour ses précieux conseils, son orientation avisée, et le temps généreux qu'il nous a consacré tout au long de ce projet. Son soutien constant a été d'une importance capitale pour la réalisation de ce travail.

Nous adressons également toute notre reconnaissance à tous les membres de la direction de distribution d'eau de la ville de Bordj Bou Arréridj (ADE), pour nous avoir accueillis et facilité l'accès aux ressources et données essentielles à notre étude. Leur soutien et leurs encouragements ont grandement contribué à la concrétisation de ce projet.

Nous exprimons notre vive gratitude aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce modeste travail et pour leurs critiques constructives qui nous permettront de l'enrichir.

Enfin, nous remercions chaleureusement nos parents, notre famille, nos amis et toutes les personnes de près ou de loin qui ont contribué à la réalisation de ce projet par leur soutien moral, leurs conseils ou leur collaboration.

Dédicace

À ma mère bien-aimée,

Pour ton amour inconditionnel, ta patience infinie et ta force silencieuse. Tu as été mon refuge dans les moments de doute et ma lumière dans les périodes d'obscurité. Chaque étape de ce parcours porte l'empreinte de ton dévouement et de ton soutien indéfectible.

À mon père,

Pour ta sagesse, ta rigueur et ta foi inébranlable en mes capacités. Tu m'as appris la valeur du travail acharné et de la persévérance. Ton exemple m'a guidé tout au long de cette aventure académique.

À mes amis fidèles,

Pour votre présence constante, vos encouragements sincères et les moments de joie partagés. Votre amitié a été une source précieuse de motivation et de réconfort, rendant ce voyage plus enrichissant et mémorable.

Ce travail est le fruit de votre amour, de votre soutien et de votre confiance. Qu'il soit le reflet de ma profonde reconnaissance envers vous tous.

Abstract

Optimizing water distribution is a crucial challenge in urban planning and infrastructure management. This work is part this strategic axis, which deals with the problem of optimizing water distribution in the city of Bordj Bou Arreridj, by reducing the energy consumption of pumps while ensuring an efficient distribution plan. This problem was modeled as a linear program composed of two objective functions and several constraints that guarantee pumping optimization while satisfying the needs of all areas of the city of Bordj. For the resolution, we used the Python programming language and the package "Pulp". The results obtained show the optimization made on the current energy bill.

Keywords : Optimization, linear programming, water distribution network, Python, Pulp.

Résumé

L'optimisation de la distribution de l'eau est devenue un enjeu crucial pour la gestion et la planification des infrastructures urbaines. Ce mémoire s'inscrit dans ce cadre stratégique, où nous traitons le problème d'optimisation de la distribution de l'eau dans la ville de Bordj Bou Arreridj, en réduisant la consommation énergétique des pompes tout en assurant un plan de distribution et d'alimentation efficace. Ce problème est modélisé sous forme d'un programme linéaire composé de deux fonctions objectives et plusieurs contraintes qui garantissent une optimisation du pompage tout en satisfaisant les besoins des différentes zones de la ville de Bordj. Pour la résolution, Nous avons utilisé le langage Python et la bibliothèque de programmation linéaire « Pulp ». Les résultats obtenus montrent clairement l'optimisation faite sur la facture d'énergie actuelle.

Mots clés : Optimisation, Programmation linéaire, réseau de distribution de l'eau, Python, Pulp.

ملخص

يهدف هذا المشروع النهائي في مجال بحوث العمليات إلى تحسين توزيع مياه الشرب في مدينة برج بوعريريج يعد تحسين توزيع المياه تحدياً بالغ الأهمية في التخطيط الحضري وإدارة البنية التحتية. يندرج هذا العمل ضمن هذا المحور الاستراتيجي، الذي يتناول مشكلة تحسين توزيع المياه في مدينة برج بوعريريج، من خلال تقليل استهلاك الطاقة للمضخات مع ضمان مخطط توزيع فعال. النموذج المستعمل لهذه الاشكالية هو البرمجة الخطية، حيث يتألف النموذج من دالتين موضوعيتين وعدة قيود تضمن تحسين الضخ مع تلبية احتياجات جميع مناطق المدينة. وللتوصل إلى الحل، استخدمنا لغة البرمجة بايثون وحزمة البرمجة الخطية PULP. وتُظهر النتائج التي تم الحصول عليها التحسين المُطبَّق على فاتورة الطاقة الحالية.

الكلمات المفتاحية: التحسين، البرمجة الخطية، شبكات توزيع المياه، بايثون PULP.

Table des matières

List of Figures	x
List of Tables	xi
Introduction Générale	1
1 Généralités sur les réseaux de l'eau	3
1.1 Les réservoirs	3
1.1.1 Les principes fonctions d'un réservoir	4
1.1.2 Classification des réservoirs	4
1.1.3 Emplacement des réservoirs	5
1.2 L'adduction	6
1.2.1 Les types d'adductions	6
1.2.2 Quelques notions simples sur l'adduction	6
1.2.3 Les différents types de vannes et dispositifs utilisés dans l'adduction	8
1.3 Les pompes	9
1.3.1 Définition	9
1.3.2 Couplage des pompes	9
1.3.3 Classification des pompes	10
1.3.4 Choix du type de pompe	11
1.3.5 Choix du nombre de pompes	12
1.3.6 Caractéristiques hydrauliques des pompes centrifuges	12
1.4 Caractéristiques du réseau	13
1.4.1 Réseau maillé	14
1.4.2 Réseau ramifié	14

2	les problèmes d'optimisation dans le réseaux de distribution d'eau	15
2.1	Typologie des problèmes d'optimisation	15
2.1.1	Optimisation des coûts	15
2.1.2	Gestion de la pression	16
2.1.3	Optimisation de la qualité de l'eau	16
2.1.4	Planification et expansion du réseau	17
2.1.5	Gestion de la demande	17
2.1.6	Résilience et fiabilité	18
2.1.7	Optimisation des opérations	18
2.1.8	Utilisation de technologies avancées	19
2.1.9	Aspects environnementaux	19
2.1.10	Conformité réglementaire	20
	Conclusion	20
3	Formulation et modélisation	21
3.1	Partie 1 : présentation du reseau étudié	21
3.1.1	Présentation générale du réseau de distribution d'eau de la ville de bordj bou Arreridj	21
3.1.2	Sectorisations et service intermittent	27
3.1.3	Les stations de pompage	33
3.1.4	Les pompes	34
3.1.5	La consommation électrique	37
3.2	Partie 02 : Formulation du problème	38
3.2.1	les fonctions objectif	39
3.2.2	Les contraintes	40
3.2.3	Résumé du modèle mathématique	43
3.2.4	Méthodes numériques de résolution	43
3.3	conclusion	44
4	Implémentation et démonstration	46
4.1	Language python	46
4.2	Justification du choix	47
4.3	Bibliothèque Utilisées (PuLP)	47

4.4	Implémentation des formules mathématiques dans le code	48
4.4.1	Les données de base :	48
4.4.2	Les paramètres physique :	49
4.4.3	Déclaration des Variables	50
4.4.4	Les fonctions objectif :	52
4.4.5	Implémentation des contraintes :	52
4.5	Les résultats et discussion	55
4.6	Proposition faisable (les modifications apportées aux pompes) :	57
4.7	Résultats d'exécution (avec modifications)	57

Table des figures

1.1	exemple reservoir [13]	4
1.2	vanne a opercule [1]	8
1.3	Vannes papillon [1]	8
1.4	Ventouse [1]	9
1.5	exemple des pompes dans la station [13]	10
3.1	Adduction de Bordj Bou Arreridj [13].	22
3.2	Réservoirs de stockage de BBA [13]	23
3.3	Schéma altimétrique du système d'AEP de BBA [13]	24
4.1	Comparaison des couts des pompes avant et apres l'optimisation.	59

Liste des tableaux

3.1	Les réservoirs de stockage de BBA.	25
3.3	Caractéristiques des pompes - Station Hasnaoua. [13]	35
3.4	Caractéristiques des pompes - Station Aouin Zraiga. [13]	36
3.5	Pompe - Forage Chania 01. [13]	36
3.6	Pompe - Forage Chania 02. [13]	37
3.7	Pompe - Forage Hrir. [13]	37
3.8	Facturation électrique annuelle par ouvrage (Exemple). [13]	38
4.1	Résultats d'exécution	58
4.2	État d'activation des pompes par période	58

Introduction Générale

L'eau est une ressource essentielle à la vie, indispensable au développement socio-économique et à la préservation des écosystèmes. Pourtant, sa gestion durable reste un défi majeur, notamment dans les régions confrontées à des pénuries ou à des infrastructures vieillissantes. Dans un contexte où les besoins en eau ne cessent de croître, comment optimiser la distribution de cette ressource précieuse pour garantir à la fois son accessibilité équitable et une utilisation efficiente des énergies associées ?

Ce mémoire de master, intitulé "étude du problème de la distribution d'eau (cas de la ville de Bordj Bou Arreridj)", s'inscrit dans le domaine de la recherche opérationnelle et vise à répondre à cette problématique cruciale. À travers une approche méthodique, nous analysons les défis techniques et économiques du réseau local de distribution d'eau, en proposant des solutions basées sur la modélisation mathématique et l'optimisation linéaire.

Notre travail est organisé en quatre chapitres :

Généralités sur les réseaux d'eau : Ce chapitre pose les bases techniques des systèmes de distribution, en détaillant les composantes clés (réservoirs, pompes, adductions) et leurs rôles.

Problèmes d'optimisation dans les réseaux : Nous y explorons les enjeux majeurs tels que la minimisation des coûts énergétiques, la gestion des fuites et l'équité de distribution, en nous appuyant sur des études antérieures.

Formulation et modélisation : Nous présentons le réseau de Bordj Bou Arreridj et développons un modèle mathématique pour optimiser la distribution tout en respectant les contraintes techniques et économiques.

Implémentation et démonstration : Enfin, nous traduisons le modèle en un programme Python utilisant la bibliothèque PuLP, testons sa faisabilité et discutons des résultats obtenus.

Ce travail démontre l'utilité de la recherche opérationnelle pour optimiser les infrastructures critiques, en alignant efficacité économique et équité sociale. Les méthodes développées pourraient être étendues à d'autres villes confrontées à des défis similaires, contribuant ainsi à une gestion plus durable des ressources en eau.

Chapitre 1

Généralités sur les réseaux de l'eau

L'eau est une ressource essentielle à la vie et aux activités humaines. Son acheminement depuis les sources naturelles jusqu'aux consommateurs nécessite une infrastructure complexe et bien organisée, communément appelée réseau d'eau. Ce réseau comprend plusieurs étapes clés dont le captage de l'eau à partir de sources superficielles ou souterraines, le forage de puits pour accéder aux nappes phréatiques et le stockage dans des réservoirs pour assurer une distribution continue. Ceci est crucial dans la préservation de la qualité et de la quantité de l'eau, tout en répondant aux besoins croissants des populations et des industries.

Le but de ce chapitre est de définir les fondamentaux de ces processus en mettant en lumière les principes techniques liés à la gestion des réseaux d'eau .

1.1 Les réservoirs

Les réservoirs sont des ouvrages hydrauliques conçus pour le stockage de l'eau potable. Ils constituent un élément intermédiaire essentiel entre les réseaux d'adduction et de distribution. Ces structures jouent un rôle crucial dans un système d'alimentation en eau potable, remplissant diverses fonctions techniques et économiques pour assurer une gestion optimale de la ressource en eau [1].



FIGURE 1.1 – exemple reservoir [13]

1.1.1 Les principes fonctions d'un réservoir

1.1.1.1 Côté technique

Les réservoirs assurent les fonctions suivantes :

- la régulation du débit .
- la sécurité d'approvisionnement .
- la régulation de la pression .
- la simplification de l'exploitation .
- le rôle d'un réacteur participant au traitement de l'eau.

1.1.1.2 Côté économique

Le réservoir permet la réduction :

- des investissements sur les ouvrages de production .
- des investissements sur le réseau de distribution .
- des dépenses d'énergie [1].

1.1.2 Classification des réservoirs

Les réservoirs peuvent être classés comme suit.

1.1.2.1 Classification selon le matériau de construction

On distingue 3 types de réservoirs :

- métalliques .
- en maçonnerie .
- en béton (armé, ordinaire ou précontraint).

1.1.2.2 Classification selon la position

On peut classer les réservoirs selon leur position par rapport à la surface du sol. On distingue trois types :

- enterrés .
- semi-enterrés .
- surélevés.

1.1.2.3 Classification selon la forme géométrique

- de forme circulaire .
- de forme rectangulaire .
- de forme quelconque (sphériques, coniques, ...).

1.1.2.4 Classification selon l'utilisation

- réservoirs principaux d'accumulation et de stockage .
- réservoirs d'équilibre (réservoirs tampons) .
- réservoirs de traitement[1].

1.1.3 Emplacement des réservoirs

Le choix de l'emplacement d'un réservoir est une décision complexe qui doit prendre en compte plusieurs facteurs techniques et économiques :

- L'emplacement doit garantir une pression suffisante pour les usagers, notamment lors des périodes de pointe.
- Pour des raisons économiques, il est préférable que le réservoir puisse être rempli par gravité, c'est-à-dire qu'il soit situé à un point plus bas que la prise d'eau.
- Il est également avantageux que l'emplacement permette une distribution gravitaire, ce qui implique que la cote du radier doit être supérieure à la cote piézométrique maximale du réseau.

- En cas de nécessité de plusieurs réservoirs, il est recommandé de les installer soit en extrémité du réseau, soit à proximité des zones de forte consommation [1].

1.2 L'adduction

L'adduction est le procédé qui permet de transporter des débits d'eau depuis les zones de captage jusqu'aux réservoirs de stockage ou de distribution [1].

1.2.1 Les types d'adductions

D'après leur fonctionnement, les adductions peuvent être classées en groupes [1] :

- adduction par refoulement .
- adduction gravitaire .
- adduction mixte.

1.2.1.1 Adduction par refoulement

Dans une adduction par refoulement, le point à alimenter se trouve à une altitude supérieure à celle du captage, donc l'écoulement est en charge (effectué par pompage).

1.2.1.2 Adduction gravitaire

Dans une adduction gravitaire, le point de captage se situe à une altitude supérieure à celle du réservoir de desserte de l'agglomération et l'écoulement peut être à surface libre ou en charge (c'est-à-dire sous pression).

1.2.1.3 Adduction mixte

C'est une adduction où la conduite par refoulement se transforme en conduite gravitaire ou l'inverse. Le relais entre les deux types de conduite est assuré par un réservoir appelé réservoir tampon.

1.2.2 Quelques notions simples sur l'adduction

Pour faire le dimensionnement des conduites d'adduction, nous prenons en considération les aspects suivants [1] :

1.2.2.1 Le choix du tracé

Le tracé des conduites d'adduction doit être défini en tenant compte de critères techniques et économiques. Plusieurs conditions doivent être respectées pour garantir un fonctionnement optimal et durable du réseau. Tout d'abord, il est essentiel de privilégier un profil en long aussi régulier que possible, afin d'éviter les contre-pentes qui pourraient perturber l'écoulement de l'eau. Par ailleurs, pour des raisons économiques, le tracé doit être conçu de manière à minimiser la longueur des conduites.

Il est également recommandé d'éviter autant que possible les zones présentant des contraintes majeures telles que les traversées d'oueds, les zones marécageuses, les routes et les voies ferrées, qui pourraient compliquer la pose des conduites et augmenter les coûts [1].

1.2.2.2 Le choix du type des conduites

Pour faire le choix du type de matériau à utiliser dans la construction des conduites, il faut prendre en considération les critères suivants :

- le diamètre .
- les pressions exigées .
- les conditions d'installation .
- les prix unitaires de pose de l'adduction .
- la disponibilité sur le marché .
- bonnes caractéristiques hydrauliques .
- répond parfaitement aux normes de potabilité .
- résiste à la corrosion interne, externe et microbiologique .
- se raccorde facilement à d'autres réseaux .
- insensible aux mouvements de terrain.

Parmi les matériaux utilisés dans l'alimentation en eau potable, on peut citer : l'acier, la fonte, le PVC et le PE haute densité (PEHD) ou basse densité (PEBD) [1].

1.2.3 Les différents types de vannes et dispositifs utilisés dans l'adduction

1.2.3.1 Robinets-vannes à opercule

Ce sont des vannes de sectionnement utilisées pour une ouverture ou fermeture totale. Elles sont actionnées par une vis qui déplace un obturateur. Elles sont généralement installées sur les réseaux secondaires et tertiaires [1].



FIGURE 1.2 – vanne a opercule [1]

1.2.3.2 Vannes papillon

Ces vannes servent à réguler le débit et à sectionner le flux. Elles sont équipées d'un disque (papillon) qui pivote pour ouvrir ou fermer la canalisation [1].



FIGURE 1.3 – Vannes papillon [1]

1.2.3.3 Vidanges

Placées aux points bas du réseau, elles permettent de purger les conduites lors de l'entretien. Elles comprennent une vanne, une conduite de décharge et un regard de vidange pour évacuer l'eau vers le système d'assainissement pluvial [1].

1.2.3.4 Ventouses

Installées aux points hauts des canalisations, elles servent à évacuer l'air présent dans les conduites pour rétablir le diamètre utile de la conduite et éviter les coups de bélier causés par les poches d'air [1].



FIGURE 1.4 – Ventouse [1]

1.3 Les pompes

1.3.1 Définition

La pompe est une machine hydraulique, son fonctionnement consiste à transformer l'énergie mécanique de son moteur d'entraînement en énergie hydraulique ; c'est-à-dire qu'elle transmet au courant liquide qui la traverse une certaine puissance. L'énergie reçue par le liquide lui permet de s'élever de la zone à basse pression vers une autre à plus haute pression. Les pompes les plus utilisées sont les pompes centrifuges, vu qu'elles permettent le refoulement des débits importants à des hauteurs considérables, et qu'elles constituent des groupes légers peu coûteux et présentent un bon rendement [1].

1.3.2 Couplage des pompes

On distingue deux types de couplage des pompes :



FIGURE 1.5 – exemple des pompes dans la station [13]

- **Le couplage en série** : ce type de couplage est utilisé en vue de l'augmentation de la hauteur d'élévation des pompes.
- **Le couplage en parallèle** : ce type de couplage est utilisé en vue de l'augmentation du débit refoulé par les pompes[1].

1.3.3 Classification des pompes

Les pompes sont divisées en deux catégories principales [1] :

- Pompes volumétriques .
- Les turbopompes.

1.3.3.1 Pompes volumétriques

Le déplacement du fluide à l'intérieur de la pompe se fait par la variation du volume. D'où on distingue deux types :

- Les pompes alternatives (à piston) .
- Les pompes rotatives (vis d'Archimède).

Elles sont utilisées dans les machines-outils, les engins de travaux publics et dans certains circuits hydrauliques d'aviation ou des bateaux. Généralement, elles conviennent pour des faibles débits à des pressions élevées.

1.3.3.2 Turbo-pompes

Les turbo-pompes sont les plus utilisées. Selon le type de roue et son mode d'action, on distingue :

- Pompe axiale à hélice .
- Pompe hélico-centrifuge .
- Pompe centrifuge.

On peut classer les pompes centrifuges comme suit :

- **Suivant la forme de la roue :**
 - Centrifuges radiales ;
 - Pompes centrifuges semi-axiales.
- **Suivant la forme du corps de la pompe :**
 - Pompe à volute ou colimaçon ;
 - À diffuseur circulaire.
- **Suivant le nombre de roues :**
 - Monocellulaire .
 - Multicellulaire.
- **Suivant la position de son axe :**
 - Pompe à axe horizontal ;
 - Pompe à axe vertical.

1.3.4 Choix du type de pompe

Les critères de choix du type de pompe sont :

- Assurer le débit de refoulement .
- La hauteur d'élévation à atteindre .
- Meilleur rendement .
- Vérifier la condition de non cavitation .
- Encombrement et poids les plus faibles .
- Vitesse de rotation la plus élevée .
- Puissance absorbée minimale.

1.3.5 Choix du nombre de pompes

Les critères de choix du nombre de pompes sont :

- Nombre de pompes « n » minimal .
- Meilleur rendement .
- Charge nette d'aspiration requise (NPSHr) minimale .
- Nombre d'étages minimal .
- Puissance absorbée minimale .
- Vitesse de rotation élevée.

1.3.6 Caractéristiques hydrauliques des pompes centrifuges

1.3.6.1 Hauteur manométrique

Elle est obtenue en sommant la hauteur géométrique et les pertes de charge à l'aspiration ainsi qu'au refoulement. Cette hauteur est donnée comme suit [1] :

$$\text{HMT} = H_G + J_{\text{ASP}} + J_{\text{REF}} \quad (1.1)$$

Avec :

- HMT : La hauteur manométrique totale (en m) .
- H_G : La hauteur géométrique (en m) .
- J_{ASP} : Pertes de charge à l'aspiration (en m) .
- J_{REF} : Pertes de charge au refoulement (en m).

1.3.6.2 La vitesse de rotation

La vitesse de rotation (N) représente le nombre de tours effectués par la pompe par unité de temps.

1.3.6.3 La puissance

On distingue deux types de puissance :

La puissance absorbée par la pompe Elle est exprimée par la puissance mécanique absorbée au niveau de l'arbre de la pompe (en kW). Cette puissance est donnée par la loi suivante :

$$P_A = \frac{\rho \times g \times \text{HMT} \times Q}{\eta} \quad (1.2)$$

Avec :

- P_A : Puissance absorbée par la pompe (kW) .
- ρ : Masse volumique du fluide (kg m^{-3}) .
- g : Accélération due à la gravité (m s^{-2}) .
- HMT : Hauteur manométrique totale (m) .
- Q : Débit refoulé par la pompe ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) .
- η : Rendement de la pompe (sans unité).

La puissance hydraulique ou la puissance utile Elle traduit la puissance transmise au fluide par la pompe, notée P_U ou P_h :

$$P_U = P_h = \rho \times g \times \text{HMT} \times Q \quad (1.3)$$

1.3.6.4 Le rendement

C'est le rapport entre la puissance utile P_U et la puissance absorbée par la pompe P_A , noté η .

$$\eta = \frac{P_U}{P_A} \quad (1.4)$$

(Le rendement η est sans dimension).

1.4 Caractéristiques du réseau

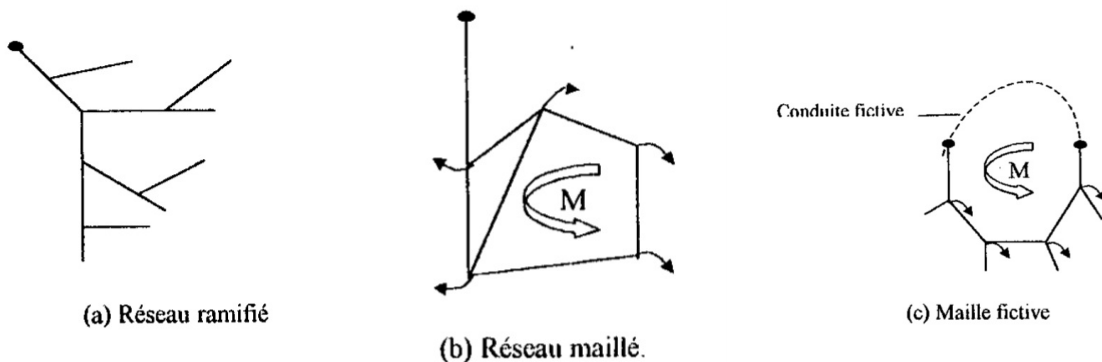
À partir d'un ou plusieurs réservoirs, l'eau est transportée aux abonnés à travers des canalisations reliées entre elles sous forme d'un ensemble maillé ou ramifié formant un réseau. Deux types de réseaux sont à distinguer [2] :

1.4.1 Réseau maillé

Tout réseau constitué de nœuds et de tronçons, formant des contours fermés, est dit maillé. Si la relation suivante est vérifiée ($m = t - n + 1$, où m est le nombre de mailles indépendantes, t le nombre de tronçons et n le nombre de nœuds). Une maille constituée par un circuit est dite fermée. Le nombre de points d'eau est égal ou supérieur à 2. Chaque chaîne reliant les points d'eau deux à deux sera considérée comme une maille dite ouverte ou fictive.

1.4.2 Réseau ramifié

Est un ensemble de conduites connectées entre elles et dont la structure est sous forme d'arbre. Chaque nœud de consommation est relié à son point d'alimentation par un chemin unique. Le sens d'écoulement est orienté de la source vers le point de consommation [2].



Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases conceptuelles et techniques essentielles pour comprendre le fonctionnement et les enjeux des réseaux de distribution d'eau, depuis les sources jusqu'aux abonnés. Ces réseaux sont connus pour leurs problèmes nombreux et variés, et c'est ce dont nous parlerons dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

les problèmes d'optimisation dans le réseaux de distribution d'eau

Les problèmes d'optimisation dans les réseaux de distribution d'eau sont complexes et multifactoriels. Ils visent généralement à améliorer l'efficacité, la fiabilité et la durabilité des systèmes de distribution d'eau tout en minimisant les coûts. Dans ce chapitre on va citer quelques principaux problèmes d'optimisation rencontrés et leurs conséquences.

2.1 Typologie des problèmes d'optimisation

2.1.1 Optimisation des coûts

- **Minimisation des coûts de Construction et d'exploitation** : Il s'agit de réduire les coûts associés à la construction des infrastructures (canalisations, réservoirs, pompes) et à leur entretien.
- **Optimisation des coûts énergétiques** : Les pompes consomment une quantité significative d'énergie. L'optimisation vise à réduire cette consommation tout en maintenant une pression et un débit adéquats.

Nous citons un travail [3] :

L'objectif de ce travail Développer un modèle numérique pour l'optimisation des réseaux de distribution d'eau, visant à déterminer le diamètre optimal des tuyaux afin de minimiser le coût

du réseau. Le modèle tient compte de contraintes hydrauliques (pressions minimales requises) et commerciales (diamètres standards disponibles). Il est formulé mathématiquement et résolu à l'aide de méthodes d'optimisation évolutives, notamment les algorithmes génétiques. L'efficacité de la méthode est démontrée par des résultats numériques appliqués à deux réseaux : un académique et un réel .

2.1.2 Gestion de la pression

- **Contrôle de la pression :** Une pression trop élevée peut causer des fuites et des ruptures de canalisations, tandis qu'une pression trop faible peut entraîner un service inadéquat. L'optimisation consiste à maintenir une pression optimale dans tout le réseau.
- **Réduction des pertes d'eau :** Les fuites dues à une pression excessive sont une préoccupation majeure. L'optimisation vise à minimiser ces pertes.

Nous citons un travail [4] :

Le problème traité : les fuites d'eau dans les réseaux de distribution, les services de recherche cherchent un équilibre entre confort des abonnés et efficacité des installations. L'une des solutions les plus efficaces consiste à ajuster dynamiquement la pression dans le réseau, ce qui permet de réduire les pertes et de prolonger la durée de vie des équipements. Ce travail propose une méthode d'optimisation de la courbe de modulation de la pression, en s'appuyant sur des algorithmes hydrauliques et des algorithmes génétiques. La solution est mise en œuvre via un couplage entre le logiciel EPANET et un modèle hydraulique développé sous Matlab .

2.1.3 Optimisation de la qualité de l'eau

- **Maintenir la qualité de l'eau :** L'eau doit être de bonne qualité tout au long de son parcours dans le réseau. Cela implique de minimiser les risques de contamination et de garantir une désinfection adéquate.
- **Gestion des temps de séjour :** L'eau ne doit pas stagner trop longtemps dans les canalisations pour éviter la dégradation de sa qualité.

Nous citons un travail [5] :

L'objectif est de Détecter la présence de contamination dans les réseaux d'eau potable et

classer les types de contaminations afin d'aider les opérateurs à prendre des décisions rapides et appropriées, utilisant les méthodes d'apprentissage statistique pour analyser en temps réel les données des capteurs de chlore, en évitant les limites des modèles paramétriques traditionnels. Le travail se concentre sur la reconnaissance et la classification multi-classes des contaminations pour une application industrielle efficace .

2.1.4 Planification et expansion du réseau

- **Optimisation de la conception du réseau** : Cela inclut la détermination des diamètres de canalisations, l'emplacement des réservoirs et des pompes, et la configuration générale du réseau pour répondre à la demande actuelle et future.
- **Gestion de la croissance urbaine** : Les réseaux doivent être conçus pour s'adapter à l'expansion urbaine et aux changements démographiques.

Nous citons un travail [6] :

L'objectif de ce travail est d'assurer l'approvisionnement en eau potable de six villages de Boumerdès à l'horizon 2048. L'étude a estimé les besoins en eau, dimensionné les réservoirs tampons et les tuyaux d'alimentation, puis simulé l'acheminement de l'eau du point bas au point haut. Des stations de pompage ont été sélectionnées, et des solutions ont été proposées pour protéger contre le coup de bélier. Le village d'Abdela a servi de cas d'étude pour le dimensionnement détaillé du réseau de distribution .

2.1.5 Gestion de la demande

- **Prévision de la demande** : Une estimation précise de la demande en eau est cruciale pour optimiser les opérations du réseau.
- **Réduction de la demande de pointe** : Des stratégies telles que le stockage de l'eau et la gestion de la demande peuvent aider à réduire les pics de consommation.

Nous citons un travail [7] :

L'objectif est de Planifier et dimensionner le réseau d'approvisionnement en eau potable du pôle urbain de Sidi Boudrahem à l'horizon 2052, pour une population estimée à 104376 habitants. L'étude repose sur une estimation détaillée des besoins en eau (321,99 l/s) et le di-

mensionnement du réseau, incluant des tuyaux en PEHD. Des contrôles hydrauliques ont été réalisés pour évaluer la nécessité de protection contre le coup de bélier, jugée non indispensable. La modélisation avec EPANET a permis d'analyser les pressions et les vitesses dans les conduites. La capacité de réservoir existante de 10000 m³ a été jugée suffisante .

2.1.6 Résilience et fiabilité

- **Gestion des risques** : Cela inclut la préparation aux pannes, aux catastrophes naturelles et aux actes de malveillance.
- **Redondance et fiabilité** : Le réseau doit être conçu pour rester opérationnel même en cas de défaillance d'un ou plusieurs composants.

Nous citons un travail [8] :

l'objectif est d'améliorer la gestion de l'eau en Algérie en réduisant les pertes dans les réseaux de distribution, en particulier dans la région de Biskra, afin de préserver une ressource rare. L'étude repose sur une analyse de la demande en eau par extrapolation des données d'abonnés, ainsi qu'une évaluation des pertes basée sur la comparaison entre le volume produit et les débits nocturnes. Elle inclut aussi une analyse de la fiabilité des systèmes à partir d'indicateurs techniques de performance, en vue de proposer des recommandations pour améliorer la gestion et la compréhension du fonctionnement des réseaux algériens .

2.1.7 Optimisation des opérations

- **Gestion des pompes et des vannes** : L'optimisation des horaires de fonctionnement des pompes et des vannes peut réduire les coûts énergétiques et améliorer l'efficacité.
- **Détection et réparation des fuites** : Des algorithmes d'optimisation peuvent aider à localiser et à réparer rapidement les fuites.

Nous citons un travail [9] :

l'objectif est de Réduire les pertes d'eau dues aux fuites dans les réseaux de distribution, afin de limiter les pertes économiques, préserver la ressource et protéger la santé publique. Les opérateurs réalisent des tests pour estimer les volumes perdus et localisent les zones à fortes

fuites. L'emplacement précis des fuites est ensuite détecté à l'aide de dispositifs d'auscultation (écoute directe) et de techniques de corrélation modernes .

2.1.8 Utilisation de technologies avancées

- **Modélisation et simulation** : Les modèles hydrauliques sont utilisés pour simuler le comportement du réseau et identifier les points à optimiser.
- **Intelligence artificielle et apprentissage automatique** : Ces technologies peuvent être utilisées pour prédire les défaillances, optimiser les opérations et améliorer la gestion des ressources.

Nous citons un travail [10] :

Le but de cette étude était d'utiliser le SIG pour gérer le réseau AEP dans la ville de Sidi Belabbes. Cette dernière modélisation transmettant la simulation dans le logiciel Epanet 2.0. Les résultats de cette modélisation permettent d'identifier les points noirs du réseau et de proposer des solutions.

2.1.9 Aspects environnementaux

- **Minimisation de l'impact environnemental** : Cela inclut la réduction de la consommation d'énergie, la minimisation de la perturbation écologique et la gestion des eaux usées.

Nous citons un travail [11] :

L'objectif est d'étudier l'effet de la modulation de la pression sur la réduction des pertes d'eau et des dégâts dans les réseaux de distribution d'eau potable, en particulier dans la zone de Kouba 97, afin d'améliorer la gestion des ressources et limiter les coûts. L'étude évalue les volumes et coûts d'eau avant et après modulation de la pression, en utilisant des calculs et des diagnostics techniques pour identifier les pertes, surveiller le réseau et appliquer des techniques adaptées de modulation de pression. Les résultats montrent l'impact positif de cette méthode sur la performance du réseau .

2.1.10 Conformité réglementaire

- **Respect des normes et réglementations** : Les réseaux de distribution d'eau doivent respecter diverses normes de qualité, de sécurité et de performance.

Nous citons un travail [12] :

Ce projet vise à améliorer la qualité et la stabilité des réseaux électriques en intégrant des énergies renouvelables (solaire, éolien) tout en respectant les normes techniques. Pour y parvenir, des programmes informatiques et des méthodes d'optimisation combinant ingénierie, mathématiques et intelligence artificielle sont développés. L'objectif est de garantir une alimentation fiable, même en cas de pannes ou de surcharges .

Conclusion

Ce chapitre a permis d'explorer en profondeur les problèmes d'optimisation liés aux réseaux de distribution d'eau, Les pertes d'eau, les déséquilibres de pression, la vétusté des infrastructures et les défis liés à la variabilité de la demande ont des répercussions majeures, tant sur le plan économique qu'environnemental et social.

Ces problèmes entraînent non seulement une augmentation des coûts d'exploitation, mais aussi une détérioration de la qualité de service et une pression accrue sur les ressources en eau, déjà limitées.

À travers l'examen de divers travaux de recherche, nous avons constaté que des solutions existent, notamment grâce à l'utilisation de modèles d'optimisation avancés, de systèmes de surveillance intelligents et de technologies innovantes.

Cependant, la mise en œuvre de ces solutions reste complexe, nécessite des investissements importants et une adaptation des infrastructures existantes. Il est donc crucial de poursuivre les efforts de recherche et de développement, tout en favorisant une approche intégrée et durable pour relever ces défis. En conclusion, l'optimisation des réseaux de distribution d'eau représente un enjeu clé pour assurer une gestion efficace et pérenne de cette ressource vitale, tout en répondant aux besoins croissants des populations et en préservant l'environnement.

Chapitre 3

Formulation et modélisation

3.1 Partie 1 : présentation du réseau étudié

3.1.1 Présentation générale du réseau de distribution d'eau de la ville de bordj bou Arreridj

La ville de Bordj Bou Arreridj (BBA) est alimentée en eau potable par 3 ressources principales : la retenue d'Ain Zada et sa station de traitement d'eau, le couloir Bordj Ghdir (chania1+chania2+cota+hrire) et le captage de Lachbourg.

La provenance des volumes nets mis en distribution dans la ville de BBA (hors volumes transférés, vendus ou cédés à des communes périphériques) était la suivante : [13]

- Station de traitement d'Ain Zada (unité de production) soit en moyenne : $833\,767\text{ m}^3/\text{mois}$;
- Couloir Bordj Ghdir (chania1+chania2+cota+hrire) soit en moyenne : $76\,285\text{ m}^3/\text{mois}$;
- Captage de Lachbourg soit en moyenne : $16\,680\text{ m}^3/\text{mois}$.
- Total : $926\,732\text{ m}^3/\text{mois}$ issues en totalité et transférés vers la ville de BBA.



FIGURE 3.1 – Adduction de Bordj Bou Arreridj [13].

La ville de BBA possède 10 réservoirs ayant une capacité totale de 47 000 m³ et un réseau de distribution dont le linéaire total est de 440 km.

Le système d'AEP inclut 3 stations de pompage, dont une seule contribue à l'alimentation d'un quartier de la ville, les deux autres assurant des transferts d'eau vers des communes périphériques (Hasnaoua et Medjana).

Le nombre d'abonnés de BBA est de 48 455 en janvier 2025.

La carte ci-après présente les tronçons terminaux des adductions, la localisation des réservoirs (l'un d'entre eux se trouve à l'extérieur du champ de la carte, à l'est de la ville : réservoir 2000 m³ de Draa Adjroud) et les conduites primaires de distribution (diamètre supérieur ou égal à 250 mm). Les 3 stations de pompage ne sont pas explicitement désignées. Elles se situent sur le site des réservoirs 2000 m³. [13]

La ville de BBA a une topographie relativement monotone caractérisée par une pente générale descendante du nord au sud. La cote TN au niveau du Bd de Ceinture Nord qui a constitué la limite d'urbanisation pendant de nombreuses années est d'environ 945 m NGA. La cote au niveau de l'autoroute qui sera pendant longtemps la limite d'extension nord de la ville est de

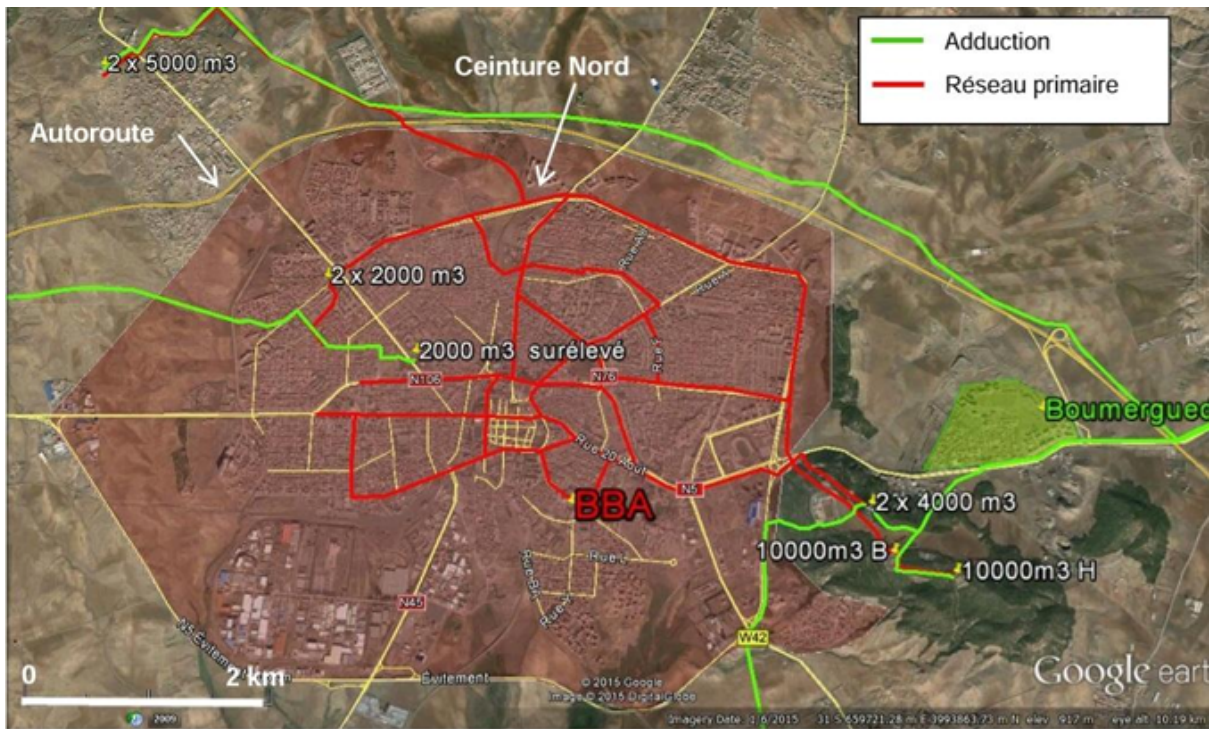


FIGURE 3.2 – Réservoirs de stockage de BBA [13]

l'ordre de 950 m NGA. La cote TN des quartiers urbanisés les plus au sud est de l'ordre de 875 m NGA. La dénivelée totale dans la ville est donc d'environ 75 m.

Cette situation topographique se retrouve sur le schéma altimétrique du système d'AEP qui est présenté dans la page suivante. [13]

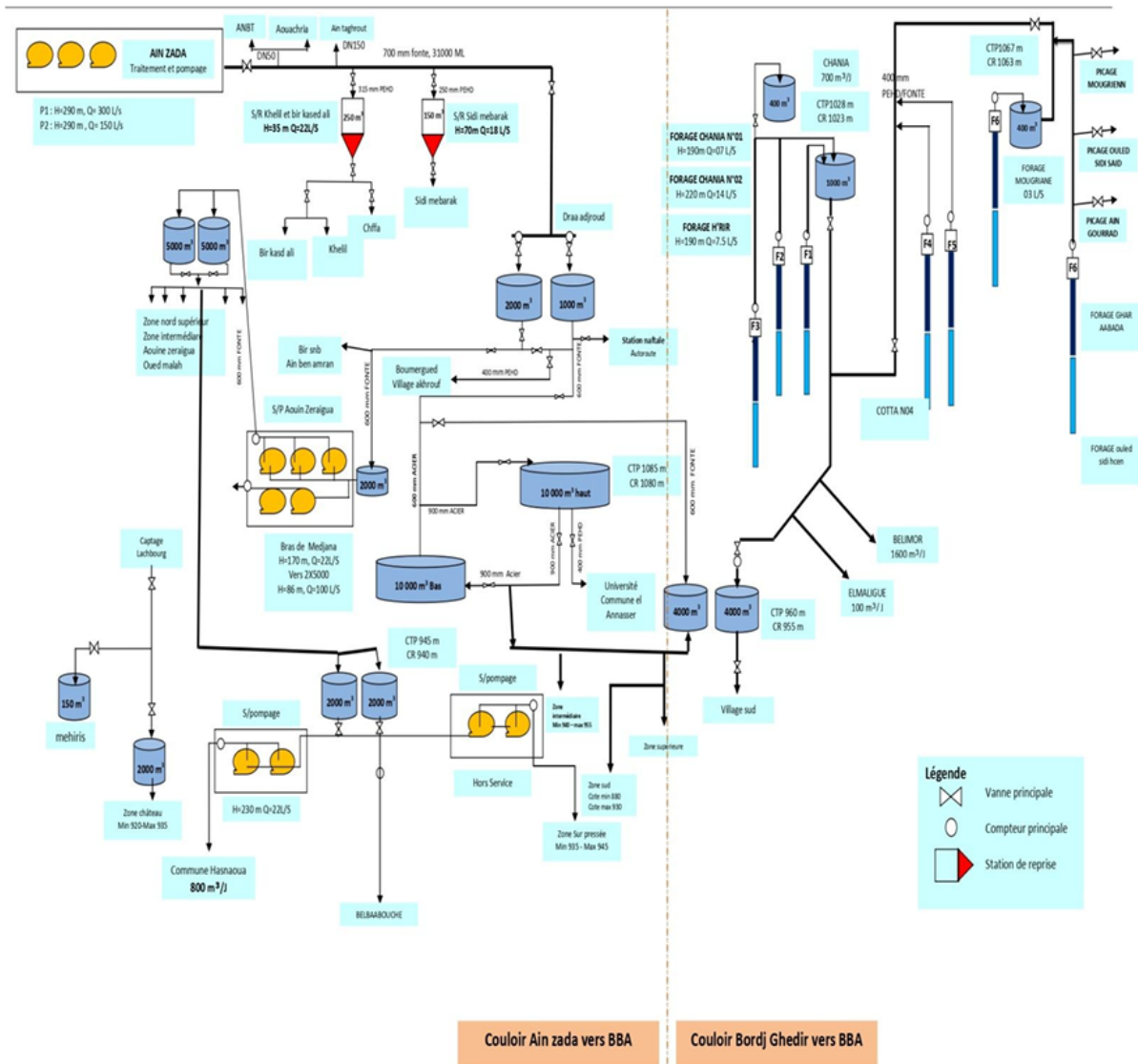


FIGURE 3.3 – Schéma altimétrique du système d’AEP de BBA [13]

Couloir Ain Zada vers BBA | *Couloir Bordj Ghedir vers BBA*

3.1.1.1 Les réservoirs

Les réservoirs de stockage et distribution de BBA et leurs caractéristiques principales sont listés dans le tableau ci-après.

Réservoir	Date de construction	Localisation	Alimentation	Commentaires
1000 m ³ & 2000 m ³	2013	Draa Adjroud	Barrage Ain Zada	Réservoir tampon
10000 m ³ haut	1990	Boumergued	Rés. 1000 m ³ et 2000 m ³	Même site
10000 m ³ bas	1987	Boumergued	Idem	Même site
4000 m ³ Ouest	1968	Boumergued	Couloir Bordj Ghdir	Même site
4000 m ³ Est	1983	Boumergued	Idem	Même site
5000 m ³ Ouest	2009	Aouin Zraigua	Rés. 1000 m ³ et 2000 m ³	Même site
5000 m ³ Est	2013	Aouin Zraigua	Idem	Même site
2000 m ³	1977	Route de Medjana	Rés. 5000 m ³	–
2000 m ³ surélevé	≈ 1950	DALLAS	Captage Lachbourg	Château d'eau

TABLE 3.1 – Les réservoirs de stockage de BBA.

Bien que les réservoirs soient capables d'alimenter toute la région, cette dernière souffre d'un manque de ressources en eau dû à des facteurs climatiques et naturels.

Actuellement, on constate que certains réservoirs ne sont pas complètement remplis, comme le réservoir (10000 m³). C'est ce qui nous pousse à recourir à la création de zones et à la répartition de l'eau par secteurs, et cela sera précisé par la suite.

3.1.1.2 L'adduction

Le fonctionnement du réseau de distribution est gravitaire à partir des 4 réservoirs principaux comme on peut voir sur la figure 3.2. Par contre, il y a une adduction par refoulement depuis le couloir de Bordj Ghdir vers le réservoir 4000 m³ ; il existe 4 pompes au niveau de chaque forage (chania1, chania2, hrir, cota).

3.1.1.3 Les types des conduites

L'historique du réseau de distribution est grossièrement le suivant [13] :

- Avant 1980, le réseau était constitué essentiellement de conduites en fonte et en amiante ciment ;
- Durant les décennies 1980 et 1990, des tuyaux en PVC ont été massivement utilisés pour remplacer les conduites en fonte et une partie des conduites en amiante ciment et pour étendre le réseau, la ville ayant une croissance assez élevée durant ces 2 décennies ;
- Depuis le début des années 2000, les tuyaux en PEHD sont quasiment les seuls utilisés dans le réseau de distribution (hors transfert vers les communes périphériques).

On peut constater que le réseau est relativement jeune, postérieur à 1980 pour l'essentiel.

Par contre, un élément majeur doit être mentionné concernant les conduites prédominantes en PVC, car cette caractéristique est la cause de nombreuses fuites : elles sont toutes constituées de tuyaux à emboîtement à joints collés.

En 2015, l'ADE a fait un diagnostic du système de distribution d'eau potable de la ville de Bordj Bou Arreridj. Ils ont précisé les fuites selon le type de conduite sur lequel elles se produisent.

Cette analyse est extrêmement précieuse pour l'établissement du programme de rénovation du réseau. Ce programme a été validé lors de la réunion tenue au Ministère des Ressources en Eau (MRE) le 7 Avril 2015.

En 2025, nous remarquons que la plupart des réseaux sont renouvelés et perdurent encore aujourd'hui ; la priorité est de rénover les conduits PVC. Ainsi, nous concluons que le problème des fuites au niveau du réseau de distribution a été diminué dans une large mesure.

3.1.1.4 Les vannes

Pour le réseau de distribution de Bordj Bou Arreridj, le Système d'Information Géographique (SIG) comporte 1899 vannes. Ce chiffre est approximatif car de nombreuses bouches à clé sont sous le bitume de la voirie. La décomposition est la suivante [13] :

- Vannes dans 257 regards apparents : 445 vannes ;
- Vannes sous bouches à clé apparentes : 151 vannes ;

- Vannes sous bouches à clé non accessibles : plus de 1000 vannes semble-t-il (1303 dans le SIG, sur la base de la connaissance d'agents ADE et ex-agent ADE ayant une longue carrière dédiée à la maintenance du réseau).

En ce qui concerne les regards :

- 257 étaient apparents durant le 2ème semestre 2014, lorsque l'inventaire a été réalisé ;
- Environ 80 regards (précisément 81 dans le SIG) étaient masqués sous le bitume de la voirie selon la connaissance de ceux qui sont longuement intervenus sur le réseau.

3.1.2 Sectorisations et service intermittent

La ville de BBA souffre d'un déficit de ressource en eau. La demande en eau ne peut pas être satisfaite.

La quantité d'eau dont dispose la ville est de 926732 m^3 , équivaut à $30891 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. La demande en eau moyenne journalière est de $50878 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$.

Dans ces conditions la distribution d'eau est intermittente. L'ADE a mis en place une sectorisation, comportant 4 zones. Le tableau ci-après résume les caractéristiques de ces zones.

PROGRAMME DE DISTRIBUTION & NOMBRE D'ABONNÉ

Zone de distribution	Alimentation	Les cités	Nombre d'abonnés	Besoin m^3	Volume distribué m^3
Zone Nord	2x4000 2x10000	FG DES JARDINS	1824	1915	19000
		Cité Abd Elmoumen	1369	1437	
		680 LOGT	725	761	
		217+285+53+50 LOGTS	476	500	
		109 LOGTS	109	114	
Suite du tableau page suivante					

Zone de distribution	Alimentation	Les cités	Nombre d'abonnés	Besoin m³	Volume distribué m³
		SECTEUR D	502	527	
		210 LOGTS	210	221	
		1044 LOTS	1183	1242	
		LOTS FATMI - LOTS SADIKI	378	397	
		517 LOTS	443	465	
		240+190+278+159+100 LOGTS	1413	1484	
		SECTEUR BC	953	1001	
		site 01	172	181	
		LOTS MAHSSES	161	169	
		LOTS 226 MAHSSES	218	229	
		LOTS 100 MAHSSES	100	105	
		150 LOGTS FG DES JARDINS	150	158	
		200 LOGS GUEROUACHE +150+130	566	594	
		41 LOGTS ROUTE ZAMOURA	41	43	
		200 LOGTS OPGI	279	293	
		300+500 LOGTS ROUTE SETIF	1869	1962	
		72 LOGTS UGTA	44	46	

Suite du tableau page suivante

Zone de distribution	Alimentation	Les cités	Nombre d'abonnés	Besoin m³	Volume distribué m³
		BATIMENT BEN CHIKH	1206	1266	
		BATIMENT DJOUDI IDRIS	345	362	
		COOPERATIF	327	343	
		SECTEUR A	263	276	
		BATIMENT 1008	809	849	
		BATIMENT 500+300+217+500+20+250 ROUTE BIR SNAB	1497	1572	
		ZONE NORD	17632	18514	
Zone Nord Sup	2x5000	COOPERATIF AL ANWAR - FERME BAHLOULI + 52 LOTS	179	188	19000
		COOPERATIF AL AHRAM - ALMORDJAAN - KHALDOUN - CITADEL	408	428	
		FAUBOURG DES MARTYRS	1124	1180	
		15 COOPERATIF	329	345	
		05 COOPERATIF	247	259	
		FERME HANICHE	206	216	
		200 UGTA	200	210	
		183 LOGTS	183	192	
Suite du tableau page suivante					

Zone de distribution	Alimentation	Les cités	Nombre d'abonnés	Besoin m³	Volume distribué m³
		BATIMENT 100 POLICE	100	105	
		90+180+150+126+120+130+124	2588	2717	
		CITE 250 UGTA	256	269	
		MAHMOUCHE 1 - MAHMOUCHE 2	741	778	
		VILLAGE NOR	600	630	
		LOTS NOUIOUA	298	313	
		LOTS 365	247	259	
		MOTS 324	455	478	
		BOUDA FATIMA ELZOHRA	402	422	
		200 LA POLICE	318	334	
		BATIMENT 750+170 EPLF+130 OPGI 200 UGTA	1167	1225	
		CITE 159	159	167	
		LOTS BOUDA - ELHIDAB - EL AMEL	153	161	
		05-juil	700	735	
		BATIMENT 210 + 180 SAFSSAF	390	410	
		700 AADL ROUTE AIN SULTAN	566	594	
Suite du tableau page suivante					

Zone de distribution	Alimentation	Les cités	Nombre d'abonnés	Besoin m ³	Volume distribué m ³
		AOUIN ZRAIGA + OUED ELMALAH	1408	1478	
		CENTRE VILLE	349	366	
		500+600 AADL ROUTE BIR SNAB	1049	1101	
		BOUMERGUED	3016	3167	
		LOGT 130-100-175-50-130 ROUTE MADJANA	1118	1174	
		ZONE NORD SUPÉRIEUR	17838	18730	
		Zone Sud	2×4000 2×10000	BATIMENT GUEROUACHE	
226 + 100 LOGTS MAHSSAS	326			342	
450 + 270 LOGTS ROUTE SETIF	410			431	
287 LOGTS	306			321	
17 OCTOBER	1567			1645	
08-mai-45	804			844	
CITE 1 NOVEMBRE	817			858	
136 AADL	139			146	
LA GARE	1008			1058	
12 HECTAR	384			403	

Suite du tableau page suivante

Zone de distribution	Alimentation	Les cités	Nombre d'abonnés	Besoin m ³	Volume distribué m ³
		LOTS 560	776	815	
		300+125 PARTICIPATIF ROUTE ZAMOURA	866	909	
		LOTS 265(17 OCTOBRE)	253	266	
		LOTS 295(17 OCTOBRE)	416	437	
		LOTS 471(17 OCTOBRE)	343	360	
		LOTS 106(17 OCTOBRE)	106	111	
		BATIMENT 18 FEVRIER	500	525	
		250 LOGT ROUTE BIR SNAB	250	263	
		250 LOGT UGTA	250	263	
		300 LOGT COSIDER	330	347	
		BATIMENT HADAAJE BIR SNAB	792	832	
		CENTRE VILLE	423	444	
		ZONE SUD - TOTAL	11762	12350	
Pompage	2x2000	114 LOGTS ROUTE MADJANA	100	105	3000
		260 LOGT BELFARKOUS	259	272	
Suite du tableau page suivante					

Zone de distribution	Alimentation	Les cités	Nombre d'abonnés	Besoin m³	Volume distribué m³
		114 LOGTS ROUTE MADJANA	100	105	
		400+130+140 LOGTS	678	712	
		POMPAGE – TOTAL	1223	1284	
TOTAL GÉNÉRAL			48455	50878	54300

Les 4 zones ne sont pas identiques en termes de permanence de la sectorisation :

- Les 2 zones principales, la Zone Nord et la Zone Sud, entre lesquelles il existe un certain nombre de vannes qui sont manipulées quotidiennement pour alimenter l'une ou l'autre. Les 2 zones sont alimentées gravitairement par les mêmes réservoirs : (4000 m³ et 10000 m³ bas + 10000 m³ haut).
- Zone pompage (sur presse), alimentée par la station de surpression du site des réservoirs 2000 m³.
- Zone Nord Sup, alimentée gravitairement par le réservoir 5000 m³ haut.

Le réseau de distribution de BBA a un type maillé qui est constitué par un circuit dit fermé. Grâce à ce cycle bien maîtrisé, ADE arrive à assurer la régularité de l'alimentation, ce qui est particulièrement important dans une desserte intermittente : les abonnés doivent recevoir de l'eau toujours à la même heure, évitant les heures de pointes entre (17h et 22h). Il est alimenté tous les trois jours pendant cinq heures, du fait de l'ouverture des vannes au niveau de ce réseau.

Il faut bien entendu mentionner que tous les abonnés possèdent un stockage privé. Les villas ont soit une grosse citerne (2500 L à 3000 L) soit une bâche en béton de plusieurs m³. Dans les immeubles, les abonnés ont une citerne, généralement sur le balcon, de capacité 1000 ou 1500 L.

3.1.3 Les stations de pompage

Il existe 3 stations de pompage dans la ville de BBA [13] :

- Station de transfert d'eau, par une conduite unique, vers la commune d'Hasnaoua (vente en gros à l'APC de la commune qui assure la distribution) et vers la maison d'arrêt.
- Station de transfert d'eau, par une conduite unique, vers la commune de Medjana et l'agglomération secondaire d'Aouin Zeriga (c'est l'ADE qui assure la distribution dans ces 2 localités).
- Station de surpression qui refoule directement dans le réseau de distribution d'un quartier situé à proximité des réservoirs 2000 m³ et donc de la station.

Ces 3 stations de pompage n'ont pas toutes le même devenir :

- L'exploitation de la station de pompage vers Medjana sera abandonnée dans le courant de l'année 2015 lorsque la station de reprise sur le transfert Draa Adjroud – réservoirs 5000 m³ sera mise en service. Cette station de reprise est en effet équipée de pompes dédiées à Medjana.
- L'exploitation de la station de surpression sera elle aussi abandonnée lors de la mise en service des réservoirs 5000 m³ car le quartier desservi par cette station sera alimenté gravitairement par lesdits réservoirs.
- Par contre la station de pompage vers Hasnaoua restera en activité car il n'est pas prévu d'autre système de transfert d'eau vers cette commune. Cependant, nous proposons d'alimenter la maison d'arrêt par piquage sur la conduite DN 700 de distribution gravitaire à partir des réservoirs 5000 m³ et par conséquent, dès la mise en service de ces réservoirs dans le courant de l'année 2015, la station de pompage refoulera uniquement vers les réservoirs de Hasnaoua.

3.1.4 Les pompes

3.1.4.1 Les pompes de la station de Hasnaoua

La station possède 2 pompes dont les caractéristiques sont les suivantes :

TABLE 3.3 – Caractéristiques des pompes - Station Hasnaoua. [13]

Caractéristiques	Pompe N. 1	Pompe N. 2
Fabricant (Pompe)	KSB	CAPRARI
Type	Multicellulaire	Multicellulaire
Débit nominal ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	140	94
HMT nominale (m)	195	230
Vitesse (tr/min)	1480	2970
Fabricant (Moteur)	EFACEC	SEIPEE
Puissance (kW)	110	90

Il n'y a pas de date de fabrication sur les plaques des pompes. L'aspect extérieur de la pompe N. 2 laisse planer peu de doute sur le fait qu'elle est récente ou du moins qu'elle a peut fonctionné.

Par contre la pompe N. 1 est très probablement ancienne. Le corps de pompe est très corrodé. En mars 2015 il y avait une fuite au presse étoupe bien plus importante que la normale. Sans présager de ses performances hydrauliques il est recommandé de remplacer cette pompe dans le cadre d'une remise à niveau globale de la station de pompage.

Les caractéristiques de la pompe de remplacement doivent être définies vis-à-vis :

- du débit nécessaire.
- de la HMT nécessaire.

En 2025 La pompe N. 1 est en panne. La pompe N. 2 qui a une capacité de $1900 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ sur la base de 20 h de fonctionnement, peut donc satisfaire le besoin à l'horizon de sa durée de vie raisonnable (10 ans), avec une certaine marge de sécurité.

Il est proposé de retenir pour la nouvelle pompe No.1 un débit nominal identique à celui de la pompe N. 2, soit $94 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$. Ce qui correspond à une vitesse d'écoulement dans la conduite de refoulement DN200 de 0.8 ms^{-1} , qui est acceptable.

3.1.4.2 Les pompes de la station d'Aouin Zraiga

La station possède 2 pompes dont les caractéristiques sont les suivantes :

TABLE 3.4 – Caractéristiques des pompes - Station Aouin Zraiga. [13]

Caractéristiques	Pompe No. 1	Pompe No. 2
Fabricant (Pompe)	POVAL	MAS
Type	Multicellulaire	Multicellulaire
Débit nominal ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	67	36
HMT nominale (m)	265	280
Vitesse (tr/min)	2900	2900
Fabricant (Moteur)	ENEL	ENEL
Puissance (kW)	90	30

3.1.4.3 Les pompes du couloir Bordj Ghdir

Chaque forage il existe une pompe dont les caractéristiques sont les suivants :

— Forage chania 01

TABLE 3.5 – Pompe - Forage Chania 01. [13]

Caractéristique	Pompe No. 1
Fabricant	VANSAN
Type	Multicellulaire
Débit nominal (L/s)	7
HMT nominale (m)	190
Puissance (kW)	55

— Forage chania 02

TABLE 3.6 – Pompe - Forage Chania 02. [13]

Caractéristique	Pompe No. 1
Fabricant	VANSAN
Type	Multicellulaire
Débit nominal (L/s)	20
HMT nominale (m)	240
Puissance (kW)	75

— Forage hrir

TABLE 3.7 – Pompe - Forage Hrir. [13]

Caractéristique	Pompe No. 1
Fabricant	VANSAN
Type	Multicellulaire
Débit nominal (L/s)	9
HMT nominale (m)	180
Puissance (kW)	30

3.1.5 La consommation électrique

La consommation d'énergie électrique d'un réseau de distribution d'eau de la ville de Bordj Bou Arreridj peut être résumée comme suit (Exemple de factures annuelles, valeurs en DZD) [13] :

TABLE 3.8 – Facturation électrique annuelle par ouvrage (Exemple). [13]

CENTRES / OUVRAGES	TOTAL FACTURES / HT	TOTAL FACTURES / TTC
S/R Route Medjana	12629.03	15228.55
S/R Hasnaoua	153804.31	183227.13
Reservoir 1000 m ³	18153.82	21703.05
F/ Chania N°2	133984.06	159541.03
F/Chania N°1	110115.32	131137.23
Reservoir 10000 m ³	37505.54	44831.59
Reservoir BOUMERGUED	14100.45	16979.54
Reservoir 4000 m ³	8225.20	9987.99
F Mouguerienne	125728.80	149817.27
S/P Aouine Zeraigua	581762.75	692497.67
TOTAL FACTURES	1196009.28	1424951.05
CENTRE B.B.ARRERIDJ		

Ce tableau montre que les postes plus énergivores sont le pompage initial et les relèvements, tandis que les réservoirs en altitude limitent la consommation.

Une optimisation du tracé du réseau et du dimensionnement des équipements permet de réduire ces coûts.

3.2 Partie 02 : Formulation du problème

Le réseau de distribution d'eau de la ville de bordj bou arreridj est composé de 3 sources ,6 pompes,4 zones ,10 réservoirs .

notons que La distribution se base sur 6 réservoirs principales :

- réservoir N° 1 : 2000 .
- réservoir N° 2 : 2000+1000 (tampon)
- réservoir N° 3 : 2*2000
- réservoir N° 4 : 2*4000
- réservoir N° 5 : 2*5000
- réservoir N° 6 : 2*10 000

vers les 4 zones comme indiqué dans les paragraphes précédant :

zone 1 : zone nord

zone 2 : zone nord sup

zone 3 : zone sud

zone 4 : zone pompage

les différentes périodes :

- la période 1 : de 23h jusqu'à 5h.
- la période 2 : de 5h jusqu'à 11h.
- la période 3 : de 11h jusqu'à 17h.
- la période 4 : de 17h jusqu'à 23h.

3.2.1 les fonctions objectif

L'objectif est de minimiser le coût d'énergie électrique des pompes avec une consommation minimale de l'eau pour toutes les zones.

Pour le problème de minimisation de la consommation de l'eau, nous définissons une variable $x_{i,j,k,l}$ qui représente la quantité de l'eau distribuée depuis le réservoir « i » vers la zone « j » le jour « k » dans la période « l » en (m^3/s),

la première fonction objectif peut être formulée de la façon suivante :

$$\text{Min } f_1(x) = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^7 \sum_{l=1}^4 x_{i,j,k,l} \quad (3.1)$$

Pour le problème de minimisation du cout énergétique liées au stations de pompage ,nous définissons la puissance consommé par la pompe « p » tel que $p \in \{1, ..6\}$

$$P_p = \frac{\rho \cdot g \cdot q_p \cdot hmt_p}{\eta} \quad (3.2)$$

où :

ρ : la masse volumique de l'eau (1000 kg/m³)

g : acceleration gravitaire (9.81 m/s²)

η : le rendement de la pompe ,supposons que toutes les pompes en bonne fonctionnement ,nous donnons $\eta = 0.8$.

nous définissons aussi un indicateur binaire $y_{p,i,l}$ qui indique si la pompe est allumé ($y_{p,i,l} = 1$) ou eteinte ($y_{p,i,l} = 0$) durant la periode « l » pour alimenté le réservoir « i ».

C représente le cout unitaire (en DA/m³) ,on distingue deux prix :

- C_1 Le prix pour les heures hors pointes : 1.8064 DA/m³
- C_2 Le prix pour les heures pointes qui représente la 4 ème période pour chaque jour (de 17h-23) : 8.7202 DA/m³.

La deuxième fonction objective peut être formulée de la façon suivante :

$$\text{Min } f_2(x) = \sum_{p=1}^6 \sum_{i=1}^3 \sum_{l=1}^6 C_1 \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot q_{p,i} \cdot hmt_p}{\eta} \cdot t \cdot y_{p,l,i} + \sum_{i=1}^6 \sum_{p=1}^6 C_2 \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot q_{p,i} \cdot hmt_p}{\eta} \cdot t \cdot y_{p,4,i} \quad (3.3)$$

Avec t le temps de fonctionnement de lampe p, et $Q_{p,i}$ le débit depuis la pompe « p » vers le réservoir « i ».

3.2.2 Les contraintes

nous considérons que le stockage dans le réservoir est presque inexisté en raison de la pénurie d'eau, qui est le problème.

Nous assumons que la quantité reçoit par le réservoir est la même distribué vers la zone.

Dans le réseau étudié nous avons la pompe numéro 2 et la pompe numéro 3 refoule l'eau vers le réservoir 5 qui alimente la zone 2 et alimente aussi graviterment le réservoir 3 vers la zone 4

$$\sum_{p \notin \{1,4,5,6\}} q_{p,5} + d_{1,5} = x_{5,2,k,l} + x_{3,4,k,l} \quad \forall k,l \quad (3.4)$$

Et nous avons aussi les pompes 4,5 et 6 transfère l'eau vers le réservoir 4 qui alimente la zone 1 et la zone 3

$$\sum_{p \notin \{1,2,3\}} q_{p,4} + d_{2,4} = \sum_{j=1, j \neq 2}^3 x_{4,k,l} \quad \forall k,l \quad (3.5)$$

Avec $d_{s,i}$: une variable qui représente le débit de la source vers le réservoirs.

Bien que le totale de la quantité d'eau distribué vers le réservoirs ne doit pas dépasser quantité max de la source .

$$\sum_{s=1}^3 \sum_{i=1}^6 d_{s,i} \leq Q_{smax} \quad (3.6)$$

aussi le totale de débit depuis le réservoirs ne doit pas dépasser le débit max de la pompe .

$$\sum_{p=1}^p \sum_{i=1}^6 q_{p,i} \leq Q_{pmax} \quad (3.7)$$

La satisfaction des zones par besoin :

La zone 1 et la zone 3 sont alimenté par les mêmes réservoirs(le réservoir 4 et le réservoir

6)

$$\sum_{i=4, i \neq 5}^6 \sum_{j=1, j \neq 2}^3 \sum_{k=1}^7 \sum_{l=1}^4 x_{i,j,k,l} \geq \sum_{j=1, j \neq 2}^3 B_j \quad (3.8)$$

La zone 2 est alimenté par le réservoir 5

$$\sum_{k=1}^7 \sum_{l=1}^4 x_{5,2,k,l} \geq B_2 \quad (3.9)$$

La zone 4 est alimenté par le reservoir 3

$$\sum_{k=1}^7 \sum_{l=1}^4 x_{3,4,k,l} \geq B_4 \quad (3.10)$$

Nous essayons d'éviter la distribution au période des heures pointe (4ème période) :

$$x_{i,j,k,4} = 0 \quad \forall i \in \{1,6\}; \forall j \in \{1,4\}; \forall k \in \{1,7\} \quad (3.11)$$

3.2.3 Résumé du modèle mathématique

$$\begin{aligned}
\text{Min } f_1(x) &= \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^7 \sum_{l=1}^4 x_{i,j,k,l} \cdot \\
\text{Min } f_2(x) &= \sum_{i=1}^6 \sum_{l=1}^3 \sum_{p=1}^6 C_1 \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot q_{p,i} \cdot hmt_p}{\eta} \cdot t \cdot y_{p,l,i} \\
&\quad + \sum_{i=1}^6 \sum_{p=1}^6 C_2 \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot q_{p,i} \cdot hmt_p}{\eta} \cdot t \cdot y_{p,4,i} \\
\sum_{p \notin \{1,4,5,6\}} q_{p,5} + d_{1,5} &= x_{5,2,k,l} + x_{3,4,k,l} \quad \forall k, l \\
\sum_{p \notin \{1,2,3\}} q_{p,4} + d_{2,4} &= \sum_{j=1, j \neq 2}^3 x_{4,k,l} \quad \forall k, l \\
\sum_{s=1}^3 \sum_{i=1}^6 d_{s,i} &\leq Q_{smax} \\
\sum_{p=1}^6 \sum_{i=1}^6 q_{p,i} &\leq Q_{pmax} \\
\sum_{i=4, i \neq 5}^6 \sum_{j=1, j \neq 2}^3 \sum_{k=1}^7 \sum_{l=1}^4 x_{i,j,k,l} &\geq \sum_{j=1, j \neq 2}^3 B_j \\
\sum_{k=1}^7 \sum_{l=1}^4 x_{5,2,k,l} &\geq B_2 \\
\sum_{k=1}^7 \sum_{l=1}^4 x_{3,4,k,l} &\geq B_4 \\
x_{i,j,k,4} &= 0 \quad \forall i \in \{1,6\}; \forall j \in \{1,4\}; \forall k \in \{1,7\} \\
x_{i,j,k,4} &\geq 0; q_{p,i} \geq 0; d_{s,i} \geq 0; y_{p,l,i} \in \{0,1\}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

3.2.4 Méthodes numériques de résolution

3.2.4.1 Classification du problème

Le modèle développé se classe comme un programme linéaire mixte en nombres entiers (PLNE), combinant :

- Variables continues : Débits ($q_{p,i}$), volumes distribués ($x_{i,j,k,l}$).
- Variables binaires : État des pompes ($y_{p,l,i}$).

- contrainte linéaire : techniques et économiques.
- Fonctions objectif : Minimisation linéaire des coûts énergétiques implique une distribution équitable entre les zones

Ce type de problème est NP-difficile dans le cas général, mais des méthodes spécifiques permettent d'obtenir des solutions optimales pour des instances de taille réaliste.

3.2.4.2 Stratégie de résolution

- Algorithme du Simplexe (relaxation continue)
 - Rôle : Résout la version relaxée (variables continues) pour obtenir une borne inférieure
 - Implémentation : Utilisé en phase préliminaire par un solveur [16] .
- Branch-and-Bound
 - Principe :
 1. Séparation : Crée des sous-problèmes en fixant ($y_{p,l} = 0$ ou 1)
 2. Élagage : Élimine les branches dont la relaxation est inférieure à la meilleure solution entière.
 - Performance : Efficace grâce aux contraintes de capacité serrées (réduction de l'espace de recherche)[17].
- Linéarisation des contraintes

La non-linéarité induite par les termes ($q*y$) est résolue via la méthode "Big-M" avec $M = Q_p \max$ (valeur adaptée a chaque pompe).

Cette analyse justifie le choix d'une approche hybride (simplexe +branch and bound)pour concilier précision et faisabilité computationnelle, comme détaille dans le chapitre 4.

3.3 conclusion

Dans ce chapitre ,nous avons étudié le réseau de distribution d'eau en analysant ses performances et en identifiant les principaux défis a optimiser .deux problèmes majeurs ont été mis en évidence :

1- une forte consommation électrique liéé au pompage et ala distribution de l'eau ,engendrant des couts operationnels élevés.

2- Une distribution inéquitable entre les différentes zones ,conduisant a des déséquilibres dans l'approvisionnement .

Pour résoudre ces problèmes ,nous avons élaboré un modèle mathématique servira de base pour la phase d'optimisation dans le prochain chapitre ,permettant d'évaluer différentes stratégies de gestion et de proposer des solutions concrètes améliorer la performance globale de réseau .

Chapitre 4

Implémentation et démonstration

Dans ce dernier chapitre, nous passons de la phase théorique à la mise en œuvre pratique du modèle mathématique développé précédemment. Après avoir défini rigoureusement les équations, les hypothèses et les contraintes du système étudié, il est désormais essentiel de les traduire dans un langage de programmation permettant leur résolution numérique. Pour cela, nous avons choisi le langage Python, reconnu pour sa flexibilité, sa richesse en bibliothèques scientifiques (telles que `pulp`), ainsi que sa large communauté active dans le domaine du calcul scientifique.

Ce chapitre détaille les différentes étapes de la programmation du modèle : de la définition des paramètres et des fonctions à l'implémentation des méthodes de résolution numérique appropriées. Nous présentons également les résultats obtenus à travers l'optimisation, en les confrontant aux prévisions théoriques ou aux données expérimentales disponibles. L'objectif est d'illustrer la pertinence et la robustesse du modèle développé, tout en identifiant ses éventuelles limites dans un contexte applicatif.

4.1 Language python

Python est un langage de programmation polyvalent et de haut niveau, dont l'utilisation s'est largement démocratisée ces dernières années. Conçu avec une philosophie axée sur la lisibilité du code, il permet aux développeurs d'exprimer des idées de manière concise, souvent en moins de lignes qu'avec des langages comme le C. Sa structure favorise la clarté aussi bien pour des projets de petite envergure que pour des applications complexes. L'un de ses atouts

majeurs réside dans sa prise en charge de divers paradigmes de programmation, notamment orienté objet, impératif, fonctionnel et procédural. Python repose sur un système de typage dynamique, intègre une gestion automatique de la mémoire et propose une bibliothèque standard particulièrement riche. De plus, des interpréteurs sont disponibles pour la plupart des systèmes d'exploitation, ce qui renforce sa portabilité et son accessibilité. [14]

4.2 Justification du choix

- Python permet de formuler et de résoudre des problèmes d'optimisation linéaire à l'aide de la bibliothèque **PuLP**, un outil puissant et intuitif pour la modélisation mathématique.
- **Définition simple des problèmes** : PuLP facilite la définition de variables, de fonctions objectif et de contraintes grâce à une syntaxe claire et accessible.
- **Compatibilité avec plusieurs solveurs** : PuLP peut s'interfacer avec des solveurs open source, permettant d'adapter la puissance de calcul selon les besoins.
- **Résolution efficace de problèmes réels** : Il est utilisé dans des domaines variés tels que la logistique, la planification de production, la finance ou les transports.
- **Intégration dans des projets Python plus larges** : Comme Python est un langage généraliste, PuLP peut facilement être intégré dans des applications plus complexes, avec traitement de données, visualisation ou automatisation.

4.3 Bibliothèque Utilisées (PuLP)

PuLP est une bibliothèque développée en Python qui permet la modélisation de programmes mathématiques, en particulier les modèles d'optimisation linéaire et linéaire en nombres entiers mixtes. Profitant des qualités de Python, une licence MIT, peut être utilisé librement dans des contextes académiques et commerciaux. PuLP offre une syntaxe intuitive, proche du langage mathématique. Elle fonctionne sur toute plateforme disposant d'un interpréteur Python, sans dépendance logicielle externe, et prend en charge un large éventail de solveurs, qu'ils soient open source ou commerciaux. De plus, sa structure modulaire permet une extension aisée pour intégrer de nouveaux solveurs selon les besoins [15].

4.4 Implémentation des formules mathématiques dans le code

4.4.1 Les données de base :

Tout d'abord, nous introduisons les données : des zones, des réservoirs, des pompes et des 4 périodes d'alimentation d'eau. Aussi nous précisons l'ensemble des pompes qui pompent l'eau vers un ou plusieurs réservoirs et l'ensemble des réservoirs qui transfèrent l'eau vers les zones et enfin nous définissons le débit max de chaque pompe et le besoin de chaque zone.

Le programme python :

```
1 import pulp
2
3 # Données de base
4 zones = ["z1", "z2", "z3", "z4"]
5 periodes = ["p1", "p2", "p3", "p4"] # Supposons 4 periodes de 6h
   chacune
6
7 reservoirs_capacites = { # Capacités en m3
8     "r1": 2000,
9     "r2": 3000,
10    "r3": 4000,
11    "r4": 8000,
12    "r5": 10000,
13    "r6": 20000
14 }
15 reservoirs = list(reservoirs_capacites.keys())
16
17 pompes = ["p1", "p2", "p3", "p4", "p5", "p6"]
18
19 pompe_to_reservoir = { # Quelle pompe alimente quel reservoir
20     "p1": "r3", # "p1" corrigé en "p1"
21     "p2": "r5", "p3": "r5",
22     "p4": "r4", "p5": "r4", "p6": "r4"
23 }
24
25 res_to_zone = { # Quel reservoir alimente quelle zone
26     "r4": ["z1", "z3"], "r6": ["z1", "z3"],
27     "r5": ["z2"], "r3": ["z4"]
```

```

28 }
29
30 debit_max_pompes = { # m3/jour
31     "p1": 94 * 21600 / 1000,
32     "p2": 67 * 21600 / 1000,
33     "p3": 36 * 21600 / 1000,
34     "p4": 7 * 21600 / 1000,
35     "p5": 20 * 21600 / 1000,
36     "p6": 9 * 21600 / 1000
37     # 21600= 86400/4 nombre de seconde par periode
38 }
39
40 besoin_zone = { # m3/jour (valeurs initiales)
41     "z1": 19000,
42     "z2": 19000,
43     "z3": 13300,
44     "z4": 3000
45 }
46
47 # HMT des pompes
48 hmt_pompes = {
49     "p1": 230,
50     "p2": 265,
51     "p3": 280,
52     "p4": 190,
53     "p5": 240,
54     "p6": 180.

```

Listing 4.1 – Données de base

4.4.2 Les paramètres physique :

```

1 # Param tres physiques et co ts
2 rho = 1000 # kg/m3 (masse volumique de l'eau)
3 g = 9.81 # m/s2 (acceleration gravitaire)
4 eta = 0.8 # rendement de la pompe
5 secondes_par_jour = 86400 # secondes dans un jour
6 # Il y a 4 periodes, donc chaque periode dure secondes_par_jour / 4 =
    21600 s (6 heures)

```

```

7
8 prix_hp = 8.7202 # DA/kWh (prix heures pleines, ex: periode "p4")
9 prix_hc = 1.8064 # DA/kWh (prix heures creuses)
10
11 M = 100 # Constante "Big M" pour la lin arisation

```

Listing 4.2 – Paramètres physiques et coûts

Notons que : le paramètre $M = 100$ est une constante très grande utilisée pour linéariser des contraintes non linéaires, ce qu'on appelle la méthode du "*Big M*". Il doit être suffisamment grand pour ne pas restreindre les variables.

4.4.3 Déclaration des Variables

```

1 # x[i,j,l]: quantite d'eau (m3) du reservoir i vers zone j pendant
   periode l
2 x = pulp.LpVariable.dicts("x",((i, j, l_idx)
3 for i in reservoirs
4 for j in zones
5 for l_idx in periodes), lowBound=0, upBound=10000) # upBound pourrait
   etre capacite reservoir ou demande
6
7 # y[p,l]: pompe p active (1) ou inactive (0) pendant periode l (binaire
   )
8 y = pulp.LpVariable.dicts("y",((p, l_idx) for p in pompes for l_idx in
   periodes), cat="Binary")
9
10 # q[p,i]: debit total journalier (m3/jour) de la pompe p vers reservoir
    i (continu)
11 q = pulp.LpVariable.dicts("q",
12                             ((p, i) for p in pompes for i in reservoirs
13                             if pompe_to_reservoir.get(p) == i),
14                             lowBound=0)
15 # w[p,i,l]: debit effectif (m3) de pompe p vers reservoir i pendant
    periode l
16 # Utile pour linearisation: w[p,i,l] approx q[p,i]/4 * y[p,l]
17 w = pulp.LpVariable.dicts("w",

```

```

18         ((p, i, l_idx) for p in pompes for i in
    reservoirs for l_idx in periodes if pompe_to_reservoir.get(p) == i),
19         lowBound=0)
20
21 # z_active[j,l_slot]: zone j active (servie) pendant le "jour" de
    distribution l_slot (pour contrainte 1 fois tous les 3 jours)
22 # periodes "p1", "p2", "p3" peuvent représenter 3 jours consecutifs ou
    slots de distribution.
23 z_active = pulp.LpVariable.dicts("z_active",
24         ((j, l_slot) for j in zones for
    l_slot in ["p1", "p2", "p3"]),
25         cat="Binary")

```

Listing 4.3 – Déclaration des variables

La variable w dans le modèle a un rôle technique et essentiel dans la modélisation du lien entre le débit (q) et l'activation (y) d'une pompe à une période donnée. On ne peut pas directement multiplier une variable continue (q) par une variable binaire (y), car ce n'est pas linéaire. Donc, on introduit une nouvelle variable w pour représenter le produit effectif.

$w[p, i, l]$ représente le débit effectif (en m^3) envoyé par la pompe p vers le réservoir i pendant la période l , mais uniquement si la pompe est activée. Si la pompe est activée ($y[p, l] = 1$), alors $w[p, i, l]$ peut être non nul. Si la pompe est désactivée ($y[p, l] = 0$), alors $w[p, i, l]$ doit être zéro. L'implémentation en python de la linéarisation (page 7 du document original) :

```

1 # Lin arisation de w = q * y
2 for p in pompes:
3     for i in reservoirs:
4         if pompe_to_reservoir.get(p) == i:
5             for l in periodes:
6                 model += w[p, i, l] <= q[p, i]
7                 model += w[p, i, l] <= debit_max_pompes[p] * y[p, l]
8                 model += w[p, i, l] >= q[p, i] - (1 - y[p, l]) *
    debit_max_pompes[p]
9         else:
10            for l in periodes:

```

```
11 model += w[p, i, l] == 0
```

Listing 4.4 – Linéarisation de w

4.4.4 Les fonctions objectif :

Dans le cadre de la gestion des réseaux de pompage, la consommation d'énergie électrique dépend directement de la manière dont l'eau est distribuée entre les réservoirs.

La fonction objectif du modèle d'optimisation est comme suit :

```
1 energie_kwh = pulp.lpSum(  
2     ((prix_hp if l == "p4" else prix_hc) *  
3     (rho * g * hmt_pompes[p] * w[p, i, l]) / (eta * 3.6e6))  
4     for p in pompes for i in reservoirs for l in periodes  
5     if pompe_to_reservoir.get(p) == i  
6 )
```

4.4.5 Implémentation des contraintes :

La première et la deuxième contrainte dans le modèles mathématique assurent que la quantité reçoit par le réservoir est la même distribué vers la zone. Et la distribution sera dehors de la période 4 implémentation est comme suit :

```
1  
2 # Pas de distribution en p4  
3 for i, j, l in x:  
4     if l == "p4":  
5         model += x[i, j, l] == 0  
  
1 # Liaisons valides r reservoir      zone  
2 for i, j, l in x:  
3     if j not in res_to_zone.get(i, []):  
4         model += x[i, j, l] == 0  
  
1 # Liaisons valides pompe      r reservoir  
2 for p in pompes:  
3     for i in reservoirs:  
4         if pompe_to_reservoir.get(p) != i:  
5             model += q[p, i] == 0;
```

```

1 # D bit max par pompe
2 for p, i in q:
3     model += q[p, i] <= debit_max_pompes[p]

```

```

1 # Activation pompes
2 for p in pompes:
3     for i in reservoirs:
4         for l in periodes:
5             model += q[p, i] <= M * y[p, l]
6

```

```

1 # Conservation : entr e = sortie
2 for i in reservoirs:
3     model += pulp.lpSum(q[p, i] for p in pompes if (p, i) in q) == \
4         pulp.lpSum(x[i, j, l] for j in zones for l in periodes if
5             j in res_to_zone.get(i, []))

```

Aussi implémentation de satisfaction des besoins par zones :

```

1     # Besoins min
2 for j in zones:
3     model += pulp.lpSum(
4         x[i, j, l] for i in reservoirs for l in periodes if j in
5         res_to_zone.get(i, []) and l != "p4"
6     ) >= besoin_zone[j]

```

Nous savons que la distribution de l'eau a lieu une fois tous les trois jours

```

1 # : distribution une fois tous les 3 jours
2 for j in zones:
3 # Activer si x[i,j,l] > 0     z_active[j,l] = 1
4     for l in ["p1", "p2", "p3"]:
5         model += pulp.lpSum(x[i, j, l] for i in reservoirs if j in
6             res_to_zone.get(i, [])) <= M * z_active[j, l]
7         # Une seule p riode de distribution parmi p1, p2, p3
8         model += pulp.lpSum(z_active[j, l] for l in ["p1", "p2", "p3"]) <=
9         1

```

Nous voulons afficher les résultats suivantes :

— La facture d'énergie de toute les pompes.

- Le plan de distribution (réservoir → zone) .
- le débit pompés :(pompe → reservoir) ainsi son cout .
- les périodes pendant les quels les pompes sont actives ou inactive .
- le programme d'alimentation des zones.

Implémentation sur python est comme suit :

```

1 # Affichage
2 if model.status == pulp.LpStatusOptimal:
3     cout_total = pulp.value(model.objective)
4     print(f"\n Facture totale d' lectricit : {cout_total:.2f} DA
5     ")
6
7     total_eau_distribuee = sum(
8         var.varValue for (i, j, l), var in x.items() if var.varValue
9     )
10
11     print(f" Quantit totale d'eau distribu e : {
12     total_eau_distribuee:.2f} m ")
13
14     print("\n--- Detail par pompe ---")
15     for p in pompes:
16         energie_pompe = sum(
17             ((prix_hp if l == "p4" else prix_hc) *
18             (rho * g * hmt_pompes[p] * w[p, i, l].varValue) / (eta *
19             3.6e6))
20             for i in reservoirs for l in periodes
21             if pompe_to_reservoir.get(p) == i and w[p, i, l].varValue
22         )
23         volume_pompe = sum(
24             w[p, i, l].varValue for i in reservoirs for l in periodes
25             if pompe_to_reservoir.get(p) == i and w[p, i, l].varValue
26         )
27         if volume_pompe > 0:
28             print(f"Pompe {p} : {volume_pompe:.2f} m pomp s , co t =
29             {energie_pompe:.2f} DA")
30
31     print("\n--- Distribution eau par zone ---")
32     for j in zones:
33         distrib = sum(

```

```

29         x[i, j, l].varValue for i in reservoirs for l in periodes
if x[i, j, l].varValue
30     )
31     print(f"Zone {j} : {distrib:.2f} m ")
32
33     print("\n--- Etat des pompes par periode ---")
34     for l in periodes:
35         print(f"\n Periode {l} :")
36         for p in pompes:
37             etat = "    ACTIVE" if y[p, l].varValue == 1 else "
INACTIVE"
38             print(f"Pompe {p} : {etat}")
39     print("\n--- Periodes d'alimentation des zones ---")
40     for l in periodes:
41         print(f"\nPeriode {l} :")
42         for z in zones:
43             etat = "    ACTIVE" if z_active[z, l].varValue == 1 else "
INACTIVE"
44             print(f"Zone {z} : {etat}")
45
46 else:
47     print("    Le mod le n'a pas trouv de solution optimale.")

```

4.5 Les résultats et discussion

Le programme affiche :

Status : Infeasible

Aucune solution trouvée.

le problème d'absence de solution vient très probablement des contraintes trop restrictives combinées avec des besoins d'eau élevés, une interdiction stricte de distribution en période de pointe (periode 4), et l'absence de stockage possible :

— les Pompes limitées en débit journalier : (p_2) peut fournir seulement $60 \times 86400 / 1000 = 5184 \text{ m}^3/\text{jour}$, et la demande 19000 m^3 pour (z_2).

— Distribution contrainte à une seule fois tous les 3 jours pour chaque zone via z_active :

Cela signifie que chaque zone ne peut être servie qu'une fois parmi (p_1), (p_2), ou (p_3).Donc,

pour livrer 19000 m³ en une seule journée, c'est irréalisable.

- Capacités de réservoirs limitées : (r_5) alimente (z_2), mais sa capacité est de 10000 m³. Même en le remplissant au maximum, cela reste insuffisant. Donc nous essayons d'améliorer ce programme, avec des ajustements pour aider à trouver une solution réalisable :

Modifications :

- Assouplissement de la contrainte "pas de distribution en période de pointe" → on minimise, mais n'interdit pas donc nous supprimons la contrainte comme indiquer en dessous :

```
1
2 # Pas de distribution en p4
3 for i, j, l in x:
4     if l == "p4":
5         model += x[i, j, l] == 0
```

On rajoute une pondération faible appliquée pour convertir cette quantité d'eau en bonus dans l'objectif. Il pousse le solveur à distribuer le plus d'eau possible, sans augmenter trop le coût énergétique. Cela favorise les solutions qui maximisent la couverture des besoins (autant que possible).

```
1 bonus_distribution = 0.001 * pulp.lpSum(
2 x[i, j, l] for i in reservoirs for j in zones for l in ["p1", "p2",
3 "p3"]
4 )
```

La fonction objectif sera comme suit :

```
1 model += energie_kwh - bonus_distribution
```

Ajout d'un petit stockage tampon (stockage faible mais possible) la modification sur python est montré ci-dessous :

```
1 for i in reservoirs:
2     entree = pulp.lpSum(q[p, i] for p in pompes)
3     sortie = pulp.lpSum(x[i, j, l] for j in zones for l in periodes if
4 j in res_to_zone.get(i, []))
5     model += entree >= 0.95 * sortie
6     model += entree <= 1.05 * sortie
```

```

6
7 for j in zones:
8     model += pulp.lpSum(x[i, j, l] for i in reservoirs for l in
9         periodes if j in res_to_zone.get(i, [])) >= besoin_zone[j]
10
11 for j in zones:
12     for l in periodes:
13         model += pulp.lpSum(x[i, j, l] for i in reservoirs if j in
14             res_to_zone.get(i, [])) <= besoin_zone[j] * z_active[j, l]
15         model += pulp.lpSum(z_active[j, l] for l in periodes) <= 1

```

4.6 Proposition faisable (les modifications apportées aux pompes) :

Dans le modèle initial, les débits étaient calculés automatiquement à partir de données horaires. Dans la version améliorée, nous avons fixé manuellement des débits maximaux plus simples et plus réalistes pour chaque pompe. Par exemple :

- (p_1) est passée de 5700 m³ à 3000 m³,
- (p_2), (p_3) ont été fixées à 9500 m³,
- (p_4), (p_5), (p_6) à 8100 m³.
- la zone 1 et la zone 3 sont aussi alimentées gravitaire par le reservoir (r_6) d'un volume 4000 m³

Cette modification permet :

- Une meilleure maîtrise des flux dans le réseau,
- Une réduction des pics de pompage,
- une gestion plus réaliste des capacités physiques.

4.7 Résultats d'exécution (avec modifications)

Discussion des résultats de la proposition faisable

Le modèle d'optimisation a été résolu avec succès et a permis de déterminer une stratégie efficace de distribution d'eau répondant à la demande des différentes zones tout en minimisant les

coûts énergétiques liés au pompage. Les résultats obtenus offrent plusieurs éléments d'analyse pertinents.

TABLE 4.1 – Résultats d'exécution

Description	Valeur (m ³)	Coût (DA)
Pompe1 pompé vers r3	2970.00	4203.15
Pompe2 pompé vers r5	9500.00	15490.30
Pompe3 pompé vers r5	9310.00	16039.77
Pompe4 pompé vers r4	8100.00	9469.54
Pompe5 pompé vers r3	7857.00	11602.68
Pompe6 pompé vers r4	8100.00	8971.15
Coût total		65 730.30
Quantité totale d'eau	46 300	

TABLE 4.2 – État d'activation des pompes par période

Pompe	Periode1	Periode2	Periode3	Periode4
Pompe1	1	0	0	0
Pompe2	0	1	0	0
Pompe3	0	1	0	0
Pompe4	0	1	0	0
Pompe5	0	1	0	0
Pompe6	0	1	0	0

Chaque pompe a été sollicitée de manière stratégique, en fonction de son débit maximal, de sa HMT, et de sa connexion au réservoir concerné. Quelques tendances notables :

- Pompe (p_1), connectée à (r_3) et alimentant la zone 4, a été largement sollicitée.
- Pompes (p_2) et (p_3), toutes deux connectées à (r_5) et alimentant la zone (z_2), ont probablement partagé la charge, équilibrant le volume pompé et le coût.
- Pompes (p_4) à (p_6), reliées à (r_4) (alimentant (z_1) et (z_3)), ont été activées en période 2 qui est également la moins coûteuse ; aussi les zones (z_1) et (z_3) sont alimentées par gravitaire à partir du réservoir 6 ,ce qui contribue à réduire utilisation des pompes.

État des pompes par période (1 = active, 0 = inactive)

★ **Facture d'électricité et efficacité énergétique**

Le coût total d'électricité des pompes pour un cycle de trois jours est : 65 730.30 DA , reflétant une gestion optimisée de l'utilisation des pompes en fonction des périodes tarifaires. Le modèle a favorisé les périodes (p_1) à (p_3), où l'énergie est moins coûteuse, tout en limitant strictement le recours à la période (p_4), identifiée comme période de tarification de pointe. L'utilisation d'une formule énergétique réaliste, intégrant :

- la hauteur manométrique totale (HMT) de chaque pompe,
- la densité de l'eau, la gravité, le rendement énergétique ,

Le tableau 3.9 indique que la station de pompage (s.p) Aouine zraiga a un cout mensuel : 581762,75 da HT et 692497,67 DA TTC ; cela en fait le poste le plus énergivore du réseau ,representant près de 48,6 % du cout totale HT (1196009.28DA) pour l'ensemble des ouvrages. Ce cout eleve s'explique par : la frequence de fonctionnement (pompage continu ou quasi continu pour alimenter les reservoirs et zones en aval) .

le diagramme a barre en dessous représente l'optimisation des couts energitique des pompes ((p_1) a (p_6)) avant et après l'optimisation.

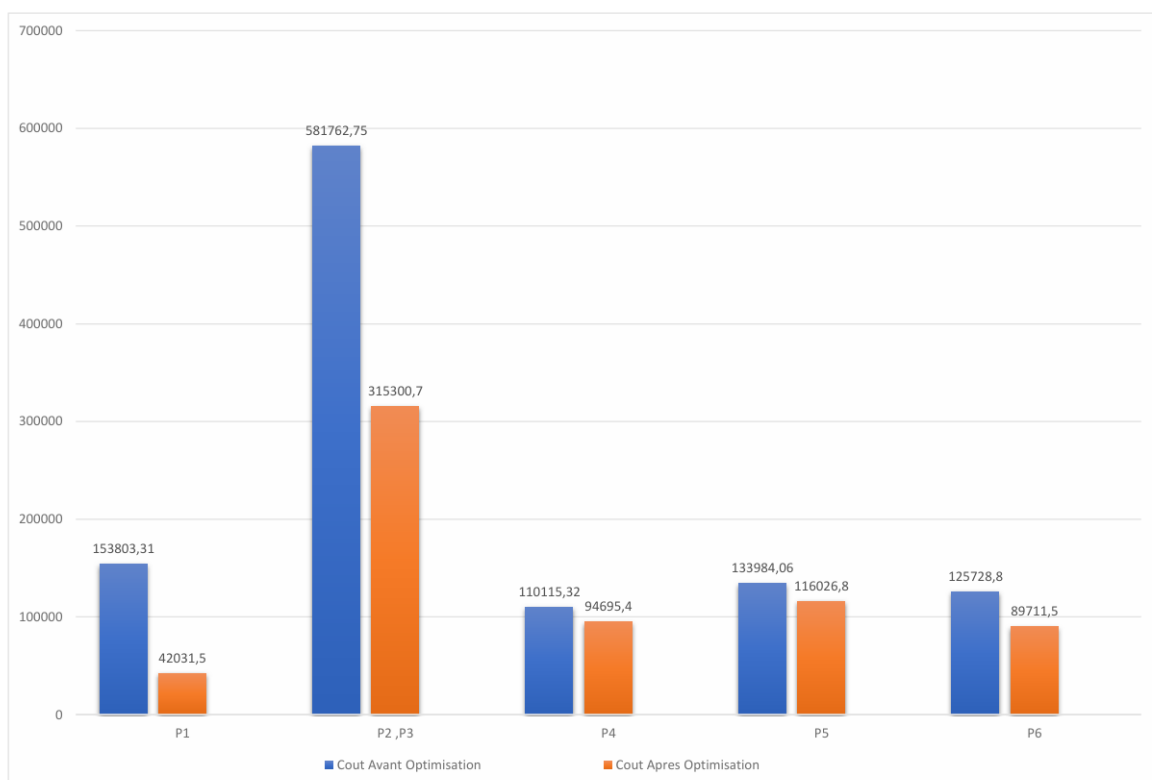


FIGURE 4.1 – Comparaison des couts des pompes avant et après l'optimisation.

- Nous remarquons que les pompes (p_2) et (p_3) qui sont installées a la station de ouin

zraiga ne fonctionnent que dans la période 1 et la période 2 d'une façon alternative. Le coût représenté par un cycle de 3 jour pour les pompes (p_1) et (p_2) :

— 15490.30 ET 16039.77 = 31530,07 DA,

alors pour 30 jours :

— 31530,07 *10 = 315300,7 DA

Cela implique l'économie mensuel est :

581762,75 -315300,7=266462,68 DA Réduction de 45,80 %.

— Nous remarquons aussi que les pompes (p_4), (p_5) et (p_6) qui sont installées respectivement dans les forages (chania 1 ; chania 2 et mouguerien) ne fonctionnent que dans la période 1 et la période 2 ,la réduction pour chaque pompes :

* le coût de (p_4) : a une réduction de 15419,92 (soit 14 %)

* le coût de (p_5) : a une réduction de 17 957,26 (soit 13,4 %)

*le coût de (p_6) : a une réduction de 36 017,3 (soit 28,64 %)

— Nous remarquons que la pompes (p_1) qui est installée a la station de Hasnaoua ne fonctionne que dans la période 1 le cout mensuel devient 42031,5 DA donc une réduction de 72,67% .

*** le volume total d'eau distribué**

La quantité totale d'eau distribuée est de 46 300 m³, ce qui correspond exactement à la somme des besoins exprimés par les quatre zones .Cette distribution montre que le modèle assure la satisfaction complète de la demande, tout en respectant les contraintes physiques et topologiques du réseau.

*** Distribution par zone**

la répartition de l'eau montre une gestion efficace des ressources hydrauliques, exploitant intelligemment la topologie réseau :

— Les réservoirs (r_4) et (r_6) alimentent les zones (z_1) et (z_3), avec une répartition maîtrisée selon les périodes.

- Le réservoir (r_5) est dédié à la zone (z_2), ce qui simplifie sa gestion.
- Le réservoir (r_3) dessert exclusivement (z_4), assurant un flux concentré.

La variable binaire z_active garantit qu'une zone n'est alimentée que pendant une seule période, ce qui permet une distribution ciblée, sans superposition inutile, et favorise la régularité dans l'utilisation des ressources.

★ Contraintes du réseau respectées

Le modèle respecte scrupuleusement les contraintes de structure et de logique réseau :

- Aucun transfert d'eau n'a été effectué depuis un réservoir vers une zone non connectée, assurant la cohérence topologique du système.
- L'équilibre hydrique entre les volumes pompés et les volumes distribués est maintenu à ± 5 pour chaque réservoir, garantissant une stabilité opérationnelle du réseau.
- Les débits limites des pompes sont respectés, évitant toute surcharge.

Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons mis en œuvre le modèle mathématique élaboré précédemment en le traduisant sous forme de programme Python, notamment grâce à la bibliothèque PuLP dédiée à la programmation linéaire. Cette implémentation a permis d'analyser les différentes stratégies de gestion de la distribution d'eau, en tenant compte des contraintes techniques et économiques du réseau. Malgré certaines difficultés initiales liées à la faisabilité du modèle avec des contraintes très strictes, des ajustements (comme la relaxation de certaines contraintes et la modification des paramètres de demande pour les tests) ont permis d'obtenir des solutions viables. Les résultats obtenus montrent la pertinence du modèle proposé pour optimiser à la fois la consommation énergétique et l'équité de distribution entre les zones. Ces travaux constituent une base solide pour envisager des applications concrètes dans des systèmes réels de gestion des ressources hydriques, tout en soulignant l'importance d'une modélisation précise et d'une analyse de sensibilité pour les paramètres clés.

Conclusion Final

Ce projet de fin d'étude en recherche opérationnelle a permis d'aborder un problème crucial dans la gestion des réseaux de distribution d'eau potable, en particulier dans la ville de Bordj Bou Arréridj. À travers une approche méthodique combinant modélisation mathématique et programmation linéaire, nous avons développé un cadre d'optimisation visant à résoudre deux défis majeurs : la minimisation des coûts énergétiques liés au pompage et l'équité de distribution entre les différentes zones de la ville.

Principales réalisations :

1. **Modélisation mathématique** : Nous avons formulé un modèle linéaire prenant en compte les contraintes techniques (capacités des pompes, besoins des zones, périodes de distribution) et économiques (coûts énergétiques différenciés selon les heures creuses et pleines). Ce modèle a permis de traduire le problème réel en équations exploitables numériquement.

2. **Implémentation informatique** : Grâce à la bibliothèque PuLP en Python, nous avons automatisé la résolution du problème d'optimisation, en testant différentes configurations pour aboutir à une solution réalisable. Les ajustements apportés, comme l'assouplissement des contraintes et l'introduction d'une tolérance de stockage, ont été essentiels pour garantir la faisabilité des solutions.

3. **Résultats significatifs** : Les résultats ont montré qu'il est possible de réduire les coûts énergétiques tout en répondant aux besoins minimaux des zones, avec une distribution optimisée évitant les périodes de pointe coûteuses. Par exemple, un coût total de 65730.30 DA a été atteint pour une distribution équilibrée entre les zones.

Limites et perspectives :

- Le modèle repose sur des hypothèses simplificatrices, comme l'absence de stockage inter-journée ou la linéarisation des coûts. Une version future pourrait intégrer des dynamiques plus complexes, comme des variations saisonnières de la demande ou des contraintes environnementales.

- L'utilisation de solveurs plus performants (comme Fico Express) pourrait améliorer l'efficacité des calculs pour des réseaux plus étendus.

- Une collaboration avec les gestionnaires locaux permettrait d'affiner les données et de valider les solutions proposées dans un contexte opérationnel.

-Améliorer les résultats du programme on élaborant un plan de distribution par cité .

Bibliographie

1. Mr.LAMARI Latamane et Mr DABEL Rezki. :étude du réseau DAEP des six village de la commune de CHAABET ELAMEUR (boumerdes) aduction et distribution .memoire de fin étude .universite Abderrahmane Mira de bejaia_2018.
2. Mr LEFKIR ABDELOUAHAB. :Contribution a l'optimisation des réseaux de distribution d'eau .mémoire de magistère .ecole nationale polytechnique_2000.
3. Mr LYES BELKASMI. :Contribution à l'optimisation des réseaux de distribution d'eau en optant la méthode des algorithmes génétiques.École nationale polytechnique _2003.
4. Mr MAHBOUB ABDELLATIF. :Réduction des débits de fuites dans un réseau de distribution d'eau potable par l'optimisation du contrôle de la pression via la modélisation hydraulique et les algorithmes génétiques _2015.
5. Mdm ZINEB NOUMIR. :Étude de la qualité de l'eau potable dans un réseau de distribution par apprentissage statistique.Ecole doctorale sciences pour l'ingenieur (troyes,aube)_2012
6. Mr lamari latmane et Mr dabel rezki. :Etude du reseau d'AEPdes six villages de la comune de chaabet el ameur (boumerdes) adduction et distribution.Universite de bejaia_2018
7. Mr GUELMINE aissam et Mr DJAHNINE lyazid.Etude du reseau d'alimentation en eau potable du nouveau pole urbain « sidi boudrahem » commune de bejaia.Universite abderrahmane mira de bejaia.2022
8. Mr MASMOUDI Rachid.Etude de la fiabilite des systemes de distributions d'eau potable en zones arides cas de la region de biskra.unuversité Mohamed khider - biskra.2009
9. Mr AMMOUCHE ,Messaoud. :Detection des fuites par Step-teste dans le reseau d'aep cas du secteur au niveau de la willaya de bouira.universite Akli mphand oulhadj -baira.2018
10. Mr KHELIL ,Mohamed ElAmine.Sig et modelisatin du réseau d'aep de la ville de Sidi Belabbes.Université Ecole national polytechnique –alg.2005

11. Mr Richa Boualem. Impact de la modulation de la pression d'un reseau de distribution d'eau potable sur les ressources en eaux. Ecole nationale polytechnique alger. 2008
12. Mr HEBBAZ Walid. Impact de l'integration des sources distribuées dans les réseaux de distribution. Université Mohamed khider -biskra. 2015
13. Des informations de l'ADE de bordj bou arreridj.
14. Srinath, K.R. .python-The Fastest Growing Programming language. international Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), (2017). <http://www.irjet.net>
15. Mitchell, Stuart, Michael O'Sullivan, and Iain Dunning. PuLP : A Linear Programming Toolkit for Python. Stuart Mitchell Consulting & The University of Auckland, 2011. Web. <http://www.coin-or.org/PuLP/>
16. D. Bertsimas and J. N. Tsitsiklis, Introduction to linear optimization. Belmont, MA : Athena Scientific, 1997.
17. Mlle Smah Lisa et Katia Imerzoukene. résolution d'un problème de programmation linéaire en nombres entiers par la methode de Branch and Bound .Memoire de master ,université mouloud mammeri de tizi ouzou. 2020.