



AVANT-PROPOS

« Agir d'abord, rectifier ensuite s'il y a lieu, reprendre tout à zéro s'il le faut, mais ne jamais rester inactif à la recherche du parfait ».

Jean Cocteau

Dédicace

*Louange à dieu le plus puissant.
A mes très chers parents,
Aucun terme et aucune langue ne pourra exprimer mon amour et mes sentiments envers
vous.*

*A ma chère sœur,
Je ne sais comment te remercier pour tout ce que tu as fait pour moi.*

A toute ma famille.

*A mon autre, ma femme,
Tu es le soleil de mes jours ; tu les éclaires, tu les prolonges.*

*A mes chers amis,
Pour tout le soutien que vous m'avez offert, je vous dis MERCI.*

A tous ceux qui m'aiment, je dédie ce travail...

Youssef

Dédicace

*Louange à dieu le plus puissant.
A mes très chers parents,
Aucun terme et aucune langue ne pourra exprimer mon amour et mes sentiments envers
vous.*

*A mes chers frères,
Je ne sais comment vous remercier pour tout ce que tous avez fait pour moi.*

A toute ma famille.

*A mon autre,
Tu es le soleil de mes jours ; tu les éclaires, tu les prolonges.*

*A mes chers amis,
Pour tout le soutien que vous m'avez offert, je vous dis MERCI.*

A tous ceux qui m'aiment, je dédie ce travail...

Abdelilah

Remerciement :

Au terme de ce travail, il nous est agréable de nous acquitter d'une dette de reconnaissance auprès de toutes les personnes dont l'intervention au cours de ce stage, a favorisé son aboutissement.

On tient à remercier tout particulièrement M.OUAZAR Driss notre Professeur et encadrant à l'EMI, M.HAJJI Mustapha et M.EL GHELBAZOURI Abdelilah nos encadrants à l'ONEP, M.TARMIDI, M.ZARKAL et M.EL BASRI à l'ONEP.

On tient également à présenter nos profonds respects et reconnaissance à M.ALLOUCH Abdellah et M.SEGTEN Ahmed pour leurs conseils et suivi.

Par la même occasion, j'en profite pour exprimer mes vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce travail.

Résumé

Si le pompage est le pôle le plus gourmand en kWh, c'est également celui sur lequel il y a le plus gros potentiel d'optimisation. La consommation d'énergie journalière de la station de pompage du Bouregreg varie entre 160 000 kWh et 210 000 kWh.

Le présent travail vise l'élaboration d'un programme à même de constituer un outil pour optimiser la gestion de la station de pompage du Bouregreg. Le programme développé à l'aide du solveur Oracle Crystal Ball & Decision Optimizer détermine le fonctionnement optimal de la station de pompage permettant de réduire le coût de la facture énergétique, en fonction du mode tarifaire souscrit tout en s'assurant que la demande en eau est satisfaite en permanence et en respectant les conditions aux limites des ouvrages de stockage.

Notre étude a été complétée par la construction d'un modèle numérique du réseau étudié sous le logiciel WaterGEMS, qui est un outil de modélisation de la famille Bentley, pour pouvoir simuler les différents scénarios de fonctionnement.

Ce travail est une tentative de recherche d'une méthodologie pour déterminer le planning optimal de fonctionnement d'une station de pompage.

Abstract

When pumping the pole as intensive energy consumption, it is also one on which there is the biggest potential for optimization. Daily energy consumption of the pump station Bouregreg varies between 160,000 and 210,000 kWh.

The present work aims to develop a program able to be a tool to optimize the management of the pumping station Bouregreg. The program developed using the Solver Oracle Crystal Ball Decision Optimizer & determines the optimal operation of the pumping station to reduce the cost of energy bills, while ensuring that water demand is met at all times and respecting the boundary conditions of storage structures.

Our study was completed by constructing a numerical model of the network studied under WaterGEMS software, in order to simulate various operating scenarios.

This work is an attempt to find a methodology to determine the optimal schedule of operation of a pumping station.

Sommaire :

Avant-propos	1
Introduction	11
I. Présentation de l'Office National de l'Eau Potable	15
1. Généralités	15
2. Nouvelles orientations stratégiques	16
3. Chiffres et indicateurs	16
4. Réorganisation de l'Office et renforcement de la décentralisation.....	18
5. Structure.....	18
6. Organigramme de la Direction de la Côte Atlantique (DRC)	19
7. Importance de la direction régionale côte atlantique (DRC)	19
II. Problématique de l'étude et objectifs du travail	22
1. Position du problème	22
2. Objectifs de l'étude.....	23
III. Rappel en Hydraulique	25
1. Le transport des fluides dans les conduites.....	25
1.1- La théorie de Bernoulli.....	25
1.2- Expression des pertes de charge linéaires.....	26
1.3- Expression des pertes de charges singulières	27
2. Les pompes	28
2.1- Pompes centrifuges.....	28
2.2- Caractéristiques d'une pompe	30
2.3- Courbe de réseau	31
2.4. NPSH.....	34
2.5. Association de pompes.....	35
III. Description du système de production d'eau potable existant	38
2.1. Preambule.....	38
2.2. Présentation	39
3. Découpage du réseau en sous-réseaux fonctionnels	40
3.1 Barrage - Bou Regreg.....	40
3.2. Fouarat Nord.....	47
3.3. Rabat 2 - Embassadors	47
3.4. Rabat 1 – Ville.....	48
3.5. Fouarat sud	49
3.6. BR2.....	52
3.7. BR1 (BR à BC2).....	53

3.8.	BR1 (BC2 à BC4).....	54
3.9.	BouRegreg-Sale.....	55
3.10.	Reseau Interne	56
3.11.	R 50000	56
3.12.	Ben Slimane	57
3.13.	BC5-Bouznika.....	58
3.14.	LA Gazelle.....	59
3.15.	Fedalte (Ain Tekki).....	59
3.16.	Tit Mellil.....	60
3.17.	Médiouna.....	61
3.18.	Takadoum - Rabat.....	62
3.19.	Romani	62
4.	Equipements hydromécaniques	63
IV.	Modélisation du réseau d'adduction du bouregreg.....	74
1.	Les modèles de représentation dans le domaine de l'alimentation en eau potable	74
1.1.	Modèles de représentation des équipements.....	74
1.2.	Modèles de simulation.....	74
1.3.	Modèles pour l'analyse du fonctionnement hydraulique.....	74
2.	But de la modélisation	75
3.	Méthodologie.....	75
4.	Les données de la modélisation	75
5.	Choix et présentation du logiciel de modélisation	76
5.1.	Présentation du logiciel WaterGems.....	76
5.2.	Potentialité du logiciel.....	77
6.	Schématisation du réseau d'adduction d'eau brute du BouRegreg.....	79
7.	Phasage et logigramme du processus de modélisation	80
8.	La campagne des mesures.....	82
8.1.	Les points de mesures.....	82
8.2.	Mesures Réalisées	83
9.	Calibrage du modèle	84
9.1	Calibrage automatique avec Darwin Calibrator	85
9.2.	Les algorithmes évolutionnaires (Algorithme génétique)	85
9.3.	Calibrage des débits et des pressions.....	86
9.4.	Déroulement du calibrage par Darwin Calibrator	89
9.5.	Formules et critères de calibrage par Darwin Calibrator.....	93
9.6.	Résultats du calibrage des pressions et des débits	94
9.7.	Calibrage d'énergie	96
9.8.	Résultat du calibrage d'énergie :	97
9.9.	Application du modèle de simulation.....	99

V. Optimisation du système de production du Bouregreg	101
1. Introduction.....	101
2. Hypothèses de travail.....	101
3. Formulation générale du problème	102
4. Formulation du problème.....	102
4.1 Modèle de la fonction objectif.....	103
4.2 Modèle des variables	103
4.3. Modèle de contraintes.....	104
5. Outils et données de travail.....	107
5.1 Volume des réservoirs.....	107
5.2 Consommation dans chaque réservoir	108
5.3. Tarif adoptés	109
6. Résolution :.....	110
6.1. 1er Scénario.....	110
6.2. Comparaison des résultats d'optimisation avec la simulation réelle	115
6.3. 2 ^{ème} Scénario.....	115
6.4. Discussions des résultats	116
Conclusions.....	117

liste des figures :

Figure 1 : Organigramme modernisateur.....	18
Figure 2 : Organigramme de la direction de la cote atlantique	19
Figure 3: schéma d'une pompe centrifuge.....	29
Figure 4 : fonctionnement d'une pompe centrifuge électrique.....	30
figure 5: courbe caractéristique et courbe de rendement.....	31
FIGURE 6: courbe de réseau.....	33
Figure 7 : point de fonctionnement du système.....	33
FIGURE 8 : caractéristique du réseau pour trois configurations d'élévation d'eau	34
FIGURE 9 : pompes identiques en parallèles.....	35
FIGURE 10 : caractéristiques de deux pompes fonctionnant en serie.	36
FIGURE 11 : Schéma de principe du système de production de BOU REGREG	39
FIGURE 12 : schéma simplifié du réseau barrage-bouregreg.....	40
FIGURE 13 : schéma synoptique de la station de pompage	43
FIGURE 14 : Groupes de pompage constituant la station de pompage du bouregreg.	43
FIGURE 15 : Conduites d'aspiration.	44
FIGURE 16 : Conduite de refoulement.....	44
FIGURE 17 : courbes de pompage d'eau brute en fonction du nombre et du type de pompe en service et de la hauteur d'eau dans le barrage.	45
FIGURE 18 : schéma simplifié du réseau Fouarat Nord.....	47
FIGURE 19 : schéma simplifié du réseau Rabat 2.....	47
FIGURE 20 : schéma simplifié du réseau Rabat.....	48
FIGURE 21 : schéma simplifié du réseau Fouarat Sud.....	51
FIGURE 22 : schéma simplifié du réseau BR2.....	52
FIGURE 23 : schéma simplifié du réseau BR1 (BR à BC2).....	53
FIGURE 24 : schéma simplifié du réseau BR1 (BC2 à BC4)	54
FIGURE 25 : schéma simplifié du réseau Bouregreg-Salé	55
FIGURE 26 : shéma simplifié du réseau interne	56
FIGURE 27 : schéma simplifié du réseau R 50 000	56
FIGURE 28 : schéma simplifié du réseau Ben Slimane	57
FIGURE 29 : schéma simplifié du réseau BC5-Bouznika	58
FIGURE 30 : schéma simplifié du réseau La Gazelle.....	59
FIGURE 31 : schéma simplifié du réseau Fedalat.	60
FIGURE 32 : schéma simplifié du réseau Tit Mellil	61
FIGURE 33 : schéma simplifié du réseau Médiouna	61
FIGURE 34 : schéma simplifié du réseau Takadoum	62
FIGURE 35 : schéma simplifié du réseau Romani	62
Figure 36 : Schématisation du système d'adduction du BouRegreg.....	80

Introduction

La sécurisation de la région de la côte atlantique en matière d'eau potable est un enjeu majeur pour les décideurs. Cette région qui abrite la majorité des activités industrielles et commerciales du Maroc, connaît une concentration démographique très importante (soit le un tiers de la population marocaine).

La région attire des projets structurants tels que l'aménagement de la vallée du Bouregreg et la nouvelle ville de Tamesna. Cette situation entraîne un accroissement continu de la demande en eau potable et industrielle.

Ces grandes agglomérations rendent leurs l'alimentation en eau potable une tâche difficile du point de vue approvisionnement, planification et surtout de la gestion et l'exploitation de ces ouvrages.

Cette zone est alimentée par le grand complexe du BouRegreg géré par l'Office National de l'eau Potable « ONEP », depuis le barrage S.M.B.A.

L'acheminement de l'eau brute vers le point de traitement nécessite un pompage permettant l'alimentation en permanence de la station de traitement.

La pompe représente l'un des éléments les plus importants dans une station de pompage comme son nom l'indique.

La station de pompage du Bouregreg est composée de neuf groupes de pompage tournés par des moteurs d'une puissance unitaire de 2,2MW pour un petit groupe (PG) et 4MW pour un grand groupe (GG), leur fonctionnement engendre une consommation d'énergie électrique très importante, elle peut atteindre des fois une valeur de 220 000 KWh /j. De ce fait elle nécessite une bonne gestion afin d'optimiser l'exploitation.

En tenant compte du fait que le prix de l'énergie électrique est variable suivant la période du jour en présence des différentes tranches de tarification , il faut procéder à un pompage optimal qui permet à la fois la réduction du coût de production et qui tient compte d'une part de l'ensemble de contraintes qui se résument dans la satisfaction de la demande en eau et le respect des conditions au limites des ouvrages de stockage et de traitement .

Une décision de choix de stratégie de pompage, fait intervenir beaucoup de paramètres .En effet la définition de cette stratégie fait essentiellement appel aux techniques de la recherche opérationnelle, et utilise des procédures de calcul essentiellement algorithmiques.

Notre étude présente une méthodologie de résolution du problème d'optimisation du coût énergétique au niveau de la station de pompage du Bouregreg, le problème est non-linéaire, à caractère combinatoire.

Ceci a été fait par le développement d'un modèle d'optimisation qui permet de trouver les meilleures configurations de pompage à réaliser en connaissant la période de simulation fixée dans notre cas à une journée type (24h), les caractéristiques des groupes de pompage, le nombre de réservoirs et leurs caractéristiques, leurs conditions aux limites et les modulations des distributions au niveau de ces réservoirs.

Puis, compte tenu des résultats obtenus lors de la phase d'optimisation, nous avons cherché à pousser la réflexion vers un fonctionnement du système avec des pompes à vitesse variable.

Maintenant que nous avons présenté l'idée générale de notre projet, nous allons présenter la démarche que nous avons envisagée en indiquant le contenu des différentes parties qui constituent cet ouvrage.

Le premier chapitre consistera à faire une présentation de l'Office National d'Eau Potable (ONEP) à l'échelle nationale, ainsi que de la Direction de la Côte Atlantique qui a été le lieu du déroulement de notre stage.

Par la suite ,un deuxième ou nous allons présenter la problématique liée à notre sujet ainsi que les objectifs attendus ,et avant d'entamer les étapes permettant la réalisation du projet , nous allons rappeler brièvement les notions de base en hydraulique qui traitent le transport des liquides mais aussi l'entraînement des pompes.

Dans la phase suivante, pour un premier temps, nous allons procéder à la description du réseau global qui permet de desservir la région de la côte Atlantique pour avoir une vue du fonctionnement général de ce système, par la suite une bonne partie sera consacré à la modélisation hydraulique.

Ce modèle est une référence pour simuler le fonctionnement du système à partir d'un scénario bien défini pour permettre de prédire les variations des paramètres du système notamment les pressions, les débits, les rendements des groupes de pompage et le coût énergétique de fonctionnement.

Rappelons que le modèle de simulation afin de le rendre utilisable il a fallu auparavant son calibrage, cette opération consiste à faire ajuster les paramètres du modèle pour qu'il reflète le fonctionnement réel du système.

Ensuite, nous allons entamer la phase d'optimisation qui consiste à la recherche des configurations optimales des groupes de pompage. Après la formulation du problème, nous exposons les principales étapes de calcul du modèle proposé. Une journée de fonctionnement de notre système hydraulique fonctionnant à la demande a été utilisée pour valider les performances du modèle.

Enfin, sur la base des résultats obtenus par le modèle d'optimisation, une phase de discussion sur la présence des pompes à vitesse variable sera abordée afin de voir la contribution de ces dernières à la réduction du coût de production.



Chapitre I

Présentation de l'Office National de l'Eau Potable

I. PRESENTATION DE L'OFFICE NATIONAL DE L'EAU POTABLE

1. GÉNÉRALITES

Créé 1972, l'ONEP est un établissement public à caractère industriel et commercial doté de la personnalité civile et de l'autonomie financière.

Acteur principal dans le secteur de l'eau potable et de l'assainissement, les missions principales de l'Office vont de la planification de l'approvisionnement en eau potable jusqu'à sa distribution en passant par les phases d'études, de conception, de réalisation, de gestion, d'exploitation des unités de production, de distribution et d'assainissement liquide et enfin du contrôle de la qualité des eaux jusqu'à la protection de la ressource.

D'importants investissements ont pu être réalisés durant les trois dernières décennies pour assurer les infrastructures de base en matière d'eau potable.

Nos Missions :

- Planification de l'approvisionnement en eau potable (AEP) à l'échelle nationale
- Production de l'eau potable
- Distribution de l'eau potable pour le compte des collectivités locales
- Gestion de l'assainissement liquide pour le compte des C.L
- Contrôle de la qualité des eaux

Nos Axes Stratégiques :

- Pérenniser, Sécuriser et renforcer l'AEP en milieu urbain
- Généraliser l'accès à l'eau potable en milieu rural
- Rattraper le retard en matière d'Assainissement liquide

Notre approche :

- Assurer une veille technologique
- Intégrer la composante environnement
- Impliquer le citoyen dans l'économie et la protection des ressources en eau.

Nos atouts :

- Une entreprise publique à haute expertise
- Un personnel compétent
- Des partenariats nationaux et internationaux en expertise et **R&D**

2. NOUVELLES ORIENTATIONS STRATEGIQUES

Les efforts déployés par l'ONEP durant les trois dernières décennies ont permis d'améliorer le niveau de l'approvisionnement en eau potable en milieu urbain. Aujourd'hui l'Office s'est fixé une nouvelle stratégie visant la généralisation de l'accès à l'eau potable à l'ensemble des citoyens et l'intervention dans le secteur de l'assainissement liquide dans une vision globale et intégrée du cycle de l'eau.

Cette nouvelle stratégie qui s'inscrit dans les orientations de S.M. LE ROI MOHAMMED VI confirmée dans son discours d'ouverture de la 9ème session du Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat à Agadir le 21 Juin 2001, s'articule autour des trois axes suivants:

- 1- Généralisation de l'accès à l'eau potable.
- 2- Le renforcement du rôle de l'office dans le domaine de l'assainissement liquide .
- 3- Maintien des acquis.

3. CHIFFRES ET INDICATEURS

Indicateurs Commerciaux

	Unité	2009
Chiffres d'affaires	Millions DH	3 489
Délai client global	Mois	2,8
Abonnés	Nombre	1 406 918

Investissement

	Unité	2009	%
Investissements	Millions DH	3 754	100
Urbain	Millions DH	1 616	43
Rural	Millions DH	1 360	36
Assainissement	Millions DH	778	21

Indicateurs Financiers

	Unité	2009
Résultat net	Millions DH	123,6
Valeur ajoutée	Millions DH	2 369,3
Excédent brut d'exploitation (EBE)	Millions DH	1 339,2

Activité Eau Potable

	Unité	2009
Production	Millions m3	861
Débit équipé	M3/S	49,3
Centres de distribution	Nombre	559
Taux desserte rural	%	89

Activité Assainissement

	Unité	2009
Station d'épuration	Nombre	33
Réseau collecte	Km	4 693
Capacité de traitement / Jour	m3	125 374
Centres d'intervention	Nombre	70
Population concernée	Millions habitants	3,2

Ressources Humaines

	2009	%
Effectif du personnel	7 125	100
Cadres supérieurs	1 518	21
Cadres Maîtrise	2 005	28
Cadres d'exécution	3 602	51

Programme d'investissement 2011-2015

(Chiffres exprimés en millions de Dirhams)

Désignation	2011-2015
Eau potable urbaine	13 343
Eau potable rural	5 885
Assainissement Liquide	6 666
Total Général	25 894

4. REORGANISATION DE L'OFFICE ET RENFORCEMENT DE LA DECENTRALISATION

La réorganisation de l'office a été concrétisée par l'adoption d'un nouvel organigramme modernisateur, présenté ci-après.

Cet organigramme cadre avec les axes stratégiques et les principes organisationnels retenus : décentralisation et recentrage du central sur le pilotage et l'assistance.

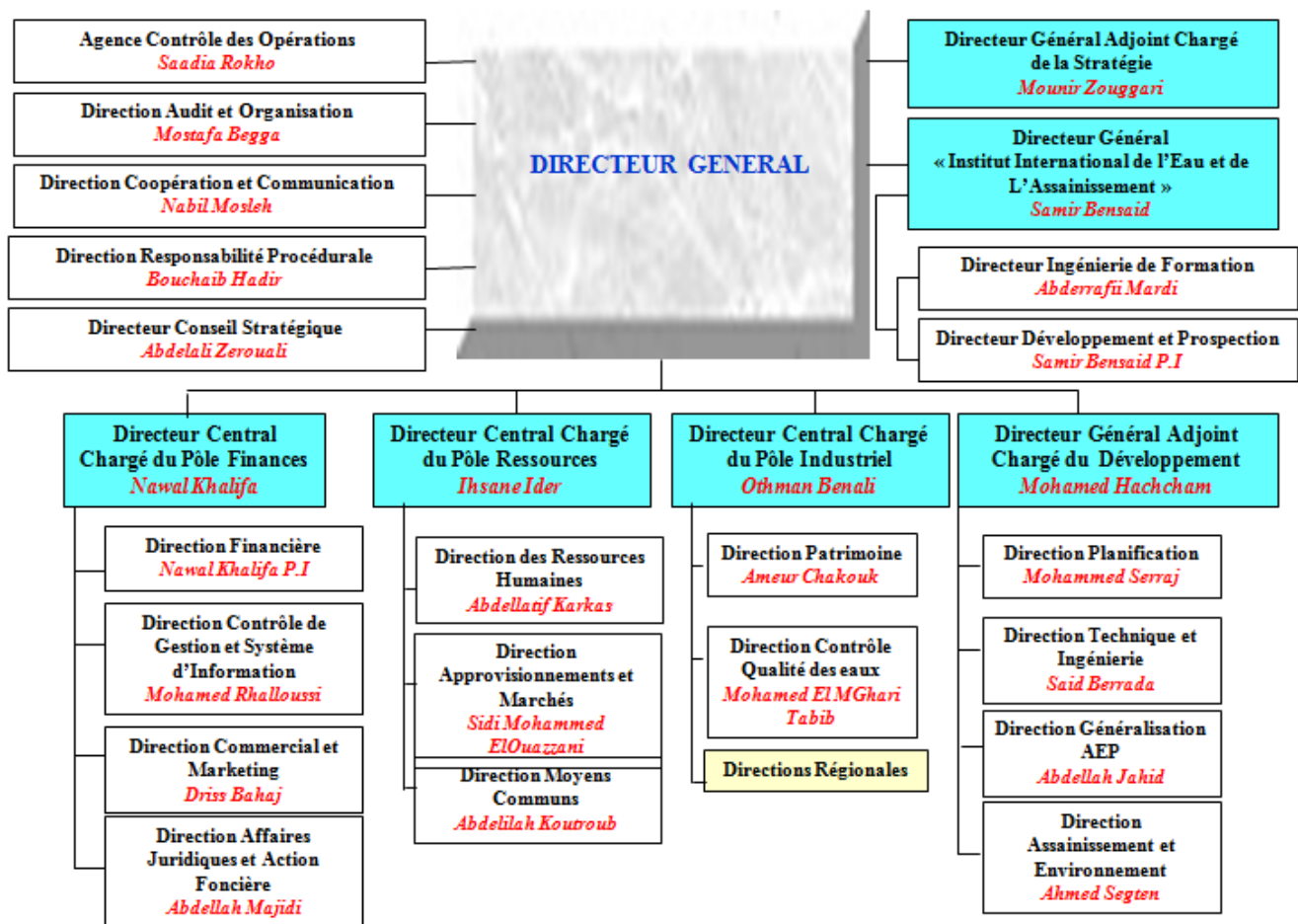


Figure 1 : Organigramme modernisateur.

5. STRUCTURE

La direction régionale possède des divisions fonctionnelles au niveau du siège :

- La division développement prépare la planification, programme et exécute les opérations de développement dans la région .

- La division Industrielle est chargée de consolider, coordonner, renforcer et améliorer l'exploitation et la maintenance des installations.
- La division support assure les tâches relatives à la comptabilité générale, gère les ressources humaines les moyens logistiques et les achats de la région.

6. ORGANIGRAMME DE LA DIRECTION DE LA COTE ATLANTIQUE (DRC)

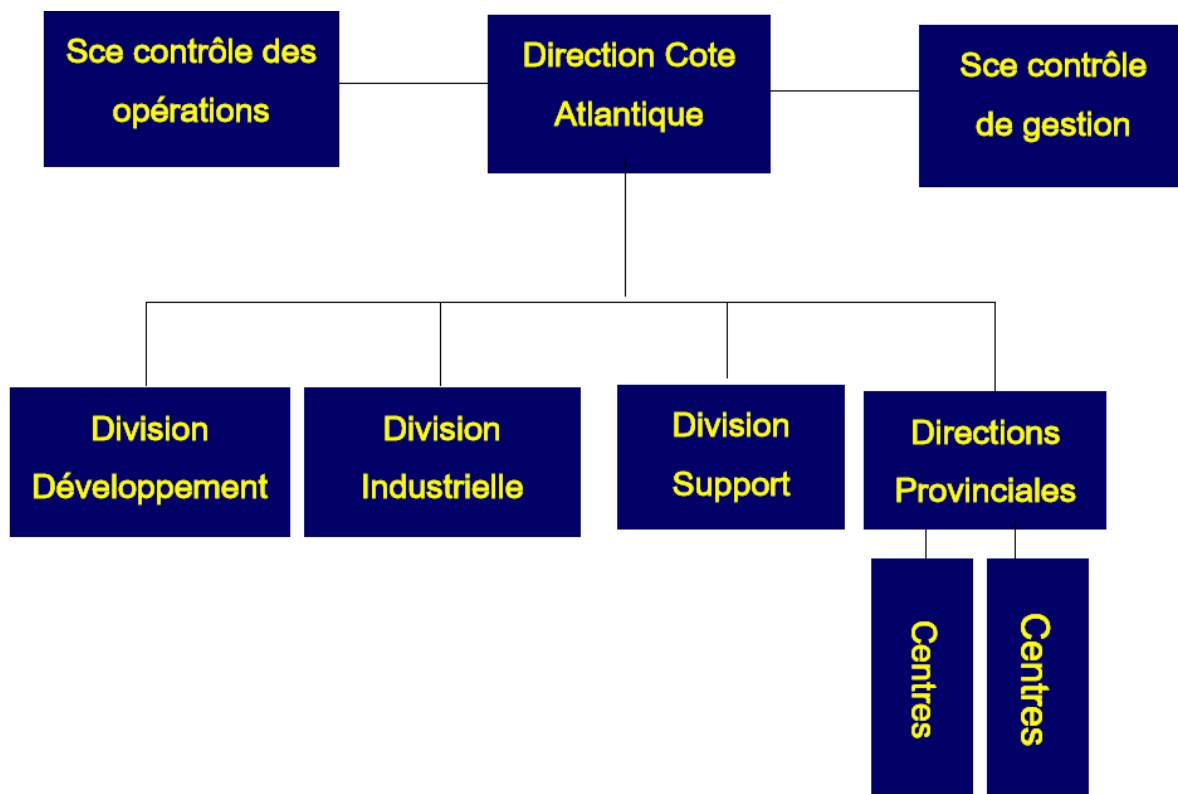


Figure 2 : Organigramme de la direction de la cote atlantique .

7. IMPORTANCE DE LA DIRECTION REGIONALE COTE ATLANTIQUE (DRC)

Trois indicateurs sont donnés ci-après pour illustrer l'importance de la direction régionale de la Côte Atlantique au sein de l'ONEP :

- **La situation géographique et population** : Elle s'étend du Nord de Rabat jusqu'au sud de la ville d'El Jadida regroupant une population de 7,3 Millions d'habitants (recensement 2004) soit près de 25% de la population totale du Royaume (50% de sa population urbaine).

- **Activité économique** : 90 % de l'activité économique du pays est concentrée dans cette zone;
- **Chiffre d'affaire** : Elle contribue à concurrence de plus que 50 % du chiffre d'affaire de l'ONEP. De ce fait la direction de la côte atlantique joue un rôle très important dans le maintien de l'équilibre des comptes globaux d'exploitation de l'office.

Compte tenu de ce qui précède, la DRC occupe une place importante au sein de l'Office tant, sur le plan capacité de production par le biais de 2 grands complexes adducteurs (Bouregreg : $9 \text{ m}^3/\text{s}$ et Daourat : $6 \text{ m}^3/\text{s}$) que sur les plans économiques et financiers. De ce fait, les gains réalisés par la mise en place au niveau de la DRC des divers chantiers lancés par la direction générale auront un impact important sur les résultats finals de l'office.

Chapitre II

Problématique de l'étude et objectifs du travail

II. PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS DU TRAVAIL

1. POSITION DU PROBLEME

Les réseaux d'eau potable sont de plus en plus souvent équipés de système de télégestion, des installations et des commandes. L'accroissement de ces équipements accompagne généralement une augmentation de leur complexité.

Au cours d'une journée, il est difficile de choisir les consignes à donner aux différents organes d'un réseau d'eau potable.

La complexité de cette gestion vient aussi de la prise en compte par les gestionnaires des réseaux de deux objectifs contradictoires qui sont la sécurité d'approvisionnement et la minimisation des coûts de production et de transport de l'eau .

La côte atlantique CASA-RABAT est la plus grande zone au Maroc par sa population (environ 1/3 de la population marocaine) et aussi ses activités économiques et industrielles. Elle s'étend de la capitale du Royaume Rabat, la capitale économique Casablanca qui représente le poumon de l'économie marocaine, Salé, Mohammedia et les petites villes intermédiaires, sans oublier les grands projets lancés par l'Etat dans cette région tels que la nouvelle ville de Tamesna et l'aménagement de la vallée du BouRegreg. Ces grandes agglomérations rendent leur alimentation en eau potable une tâche difficile du point de vue approvisionnement, planification et surtout de la gestion et l'exploitation de ces ouvrages. Cette zone est alimentée par le grand complexe du BouRegreg géré par l'Office National de l'eau Potable « ONEP ».

Les chiffres indicateurs de la consommation en termes d'énergie montrent que le réseau étudié consomme entre 160 000KWh et 210 000KWh par jour. La plus grande part de l'électricité consommée est consacrée au fonctionnement des pompes permettant l'alimentation en permanence de la station de traitement.

Tous ces éléments ont orienté le choix du sujet de notre projet de fin d'études vers la recherche de meilleures configurations de pompage. Ce sujet correspond à une préoccupation réelle de la vie de la station de pompage. Il peut présenter une voie à la recherche de solutions purement algorithmique.

2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'optimisation des coûts énergétiques de pompage d'eau consiste à trouver des solutions pour réduire les coûts de fonctionnement annuels énergétiques de la station de pompage.

Le pilotage de la production doit prendre en compte un ensemble complexe d'objectifs et de contraintes :

- Minimiser les coûts engendrés par la consommation d'énergie des groupes de pompage.
- Satisfaire en permanence la demande en eau.
- Respecter les conditions aux limites au niveau des réservoirs de stockage et de la station de traitement.
- Assurer le bon fonctionnement du réseau.

Ce travail a pour but de présenter le développement d'un modèle d'optimisation et un modèle numérique de simulation hydraulique afin de remplir les objectifs cités ci-dessus.

Avant de pouvoir commencer à optimiser le coût énergétique, il y a tout un travail préalable de collecte de données, d'abord au bureau dans les bases de données, puis sur le terrain. Il faut également maîtriser le fonctionnement global du réseau.

Dans ce qui suit, nous allons présenter de façon détaillée la conduite de cette étude.

Chapitre III

Rappel en Hydraulique

III. RAPPEL EN HYDRAULIQUE

Toute maîtrise d'un domaine nécessite au préalable la connaissance de la théorie qui le fonde. C'est dans cet ordre d'idée que nous allons présenter ce chapitre qui traite du transport des liquides mais aussi de l'entraînement des pompes.

1. LE TRANSPORT DES FLUIDES DANS LES CONDUITES

1.1- LA THEORIE DE BERNOULLI

L'énergie hydraulique peut se présenter sous différentes formes notamment:

- Une énergie de pression caractérisée par la pression statique en ce point,
- Une énergie cinétique caractérisée par le carré de la vitesse d'une particule,
- Une énergie potentielle caractérisée par la cote du point considéré par rapport à une référence unique qu'on peut choisir arbitrairement.

Pour passer d'un point donné à un autre ayant un niveau d'énergie différent il faut une source extérieure qui peut soit retrancher ou ajouter de l'énergie. Dans le cas de diminution d'énergie on peut prendre l'exemple de la turbine. Pour une élévation du niveau d'énergie comme dans le cas du transport de fluide d'un bassin vers des réservoirs placés en hauteur on a recours à un système de pompage.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + E_p = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2$$

Où P_1, P_2 : Respectivement pressions au niveau initial et au niveau final (Pa)

V_1, V_2 : Respectivement vitesses d'écoulements au départ et à l'arrivée (m/s)

Z_1, Z_2 : Respectivement niveaux de départ et d'arrivée (m)

ρ : Masse volumique (kg/m^3)

g : Accélération de pesanteur (m/s^2)

Dans notre cas E_p est positif: cas du pompage.

Lors de la circulation du fluide, une partie de l'énergie est perdue du fait des frottements dans les conduites et des imperfections de trajectoire d'où les pertes de charges. En tenant compte de l'ensemble des pertes de charge on a l'expression suivante:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + E_p - \sum H_f = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2$$

$\sum H_f$: Les pertes de charge qui peuvent être linéaires ou singulières.

1.2- EXPRESSION DES PERTES DE CHARGE LINEAIRES

Les pertes de charge linéaires sont dues aux frottements entre la tuyauterie et le fluide en mouvement donc elles sont fonction de la rugosité de l'intérieur de la canalisation.

Elles sont provoquées par la viscosité du fluide réel et apparaissent lorsqu'il y a mouvement entre les diverses particules des couches voisines du fluide se déplaçant avec des vitesses différentes.

Des abaques nous donnent un coefficient de frottement f en fonction de la rugosité relative (Rapport de la rugosité \mathcal{E} par le diamètre intérieur D) et du nombre de Reynolds. En régime turbulent rugueux la rugosité relative seule suffit pour déterminer le coefficient de frottement car le nombre de Reynolds est suffisamment grand.

Ainsi les pertes de charge linéaires sont données par l'équation de Darcy-Weisbach :

$$H_f = f \frac{L \times V^2}{2gD}$$

L : longueur du tronçon considéré (m)

D : diamètre intérieur de la tuyauterie du tronçon considéré (m)

V : vitesse d'écoulement du fluide dans la conduite (m/s)

f : coefficient de frottement

g : accélération de la pesanteur (m/s^2)

Dans le cas d'un écoulement laminaire le coefficient de frottement peut être donné par la formule suivante :

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{Avec} \quad Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

R_e : nombre de Reynolds

μ : viscosité cinématique

ρ : masse volumique (kg/m^3)

En régime turbulent de nombreuses expériences ont permis de mettre en évidence que f dépend de:

- Du nombre de Reynolds
- De la rugosité relative ε/D

Cas des tuyaux pleinement rugueux:

Von Karman propose :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(3,7 \frac{D}{\varepsilon})$$

Cas des tuyaux lisses

L'équation de Von Karman modifiée par Prandtl est :

$$\left(\frac{1}{\sqrt{f}}\right)^{-0,25} = 2 \log(R_e \sqrt{f})^{-0,8}$$

Pour un nombre de Reynolds inférieur à 10^5 Blasius propose :

$$f = 0,316 R_e^{-0,25}$$

Pour tout type de tuyaux (lisses ou rugueux) Colbrooke et White ont établi une formule :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{R_e \sqrt{f}}\right)$$

1.3- EXPRESSION DES PERTES DE CHARGES SINGULIERES

Les pertes de charge singulières sont dues aux changements de direction ou de section de passage. Elles se produisent lorsqu'il y a perturbation de l'écoulement ou une présence d'obstacle.

Ainsi pour chaque type de singularité on a une perte de charge donnée par :

$$h_f = K \frac{V^2}{2g}$$

K: coefficient qui dépend de la singularité

V: vitesse du fluide dans la conduite

Généralement la détermination des pertes de charge singulières se fait au moyen d'abaques donnant la longueur équivalente de l'accessoire considéré en mètres: Ce qui ramène à un calcul de pertes de charge régulières.

Etant données toutes ces pertes de charges ajoutées éventuellement à l'élévation, le transport des fluides nécessite une source de puissance extérieure d'où l'utilisation des pompes.

2. LES POMPES

La pompe est un appareil qui communique de l'énergie hydraulique à un fluide en vue de son déplacement d'un point à un autre. Il existe une gamme très variée de pompes; des critères nous permettent de faire une classification et ils peuvent être basés sur:

- Le principe de fonctionnement
- Le domaine d'application
- La limite de pression

Selon le premier critère les pompes peuvent être classées en deux catégories :

- les pompes à déplacement positif ou pompes volumétriques: le liquide emprisonné entre les parties fixes et mobiles reçoit une poussée de ces dernières.
- les pompes à énergie cinétique: Elles utilisent le principe de la force centrifuge: le liquide est amené en rotation, ayant tendance à s'éloigner du centre de la pompe et en à sortir s'il existe un passage.

Nous étudierons les pompes centrifuges dans les paragraphes qui suivent.

2.1- POMPES CENTRIFUGES

Les pompes centrifuges sont composées d'une roue à aubes qui tourne autour de son axe, d'un stator constitué au centre d'un distributeur qui dirige le fluide de manière adéquate à l'entrée de la roue, et d'un collecteur en forme de spirale disposé en sortie de la roue appelé volute.

Le fluide arrivant par l'ouïe est dirigé vers la roue en rotation qui sous l'effet de la force centrifuge lui communique de l'énergie cinétique. Cette énergie cinétique est transformée en énergie de pression dans la volute.

Un diffuseur à la périphérie de la roue permet d'optimiser le flux sortant et ainsi de limiter les pertes d'énergie.

Deux figures sont proposées ci-dessous. La première est une coupe d'une pompe de type monocellulaire, tandis que la deuxième regroupe les différents organes constituant le groupe de pompage.

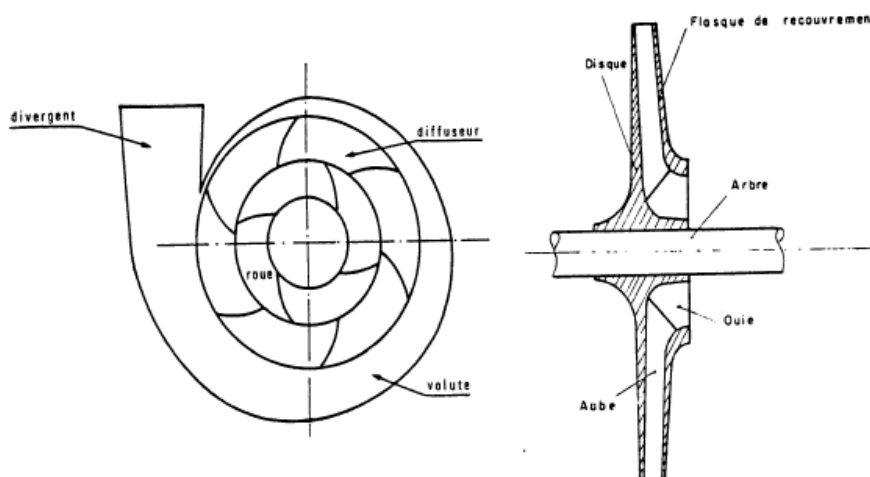


Figure 3: schéma d'une pompe centrifuge

Quel que soit le type de pompe, celle-ci est constituée de 3 parties distinctes:

- la partie moteur qui fournit la puissance nécessaire au pompage,
- l'accouplement qui transmet cette puissance à la partie hydraulique
- la partie hydraulique qui transmet cette puissance à l'eau pour la déplacer (l'aspirer et/ou la refouler).

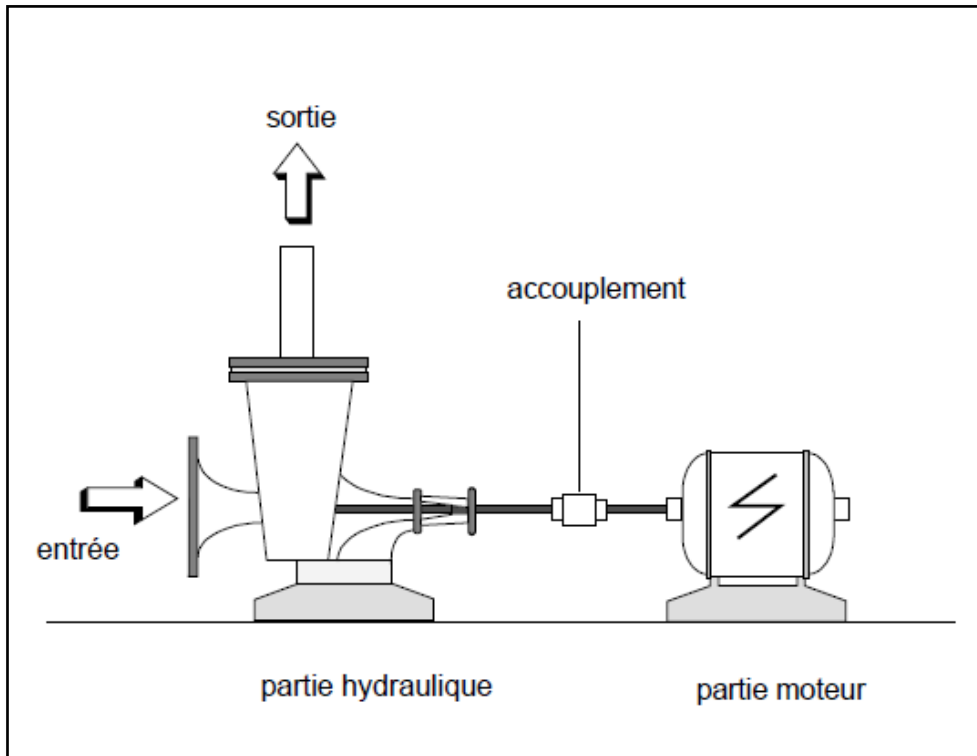


FIGURE 4 : fonctionnement d'une pompe centrifuge électrique

2.2- CARACTERISTIQUES D'UNE POMPE

D'un point de vue hydraulique, les trois principaux paramètres qui caractérisent une pompe centrifuge sont :

Le débit volumique Q ,

La hauteur manométrique H

Et son rendement η

Afin de caractériser une pompe, la hauteur manométrique et le rendement sont tracés en fonction du débit (Figure

Le point de fonctionnement se situe à l'intersection de la caractéristique de la pompe et de celle du réseau $H_{pompe} = \Delta H_{réseau}(Q)$ (voir Figure). Idéalement, la caractéristique du circuit coupe la courbe de la pompe pour un débit qui correspond à son rendement maximal. Une dispersion de 25% autour de ce point est cependant acceptable.

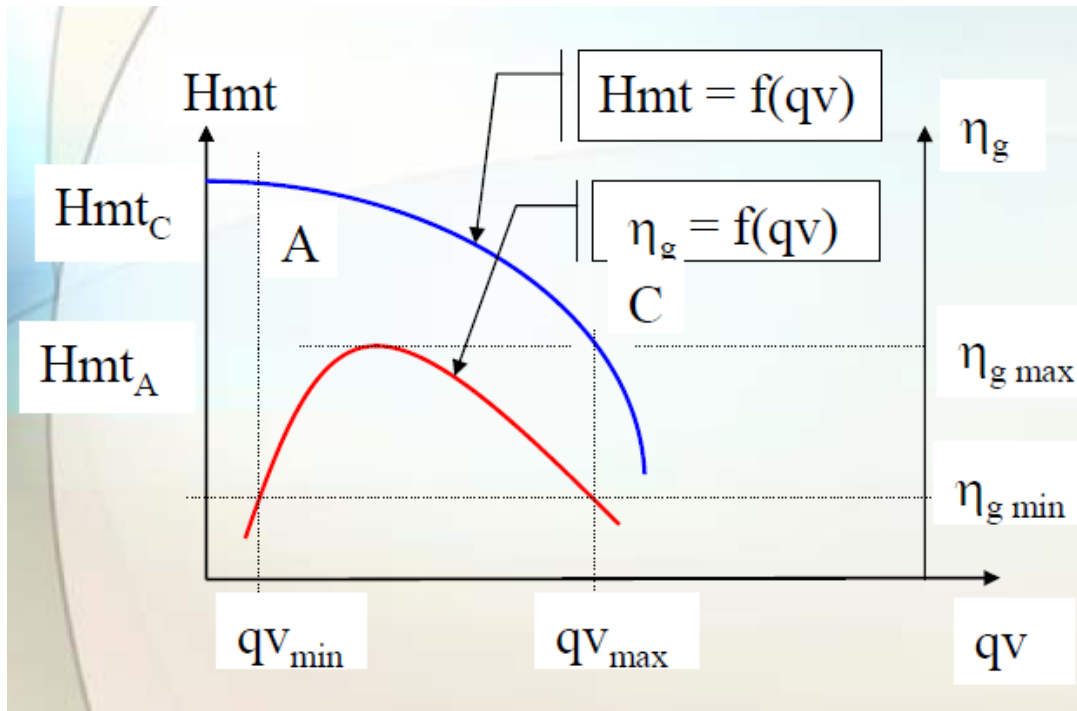


figure 5: courbe caractéristique et courbe de rendement

$\eta_{g \max}$: Rendement maximal

$\eta_{g \min}$: Rendement minimal

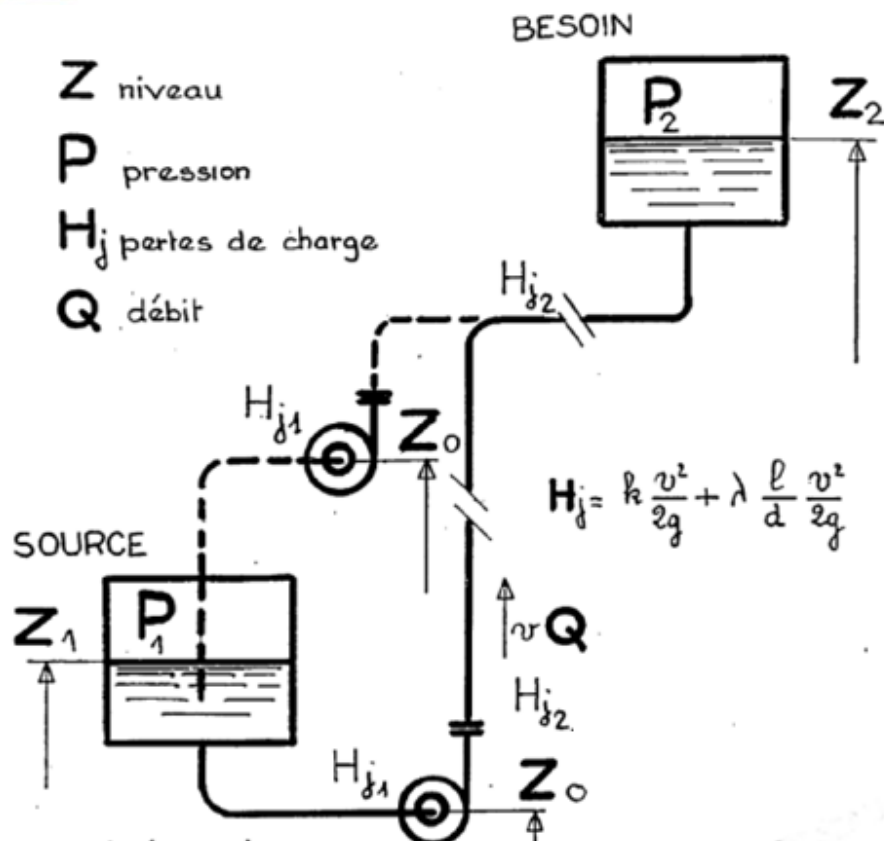
La puissance utile est :

$$P_{utile} = \rho \times g \times q_v \times H_{mt}$$

2.3- COURBE DE RÉSEAU

(Courbe représentative des pertes de charge en fonction du débit)

Considérons l'installation ci-dessous :



En appliquant la relation de Bernoulli généralisée, on peut exprimer la hauteur manométrique HMT de la pompe En négligeant les termes de vitesse et en supposant $P_1 = P_2$ sous la forme :

$$H_{pompe} = (Z_2 - Z_1) + \sum H_j$$

La perte de charge totale est donnée par la somme des pertes de charge singulières et linéaires, elle s'écrit donc :

$$\sum H_j = \sum H_{sing} + H_{linéaire} = \left(\sum K_i + f \frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g}$$

On peut exprimer la perte de charge totale à partir du débit volumique par :

$$\sum H_j = \sum H_{sing} + H_{linéaire} = \frac{8}{g \pi^2 D^4} \left(\sum K_i + f \frac{L}{D} \right) q_v^2$$

Si l'écoulement est turbulent rugueux, L est une constante et donc les pertes de charge sont proportionnelles à Q^2 .

Le terme de perte de charge est donc d'allure parabolique et la courbe du réseau est par conséquent une parabole $\Delta H_{réseau} = H_{géo} + \alpha Q^2$ et ressemble à la courbe ci-dessous :

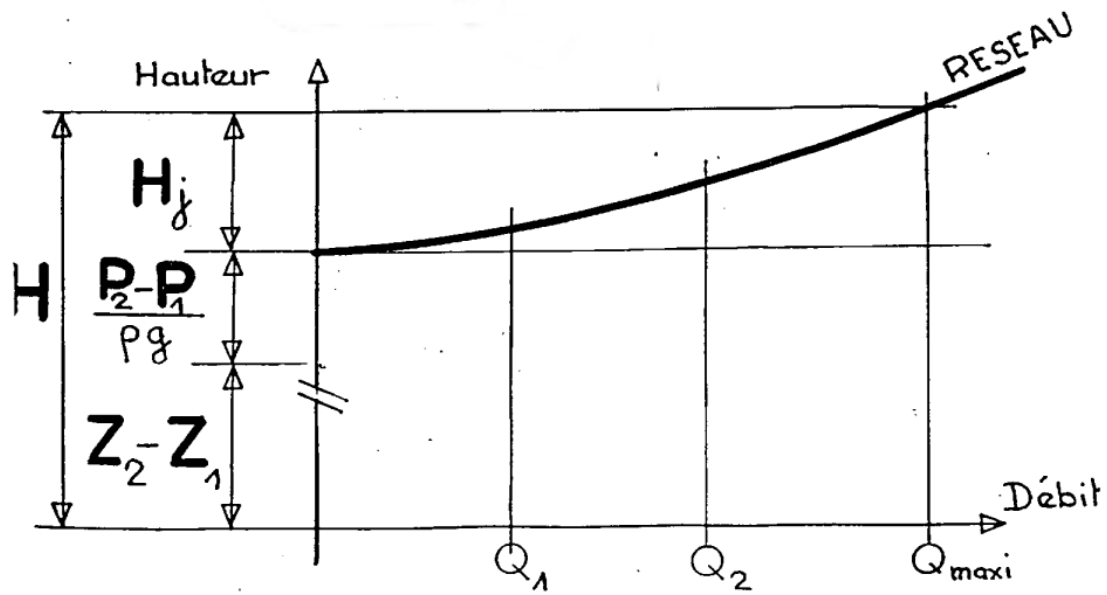


FIGURE 6: courbe de réseau

Le point de fonctionnement du système se situe à l'intersection de la courbe de réseau et de la caractéristique de la pompe. $HMT\ pompe = \Delta H\ réseau(Q)$

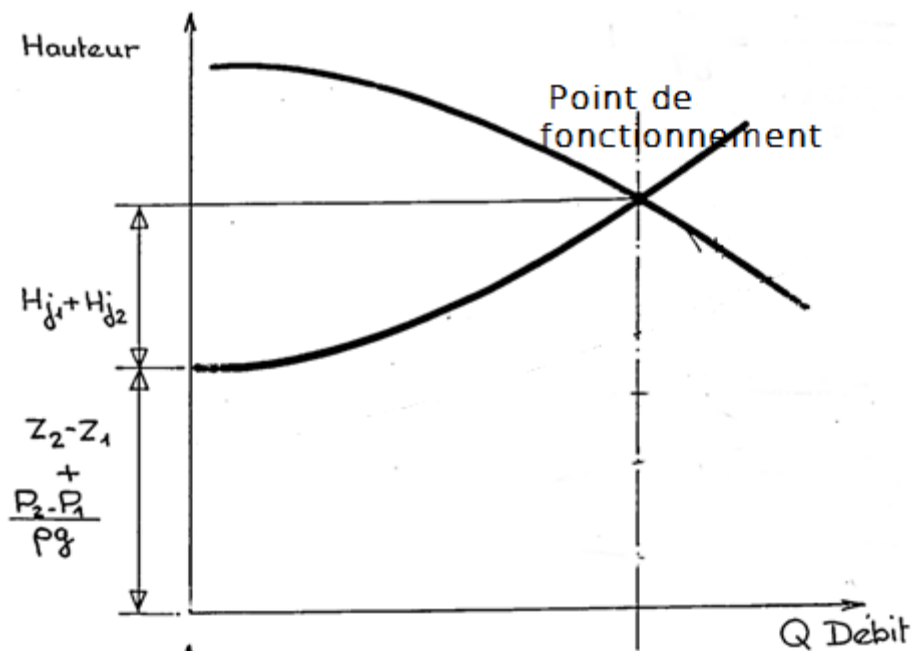


FIGURE 7 : point de fonctionnement du système

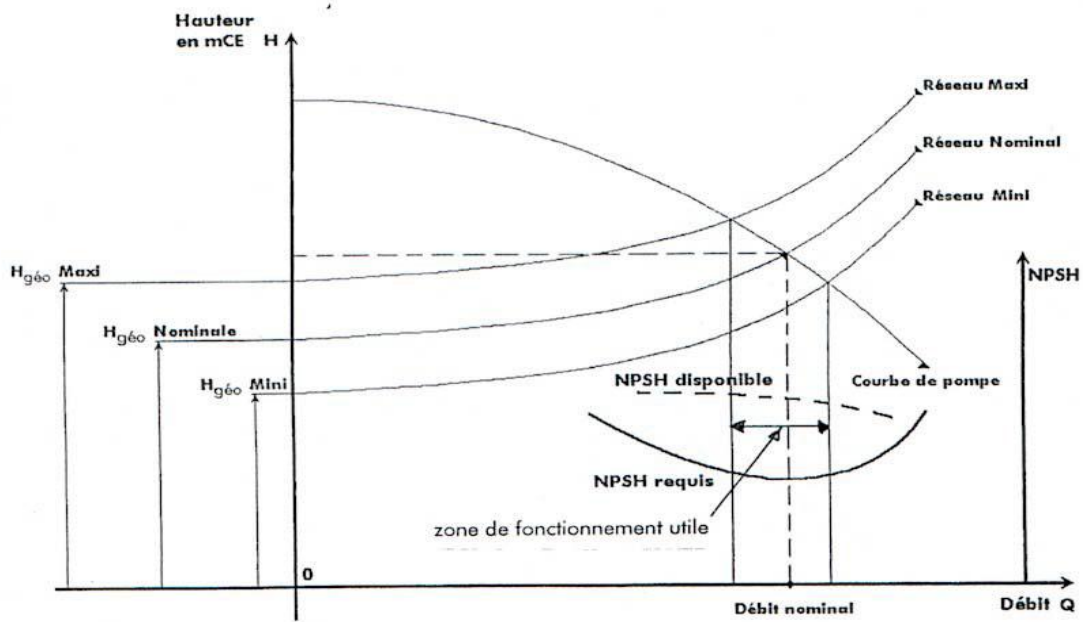


FIGURE 8 : caractéristique du réseau pour trois configurations d'élévation d'eau

2.4. NPSH

Afin d'éviter le phénomène de cavitation à l'intérieur de la pompe, la pression à l'aspiration P_a doit être supérieure à la tension de vapeur saturante du fluide P_s . Soit :

$$P_a > P_s$$

En réalité, les conditions de non cavitation sont données par le constructeur de la pompe car il existe des zones dans la pompe où la pression est inférieure à P_a . Cette condition est donnée sous la forme d'une charge hydraulique minimale à avoir à l'entrée de la pompe. On l'appelle le *NPSH requis*. Il est déterminé expérimentalement par le constructeur de la pompe et dépend de la vitesse de rotation de la roue.

Le *NPSH* désigne le Net Pressure Suction Head soit la hauteur nette absolue à l'aspiration. Elle correspond à la charge hydraulique absolue diminuée de la tension de vapeur saturante du fluide.

On distingue le *NPSH disponible*, c'est à dire celui qu'on a à l'entrée de la pompe :

$$NPSH_{disponible} = H_a - \frac{P_s}{\rho g} = \frac{P_a}{\rho g} + \frac{V_a}{2g} + Z_a - \frac{P_s}{\rho g}$$

Avec H_a : Charge d'aspiration (m)

P_a , P_s respectivement pression d'aspiration et pression de vapeur saturante (Pa)

V_a : Vitesse d'écoulement à l'aspiration (m/s)

Z_a : Hauteur d'aspiration (m)

La condition de non cavitation de la pompe s'écrit :

$$NPSH_{\text{disponible}} > NPSH_{\text{requis}}$$

En fait, le *NPSH requis* de la pompe est déterminé comme le seuil au-dessus duquel la cavitation fait son apparition dans la pompe et détériore ses performances.

2.5. ASSOCIATION DE POMPES

Pompes en parallèles

Lorsque l'on met deux pompes en parallèle, les débits s'ajoutent. Ainsi, on peut reconstruire la caractéristique de l'ensemble des deux pompes en sommant le débit pour une hauteur manométrique donnée. En Figure ci-dessous, trois pompes identiques sont mises en parallèles. Les caractéristiques pour une pompe, puis deux et trois pompes en parallèle sont tracées. Il est à noter que le rendement ne change pas.

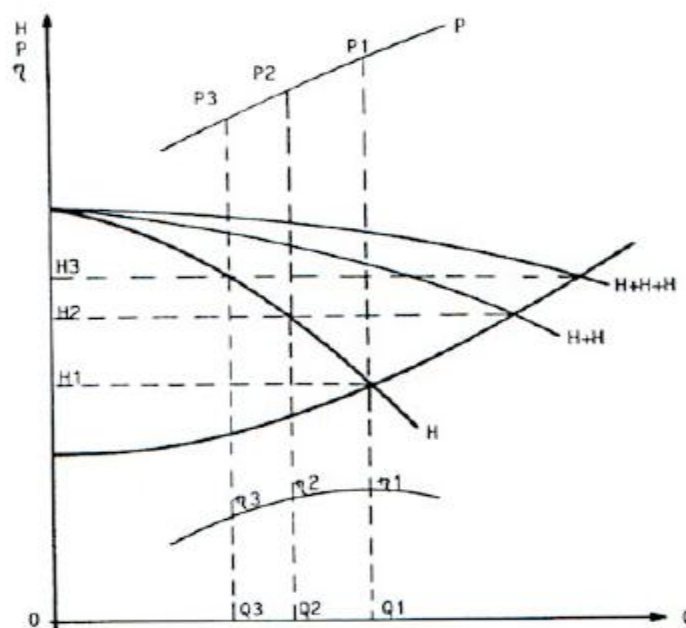
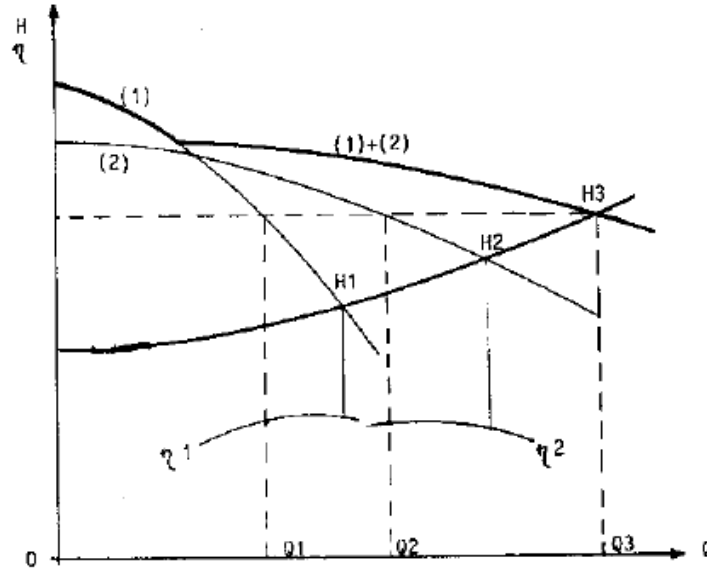


FIGURE 9 : pompes identiques en parallèles

Lorsque les pompes sont différentes, Figure ci-dessous, il faut veiller à ce que les pompes délivrent des hauteurs manométriques proches



Pompes en séries

Lorsque les pompes sont en séries, il faut ajouter la hauteur manométrique. On retrouve ce cas dans les pompes multicellulaires.

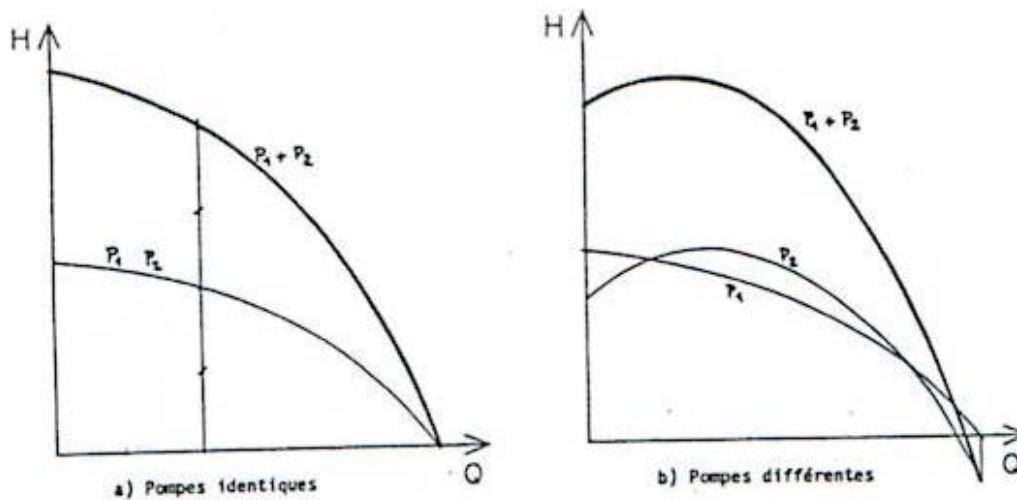


FIGURE 10 : caracteristiques de deux pompes fonctionnant en serie.

Chapitre IV

Description du système de production d'eau potable existant

III. DESCRIPTION DU SYSTEME DE PRODUCTION D'EAU POTABLE EXISTANT

2.1. PREAMBULE

Le complexe de production d'eau potable du BouRegreg constitue la principale ressource pour l'approvisionnement en eau potable de la région côtière entre Salé et Casablanca .Elle est la plus importante unité de production d'eau potable au Maroc.

L'ensemble du réseau de production d'eau potable est difficile à appréhender et à gérer en un seul bloc, aussi il a été procédé au découpage de ce réseau en sous-réseaux fonctionnels :

- 1 - Barrage - Bou Regreg (adduction d'eau brute)
- 2 - Fouarat Nord
- 3 - Rabat 2 - Embassadors
- 4 - Rabat 1 - Ville
- 5 - Fouarat Sud
- 6 - BR2
- 7a - BR1 - BR à BC2
- 7b - BR1 - BC2 à BC4
- 8 - Bou Regreg-Salé
- 9 - Réseau Interne
- 10 - R 50000
- 11 - Ben Slimane
- 12 - BC5-Bouznika
- 13 - La Gazelle
- 14 - Fedalate (Ain Tekki)
- 15 - Tit Mellil
- 16 - Médiouna
- 17 - Takadoum - Rabat
- 18 -. Romani

2.2. PRESENTATION

Mis à part le système de FOUARART NORD (sous-réseau N°2) qui peut être considéré comme un système indépendant, le système de production d'eau potable à considérer est celui de BOUREGREG (les dix-huit sous-réseaux restants).

Ce système de production d'eau potable est alimenté principalement par l'usine de traitement du complexe de BOU REGREG qui est lui-même alimenté en eau brute par un pompage installé à l'écart du barrage SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH.

Le système de production d'eau potable peut être symbolisé par le schéma qui suit :

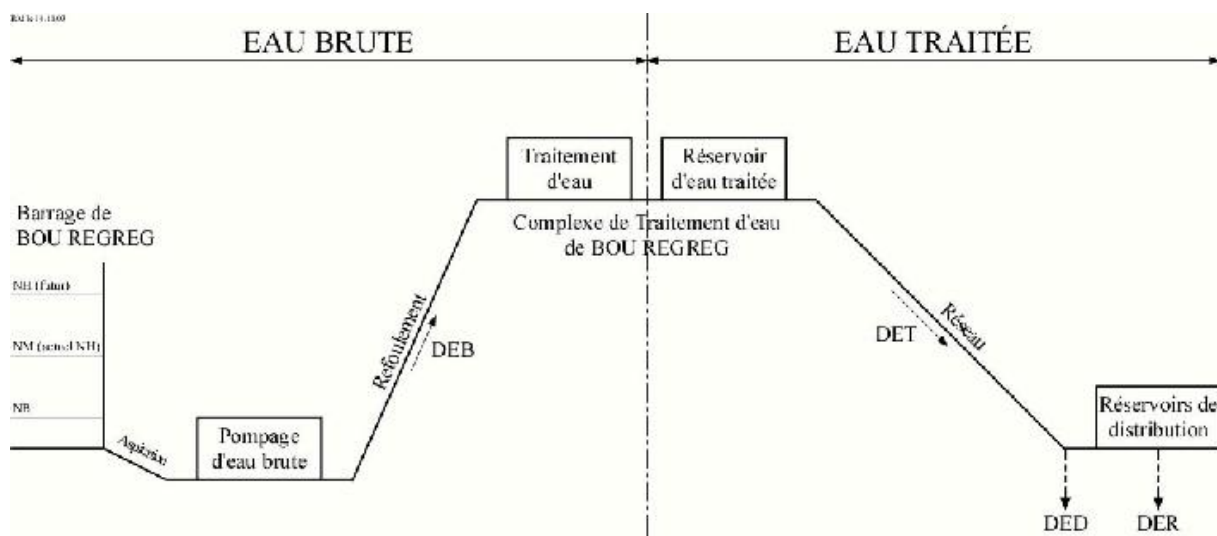


FIGURE 11 : Schéma de principe du système de production de BOU REGREG

Les flux globaux sont représentés par :

- DEB : demande en eau brute.
- DET : demande en eau traitée.
- DED : demande en eau traitée directe.
- DER : demande en eau traitée au travers d'un réservoir.

Pour l'essentiel, le fonctionnement de ce système est le suivant :

L'eau brute est pompée depuis le barrage jusqu'à la station de traitement du BOU REGREG. Ce pompage constitue le principal point de consommation électrique.

Après traitement, l'eau est stockée dans des réservoirs situés à BOU REGREG.

L'eau traitée est généralement transportée gravitairement dans le réseau jusqu'aux piquages à distribution directe et jusqu'aux réservoirs de distribution. Une faible partie de la demande en eau nécessite la mise en œuvre de pompes complémentaires.

En cas de problème sur le transport entre RABAT et CASABLANCA, les deux canalisations les plus récentes (BR1 et BR2) disposent chacune des équipements de pompage destinés à renforcer les possibilités de l'alimentation gravitaire.

L'équilibrage des consommations sur BR1 et BR2 est réalisable manuellement par le choix du raccordement sur l'une ou l'autre canalisation d'un certain nombre de sous réseaux.

3. DECOUPAGE DU RESEAU EN SOUS-RESEaux FONCTIONNELS

3.1 BARRAGE - BOU REGREG.

SCHEMA DU RESEAU

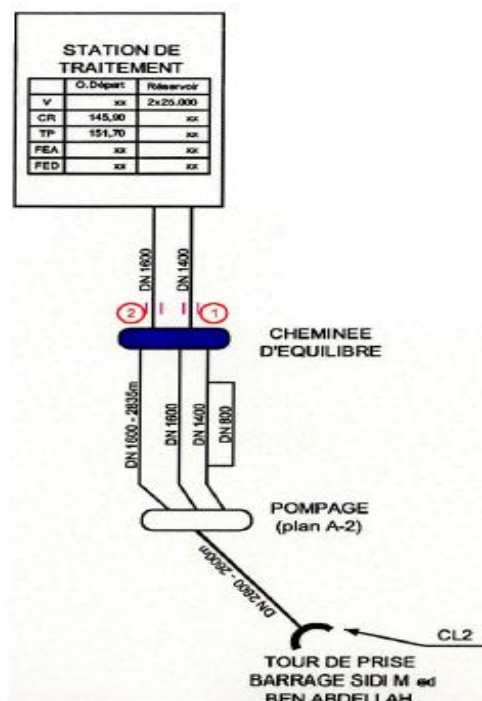


FIGURE 12 : schéma simplifié du réseau barrage-bouregreg.

Le réseau d'alimentation en eau brute se compose d'une prise d'eau dans le barrage qui permet de sélectionner la tranche d'eau de pompage à l'aide de vannes wagons à commande hydraulique.

La tour de prise est reliée à la station de pompage par une galerie pratiquement rectiligne.

La station de pompage est organisée en deux lignes de pompes de deux types différents (trois petites pompes et six grosses pompes).

Les pompes refoulent dans deux nourrices qui se rejoignent et alimentent trois canalisations principales jusqu'au bas de la colline. À cet endroit, une quatrième canalisation est installée en parallèle sur la plus ancienne et ces quatre canalisations cheminent jusqu'à la cheminée d'équilibre d'où repartent deux canalisations jusqu'à l'ouvrage d'arrivée.

CARACTERISTIQUES DES PRINCIPAUX OUVRAGES

Barrage

La retenue du barrage Sidi Mohamed Ben Abdullah, située à une vingtaine de kilomètres de Rabat. Le Barrage a été mis en service en 1974 sur l'oued BouRegreg afin de mobiliser les eaux des bassins versants des Oueds BouRegreg, Grou et Korifla .

- Type : Remblai zoné à noyau argileux
- Terrain de fondation : Schiste et quartzite
- Hauteur maximale sur fondation : 87.50 m avant surélévation, 95.00 m après
- Longueur en crête : 600 m
- Largeur en crête : 8.00 m
- Côte de la crête : 67.5 NGM avant surélévation, 75 après
- Volume du corps du barrage : 3,1Mm³ après surélévation.

Les ouvrages de protection

Les cheminées d'équilibre sont des équipements anti-bélier à stockage d'énergie, puisqu'elles permettent la mise en atmosphère des conduites en charge ou gravitaire et permet l'oscillation de la surface d'eau en fonction de la pression qui règne dans le réseau.

La protection contre les événements transitoires est assurée par l'ancienne cheminée d'équilibre et la cheminée d'équilibre implantée sur la nouvelle galerie.

Emplacement	Marnage			Côte du calage de la base	Diamètre (m)
	Côte normale	Côte Min	Côte Max		
L'ancienne galerie	60,99 mNGM	50 mNGM	71 mNGM	20 mNGM	2,6
La nouvelle galerie	60,99 mNGM	50 mNGM	71 mNGM	10 mNGM	2,6
Les conduites de refoulement	158,3 mNGM	157,6 mNGM	159 mNGM	147 mNGM	5

Tableau : Caractéristiques des cheminées d'équilibre

Station de pompage

L'acheminement des eaux brutes vers la station de traitement est assurée par la station de pompage , elle est constituée de :

- Une salle des pompes dont la plate-forme est calée à la côte 18,5 m NGM et de dimensions approximatives de 25,50×45m avec une hauteur sous plafond de 10,5m.
- Un local électrique et des bureaux en deux niveaux de 13,5m× 35m de dimensions.

Cette station est équipée de plusieurs groupes de pompage :

- Trois pompes (PG) : tournées par des moteurs d'une puissance unitaire de 2,2MW dont un à vitesse variable non fonctionnel.
- six pompes (GG) : tournées par des moteurs à vitesse fixe dont deux de puissance unitaire 4MW et quatre de puissance 4,4MW. Ces six groupes sont plus grands que les premiers.

L'alimentation en énergie de la station est assurée par un poste de transformation de 60/5,5KV. Pour des raisons de sécurité cette dernière est alimentée par trois lignes de 60 KV provenant de différentes sources d'alimentation électrique. Ce poste est constitué de trois transformateurs de puissance nominale 18MVA.

Les points de fonctionnement nominaux des pompes constituant la station de pompage sont les suivants :

Type de pompe	Débit nominal (m ³ /s)	Hauteur manométrique (mCE)	Rendement %	Vitesse nominale (tr/min)
GG	2,8	124	93	990
PG	1,25	124	93	990

Tableau : Caractéristiques des groupes de pompage

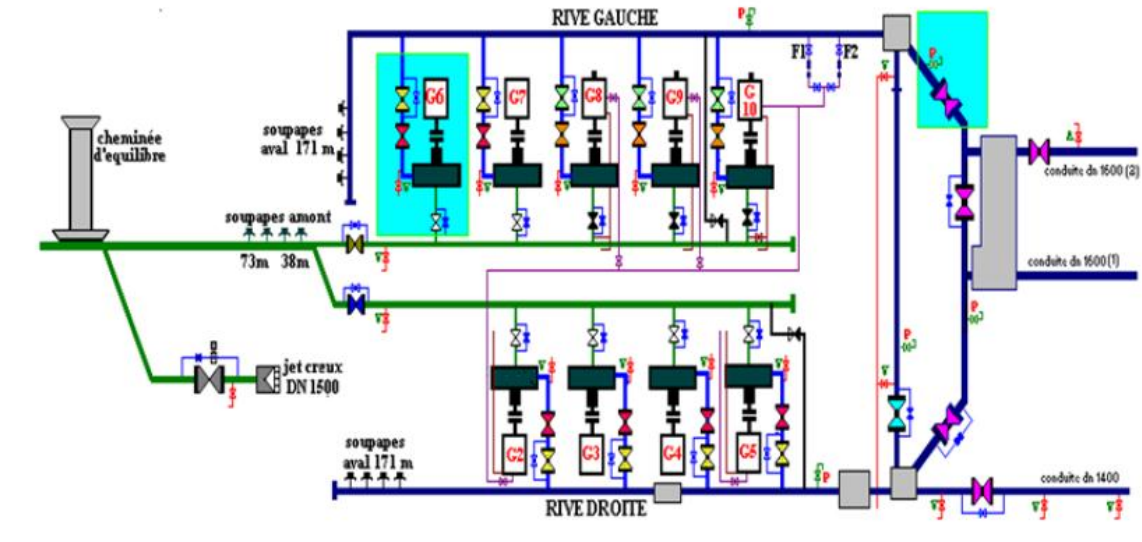


FIGURE 13 : schéma synoptique de la station de pompage



FIGURE 14 : Groupes de pompage constituant la station de pompage du bouregreg.



FIGURE 15 : Conduites d'aspiration.



FIGURE 16 : Conduite de refoulement.

REFOULEMENT D'EAU BRUTE

Les courbes de pompage permettent de définir :

Les courbes de perte de charge des liaisons des pompes et du réseau. Cette courbe est représentée dans la figure qui suit de la même couleur que les courbes des pompes à associer. Il y a une courbe pour chacun des trois niveaux dans le barrage (30,50,73,3m).

Les courbes des pompes sont représentées en trait épais pour les grosses pompes seules, en trait fin avec une petite pompe.

Il faut remarquer sur les courbes qui suivent :

- Le débit maximal est fortement influencé par la hauteur d'eau dans le barrage puisqu'il varie entre 9,2m³/s et 14,45m³/s pour un fonctionnement avec une petite pompe et quatre grosses pompes.
- Que pour une cote dans le barrage supérieure à 69 NGM et une seule grosse pompe en fonctionnement, le point de pompage est en dehors de la courbe de fonctionnement.

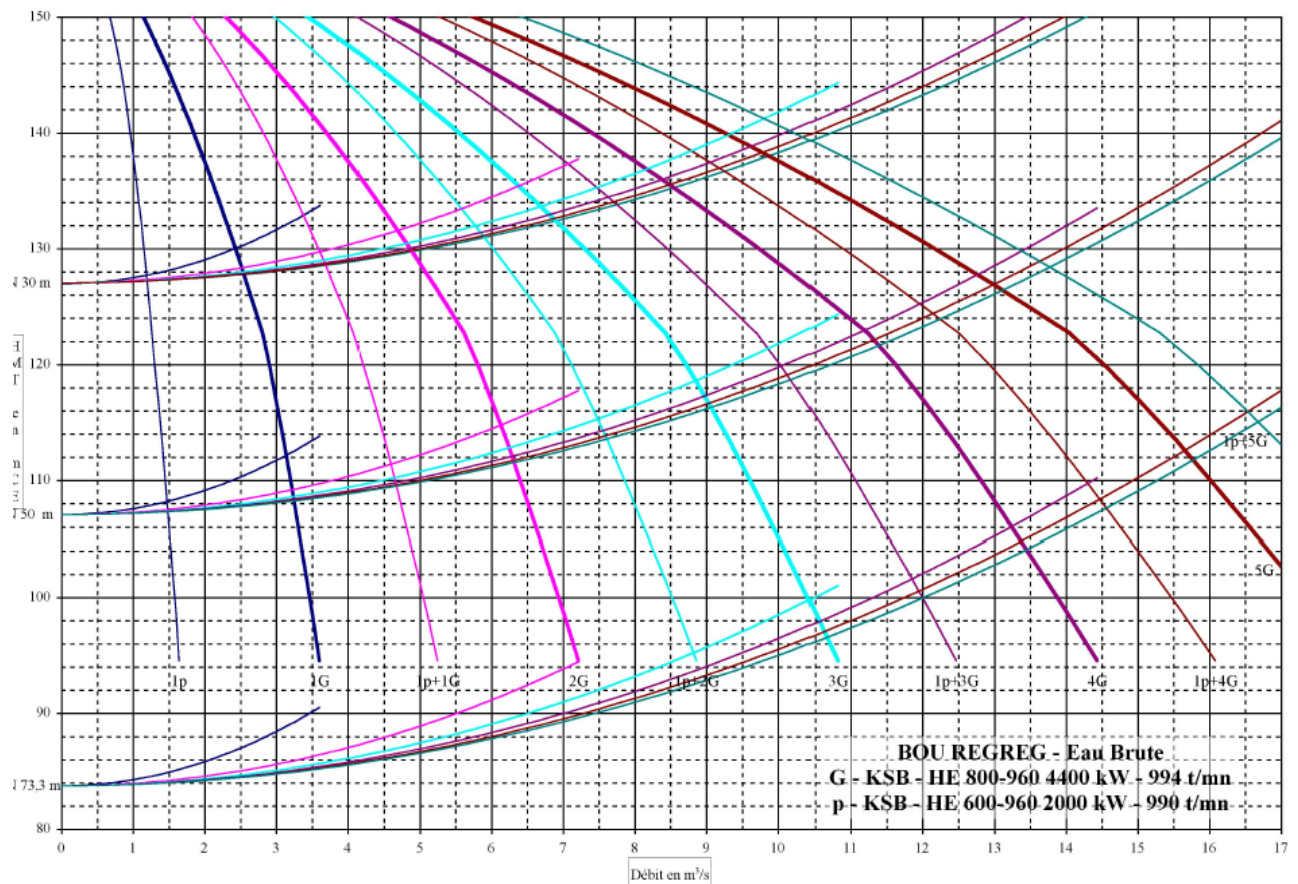


FIGURE 17 : courbes de pompage d'eau brute en fonction du nombre et du type de pompe en service et de la hauteur d'eau dans le barrage.

STATION DE TRAITEMENT DE BOUREGREG

La station de traitement du BouRegreg de capacité nominale 9 m³/s, est composée de trois stations : ST1, ST2 et ST3.

L'eau brute pré-chlorée arrive dans un ouvrage d'arrivée unique, commun aux trois stations et composé de deux compartiments. Le premier de 300 m³ sert de mélangeur rapide du sulfate d'alumine et le deuxième de 450 m³ est un répartiteur comprenant huit (8) déversoirs rectangulaires, au niveau de la station. L'eau subit les opérations de traitement suivantes:

- Pré chloration effectuée au niveau de la tour de prise moyennant l'utilisation du chlore gazeux.
- Coagulation - floculation réalisée au niveau de l'ouvrage d'arrivée par injection du Sulfate d'aluminium et d'un polymère.
- Décantation des matières en suspension dans les décanteurs.
- Filtration sur sable.
- Désinfection de l'eau par le chlore au niveau des citernes.

Les trois stations ont les caractéristiques suivantes :

Station de traitement ST1 :

- Date de mise en service : 1969.
- Débit nominal : 1 m³/s.(une ligne de 1 m³/s)
- Filtres à faible hauteur d'eau.
- Citerne d'eau filtrée de 3500 m³.

Station de traitement ST2 :

- Date de mise en service : 1976.
- Débit nominal : 3m³/s.(3 lignes de 1 m³/s)
- Citerne d'eau traitée : 10.000 m³.

Station de traitement ST3 :

- Date de mise en service : 1983.
- Débit nominal : 5m³/s.(4 lignes de 1,25 m³/s)
- Citerne d'eau traitée : 10.000 m³.

3.2. FOUARAT NORD

- SCHEMA DU RESEAU

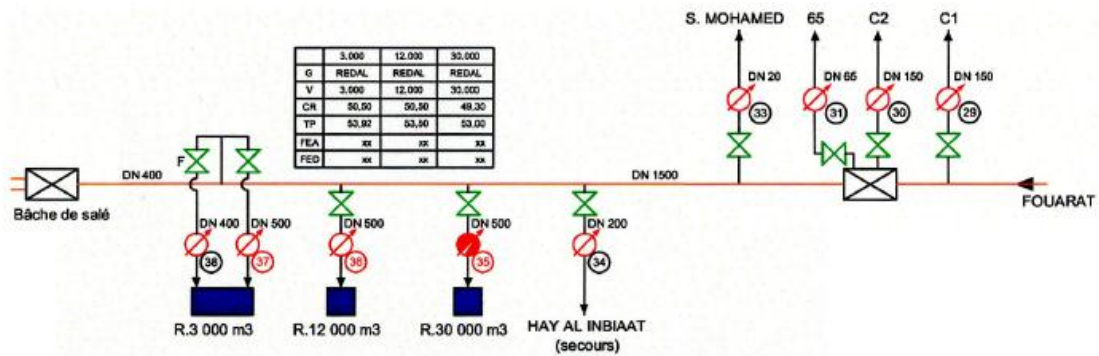


FIGURE 18 : schéma simplifié du réseau Fouarat Nord.

Ce réseau est totalement isolé et dispose d'une alimentation par forages très largement suffisante pour ses besoins.

3.3. RABAT 2 - EMBASSADORS

- SCHEMA DU RESEAU

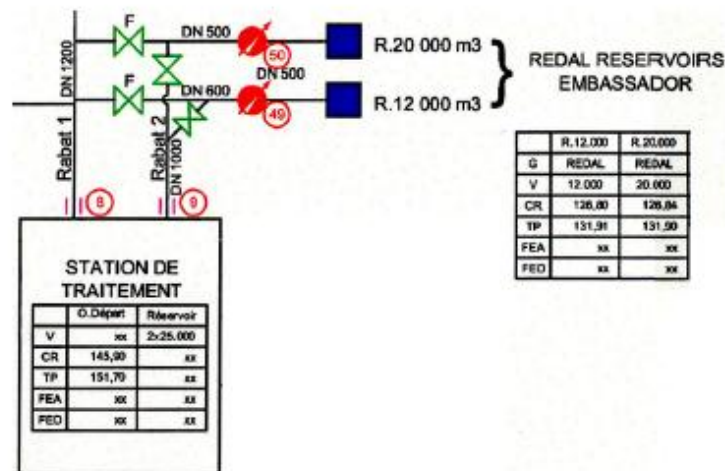


FIGURE 19 : schéma simplifié du réseau Rabat 2.

Ce réseau alimente directement les réservoirs de la zone des ministères et des ambassades de Rabat à partir de Bou Regreg.

3.4. RABAT 1 – VILLE

- SCHEMA DU RESEAU

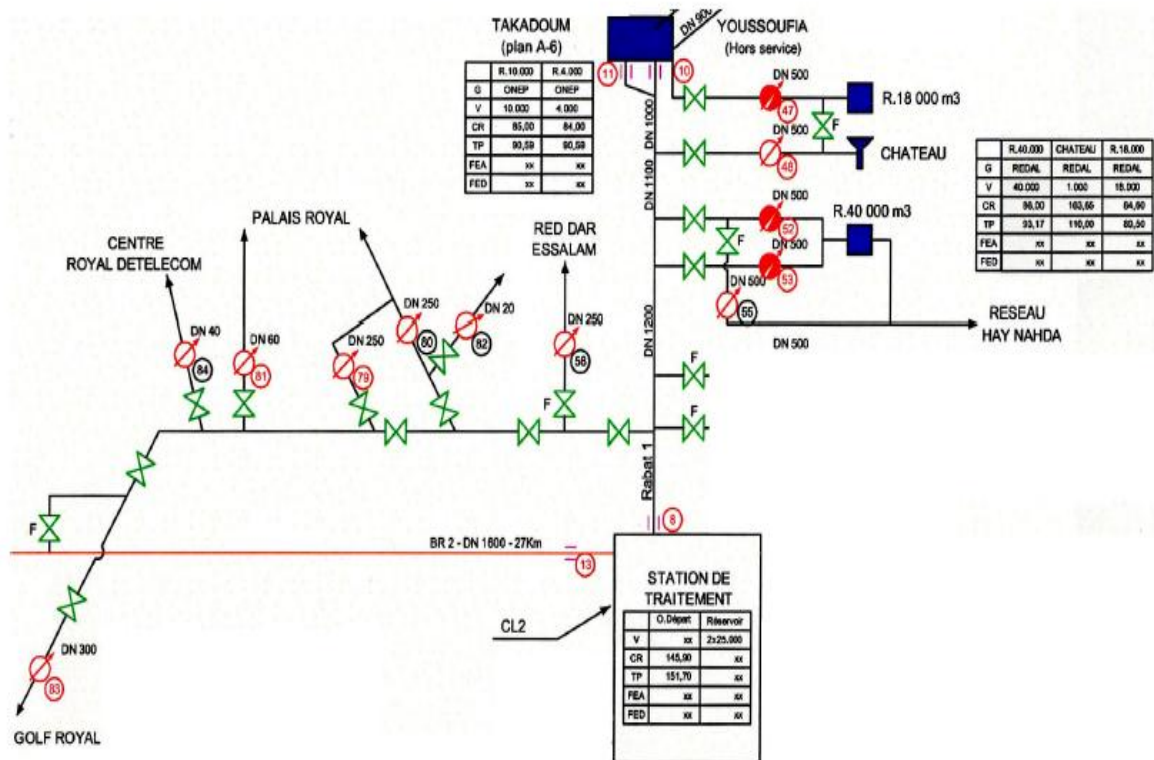
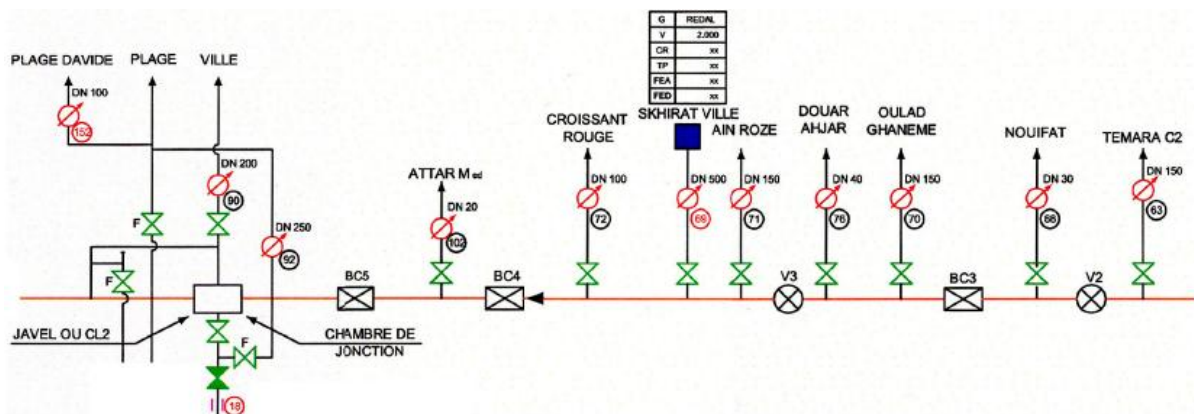
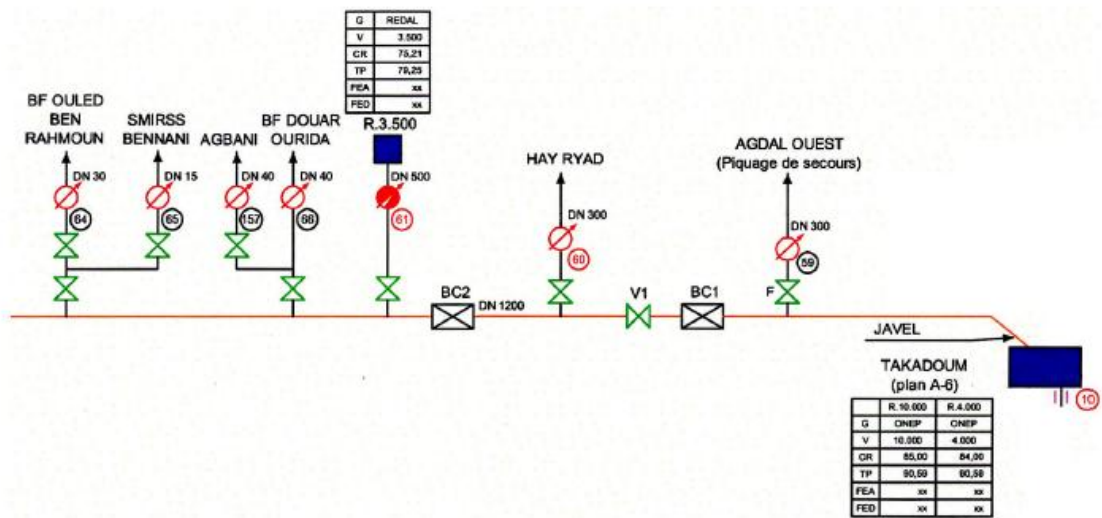


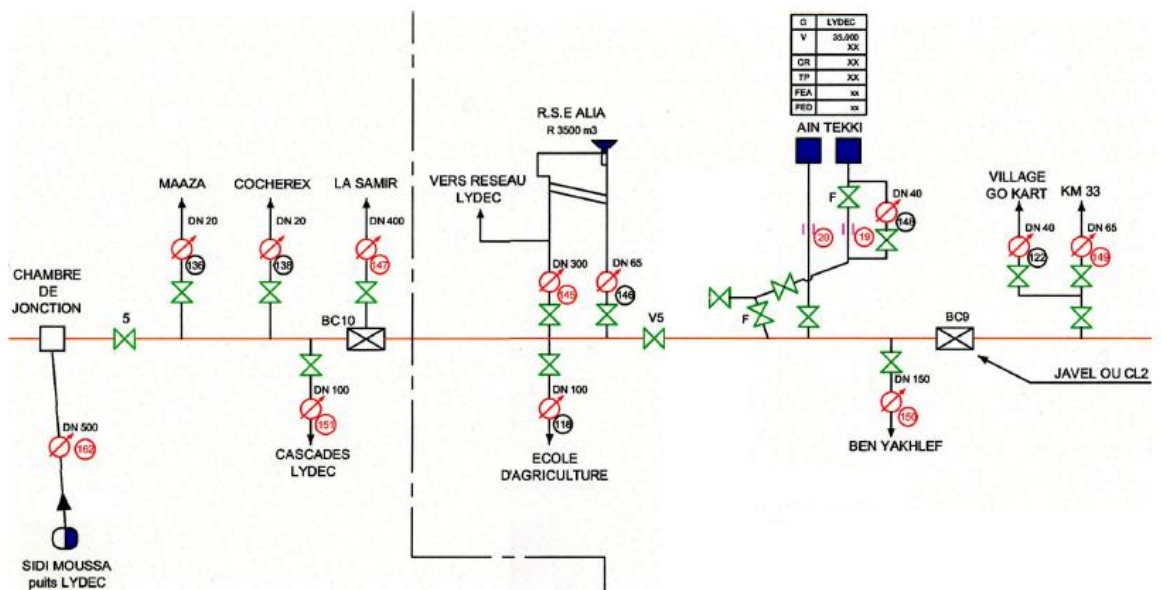
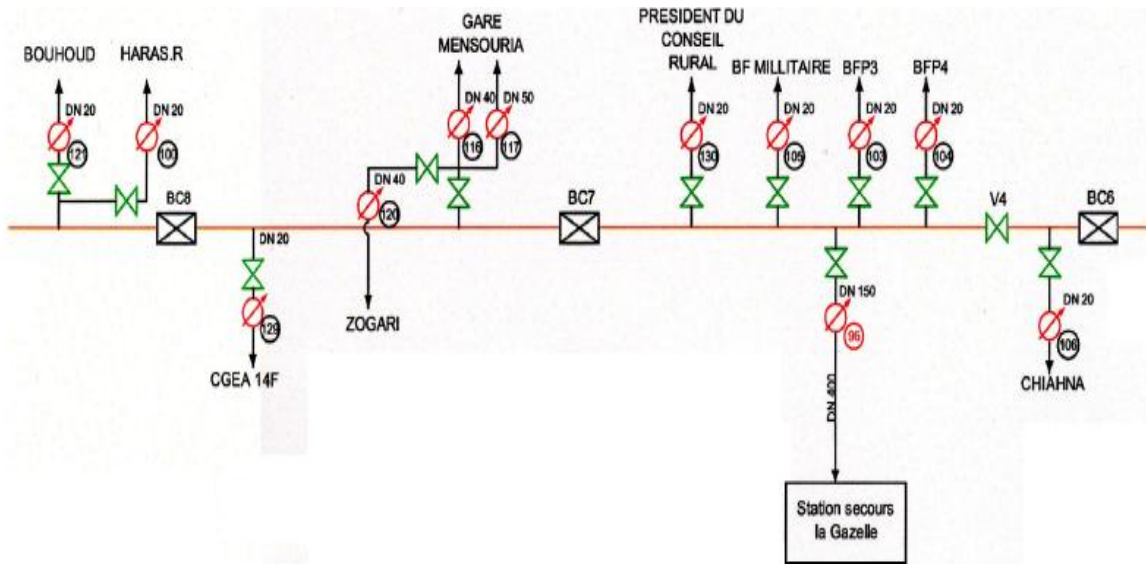
FIGURE 20 : schéma simplifié du réseau Rabat

Ce réseau alimente directement les réservoirs de la ville de Rabat et le golf de Dar Es Salam à partir de Bou Regreg. Le château d'eau présente une capacité trop faible (25 % de la demande journalière).

3.5. FOURAT SUD

- SCHEMA DU RESEAU





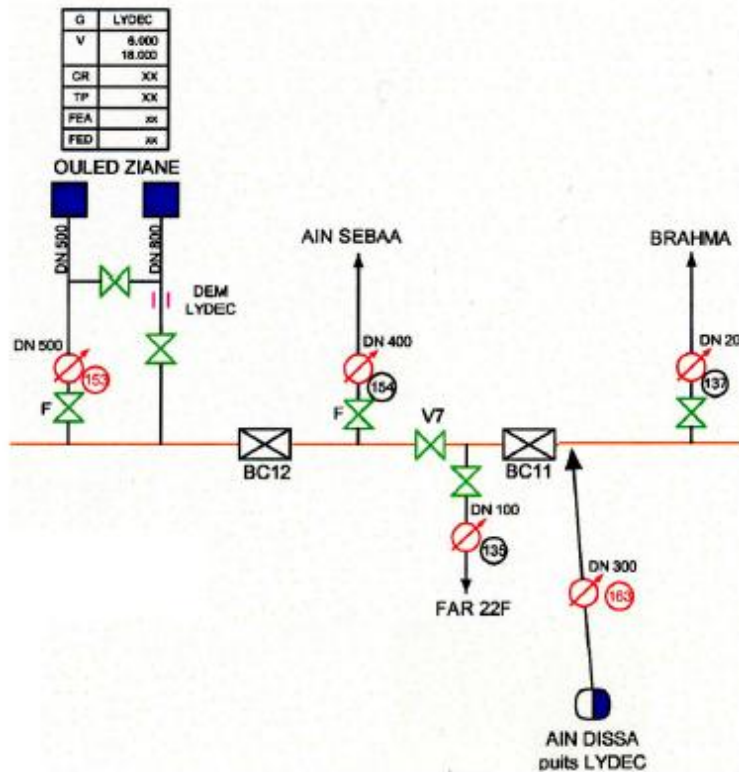


FIGURE 21 : schéma simplifié du réseau Fouarat Sud

Ce réseau s'étend entre Rabat et Casablanca et dessert toute la zone côtière. Ce réseau est très ancien.

Du fait également de son ancienneté, il dispose de nombreux piquages tout au long de son cheminement. Ces piquages sont pour la majorité bien repérés sur le profil en long de la canalisation.

3.6. BR2

- SCHEMA DU RESEAU

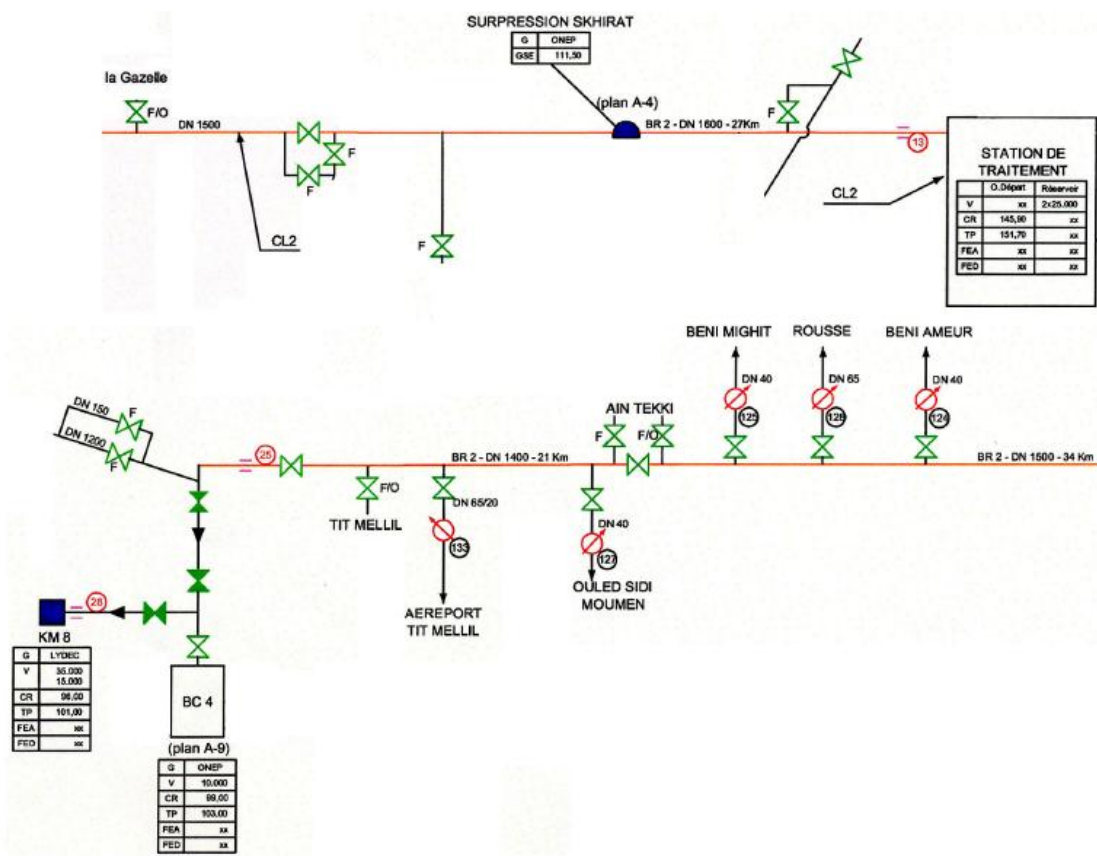


FIGURE 22 : schéma simplifié du réseau BR2.

Ce réseau permet l'alimentation de Casablanca en gravitaire. Un surpresseur situé à Skhirat permet d'augmenter le débit du réseau en cas de crise par exemple lors de l'arrêt de BR1 pour entretien ou travaux.

3.7. BR1 (BR à BC2)

▪ SCHEMA DU RESEAU

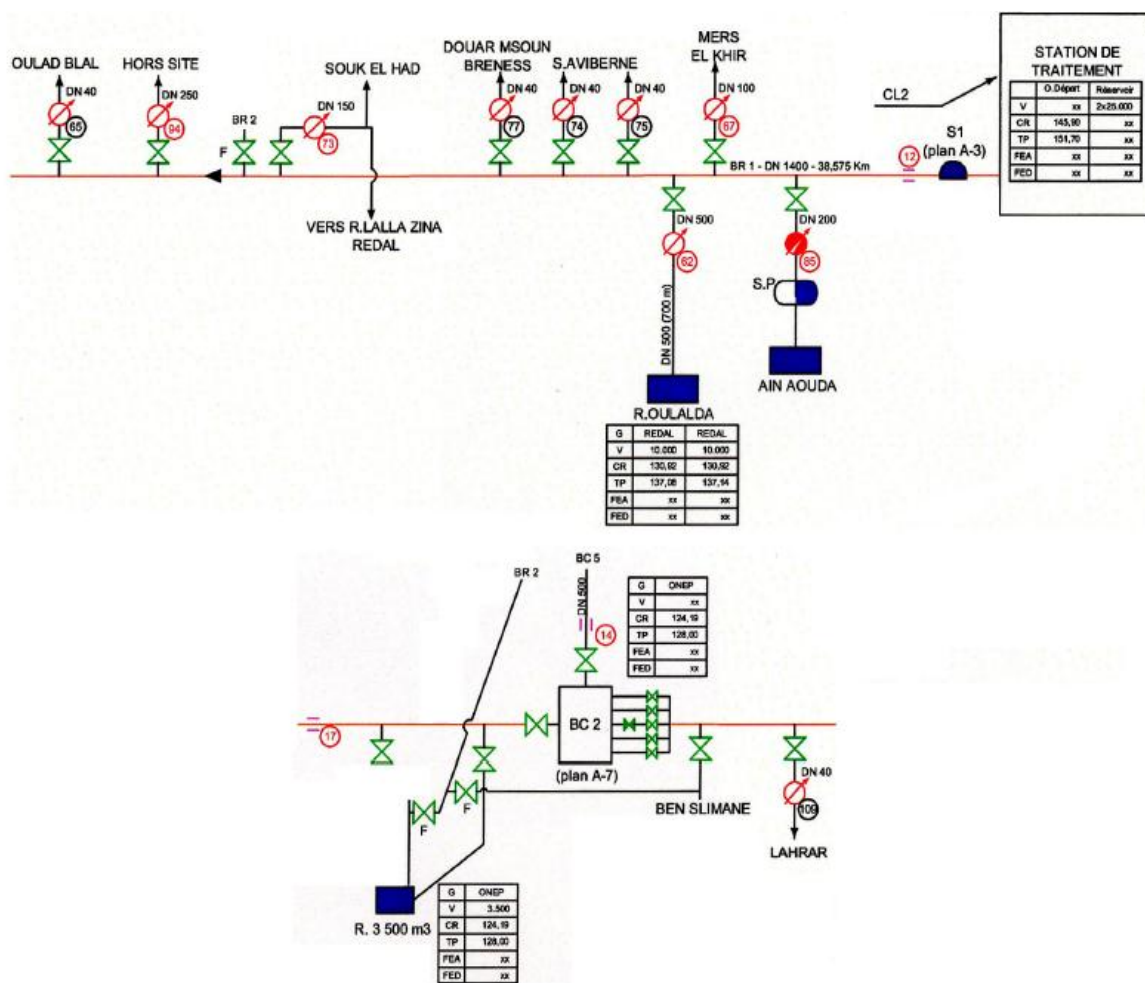


FIGURE 23 : schéma simplifié du réseau BR1 (BR à BC2).

Ce réseau permet l'alimentation de BC2 en gravitaire. Un surpresseur situé à l'ouvrage de départ permet d'augmenter le débit du réseau en cas de crise par exemple lors de l'arrêt de BR2 pour entretien ou travaux.

3.8. BR1 (BC2 à BC4)

- SCHEMA DU RESEAU

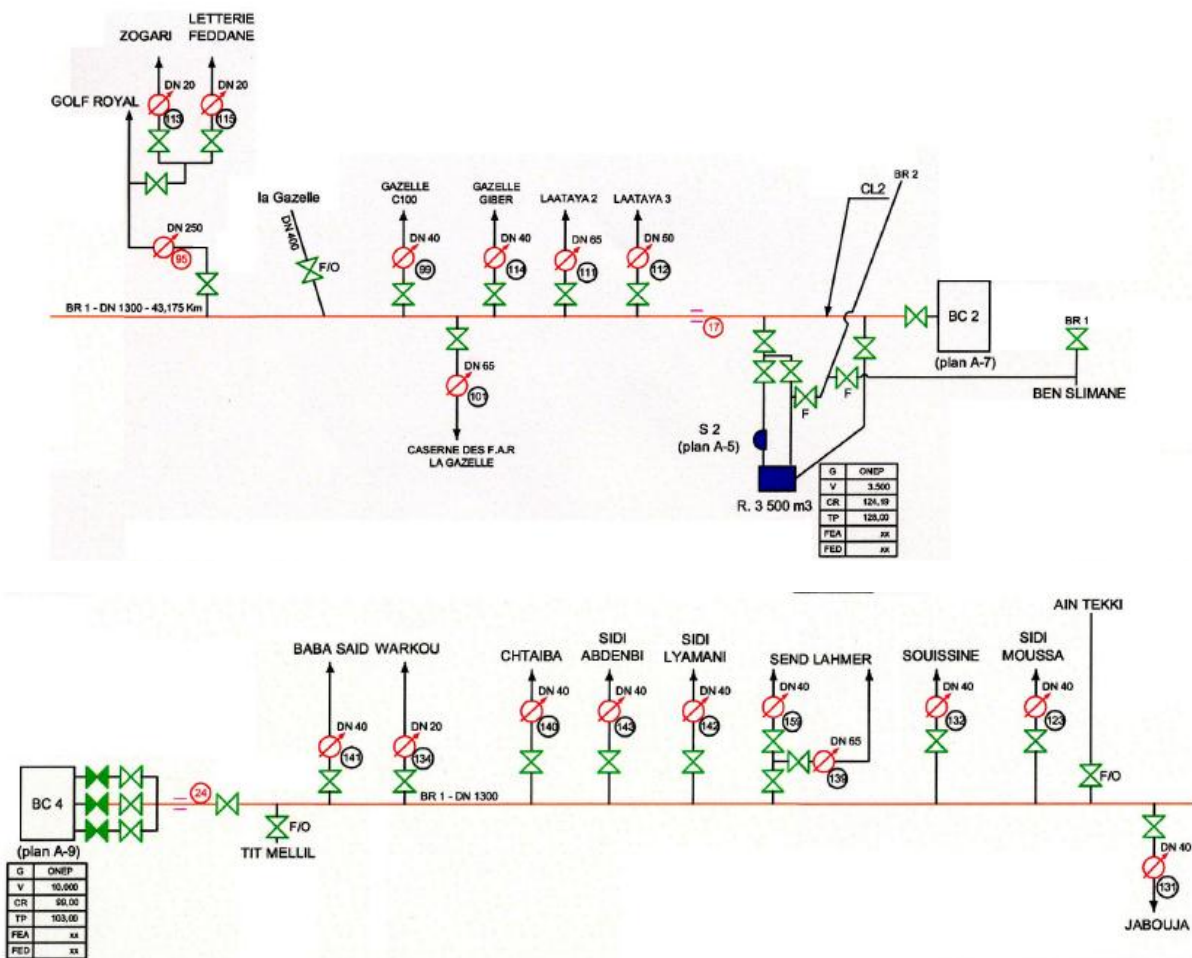


FIGURE 24 : schéma simplifié du réseau BR1 (BC2 à BC4) .

Ce réseau permet l'alimentation de Casablanca en gravitaire. Un surpresseur situé à Bouznika permet d'augmenter le débit du réseau en cas de crise par exemple lors de l'arrêt de BR2 pour entretien ou travaux.

3.9. BOUREGREG-SALE

- SCHEMA DU RESEAU

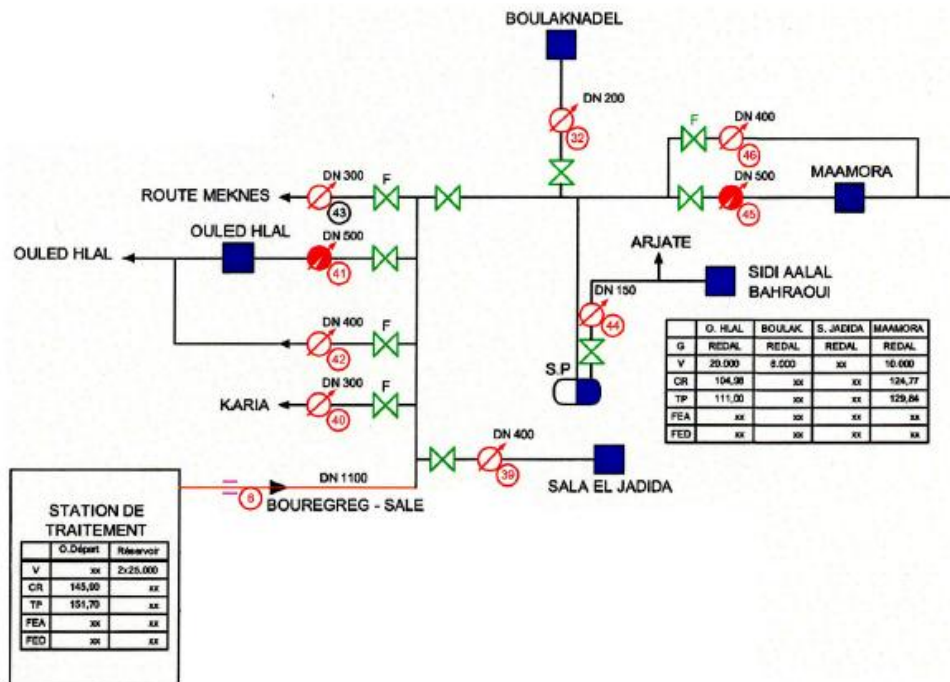


FIGURE 25 : schéma simplifié du réseau Bouregreg-Salé .

Ce réseau alimente depuis Bou Regreg une bonne partie de la zone desservie par le réseau Fouarat Nord et tend à s'y substituer.

C'est un réseau de conception moderne avec débitmètre à l'ouvrage de départ.

Le volume des réservoirs 202 (Ouled Hlal) et surtout 204 (Sidi Aalal Bahraoui) est cependant un peu faible.

3.10. RESEAU INTERNE

- SCHEMA DU RESEAU

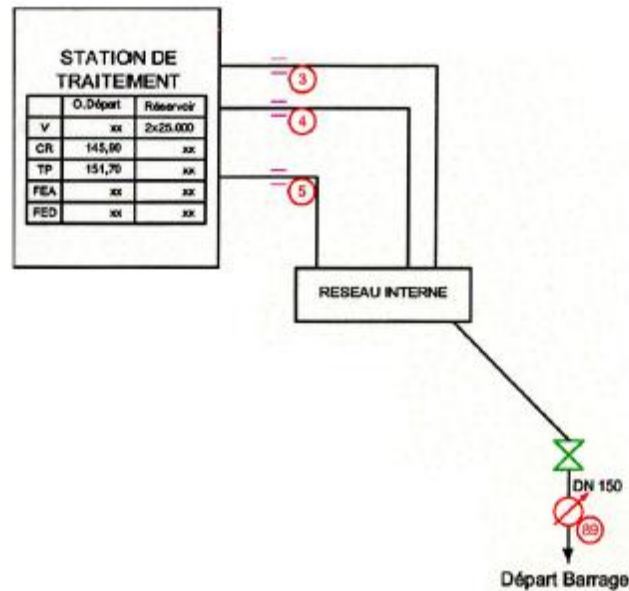


FIGURE 26 : schéma simplifié du réseau interne .

Ce réseau est alimenté directement par le réservoir de Bou Regreg. Il s'agit principalement des besoins locaux de l'ONEP, cités et barrage.

3.11. R 50000

- SCHEMA DU RESEAU

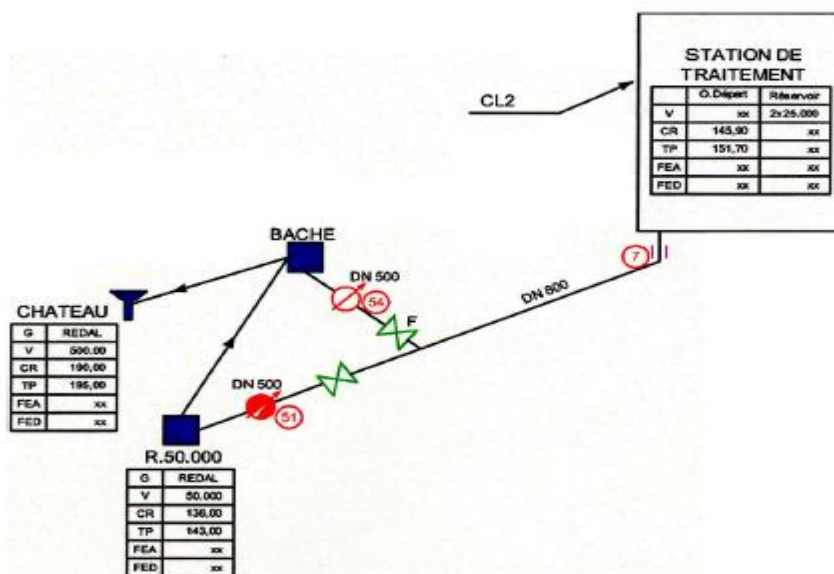


FIGURE 27 : schéma simplifié du réseau R 50 000

Ce réseau permet un doublement des réservoirs de BouRegreg et permet d'alimenter tous le voisinage.

3.12. BEN SLIMANE

- SCHEMA DU RESEAU

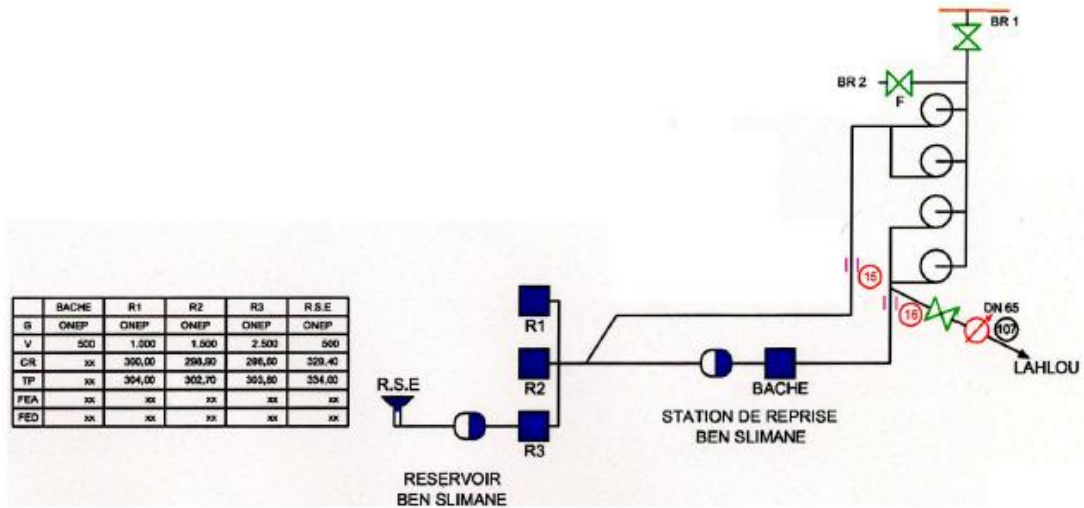


FIGURE 28 : schéma simplifié du réseau Ben Slimane .

Ce réseau permet l'alimentation de Ben Slimane.

3.13. BC5-BOUZNIKA

- SCHEMA DU RESEAU

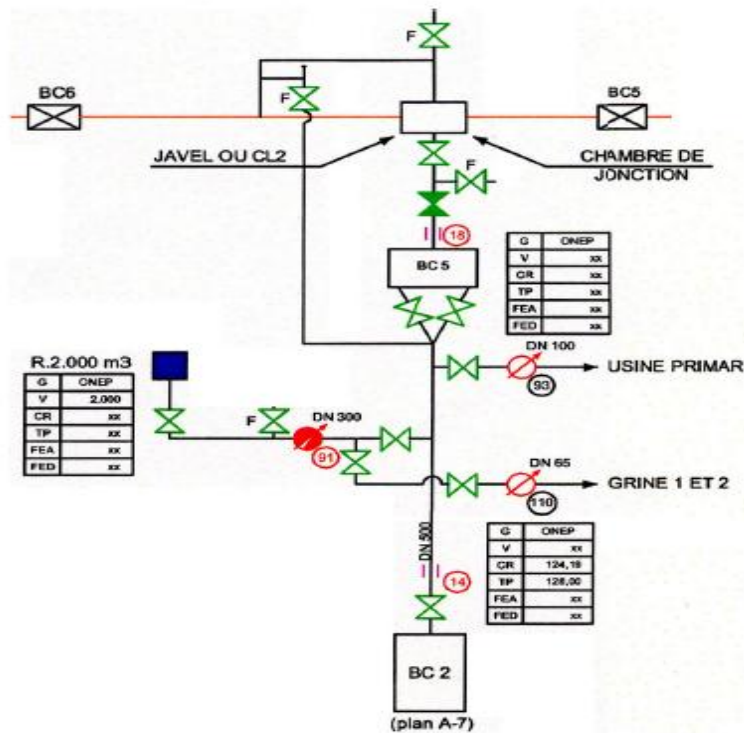


FIGURE 29 : schéma simplifié du réseau BC5-Bouznika .

Ce réseau sert à :

- Reprendre l'alimentation de la ville de Bouznika à partir de BR1 par le réservoir de 2000 m3.
- Alimenter la canalisation de Fouarat Sud en cas de délai trop important de mise en régime de la ligne d'eau sur ce réseau.

3.14. LA GAZELLE

- SCHEMA DU RESEAU

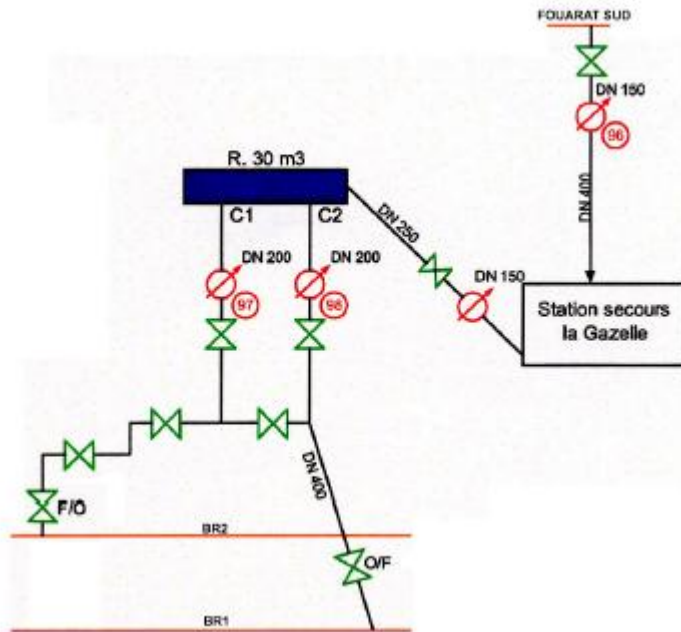


FIGURE 30 : schéma simplifié du réseau La Gazelle

3.15. FEDALATE (AIN TEKKI)

- SCHEMA DU RESEAU

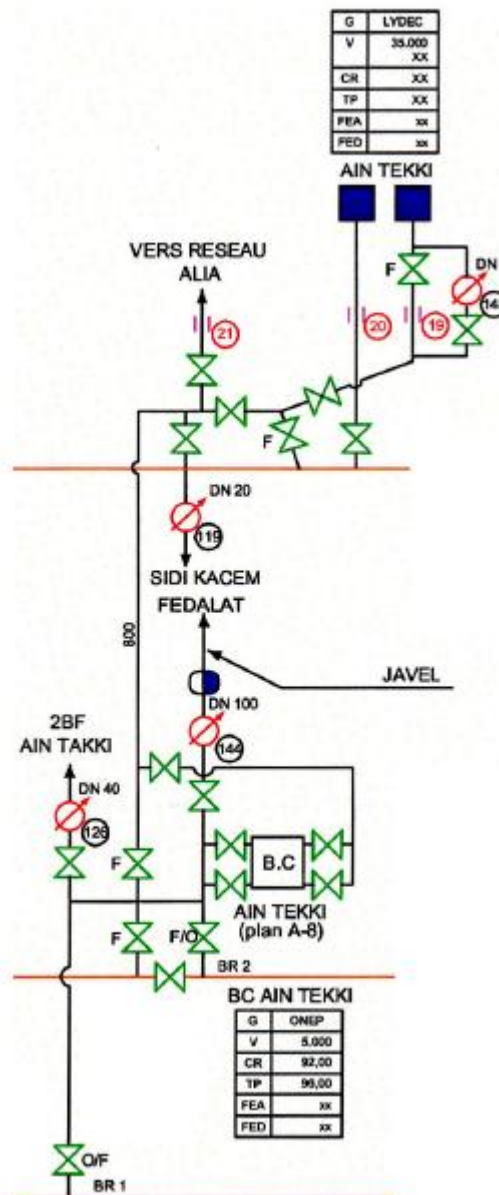


FIGURE 31 : schéma simplifié du réseau Fedalat.

3.16. TIT MELLIL

- SCHEMA DU RESEAU

Ce sous-réseau sert à l'alimentation des réservoirs de Tit Mellil à partir de BR1 ou de BR2.

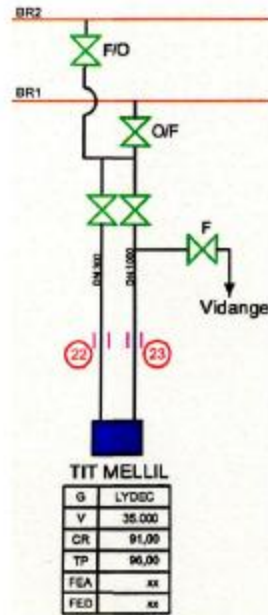


FIGURE 32 : schéma simplifié du réseau Tit Mellil.

3.17. MÉDIOUNA

- SCHEMA DU RESEAU

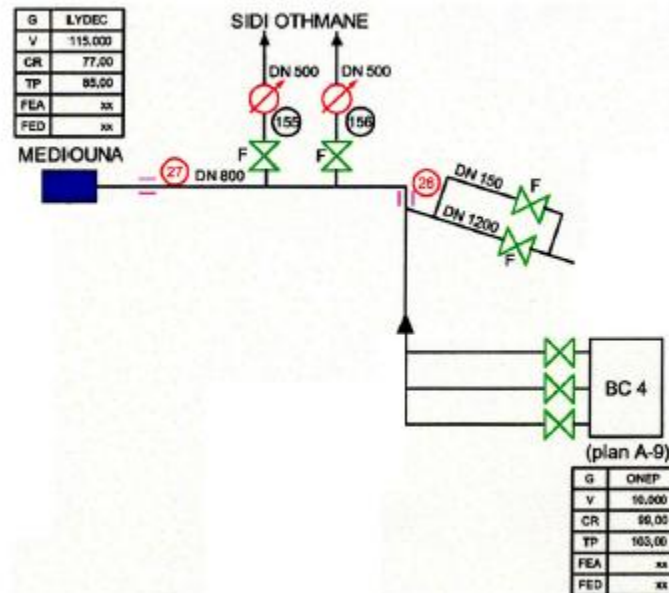


FIGURE 33 : schéma simplifié du réseau Médiouna .

Ce réseau permet d'alimenter le réservoir de Médiouna (Casablanca) par BC4 qui est lui-même alimenté par BR1 ou BR2.

3.18. TAKADOUM - RABAT

- SCHEMA DU RESEAU

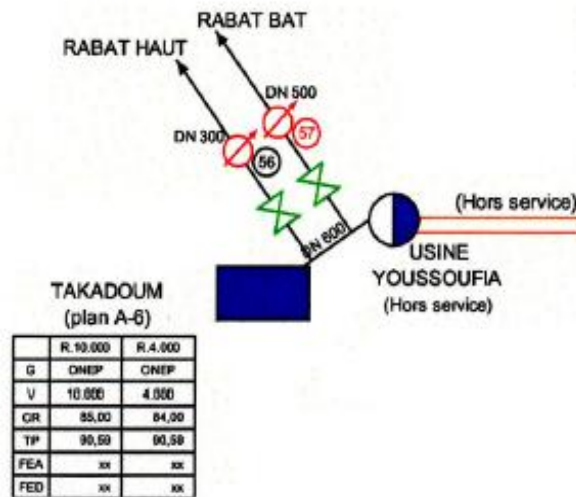


FIGURE 34 : schéma simplifié du réseau Takadoum

Il s'agit d'un réseau de distribution existant qui alimente la ville de Rabat à partir du réservoir de Takadoum.

3.19. ROMANI

- SCHEMA DU RESEAU

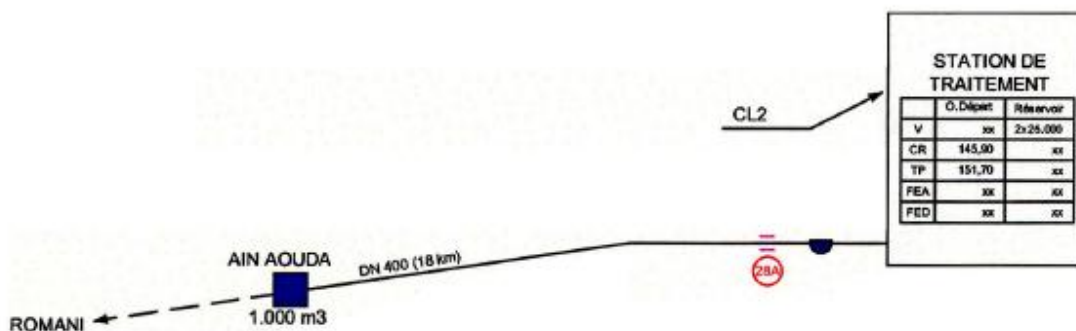


FIGURE 35 : schéma simplifié du réseau Romani

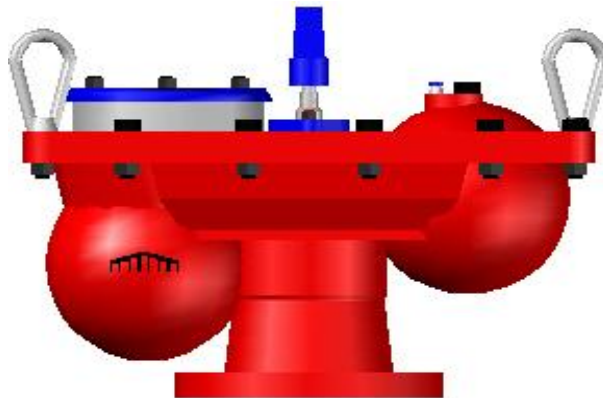
Ce réseau sert à alimenter Ain Aouda à partir du réservoir de BouRegreg.

4. EQUIPEMENTS HYDROMÉCANIQUES

- **Ventouse simple**



- **Ventouse à 3 fonctions**



1- Evacuation d'air à grand débit

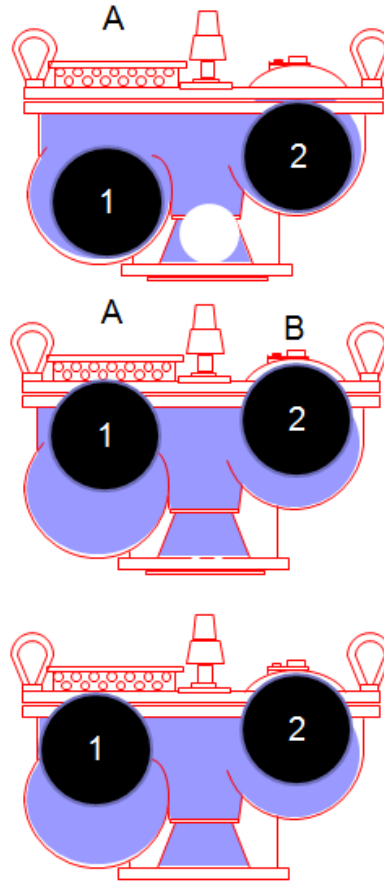
Lors du remplissage de la canalisation l'eau doit arriver lentement: 0,4 m/s
L'air s'échappe par l'orifice A de la ventouse avec un débit équivalent à celui de l'eau entrant dans la canalisation.

2- Dégazage en période d'exploitation

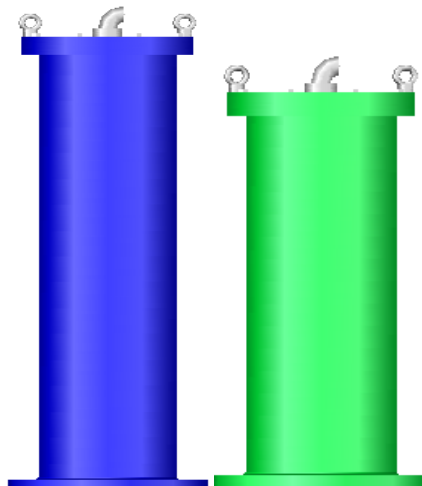
Fonctionnement en purgeur, le débit d'air évacué étant fonction du diamètre d'orifice de la tuyère B.

3- Admission de l'air dans la canalisation

Lors d'une vidange ou d'une mise en dépression de la canalisation, le flotteur repère 1 sous l'effet de son propre poids descend et libère le gros orifice.



- **Purgeur sonique**

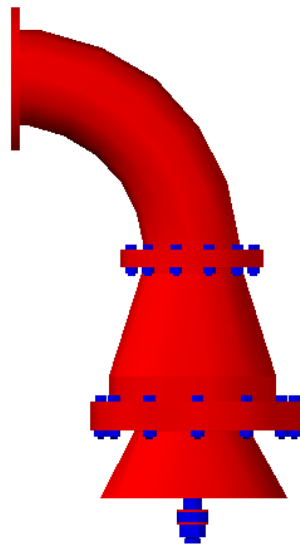


Cet appareil permet l'évacuation de l'air sous un débit contrôlé par la section de la tuyère limitant ainsi le coup de bélier en fin de purge.

En effet, les lois d'écoulement de l'air font que celui-ci ne peut dépasser la vitesse du son, soit environ 200 m/s quelle que soit la pression amont.

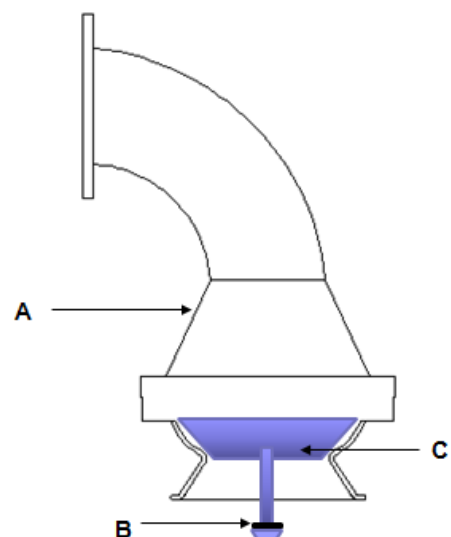
De ce fait, le coup de bélier consécutif à la fin de purge du réseau s'en trouve annulé.

- **Clapet à rentrée d'air**

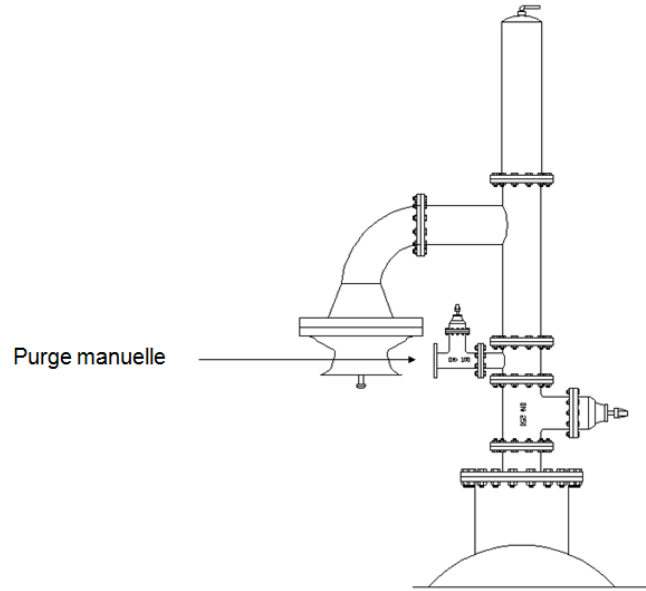


Cet équipement assure la mise à l'atmosphère des conduites pour éviter leur écrasement ou la détérioration des joints en cas de vidange provoquée ou accidentelle.

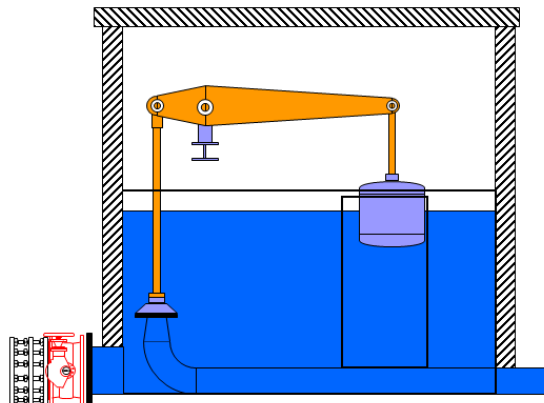
- A- Corps du clapet
- B- Caoutchouc amortisseur
- C- Obturateur en forme de coupelle



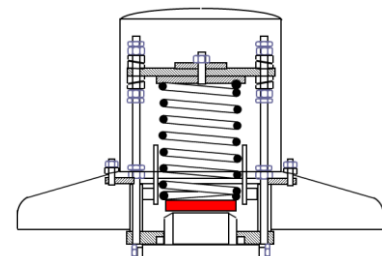
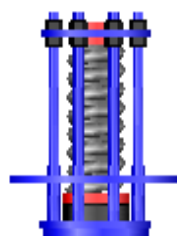
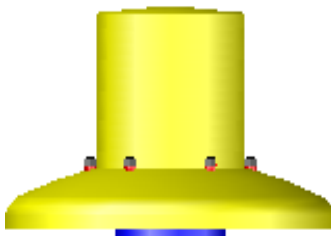
- **Purge manuelle**



- **Obturbateur à disque: (noyé ou sous capot)**



- **Soupape de décharge**



Principe

La soupape est un appareil qui écrête les surpressions en laissant échapper l'eau lorsque la pression dépasse une certaine valeur limite.

Fonctionnement

La soupape est un appareil muni d'un disque plaqué par un puissant ressort. Lorsque la pression de l'eau dépasse la force exercée par le ressort, le disque repoussé, laisse s'échapper à l'extérieur un certain débit.

Tant que la pression à l'intérieur n'est pas revenue à une valeur inférieure à la valeur de réglage la soupape continuera à déborder.

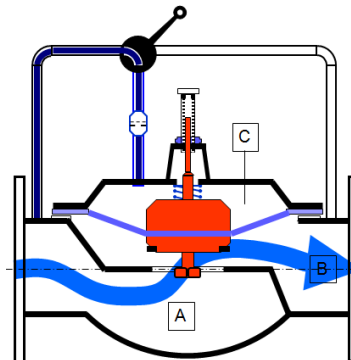
Une soupape est définie par ses diamètres de buse et de fil du ressort en mm, et par sa pression d'étanchéité en m d'eau.

Tarage d'une soupape

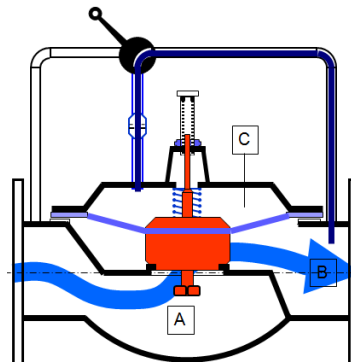
Les soupapes de décharge doivent être étalonnées à 1,05 fois la pression maximale de service au droit de leur installation.

- **Vanne hydrobloc**

Cette manœuvre provoque une arrivée d'eau dans la chambre C et déclenche la fermeture de l'appareil.



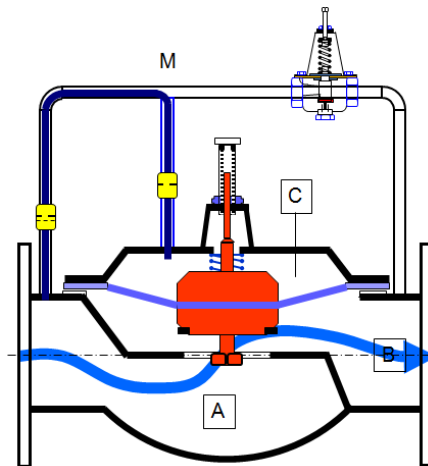
Cette manœuvre provoque une sortie d'eau de la chambre C et l'appareil s'ouvre.



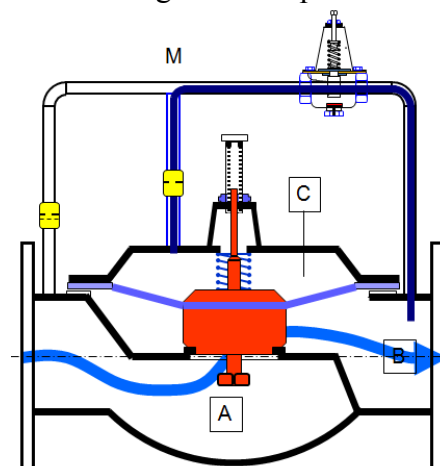
- Régulateur hydrobloc



Si la pression aval augmente, le pilote se ferme partiellement, la pression en M augmente, la chambre C se remplit, l'appareil se ferme faisant ainsi baisser la pression aval.



Si la pression aval diminue, le pilote s'ouvre, la pression en M diminue, la chambre C se vide, l'appareil s'ouvre faisant ainsi augmenter la pression aval.



- **Stabilisateur de pression aval**

Fonctionnement

Réducteur, stabilisateur de pression aval à un clapet compensé par ressort et équilibré de la pression amont par une membrane à déroulement.

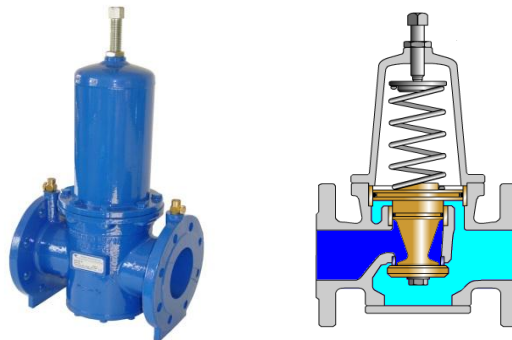
L'effet de la pression amont sur le dessus du clapet est équilibré par l'effet de la pression sous la membrane.

L'ensemble est pratiquement insensible aux variations de cette pression.

L'effet de la pression aval au dessous du clapet est compensé par la compression réglable du ressort.

Quand la pression aval tend à devenir inférieure à la pression de réglage, l'effort du ressort devient prépondérant et l'équipage mobile descend laissant passer un débit plus important, ce qui rétablit la pression.

Inversement, si la pression aval tend à augmenter, l'ensemble se ferme et limite le débit. La pression aval reste donc constante.



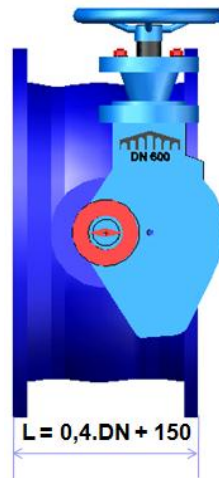
Vannes :

Appareils servant à interrompre ou à rétablir la circulation d'un fluide dans une canalisation à l'aide d'un obturateur commandé de l'extérieur.

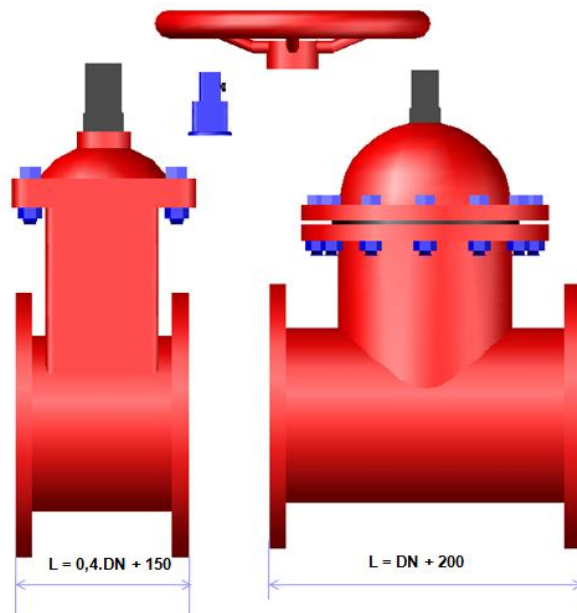
Fonctions:

- ✓ Sectionnement: La vanne est en position ouverte ou fermée.
- ✓ Réglage: Le robinet est maintenu en position intermédiaire d'ouverture permet de régler un débit.
- ✓ Régulation: Le robinet fait varier son ouverture pour maintenir une pression ou un débit à une valeur choisie par l'utilisateur: Régulateur de pression amont; aval; Combinés.

- Vanne papillon



- Vanne à opercule



- **Vanne multijets**

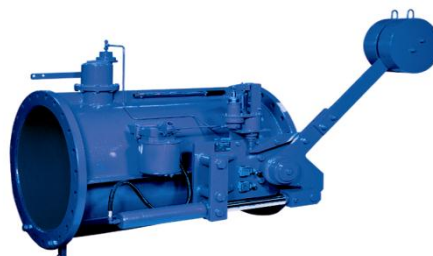


- **Vanne de survitesse**

Description

La vanne de survitesse est composée:

- ✓ d'une vanne à papillon étanche dont l'ouverture est commandée par un vérin hydraulique simple effet, lui même commandé par une pompe manuelle. La fermeture est assurée par des contrepoids. En service normal elle est maintenue ouverte par un verrou mécanique, le vérin étant à l'échappement.
- ✓ d'une tête de servocommande dont l'organe essentiel est une palette articulée jouant le rôle de capteur de vitesse.
- ✓ d'un déclencheur qui équilibre la poussée de la palette en service normal, dont le rôle est de déverrouiller la vanne.



Choix des équipements :

- Pente < à 10 mm/m:
Installer une ou des ventouses suivant l'importance du débit d'air entrant par le point haut lors d'une casse franche.
- Pente ≥ à 10 mm/m:
Installer un purgeur sonique et un ou des clapets à rentrée d'air suivant l'importance du débit d'air entrant par le point haut lors d'une casse franche.

Equipements du réservoir :

Conduite d'arrivée - Robinet à flotteur

La conduite d'adduction à son débouché dans le réservoir, doit pouvoir s'obstruer quand l'eau atteint son niveau maximal: obturation par robinet à flotteur ou obturateur à disque (noyé ou sous capot) si l'adduction est gravitaire ou dispositif permettant l'arrêt du moteur si l'adduction se fait par refoulement: robinet à flotteur + pressostat ou ligne pilote.

Conduite de distribution

Le départ de la conduite s'effectue à 0.15 ou 0.20 m au dessus du radier en vue d'éviter d'introduire des boues ou des sables dans la distribution.
Une crépine d'aspiration doit être prévue à l'extrémité de la conduite pour empêcher l'introduction des débris.

Trop-plein

Cette conduite doit pouvoir évacuer le surplus d'eau en cas de remplissage total du réservoir (cas de non fermeture du robinet à flotteur).

Vidange

Elle part du point bas du réservoir et permet la vidange totale du réservoir en cas de besoin de nettoyage ou d'intervention.

By-pass entre adduction et distribution

En cas d'indisponibilité (nettoyage ou réparation du réservoir).

Comptage

A la sortie de la conduite de distribution un compteur doit être installé pour effectuer des relevés périodiques de la consommation.

Robinets Vannes

Dans chaque canalisation (arrivée, départ, vidange.....) un robinet vanne doit être prévu pour effectuer le sectionnement de chacune de ces conduites en cas de besoin.

Modélisation du réseau d'adduction du bouregreg

IV. MODELISATION DU RESEAU D'ADDUCTION DU BOUREGREG

1. LES MODELES DE REPRESENTATION DANS LE DOMAINE DE L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE

On distingue en général les modèles suivants :

- Modèles de représentation des réseaux.
- Modèles de simulation.

Il existe bien évidemment d'autres modèles, parce qu'ils diffèrent selon le but entendu de la Modélisation.

1.1. MODELES DE REPRESENTATION DES EQUIPEMENTS

Ce type de modèles consiste à représenter les différentes structures et permet de reproduire la connaissance du réseau d'un point de vue descriptif et géométrique.

On représente notre réseau par un graphe constitué de tuyaux qui modélisent des conduites et des nœuds correspondants soit aux connexions entre les conduites soit aux éléments de contrôle hydraulique, des nœuds de consommations (station de traitement) ou bien les sources(barrage).

1.2. MODELES DE SIMULATION

La simulation permet de reproduire à l'identique le fonctionnement d'un système soit dans son état actuel ou futur, ainsi à travers ces modèles on peut prévoir des modifications qui peuvent survenir, les modèles de la simulation peuvent être utilisés dans le cadre :

- D'une étude de diagnostic : connaître le fonctionnement hydraulique du système en situation actuelle et future, pour planifier les interventions nécessaires.
- Pour le contrôle de quelques paramètres de réseau(les débits, les pressions et les vitesses), et l'étude des situations névralgiques du système.

1.3. MODELES POUR L'ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE

Le but principal de ces modèles est la connaissance de la situation hydraulique du système vis-à-vis des conditions hydrauliques, par exemple la cavitation des pompes, les vitesses dans les adductions lorsque on change un paramètre du système.

Tous les modèles nécessitent des calibrages à fin de reproduire le processus réel.

2. BUT DE LA MODELISATION

En raison de la complexité des réseaux d'alimentation en eau potable et des systèmes adducteurs, ces derniers nécessitent une modélisation avant la conception, le dimensionnement et leurs gestions.

La modélisation a pour objectif de reproduire le fonctionnement actuel ou futur du réseau afin de pouvoir tester les scénarios envisagés ou toute autre action sur le réseau.

Ce chapitre présente les différentes étapes de la modélisation du système d'adduction d'eau brute du BouRegreg.

Pour bien modéliser un réseau, il faut avant tout bien le connaître, cette modélisation a donc commencé par une recherche documentaire, par une collecte des données et par l'exploitation des archives et des fichiers suivie de la construction du modèle et finira par un calibrage de ce dernier afin de le rendre conforme à la réalité et pour qu'il soit un outil d'aide à la décision pour les exploitants de ce système.

3. METHODOLOGIE

Pour avoir un modèle fiable qui représente la réalité de notre système on propose les étapes suivantes pour sa construction :

- 1) Caractériser de manière exhaustive et fiable les infrastructures du réseau et connaître le fonctionnement de l'ensemble du système.
- 2) la collecte et l'analyse synthétique de toutes les données nécessaires pour notre étude.
- 3) La construction du modèle.
- 4) Le calibrage du modèle.
- 5) Une fois que le modèle est calibré alors on peut l'exploiter pour faire les simulations de scénarios opérationnels.

4. LES DONNEES DE LA MODELISATION

La réalisation du modèle de simulation hydraulique nécessite la connaissance de :

- La structure ou topologie du réseau, c'est à dire les connexions entre l'ensemble des éléments du réseau. Elle se détermine à partir des plans du réseau que l'on peut trouver chez les exploitants.

- Les caractéristiques des conduites : longueur, diamètre, matériaux, Le diamètre et la longueur sont des données qui se lisent ou sur les plans.
- Les courbes caractéristiques de pompes constituant la station de pompage.
- Le matériau et la date de pose ne sont pas des données indispensables à la réalisation d'un modèle, mais ils permettent une plus grande précision dans la détermination initiale de la rugosité, et par conséquent facilitent le calibrage du modèle.
- Les pertes de charge singulières sont occasionnées par les coudes, changement de diamètre ou de matériau, etc. Pour notre étude on ne dispose pas tous les détails des singularités existantes dans le réseau.
- Les caractéristiques des appareils : pompes, vannes, régulateurs de pression, diaphragmes, régulateur de débit. Il est nécessaire de connaître leur position exacte sur le réseau.

5. CHOIX ET PRESENTATION DU LOGICIEL DE MODELISATION

Nous avons choisi d'effectuer la modélisation et la simulation du fonctionnement hydraulique du système hydraulique de BouRegreg à partir du logiciel WaterGEMS.

5.1. PRESENTATION DU LOGICIEL WATERGEMS

WaterGEMS est une solution complète et conviviale de modélisation hydraulique et de la qualité de l'eau pour les systèmes de distribution d'eau.

Outre son interopérabilité avancée, WaterGEMS offre des outils de gestion d'actifs d'optimisation et de création de modèles sophistiqués. C'est une application multi-plate-forme, elle s'exécute sans restriction sur quatre plates-formes : Autonome, Microstation, AutoCAD ou ArcGIS.

Depuis les analyses de concentration en constituants jusqu'à la gestion des coûts et de la consommation énergétique WaterGEMS aide ingénieurs et services publics à analyser, concevoir et optimiser des systèmes de distribution d'eau. Pour la gestion de leurs infrastructures de distribution d'eau, les services publics, les municipalités et les bureaux d'étude font confiance à WaterGEMS, un outil fiable et économique qui facilite la prise de décisions.

WaterGEMS offre des analyses hydrauliques d'une grande fiabilité, une gestion pratique du modèle, des outils d'interprétation des résultats et une convivialité exceptionnelle.

5.2. POTENTIALITE DU LOGICIEL

▪ **Simulation hydraulique, de défense incendie, de la qualité de l'eau et des opérations d'exploitation du réseau**

Les fonctions intégrées de gestion de la qualité de l'eau, disponibles dans WaterGEMS, permettent aux ingénieurs d'analyser les constituants, l'âge de l'eau, le mélange d'eau dans les réservoirs, ainsi que la traçabilité, afin de définir des programmations de chloration, de simuler des contaminations, de modéliser des unités de type « flow-paced » et « mass-booster » et de visualiser les zones d'influence de chaque source d'eau. Elles permettent également d'améliorer la turbidité, le goût et l'odeur de l'eau en identifiant les problèmes de mélange et en proposant des solutions.

Avec WaterGEMS, Les utilisateurs peuvent également évaluer le volume d'eau disponible pour la défense incendie. L'application calcule la quantité d'eau mobilisable à chaque bouche d'incendie ou groupe de bouches d'incendie, en fonction des contraintes de pression et de débit imposées par les réglementations locales. Les utilisateurs déterminent rapidement et avec précision la capacité du réseau à assurer une protection efficace contre les incendies.

De plus, les commandes d'exploitation basées sur des règles, le pompage à vitesse variable, la modélisation des fuites et des gicleurs, ainsi que les dispositifs de vidange unidirectionnelle, aident les utilisateurs à localiser les goulets d'étranglement, réduire la consommation d'énergie et modéliser différentes actions sur le réseau.

- Simulation en régime permanent.
- Simulation sur période étendue.
- Analyse de la concentration en constituants.
- Traçabilité.
- Analyse du mélange de l'eau dans les réservoirs.
- Analyse de l'âge de l'eau.
- Analyse de la défense incendie.
- Commandes logiques ou basées sur des règles.
- Pompage à vitesse variable.
- Modélisation des fuites et des gicleurs.
- Consommation fonction de la pression.
- Vidange unidirectionnelle en fonction du scénario modélisé.
- Modélisation des vannes.

▪ **Gestion complète des scénarios**

La fonction exclusive de Centre de contrôle des scénarios permet aux ingénieurs de contrôler totalement la configuration, l'exécution, l'évaluation, la visualisation et la comparaison d'un nombre illimité de scénarios dans un seul fichier. Ils peuvent donc tester différentes conceptions, planifications, analyses et scénarios opérationnels afin de prendre les bonnes décisions pour leur infrastructure de distribution d'eau. Ils définissent facilement un nombre illimité de scénarios de modélisation afin d'analyser et de comparer les possibilités de vidange d'urgence en cas de contamination ou les alternatives de réhabilitation envisageables selon les objectifs de planification et les stratégies de contrôle des pompes à des fins d'économies d'énergie.

▪ **Présentation des résultats**

- Cartographie thématique.
- Représentations graphiques dynamiques, multi-paramètres.
- et multi-scénarios.
- Fonction de création de courbes de niveau.
- Fonctions avancées de calcul de profils en long.
- Création de rapports tabulaires avancés à l'aide de FlexTables.
- Symbologie et codification couleur basées sur les propriétés.
- Annotation basée sur les propriétés.

▪ **Optimisation**

- Étalonnage, conception et réhabilitation avancées par application d'algorithmes génétiques.
- Étalonnage automatique des modèles à l'aide de Darwin Calibrator™.
- Conception et réhabilitation optimisées à l'aide de Darwin Designer™.

▪ **Gestion des dépenses énergétiques et d'infrastructure**

- Analyse des dépenses énergétiques.
- Analyse des dépenses d'infrastructure.
- Conception et réhabilitation automatiques.

6. SCHEMATISATION DU RESEAU D'ADDUCTION D'EAU BRUTE DU BOUREGREG

A ce stade, nous allons représenter les différents ouvrages constituant le réseau à savoir le barrage, les galeries d'amenée d'eau, la station de pompage, les conduites de refoulement et la station de traitement.

Le réseau modélisé est schématisé sur la base des plans de masses et des différents schémas fournis par l'ONEP.

En vue de construire le modèle de simulation, nous avons opéré dans un premier temps avec le logiciel de simulation Epanet. Nous avons procédé de la manière suivante :

- i. L'établissement du réseau sur Epanet.
- ii. L'attribution des propriétés et les caractéristiques des différents éléments de réseau à savoir les données caractéristiques de chaque élément du réseau ainsi que les courbes caractéristiques des pompes sur WaterGEMS .

Les données nécessaires pour la construction du modèle sont citées dans le tableau suivant :

Eléments	Caractéristiques
Conduite	Diamètre (mm)
	Longueur (m)
	Rugosité (mm)
	nœud initial et nœud final
	Coefficient de pertes de charge singulière
	Matériau de construction
Bâche	Charge totale (niveau de la surface libre)
	Elévation de la jonction(m NGM)
Vanne	Elévation
	Diamètre (mm)
	Type
	Coefficient de pertes de charge
	Consigne de fonctionnement
Nœud de demande	Altitude
	Demande
Pompe	Courbe caractéristique
	Vitesse de rotation
	Courbe de rendement

Tableau : Paramètres de schématisation des composants du système

Dans un second temps , nous avons exporté le fichier Epanet sous le format INP, pour pouvoir l'importer par la suite avec le logiciel WaterGEMS .

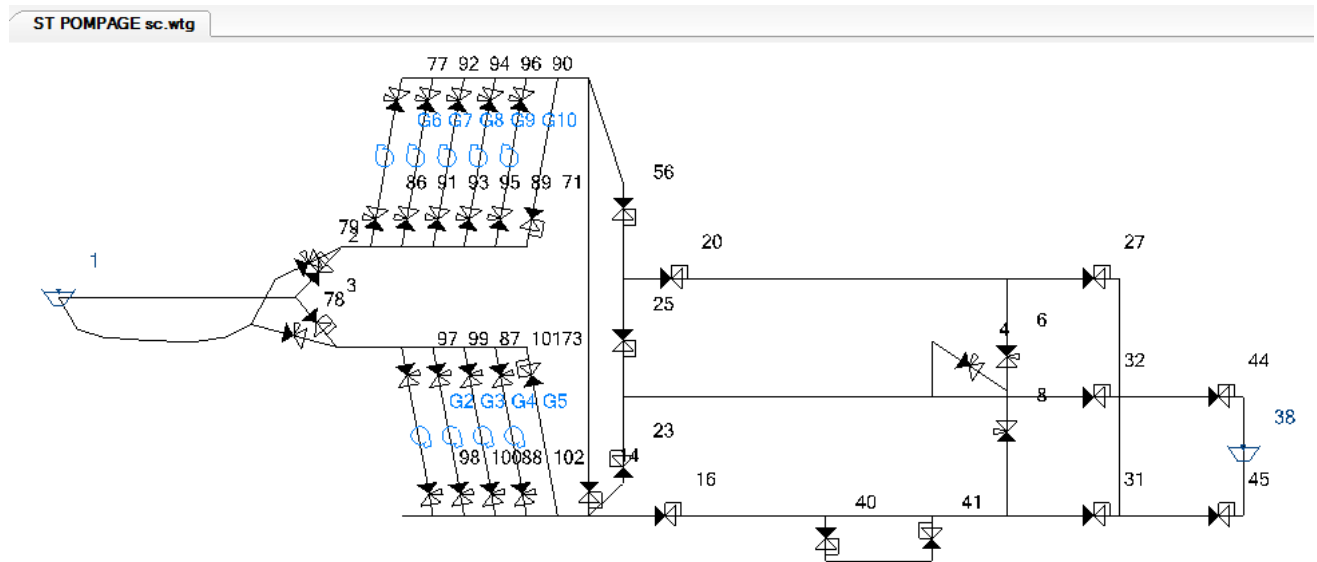
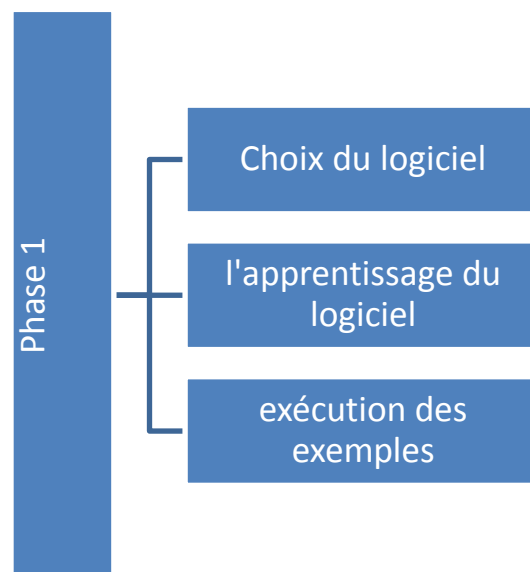
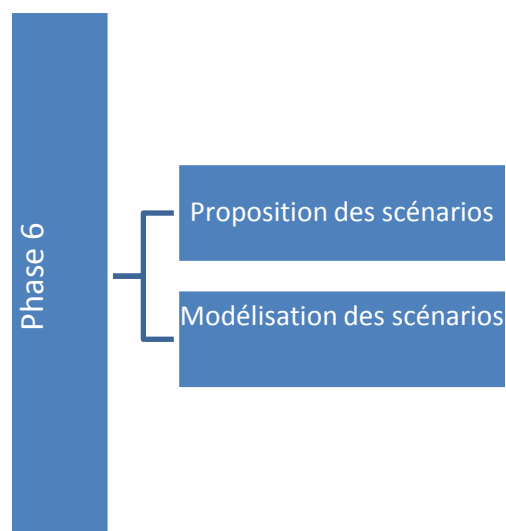
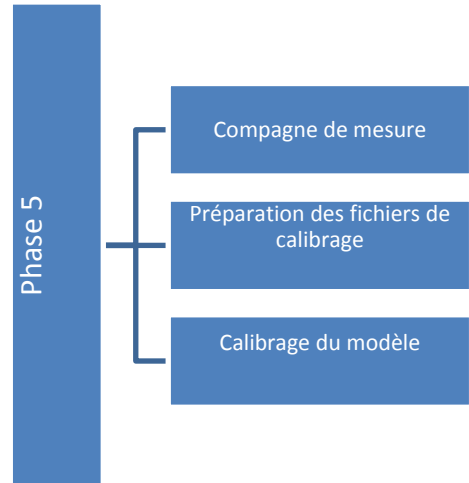
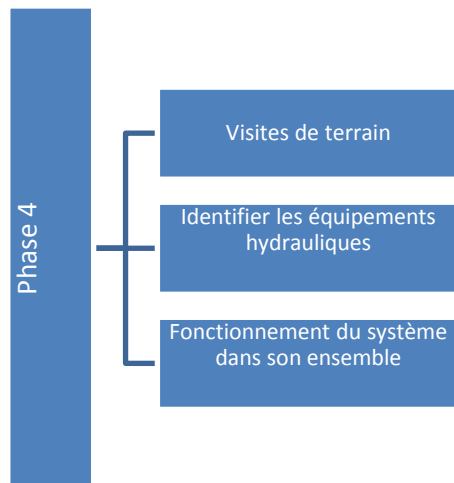
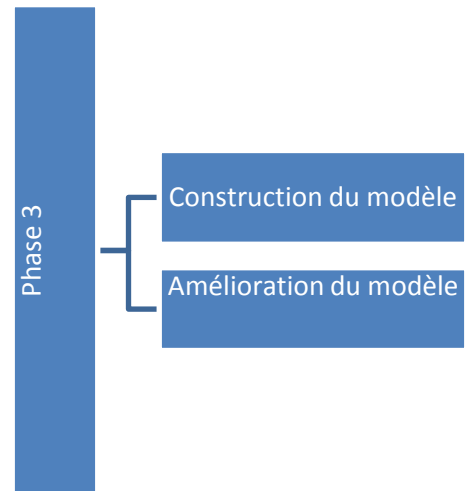
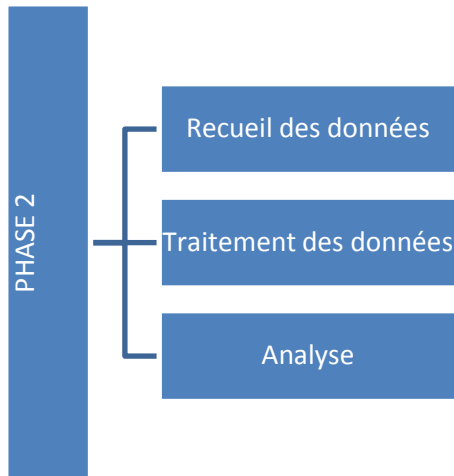


Figure 36 : Schématisation du système d'adduction du BouRegreg

7. PHASAGE ET LOGIGRAMME DU PROCESSUS DE MODELISATION

La figure suivant montre que la totalité du travail de la modélisation, doit être effectué avant que le modèle ne soit exploitable pour résoudre des problèmes réels.





8. LA CAMPAGNE DES MESURES

La campagne de mesures a pour but la collecte des données nécessaires au calibrage du modèle.

Ces données doivent être caractéristiques du fonctionnement ordinaire du réseau sur une période donnée. Les mesures nécessaires au calibrage de notre modèle sont fournies par les bilans mensuels établis au niveau de la station de pompage, nous nous sommes servis d'une autre source de données, qui est une application permettant la télégestion des installations exploitées par le complexe du BouRegreg.

Ces mesures regroupent :

- Mesures de pression sur le réseau.
- Mesures de débit sur le réseau.
- Mesures de l'énergie consommée dans la station de pompage.

Pour prendre connaissance du fonctionnement hydraulique, la réalisation des points significatifs des mesures des pressions et de débits ainsi que la récupération des enregistrements effectués par l'exploitant, est très intéressant, ceci aussi permet d'exploiter ces données lors du calibrage du modèle.

8.1. LES POINTS DE MESURES

Le système d'adduction du BouRegreg comporte des capteurs de pression et des débitmètres qui sont installés le long du système afin de suivre le fonctionnement de ce dernier et planifier les interventions de maintenance.

▪ **Au niveau de la station de pompage**

Sur les deux rives de l'aspiration à l'entrée et celles de refoulement de la station de pompage des mesures de pression s'effectuent via des capteurs de pression implantés sur place.

▪ **Au niveau de la station de traitement**

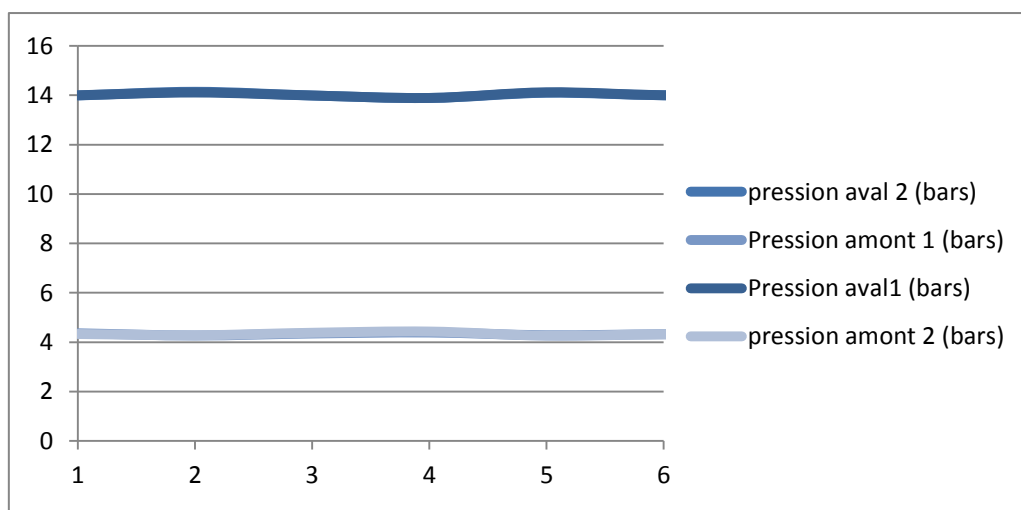
A l'entrée de la station de traitement, deux débitmètres sont installés sur les deux conduites principales de refoulement C1600 et C1400, pour mesurer le débit entrant à la station.

8.2. MESURES REALISEES

Le calibrage du modèle a été effectué sur la base des mesures réalisés durant le mois de Mai 2012, les six premiers jours de ce mois ont été retenus comme période de calibrage.

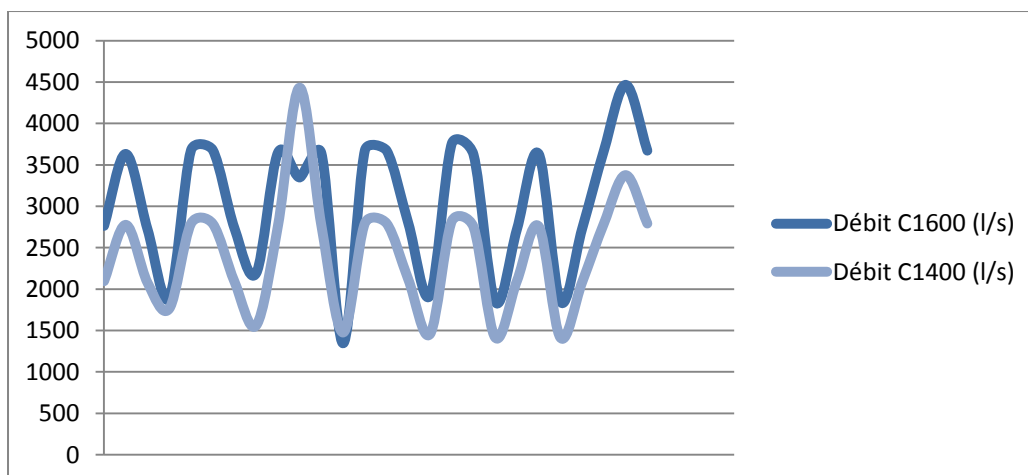
▪ Mesures de pression

Les enregistrements de pression en amont et en aval de la station de pompage ont permis de tracer le graphe d'évolution de la pression en ces points durant les six premiers jours du mois de mai .



▪ Mesures de débits

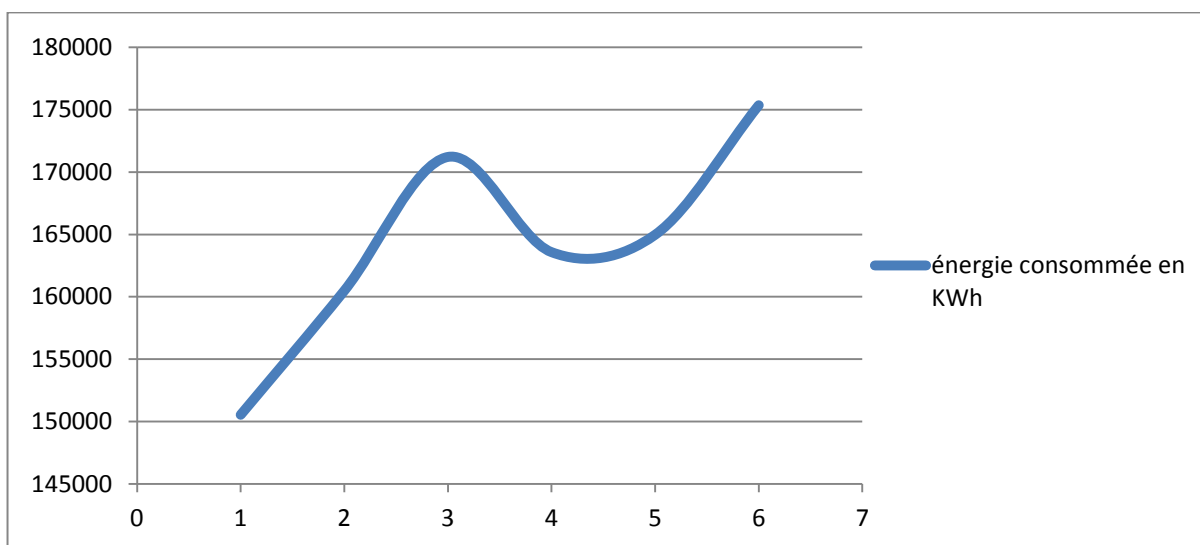
Les points de mesures existants sur le système sont situés à l'entrée de la station de traitement sur les conduites de refoulement C1600 et C1400, nous avons récupéré les données relatives aux débits auprès du centre de contrôle, les mesures sont fournies par le système de télégestion.



Ces mesures permettent d'évaluer le débit de fonctionnement donné par la station de pompage en fonction de la combinaison des groupes de pompage choisi et le niveau de la retenue durant les six premiers jours du mois de Mai 2012 .La côte du barrage à cette date est de 61,04 mNGM .

▪ Mesures d'énergie

L'énergie consommée par la station de pompage par jour est calculée directement à partir des puissances consommées par les différents groupes de pompage. Le graphe ci-dessous montre la variation de l'énergie consommée pendant les six premiers jours de Mai 2012.



9. CALIBRAGE DU MODELE

Lors de cette étape, il est nécessaire de tenir compte du vieillissement des conduites et des pompes afin de rendre le modèle conforme à la réalité, L'adoption du modèle tel qu'il a été construit peut amener à quelques erreurs.

Le calibrage a pour but d'opérer des modifications par rapport aux valeurs théoriques pour rapprocher les résultats simulés aux données observées, ce qui traduirait par la suite la fiabilité des simulations.

Pour ce faire, nous avons calibré notre modèle par les paramètres suivants :

- Pression
- Débit
- Energie

9.1 CALIBRAGE AUTOMATIQUE AVEC DARWIN CALIBRATOR

‘Darwin Calibrator’ est une fonctionnalité intégrée au logiciel WaterGEMS, le module suivant emploie une puissante méthode basée sur les principes de l’évolution naturelle et la reproduction biologique, qui est les algorithmes génétiques. Ce type d’algorithme de recherche est bien adapté à l’optimisation de problèmes de nature locale. Le calibrage d’un modèle hydraulique s’intègre dans cette catégorie de problèmes, par conséquent une optimisation avec les AG est un outil de recherche, et un bon choix pour la calibration du modèle hydraulique.

Après l’insertion de toutes les données observées et la définition de toutes les étapes fournies par le guide de calibrage à savoir :

- La création des groupes d’ajustements, ces derniers sont choisis de la façon à ce que les conduites dont les dates de poses sont proches et dont le diamètre est le même sont regroupées dans le même groupe.
- La définition des seuils min et max de la rugosité à prendre en compte lors du processus du calibrage.
- La définition des statuts initiaux pour les différents éléments du réseau.

En fin du processus du calibrage, les conduites appartenant à un groupe d’ajustement auront la même rugosité.

9.2. LES ALGORITHMES EVOLUTIONNAIRES (ALGORITHME GÉNIQUE)

Les AE sont des algorithmes stochastiques d’optimisation inspirés du paradigme de l’évolution darwinienne des populations. Selon Darwin, les individus les plus aptes survivent à la sélection naturelle et se reproduisent et ceci se répète d’une génération à l’autre, menant à l’adaptation de la population des individus à l’environnement au cours de l’évolution.

En termes d’optimisation, l’évolution se traduit par un processus itératif de recherche de l’optimum dans l’espace de décision.

▪ **Les Algorithmes génétiques**

Les algorithmes génétiques appartiennent à la famille des algorithmes évolutionnistes. Leur but est d’obtenir une solution approchée à un problème d’optimisation, lorsqu’il n’existe pas de méthode exacte pour le résoudre en un temps raisonnable.

Un algorithme génétique recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données .Pour l'utiliser, on doit disposer les cinq éléments suivants :

- Un principe de codage de l'élément de population .Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données.
- Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individu non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global.
- Une fonction à optimiser. Celle-ci retourne une valeur dans R appelé fonction Fitness ou fonction d'évaluation, c'est le critère qui sert à déterminer les bons individus des mauvais.

9.3. CALIBRAGE DES DEBITS ET DES PRESSIONS

- **Calibrage de débit**

Les données que nous avons récupérées auprès de l'ONEP concernent les débits des deux conduites de refoulement liant la station de pompage à la station de traitement.

Il s'agit d'ajuster les débits simulés avec les débits observés dans les différentes conduites de refoulement en agissant sur les pertes de charge au niveau des vannes liées aux conduites ainsi que les rugosités. L'objectif est d'obtenir une bonne corrélation entre les débits simulés et les débits observés.

Les coefficients des pertes de charge que nous avons adopté au niveau des vannes varient entre 0,24 et 0,42. Quant aux rugosités des différentes conduites constituant le réseau, elles seront prises en compte par le processus du calibrage automatique.

Les données relatives aux mesures de débit pendant les six premiers jours du mois de Mai sont présentés dans le tableau suivant :

DATE	GROUPES	DEBIT DN 1400	DEBIT DN 1600	DEBIT TOTAL					
1	7+9	2096	2764	4860	4	4+6	2794	3673	6467
	7+4	2776	3632	6408		6+9	2117	2796	4913
	4+8	2077	2722	4799		6	1457	1923	3380
	4	1764	1892	3656		6+5	2820	3757	6577
	4+6	2790	3675	6465		5+8			0
	6+10			0					0
				0					0
2	6+10			0	5	5+8			0
	6+5	2790	3681	6471		5+7	2750	3624	6374
	5+9	2090	2735	4825		7	1415	1845	3260
	5	1561	2192	3753		7+9	2100	2724	4824
	5+7	2762	3646	6408		7+4			0
	5+7+8	4433	3348	7781					0
	5+7			0					0
	7+10			0	6	7+4	2757	3632	6389
7+10			0	4+8				0	
7+4	2767	3639	6406	4		1414	1850	3264	
4	1476	1346	2822	4+9		2084	2730	4814	
4+6	2794	3673	6467	4+6		2792	3672	6464	
			0	4+6+8		3376	4466	7842	
			0	4+6		2792	3672	6464	

Tableau des mesures des débits dans les conduites de refoulement C1600 et C1400

▪ **Calibrage de pression**

Nous avons collecté les observations de pression à l'entrée et à la sortie de la station de pompage. Le calibrage de pression consiste à faire coïncider le plus possible les pressions mesurées avec les pressions simulées données par WaterGEMS. Le calibrage s'effectue en agissant principalement sur les paramètres suivants :

- Le coefficient de rugosité des conduites.
- L'introduction de singularités en certains points du réseau pour générer des pertes de Charge afin d'ajuster les pressions simulées aux pressions observées.

Nous avons agi sur les pertes de charges au niveau des vannes à l'entrée et à la sortie des groupes de pompage afin de rapprocher les pressions observées avec celles simulée avec le modèle.

Les coefficients de perte de charge utilisés dans ce cas varient entre 0,24 et 5,35.

Les rugosités ont été affectées par le processus de calibrage Darwin Calibrator

DATE	GROUPES	PAM1	PAM2	PAV1					
1	7+9	4,36	4,33	14	4	4+6	4,28	4,29	14,1
	7+4	4,27	4,28	14,11		6+9	4,34	4,29	14
	4+8	4,35	4,38	13,99		6	4,38	4,4	13,9
	4	4,39	4,43	13,89		6+5	4,26	4,28	14,12
	4+6	4,28	4,26	14,12		5+8	4,34	4,39	14
	6+10	4,32	4,32	14					
2	6+10	4,32	4,32	14	5	5+8	4,34	4,39	14
	6+5	4,27	4,27	14,11		5+7	4,26	4,3	14,11
	5+9	4,34	4,36	13,99		7	4,36	4,41	13,9
	5	4,39	4,43	13,89		7+9	4,35	4,32	14
	5+7	4,28	4,3	14,1		7+4	4,26	4,29	14,11
	5+7+8	4,2	4,18	14,22					
	5+7	4,28	4,3	14,1					
7+10	4,35	4,34	14	6	7+4	4,26	4,29	14,11	
3	7+10	4,35	4,34		14	4+8	4,35	4,38	14
	7+4	4,26	4,3		14,11	4	4,39	4,43	13,91
	4	4,39	4,42		13,9	4+9	4,34	4,36	13,99
	4+6	4,28	4,29		14,1	4+6	4,26	4,26	14,11
						4+6+8	4,18	4,15	14,25
					4+6	4,27	4,27	14,13	

Tableau des mesures des pression à l'entrée et à la sortie de la station de pompage

9.4. DEROULEMENT DU CALIBRAGE PAR DARWIN CALIBRATOR

➤ Données de calibrage

La première étape consiste à entrer toutes les observations nécessaires au calibrage du modèle. Ceci est fait après le choix du scénario de base sur lequel le processus de calibrage sera appliqué.

La saisie des mesures observées se passe en plusieurs étapes :

- Premièrement, il faut identifier la date et l'heure correspondantes à chaque mesure réalisées.

Field Data Snapshots				
Roughness Groups	Demand Groups	Status Elements	Calibration Criteria	Notes
Representative Scenario: 54: Base				
Label	Label	Date	Time	Time From Start (hours)
All Snapshots (7)				
test pressure 1 MAI 8H				
test pressure 1 MAI 12.22 H	1	01/05/2012	08:00:00	0,000
test pressure 1 MAI 18H	2	01/05/2012	12:22:08	-19,617
test pressure 2 MAI 00.15H	3	01/05/2012	18:00:00	-14,000
test pressure 2 MAI 8.39H	4	02/05/2012	00:15:00	-7,750
test pressure 2 MAI 19H	5	02/05/2012	08:39:00	-23,350
test pressure 3 MAI 3H	6	02/05/2012	19:00:00	-13,000
	7	03/05/2012	03:00:00	-5,000

- Deuxièmement, pour chaque mesure on identifie l'élément concerné par la mesure, ainsi le type de mesure établie et la valeur de cette dernière.

Field Data Snapshots					
	Roughness Groups	Demand Groups	Status Elements	Calibration Criteria	Notes
Representative Scenario: 54: Base					
Observed Target	Boundary Overrides	Demand Adjustments			
Field Data Set	Element	Attribute	Value		
1	test pressure 1 MAI 8H	89: 63	Pressure (bars)	14,0	
2	test pressure 1 MAI 8H	86: 66	Pressure (bars)	4,3	
3	test pressure 1 MAI 01I	138: 13	Pressure (bars)	13,9	
4	test pressure 1 MAI 8H	87: 65	Pressure (bars)	4,4	
5	test pressure 1 MAI 12.22 H	138: 13	Pressure (bars)	14,1	
6	test pressure 1 MAI 12.22 H	366: 18	Discharge (L/s)	2 776	
7	test pressure 1 MAI 12.22 H	86: 66	Pressure (bars)	4,3	
8	test pressure 1 MAI 12.22 H	89: 63	Pressure (bars)	14,1	
9	test pressure 1 MAI 12.22 H	87: 65	Pressure (bars)	4,3	
10	test pressure 1 MAI 12.22 H	316: 29	Discharge (L/s)	3 632	
11	test pressure 1 MAI 18H	87: 65	Pressure (bars)	4,3	
12	test pressure 1 MAI 18H	89: 63	Pressure (bars)	13,9	
13	test pressure 1 MAI 18H	86: 66	Pressure (bars)	4,4	
14	test pressure 1 MAI 18H	138: 13	Pressure (bars)	13,9	
15	test pressure 2 MAI 00.15H	138: 13	Pressure (bars)	14,1	
16	test pressure 2 MAI 00.15H	86: 66	Pressure (bars)	4,2	
17	test pressure 2 MAI 00.15H	87: 65	Pressure (bars)	4,3	
18	test pressure 2 MAI 00.15H	89: 63	Pressure (bars)	14,1	
19	test pressure 2 MAI 8.39H	87: 65	Pressure (bars)	4,3	
20	test pressure 2 MAI 8.39H	89: 63	Pressure (bars)	14,1	
21	test pressure 2 MAI 8.39H	86: 66	Pressure (bars)	4,3	
22	test pressure 2 MAI 8.39H	138: 13	Pressure (bars)	14,1	
23	test pressure 2 MAI 19H	86: 66	Pressure (bars)	4,4	
24	test pressure 2 MAI 19H	316: 29	Discharge (L/s)	2 192	
25	test pressure 2 MAI 19H	138: 13	Pressure (bars)	13,9	
26	test pressure 2 MAI 19H	89: 63	Pressure (bars)	13,9	
27	test pressure 2 MAI 19H	87: 65	Pressure (bars)	4,4	
28	test pressure 2 MAI 19H	366: 18	Discharge (L/s)	1 561	
29	test pressure 3 MAI 3H	366: 18	Discharge (L/s)	3 348	
30	test pressure 3 MAI 3H	87: 65	Pressure (bars)	4,2	
31	test pressure 3 MAI 3H	89: 63	Pressure (bars)	14,2	
32	test pressure 3 MAI 3H	86: 66	Pressure (bars)	4,2	
33	test pressure 3 MAI 3H	138: 13	Pressure (bars)	14,2	

- Troisièmement, on définit les états initiaux des différents éléments du réseau et les conditions de fonctionnement de cette dernière de manière à ce qu'elles représentent le fonctionnement réel lors de la prise de la mesure.

Field Data Snapshots				
Roughness Groups Demand Groups Status Elements Calibration Criteria Notes				
Representative Scenario: 54: Base				
Label	Label	Date	Time	Time From Start (hours)
All Snapshots (7)				
test pressure 1 MAI 8H	1 test pressure 1 MAI 8H	01/05/2012	08:00:00	0,000
test pressure 1 MAI 12.22 H	2 test pressure 1 MAI 12.22 H	01/05/2012	12:22:08	-19,617
test pressure 1 MAI 18H	3 test pressure 1 MAI 18H	01/05/2012	18:00:00	-14,000
test pressure 2 MAI 00.15H	4 test pressure 2 MAI 00.15H	02/05/2012	00:15:00	-7,750
test pressure 2 MAI 8.39H	5 test pressure 2 MAI 8.39H	02/05/2012	08:39:00	-23,350
test pressure 2 MAI 19H	6 test pressure 2 MAI 19H	02/05/2012	19:00:00	-13,000
test pressure 3 MAI 3H	7 test pressure 3 MAI 3H	03/05/2012	03:00:00	-5,000

Observed Target Boundary Overrides Demand Adjustments				
Field Data Set	Element	Attribute	Value	
1 test pressure 1 MAI 8H	292: G9	Pump Status	On	
2 test pressure 1 MAI 8H	300: G7	Pump Status	On	
3 test pressure 1 MAI 12.22 H	288: G4	Pump Status	On	
4 test pressure 1 MAI 12.22 H	300: G7	Pump Status	On	
5 test pressure 1 MAI 18H	296: G8	Pump Status	On	
6 test pressure 1 MAI 18H	288: G4	Pump Status	On	
7 test pressure 2 MAI 00.15H	288: G4	Pump Status	On	
8 test pressure 2 MAI 00.15H	304: G6	Pump Status	On	
9 test pressure 2 MAI 8.39H	272: G5	Pump Status	On	
10 test pressure 2 MAI 8.39H	304: G6	Pump Status	On	
11 test pressure 2 MAI 19H	272: G5	Pump Status	On	
12 test pressure 3 MAI 3H	296: G8	Pump Status	On	
13 test pressure 3 MAI 3H	300: G7	Pump Status	On	
14 test pressure 3 MAI 3H	272: G5	Pump Status	On	

- Quatrièmement, il s'agit de créer ce qu'on appelle des groupes d'ajustement, ces groupes contiennent les éléments dont la valeur d'attribution sera ajustée durant le processus du calibrage .Il y a plusieurs groupes d'ajustement, dans notre cas le paramètre de calibrage est la rugosité, pour cela nous avons créé des groupes d'ajustement de rugosité (Roughness adjustment groups).la génération des groupes d'ajustement a été faite en respectant les deux points suivant :
 - Les conduites dont la date de pose est proche seront affectées dans le même groupe.
 - Le cas aussi, pour les conduites de même diamètre.

Darwin Calibrator (ST POMPAGE.wtg)

Field Data Snapshots Roughness Groups Demand Groups Status Elements Calibration Criteria Notes

New Calibration Study - 1
New Optimized Run - 1
Solutions
Solution 1

ID	Label	Element IDs	Notes
811	Roughness Group - 1	<Collection: 7 items>	
813	Roughness Group - 2	<Collection: 2 items>	
818	Roughness Group - 3	<Collection: 6 items>	
819	Roughness Group - 4	<Collection: 6 items>	
820	Roughness Group - 5	<Collection: 7 items>	
821	Roughness Group - 6	<Collection: 7 items>	
822	Roughness Group - 7	<Collection: 7 items>	
823	Roughness Group - 8	<Collection: 7 items>	
824	Roughness Group - 9	<Collection: 7 items>	
825	Roughness Group - 10	<Collection: 7 items>	
826	Roughness Group - 11	<Collection: 7 items>	
827	Roughness Group - 12	<Collection: 7 items>	

Selection Set: Roughness Group - 10

Label	Element ID	
366	18	366
340	37	340
337	42	337
339	38	339
338	39	338
358	76	358
333	49	333
336	46	336

Remove All

OK Cancel

La plage des rugosités acceptable a été définie en fixant la valeur maximale et minimale de la rugosité à prendre en compte.

Darwin Calibrator (SI POMPAGE.wtg)

Roughness Demand Status Field Data Options Notes

New Calibration Study - 1
New Optimized Run - 1
Solutions
Solution 1

	Roughness Adjustment Group	Is Active?	Operation	Minimum Value	Maximum Value	Increment
1	811: Roughness Group - 1	<input checked="" type="checkbox"/>	Set	0,100	2,000	0,100
2	813: Roughness Group - 2	<input checked="" type="checkbox"/>	Set	0,100	2,000	0,100
3	818: Roughness Group - 3	<input checked="" type="checkbox"/>	Set	0,100	1,500	0,100
4	819: Roughness Group - 4	<input checked="" type="checkbox"/>	Set	0,100	1,500	0,100
5	820: Roughness Group - 5	<input checked="" type="checkbox"/>	Set	0,100	1,500	0,100
6	821: Roughness Group - 6	<input checked="" type="checkbox"/>	Set	0,100	1,500	0,100
7	822: Roughness Group - 7	<input checked="" type="checkbox"/>	Set	0,100	1,500	0,100
8	823: Roughness Group - 8	<input checked="" type="checkbox"/>	Set	0,100	1,500	0,100
9	824: Roughness Group - 9	<input checked="" type="checkbox"/>	Set	0,100	1,500	0,100
10	825: Roughness Group - 10	<input checked="" type="checkbox"/>	Set	0,100	1,500	0,100
11	826: Roughness Group - 11	<input checked="" type="checkbox"/>	Set	0,100	1,500	0,100
12	827: Roughness Group - 12	<input checked="" type="checkbox"/>	Set	0,100	1,500	0,100

9.5. FORMULES ET CRITERES DE CALIBRAGE PAR DARWIN CALIBRATOR

Les formules suivantes sont utiliser pour minimiser le carrée de la différence , la différence absolue et la différence maximale .

- Minimize Difference Squares:

$$\frac{\sum W_{nh} \left(\frac{H_{simnh} - H_{obsnh}}{H_{pnt}} \right)^2 + \sum W_{nf} \left(\frac{F_{simnf} - F_{obsnf}}{F_{pnt}} \right)^2}{NH + NF}$$

- Minimize Difference Absolute Values

$$\frac{\sum W_{nh} \left| \frac{H_{simnh} - H_{obsnh}}{H_{pnt}} \right| + \sum W_{nf} \left| \frac{F_{simnf} - F_{obsnf}}{F_{pnt}} \right|}{NH + NF}$$

- Minimize Maximum Difference

$$\max \left\{ \max w_{nh} \left| \frac{H_{simnh} - H_{obsnh}}{H_{pnt}} \right|, \max w_{nf} \left| \frac{F_{simnf} - F_{obsnf}}{F_{pnt}} \right| \right\}$$

Avec :

$$w_{nh} = \frac{H_{obsnh}}{\sum H_{obsnh}}$$

$$w_{nf} = \frac{f_{obsnf}}{\sum f_{obsnf}}$$

- **Hobsnh** et **Hsimnh** désignent respectivement la valeur observée et simulé de la charge au nœud nh.
- **Fobsnf** et **Fsimnf** désignent respectivement la valeur observée et simulée du débit dans la conduite nf.
- **NH** est le nombre de point d'observation de la charge.
- **NF** est le nombre de point d'observation de débit.

9.6. RESULTATS DU CALIBRAGE DES PRESSIONS ET DES DEBITS

Nous avons pris comme solution initiale ,une rugosité uniforme de 0,1 mm .

Après l'exécution du processus de calibrage,nous avons obtenue après 10 000 itérations la solution suivante : $\varepsilon_1 = 0,609$ mm ; $\varepsilon_2 = 0,457$ mm

▪ Rugosité

la figure ci –dessous récapitule la répartition de la rugosité en fonction des différents groupes d'ajustement .

Solution		Simulated Results		
Adjustment Results				
Adjustment Groups				
	Adjustment Group	Link	Original Darcy-Weisbach e (mm)	Adjusted Darcy-Weisbach e (mm)
1	811: Roughness Group...	355: 81	0,1000	0,6096
2	811: Roughness Group...	354: 82	0,1000	0,6096
3	811: Roughness Group...	353: 83	0,1000	0,6096
4	811: Roughness Group...	352: 84	0,1000	0,6096
5	811: Roughness Group...	351: 85	0,1000	0,6096
6	811: Roughness Group...	350: 103	0,1000	0,6096
7	811: Roughness Group...	349: 104	0,1000	0,6096
8	813: Roughness Group...	315: 1	0,1000	0,6096
9	813: Roughness Group...	314: 24	0,1000	0,6096
10	818: Roughness Group...	363: 52	0,1000	0,4572
11	818: Roughness Group...	326: 62	0,1000	0,4572
12	818: Roughness Group...	325: 63	0,1000	0,4572
13	818: Roughness Group...	324: 64	0,1000	0,4572
14	818: Roughness Group...	323: 65	0,1000	0,4572
15	818: Roughness Group...	348: 5	0,1000	0,4572
16	819: Roughness Group...	362: 57	0,1000	0,4572
17	819: Roughness Group...	330: 58	0,1000	0,4572
18	819: Roughness Group...	329: 59	0,1000	0,4572
19	819: Roughness Group...	328: 60	0,1000	0,4572
20	819: Roughness Group...	327: 61	0,1000	0,4572
21	819: Roughness Group...	347: 7	0,1000	0,4572
22	820: Roughness Group...	313: 30	0,1000	0,4572
23	820: Roughness Group...	311: 50	0,1000	0,4572
24	820: Roughness Group...	322: 67	0,1000	0,4572
25	820: Roughness Group...	312: 43	0,1000	0,4572
26	820: Roughness Group...	331: 51	0,1000	0,4572
27	820: Roughness Group...	345: 13	0,1000	0,4572
28	820: Roughness Group...	369: 9	0,1000	0,4572
29	821: Roughness Group...	321: 68	0,1000	0,4572
30	821: Roughness Group...	360: 74	0,1000	0,4572
31	821: Roughness Group...	320: 70	0,1000	0,4572
32	821: Roughness Group...	361: 69	0,1000	0,4572
33	821: Roughness Group...	332: 36	0,1000	0,4572

▪ Pressions

La figure suivante donne les la différence entre les valeurs observées et simulées de la charge hydraulique dans les différents nœuds, à l'aspiration et au refoulement de la station de pompage.

	Field Data Snapshot	Junction	Observed Hydraulic Grade (m)	Simulated Hydraulic Grade (m)	Difference (m)
1	406: test pressure 1 MA...	87: 65	61,46	60,16	-1,30
2	406: test pressure 1 MA...	89: 63	161,26	165,44	4,18
3	406: test pressure 1 MA...	86: 66	61,15	60,13	-1,03
4	406: test pressure 1 MA...	138: 13	159,74	165,43	5,69
5	806: test pressure 1 MA...	87: 65	60,54	60,16	-0,39
6	806: test pressure 1 MA...	89: 63	162,28	165,44	3,16
7	806: test pressure 1 MA...	86: 66	60,85	60,13	-0,72
8	806: test pressure 1 MA...	138: 13	162,19	165,43	3,24
9	807: test pressure 1 MA...	87: 65	60,85	60,16	-0,69
10	807: test pressure 1 MA...	89: 63	160,24	165,44	5,20
11	807: test pressure 1 MA...	86: 66	61,87	60,13	-1,74
12	807: test pressure 1 MA...	138: 13	159,74	165,43	5,69
13	808: test pressure 2 MA...	87: 65	60,85	60,16	-0,69
14	808: test pressure 2 MA...	89: 63	162,28	165,44	3,16
15	808: test pressure 2 MA...	86: 66	59,83	60,13	0,30
16	808: test pressure 2 MA...	138: 13	161,78	165,43	3,65
17	809: test pressure 2 MA...	87: 65	60,85	60,16	-0,69
18	809: test pressure 2 MA...	89: 63	162,28	165,44	3,16
19	809: test pressure 2 MA...	86: 66	60,85	60,13	-0,72
20	809: test pressure 2 MA...	138: 13	161,78	165,43	3,65
21	810: test pressure 2 MA...	87: 65	61,87	60,16	-1,71
22	810: test pressure 2 MA...	89: 63	160,24	165,44	5,20
23	810: test pressure 2 MA...	86: 66	61,87	60,13	-1,74
24	810: test pressure 2 MA...	138: 13	159,74	165,43	5,69
25	812: test pressure 3 MA...	87: 65	59,83	60,16	0,33
26	812: test pressure 3 MA...	89: 63	163,50	165,44	1,93
27	812: test pressure 3 MA...	86: 66	59,83	60,13	0,30
28	812: test pressure 3 MA...	138: 13	162,80	165,43	2,63

Les graphiques suivants comparent les valeurs simulées et les valeurs observées des pressions.

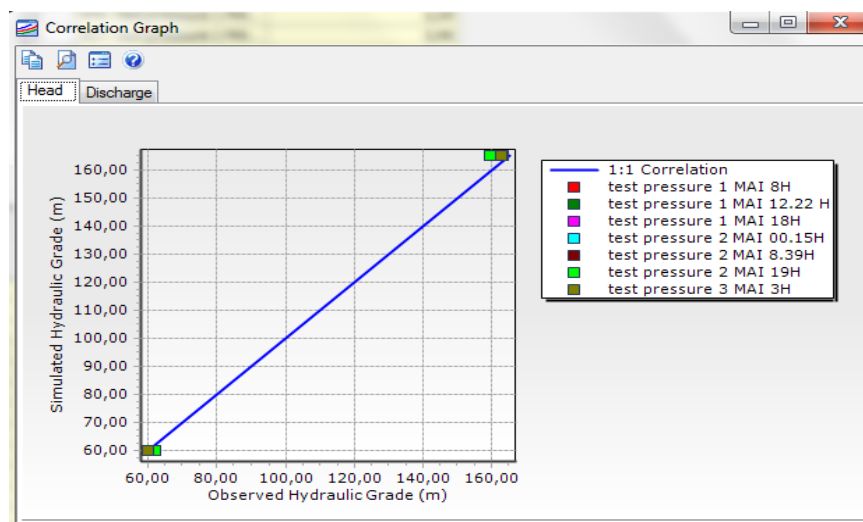


Figure : Diagramme de corrélation pour la pression

▪ **Débits**

Le tableau suivant donne les valeurs simulées et observées du débit dans les conduites de Refoulement au début du mois de Mai.

GROUPES	DEBIT DN 1400	DEBIT DN 1600	simulé 1400 (l/s)	simulé 1600 (l/s)	Différence 1400	Différence 1600
					(%)	(%)
7+9	2096	2764	2005	2702	4,3%	2,2%
7+4	2776	3632	2 731	3667	1,6%	1,0%
4+8	2077	2722	2048	2747	1,4%	0,9%
4	1764	1892	1623	1906	8,0%	0,7%
4+6	2790	3675	2739	3678	1,8%	0,1%
6+5	2790	3681	2664	3577	4,5%	2,8%
5+9	2090	2735	1988	2667	4,9%	2,5%
5+7	2762	3646	2656	3567	3,8%	2,2%
5+7+8	3348	4433	3245	4359	3,1%	1,7%
6+9	2117	2796	2013	2712	4,9%	3,0%
6	1457	1923	1367	1843	6,2%	4,2%
7	1415	1845	1360	1834	3,9%	0,6%
4+9	2084	2730	2070	2777	0,7%	1,7%

9.7. CALIBRAGE D'ENERGIE

Nous disposons des données de l'énergie journalière consommée par les groupes de pompage pendant le mois de Mai, le calibrage de l'énergie s'effectue en agissant principalement sur le rendement hydraulique.

Les rendements des moteurs qui entraînent les pompes sont pratiquement constant 96% (selon l'exploitant), et car il s'agit d'un entraînement à vitesse fixe .En effet, nous ne disposons pas des courbes de rendement actualisées, et sans oublier que l'effet de vieillissement réduit la performance des pompes et les rend moins rentables, ceci nous a poussé à vérifier auprès des exploitants les mesures récentes de rendement, malheureusement ces données étaient réduites.

Le calibrage fait sur le début du mois de mars a permis de constater les rendements ont subi une réduction entre 4 à 7% par rapport à la valeur théorique.

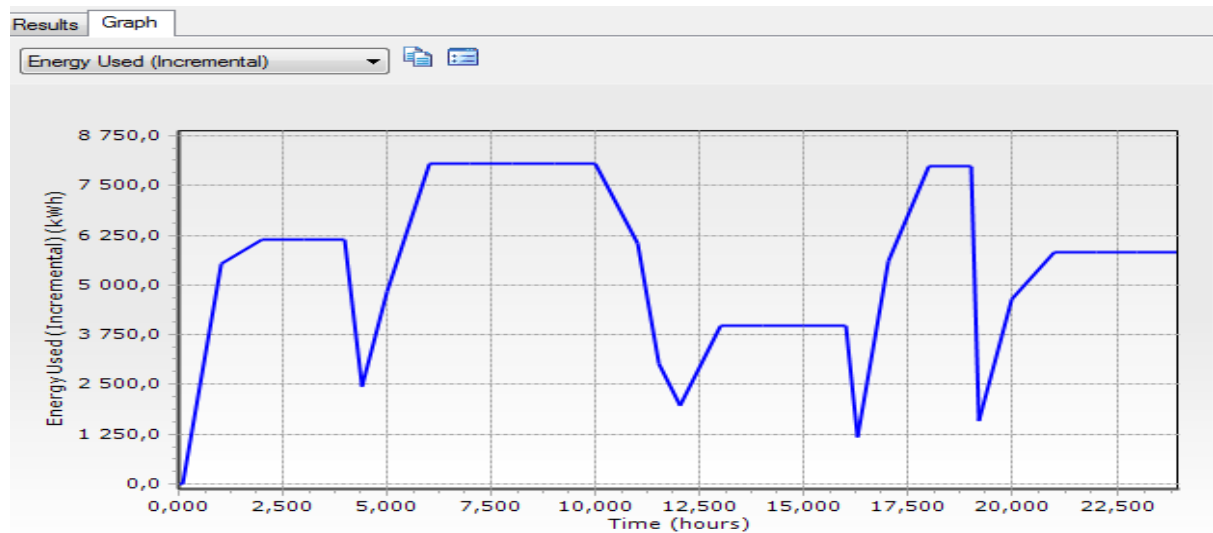
9.8. RESULTAT DU CALIBRAGE D'ENERGIE :

Le logiciel de simulation permet la prise en compte des contrôles et des conditions imposés afin de construire un scénario précis, il intègre aussi un module de calcul d'énergie , ceci nous a permis de simuler le fonctionnement pendant les six premiers jours du mois de Mai .

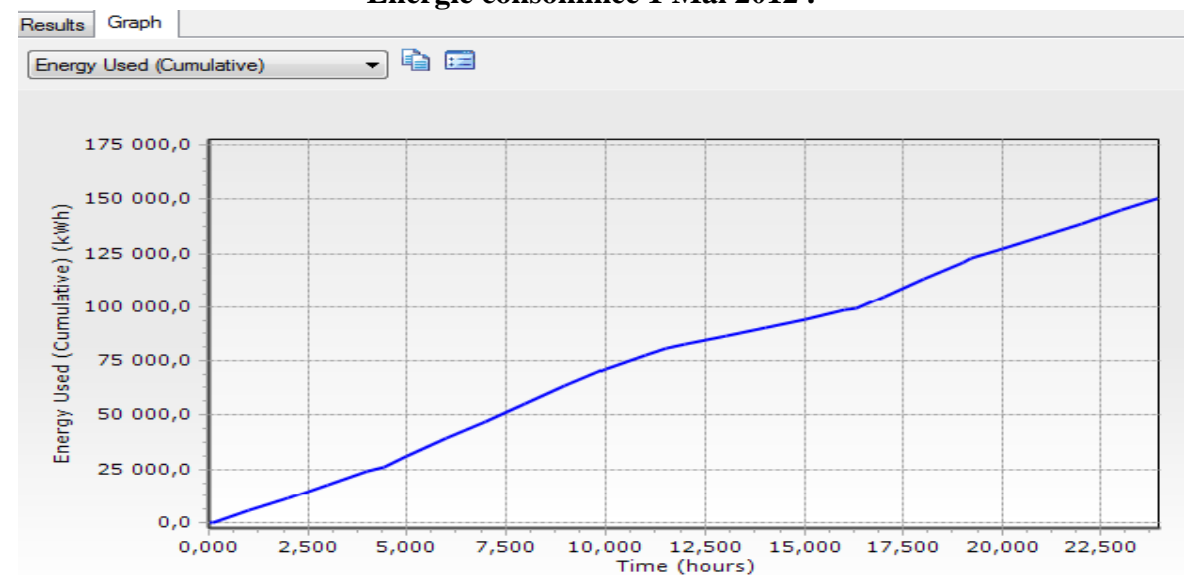
Le calibrage d'énergie a abouti à ce qui suit :

- **Résultat du 1 Mai 2012**

Energie réelle KWh	Energie simulée KWh
150 538	150 688,4



Energie consommée 1 Mai 2012 .



Energie cumulée le 1 Mai 2012.

- **Résultat du 2 Mai 2012**

Energie réelle KWh	Energie simulée KWh
160 488	154 946,0

- **Résultat du 3 Mai 2012**

Energie réelle KWh	Energie simulée KWh
171 214	168 287,9

- **Résultat du 4 Mai 2012**

Energie réelle KWh	Energie simulée KWh
163 578	154 696,0

- **Résultat du 5 Mai 2012**

Energie réelle KWh	Energie simulée KWh
164 974	165 585,1

- **Résultat du 6 Mai 2012**

Energie réelle KWh	Energie simulée KWh
175 359	176 317,6

Conclusion

À la suite des résultats obtenus que se soit sur le calibrage de débit, de pression ou de la consommation d'énergie on peut conclure que notre modèle est acceptable et valide.

9.9. APPLICATION DU MODELE DE SIMULATION

Le modèle est construit dans le but de servir comme :

- Outil de planification, de prévision de ce qui peut se passer dans le futur afin d'évaluer la vulnérabilité d'un système pour différents types d'événements et de planifier la façon de réagir si un tel événement se produit.
 - Outil en temps réel pour l'utilisation lors d'un événement actuel pour aider à formuler une solution à la situation.
 - Outil pour enquêter sur un événement passé afin de le comprendre.
- **Scénario pour un fonctionnement en régime permanent.**

Les objectifs attendus lors de l'exécution d'une simulation sont :

- Qu'elle sera la distribution des pressions et des débits dans le réseau en faisant varier la cote du barrage et les combinaisons de groupes de pompage.
- Y'aura-t-il du phénomène de cavitation dans les pompes pour les différentes configurations du fonctionnement du réseau
- Que serait le comportement du système en cas d'intervention sur une branche principale du réseau

Le modèle que nous avons élaboré, nous servira aussi dans la phase d'optimisation que nous allons présenter dans le chapitre qui suit .

www.Mcours.com
Site N°1 des Cours et Exercices Email: contact@mcours.com

Optimisation du système de production du Bouregreg

V. OPTIMISATION DU SYSTEME DE PRODUCTION DU BOUREGREG

1. INTRODUCTION

Le problème d'ordonnement des 9 groupes de pompage comme indiqué ci-dessous est trivial à formuler, mais en raison du grand nombre de composants du système étudié pompes, réservoirs... etc. La résolution du problème devient très difficile pour différents algorithmes connus dans la littérature. La complexité du problème est due à sa nature elle-même : programmation en nombres entiers mixte, non linéaire et combinatoire.

Pour cette raison on a choisi de travailler avec Oracle Crystal ball & Decision Optimizer vu sa puissance et sa rapidité, le nombre de contraintes peut atteindre 5000 contraintes et le nombre de variables 1000 variables.

Oracle Crystal ball & Decision Optimizer est une option pour Oracle Crystal Ball qui ajoute des fonctionnalités avancées d'optimisation et de vitesse de calcul à la simulation puissante Oracle Crystal Ball et outils de prévision. Oracle Crystal ball & Decision Optimizer est la meilleure façon d'effectuer l'analyse des risques rapides et l'optimisation de vos propres feuilles de calcul.

OptQuest est un outil d'optimisation qui fonctionne comme un add-in pour Crystal Ball qui améliore les modèles de simulation par recherche automatique des solutions optimales.

Optquest procède comme suit dans sa méthode de résolution des problèmes d'optimisation : Il sélectionne une valeur pour chaque variable de décision, entre ces valeurs dans votre feuille de calcul, exécute une simulation Monte-Carlo sur la feuille de calcul, enregistre les résultats, et répète le processus.

2. HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

- Conservation du flux de matière (pas de fuites dans les conduites)
- Temps de séjour de l'eau dans la station de traitement n'est pas pris en compte
- Les débits obtenus ne dépassent pas la capacité des différentes conduites
- Côte du barrage considérée constante pour un jour donné
- Les grands groupes et les petits groupes sont respectivement identiques

3. FORMULATION GÉNÉRALE DU PROBLÈME

$$\begin{aligned} & \text{Min } F(x) \\ & \text{S/c } Ax \leq b \\ & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ & g_{\min} \leq G(x) \leq g_{\max} \end{aligned}$$

Où x peut être continu ou discret avec un pas arbitraire.

4. FORMULATION DU PROBLÈME

On cherche à déterminer le fonctionnement optimal de la station de pompage permettant de réduire le coût de la facture énergétique, en fonction du mode tarifaire souscrit tout en s'assurant que la demande en eau est satisfaite en permanence et en respectant les conditions aux limites des ouvrages de stockage.

Pour ce faire, on devrait choisir un jour dont nous disposons des données nécessaires : Consommations horaires pour chaque réservoir, capacités et dimensions des réservoirs, débits pompés et rendements pour chaque combinaison de groupes de la station de pompage, hauteur manométrique totale...etc.

Notre visite de la station de pompage a coïncidé avec une HMT de 98.6m, qu'on a calculé à partir de la différence entre les pressions d'aspiration et de refoulement.

Pour aboutir à un fonctionnement optimal de la station, on doit minimiser le coût de pompage tout en tenant compte des contraintes qui sont :

- La satisfaction de la demande horaire
- Le niveau dans tous les réservoirs qui doit être compris entre une limite inférieure qui correspond au volume de sécurité (20% de la capacité totale du réservoir) et une limite supérieure qui à elle correspond à 100% de la capacité totale.
- Le nombre de switches pour chaque pompe qui ne doit dépasser 5 arrêt-marche pour éviter le plus possible un régime transitoire et pour réduire les frais de maintenance.
- Le débit maximum que fournit la station de pompage ne doit pas dépasser $9\text{m}^3/\text{s}$ (débit maximum de la station de traitement).

4.1 MODELE DE LA FONCTION OBJECTIF

La fonction objectif est la fonction du coût de pompage qui se traduit comme suit :

$$Coût = \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^9 \frac{\rho g Q_{ij} HMT}{r_{h_i}} T_i B_{ij}$$

Avec,

ρ : Densité de l'eau

g : Accélération de la pesanteur

Q_{ij} : Débit donné par la pompe j à la $i^{\text{ème}}$ heure

HMT : Hauteur manométrique totale

T_i : Tarif de la $i^{\text{ème}}$ heure

B_{ij} : Matrice qui définit les pompes en marche

r_{h_i} : Rendement hydraulique à la $i^{\text{ème}}$ heure

La station de pompage dispose de 9 groupes : 6 grands groupes et 3 petits, le débit maximum de la station de traitement est de $9\text{m}^3/\text{s}$, ainsi, dans chaque heure le nombre de groupes en marches ne peut pas dépasser 3 groupes : 2 grands et 1 petits pour que le débit livré par la station de pompage soit toujours inférieur ou égal à $9\text{m}^3/\text{s}$.

Quand on doit livrer un débit quelconque et on a le choix d'utiliser ou 1 grand groupe ou 2 petits groupes on préfère faire marcher le grand groupe car le rendement hydraulique est meilleur dans ce cas.

Ainsi à partir de ce qui précède on peut réduire notre problème en diminuant le nombre de variables, au lieu d'étudier 9 groupes on se contentera par 3 groupes: 2 grand et un petit.

4.2 MODÈLE DES VARIABLES

Le modèle de la fonction objectif qu'on a traité dans la partie précédente montre qu'on a divisé notre jour en 24h, chose qui veut dire que pour un jour donné on aura 24 combinaisons de groupes et 24 débits de production pompés.

Nous disposons de deux types de variables :

- **Variables binaires** qui traduisent l'état des pompes « soit en marche soit en arrêt » et ils sont en nombre de 72, car chaque groupe dans une heure donné peut être soit en marche donc prenant la valeur « 1 » soit en arrêt et donc prenant la valeur « 0 ».
- **Variables continus** qui traduisent les débits horaires produits pour chaque réservoir de distribution. Le nombre de réservoirs étudié est 19, ainsi on aura $19 \times 24 = 456$ variables continus.

4.3. MODÈLE DE CONTRAINTES

- **Contraintes de stockage :**

Le niveau dans chaque réservoir doit être maintenu entre un niveau maximum correspondant 100% de la capacité du réservoir et un niveau minimum correspondant à la réserve de sécurité qui est de 20% de la capacité totale.

Les réservoirs garantissent la fiabilité de l'approvisionnement en eau potable, ils se vident en heures de pointe où le débit de pompage est faible pour se remplir en heures creuses où le débit de pompage est élevé.

La contrainte de stockage peut être traduite comme suit :

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$$

Avec V_i : volume disponible en fin d'heure i

V_{\min} : 20% de la capacité du réservoir

V_{\max} : 100% de la capacité du réservoir

Soit V_0 le volume d'eau dans le réservoir de tête (R 50 000) à 00h,

Alors V_{0i} le volume d'eau dans le réservoir de tête à la $i^{\text{ème}}$ heure est :

$$V_{0i} = V_0 + \sum_{k=1}^i (E_k - S_k)$$

Avec E_k , S_k le volume d'eau entrant et sortant respectivement au réservoir de tête à la $k^{\text{ème}}$ heure :

$$E_k = \sum_{p=1}^3 (Q_{pk} \times 1h)$$

$$S_k = \sum_{r=1}^{19} (q_{rk} \times 1h)$$

Avec Q_{pk} le débit que fournit la pompe p à l'heure k

q_{rk} le débit fournit au réservoir r à l'heure k

Soit V_{r0} le volume d'eau dans un réservoir de distribution à 00h,

Alors V_{ri} le volume d'eau dans un réservoir de distribution à la $i^{\text{ème}}$ heure est :

$$V_{ri} = V_{r0} + \sum_{k=1}^i (E_{rk} - S_{rk})$$

Avec E_{rk} , S_{rk} le volume d'eau entrant et sortant respectivement au réservoir de distribution r à la $k^{\text{ème}}$ heure :

$$E_{rk} = \sum_{m=1}^3 (q_{rk} \times 1h)$$

$$S_{rk} = C_{rk}$$

Avec q_{rk} le débit fournit au réservoir r à l'heure k

C_{rk} la consommation horaire du réservoir r à l'heure k

- **Contraintes de consommation :**

Pour pouvoir maintenir le niveau d'eau dans chaque réservoir dans la plage de niveaux possibles, la consommation à chaque heure doit être inférieure à un volume utilisable, ce dernier qui est égale à la somme du volume produit et le volume disponible dans le réservoir en fin d'heure précédente moins la réserve de sécurité.

Cette contrainte peut être traduite pour le réservoir de tête comme suit :

$$\sum_{p=1}^3 (Q_{pk} \times 1h) + V_{0,k-1} - 20\% \times V_{R50000} \geq \sum_{r=1}^{19} (q_{rk} \times 1h)$$

Pour les réservoirs de distribution, on écrit:

$$(q_{rk} \times 1h) + V_{r,k-1} - 20\% \times V_{r,\text{total}} \geq C_{rk}$$

- **Contraintes du système :**

La station de traitement doit fonctionner 24h/24, ainsi à chaque heure on est contraint par le fait de garder au moins une pompe en marche. Par conséquent, le débit qui alimente la station de traitement doit être toujours supérieur à un minimum qui est en fait le débit que livre un petit groupe.

En outre, la capacité de la station de traitement est limitée actuellement à un débit de $9\text{m}^3/\text{s}$, donc le débit alimentant cette station doit être inférieur en permanence à son débit capable.

Ces deux contraintes peuvent être exprimées comme suit :

$$Q_{\min} \leq \sum_{p=1}^9 (Q_{pk}) \leq Q_{\max}$$

Avec $Q_{\max} = 9\text{m}^3/\text{s}$

Q_{\min} le débit que livre un petit groupe

- **Contraintes de switches des pompes :**

Le nombre d'interruptions de la pompe dans un cycle de fonctionnement doit être limité afin d'éviter l'excès d'exploitation de la pompe, des coûts de maintenance et aussi pour éviter tant que possible de tomber dans un régime transitoire.

5. OUTILS ET DONNEES DE TRAVAIL

5.1 VOLUME DES RÉSERVOIRS

On a décomposé notre réseau en 19 sous-réseaux où chaque sous-réseau est représenté par un réservoir, ci-dessous la liste de ces 19 réservoirs accompagnés de leurs volumes :

	Volume du réservoir (m ³)
Réservoir Hay Nahda 40 000	40 000
Réservoir Ambassador 20 000	20 000
Réservoir Ambassador 12 000	12 000
Réservoir Takadoum 14 000	14 000
Réservoir Takadoum 18 000	18 000
Réservoir Sala Al Jadida	15 000
Réservoir Maâmora	10 000
Réservoir Ouled Hlal	60 000
Réservoir Sidi Allal Bahraoui	600
Réservoir Ain Aouda	200
Réservoir Loulalda	20 000
Réservoir Skhirat	2 000
Réservoir Tit Mellil	35 000
Réservoir Médiouna	115 000
Réservoir Km8	35 000
Réservoir Benslimane	5 500
Réservoir Rommani	1 500
Réservoir Alia	3 500
Réservoir Ain Tekki	35 000

5.2 CONSOMMATION DANS CHAQUE RÉSERVOIR

Ci-dessous la demande journalière pour chaque réservoir de notre réseau :

	Demande journalière (m ³)
Réservoir Hay Nahda 40 000	32 402
Réservoir Ambassador 20 000	700
Réservoir Ambassador 12 000	22 347
Réservoir Takadoum 14 000	59 855
Réservoir Takadoum 18 000	40 000
Réservoir Sala Al Jadida	7 480
Réservoir Maâmora	11 311
Réservoir Ouled Hlal	38 588
Réservoir Sidi Allal Bahraoui	1 375
Réservoir Ain Aouda	557
Réservoir Loulalda	22 347
Réservoir Skhirat	28 007
Réservoir Tit Mellil	46 803
Réservoir Médiouna	81 460
Réservoir Km8	57 895
Réservoir Benslimane	10 044
Réservoir Rommani	8 014
Réservoir Alia	6 043
Réservoir Ain Tekki	18 873

Pour l'évolution de la consommation sur une journée , nous avons utilisé une répartition standard tirée de LYDEC et cela car on n'a pas pu obtenir les données réelles de LYDEC et REDAL pour des raisons de confidentialité.

Il faut préciser que chaque réservoir dispose d'une courbe qui lui est propre.

Répartition de la demande d'eau du 30/10/02 - Réseau 85

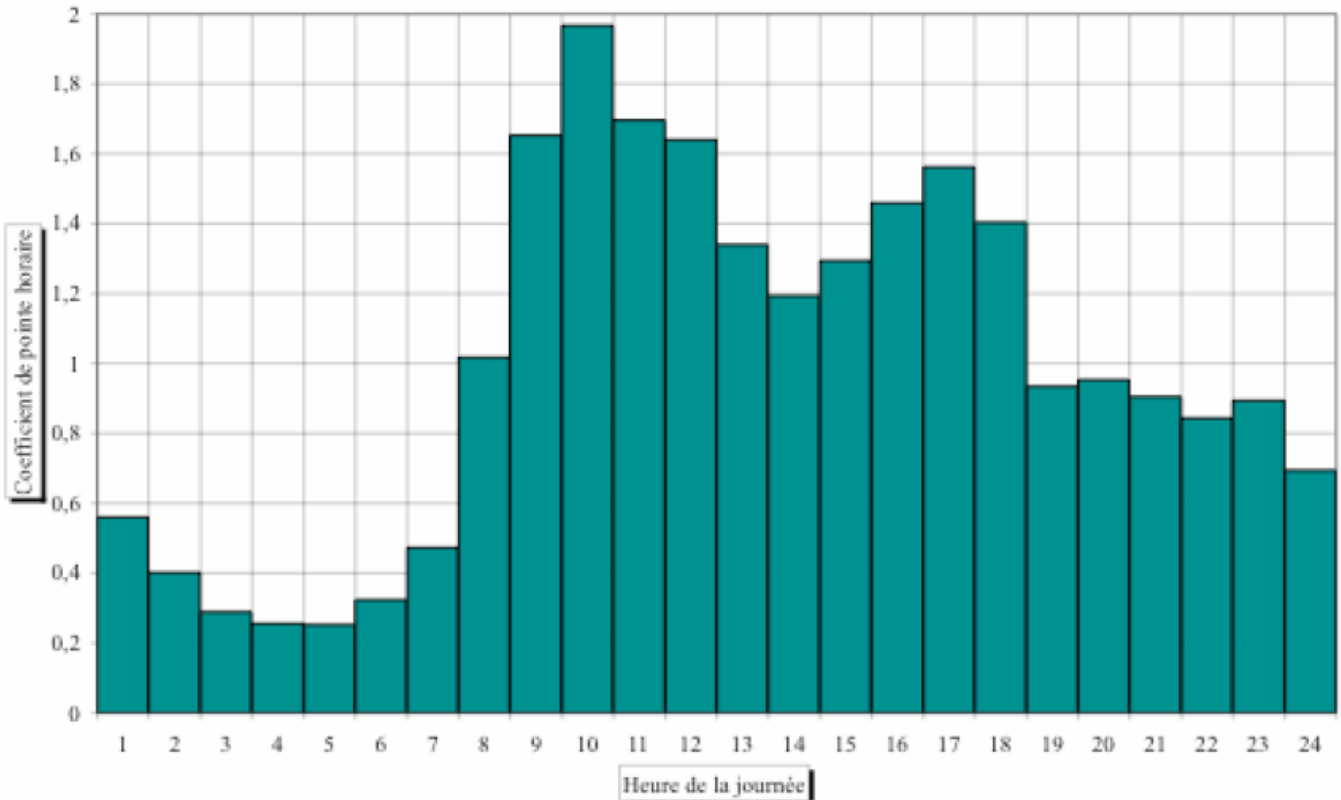


Figure : Courbe de demande en eau du 30/10/2002 sur le réseau 85 de la LYDEC- source ONEP

5.3. TARIF ADOPTES

On a adopté les tarifs en surbrillance jaune dans le tableau ci-dessous (source ONE) :

Clients haute tension (60 kV)

Les tarifs sont exprimés en dirhams TVA comprise (TVA est de 14%).

Options tarifaires	Prime fixe kW/An	Prix par kWh		
		HP	HPL	HC
TLU	1 618,74	0,7880	0,5873	0,4961
MU	648,25	1,2930	0,7531	0,4961
CU	323,50	1,7258	0,8851	0,5202
Coefficient de réduction de puissance		1	0,6	0,4

6. RESOLUTION :

➤ Méthode déterministe

Dans ce type d'approche , pas très courante dans notre domaine , il s'agit de connaître tout les paramètres régissant le problème hors les variables de décision .Nous avons choisi la resolution déterministe car nous avons pas pris en compte le caractère stochastique de la demande .

➤ Définition des scénarios

On va simuler deux scénarios à l'aide du modèle d'optimisation selon le critère de switches, le switche est le nombre de fois où la pompe est mise en marche et en arrêt. La contrainte de switches est indispensable pour éviter à notre réseau de tomber dans un régime transitoire.

On va donc dans un 1^{er} scénario respecter cette contrainte, puis dans un 2^{ème} scénario on n'en tiendra pas compte pour pouvoir conclure sur l'influence de cette contrainte sur le coût total de pompage.

6.1. 1ER SCÉNARIO

• Résultats

On a fixé le nombre de switches permis à 5 et on a laissé au programme le temps de calculer et d'optimiser, nous avons obtenu les résultats suivants :

• La matrice représentative des pompes en marches :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
GG 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
GG 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
GG 4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GG 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GG 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GG 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PG 8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PG 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
PG10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

- Le tableau des énergies consommées et des coûts pendant les heures creuses, pleines et de pointe :

	HC	HPL	HP	Total
Energie	88 336	88 790	10 299	187 426
Coût	43 824	52 173	8 116	104 113

Avec HC, HPL et HP respectivement heures creuses, pleines et de pointe de la journée.

- La gestion du réservoir de tête :

Heure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Utilisation du réservoir																								
Côte station de traitement en m	157																							
Côte du barrage en m	61,14																							
Demande journalière en m3	494 060																							
Volume du réservoir en m3	50 000 100%																							
Réserve de sécurité en m3	10 000																							
Hiver																								
Tarif en Dh	0,4961	0,4961	0,4961	0,4961	0,4961	0,4961	0,4961	0,5873	0,5873	0,5873	0,5873	0,5873	0,5873	0,5873	0,5873	0,5873	0,5873	0,7880	0,7880	0,7880	0,7880	0,7880	0,4961	0,4961
Demande dans l'heure en m3/h	26000	25770	25702	27005	26312	27843	30685	26716	23414	23397	22844	24146	24436	23930	19885	17476	16518	13308	13350	11669	11406	10887	11635	9727
Marnage 24h																								
Heure d'arrêt de l'alimentation	24																							
Heures de production restantes	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Production pompée	27756	27756	27756	27756	27756	27756	27756	27756	27756	27756	22860	22860	22860	22860	22860	11160	5508	5508	5508	5508	5508	16884	16884	
Volume utilisable*	42756	44512	46498	48552	49303	50747	50660	47731	48770	53113	57471	57487	56202	54626	53555	56531	50215	39204	31205	23363	17202	11304	17501	22751
Volume disponible en fin d'heure	26756	28742	30796	31547	32891	32804	29375	31014	35357	39715	44627	43342	41766	40695	43671	49055	43696	35697	27855	21684	15796	10617	15867	23024
Volume disponible en %	53,5	57,5	61,6	63,1	66,0	65,8	59,9	62	71	79	89	87	84	81	87	98	87	71	56	43	31	21	31,7	46,0
Appel d'eau en %	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	22,3	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	33,8	33,8	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
GG 12 600	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1
GG 12 600	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
PG 5 700	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Somme surj	30900	30900	30900	30900	30900	30900	30900	30900	30900	30900	30900	25200	25200	25200	25200	25200	12600	5700	5700	5700	5700	5700	18300	18300
Total groupe en marche	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2

Energie/h	10816,77	10816,77	10816,77	10816,77	10816,77	10816,77	10816,77	10816,77	10816,77	10816,77	8300,18	8300,18	8300,18	8300,18	8300,18	4022,49	2059,90	2059,90	2059,90	2059,90	2059,90	6309,42	6309,42	
Coût/h	5366,20	5366,20	5366,20	5366,20	5366,20	5366,20	5366,20	6352,69	6352,69	6352,69	4874,70	4874,70	4874,70	4874,70	4874,70	2362,41	1623,20	1623,20	1623,20	1623,20	1623,20	3130,10	3130,10	
HMT en m	101,80	101,80	101,80	101,80	101,80	101,80	101,80	101,80	101,80	101,80	99,89	99,89	99,89	99,89	99,89	96,82	96,09	96,09	96,09	96,09	96,09	96,09	98,06	98,06
Rend mec %	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%
Rend hyd %	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	88%	88%	88%	88%	88%	88%	88%	77%	77%	77%	77%	77%	82%	82%
Rend Total %	81,7%	81,7%	81,7%	81,7%	81,7%	81,7%	81,7%	81,7%	81,7%	81,7%	85,2%	85,2%	85,2%	85,2%	85,2%	85,2%	74,7%	74,7%	74,7%	74,7%	74,7%	79,9%	79,9%	

Coût	104086,271	Energie	187426,24	Min gpe en marche	1	p (kg/l)	1	g (m/s)	9,81	V initial	25 000	V final	23 024
------	------------	---------	-----------	-------------------	---	----------	---	---------	------	-----------	--------	---------	--------

*Volume utilisable : Volume en fin d'heure précédente - Réserve de sécurité + production

• La gestion des réservoirs de distribution :

Réservoir Hay Nahda 40 000

Demande journalière en m3	32 402		Vinitial																					
Volume du réservoir en m3	40 000	100%	8 000																					
Réserve de sécurité en m3	8 000		20%																					
Demande dans l'heure en %	1,25%	0,83%	1,04%	1,46%	2,08%	4,17%	7,50%	6,67%	5,00%	4,58%	4,17%	4,58%	4,17%	3,33%	3,75%	4,17%	7,08%	8,33%	7,50%	6,67%	5,00%	3,33%	2,08%	1,25%
en m3/h	405	269	337	473	674	1 351	2 430	2 161	1 620	1 484	1 351	1 484	1 351	1 079	1 215	1 351	2 294	2 699	2 430	2 161	1 620	1 079	674	405
Production	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	400	0	0	0	1 000	1 000	1 000	500	0	0	0	0	0	0	0	250	250
Volume utilisable*	4 000	7 595	11 326	14 989	18 516	21 842	24 491	22 461	20 300	18 679	17 195	16 844	16 360	16 009	15 430	14 215	12 864	10 570	7 871	5 441	3 279	1 659	830	406
Volume disponible en fin d'heure	11 595	15 326	18 989	22 516	25 842	28 491	30 061	28 300	26 679	25 195	23 844	23 360	23 009	22 930	22 215	20 864	18 570	15 871	13 441	11 279	9 639	8 580	8 156	8 001
Volume disponible en %	29%	38%	47%	56%	65%	71%	75%	71%	67%	63%	60%	58%	58%	57%	56%	52%	46%	40%	34%	28%	24%	21%	20%	20%

Réservoir Ambassador 20 000

Demande journalière en m3	700		4 000																					
Volume du réservoir en m3	20 000	100%	4 000																					
Réserve de sécurité en m3	4 000		20%																					
Demande dans l'heure en %	1,25%	0,83%	1,04%	1,46%	2,08%	4,17%	7,50%	6,67%	5,00%	4,58%	4,17%	4,58%	4,17%	3,33%	3,75%	4,17%	7,08%	8,33%	7,50%	6,67%	5,00%	3,33%	2,08%	1,25%
en m3/h	9	6	7	10	15	29	53	47	35	32	29	32	29	23	26	29	50	58	53	47	35	23	15	9
Production	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Volume utilisable*	100	191	285	378	468	553	624	572	525	490	458	429	397	368	344	318	289	239	181	128	82	47	23	9
Volume disponible en fin d'heure	4 091	4 185	4 278	4 368	4 453	4 524	4 572	4 525	4 490	4 458	4 429	4 397	4 368	4 344	4 318	4 289	4 239	4 181	4 128	4 082	4 047	4 023	4 009	4 000
Volume disponible en %	20%	21%	21%	22%	22%	23%	23%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	21%	21%	21%	21%	20%	20%	20%	20%	20%

Réservoir Ambassador 12 000

Demande journalière en m3	22 347		2 400																					
Volume du réservoir en m3	12 000	100%	2 400																					
Réserve de sécurité en m3	2 400		20%																					
Demande dans l'heure en %	1,25%	0,83%	1,04%	1,46%	2,08%	4,17%	7,50%	6,67%	5,00%	4,58%	4,17%	4,58%	4,17%	3,33%	3,75%	4,17%	7,08%	8,33%	7,50%	6,67%	5,00%	3,33%	2,08%	1,25%
en m3/h	279	185	232	326	465	932	1 676	1 491	1 117	1 023	932	1 023	932	744	838	932	1 582	1 862	1 676	1 491	1 117	744	465	279
Production	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	1 600	1 500	1 120	1 100	900	1 000	990	700	500	500	0	0	0	0	0	0	225	211
Volume utilisable*	2 000	3 721	5 535	7 303	8 977	10 512	11 180	11 004	10 633	10 616	10 492	10 561	10 527	10 295	10 051	9 713	8 781	7 199	5 337	3 661	2 171	1 054	534	281
Volume disponible en fin d'heure	4 121	5 935	7 703	9 377	10 912	11 980	11 904	11 913	11 916	11 992	11 961	11 937	11 895	11 851	11 613	11 181	9 599	7 737	6 061	4 571	3 454	2 709	2 470	2 401
Volume disponible en %	34%	49%	64%	78%	91%	100%	99%	99%	99%	100%	100%	99%	100%	100%	97%	93%	80%	64%	51%	38%	29%	23%	21%	20%

Réservoir Takadoum 14 000

Demande journalière en m3	59 855		2 800																					
Volume du réservoir en m3	14 000	100%	2 800																					
Réserve de sécurité en m3	2 800		20%																					
Demande dans l'heure en %	1,25%	0,83%	1,04%	1,46%	2,08%	4,17%	7,50%	6,67%	5,00%	4,58%	4,17%	4,58%	4,17%	3,33%	3,75%	4,17%	7,08%	8,33%	7,50%	6,67%	5,00%	3,33%	2,08%	1,25%
en m3/h	748	497	622	874	1 245	2 496	4 489	3 992	2 993	2 741	2 496	2 741	2 496	1 993	2 245	2 496	4 238	4 986	4 489	3 992	2 993	1 993	1 245	748
Production	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	2 600	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	2 500	2 765	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	1 300	667
Volume utilisable*	3 000	5 252	7 755	10 133	12 259	13 614	14 118	12 629	11 636	11 644	11 902	12 406	12 665	12 669	13 441	13 196	12 700	10 462	7 477	4 987	2 995	2 002	1 309	751
Volume disponible en fin d'heure	5 052	7 555	9 933	12 059	13 814	13 918	12 429	11 436	11 444	11 702	12 206	12 465	12 969	13 476	13 996	13 500	11 262	8 277	5 787	3 795	2 802	2 809	2 864	2 803
Volume disponible en %	36%	54%	71%	86%	99%	99%	89%	82%	82%	84%	87%	89%	93%	96%	100%	96%	80%	59%	41%	27%	20%	20%	20%	20%

Réservoir Ghiriat

Demande journalière en m ³	28 007	
Volume du réservoir en m ³	2 000	100%
Réserve de sécurité en m ³	400	20%
Demande dans l'heure en %	1,25%	0,83%
en m ³ /h	350	232
Production	700	700
Volume utilisable*	700	1 050
Volume disponible en fin d'heure	750	1 217
Volume disponible en %	37%	61%

Réservoir Tit Mellil

Demande journalière en m ³	46 803	
Volume du réservoir en m ³	35 000	100%
Réserve de sécurité en m ³	7 000	20%
Demande dans l'heure en %	1,25%	0,83%
en m ³ /h	585	388
Production	3 000	3 000
Volume utilisable*	3 000	5 415
Volume disponible en fin d'heure	9415	12 026
Volume disponible en %	27%	34%

Réservoir Médouana

Demande journalière en m ³	81 460	
Volume du réservoir en m ³	115 000	100%
Réserve de sécurité en m ³	23 000	20%
Demande dans l'heure en %	1,25%	0,83%
en m ³ /h	1 018	676
Production	3 000	3 000
Volume utilisable*	3 000	4 982
Volume disponible en fin d'heure	24 982	27 306
Volume disponible en %	22%	24%

Réservoir Km8

Demande journalière en m ³	57 895	
Volume du réservoir en m ³	35 000	100%
Réserve de sécurité en m ³	7 000	20%
Demande dans l'heure en %	1,25%	0,83%
en m ³ /h	724	481
Production	700	500
Volume utilisable*	28 700	28 476
Volume disponible en fin d'heure	34 976	34 996
Volume disponible en %	100%	100%

Réservoir Benslimane

Demande journalière en m ³	10 044	
Volume du réservoir en m ³	5 500	100%
Réserve de sécurité en m ³	1 100	20%
Demande dans l'heure en %	1,25%	0,83%
en m ³ /h	126	83
Production	0	0
Volume utilisable*	4 400	4 274
Volume disponible en fin d'heure	5 374	5 291
Volume disponible en %	98%	96%

Réservoir Rommani

Demande journalière en m ³	8 014	
Volume du réservoir en m ³	1 500	100%
Réserve de sécurité en m ³	300	20%
Demande dans l'heure en %	1,25%	0,83%
en m ³ /h	100	67
Production	0	0
Volume utilisable*	1 200	1 100
Volume disponible en fin d'heure	1 400	1 333
Volume disponible en %	93%	89%

Réservoir Aïa

Demande journalière en m ³	6 043	
Volume du réservoir en m ³	3 500	100%
Réserve de sécurité en m ³	700	20%
Demande dans l'heure en %	1,25%	0,83%
en m ³ /h	76	50
Production	0	0
Volume utilisable*	2 800	2 724
Volume disponible en fin d'heure	3 424	3 374
Volume disponible en %	98%	96%

Réservoir Ain Tekki

Demande journalière en m ³	18 873	
Volume du réservoir en m ³	35 000	100%
Réserve de sécurité en m ³	7 000	20%
Demande dans l'heure en %	1,25%	0,83%
en m ³ /h	236	157
Production	1 000	1 000
Volume utilisable*	1 000	1 764
Volume disponible en fin d'heure	7 764	8 607
Volume disponible en %	22%	25%

6.2. COMPARAISON DES RESULTATS D'OPTIMISATION AVEC LA SIMULATION REELLE

Le 19 Mars, l'ONEP a pompé 494 000m³ (source ONEP), le tableau ci-dessous qui représente la consommation en énergie et le coût par tranche de tarif de la gestion réelle de la Station de pompage :

	HPL	HP	HC	total
Energie	75 240	31 547	68 729	175 517
Coût	37 327	18 537	54 159	110 022

Alors, l'ONEP a pompé le 19 Mars 494 000m³ au prix de 110 022dh. Mais si on considère la nouvelle gestion de la station de pompage, le gain sera :

$$Gain/j = Coût_{réel} - Coût_{ac\ swithes} = 110\ 022 - 104\ 087 = 5935\ dh$$

Même si l'énergie consommée a augmenté mais le prix de pompage a baissé, ceci prouve que l'énergie consommée dans les tranches à grand tarif avec la nouvelle gestion est largement inférieure à celle consommée dans la même période du jour avec l'ancienne gestion.

Le coût de pompage va donc baisser de 5935dh/j, soit d'environ :

$$Gain = 2\ 170\ 000\ dh/an$$

6.3. 2^{EME} SCENARIO

- **Résultats**

Dans ce scénario, on laisse le choix libre aux pompes de permuter sans leur imposer la contrainte de switches pour voir si le programme trouvera un nouveau minimum pour la fonction du coût.

Les résultats obtenus sont les suivants :

- La matrice représentative des pompes en marches :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
GG 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
GG 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
GG 4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GG 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GG 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GG 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PG 8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PG 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
PG10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0

- Le tableau des énergies consommées et des coûts pendant les heures creuses, pleines et de pointe :

	HC	HPL	HP	Total
Energie	86 049	89 316	10 299	185 665
Coût	42 689	52 482	8 116	103 287

En comparant de nouveau les deux coûts, on aboutit à un gain de :

$$Gain/j = Coût_{réel} - Coût_{sans\ switches} = 110\ 022 - 103\ 260 = 6762\ dh$$

Le coût de pompage va donc baisser de 6762dh/j, soit d'environ :

$$Gain = 2\ 470\ 000\ dh/an$$

6.4. DISCUSSIONS DES RESULTATS

La demande en eau établie et sa modulation n'est pas précisément celle qu'on devrait prendre en compte, ceci peut être corrigé si la demande au niveau de la distribution était parfaitement connues.

Il faut aussi considérer les piquages et les points de livraison directe.

Les mesures d'énergie doivent être établies à la tête de chaque heure car la consommation journalière ne peut refléter l'état du groupe de pompage considéré.

La variante sans switches montre l'intérêt de la vitesse variable, sauf que pour une décision pareille, il est nécessaire de faire une étude dans ce sens et démontrer la rentabilité de l'emploi de la vitesse variable dans le cas de BouRegreg.

Conclusions

En guise de conclusion, ce projet de fin d'études nous a permis de mettre la lumière sur l'état du système d'adduction d'eau brute du BouRegreg, à travers sa modélisation. Cette étape est nécessaire. En effet, la modélisation nous a permis d'avoir un outil d'aide à la décision pour le système parce que notre modèle est bien calibré donc il est prêt à être utilisé pour simuler de nombreux scénarios.

Certes, le modèle construit pour l'optimisation de la gestion de la station de pompage a permis des économies significatives du coût de la consommation énergétique. Mais le modèle devrait être complété pour approcher le plus possible la réalité, et dans ce sens toute personne qui continuera ce travail doit tenir compte de plusieurs autres facteurs intervenant dans le problème d'optimisation, soit des fuites et des casses qui peuvent surgir à n'importe quel moment de l'alimentation, soit de l'utilisation différente des 9 groupes qui rend chaque caractéristique hydraulique d'un groupe différente de celle d'un autre groupe.

Et pour aider à la réalisation d'un modèle plus réel, la station de pompage doit être équipée d'un automate qui centralise les données envoyées par les appareils de contrôle répartis dans les différentes installations du système de pompage.

Enfin, le projet nous a permis d'avoir des contacts avec le monde professionnel, et d'échanger des informations avec.