

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



École Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

Mémoire de fin d'études

*En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en
hydraulique*

Thème

***Optimisation hydraulique et
énergétique du système de pompage
des chaînes ouest de l'adduction de la
Wilaya d'Alger***

Présenté par :

M^{lle} Sara BOUDHANE

Dirigé par :

M. Olivier NARBÉY

SEAAL

Dr. Abdelmalek BERMAD ENP

Promotion 2011

Remerciements

*Mes plus grands remerciements sont destinées au bon **DIEU** tout puissant, que je tolère insuffisantes, de m'avoir donné la force, le courage, la patience et la volonté de parcourir le chemin de mes études.*

*Merci à mon professeur et promoteur **Dr BERMAD Abdemlalek**, pour l'intérêt qu'il m'a accordé, les conseils qu'il m'a donné, et surtout pour tout le temps qu'il m'a consacré pour élaborer au mieux ce travail.*

*Je tiens à exprimer aussi toute ma reconnaissance à mon promoteur **Mr NARBAY Olivier**, chef de projet à la SEAAL pour son encadrement parfait, ses conseils avisés ainsi que le soutien qu'il m'a témoigné pour que ce travail puisse être mené à bien.*

*Je tiens à remercier le président et les membres du **jury** d'avoir accepté d'analyser mon travail.*

*Je remercie également tout le **personnel de la SEAAL**, ceux du bureau d'étude de la direction technique à Garidi à savoir **Mr Ayoub GUESMIA** pour sa participation aux essais expérimentaux, **Mr HANNIFI Brahim** et **Melle ABERSI Hayet** de m'avoir octroyé la documentation nécessaire à mes travaux de recherche ainsi que toute l'équipe.*

*Je n'oublierai pas de remercier également tous mes **enseignants** du **département Hydraulique**, qui m'ont transmis leurs connaissances et leur savoir faire pour assurer ma formation.*

Dédicace ...

À *mama et papa*, mes chers parents. Ce travail vous doit beaucoup... Qu'il soit pour vous le témoignage de mon amour, mon infinie reconnaissance pour ces années de soutien, de compréhension, de privations et d'efforts communs.

À *ma sœur*. Tu as su être présente avec ta manière, ta grande sœur te le rendra à sa manière aussi, puisse ce travail te guider vers ton propre succès, le succès que tu mérites vraiment.

À *mon frère*. Tu es une pièce indispensable dans la famille petit frère, toute l'ambiance que ta personne met à la maison comble mon vide, merci mamine.

À *la personne qui a toujours été là pour moi malgré les difficultés, Merci.*

À *tata Farida*, ma tante qui nous a toujours poussé et motivé dans nos études. Qu'elle en soit remerciée par cette modeste dédicace.

À *mes tantes et oncles, cousines et cousins*, à tous ceux qui ont un lien de sang avec ma personne.

À *mes amis*, ceux de mon enfance et ceux que j'ai connus à l'école, tous, ils se reconnaîtront tous.

À *la mémoire de mon oncle et mes grands parents*, Puisse Dieu, le tout puissant, vous avoir en sa sainte miséricorde !

Cette thèse représente donc l'aboutissement du soutien et des encouragements que vous, **tous**, m'avez prodigués tout au long de ma scolarité.

... Merci infiniment

Table des matières

Introduction générale	01
------------------------------------	-----------

Chapitre I : Présentation de l'organisme d'accueil et de la zone d'étude

I.1 Introduction	03
I.2 Organisation de la SEAAL	03
I.2.1 Missions.....	04
I.2.2 Chiffres clés	04
I.3 Le contrat avec SUEZ Environnement	04
I.3.1 Objectifs du contrat	04
I.3.2 Contexte financiers et moyens de contrat	05
I.3.3 Transfert de savoir-faire	05
I.4 Présentation du réseau d'adduction chaîne des hauteurs-chaîne côtière	06
I.4.1 Le secteur chaîne côtière	06
I.4.2 Le secteur chaîne des hauteurs.....	12

Chapitre II : Problématiques du pompage dans les systèmes d'AEP

II.1 Introduction	18
II.2 Systèmes de pompage.....	18
II.2.1 Généralités sur les systèmes de pompage	18
II.2.2 Courbe du système	20
II.2.3 Environnement hydraulique des stations de pompage	22
II.3 Types de pompe	26
II.3.1 Les pompes centrifuges	26
II.3.2 Les pompes volumétriques	27
II.3.3 Les différents types de roues	28
II.4 Revue de la théorie des pompes	29
II.4.1 Courbe caractéristique des pompes.....	30
II.4.2 Point de fonctionnement	30
II.4.3 NPSH-Hauteur nette absolue à l'aspiration.....	31

Table des matières

II.4.4	Fonctionnement en série et en parallèle.....	32
II.4.5	Rendement de la pompe	32
II.5	Calcul des mesures d'économie d'énergie électrique	33
II.5.1	Sommaire des mesures d'économie d'énergie électrique	35
II.5.2	Modulation de la vitesse.....	35
II.5.3	Installation d'un moteur à vitesse variable.....	37
II.5.4	Modification du diamètre de la roue de pompe.....	37
II.5.5	Réduction des pertes dans le système.....	39
II.5.6	Choix des ressources alternatives.....	40
II.6	Tarification de la SONELGAZ.....	40
II.6.1	L'analyse tarifaire.....	41
II.7	Conclusion.....	42

Chapitre III : Modélisation de la chaîne Ouest d'adduction de la Wilaya d'Alger sous EPANET

III.1	Introduction.....	43
III.2	Présentation du logiciel.....	43
III.2.1	Potentialités du logiciel.....	43
III.2.2	Principes hydrauliques régissant les calculs du logiciel.....	44
III.2.3	Spécificités du logiciel.....	46
III.3	Construction du modèle.....	47
III.3.1	Saisie du réseau.....	47
III.3.2	Rugosité des conduites.....	49
III.3.3	Les réservoirs.....	49
III.3.4	Demande aux nœuds.....	50
III.3.5	Les vannes de régulation.....	50
III.3.6	Variation journalière de la consommation.....	51
III.3.7	Courbes de modulation.....	52
III.3.8	La régulation dans EPANET.....	53
III.4	Calage du modèle.....	56
III.5	Conclusion.....	57

Table des matières

Chapitre IV : Diagnostic des installations

IV.1	Introduction.....	58
IV.2	Essai de rendement.....	58
IV.2.1	Méthodes de mesures.....	58
IV.2.2	Instruments et méthodes de mesures.....	59
IV.2.3	Paramètres à mesurer.....	61
IV.3	Campagne de mesures.....	62
IV.3.1	Description et présentation des installations.....	62
IV.3.2	Identification des points de mesures.....	66
IV.3.3	Matériels utilisés.....	66
IV.3.4	Méthodologie suivi lors des essais.....	65
IV.4	L'exploitation des données de la campagne de mesures.....	67
IV.5	D'autres essais qui peuvent être réalisés.....	71
IV.6	Conclusion.....	71

Chapitre IV : Etude d'amélioration des coûts énergétiques

V.1	Introduction.....	72
V.2	Aspect énergétique du logiciel EPANET.....	72
V.2.1	Rapport d'énergie.....	73
V.3	Intégration des données de performance dans le modèle.....	74
V.4	Simulation des variations de régulation du remplissage des réservoirs.....	76
V.5	Résultats de la simulation.....	78
V.5.1	Résultats hydrauliques.....	78
V.5.2	Résultats énergétiques.....	80
V.6	Retour sur investissement.....	82
V.7	Recommandations.....	82
	Conclusion générale.....	83

Liste des figures

Figure I.1 : Carte de présentation des principales communes du secteur - Chaîne côtière

Figure I.2 : Carte du réseau d'adduction chaîne côtière-situation actuelle.

Figure I.3 : Carte de présentation des principales communes du secteur - Chaîne des hauteurs.

Figure I.4 : Carte du secteur - Situation actuelle - Chaîne des hauteurs

Figure II.1 : Coût global typique d'une pompe.

Figure II.2 : Courbe d'un système de pompage.

Figure II.3 : Effets de la hauteur statique sur la courbe du système.

Figure II.4 : Effet de l'ouverture de la vanne sur la courbe du système.

Figure II.5 : Roue ouverte.

Figure II.6 : Roue semi ouverte.

Figure II.7 : Roue fermée.

Figure II.8 : Courbe caractéristique d'une pompe.

Figure II.9 : Point de fonctionnement d'une pompe.

Figure II.10 : Economie d'énergie électrique par modulation de la vitesse

Figure III.1 : Schéma illustratif de la loi des mailles dans un réseau d'eau potable.

Figure III.2 : Modèle initial- chaîne Ouest.

Figure III.3 : Modèle chaîne Ouest après modifications

Figure III.4 : Editeur des caractéristiques d'une vanne.

Figure III.5 : Courbe de modulation dans le modèle

Figure III.6 : Editeur des commandes appliquées aux vannes de régulation.

Figure III.7 : Editeur des commandes élaborées.

Figure IV.1 : Débitmètre ultrasonique.

Figure IV.2 : La station SP1-1500

Figure IV.3 : La station SP1-630.

Figure IV.4 : Emplacement du point de mesure du débit SP1-630.

Figure IV.5 : Feuille Excel-calcul du rendement d'un système de pompage.

Figure V.1 : Courbe de modulation de tarif E41.

Figure V.2 : Tableau de rapport d'énergie.

Figure V.3 : Histogramme de rapport d'énergie.

Figure V.4 : Courbe de rendement.

Figure V.5 : graphique de marnage d'un réservoir.

Figure V.4 : Variation du niveau d'eau dans le réservoir SP3.

Figure V.5 : Variation du niveau d'eau dans le réservoir SAHEL 190.

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Taif E41

Tableau II.2 : Tarif E42

Tableau II.3 : Tarif E43

Tableau IV.1 : Mesure électrique.

Tableau V.1 : tableau récapitulatif des gains réalisés par la démarche d'optimisation en
DA/m³.

Tableau V.2 : les gains en DA/j pour chaque station.

Liste des abréviations

ADE : Algérienne Des Eaux.

CTP : Cote du Trop Plein.

MZ I : Forages Mazafran I.

MZ II: Forages Mazafran II.

ONA : Office nationale d'Assainissement.

SEAAL : Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger.

SIG : Système d'Information Géographique.

Résumé :

Le but de cette étude est l'optimisation des coûts énergétiques des stations de pompage d'eau potable du réseau Ouest d'adduction d'Alger, c.-à-d réduire leurs coûts de fonctionnement annuels. La méthodologie mise en place à la SEAAL fait intervenir le logiciel EPANET, celui ci permet de modéliser le réseau et de tester les différentes possibilités d'optimisation. Elle se fait sur deux niveaux : l'amélioration du rendement de la pompe et du système et l'analyse tarifaire.

Mots clés:

Optimisation, coûts, SEAAL, EPANET, modéliser.

Abstract:

The aim of this study is the optimization of energy costs for pumping stations of drinking (potable) water for Network supply of western Algiers, i.e. reduce annual operating costs. SEAAL operates with a methodology that involves software EPANET, This one allows to model the network and test the different optimization options. Treatment is on two levels: improving the yield (efficiency) of the (pump+system) and tariff analysis.

Keywords:

Optimization, cost, SEAAL, EPANET, model.

ملخص:

الغرض من هذا البحث هو دراسة طريقة الاستفادة المثلى من تكاليف الطاقة لضخ المياه الصالحة للشرب لشبكة غرب الجزائر العاصمة, أي للحد من تكاليف التشغيل السنوي. إن المنهجية المتبعة في SEAAL تنطوي على البرنامج EPANET الذي يسمح بتعيين النماذج و اختبار مختلف الخيارات للتحسين. تدرس الاستفادة المثلى على مستوى ؛ تحسين كفاءة المضخات والنظام, تحليل التعريفات (التسعير).

الكلمات المفتاحية :

التحسين(الاستفادة المثلى), التكلفة , EPANET , SEAAL, نموذج.

Introduction générale

Dans le contexte économique et écologique actuel, il apparaît indispensable pour la SEAAL de faire des efforts pour tenter de maîtriser ses dépenses énergétiques. Ces dernières années, l'augmentation du coût de l'énergie ainsi que la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre l'ont poussé à chercher des solutions pour réduire ses consommations énergétiques. Si la réduction des coûts est une nécessité, c'est également un moyen pour l'entreprise de s'inscrire dans une démarche de développement durable.

C'est dans cette optique qu'intervient l'idée d'optimiser les stations de pompages sur l'ensemble du réseau de la chaîne Ouest de l'adduction de la wilaya d'Alger où les coûts liés aux pompages d'eau potable représentent un pôle très gourmand en kWh.

L'objectif de ce travail est donc d'effectuer une action d'optimisation des systèmes de pompage sur l'étage Ouest du réseau d'adduction d'Alger et cela en faisant un diagnostic hydraulique et électrique du fonctionnement de ces systèmes. Cela commence tout d'abord par l'élaboration d'un modèle hydraulique du réseau, dans le but de prévoir son comportement hydraulique lors de l'établissement des scénarii d'optimisation.

L'entreprise attend par conséquent que j'optimise le fonctionnement des systèmes de pompage présents dans ce réseau, pour réaliser des gains à court terme et que je présente des mesures à mettre en œuvre pour réduire les coûts de pompage à moyen et long termes ainsi qu'un compte rendu écrit précis de mes conclusions afin que ces modifications soient bien comprises par les responsables des sites ainsi que les personnes concernées par les modifications apportées.

Après avoir donné une présentation brève de l'entreprise SEAAL et les chiffres clés qui la caractérisent ainsi que le système à étudier dans le premier chapitre. Nous avons rappelé quelques principes de la théorie des pompes et les différentes façons d'améliorer le rendement d'un système de pompage dans le deuxième chapitre. Nous représentons aussi les différents tarifs proposés par la SONELGAZ pour la moyenne tension et les points essentiels de l'analyse tarifaire.

Le chapitre III a pour but de présenter le logiciel utilisé EPANET, les différentes étapes de l'élaboration du modèle (introduction des différentes caractéristiques du réseau : cotes et volumes des réservoirs, types de vannes, caractéristiques des pompes ainsi que les caractéristiques des conduites), ce chapitre aborde aussi la validation du modèle et son calage à partir des essais et des campagnes de mesures effectués in-situ.

Le chapitre IV a pour but de présenter la méthodologie à suivre pour réaliser une campagne de mesures et les différents matériels utilisés, mais aussi l'exploitation des résultats obtenus pour l'estimation des performances des équipements.

Dans le chapitre V nous avons présenté les différents résultats énergétiques des simulations obtenues et l'interprétation des scénarii d'optimisation énergétiques sous EPANET mais aussi de les comparer au scénario de base.

Chapitre I

Présentation de l'organisme d'accueil et de la zone d'étude

I.1 Introduction

La Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger (SEAAL) est une société par actions (SPA) détenue par l'Algérienne Des Eaux (ADE) et l'Office National de l'Assainissement (ONA). Elle a pour mission la gestion des services de l'eau et de l'assainissement de la wilaya d'Alger.

Créée le 1^{er} mars 2006, la SEAAL est un opérateur public de droit algérien. Afin d'optimiser cette gestion et de profiter du savoir faire étranger, la SEAAL a opté pour un contrat de 5 ans et 6 mois avec SUEZ Environnement (SE), spécialiste dans le domaine. Grâce à son programme de Transfert de Savoir-Faire (TSF), SE suit l'ensemble des métiers de la SEAAL, l'objectif étant d'aboutir à une bonne maîtrise de ceux-ci par les cadres locaux.

I.2 Organisation de la SEAAL

La SEAAL regroupe plus de 4000 employés au sein des principales structures suivantes :

- Directions opérationnelles :
 - La direction Exploitation Eau Potable comprenant :
 - ✓ La Direction Distribution.
 - ✓ La Direction Production.
 - Direction Assainissement.
 - Direction Clientèle.

- Directions supports :
 - Direction Achats et Logistique.
 - Direction Technique.
 - Direction des Investissements.
 - Direction du Patrimoine.
 - Direction Finance et Comptabilité.
 - Direction des Ressources Humaines.

- Direction de la Communication.

Les directions opérationnelles représentent le cœur du métier. Pour mener à bien leurs missions, celles-ci sont assistées des directions supports.

I.2.1 Missions

- Assurer une distribution d'eau de qualité 24H/24.
- Gérer de façon pérenne les ouvrages et installations d'eau et d'assainissement.
- Améliorer la qualité du milieu naturel par l'élimination des rejets directs.
- Instaurer une gestion clientèle moderne et efficace pour améliorer la satisfaction des clients.

I.2.2 Chiffres clés

- Eau potable
 - 4 461 km de réseau.
 - 12 centres d'exploitation.
 - 245 forages en service.
 - 148 réservoirs, 706 000 m³ stockés.
 - 58 stations de pompage.
 - 2 usines de traitement d'eau superficielle (620 000 m³/jour).
- Assainissement
 - 3 200 km de réseau.
 - 33 postes de relevage.
 - 4 stations d'épuration.
- Clientèle
 - 494 000 clients.
 - 18 agences commerciales.
 - 25 points d'accueil.

I.3 Le contrat avec SUEZ Environnement

I.3.1 Objectifs du contrat

Le contrat de management conclu entre SEAAL et SUEZ Environnement vise à atteindre les objectifs que se sont fixés les deux actionnaires (ADE et ONA) en se donnant les moyens financiers appropriés tout en assurant un réel transfert de savoir-faire.

I.3.2 Contexte financiers et moyens de contrat

Les moyens mis à disposition du contrat sont les suivants :

- Un programme ambitieux d'investissement financé par l'état :
- ✓ 100 milliards de dinars en 5 ans pour la mobilisation des ressources en eau et la réhabilitation des infrastructures.
- ✓ Pour améliorer l'emploi des actifs.
- 35 milliards de dinars sur 5 ans.
- Mobilisation de 27 experts de SE.
- Réalisation de missions d'assistance technique spécifique en fonction des besoins par des experts de SE.
- L'installation d'outils modernes de gestion tels que le Centre de Télé Contrôle, la modulation de pression ...etc.
- Un transfert de savoir-faire de SE grâce à une méthodologie structurée et innovante.

La mise en place d'un centre de formation aux métiers de l'eau et de l'assainissement.

I.3.3 Transfert de savoir-faire

L'accès au savoir-faire de SE et son transfert aux agents de la SEAAL est un des objectifs majeurs du contrat de la SEAAL.

Ce transfert de savoir-faire repose sur les principes suivants :

- Capturer les connaissances et le savoir faire là où ils existent dans le groupe.
- Formaliser ce savoir en le transformant en documents consolidés et validés.
- Mettre ce savoir à disposition.
- Diffuser ce savoir.

Métiers WIKTI

Le programme WIKTI (Water International Knowledge Transfer Initiative) est le référentiel de base du TSF de SE. C'est une démarche structurée et innovante qui mesure l'évolution du niveau de maîtrise par les équipes pour les 36 métiers exercés à la SEAAL. Ces métiers englobent les 4 domaines suivants :

- Eau potable : 12 métiers.

- Assainissement : 8 métiers.
- Clientèle : 7 métiers.
- Support : 9 métiers.

Tous les métiers WIKTI sont documentés. Autrement dit, à chaque fonction est attribué un kit métier. Celui-ci décrit les tâches des intervenants avec des rappels techniques pour les orienter afin de mener à bien leurs fonctions. Une liste de règles de base est définie dans chaque kit métier.

L'évaluation de la maîtrise d'un métier repose sur un système de notation (de 1 à 6) citons les trois principales notes :

- 1 : service très défaillant.
- 2 : service de standard international, mature et autonome.
- 6 : niveau de leadership international.

En se basant sur les règles de base, un ajustement de la notation est réalisé tout les trimestres. Chaque métier qui a en charge l'établissement et le suivi des plans d'actions pour améliorer la maîtrise du métier dont il est en charge.

I.4 Présentation du réseau d'adduction chaîne des hauteurs-chaîne côtière

I.4.1 Le secteur chaîne côtière

➤ Présentation du secteur

Le secteur comprend l'adduction de la zone littorale Ouest de la wilaya d'Alger, à savoir toutes ou une partie des communes de Rahmania, Mahelma, Zéralda, Staoueli, Chéraga, Aïn Benian, Hammamet et Raïs Hamidou.

La carte suivante illustre bien toutes ces communes.



Figure I.1 : Carte de présentation des principales communes du secteur - Chaîne côtière

Le secteur « chaîne côtière » se situe à l'Ouest de la wilaya d'Alger. Il est délimité au Nord et à l'Ouest par la mer Méditerranéenne, au Sud-Ouest par le passage de l'Oued Mazafran, qui marque la frontière avec la wilaya de Tipasa. Le terrain s'élève en allant vers l'Est. Les zones à desservir par ce secteur se situent ainsi entre des cotes de terrain naturel variant de 0m NGA à 200 m NGA. [Document technique SEAAL. 2010].

Ce secteur est moyennement urbanisé, il est traversé par 5 grands axes routiers :

- L'autoroute de Ben Aknoun, qui traverse le secteur chaîne côtière au niveau de Staoueli et Zéralda.

- La RN 11, qui suit le littoral, et traverse les communes de Hammamet, Aïn Benian, Staoueli, Zéralda.
- La RN 41, qui traverse la commune de Chéraga et rejoint la RN 11 à Staoueli.
- la RN 63, à la limite de Zéralda et Staoueli.
- la RN 67, qui constitue un axe Est-Ouest de Zéralda à Tessala el Merdja au Sud de la wilaya.
- Un aéroport militaire se situe sur la commune d'Aïn Benian.

➤ **Fonctionnement hydraulique du réseau**

❖ **Caractéristiques des ouvrages**

Les réservoirs et châteaux d'eau:

- Sahel 190 : trois réservoirs ; un de 5000 m³ et deux de 50000 m³ avec une CTP=191,8m NGA.
- Zéralda : trois réservoirs au sol ; un de 3 000 m³ (CTP=107 m NGA) et deux de 1000 m³ (CTP=105,5 m NGA).
- Staoueli : quatre réservoirs au sol deux de 750 m³, un de 500 m³ et un de 2 000 m³ (CTP=82,5 m NGA), un château d'eau de 1 000 m³ avec CTP=112 m NGA.
- Sidi Fredj : un château d'eau de 1 000 m³ avec une CTP=35,5 m NGA.
- Aïn Benian : Cinq réservoirs à Belle vue : un de 1000m³ (CTP=82,9m NGA), deux de 750m³ (CTP=81,6m NGA) et deux de 5000m³ (CTP=81,6 m NGA).
- Grand rocher : un réservoir de 750 m³ avec CTP= 76m NGA.
- Forêt de Bainem : un réservoir opérationnel de 1500 m³ avec un CTP=170m NGA et deux réservoirs hors service de 3000m³ avec CTP=140m NGA.

❖ **Ressources du secteur**

Actuellement le secteur possède 3 types de ressources principales :

- les eaux de surface SAA.

- les eaux souterraines de Mazafran I et Mazafran II.
- les eaux dessalées des cinq SDEM de Zéralda, Staoueli et Ain Benian.

Les eaux du SAA et du Mazafran alimentent directement le secteur chaîne côtière. Elles sont stockées au niveau de la station de pompage SP3, point d'entrée Sud de la chaîne côtière.

❖ Entrées d'eau secondaires

Contrairement aux eaux du SAA et de Mazafran, les eaux dessalées des SDEM sont distribuées localement.

- Deux stations alimentent les trois réservoirs de Zéralda ($2 \times 1000 \text{ m}^3$ et 3000 m^3).
- Une station alimente le réseau au niveau du complexe touristique Azur Plage (commune de Staoueli).
- Deux stations alimentent un des deux réservoirs d'Ain Benian de 5000 m^3 .

❖ Pompage

- Station de pompage SP3.

Actuellement, la chaîne côtière est principalement alimentée par la station de pompage SP3 au Sud, qui reçoit les eaux du Mazafran et du SAA. Le volume de stockage à SP3 est actuellement de $30\,000 \text{ m}^3$ suite à la réalisation de deux nouveaux réservoirs au sol de $10\,000 \text{ m}^3$ et $20\,000 \text{ m}^3$ (CTP 67 m NGA). [Document technique SEAAL, 2010].

La station de pompage SP3 se décompose en deux unités :

- SP3 1500 : Trois pompes ($1512 \text{ m}^3/\text{h}$, 110 m), fonctionne avec 2 pompes et 1 pompe de secours, elles refoulent dans une conduite de DN 900.
- SP3 630 : Trois pompes ($630 \text{ m}^3/\text{h}$, 115 m), fonctionne avec 2 pompes et 1 pompe de secours, elles refoulent dans une conduite de DN 700.

La station de pompage SP3 alimente le nouveau complexe hydraulique Sahel 190.

❖ **Axe principal d'adduction**

Le nouveau complexe hydraulique Sahel 190 alimente des conduites d'adduction DN 800/700 qui amène l'eau jusqu'aux complexes hydrauliques suivants (de l'amont vers l'aval) : Zéralda, Sidi Fredj, Staoueli et Aïn Benian.

❖ **Adduction secondaire**

Les deux réservoirs de 5 000 m³ d'Aïn Benian alimentent la station de pompage SP4 « Bellevue » qui refoule par une DN 500 sur le réservoir au sol Forêt de Bainem (1 500 m³, CTP 170 m NGA).

Les deux réservoirs de 750 m³ d'Aïn Benian mettent en charge une conduite DN 350 qui alimente le réservoir au sol Grand Rocher (750 m³, CTP 76 m NA).

La figure suivante représente le secteur hydraulique chaîne côtière dans sa situation actuelle.

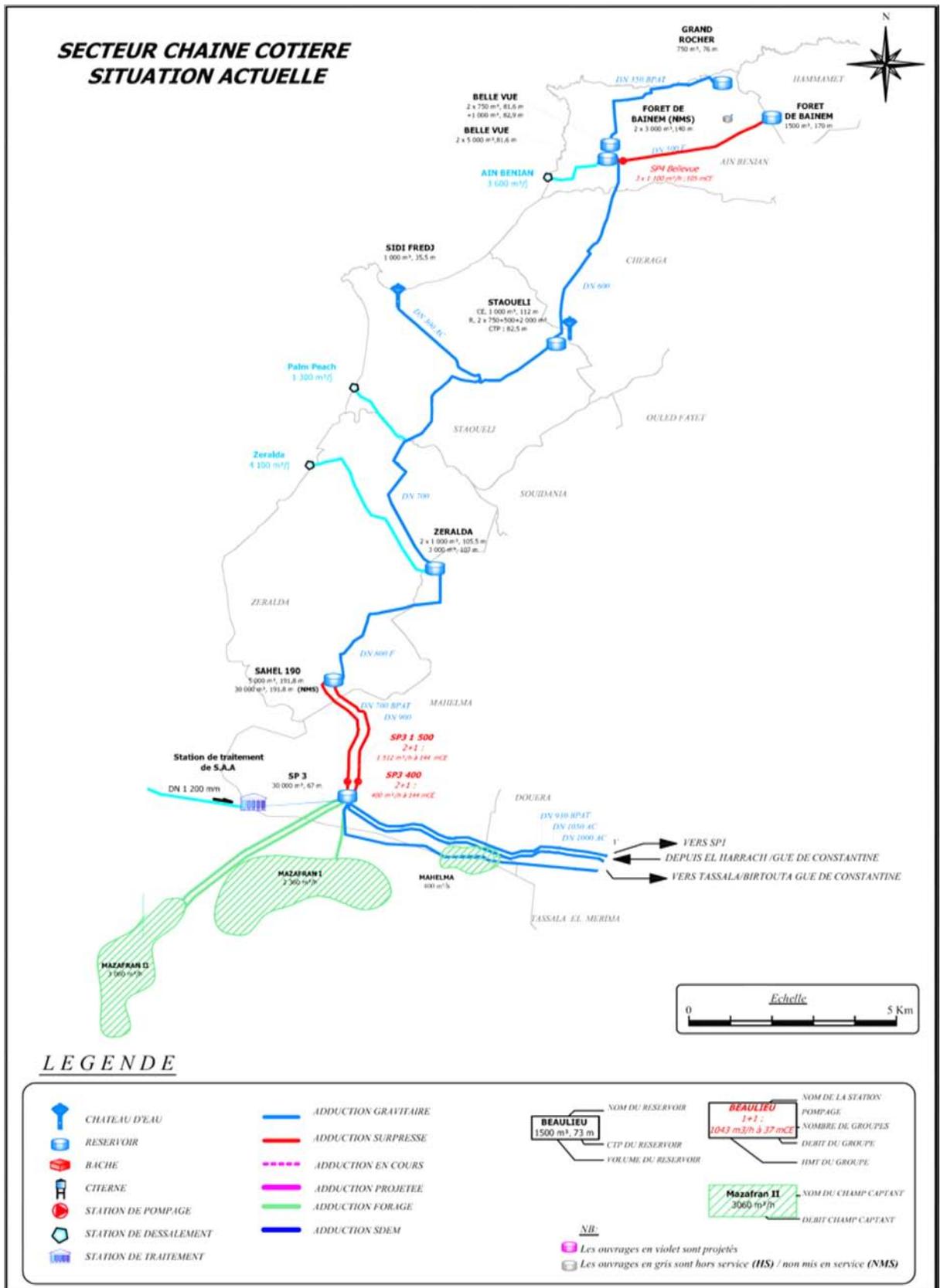


Figure I.2 : Carte du réseau d'adduction chaîne côtière-situation actuelle.

I.4.2 Le secteur chaîne des hauteurs

➤ Présentation du secteur

Le secteur « chaîne des hauteurs » comprend l'adduction de toute ou une partie des communes de Douera, Rahmania, Baba Hassen, Draria, El Achour, Ouled Fayet, Chéraga, Dely Brahim, Ben Aknoun, Béni Messous, Bouzareah, Raïs Hamidou. Il doit son nom à la géographie de la zone : Bouzareah est en effet la commune la plus élevée de la wilaya. Ce secteur comprend comme pôles principaux SP1, Douera, SP2 et Stand.

La carte ci-dessous illustre bien toutes ces communes.

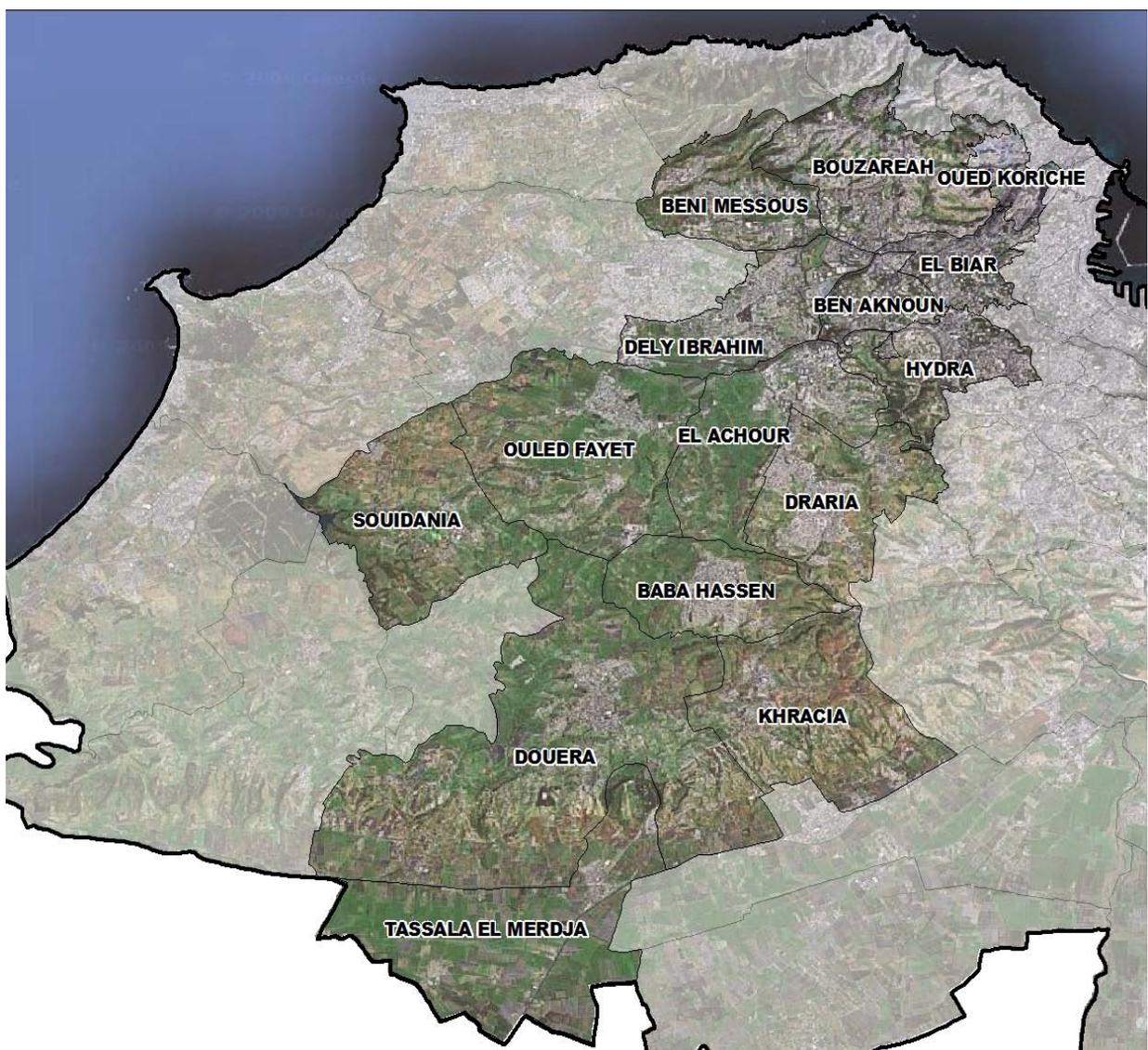


Figure I.3 : Carte de présentation des principales communes du secteur - Chaîne des hauteurs.

Le secteur « chaîne des hauteurs » se situe à l'Ouest de la wilaya d'Alger. Il tire son nom des importantes dénivelées qui le caractérisent : de 40 m à 400 m. Il est délimité au Nord par la colline de Fort Bouzareah, point culminant de la wilaya d'Alger, et au Sud par la plaine à la limite de la wilaya de Blida. A l'Ouest se trouvent le secteur chaîne côtière et à l'Est le secteur Garidi, qui marque l'entrée dans le cœur très urbanisé de la wilaya. [Document technique SEAAL, 2010].

Le relief est tortueux. De nombreux Oueds sillonnent les collines de la chaîne des hauteurs, les plus importants étant les suivants :

- Oued Baba Hassen.
- Oued El Achour.
- Oued Draa.
- Oued Zitoune.
- Oued Ben Brahim.
- Oued Ben Amar.

Le secteur chaîne des hauteurs est urbanisé, il est traversé par 6 grands axes routiers :

- L'autoroute de Ben Aknoun, qui traverse le secteur chaîne des hauteurs au niveau de Dely Brahim et Ouled Fayet.
- La RN 41, qui traverse les communes de Chéraga et Béni Messous selon un axe Est-Ouest.
- La RN 36, qui forme un axe Nord-Sud de Dely Brahim à Tessala el Merdja.
- La RN 63, qui constitue un axe Est-Ouest de Khraïcia à Mahelma.
- La RN 1 et la RN 67, qui constituent un axe Est-Ouest de Mahelma à Birtouta au Sud de la wilaya.
- Au Sud les chemins de wilaya n°112 et n°214 marquent la frontière avec la wilaya de Blida.

Le projet Parc des Grands Vents implanté sur les communes d'Ouled Fayet, de Dely Brahim et d'El Achour, est alimenté par le complexe hydraulique Ouled Fayet. Ce projet a déjà démarré et doit continuer à se développer jusqu'en 2025.

➤ **Fonctionnement hydraulique du réseau**

❖ Caractéristiques des ouvrages

Les réservoirs et châteaux d'eau :

- Douira : trois réservoirs ; deux de 5000 m³ (CTP=228,5 m NGA).
- Tampon Douira : un réservoir de 1500 m³ (CTP=234,5 m).
- Hadj Yakoub : un réservoir de 1000 m³ (CTP=183,4 m NGA).
- Dkakna : un réservoir de 1000 m³ (CTP=136,4m NGA).
- Baba Hassen : un réservoir de 5000 m³ (CTP=200 m NGA) et un château d'eau de 1000 m³ (CTP=220 m NGA).
- Draria : un réservoir de 1000 m³ (CTP= 230 m NGA).
- Ouled Fayet : deux réservoirs 5000 m³+3000 m³ (CTP=255 m NGA) et un château d'eau de 1000m³ (CTP=265m NGA).
- Oued Romane : un réservoir de 4000 m³ avec une CTP=255 m NGA.
- Ain Allah : un réservoir de 5000 m³ avec une CTP= 270m NGA.
- Bois des cars : deux réservoirs de 5000 m³ avec une CTP=277m NGA et un château d'eau de 1000m³ avec une CTP=302m NGA.
- Delly Brahim : Cinq réservoirs, deux de 1000m³ (CTP=240m NGA), deux de 1500 m³ (CTP=206m NGA) et un de 1000m³ (CTP=214m NGA).
- Stand : deux réservoirs de 1500 m³ (CTP=306m NGA) et deux réservoirs de 1000m³ (CTP=301m NGA).
- Beni Messous : un réservoir de 2000m³ (CTP=260 m NGA).

- Rostomia : deux réservoirs de 5000 m³ (CTP=272m NGA).
- Bouzareah : deux réservoirs de 5000 m³ (CTP=399 m NGA).
- Tribu : trois réservoirs 5000m³+2000m³+600m³ avec une CTP=397,5 m NGA.

❖ Ressources du secteur

La chaîne des hauteurs possède actuellement 2 points d'entrée, pour 3 types de ressources :

- SP1 : les eaux souterraines du Mazafran, eaux de surfaces du SAA et du système Isser-Keddara, la capacité maximale d'apport se situe à Douera.
- Stand : les eaux dessalées d'El Hamma et les eaux de surfaces du système Isser-Keddara et Taksebt, la capacité maximale d'apport se trouve à Stand.

❖ Fonctionnement de l'adduction

Actuellement, la chaîne des hauteurs est principalement alimentée par :

- La station de pompage SP1.
- La station de pompage de Garidi.

➤ La station de pompage SP1

La station de pompage SP1 au Sud reçoit :

- Les eaux du Mazafran et du SAA une la conduite de 40 pouces.
- Les eaux du système Isser-Keddara depuis 2008 par une conduite 42 pouces grâce au By-pass réalisé à El Harrach entre les conduites SPIK et la conduite 42 pouces.

Le volume de stockage à SP1 est actuellement de 650 m³ (150 m³+500 m³, CTP 40,6 m NGA).

Elle se décompose en deux unités :

SP1 1500 : 3 pompes (2+1), leur point de fonctionnement (Q=1500m³/h, H=220m), elles refoulent dans une conduite de DN 1000.

SP1 630 :3 pompes (2+1), leur point de fonctionnement ($Q=630 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=210\text{m}$), elles refoulent dans une conduite de DN 700.

Actuellement, la station de pompage SP1 alimente :

- Le réservoir Tampon Douera.
- La conduite DN 600, qui alimente le château d'eau Baba Hassen par un DN 250/200 et une partie du réseau de Khraïcia par un DN 150.
- Les conduites DN 700 et DN 1000, qui alimentent la double station de pompage SP2
- ✓ Alimentation par Garidi
 - La station de pompage de Garidi, à l'Est, reçoit les eaux d'El Hamma et les eaux du système Isser-Keddara.
 - Le volume à la station de Garidi est de $25\,000 \text{ m}^3$; elle alimente la Campagne Semmar, Kouba 107, Kouba 117 et les réservoirs du complexe hydraulique Stand.
- ✓ Système SP2-Stand

La station de pompage SP2 se décompose en deux unités :

- SP2 1000.
- SP2 630.

Actuellement, la station de pompage SP2 refoule dans 2 canalisations DN 900/800 et DN 700, elle alimente le complexe hydraulique Stand.

Il existe 4 canalisations piquées sur la conduite DN 700 (du Sud au Nord, soit du plus bas au plus haut) :

- DN 300 pour alimentation de Draria et un réservoir et un château d'eau à Ouled Fayet.
- DN 500 pour alimentation d'Oued Romane (El Achour) : un réservoir et un château d'eau, tous deux by-passés actuellement.

- DN 500 pour alimentation d'Ain Allah : un château d'eau by-passé actuellement.
- 2*DN 500 pour alimentation de Bois des Cars (Dely Brahim) : deux réservoirs.

Il existe 2 maillages entre les deux conduites de refoulement de SP2 :

- En sortie de la station SP2.
- Au niveau du piquage de Bois des Cars (Dely Brahim)

La figure suivante représente le secteur hydraulique chaîne des hauteurs dans sa situation actuelle :

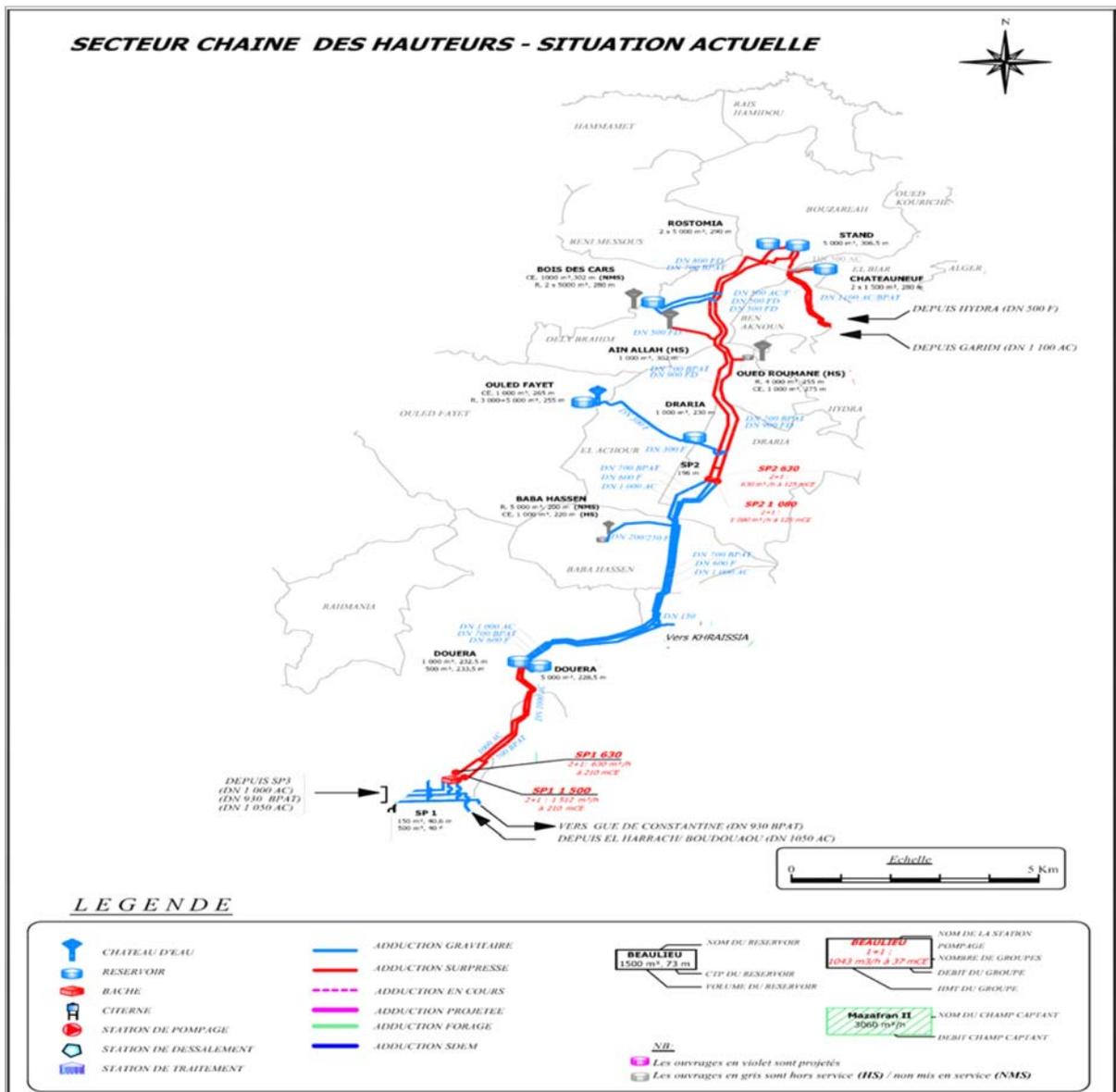


Figure I.4 : Carte du secteur - Situation actuelle - Chaîne des hauteurs

Chapitre II

Problématiques du pompage dans les systèmes d'AEP

II.1 Introduction

Ce chapitre consiste à faire connaître les différentes possibilités d'économie d'énergie électrique réalisable dans un système de pompage. En premier lieu, il présente une revue générale des systèmes de pompage et de la théorie des pompes. Par la suite il porte sur les différentes mesures d'économie d'énergie électrique réalisables dans un système de pompage.

Le coût d'un système de pompage provient de trois pôles essentiels : l'investissement initial lors de l'achat de la pompe, les interventions de maintenance qui sont nécessaires à l'entretien et au bon fonctionnement du système, et surtout l'énergie consommée, qui représente généralement 85% du coût global de la pompe.

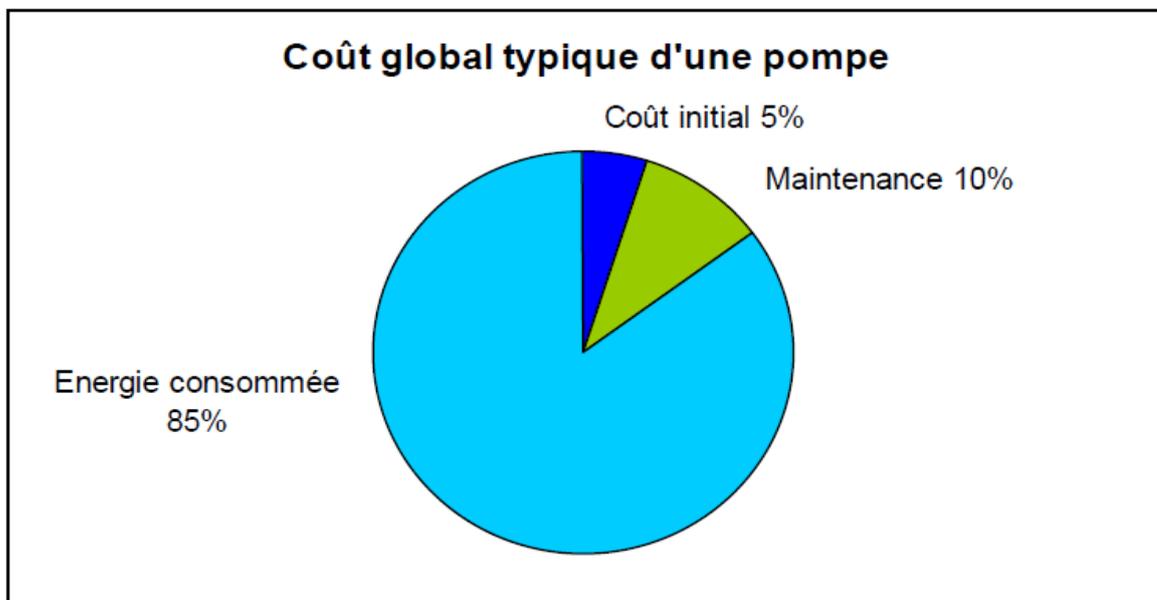


Figure II.1 : Coût global typique d'une pompe.

II.2 Systèmes de pompage

II.2.1 Généralités sur les systèmes de pompage

Le rôle premier d'une pompe est d'aspirer et de refouler efficacement des fluides dans un système. Il est plus facile de maintenir une haute efficacité de pompage et de satisfaire

l'exigence de la pompe en matière de débit, lorsque l'on comprend les exigences du procédé.

Un simple diagramme de la tuyauterie et de l'instrumentation peut fournir des données sur les exigences du procédé. Ce diagramme du système doit comporter un minimum de renseignement, c'est-à-dire non seulement la source d'approvisionnement d'une pompe donnée mais aussi toutes les composantes à travers lesquelles le fluide passera avant d'atteindre le ou les points de refoulement finaux. On devrait inclure tout autre renseignement relatif au fonctionnement du procédé et de la pompe : le diamètre des tuyaux, les boucles de régulations et les détecteurs, de même que les régulateurs de débit comme les robinets et les vannes de régulation.

Par la suite, il est important de connaître les débits de fonctionnement requis. Ces débits comprennent les débits de fonctionnement minimal, normal et maximal. Le débit normal est celui observé le plus souvent au cours du fonctionnement du système. Si le débit normal est variable ou si le système, fonctionne pendant une période de temps non négligeable à un débit différent, les données de ces débits devront être intégrées au tableau d'analyse.

Pour chaque point de fonctionnement, il est utile de connaître les exigences du système en matière de hauteur statique. Cela déterminera la puissance requise pour élever le fluide et fournir la pression nécessaire aux divers points de fonctionnement du procédé.

La hauteur statique repose sur trois éléments :

- La densité du fluide (densité relative).
- La différence d'élévation entre le point d'aspiration et le point de refoulement de la pompe.
- La différence de pression de fonctionnement entre les points d'aspiration et de refoulement.

Pour chaque débit de fonctionnement requis, on doit évaluer la chute de pression dans les équipements et la tuyauterie à travers laquelle passera le fluide transporté. Les données sur les chutes de pression s'obtiennent à partir de mesures réelles ou des spécifications fournies par les fabricants des équipements.

Les pertes par frottement dépendent des propriétés du fluide, du diamètre et de la longueur des tuyaux, du nombre de raccordement comme les coudes et les manchons de réduction, de même que l'âge de la tuyauterie. La meilleure façon de déterminer les pertes par frottement demeure la mesure de la pression réelle dans les tuyaux. On peut également estimer les pertes par frottement lorsque les indications de la pression dans la tuyauterie ne sont pas disponibles et que le système est encore à l'étape de la conception.

La hauteur manométrique totale nécessaire au transfert du fluide dans le système est définie par la somme de la hauteur statique requise par le système, de la chute de pression de l'équipement et des pertes par frottement et aux étranglements (la chute de pression causée par le réglage des débits). La hauteur manométrique totale minimale peut varier selon les conditions de fonctionnement. Cela n'inclut pas les pertes causées par la vanne de régulation. On ne peut pas faire le choix d'une pompe sans incorporer les pertes de charge d'une éventuelle vanne de régulation. [Système de pompage. HQ. 1993].

II.2.2 Courbe du système

Il est possible d'établir la courbe du système en déterminant la hauteur manométrique totale pour une gamme de débits. Comme l'indique la figure ci dessous, la courbe du système illustre la relation entre le débit et la hauteur manométrique totale requise.

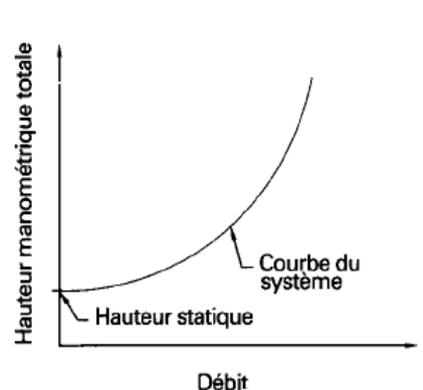


Figure II.2 : Courbe d'un système de pompage.

La hauteur statique du système est définie par la hauteur manométrique totale, là où la courbe du système est au débit nul. À mesure que le débit s'accroît, une hauteur supplémentaire est requise afin de surmonter la résistance du système à l'écoulement. Cette résistance est généralement proportionnelle au carré du rapport des débits.

Les paramètres connus qui suivent déplaceront ou modifieront la courbe du système :

- La hauteur statique du système.
- L'ouverture de la vanne de régulation.

La variation des niveaux de fonctionnement des réservoirs ainsi que la variation de la pression de fonctionnement des équipements (ex : réservoir sous pression) sont des exemples de variation de la hauteur statique.

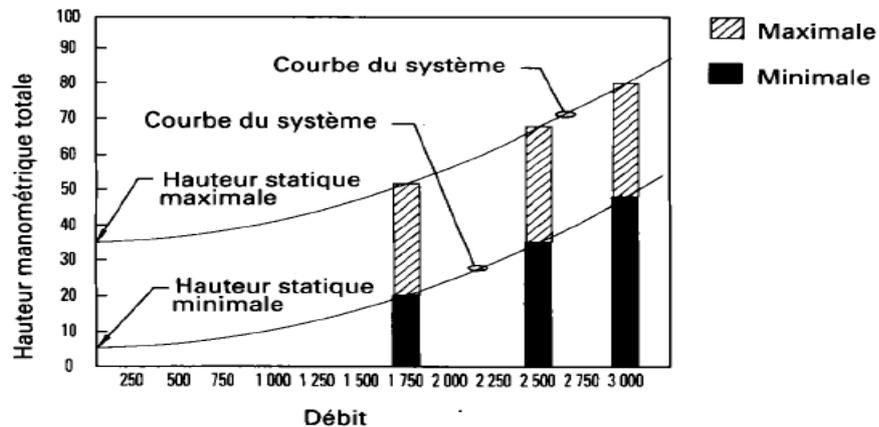


Figure II.3 : Effets de la hauteur statique sur la courbe du système.

La forme de la courbe du système peut aussi changer en fonction du degré d'ouverture de la vanne de régulation. L'ouverture de la vanne de régulation peut ainsi avoir des effets sur le débit et la hauteur manométrique totale.

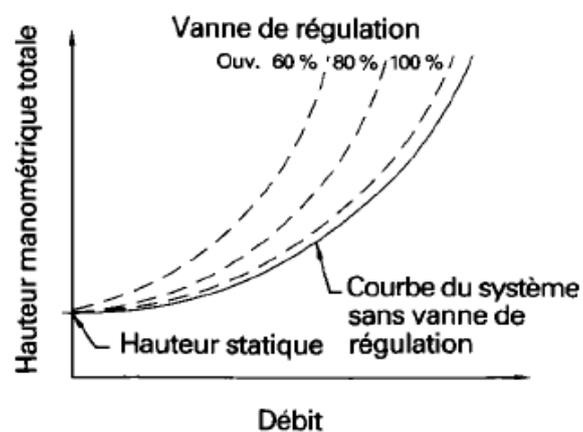


Figure II.4 : Effet de l'ouverture de la vanne sur la courbe du système.

D'autres paramètres inconnus, comme l'encrassement, la rouille et l'usure des composants de système viendront modifier la courbe du système.

II.2.3 Environnement hydraulique des stations de pompage

Les équipements hydrauliques d'une station de pompage comprennent en dehors des pompes elles-mêmes [*Les station de pompage d'eau*] :

- Les équipements d'aspiration : grille, tulipe d'aspiration, crépine, clapet, joint, vanne, convergent, dispositif anti-vortex, appareils de protection anti-bélier, circuit d'amorçage de la conduite et de la pompe. Ces équipements se différencient selon que l'aspiration se fait dans une bache ou sur une conduite ;
- Les équipements de refoulement : joint, divergent, clapet anti-retour, vanne, appareils divers.

❖ Equipement en amont : aspiration

L'aspiration des pompes d'une station peut se faire soit dans une bache d'aspiration, soit dans une conduite.

➤ aspiration en bache

L'eau à élever est stockée dans une bache ou réservoir d'aspiration, réservoir en communication avec l'atmosphère, et l'aspiration des pompes se fait alors directement dans la bache, soit qu'une courte conduite plongeant dans la bache amène l'eau à la bride d'aspiration de la pompe, soit que la pompe elle-même soit immergée dans la bache.

➤ Grilles

Ces dispositifs ne sont utilisés que pour les pompages d'eau brute afin d'éviter l'entrée des corps solides dans les pompes.

Il existe deux types principaux de grilles :

- Les grilles fixes à barreaux dont le nettoyage est assuré soit manuellement, soit automatiquement par des râteaux mécaniques.
- Les grilles tournantes à toile métallique disposée en bande ou en tambour. Le nettoyage s'effectue par lavage de la toile par des rampes d'eau sous pression.

➤ **Tulipe**

La nécessité de la tulipe dépend essentiellement de la vitesse d'entrée de l'eau dans la conduite d'aspiration. Pour des valeurs ne dépassant pas 0.8 m/s, il est possible de ne pas prévoir de tulipe. Cependant son utilisation permet de diminuer les pertes de charge. Aussi est-il recommandé d'en prévoir dès que la vitesse atteint 0.5 m/s

➤ **Crépine**

Tout comme la grille, la crépine évite l'entrée accidentelle de corps solides dans la pompe.

En eau brute, la crépine peut s'obturer rapidement créant ainsi une perte de charge additionnelle à l'aspiration de la pompe, ce qui peut engendrer une cavitation dangereuse pour la pompe.

➤ **Clapet d'aspiration, clapet à crépine**

Un clapet anti-retour placé sur la canalisation d'aspiration évite à l'arrêt de la pompe un retour d'eau si de son côté le clapet anti-retour normalement placé au refoulement ferme mal ; de cette manière, il n'y a alors pas de risque de dévirage.

De plus, ce clapet placé à l'aspiration permet de maintenir la colonne d'eau dans la conduite d'aspiration et le corps de pompe, évitant ainsi de recommencer trop souvent l'amorçage. Ce clapet peut être combiné avec la crépine d'aspiration pour former un clapet à crépine.

Dans tous les cas, il y a augmentation des pertes de charge, ce dont il faut tenir compte dans les conditions d'aspiration.

➤ **Aspiration sur conduite**

L'eau à élever arrive à la station par une conduite que l'on relie directement au collecteur d'aspiration de l'usine d'où partent les aspirations des pompes ; il n'existe aucune bache à la station.

➤ **Conduite ou collecteur d'aspiration**

Sur la conduite, on évitera toute formation de poches d'air. Les parties horizontales comporteront une légère pente (2%) montant en direction de la pompe ; ceci permettra

l'évacuation permanente des bulles d'air qui pourront être libérées dans l'eau. Toute contre pente est à proscrire.

L'équipement du collecteur comprendra tous les dispositifs nécessaires à son ventousage et à sa vidange.

➤ **Joints**

Si la conduite d'aspiration est en dépression, une attention particulière sera donnée aux joints afin de supprimer toute possibilité d'entrée d'air et éventuellement d'entrée d'agent polluant. Aussi, on préfère les joints soudés aux joints à emboîtement et aux joints à manchons filetés.

➤ **Organes communs aux deux cas d'aspiration**

L'idée maitresse qui présidera à l'étude des organes communs d'aspiration est la limitation des pertes de charges d'une part, et l'élimination de tout dispositif risquant d'engendrer des entrées d'air d'autre part.

Selon la position du ou des clapets, il y aura lieu de dimensionner les organes d'aspiration pour résister à la pression d'aspiration seule ou à la pression de refoulement.

➤ **Coudes, dispositif anti vortex**

Les coudes seront le moins nombreux possible, et à grand rayon de courbure ; on évitera de monter un coude juste en amont de la bride d'aspiration ; si cela est impossible, on améliorera le coude en installant une cloison ou un croisillon anti-vortex.

➤ **Vannes d'aspiration**

Une vanne montée à l'aspiration de la pompe permet d'isoler la pompe pour les travaux d'entretien ou de démontage sans pour autant arrêter toute la station.

➤ **Convergent d'aspiration**

Afin de limiter les pertes de charges à l'aspiration des pompes, la conduite d'aspiration a fréquemment un diamètre élevé donnant une vitesse de circulation de 0.8 à 1 m/s. Cette vitesse est inférieure à la vitesse à l'entrée de la bride de pompe (de l'ordre de 2 à 5 m/s), la conduite est alors raccordée à la pompe par un convergent, ce qui permet d'avoir une

accélération progressive de l'écoulement, favorisant la bonne répartition des vitesses juste à l'amont de la pompe.

➤ **amorçage**

Lorsqu'une pompe centrifuge n'est pas en charge à l'aspiration, un amorçage de la pompe doit être prévu avant la mise en marche du groupe.

❖ **Equipement en aval**

➤ **Joint de raccordement**

La conduite de refoulement sera raccordée à la pompe de manière à ne transmettre aucun effort parasite sur la pompe.

➤ **Divergent**

A la sortie de la pompe, la vitesse de l'eau peut être de 3 à 7 m/s. Dans les conduites de refoulement, il est nécessaire de ralentir cette vitesse pour la maintenir dans une plage de 1.2 à 1.5 m/s.

➤ **Clapet de refoulement**

A la sortie de la pompe, il pourra être placé un clapet dont le rôle sera d'empêcher l'inversion du débit d'eau lors de l'arrêt de la pompe.

➤ **Vanne de refoulement**

La vanne de refoulement placée après la pompe et le clapet anti-retour, peut avoir plusieurs rôles. Cette vanne permettra tout d'abord d'isoler la pompe lors des entretiens et des démontages. La vanne peut intervenir également lors de la mise en marche et de l'arrêt de la pompe dans le cas des pompes centrifuges. Pour celles-ci, en effet, la courbe de puissance absorbée montre que la puissance est minimale lorsque la vanne de refoulement est fermée. Il sera donc intéressant, dans le cas où de grosses puissances sont en jeu, de démarrer la pompe vanne fermée pour limiter la durée du démarrage. La manœuvre progressive de la vanne de refoulement permettra par ailleurs, lors du démarrage et de l'arrêt du groupe, de limiter les coups de bélier dus aux variations brusques de la vitesse de l'eau dans la conduite de refoulement.

➤ **Conduite de refoulement**

La vitesse de circulation de l'eau dans la conduite de refoulement d'une usine sera de l'ordre de 1.3 à 1.5 m/s. En effet, le long de cette conduite se trouvent les piquages pour le raccordement du refoulement des pompes.

La conduite comportera les dispositifs classiques pour le ventousage et la vidange.

II.3 Types de pompe

Les pompes centrifuges : le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge.

Les pompes volumétriques : l'écoulement résulte de la variation d'une capacité occupée par le liquide.

II.3.1 Les pompes centrifuges

➤ **Principe de fonctionnement**

Une pompe centrifuge est constituée de :

- une roue à aubes tournante autour de son axe.
- un distributeur dans l'axe de la roue.
- un collecteur de section croissante, en forme de spirale appelée volute.

Le liquide arrive dans l'axe de l'appareil par le distributeur et la force centrifuge le projette vers l'extérieur de la turbine. Il acquiert une grande énergie cinétique qui se transforme en énergie de pression dans le collecteur où la section est croissante.

L'utilisation d'un diffuseur (roue à aubes fixes) à la périphérie de la roue mobile permet une diminution de la perte d'énergie.

➤ **Caractéristiques**

Les hauteurs manométriques totales fournies ne peuvent dépasser quelques dizaines de mètres. Pour dépasser ces valeurs on utilise des pompes centrifuges multicellulaires où plusieurs roues sont montées en série sur le même arbre. Le refoulement d'une des pompes communique avec l'aspiration de la pompe suivante.

Il est également possible de coupler en série plusieurs de ces pompes. Le rendement des pompes centrifuges est de l'ordre de 65 à 80 % : il est inférieur à celui des pompes volumétriques.

➤ **Utilisation**

Ce sont les pompes les plus utilisées dans le domaine industriel à cause de la large gamme d'utilisation qu'elles peuvent couvrir, de leur simplicité et de leur faible coût.

II.3.2 Les pompes volumétriques

➤ **Principe de fonctionnement et généralités**

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté. Leur fonctionnement repose sur le principe suivant:

- Exécution d'un mouvement cyclique pendant un cycle, un volume déterminé de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé à la fin.

Ce mouvement permet le déplacement du liquide entre l'orifice d'aspiration et l'orifice de refoulement.

On distingue généralement:

- les pompes volumétriques rotatives : Ces pompes sont constituées par une pièce mobile animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, qui tourne dans le corps de pompe et crée le mouvement du liquide pompé par déplacement d'un volume depuis l'aspiration jusqu'au refoulement.
- les pompes volumétriques alternatives : la pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif.
- Les pompes volumétriques permettent d'obtenir des hauteurs manométriques totales beaucoup plus élevées que les pompes centrifuges. La pression au refoulement est ainsi plus importante. Le débit est par contre généralement plus faible mais il ne dépend pratiquement pas des caractéristiques du réseau.

Le rendement est souvent voisin de 90 %.

II.3.3 Les différents types de roues

La roue (turbine, impulseur) constitue l'élément mobile de la pompe. Elle communique au liquide une partie de l'énergie transmise à l'arbre par l'intermédiaire de ses aubes (ailettes).

Il existe trois formes principales de roue :

- roue ouverte

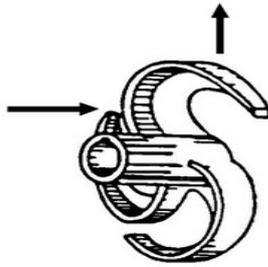


Figure II.5 : Roue ouverte.

- roue semi ouverte

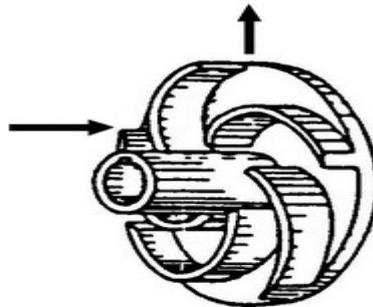


Figure II.6 : Roue semi ouverte.

- roue fermée

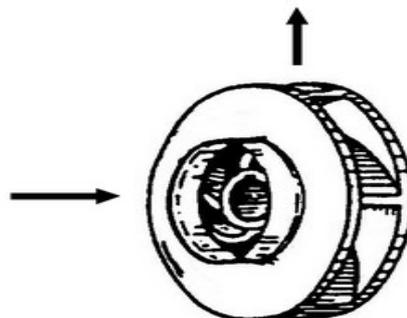


Figure II.7 : Roue fermée.

La forme des roues, le nombre des aubes et le profil méridien dépendent des caractéristiques recherchées et la nature du liquide à véhiculer.

La hauteur engendrée par la roue est fonction du carré de la vitesse périphérique. En conséquence, pour une hauteur donnée à réaliser, plus la vitesse de rotation sera grande plus le diamètre sera faible et inversement. Plus le débit est important, plus la section d'entrée et la largeur de sortie sont grandes.

La vitesse spécifique est caractéristique importante d'une pompe. Sa connaissance guide le choix de la pompe la plus appropriée à une situation donnée. Connaissant le débit Q à pomper, la hauteur d'élévation H et la vitesse de rotation N du moteur accouplé à la pompe.

$$N_s = \frac{N \cdot Q^{1/2}}{H^{3/4}}$$

Une faible vitesse spécifique $N_s < 20$ (Q petit, H grand) conduit à fabriquer des roues étroites présentant des difficultés d'élaboration et un mauvais rendement. La hauteur totale est alors divisée par un entier E pour augmenter la vitesse spécifique, la pompe est de type multicellulaire avec E le nombre d'étage.

Pour une vitesse spécifique moyenne $30 < N_s < 120$ (Q moyen, H moyen). La roue facile à obtenir et le rendement est excellent. La pompe est de type monocellulaire.

Pour une vitesse spécifique élevée $N_s > 150$ (Q grand, H moyen). Le rendement tend à diminuer. Le profil de la roue ne se prête plus à certaines adaptations (joints hydrauliques, ailettes de décharge). Par ailleurs, les vitesses à l'aspiration deviennent élevées. Le débit est alors divisé par deux pour diminuer la vitesse spécifique, la pompe est alors du type à double entrée ou double flux. [Système de pompage. HQ. 1993].

II.4 Revue de la théorie des pompes

Les pompes fournissent l'énergie requise pour déplacer un liquide et vaincre la résistance de la tuyauterie, du procédé et des changements d'élévation. Les pompes sont généralement regroupées en deux catégories : les pompes centrifuges et les pompes volumétriques. Dans ce point, nous traiterons uniquement des pompes centrifuges, car ce sont les plus répandues dans le domaine de l'adduction en eau potable et qu'elles

s'appliquent à des puissances supérieures. Elles représentent donc le potentiel d'économie d'énergie le plus élevé.

II.4.1 Courbe caractéristique des pompes

La performance des pompes centrifuges à vitesse constante peut être illustrée directement sur une courbe caractéristique pour un diamètre de roue donné. Les courbes caractéristiques indiquent la hauteur manométrique totale fournie par la pompe, sa puissance, son efficacité et son NPSH requis (*Net Positive Suction Head* : hauteur nette absolue à l'aspiration), définies à partir du débit nul jusqu'à la capacité maximale. Les facteurs de correction doivent être appliqués pour l'évaluation du débit, la hauteur manométrique totale et l'efficacité lorsqu'il s'agit d'un fluide dont la viscosité est très différente de celle de l'eau. Ces facteurs de correction se trouvent dans les catalogues des fabricants.

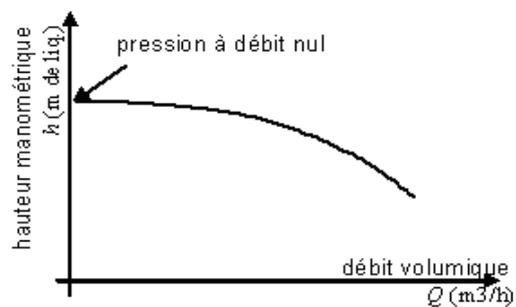


Figure II.8 : Courbe caractéristique d'une pompe.

II.4.2 Point de fonctionnement

La figure suivante indique une courbe de pompe à vitesse constante pour un diamètre de roue donné, ainsi que la courbe caractéristique d'un système. Le point d'intersection de la courbe de la pompe et de la courbe du système correspond au point de fonctionnement. La pompe fonctionne habituellement selon une gamme de débits variables et parfois même selon une gamme de hauteurs statiques variables. Pour satisfaire toutes ces conditions, on doit faire correspondre la courbe du système avec la courbe d'une pompe à vitesse constante en utilisant une vanne de régulation. Les points correspondant à chaque fonctionnement particulier définissent un champ de fonctionnement sur la courbe de la pompe.

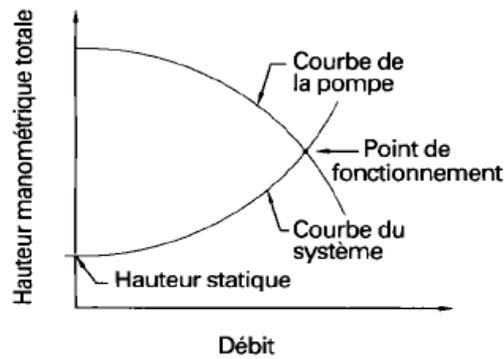


Figure II.9 : Point de fonctionnement d'une pompe.

II.4.3 NPSH-Hauteur nette absolue à l'aspiration

Plusieurs paramètres doivent être vérifiés pour assurer une bonne performance des pompes centrifuges. L'un de ces paramètres est la hauteur nette absolue à l'aspiration (NPSH) du liquide à la roue. Deux valeurs de NPSH doivent être considérées : la hauteur nette à l'aspiration requise (NPSH_{requis}) et la hauteur nette à l'aspiration disponible (NPSH_{disponible}). Le NPSH_{requis} est déterminé par le fabricant de la pompe. Cette valeur dépend de plusieurs facteurs comme la géométrie de la roue, le débit de la pompe, la vitesse de rotation, la nature du liquide, etc. On définit ensuite le NPSH_{disponible} selon l'équation suivante :

$$\text{NPSH disp} = h_a - h_{\text{vap}} \pm h_{\text{st}} - h_{\text{fs}}$$

Avec :

h_a : pression absolue à la surface du liquide au point d'alimentation de la pompe.

h_{vap} : pression de vapeur absolue du liquide à la température de pompage.

h_{st} : différence de hauteur du liquide à l'alimentation par rapport au centre de la pompe.

h_{fs} : pertes de charge par frottement dans le tuyau d'aspiration.

Pour obtenir un bon fonctionnement d'une pompe centrifuge, il faut que la valeur du NPSH_{disponible} soit supérieure à celle du NPSH_{requis} afin d'empêcher la cavitation. Il convient généralement d'ajouter une marge de sécurité de 1 mètre au moins.

II.4.4 Fonctionnement en série et en parallèle

Un système peut être alimenté par plusieurs pompes. Elles peuvent être installées en série ou en parallèle de façon à augmenter respectivement la pression ou le débit. Ainsi, pour deux ou plusieurs pompes en série, on obtient la caractéristique de l'ensemble des pompes en additionnant, à débit constant, les hauteurs manométriques totales de chaque pompe.

Pour deux ou plusieurs pompes en parallèle, on obtient la caractéristique de l'ensemble des pompes en additionnant, pour une hauteur manométrique totale donnée, les débits fournis par chaque pompe.

II.4.5 Rendement de la pompe

La puissance utile (P_u) communiquée au fluide est donnée par la formule :

$$P_u = \rho g H Q$$

La puissance mécanique (P) fournie à la pompe tient compte du rendement η de la pompe, soit :

$$P = (1/\eta)P_u = (1/\eta)\rho g H Q$$

Le rendement η de la pompe est variable en fonction du débit. Il est nul lorsque la HMT ou le débit est nul.

Le point de fonctionnement nominal est défini comme le point où le rendement de la pompe est maximal.

- **L'indicateur de l'état d'usure : le rapport Wh/m³/m**

L'un des indicateurs pertinents de l'usure d'une pompe est le calcul du rapport des Wh/m³/m, qui doit avoir une valeur proche de 4 (énergie nécessaire pour élever un mètre cube d'eau sur une hauteur d'un mètre). Plus on dépasse cette valeur, plus la pompe est usée.

II.5 Calcul des mesures d'économie d'énergie électrique

Le calcul des économies d'énergie électrique réalisables dans un système de pompage doit être effectué en évaluant la consommation d'énergie avant et après l'implantation d'une mesure d'économie d'énergie électrique. L'équation de base suivante sert à évaluer la puissance requise à l'arbre de la pompe

$$P = \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g}{E_p} \quad (\text{Watt})$$

Q : débit de fonctionnement (l/s)

H : hauteur manométrique totale correspondant au débit Q (m)

ρ : densité relative du fluide (Kg/m³)

E_p : efficacité de la pompe

Il est important de noter que pour les pompes servant à transporter des fluides visqueux, le débit, la hauteur manométrique totale et l'efficacité doivent être corrigés pour évaluer approximativement la puissance P.

Par la suite, on évalue la puissance requise du moteur à l'aide de l'équation suivante :

$$P_m = \frac{P}{E_m}$$

E_m : efficacité nominale du moteur.

Enfin, la consommation d'énergie est obtenue en multipliant la puissance par le nombre d'heures de fonctionnement :

$$\text{Consommation d'énergie : kW} \times \text{h} = \text{kWh}$$

Le calcul des économies d'énergie électrique entre les deux hypothèses est donc :

$$\text{Economies d'énergie : (kW - kW')} \times \text{h} = \text{kWh/an}$$

kW : puissance consommée avant mesures d'économie d'énergie électrique.

kW' : puissance consommée après mesures d'économie d'énergie électrique.

h : nombre d'heures de fonctionnement dans une année.

Lorsqu'il existe plusieurs points de fonctionnement, on doit calculer l'énergie consommée pour chacun d'eux avant et après les modifications.

Économies d'énergie électrique totales :

$$(kW_1 - kW'_1) \times h_1 + (kW_2 - kW'_2) \times h_2 = \text{kWh économisés}$$

h_1 : nombre d'heures de fonctionnement au point de fonctionnement 1.

h_2 : nombre d'heures de fonctionnement au point de fonctionnement 2.

Ces équations permettent de déduire que la réduction de la consommation d'énergie électrique d'une pompe est réalisable en proposant une ou plusieurs des modifications suivantes :

- réduire le débit requis (Q) ;
- réduire la hauteur manométrique totale requise (H) ;
- réduire le temps de fonctionnement (h) ;
- augmenter l'efficacité de la pompe (E_p) ;
- augmenter l'efficacité du moteur (E_m) ;
- réduire la densité relative (ρ).

Cependant, plusieurs de ces paramètres sont directement reliés au système, tel le débit (Q), la hauteur manométrique totale (H) et le temps de fonctionnement (h). C'est pourquoi les possibilités d'économie d'énergie électrique sont réalisables en examinant non seulement la pompe, mais également le système dans son ensemble.

Il faut retenir deux aspects importants en relation avec les paramètres précédents :

- les paramètres ont un effet les uns par rapport aux autres. Par exemple, une modification du débit influencera habituellement la valeur des autres paramètres, comme l'efficacité et la hauteur manométrique totale requises (H_{mt}).
- en calculant les économies d'énergie électrique pour plusieurs mesures d'économie d'énergie électrique, l'énergie totale économisée ne sera pas nécessairement la somme des économies calculées individuellement, puisque certaines mesures d'économies d'énergie électrique influenceront les paramètres.

Par conséquent, il est important d'évaluer le gain net en comparant les différentes hypothèses par rapport à l'état actuel compte tenu de l'influence des différents paramètres.

II.5.1 Sommaire des mesures d'économie d'énergie électrique

Plusieurs démarches peuvent être entreprises afin d'économiser l'énergie électrique tels que :

- pompes
 - L'installation d'un entraînement à vitesse variable ;
 - Redimensionnement de la pompe pour un fonctionnement au point d'efficacité maximal.
- moteur
 - Installation d'un moteur à vitesses multiples.
- tuyauterie
 - Optimisation du diamètre de la tuyauterie ;
 - Application d'un revêtement interne ;
 - Réduction des pertes dans le système.

II.5.2 Modulation de la vitesse

Une pompe à vitesse constante a habituellement une hauteur manométrique totale plus importante que celle requise par le procédé et à des conditions autres que le point de conception de la pompe. L'exploitation d'une pompe à vitesse variable peut permettre des économies d'énergie électrique en répondant aux exigences réelles du procédé. Le débit est transmis à la hauteur manométrique totale requise par le procédé lorsque la vitesse de la pompe est réglée par un entraînement à vitesse variable (EVV).

Pour bien comprendre le fonctionnement d'un entraînement à vitesse variable, il faut bien saisir que le point de fonctionnement se déplace alors sur la courbe du système et non plus sur la courbe de la pompe à vitesse constante. Ainsi, les économies réalisées dépendent de la différence de hauteur entre la courbe de la pompe à vitesse constante et la hauteur requise par le système à chaque débit donné. Comme l'indique la figure suivante :

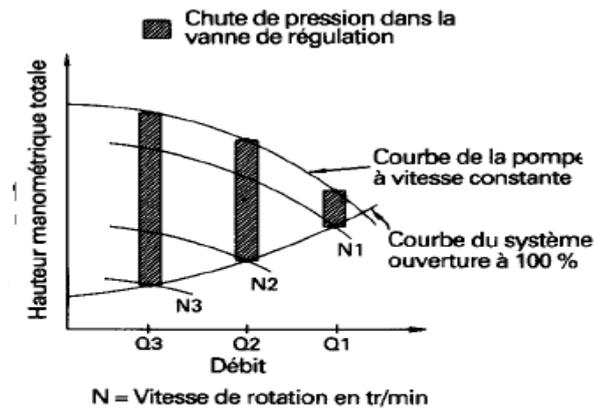


Figure II.10 : Economie d'énergie électrique par modulation de la vitesse

Lorsqu'une pompe fonctionne avec une grande variation de débit ou de hauteur statique, la modulation de la vitesse peut être une mesure intéressante pour optimiser le rendement.

L'utilisation de la pompe à vitesse variable par rapport à l'utilisation de la pompe à vitesse constante peut offrir des économies d'énergie électrique substantielles quand il y a une grande variation des débits ou des pressions nécessaires au procédé.

Les pompes sont conçues de façon à satisfaire aux conditions de fonctionnement normales et extrêmes, et à fournir les débits et la hauteur manométrique totale exigés par le procédé. La roue de la pompe à vitesse constante est dimensionnée afin de satisfaire la condition extrême qui définit la courbe spécifique de la pompe. Un entraînement à vitesse variable offre un degré supplémentaire de liberté pour optimiser le fonctionnement réel de la pompe.

Lorsque le procédé requiert un débit moins important, la pompe à vitesse constante fournira ce débit à une hauteur manométrique totale telle qu'elle est dictée par la courbe de la pompe. De plus, le procédé exigera une hauteur moins grande grâce à la réduction des pertes de charge dans la tuyauterie, occasionnées par le faible débit. Une vanne de régulation doit être ajustée afin de fournir un débit faible et éliminer tout excédent de pression produit par la pompe. Cette chute de pression supplémentaire provoquée par la vanne de régulation constitue une perte d'énergie.

Une pompe à vitesse variable produira des économies d'énergie électrique grâce à :

- une hauteur statique réduite au cours du fonctionnement réel.

- une chute de pression minimale dans la vanne de régulation existante, ouverte à 100%, puisque la vitesse de la pompe est réglée pour contrôler le débit.
- une amélioration de l'efficacité de fonctionnement de la pompe en raison de l'augmentation du diamètre de la roue.

II.5.3 Installation d'un moteur à vitesse variable

Le moteur à vitesses multiples d'une pompe peut réduire la consommation d'énergie électrique lorsque le procédé requiert seulement quelques points de fonctionnement spécifiques. La vitesse du moteur peut être modifiée selon les exigences du procédé. On doit conserver la vanne de régulation et moduler à partir de quelques points spécifiques. Un moteur à double enroulement spécial peut être réglé à deux, trois ou quatre vitesses.

Avantages de la pompe à moteur à vitesses multiples :

- Immobilisations moindres que pour un entraînement à vitesse variable.
- Elimination des pertes et de l'entretien d'un entraînement à vitesse variable.

Inconvénients de la pompe à moteur à vitesses multiples

- Les vitesses de fonctionnement sont limitées à des valeurs spécifiques et restreignent donc la flexibilité de l'exploitation.
- La possibilité de devoir entreposer un moteur à vitesses multiples de réserve.
- L'achat et l'installation d'un démarreur spécial.
- La nécessité de recourir à un câblage plus volumineux (un câble de puissance pour chaque vitesse), ce type de technologie est de ce fait réservé à des puissances plus faibles

II.5.4 Modification du diamètre de la roue de pompe

Ces mesures d'économie d'énergie électrique requièrent un investissement minime pouvant engendrer des économies d'énergie importantes, ce qui permet en général une période de recouvrement très courte, souvent inférieure à un an.

La notion de sous ou surdimensionnement est assez floue, et il convient de préciser la grandeur qui est sous ou surdimensionnée : on peut parler du débit, de la HMT ou encore de la puissance de la pompe.

➤ **Cas d'une pompe surdimensionnée**

Plusieurs pompes installées sont surdimensionnées en raison du facteur de sécurité élevé, alors que, dans bien des cas, une marge de sécurité minimale sur les conditions maximales suffirait. Ainsi, des économies d'énergie de 10 à 20 % pourraient être réalisées, uniquement en réduisant le diamètre de roue de ces pompes. Les causes fréquentes du surdimensionnement sont les pertes de charge élevées à travers les vannes de régulation, la tuyauterie, les filtres, les robinets partiellement ouverts et les pertes engendrées par les boucles de recirculation inutiles. On peut citer également le manque de connaissance des débits requis par le procédé et une attitude trop conservatrice dans l'exploitation des équipements (pressions, débits).

Enfin, on a tendance à surdimensionner la roue de la pompe pour éventuellement compenser les pertes de pression causées par la corrosion de la tuyauterie ou par l'encrassement des équipements, ou encore pour des augmentations futures de la capacité du procédé. Dans certains cas, ces conditions ne se produiront qu'après plusieurs années de fonctionnement. La pompe fonctionne alors à des conditions dépassant les besoins, et ce, avec des pertes inutiles pendant plusieurs années. [SABLE, S. 2010]

Les pertes de pression élevées à travers certaines composantes du procédé constituent des limites physiques entraînant une augmentation de la hauteur manométrique totale requise par la pompe. Voici les composantes énergivores que l'on rencontre souvent :

- Vannes de régulation mal dimensionnées.
- Filtres ou échangeurs partiellement bloqués.
- Tuyauterie de diamètre insuffisant.
- Robinets partiellement ouverts.
- Débitmètre à forte restriction (ex. : plaque orifice).

En choisissant des composantes à faibles pertes de charge, on réduit la perte de pression dans le système, ce qui permet de réduire le diamètre de la roue de la pompe pour obtenir le même débit avec une réduction de l'énergie servant au pompage.

➤ **Cas d'une pompe sous-dimensionnée**

Par exemple une pompe sous-dimensionnée en débit quand le point de fonctionnement de la pompe se situe trop à gauche par rapport au point de meilleur rendement. Ainsi,

pour être dans les meilleures conditions de rendement, la pompe choisie devrait fonctionner à un plus gros débit que celui auquel elle fonctionne actuellement.

Le sous dimensionnement d'une pompe peut provenir de la réfection d'un réservoir. En effet il arrive que l'on doive By-passé un réservoir pour un certain temps en cas de travaux importants, comme l'étanchéité des cuves par exemple. On va donc choisir des pompes avec un débit et une Hmt importants qui seront capable d'assurer une distribution aux usagers pendant toute la durée des travaux. Ensuite, une fois le château d'eau remis en service, on pourra soit brider la pompe avec une vanne, ou bien installer un variateur de vitesse pour retrouver un fonctionnement normal.

Une pompe peut aussi fonctionner en sous-dimensionnement si la rugosité de la conduite de refoulement est trop importante : on aura des pertes de charges élevées, et pour une même HMT le débit sera plus faible ; le point de fonctionnement se retrouve donc trop à gauche par rapport au meilleur rendement. Pour remédier à ce problème, un nettoyage de conduite peut être envisagé. Il consiste à introduire dans la conduite une sorte d'obus en caoutchouc qui va racler les parois de la conduite pour la décrasser. Le renforcement de conduite est une autre possibilité afin d'augmenter le débit. Cependant ces opérations sont assez coûteuses, et il faudra comparer le gain obtenu en fonctionnant avec un nouveau couple débit-Hmt une fois la conduite nettoyée par rapport au coût de l'intervention. [*SYSTEMES DE POMPAGE, H Q, 1993*]

II.5.5 Réduction des pertes dans le système

Lors de la conception d'un système de pompage, il faut choisir des raccords à faible perte de charge :

- Coudes à rayon optimal (rayon/diam= 1,5 à 3), tés à 45°, coudes à 45°, robinets de retenue à frottement minimal, raccords soudés, surfaces lisses, matériaux anticorrosion, ...etc.
- Choisir le parcours le plus direct possible.
- Choisir des débitmètres à faible restriction hydraulique (ex. : débitmètres magnétiques et ultrasoniques).
- limiter la perte de pression dans les filtres : prévoir des systèmes de purge à rebours automatiques, ainsi que des alarmes de haute pression différentielle sur les filtres, étager la filtration et choisir l'efficacité de filtration minimale qui satisfait le procédé et les équipements.

➤ Optimisation du diamètre de la tuyauterie

Pour maintenir un frottement raisonnable et limiter l'érosion dans la tuyauterie, la vitesse d'un fluide Newtonien (similaire à l'eau) dans un tuyau droit ne devrait pas dépasser une valeur donnée. Cette dernière dépend de divers facteurs : type de liquide, diamètre de la tuyauterie, type de procédé et d'industrie, rugosité de la tuyauterie, etc.

Lorsque la vitesse du liquide est telle qu'elle entraîne des pertes de charge élevées, on doit vérifier si l'énergie consommée pour vaincre le frottement ne coûte pas plus cher que le coût de remplacement de la tuyauterie pour un diamètre supérieur, ou encore l'installation d'une tuyauterie en parallèle avec la tuyauterie existante.

Lorsque la durée de vie de la tuyauterie peut atteindre cinquante ans, même une période de recouvrement de trois à cinq années pourrait alors justifier cette intervention. Une combinaison d'une ou plusieurs des situations suivantes en accélérera la rentabilité :

- le choix est fait à l'étape de la conception.
- le matériau est peu coûteux (acier standard).
- la vitesse est élevée.

La période de retour sur investissement est habituellement plus courte avec une tuyauterie de faible diamètre, même si l'énergie récupérée est moindre.

II.5.6 Choix des ressources alternatives

En cas d'alternatives de ressources, le critère « moindre coût du m³ d'eau produite » (dont le poids de l'énergie est souvent très important) doit être pris en considération. Cependant, d'autres critères tels que la disponibilité de la ressource dans les barrages ou qualité d'eau pourraient être primordiaux dans les décisions.

En général, la règle est :

$$\text{Coût eau barrage} < \text{coût eau forage} \lll \text{coût eau dessalée}$$

II.6 Tarification de la SONELGAZ

La SONELGAZ mais à la disposition du client trois tarifs différents pour la moyenne tension, ces derniers sont cités dans les tableaux suivants :

E41 :

00h00-6h00 (6h)	6h00-17h00 (11h)	17h00-21h (4h)	21h- 22h30 (1h30)	22h30-00h (1h30)
85.33	161.47	726.68	161.47	85.33

Tableau II.1 : Taif E41 en CDA

E42 :

00h – 17h00	17h00 – 21h00	21h00 – 00h00
150.53	726.68	150.53

Tableau II.2 : Tarif E42

E43 :

00h00 – 6h00	6h00 – 22h30	22h30 – 00h00
85.33	356.92	85.33

Tarif II.3 : Tarif E43

II.6.1 L'analyse tarifaire

La solution qui vient à l'esprit en premier lieu pour optimiser le cout d'un pompage en jouant sur la tarification est le changement des tarifs. Cette solution se base sur un calcul mathématique suivant le cout des différentes tranches des 3 tarifs proposés par la SONELGAZ en fonction de la durée d'utilisation et de son intensité. Elle permet de réaliser un gain immédiat et sans risque.

➤ Modification des consignes de régulation

Il s'agit de voir si l'on peut jouer sur les consignes de régulations de la pompe pour faire des économies, tout en continuant à alimenter les réservoirs dans de bonnes conditions, c'est-à-dire sans risque de vidange dans le réservoir ou d'interruption de la distribution. Ce premier point est très intéressant puisque sa mise en œuvre ne coute rien : le gain est immédiat.

Selon les cas étudiés, on distingue deux modes de fonctionnement optimisé pour les pompages de reprise d'eau potable. Le premier s'appuie sur la différence de tarification heures pleines/ heures creuses proposée par la SONELGAZ pour la moyenne tension, le second consiste en un lissage des pompages sur 24h.

L'enjeu est de trouver une sorte de compromis entre un marnage trop extrême du réservoir, au risque de le voir se vider en cas de problème technique (arrêt des pompages,

casse importante des conduites...) et un pompage excessif dans lequel le réservoir ne marne que très légèrement.

➤ **Optimisation des puissances souscrites**

La puissance mise à disposition par compte est sollicitée à la SONELGAZ en fonction de la prévision de puissance maximale à consommer. Cela permet au distributeur d'énergie d'avoir une visibilité sur la demande future.

La puissance mise à disposition doit être soigneusement étudiée. Si elle est trop élevée par rapport à la demande réelle, on paiera des kW qui ne seront jamais utilisés. En revanche, si on demande en moins, une pénalité peut être appliquée par kW en excès.

➤ **Contraintes contractuelles**

Le choix de tarification doit se faire avec une vision à long terme car les contrats de fourniture d'énergie figent les puissances souscrites et les options tarifaires pour des périodes allant de 1 à 5 ans.

➤ **Marnage heures pleines / heures creuses**

L'utilisation de la tarification heures pleines/heures creuses qui favorise la consommation de nuit par des tarifs plus faibles. Avec cette méthode, on va limiter le plus possible le fonctionnement en journée en laissant le niveau descendre dans le réservoir jusqu'à un certain seuil, puis on pompe un maximum en heures creuses afin de remplir le réservoir, de manière à se retrouver au début de la période de pointe avec un réservoir plein.

II.7 Conclusion

Une partie importante des frais d'électricité de l'industrie de l'eau provient de l'utilisation des systèmes de pompage. Une gestion optimale de l'énergie de pompage peut être atteinte lorsque les besoins du procédé sont bien établis et la performance évaluée.

Plusieurs mesures communes d'économie d'énergie électrique ont été présentées dans ce chapitre, il peut exister d'autres mesures mais on a préféré parler des mesures rentables à court et moyen termes.

Chapitre III

Modélisation de la chaîne Ouest d'adduction de la wilaya d'Alger sous EPANET

III.1 Introduction

Le modèle hydraulique est un outil puissant pour l'ingénieur chargé de la gestion du réseau d'eau potable. En effet, nous pouvons simuler et prévoir des comportements futurs du réseau, mais cela dépend principalement de la représentativité du modèle de la réalité du terrain. Cette représentativité dépend de la finesse ou de la précision du calage du modèle, parce qu'un modèle non calé ou non calibré est purement théorique, donc nous ne pouvons faire confiance aux résultats obtenus par un tel modèle.

Le but de ce chapitre est d'élaborer et de caler le modèle de la chaîne d'adduction Ouest sous le logiciel EPANET, dans le but de simuler le comportement réel du système. Ce qui constitue l'étape la plus importante avant d'établir des mesures d'économie d'énergie électrique.

III.2 Présentation du logiciel

Le logiciel EPANET est né d'une initiative du Congrès des Etats-Unis qui visait à protéger les ressources naturelles du pays. Dès lors, l'EPA (US Environmental Protection Agency) a été chargée de développer des techniques permettant de mieux appréhender les écoulements et les transformations de l'eau dans un réseau d'eau potable.

Depuis 1993, le logiciel est disponible gratuitement pour tous les bureaux d'études. Afin d'augmenter la convivialité du logiciel pour les sociétés francophones, des partenaires privés ont financé la version française. C'est cette version qui a été utilisée tout au long du stage.

III.2.1 Potentialités du logiciel

EPANET est un logiciel de simulation du comportement hydraulique et qualitatif de l'eau dans les réseaux d'eau potable. Un réseau d'eau potable sur un logiciel se définit par des tuyaux (tronçons sur le logiciel), des nœuds (intersection de deux tuyaux et extrémité

d'une antenne) mais également d'autres organes (réservoirs, pompes, clapets, différents types de vannes,...).

Le logiciel permet de calculer le débit parcourant chaque tuyau, la pression à chacun des nœuds mais également le niveau de l'eau à n'importe quel moment de la journée. Le moteur de calcul hydraulique intégré permet de traiter des réseaux de taille importante. Il dispose de plusieurs formules de calcul de pertes de charge (voir paragraphe suivant), il inclut les différentes pertes de charge singulières. En résumé, le logiciel présente tous les outils pour remplir les objectifs suivants :

- Régulation des pressions dans le réseau.
- Détection des zones de fonctionnement déficitaire.
- Dimensionnement de réseaux.
- Amélioration de la gestion des équipements d'eau.

Le logiciel présente également un module qualité qui permet de calculer les concentrations en substances chimiques, les temps de séjour de l'eau dans différentes parties du réseau. Il permet également de suivre l'origine de l'eau. L'utilisation de ce module qualité nécessite un calage hydraulique préalable. Je n'ai pas utilisé les fonctionnalités de ce module au cours de mon stage.

III.2.2 Principes hydrauliques régissant les calculs du logiciel

➤ Les lois de base du calcul

La loi des nœuds et la loi des mailles constituent la base du calcul hydraulique. La loi des nœuds affirme que le débit entrant dans un nœud est quoiqu'il arrive égal au débit sortant de ce nœud et ce quelque soit le nombre d'entrées et de sorties dans ce nœud.

La loi des mailles dit, quant à elle, que la différence de charges ΔH (égale à la somme de la pression et de la côte au sol au point considéré) entre deux nœuds est égale à la perte de charge entre ces nœuds (voir figure ci-dessous). [GUILSOU. S. 2007]

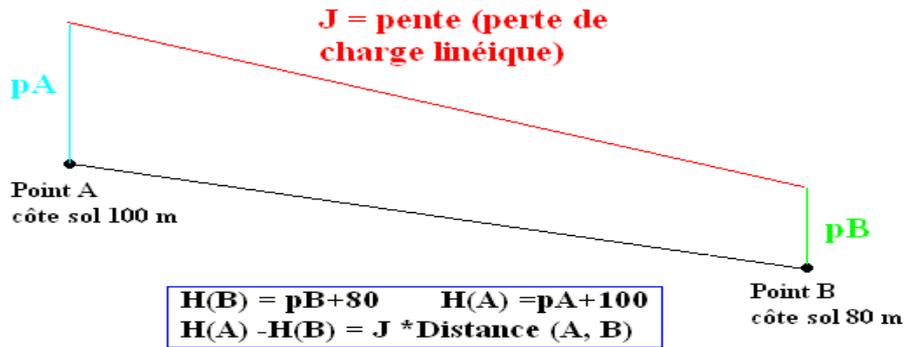


Figure III.1 : Schéma illustratif de la loi des mailles dans un réseau d'eau potable.

Cependant, pour pouvoir obtenir les charges et débits pour chaque nœud et chaque tronçon, il est nécessaire que certains débits et certaines charges soient préalablement connus. Il s'agit des nœuds à charge fixée (réservoirs, bâches) qui imposent la charge de départ et ainsi permet le calcul de la charge à chaque nœud de proche en proche. Il s'agit aussi des nœuds à débit fixé (définition des demandes à chaque nœud) qui permettent de connaître les débits dans les tronçons satisfaisants cette demande. Enfin, l'écoulement se fait du nœud ayant la charge la plus élevée vers le nœud ayant un potentiel de charge moins important.

Le calcul des débits et des charges est lié et ne peut se faire indépendamment. Dès lors, il est nécessaire de connaître l'une ou l'autre des données à chaque nœud pour permettre l'aboutissement du calcul.

➤ **Le calcul des pertes de charges**

- **Le calcul des pertes de charge linéaires**

Le calcul des pertes de charges linéaires sur le logiciel peut se faire par le biais de trois formules différentes (Hazen-Williams, Darcy-Weisbach, Chezy-Manning). La formule de Hazen-Williams est fortement utilisée aux Etats-Unis et présente la particularité de n'être utilisable que pour l'eau et de n'avoir été développée à la base que pour les écoulements turbulents. La formule de Chezy-Manning est plus souvent utilisée pour les canaux à ciel ouvert et pour les grands diamètres. J'ai choisi d'utiliser la formule de Darcy Weisbach qui est plus facile à utilisée et traite les écoulements de tout type et pour tout liquide.

- **Le calcul des pertes de charges singulières**

Les pertes de charges singulières représentent la présence ponctuelle d'un obstacle à l'écoulement (vanne, coude, té ou obstacle non identifié). La formule utilisée est la suivante :

$$H = l * \frac{V^2}{2g}$$

Avec :

V : vitesse de l'écoulement en m/s.

l : coefficient de perte de charges singulières.

g : l'accélération de la pesanteur en m/s².

Le coefficient l définit la nature de l'obstacle, à titre d'exemple, on affecte un coefficient de perte de charge singulière de 10 pour une vanne à boule entièrement ouverte et 2,5 pour un clapet anti-retour.

III.2.3 Spécificités du logiciel

Le logiciel possède les mêmes fonctionnalités et possibilités que les autres logiciels de modélisation des réseaux d'eau potable tel Piccolo. Il présente une convivialité au niveau de son interface qui permet de le rendre assez facilement accessible.

En termes de calcul, EPANET présente quelques particularités. Par exemple, sur le logiciel Piccolo, il est possible de demander au logiciel de revoir une demande à la baisse tandis que sur EPANET, une demande est toujours desservie à 100%. Dès lors, lorsqu'on obtient des pressions négatives sur un nœud, ceci signifie que la demande n'est pas satisfaite.

III.3 Construction du modèle

III.3.1 Saisie du réseau

L'idée d'élaborer un nouveau modèle du réseau chaîne côtière-chaîne des hauteurs sous EPANET constitue une tâche très délicate, car on est obligé de passer par l'étape de saisie de toutes les données nécessaires à la modélisation comme; les longueurs, les diamètres et les rugosités des conduites mais aussi les cotes et les consommations aux nœuds...etc., chose qui pouvait se faire mais qui allait prendre beaucoup de temps pour la réalisation vu le nombre très important de nœuds et d'arcs que comportent le réseau.

Nous avons alors construit le modèle par une autre méthode plus rapide et plus efficace, qui était d'extraire le modèle chaîne côtière-chaîne des hauteurs par le biais d'une passerelle existante entre le SIG du réseau AEP de SEAAL et *EPANET*.

En effet le SIG contient les données relatives au réseau d'Alger et surtout il a la possibilité d'avoir un fichier d'entrée sous format texte avec séparateurs espaces ; ce format peut être obtenu par enregistrement à partir d'un fichier Excel.

Elaboration du modèle

Après l'élaboration du fichier, nous avons réussi à faire le passage *SIG – EPANET* et on a pu avoir le modèle suivant :

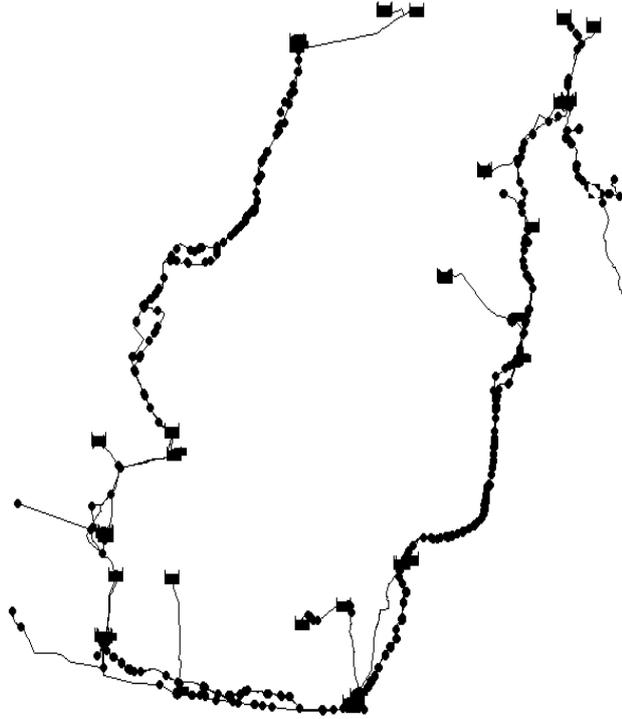


Figure III.2 : Modèle initial- chaîne Ouest.

Après des mois de modification du modèle afin de l'actualiser (localisation des sites, suppression des conduites non connectées, remplacement des bâches par des réservoirs de volume fini, ajouts de quelques réservoirs inexistants, correction des cotes, les volumes des réservoirs et les côtes des nœuds), nous avons obtenu le réseau correspondant à l'étage d'adduction ouest :

III.3.4 Demande aux nœuds

Une donnée très importante qu'on doit assigner à un nœud est la demande à ce nœud ou bien le débit sortant de ce nœud. En effet c'est une donnée qui influe fortement dans le calcul hydraulique du réseau.

Pour notre cas, la répartition de la consommation a été établie sur une feuille de calcul EXCEL pour chaque étage de la chaîne Ouest par le bureau d'étude SOGREAH pour différents horizons.

III.3.5 Les vannes de régulation

Les vannes de régulation sont des stabilisateurs de pression amont. Ce type de vannes garantit une pression amont constante quelque soient les conditions de demande. La modification de sa consigne se fait en fonction de la pression, du débit ou suivant un profil horaire.

Dans notre modèle et avec le logiciel *EPANET*, le type de vannes qui répond à celles utilisées sur le terrain est la vanne stabilisatrice amont.

Propriété	Valeur
*ID Vanne	45
*Noeud Amont	116
*Noeud Aval	137
Description	
Genre	
*Diamètre	200
*Type de Vanne	Stab. Amont
*Consigne	150
Coeff. Perte Charge	0
État Préréglé	En régulation
Débit	0,00
Vitesse	0,00
Perte de Charge	0,00
Qualité	0,00
État	Fermé

Figure III.4 : Editeur des caractéristiques d'une vanne.

III.3.6 Variation journalière de la consommation

Le logiciel *EPANET* nous permet de simuler le comportement du réseau sur une journée entière et qui variera selon les variations de consommation de la population.

Quand les mesures à la sortie de chaque château d'eau n'est pas disponible, on se réfère à une étude d'estimation des besoins en eau.

Dès lors, il est nécessaire de différencier les consommateurs qui ont un comportement différent.

➤ Catégories de consommations

Quatre catégories de consommation ont été définies suite à des études faites lors de l'élaboration du Schéma Directeur de l'Alimentation en Eau Potable (SDAEP) 2009 par SOGREAH pour l'établissement du modèle de consommations :

- Consommations industrielles (Gros Consommateurs GC).
- Consommations domestiques(DOM).
- Consommations commerciales(COM).
- Consommations administratives(ADM).

Les deux catégories, consommation administrative et commerciale, sont englobées dans une seule catégorie appelée : consommations diffuses (DIF).

La consommation domestique est évaluée à partir des dotations individuelles, fonction de la typo morphologie de l'habitat. Ces dotations ont été proposées dans l'étude de la demande en eau.

Cette étude s'est basée :

- d'une part sur une analyse urbaine fine à l'échelle des districts composant la zone d'étude ;

- d'autre part sur une étude bibliographique de la demande en eau d'une des grandes villes métropoles méditerranéennes (Marrakech), qui ressemble beaucoup à la ville d'Alger en termes de culture, climat, situation géographique, habitudes...etc.

III.3.7 Courbes de modulation

Les courbes de modulation sont les outils qui permettent au logiciel *EPANET* de calculer les variations journalières de débit sur l'ensemble du réseau. Associées à chaque catégorie de consommateurs, elles représentent l'évolution de la consommation de la catégorie considérée sur une journée.

C'est une courbe représentant un coefficient de consommation horaire (multiplicateur) en fonction du temps (sur une journée avec un intervalle d'un quart d'heure).

La consommation d'un nœud à une heure bien précise de la journée est donnée par le produit du multiplicateur à cette heure par la consommation moyenne à ce nœud.

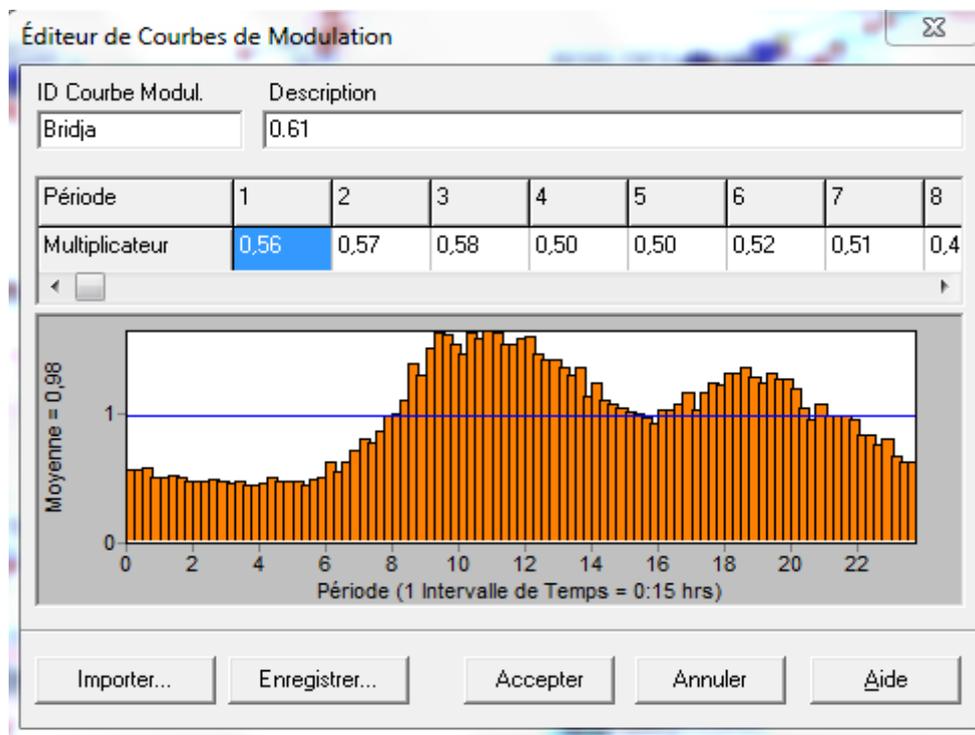


Figure III.5 : Courbe de modulation dans le modèle.

III.3.8 La régulation dans EPANET

Avec l'environnement de commandes d'EPANET, nous pouvons commander une vanne de régulation en lui attribuant des consignes dépendante du niveau des réservoirs, de la pression du nœud amont ou aval mais on peut également commander le fonctionnement d'une pompe en lui attribuant des consignes dépendantes des différents niveaux des réservoirs.

Il existe deux types de commandes : simple et élaborée.

- **Commande simple**

Les commandes simples changent l'état ou la consigne de fonctionnement d'un arc (vanne, tuyau, Pompe,...) en fonction des paramètres suivants:

- niveau d'eau dans un réservoir ;
- la pression à un nœud ;
- l'instant de la simulation ;
- l'heure de la journée.

Les commandes doivent être rédigées en suivant l'un de ces trois modèles

LINK IDarc état IF NODE ID noeud ABOVE/BELOW valeur

LINK IDarc état AT TIME temps

LINK IDarc état AT CLOCKTIME heure AM/PM

Dans lesquels :

- *IDArc* : étiquette d'identification d'un arc.
- *Etat* : OPEN ou CLOSED, la vitesse de rotation d'une pompe, la consigne de fonctionnement d'une vanne.
- *IDNoeud* : étiquette d'identification d'un nœud.
- *Valeur* : la pression d'un nœud ou le niveau d'un réservoir.
- *Temps* : le temps depuis le début du calcul, en heures ou en notation heures : minutes.
- *Heure* : l'heure de la journée en format américain (AM : jusqu'à midi, PM : de midi à minuit (midi et demi = 12 : 30PM, minuit et demi = 12 : 30 AM).

La figure suivante présente l'éditeur de quelques commandes avec les consignes appliquées au modèle.

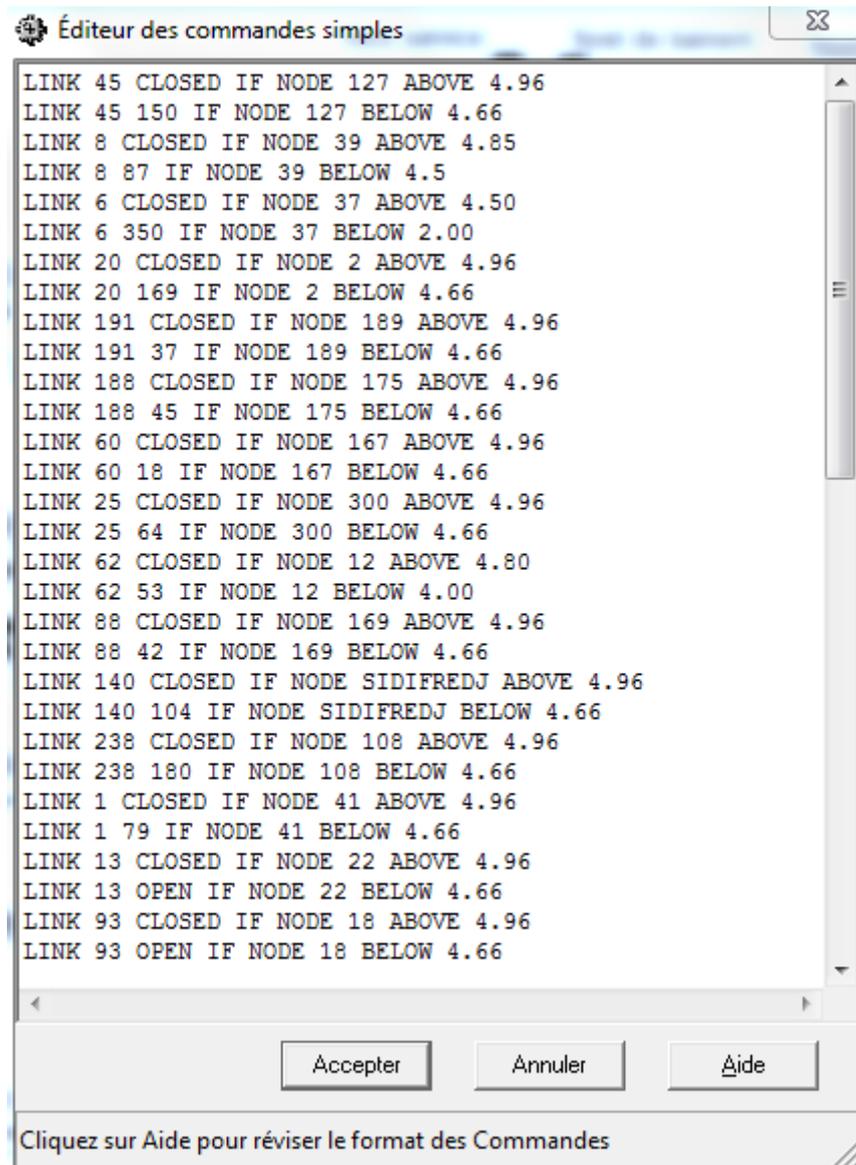


Figure III.6 : Editeur des commandes appliquées aux vannes de régulation.

- Commandes élaborées

Quand un état hydraulique particulier du système est atteint, les commandes élaborées permettent de déterminer l'état ou la consigne d'un arc basé sur une combinaison de conditions pour l'intervalle actuel.

Chaque commande élaborée est une série de déclarations de la forme suivante :

```
RULE IDCommande  
IF condition_1  
AND condition_2  
OR condition_3  
AND condition_4  
etc.  
THEN action_1  
AND action_2  
etc.  
ELSE action_3  
AND action_4  
etc.  
PRIORITY Priorité
```

Où:

- *IDCommande* : l'étiquette d'identification de la commande.
- *condition_n* : une clause conditionnelle.
- *action_n* : une clause d'action.
- *Priorité* : une valeur de priorité (par exemple, un nombre de 1 à 5).

○ **Remarques**

- Seulement les déclarations **RULE**, **IF** et **THEN** sont obligatoires; les autres sont optionnelles.
- La valeur qui suit **PRIORITY** s'utilise pour déterminer quelle commande s'applique, s'il y a deux commandes qui donnent des instructions contradictoires.
- Une commande sans valeur de priorité a toujours la priorité la plus basse. Si deux commandes ont la même valeur de priorités, la priorité est donnée à la commande qui figure la première dans la section.
- Il n'y a aucune limite au nombre de commandes pouvant être utilisées.

La figure suivante présente l'éditeur de quelques commandes élaborées appliquées aux différentes pompes :

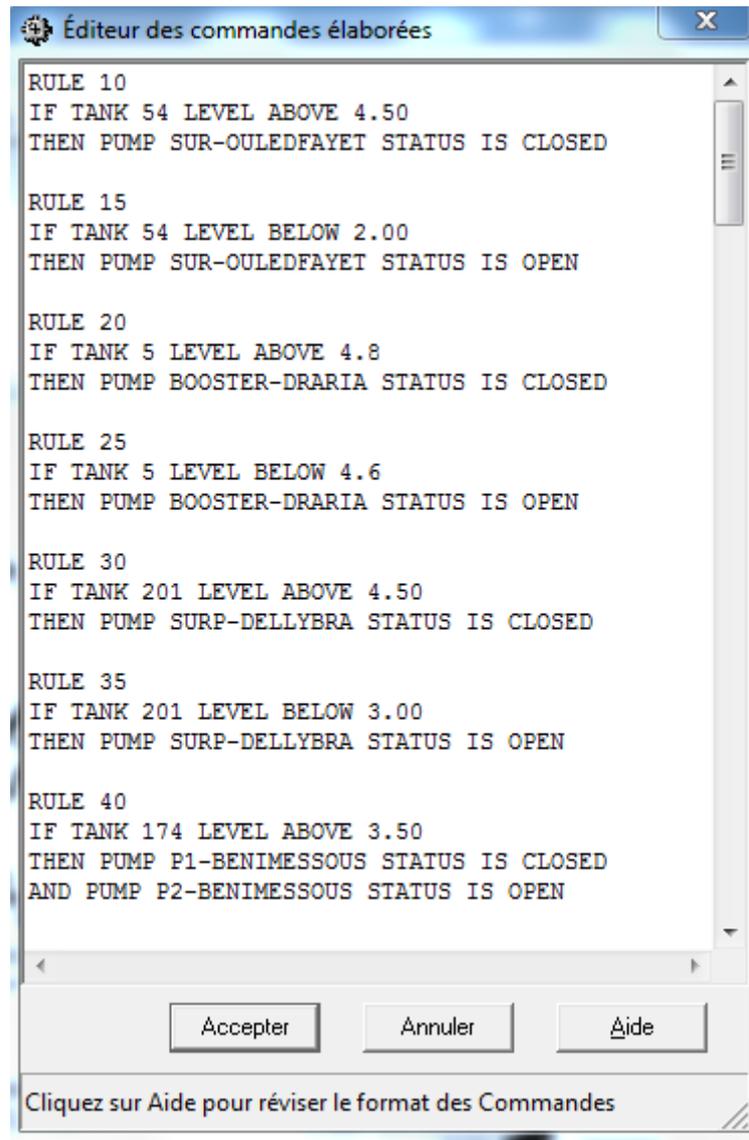


Figure III.7 : Editeur des commandes élaborées.

III.4 Calage du modèle

Le calage a pour objectif de rapprocher le comportement du modèle de celui du système réel. Il s'agit de rendre le modèle représentatif de la réalité. Pour cela, des mesures de débits ont été réalisées sur l'ensemble du réseau. À partir de ces mesures réalisées dans des situations données, des changements de quelques paramètres entre autre la rugosité, ont eu lieu.

III.5 Conclusion

L'élaboration du modèle hydraulique représentait une phase très fastidieuse, longue et importante dans notre étude, à la fin de ce chapitre, nous pouvons dire que le modèle construit est bon, plus au moins représentatif du réseau. Il peut être utilisé par la SEAAL comme un outil d'aide à la décision dans le futur proche.

Les objectifs du calage ont été atteints mais la nécessité des campagnes de mesures plus fines pour mieux identifier le réseau. Les résultats des différentes simulations sont présentés dans le dernier chapitre en but d'évaluer le gain apporté par la démarche d'optimisation.

Chapitre IV

Diagnostic des installations

IV.1 Introduction

Une campagne de mesure est nécessaire lors d'une démarche d'optimisation énergétique d'une station de pompage, afin de pouvoir approcher au mieux les conditions de fonctionnement du système.

IV.2 Essai de rendement

IV.2.1 Méthodes de mesures

Un essai de rendement peut être nécessaire pour vérifier l'état de fonctionnement d'une pompe.

Généralement cet essai consiste à mesurer les paramètres suivants :

- La pression totale à l'aspiration de la pompe.
- La pression totale au refoulement de la pompe.
- Le débit de la pompe.
- La puissance consommée par le moteur.

Ensuite, on calcule :

- La hauteur manométrique totale (différence entre la pression de refoulement et la pression à l'aspiration de la pompe).
- La puissance disponible à l'entrée de la pompe (enlever les pertes dans l'accouplement).

On rapporte les points de fonctionnement sur le graphique du fabricant ; la hauteur manométrique totale par rapport au débit.

S'il existe un écart considérable (plus de 20%) entre les valeurs obtenues et théorique, on doit en vérifier la cause. Une perte de performance peut être due à une perte des tolérances initiales de la pompe (augmentation du jeu roue-surface d'usure, usure de la

roue, défaut du joint d'étanchéité de la pompe) ou encore à un fonctionnement marginal compte tenu d'un NPSH insuffisant.

IV.2.2 Instruments et méthodes de mesures

La précision des mesures et des résultats obtenus dépendent des paramètres suivants :

- la précision, des limitations, de la calibration, de l'installation et de l'interprétation à donner des instruments,
- la formation de celui ou de celle qui les utilise,
- la stabilité du procédé (les ouvertures des vannes de régulation, les niveaux des réservoirs, les pressions de fonctionnement, les débits, la vitesse du moteur) devraient être maintenus constants pour la durée des tests.

❖ Mesure du débit par ultrasons

▪ Mesure du débit par différence de temps de transit

➤ Principe

Mesure de la différence du temps de propagation d'une impulsion ultrasonore se déplaçant dans le sens de l'écoulement, deux sondes A et B disposées sur un axe horizontal fournissent la vitesse moyenne intégrée sur la longueur du trajet acoustique.

➤ Limites du procédé

Absorption des ondes émises dans des eaux très chargées et lors de distances trop longues, remous et tourbillons faussent les mesures idem pour les dépôts (réduisent la section mouillée et "aveuglent" les sondes situées à proximité du radier).

➤ vitesses recommandées

- Minimum 0.3 m/s avec de fréquentes pointes > 0.6 m/s.

➤ Avantages

- pas d'obstacle à l'écoulement (pas de pertes de charges),
- utilisable pour des écoulements en charge et des conduites partiellement remplies (pour autant que l'on mesure la hauteur),

- utilisable lorsque l'écoulement aval n'est pas libre (avant une station de relevage par exemple),
- moyennant une diminution de la précision,

➤ **Précision**

- de l'ordre de 2 à 5 % dans des conditions idéales,
- peut facilement atteindre 10% dans la réalité, surtout dans le cas du capteur unique situé sur le radier,
- précision de la mesure de débit dépend de la vitesse et de la hauteur d'eau,
- précision sur le débit de 3 à 5 % dans les meilleurs des cas, peut atteindre 15 à 20% dans les moins bons cas.

▪ **Débitmètre à cordes**

➤ **Principe**

Mesure de vitesse par des paires de sondes à ultrasons disposées à différents niveaux de détermination de la vitesse moyenne (précision dépend de l'espacement entre les cordes) et mesure de la hauteur d'eau en parallèle.

❖ **Débitmètre électromagnétique**

➤ **Limites**

- Conçu pour des écoulements en charge (possible pour des conduites partiellement remplies, mais nécessite la détermination de la section mouillée : mesure de la hauteur ou parfaite connaissance du profil des vitesses).
- Dépôts faussent les mesures.

➤ **Conditions d'installation :**

- $V > 0.3$ à 0.5 m/s, idéal = 1 m/s,
- éviter les champs magnétiques ou électriques extérieurs (proximité de moteurs électriques, lignes haute tension, émetteurs d'ondes radio, ...),
- by-pass vivement recommandé pour l'entretien.

➤ **Avantages**

- idem que pour les mesures des débits par ultrasons,
- Précision de 1 % pour les conduites en charge (avec conditions idéales) et de 3 à 5 % pour les conduites partiellement remplies (avec conditions idéales).

➤ **Inconvénients**

- coût élevé.
- difficile à mettre en place sur une installation existante.

IV.2.3 Paramètres à mesurer

➤ **Débit**

La mesure du débit peut se faire par un débitmètre permanent si ce dernier est installé au refoulement de la pompe, dans le cas contraire on peut utiliser des débitmètres portatifs (ultrasoniques).



Figure IV.1 : Débitmètre ultrasonique.

Cependant, on peut constater des erreurs dû à :

- Un débitmètre défectueux ou mal calibré.
- Méconnaissance des limitations du débitmètre (taux de solides, viscosité, densité, diamètre de la tuyauterie, ...etc.).

A la sortie d'une pompe, on devrait toujours prévoir un manomètre placé en aval de la dernière singularité. Celui-ci devrait posséder un robinet d'isolement permettant d'enlever le manomètre pour le protéger des vibrations après utilisation.

Quelques erreurs que l'on retrouve assez souvent lors d'une mesure de pression :

- Un manomètre défectueux ou mal calibré (vibration et absence du robinet d'isolement).
- Oubli de corriger l'élévation du manomètre par rapport au centre de la pompe.

➤ **Puissance**

On devrait idéalement mesurer directement la puissance consommée par le moteur électrique en utilisant un wattmètre. Toutefois, en absence de toutes ces méthodes, une autre éventualité peut se présenter. Cette dernière consiste à relever directement l'énergie consommée par le groupe (pompe+moteur) du compteur électrique présent sur la station pour une durée déterminée.

IV.3 Campagne de mesures

Le nombre de stations de pompage existante dans le système à étudier et la durée de mon stage, on s'est trouvé dans l'impossibilité de généraliser notre campagne de mesures sur toutes ces stations, la seule station où on pouvait faire cette campagne sans trop perturber l'alimentation en eau potable de la chaîne était la station de pompage SP1.

IV.3.1 Description et présentation des installations

La station étudiée comporte deux compartiments :

- Station SP1-1500.
- Station SP1-630.

➤ **La station SP1-1500**

La station possède 3 pompes qui ont les caractéristiques suivantes :

$$Q=1500\text{m}^3/\text{h} \quad \text{Hmt}=220\text{m.}$$

La conduite d'aspiration de la station de DN 900, comporte un coude et une vanne papillon. La conduite de refoulement de DN 700 comporte un coude de 120° et un Y de l'anti béliet.

Pour chaque pompe, la conduite d'aspiration est de DN 600, après un convergent elle devient en DN 300. La conduite de refoulement de DN 500 comporte un clapet de type Clasar, une vanne papillon, un coude de 90° et un divergent.



Figure IV.2 : La station SP1-1500.

➤ **SP1-630**

La station possède 3 pompes qui ont les caractéristiques suivantes :

$$Q=630\text{m}^3/\text{h} \quad \text{Hmt}=210\text{m.}$$

Pour toute la station, la conduite d'aspiration de DN 600. La conduite de refoulement de DN 700, comporte un coude de 90° et un Y de l'anti bélier.

Pour chaque groupe la conduite d'aspiration de DN 400 comporte un coude de 90°, une vanne papillon, un convergent et un autre coude. La conduite de refoulement de DN300 comporte une un clapet et une vanne papillon.



Figure IV.3 : La station SP1-630.

IV.3.2 Identification des points de mesures

Pour le bon déroulement de notre campagne de mesures au sein de la station de pompage SP1, nous avons effectué une première visite afin de localiser les différents points de mesures des pressions et des débits ou de les créer au cas où ils n'existeraient pas.

Au cours de cette visite nous avons constaté qu'il n'y avait pas de problème pour les points de mesure de pression dans les deux stations, ils fallait juste démonter les manomètres existants dans la station et les remplacer par ceux fournis par l'équipe de métrologie par contre nous avons eu un problème quant à l'emplacement du débitmètre à ultrason sur la conduite de refoulement de la 630, cela est dû à l'inexistence d'un accès à la conduite de refoulement au sein même de la station, le seul accès était trop près de l'anti-bélier donc exposé à des perturbation et susceptible de fausser les mesures, donc on a du sortir en dehors de la station et parcourir quelque centaines de mètres pour trouver un petit tronçon en acier fraîchement renouvelé.



Figure IV.4 : Emplacement du point de mesure du débit SP1-630.

IV.3.3 Matériels utilisés

Lors de cette campagne, le matériel fourni par l'équipe de métrologie était performant, avec une précision élevée, pour le débit, on a utilisé le débitmètre à ultrason portatif, et pour les pressions des manomètres électroniques qui supportent plus de 20 bars de pression.

IV.3.4 Méthodologie suivi lors des essais

➤ La première campagne

Ne pouvant pas faire fonctionner les stations avec un seul groupe étant donné la forte consommation en période estivale, nous avons décidé de prendre les mesures pour le système global de chaque station tout en prenant des mesures de pression à l'amont de chaque groupe en fonctionnement et des mesures de débit à l'aval des installations pour une durée d'une heure (voir annexe 1).

Les résultats obtenus lors de ces premiers essais sont bons néanmoins ils sont peu précis. Ils nous fournissaient une idée générale sur l'état de fonctionnement de la station.

❖ Station SP1-1500

La mesure de débit a été effectuée par un débitmètre à ultrason loin de toute perturbation au refoulement de la station. La valeur obtenue était proche de celle mesurée par le débitmètre électromagnétique permanent installé à la station. Alors que la mesure des pressions a été mesurée à chaque point d'aspiration et de refoulement des pompes en fonctionnement mais aussi à l'amont et à l'aval de la station.

Les résultats obtenus lors de la cette campagne :

➤ Mesure électrique

index	0h	1h
0	6960480	6962873

Tableau IV.1 : Mesure électrique.

➤ Mesures hydrauliques

- Index hydraulique $I=3534,113 \text{ m}^3/\text{h}$

- Pression à l'amont de la pompe 1 : $P_{\text{amont}}=0,31$ bar
- Pression à l'aval de la pompe 1 : $P_{\text{aval}}= 19,39$ bar
- Pression au refoulement de la station : $P_{\text{ref}}=19,2$ bar.

❖ Station SP1-630

La même méthodologie a été suivie pour cette station que pour la SP1-1500. Les résultats obtenus sont dans l'annexe 1.

➤ La deuxième campagne de mesures

Dans cette série de mesures, on a eu la possibilité de mesurer les pressions et les débits pour chaque groupe et pour les différentes combinaisons.

Cette campagne n'a été effectuée que sur la station SP1-630 car ce jour là, la station de dessalement d'eau de mer d'El Hamma était à l'arrêt, donc on était dans l'impossibilité de faire fonctionner la station SP1-1500 pendant au minimum 1h30 avec un seul groupe. Pour ces mesures on a pris une durée de 15 min pour chaque essai (voir annexe 1).

Les résultats obtenus lors de ces deux campagnes de mesures ont été transcrits sur une feuille EXCEL afin de faciliter leur analyse.

IV.4 L'exploitation des données de la campagne de mesures

Les résultats obtenus dans cette première campagne de mesures ont été exploités afin de calculer toutes les variables nécessaires (la hauteur manométrique, la puissance fournie au groupe : pompe-moteur) pour le calcul du rendement du système par la feuille de calcul Excel développée par le bureau d'étude de la direction technique de la SEAAL.

Pour ce cas, on a calculé le rendement pour chaque pompe en supposant que les pompes étaient similaires c.-à-d. le débit total sera divisé par deux ainsi que la puissance consommée.

La feuille de calcul Excel a comme paramètres d'entrée :

- Le débit traversant la pompe.
- La pression à l'entrée de la pompe.

- La pression à la sortie de la pompe.
- La pression en aval de la dernière singularité dans le système.
- La pression en amont de toute singularité dans le système.
- L'énergie électrique consommée par le système.

En sortie, la feuille Excel calcule :

- Le rendement de la pompe.
- Le rendement de tout le système.

Le calcul du rendement de la pompe est basé sur les équations suivantes :

$$Hmt = Pavl - Pamont$$

Avec :

Hmt : la hauteur manométrique (m de colonne d'eau).

Pavl : la pression à la sortie de la pompe (m de colonne d'eau). .

Pamont : la pression à l'entrée de la pompe (m de colonne d'eau).

$$P = Q * g * Hmt * \rho$$

Avec :

P : puissance fournie au fluide par la pompe (Watt).

Hmt : la hauteur manométrique de la pompe (m de colonne d'eau).

\rho : la masse volumique du fluide (kg/m³).

Q : le débit traversant le système (l/s).

$$\eta = \frac{P}{E}$$

Avec :

\eta : le rendement de la pompe.

P : la puissance fournie au fluide kW.

E : la puissance consommée par la pompe kW.

La feuille Excel, calcule aussi les pertes d'énergie dues aux singularités (vanne, coude...etc.) qui seront utilisées dans le calcul du rendement global du système.

Le rendement des trois pompes existantes dans la station SP1-630 était aux alentours de 68%. Ce rendement est acceptable.

Pour la station SP1-1500 le rendement était de l'ordre de 74%.

La figure qui suit est un exemple de la feuille de calcul :

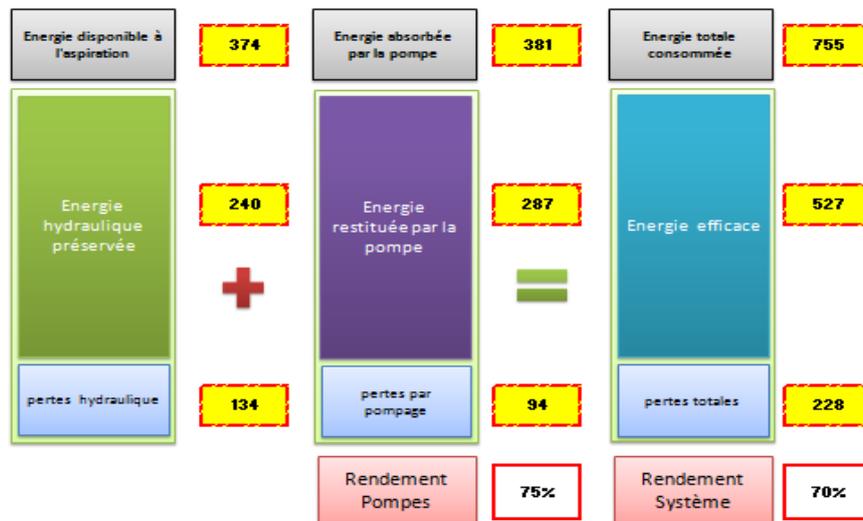
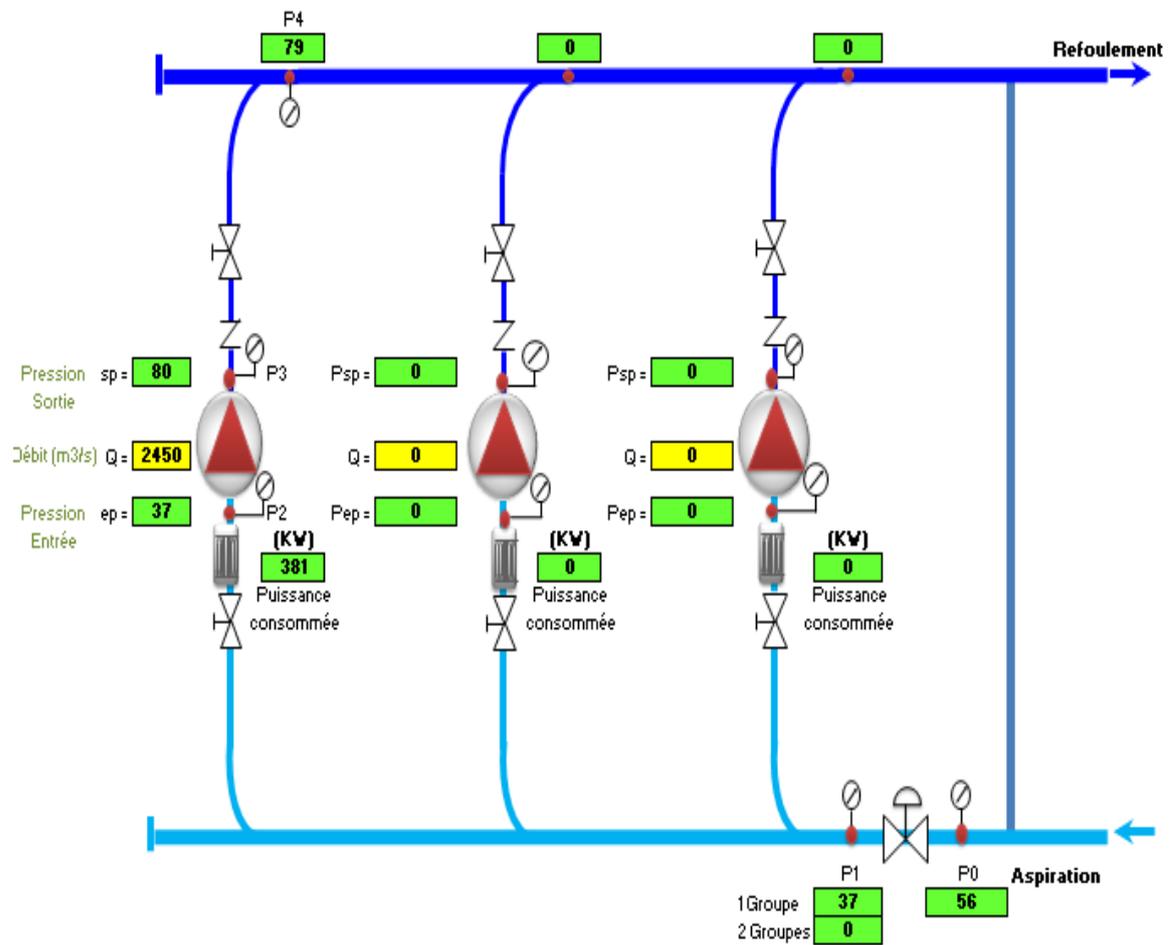


Figure IV.5 : Feuille Excel-calculation du rendement d'un système de pompage.

IV.5 D'autres essais qui peuvent être réalisés

D'autres essais existent et peuvent être réalisés pour la reconstruction de la courbe de pompe ou aussi pour la reconstruction de la courbe de rendement des pompes vu que les conditions de fonctionnement diffèrent de celles du constructeur donc ces courbes diffèrent aussi avec un écart acceptable. Les mesures de la hauteur manométrique doivent être prises pour différents débits pour établir la courbe (Q, HMT).

Afin de reconstruire la courbe de rendement, il nous faut un matériel qui peut calculer la puissance transmise à la pompe pas le moteur (couple mètre).

Ensuite le rendement de chaque cas (Q, HMT) doit être calculé pour reconstruire la courbe de rendement. Si on trouve un écart très important entre la courbe reconstruite et celle du constructeur, alors une étude doit être faite pour trouver les raisons de cet écart.

IV.6 Conclusion

Les campagnes de mesures sont très importants pour évaluer les performances du système, détecter les écarts importants et essayer de trouver des solutions pour les éliminer. Dans notre étude, on s'est intéressé aux essais de rendement (moteur+pompe) à un point de fonctionnement donné, vu le manque de moyens et de temps.

En perspective, d'autres essais peuvent être effectués pour améliorer la représentativité du modèle.

Chapitre V

Etude d'amélioration des coûts énergétiques

V.1 Introduction

L'optimisation des coûts énergétiques de pompes d'eau potable consiste à trouver des solutions pour réduire les coûts de fonctionnement annuels énergétiques et financiers de stations de pompage dont la consommation est importante. Pour cela, des mesures sur site sont nécessaires. La méthodologie mise en place à la SEAAL fait appel au logiciel EPANET, qui permet de simuler diverses possibilités d'optimisation.

L'optimisation se fait alors par la modification du mode de fonctionnement des trois plus grandes stations de pompage existante sur le réseau (SP3, MZI, MZII). Le gain apporté par les différents scénarii envisagés (modification des consignes d'arrêt/démarrage) est chiffré.

V.2 Aspect énergétique du logiciel EPANET

Les options d'énergie offrent des valeurs par défaut pour calculer l'énergie et le coût de fonctionnement des pompes. Les options sont les suivantes :

- Rendement des pompes (%) : le rendement des pompes par défaut.
- Prix de l'énergie : prix de l'énergie par kWh. Il n'y a pas de spécification de monnaie.
- Courbe modulation des prix : étiquette d'identification de la courbe de modulation décrivant la variation du prix de l'énergie pendant la journée. Laisser vide si la tarification n'est pas applicable.

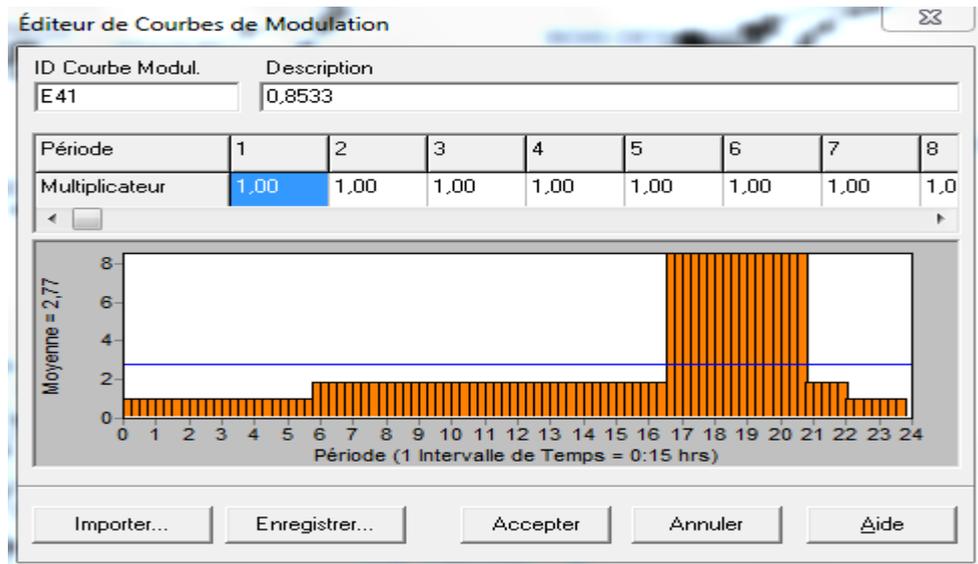


Figure V.1 : Courbe de modulation de tarif E41.

- Prix de la puissance maximale utilisée ; correspond au coût additionnel payé pour la puissance maximale utilisée par le réseau en kW. Ce paramètre n'a pas été modélisé car les puissances des installations avaient été précédemment optimisées par SEAAL.

V.2.1 Rapport d'énergie

EPANET peut afficher les statiques sur la consommation d'énergie de chaque pompe et le coût de cette consommation pour la durée de la simulation dans un rapport d'énergie (voir la figure V.2). Le rapport est constitué de deux rubriques ; la rubrique Tableau affiche sous forme de tableau la consommation d'énergie pour chaque pompe, à la fin du tableau le coût total. La rubrique histogramme qui permet de comparer les consommations sélectionnées dans la fenêtre à gauche (voir figure V.3).

Pompe	Pourcentage Utilisation	Rendement Moyen	kWh /m3	P. Moyenne kW	P. Maximale kW	Coût /jour
P3-SP3-630	2,08	75,00	0,52	162,64	163,09	69,39
P1-BABAHASSEN	62,77	75,00	0,07	20,01	23,15	868,01
P2-BABAHASSEN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2-STAND	24,58	75,00	0,38	162,57	163,17	1457,67
P3-STAND	24,58	75,00	0,38	92,59	92,81	830,12
P1-STAND	24,58	75,00	0,38	133,93	135,34	1201,01
P1-BENIMESSOUS	33,22	75,00	0,09	17,48	17,89	370,77
P2-BENIMESSOUS	100,00	75,00	0,09	17,47	17,89	1134,51
SURP-DELLYBRA	59,32	75,00	0,08	27,74	27,94	1136,53
P2-ROSTOMIA	63,37	75,00	0,44	291,90	292,68	12412,88
P3-ROSTOMIA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MZ-I	72,92	85,00	0,42	591,61	591,67	15436,39
MZ-II	72,92	70,00	0,61	1765,88	1766,03	46073,10
Coût Total						395032,80

Figure V.2 : Tableau de rapport d'énergie.

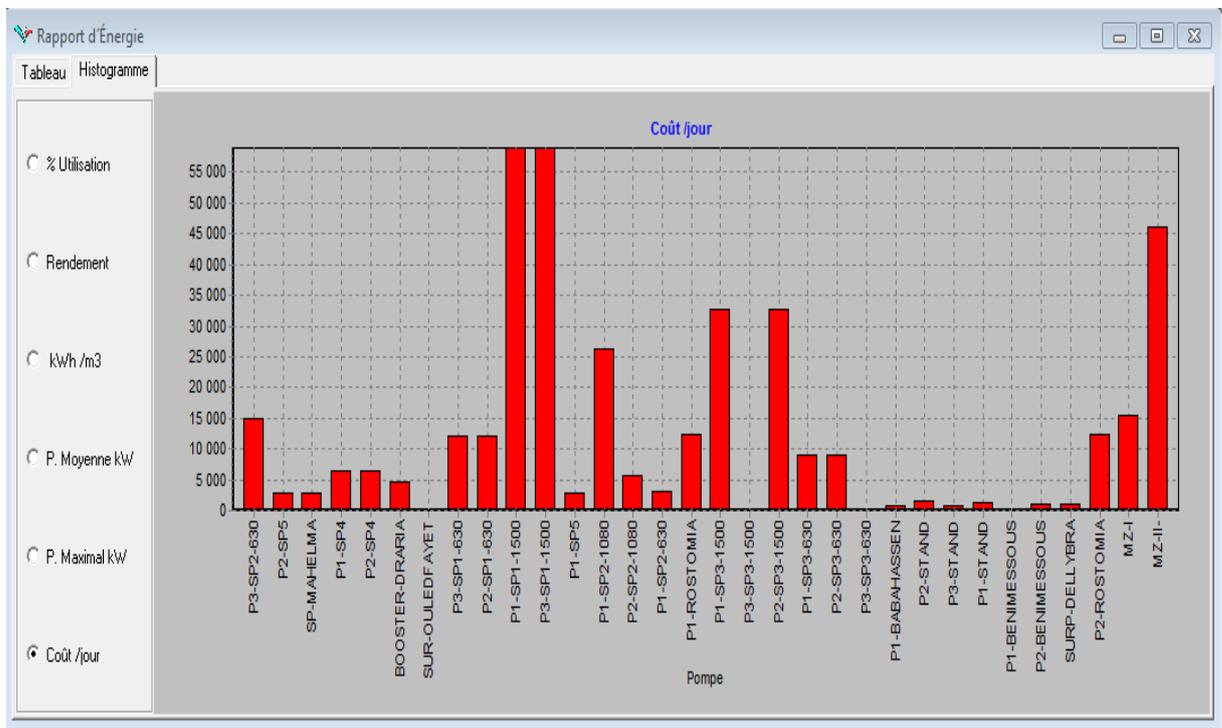


Figure V.3 : Histogramme de rapport d'énergie.

V.3 Intégration des données de performance dans le modèle

La première démarche à entreprendre pour l'amélioration du coût énergétique après la modélisation du réseau à étudier est d'intégrer les données de performance dans le

modèle (rendement des pompes), ce dernier est obtenu par des mesures in-situ (essais de pompage). Ces données de performance doivent être introduites dans le modèle afin qu'il soit représentatif du gain réel obtenu.

Durant ce stage, nous avons eu l'occasion de faire un seul essai de pompage sur une seule station « SP1 » (voir chapitre IV). Pour les autres stations, les données de performance ont été établies sur la base de mesures faites par les exploitants de chaque station. Il faut que ces mesures soient généralisées pour toutes les stations existantes dans le modèle afin de le corriger et d'approcher au mieux le fonctionnement réel du réseau.

Le logiciel EPANET a besoin de la courbe de rendement, de la courbe caractéristique (HMT, Q) de chaque pompe et de la tarification (prix maximal, courbe de modulation des tarifs) de chaque site afin de calculer le coût énergétique de tout le réseau en DA/jour.

Si on dispose d'un seul point de mesure de rendement, la courbe peut être construite de telle façon à ce qu'elle soit une courbe plate, cette alternative ne représente pas exactement la courbe de rendement réelle de la pompe mais elle estime le rendement de fonctionnement.



Figure V.4 : Courbe de rendement.

V.4 Simulation des variations de régulation du remplissage des réservoirs

Après avoir introduit les données de performance du réseau et la courbe de modulation des tarifs actuels, la simulation est lancée, si un problème se pose (réservoir vide, demande non satisfaite) un rapport d'état est affiché afin de spécifier de quel réservoir ou de quel nœud il s'agit. Si le rapport d'état ne s'affiche pas, c'est que la simulation a réussi. Un rapport d'énergie existe pour estimer le coût énergétique du scénario de base du fonctionnement du réseau, ce rapport affiche en détail, le temps de fonctionnement, le ratio kWh/m³, le rendement moyen, la puissance moyenne et le coût par jour de chaque pompe.

Avant d'essayer les différentes modifications pour l'optimisation des coûts énergétiques, il faut tout d'abord calculer le coût énergétique du scénario de base afin de pouvoir comparer les coûts de fonctionnement et les gains apportés par les deux scénarii présentés ci-dessous :

➤ Scénario 1 :

Il comporte plusieurs modification :

- Optimisation du fonctionnement des forages Mazafran I et Mazafran II.
- Optimisation du fonctionnement de la station de pompage SP3.
- Suppression de la bache d'aspiration 500 m³ à SP1-1500.
- L'ouverture de la conduite DN 700 déjà existante dans la chaîne des hauteurs.

➤ Scénario 2 :

- L'intégration de la station de dessalement d'eau de mer de FOUKA.

Scénario 1

➤ **Optimisation du fonctionnement des forages Mazafran I, Mazafran II et SP3**

Dans le modèle initial, ces sites étaient commandés par des consignes de fermeture ou d'arrêt des différentes pompes de chaque site par rapport au niveau du réservoir (bache d'aspiration SP3); quand le niveau dans le réservoir atteint un certain niveau max les

pompes s'arrêtent par contre si le niveau descend à un niveau bas (dans notre cas à 4, 3m) les pompes redémarrent.

Après avoir trouver les tarifs optimaux dans l'analyse tarifaire (chapitre III), cette analyse nous a permis de trouver un fonctionnement optimal des deux sites en appliquant la tarification heures pleines/ heures creuses parmi celles proposées par la SONELGAZ qui favorise la consommation hors pointe par des tarifs plus faible de 21h00 à 17h00. La stratégie d'économie consiste donc à arrêter le pompage pendant les heures de pointe (17h-21h00), tout en continuant à alimenter les réservoirs (bâche SP3-Sahel 190) dans de bonnes conditions c'est-à-dire sans risque de niveau bas dans les réservoirs.

Pour vérifier l'état des réservoirs après la simulation, une option « graphique » existe sur EPANET :

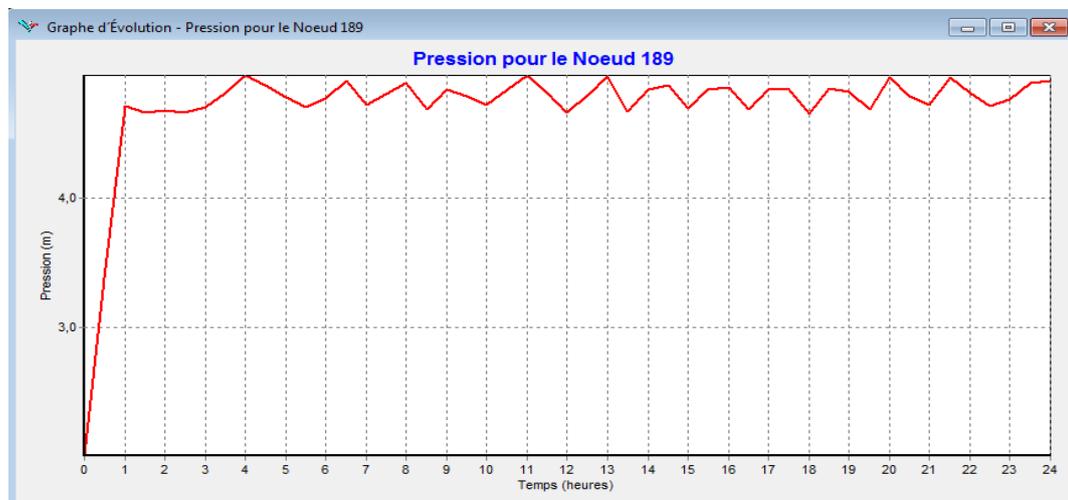


Figure V.5 : graphique de marnage d'un réservoir.

➤ **Suppression de la bâche 500 m³ à SP1-1500**

La suppression de la bâche d'aspiration à SP1 permet de gagner en charge en aspirant directement du réservoir SP3 puisque la cote de ce dernier est plus élevée tout en sachant que les pertes de charge dans les conduites d'aspiration sont négligeables (vu leurs diamètres, débits et longueurs). Ce scénario est modélisé en enlevant la bâche d'aspiration à SP1 et en la remplaçant par un nœud, tout en supprimant les commandes qui dépendent de son niveau.

➤ **L'ouverture de la conduite DN 700 déjà existante sur la chaîne des hauteurs**

La conduite déjà existante sur la chaîne des hauteurs, est à l'heure actuelle fermée, son ouverture permettra de réduire les pertes de charge linéaire dans la conduite, ce qui permet de faire une économie intéressante et cumulable avec les autres gains. L'ouverture de cette conduite est réalisée sur le modèle en ouvrant les by-pass entre cette conduite et la conduite de DN 900 qui est actuellement en service et en isolant la conduite DN600.

Scénario 2 :

➤ **L'intégration de la station de dessalement d'eau de mer de FOUKA**

Cette option, n'est pas considérée comme une ressource économique à l'échelle globale puisqu'elle fournit de l'eau de dessalement d'eau de mer qui représente la ressource la plus chère, mais elle est considérée comme une solution économique à l'échelle de la SEAAL puisqu'elle n'entre pas dans ses charges d'exploitation.

Dans ce scénario, on intègre 4200 m³/h d'eau de dessalement de FOUKA au réservoir Sahel 190, ce dernier aura un apport supplémentaire ce qui nous permettra de limiter le pompage au niveau de la station SP3, donc faire des économies d'énergie.

Le gain apporté à la SEAAL par cette démarche est considérable mais dans un futur proche, cette ressource sera plus utile là où il y a un manque d'eau.

V.5 Résultats de la simulation

V.5.1 Résultats hydrauliques

Avant de valider ces démarches, il faut tout d'abord vérifier le remplissage des réservoirs et les valeurs de débit passant par les différentes conduites. Chacun des trois scénarii est simulé séparément afin de pouvoir vérifier le fonctionnement hydraulique du réseau et de pouvoir estimer le coût total à chaque fois.

➤ **Scénario sans l'intégration de FOUKA**

Les réservoirs directement affectés par ces modifications sont les réservoirs (Sahel 190, réservoir d'aspiration SP3). Après le lancement de la simulation, il faut vérifier que ces deux réservoirs soient remplis avec un marnage très faible durant la période de pompage.

La baisse de niveau pendant l'arrêt des pompes n'entraîne pas l'atteinte d'un niveau bas critique. Ensuite tous les résultats obtenus sont englobés dans un tableau afin d'estimer le coût global de cette démarche d'optimisation.

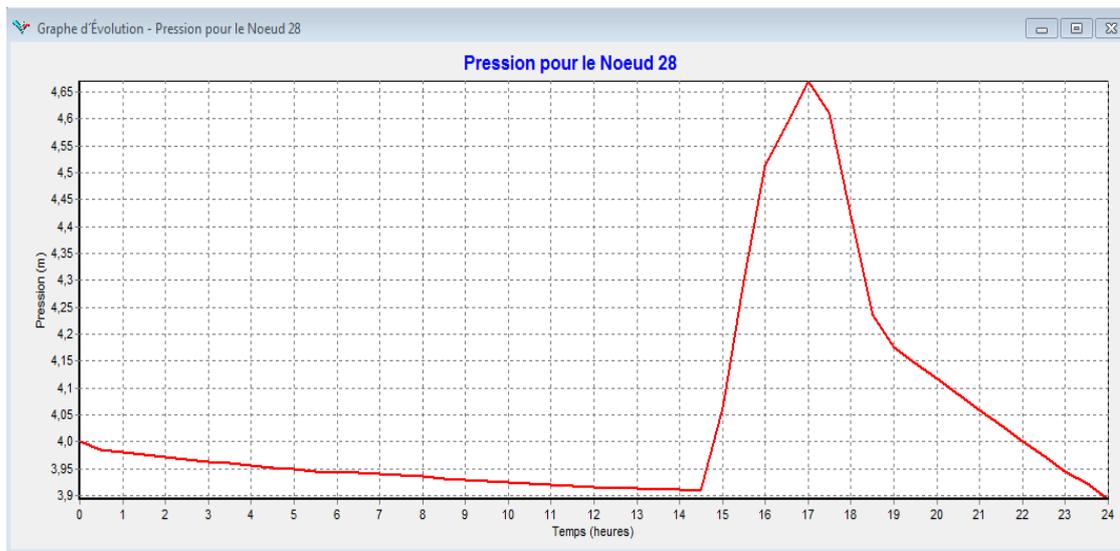


Figure V.4 : Variation du niveau d'eau dans le réservoir SP3.

Puisque le réservoir SP3 se trouve à l'aspiration, le niveau descend d'un mètre à peu près, pendant l'arrêt de pompage, cela est dû à l'aspiration des pompes sur SP1. Ce marnage est acceptable.

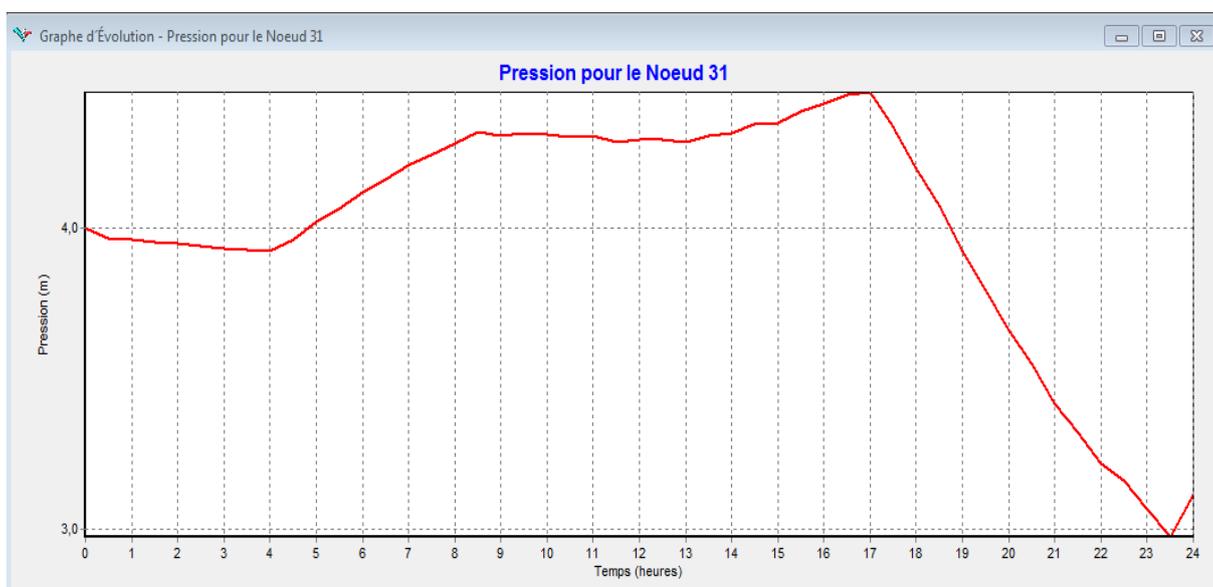


Figure V.5 : Variation du niveau d'eau dans le réservoir SAHEL 190.

Le réservoir SAHEL 190 se situe au refoulement de la station SP3, c'est pour cela que le niveau durant la période de pompage augmente sans pour autant déborder.

Pour les autres réservoirs du système, aucun rapport d'avertissement n'a été affiché après la simulation donc ces résultats montrent que cette démarche assure le bon fonctionnement hydraulique du système, donc cette solution d'optimisation peut être retenue.

➤ Scénario d'intégration de FOUKA

Ce scénario n'affecte pas le fonctionnement hydraulique du système, puisque c'est un apport en plus dans le réseau. Aucun réservoir n'est affecté.

V.5.2 Résultats énergétiques

Grâce à EPANET, pour un volume bien précis, on peut estimer le gain apporté par les différents scénarii présentés ci-dessus en DA/jour. Le gain obtenu change avec le volume pompé, donc cette donnée doit être prise en considération dans l'estimation du gain apporté.

Pour pouvoir estimer ce gain, il faut calculer le coût énergétique pour chaque m³ pompé, pour chaque station et pour les trois scénarii (intégration de FOUKA, avant et après optimisation) en DA/m³. Puisque EPANET ne calcule pas ce ratio, alors il doit être calculé en utilisant les variables calculées par EPANET (le ratio Wh/m³, la puissance moyenne, le pourcentage d'utilisation sur une heure et le coût du pompage sur une journée DA/j).

Les résultats obtenus pour chaque station sont illustrés dans le tableau suivant :

Station	cout avant optimisation	cout après optimisation	cout avec fouka	Gains optimisation sans Fouka(DA/m ³)	gains optimisation fouka(DA/m ³)
SP1-630	2,61	2,61	2,61	0,00	0,00
SP1-1500	1,66	1,45	1,66	0,21	0,00
SP2-630	1,21	0,85	1,22	0,36	0,00
SP2-1080	0,97	0,67	0,98	0,30	0,00
SP3-1500	1,32	1,20	0,41	0,12	0,91
SP3-630	1,40	1,28	0,43	0,12	0,98
SP4	1,07	1,20	1,07	-0,13	0,00

SP5	1,68	1,64	1,67	0,04	0,01
STAND	0,58	0,58	0,58	0,00	0,00
BENI MESSOUS	0,24	0,24	0,24	0,00	0,00
ROUSTOMIA	2,46	1,23	1,23	1,23	1,23
BABA HASSEN	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00
SP-MAHELMA	1,03	1,03	1,03	0,00	0,00
BOOSTER-DRARIA	0,60	0,60	0,60	0,00	0,00
SUR-OULEDFAYET	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00
SURP-DELLYBRA	0,23	0,23	0,23	0,00	0,00
MZ-I	1,03	0,63	0,80	0,40	0,23
MZ-II-	1,49	0,91	1,16	0,58	0,33

Tableau V.1 : tableau récapitulatif des gains réalisés par la démarche d'optimisation en DA/m³.

Le tableau suivant exprime les gains apportés par les différents scénarii sans FOUKA en DA/j :

station	GAINS PAR STATION (DA/m ³)	volume (m ³)	Gains en DA/j
SP1-630	0,001	9202	10
SP1-1500	0,000	81479	0
SP2-630	0,008	19214	159
SP2-1080	0,041	43090	1746
SP3-1500	0,121	54297	6579
SP3-630	0,121	14055	1695
SP4	0,000	10586	0
SP5	0,000	3334	0
STAND	0,000	6040	0
BENI MESSOUS	0,000	6207	0
ROUSTOMIA	0,001	20179	12
BABA HASSEN	0,003	4306	12
SP-MAHELMA	0,001	2872	3
BOOSTER-DRARIA	0,000	7562	1
SUR-OULEDFAYET	0,000	3228	0,8
SURP-DELLYBRA	0,000	4936	0
MZ-I	0,400	24651	9867
MZ-II	0,581	50662,81	29456

Tableau V.2 : les gains en DA/j pour chaque station.

Le gain total apporté par la démarche d'optimisation pour un volume de 200 000 m³/j est de 50000 DA/j, ce qui se traduit en 18 M DA/an.

L'introduction des eaux de dessalement de FOUKA, est un gain très important pour la SEAAL mais comme mentionner auparavant cette ressource est chère, donc globalement, elle ne constitue pas un véritable gain.

Ce gain est estimé à 213 000 DA/j, ce qui représente 76 M DA/an.

Tant que le fonctionnement des installations est sur 24h, l'économie d'énergie sera difficile à réaliser, mais dès que le programme d'économie d'eau (réduction des fuites, estimé à 30%) sera appliqué, le gain sera plus important en utilisant cette eau durant les heures de pointes.

V.6 Retour sur investissement

L'investissement dans ces différents scénarii est quasiment inexistant à part le cas de la suppression de la bêche d'aspiration SP1 où on doit investir pour le By-pass de la bêche, et probablement aussi un anti bélier à l'aspiration.

V.7 Recommandations

Tout ces scénarii, apporte des gains immédiats sans aucun investissement, en jouant sur les différentes tarifications et le fonctionnement heures de pointe/ heures creuse. D'autres démarches d'optimisation peuvent être réalisées dans un futur proche pour réaliser des gains à moyen et long terme. Ces démarches peuvent concerner les pompes en elle-même en revoyant les conditions de fonctionnement du système et leur fonctionnement dans ces dernières.

Ces solutions restent théoriques et leur réalisation sur terrain reste à vérifier puisqu'ils dépendent des performances des pompes car les limites des pompes et leurs performances en cas de modification du fonctionnement hydraulique du réseau doivent être connues.

Conclusion générale

L'étude d'optimisation du système de pompage de l'étage Ouest du réseau d'adduction d'Alger a permis de réduire de manière intéressante les coûts de fonctionnement énergétique de cet étage, et ainsi de faire des économies en kWh et en Dinar Algérien. Il a fallu pour cela mettre en place des stratégies de modification sur les pompes principales, tout en évaluant le risque potentiel apporté par de tels changements.

Pour mener à bien notre travail, il a été nécessaire de bien comprendre les principes de base de la modélisation sur EPANET (les vannes de régulation, les commandes simples et élaborées), il fallait aussi passer par la collecte des données nécessaires pour la modélisation. Cette étape était ardue, vu la complexité du réseau, mais elle était plus que nécessaire afin de cerner l'impact des différents scénarii sur le bon fonctionnement du réseau.

Le modèle que nous avons élaboré peut servir comme un outil d'aide à la décision, au diagnostic et à la prévision du comportement du réseau.

Pendant mes sorties sur terrain, j'ai pu confronter ma vision théorique des stations telle que je la concevais au bureau à partir des données de la SEAAL avec la réalité pratique du terrain et ses contraintes.

Le facteur limitant de notre étude a été incontestablement la contrainte temporelle ne permettant pas d'étendre des campagnes de mesures sur l'ensemble des stations existantes dans le réseau.

A l'issue de cette étude et à l'aide des simulations obtenues sur EPANET, nous avons pu estimer les gains immédiats apportés pour chaque station en DA/m³ et un gain global en DA/j. Cependant, un suivi devra être mis en place sur ces différents sites pour s'assurer que les modifications sont effectives, et que les gains sont réels.

Cette étude est donc en bonne voie mais reste à affiner, la méthodologie en place est efficace et ne demande qu'à être étendue dans d'autres zones et sur d'autres domaines pour que les efforts de réduction se fassent ressentir.

Référence bibliographique

DOCUMENT TECHNIQUE SEAAL. 2010. Actualisation du schéma directeur d'alimentation en eau potable de la wilaya d'Alger, mai 2009.

GUILSOU, S. 2007. « *Modélisation sur le logiciel EPANET du réseau d'eau potable de la commune d'URRUGNE* ». Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de STRASBOUR, 2007.

LES STATIONS DE POMPAGE D'EAU. « *Les stations de pompage d'eau* ». 5^{ème} édition, TEC & DOC éditions.

ROSSMA.,L.A, 2003. « *EPANET 2-Manuel d'utilisateur* ».

SABLE, S. 2010. « *Optimisation des coûts énergétiques de pompages d'eau potable* ». Projet de fin d'étude, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de STRASBOURG, 2010.

SEBBAGH, K. 2011. «Elaboration d'un modèle de prévision des pertes physique par la modulation de pression». Université des sciences et des technologies HOUARI BOUMEDIENNE, 2011.

SYSTEMES DE POMPAGE, H Q, 1993. «*Les économies d'énergie électrique dans les systèmes de pompage* ». Guide technique, Hydro Québec, 1993.

1.1 Première campagne de mesure

Dans cette campagne, les mesures ont été prises pour les deux groupes en marche, pendant 1h de temps.

1.1.1 Station SP1-1500

❖ Mesure électrique

0h	1h
6960480	6962873

❖ Mesures hydrauliques

- Index hydraulique $I=3534,113 \text{ m}^3/\text{h}$
- Pression à l'amont de la pompe : $P_{\text{amont}}=0,31 \text{ bar}$
- Pression à l'aval de la pompe : $P_{\text{aval}}= 19,39 \text{ bar}$
- Pression au refoulement de la station : $P_{\text{ref}}=19,2 \text{ bar}$.

1.1.2 SP1-630

❖ Mesures électriques

0h	1h
6208240	6209039

❖ Mesures hydrauliques

- Index hydraulique $I=1119 \text{ m}^3/\text{h}$
- $P_{\text{aspiration}}= 0,2 \text{ bar}$
- $P_{\text{amont pompe}} = 0,1 \text{ bar}$
- $P_{\text{aval pompe}}=19,8 \text{ bar}$
- $P_{\text{refoulement}}= 20,1 \text{ bar}$

1.1 Deuxième campagne de mesure

Pour cette campagne les mesures ont été prises pour une durée de 15min pour chaque pompe, ensuite 15 min pour chaque combinaison :

Groupe 1 :

❖ Mesure électrique :

0 min	15min
6297634	6297744

❖ Mesures hydraulique

- $P_{\text{aspiration}} = 0,26 \text{ bar}$
- $P_{\text{amont pompe}} = 0,1 \text{ bar}$
- $P_{\text{aval pompe}} = 19,1 \text{ bar}$
- $P_{\text{refoulement}} = 19 \text{ bar}$
- $Q = 625 \text{ m}^3 / \text{h}$

Groupe 2 :

❖ Mesure électrique

0 min	15min
6297744	6297859

❖ Mesures hydraulique

- $P_{\text{aspiration}} = 0,23 \text{ bar}$
- $P_{\text{amont pompe}} = 0,09 \text{ bar}$
- $P_{\text{aval pompe}} = 19,1 \text{ bar}$
- $P_{\text{refoulement}} = 19,1 \text{ bar}$
- $Q = 607 \text{ m}^3 / \text{h}$

Groupe 3 :

❖ Mesure électrique

0 min	15min
6297859	6297984

❖ mesures hydraulique

- $P_{\text{aspiration}} = 0,24 \text{ bar}$
- $P_{\text{amont pompe}} = 0,08 \text{ bar}$
- $P_{\text{aval pompe}} = 19,1 \text{ bar}$
- $P_{\text{refoulement}} = 19,1 \text{ bar}$
- $Q = 610 \text{ m}^3 / \text{h}$

Combinaison : groupe1+groupe2

❖ Consommation énergétique :

0 min	15 min
6297984	6298223

❖ Mesures hydrauliques :

- $P_{\text{aspiration}} = 0,21 \text{ bar}$
- $P_{\text{refoulement}} = 20 \text{ bar}$
- $Q = 1156 \text{ m}^3 / \text{h}$

Combinaison : groupe3+groupe2

❖ Consommation énergétique :

0min	15 min
6298223	6298456

❖ Mesures hydrauliques :

- $P_{\text{aspiration}} = 0,20 \text{ bar}$
- $P_{\text{refoulement}} = 19,9 \text{ bar}$
- $Q = 1157 \text{ m}^3 / \text{h}$

Combinaison : groupe3+groupe1

❖ Consommation électrique :

0 min	15 min
6298456	6298639

❖ Mesures hydrauliques :

- $P_{\text{aspiration}} = 0,20 \text{ bar}$
- $P_{\text{refoulement}} = 19,9 \text{ bar}$
- $Q = 1183 \text{ m}^3 / \text{h}$