



N° d'ordre : M2...../GM/2024

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

**Filière :** Génie mécanique

**Spécialité :** Energétique

### Thème

**Etude énergétique d'un système de fonctionnement par  
pompage-turbinage d'une centrale hydroélectrique locale**

Présenté par

1-MORALENT Abdelhak

2-ZAOUI Omar

Soutenu le 25/06/ 2024 devant le jury composé de :

Président	Dr MEDJAHED Bendida	MCA	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr FLITTI Abdelmadjid	MCB	Université de Mostaganem UMAB
Encadrant	Dr GUERMAT Abdelkader	MCB	Université de Mostaganem UMAB

**Année universitaire 2023 / 2024**

## Dédicaces

Je dédie ce travail, à mes parents qui m'ont orienté et soutenu  
dans les choix difficiles.

A mon binôme et toute sa famille.

A tous mes amis.

Charef, mohamed, abderrahmane, hakim.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à  
l'aboutissement de ce mémoire.

Je le dédie aussi à tous ceux qui le liront, et j'espère qu'ils  
trouveront dans son contenu des réponses à leurs questions.

ABDELHAK....

## **Dédicaces**

Je dédie ce travail, à mes parents qui m'ont orienté et soutenu  
dans les choix difficiles.

A mon binôme et toute sa famille.

A tous mes amis.

Abdel Wahab, mohamed, ammour, habib, kamel.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à  
l'aboutissement de ce mémoire.

Je le dédie aussi à tous ceux qui le liront, et j'espère qu'ils  
trouveront dans son contenu des réponses à leurs questions.

OMAR...

# Remerciements

Nous remercions Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de nous avoir appris ce que nous ignorions, de nous avoir donné la santé et tout ce dont nous avons besoin pour réaliser le travail imposé et rédiger ce mémoire.

Nous remercions très vivement mon encadreur : Monsieur Dr. Guermat Abdelkader, de nous avoir fait profiter de ces grandes compétences et ces conseils judicieux, de nous avoir proposé le sujet de cette thèse, et nous avoir dirigé avec efficacité et patience.

Nos remerciements vont de même aux autres membres de jury examinateurs qui nous ont fait l'honneur de participer au jury pour pouvoir évaluer ce mémoire.

Il s'agit, en l'occurrence de :

Dr MEDJAHED BENDIDA

Dr FLITTI ABDELMADJID

Nos remerciements vont de même aux ingénieurs de la direction d'hydraulique et du service d'algérienne des eaux de Mostaganem.

Nos vifs remerciements à tous nos enseignants du primaire à l'université.

Nous exprimons aussi notre gratitude à nos collègues de promotion de master merci à toutes les personnes que nous n'avons pas citées et qui ont de près ou de loin participé à la réalisation de ce travail. Merci pour leur sympathie et simplement pour le plaisir que nous avons eu à les côtoyer quotidiennement.

Nous voudrions remercier tout particulièrement nos parents ainsi que tous les membres de nos familles de leur soutien et leurs encouragements tout au long de notre étude.

# Liste des figures

## Chapitre I : GENERALITES SUR LES CENTRALES HYDRO-ELECTRIQUES.

<b>Figure I.1</b> : Principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques.....	-3-
<b>Figure I.2</b> : Centrale au fil de l'eau ou de basse chute.....	-4-
<b>Figure I.3</b> : Centrale de moyenne et haute chute.....	-5-
<b>Figure I.4</b> : Schéma de principe d'un barrage de haute chute.....	-6-
<b>Figure I.5</b> : Principe de fonctionnement d'une centrale STEP.....	-7-

## Chapitre II : Description et calcul du système de pompage turbinage

<b>Figure II.1</b> : Schéma d'illustration du principe de fonctionnement du pompage turbinage.-	12-
<b>Figure II.2</b> : Différentes architectures de groupes de pompage –turbinage.....	-13-
<b>Figure II.3</b> : Mode Turbinage.....	-13-
<b>Figure II.4</b> : Mode Pompage.....	-15-
<b>Figure II.5</b> : Zones d'application des différentes turbines.....	-26-

## Chapitre III: Etude technique et énergétique d'un système de pompage-turbinage dans la localité de Mostaganem

<b>Figure III. 1 :</b> Schéma reliant la source et la station de traitement MAO.....	-29-
<b>Figure III.2 :</b> Schéma d'acheminement de l'eau.....	-30-
<b>Figure III.3 :</b> plan de distribution d'eau potable au centre de Mostaganem.....	-33-
<b>Figure. III.4 :</b> Station pompage-turbinage.....	-39-
<b>Figure III.5 :</b> Turbine Cross flow.....	-44-
<b>Figure III.6 :</b> Station dessalement de Mostaganem.....	-46-
<b>Figure III.7 :</b> Endroit du bassin supérieur.....	-47-
<b>Figure III.8 :</b> Nouveau système pompage-turbinage.....	-47-
<b>Figure III.9 :</b> Schéma représentatif de la turbine Pelton.....	-52-
<b>Figure III.10 :</b> Turbine Francis.....	-53-

# Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Classification des centrales d'après leur puissance.....	-7-
<b>Tableau II.1</b> : Types des turbines hydrauliques.....	-26-
<b>Tableau III.1</b> : Les étages de distribution de Mostaganem.....	-32-
<b>Tableau III.2</b> : Les résultats d'installation existante.....	-44-
<b>Tableau III.3</b> : Les résultats d'une nouvelle installation.....	-53-



## Liste des abréviations et des symboles

Abréviation ou Symbole	Unité	Désignation
AEP		Alimentation en Eau Potable
D	m	Diamètre de la conduite
$E_p$	kWh	Énergie consommée par la pompe
$E_t$	kWh	Énergie produite par la turbine
$E_{t_{unitaire}}$	kWh	Energie de turbinage obtenue pour un (1) $m^3$
g	$m/s^2$	accélération de la pesanteur
$h_p$	h	d'heures de pompage
$h_t$	h	d'heures de turbinage
$H_m$	m	Hauteur manométrique
$H_p$	m	Hauteur brut de la pompe
$H_t$	m	Hauteur brut de la turbine
$k_i$		Coefficient de pertes de charge
L	m	longueur du tronçon
M	kg	Masse de l'eau

$P_{Mec,p}$	kW	La puissance Mécanique de la pompe
$P_{Mec,t}$	kW	La puissance Mécanique de la turbine
$P_p$	kW	La puissance de pompage
$P_t$	kW	La puissance de turbinage
$Q_v$	$m^3/s$	Le débit
$Q_{vp}$	$m^3/s$	Débit de pompage
$Q_{vt}$	$m^3/s$	Débit de turbinage
Re		Nombre de Reynolds
s	$m^2$	La section
$t_p$	h	Temps de pompage
$t_t$	h	Temps de turbinage
$v_A$	m/s	La vitesse au de l'écoulement point A
$v_B$	m/s	La vitesse au de l'écoulement point B
$Z_A$	m	L'altitude du point A
$Z_B$	m	L'altitude du point B
$\eta_{sys\_p-t}$	%	Rendement de cycle pompage-turbinage
$\nu$	$m^2/s$	viscosité cinématique
$\Delta H$	m	Les pertes de charge
$\lambda$		Coefficient de pertes de charge

# Résumé

Le projet se concentre sur le stockage et l'utilisation de l'énergie hydroélectrique à Mostaganem, la description de l'installation d'un système de pompage-turbinage qui peut être utilisé dans une centrale hydroélectrique localement en vue d'assister une centrale thermique notamment dans les périodes de perturbation de consommation électrique et l'analyse de ses limites énergétiques et/ou non sa faisabilité dans la région de Mostaganem.

A travers ce projet, nous avons montré que la ville de Mostaganem possède des potentialités non négligeables en matière d'installation d'une centrale hydroélectrique travaillant par système de pompage-turbinage que ce soit en exploitant le réseau d'AEP existant ou par l'implantation d'une nouvelle centrale liée à la station de dessalement de la ville.

En appliquant les lois de l'hydraulique et de la MDF ainsi que celles relatives au calcul des performances énergétiques des pompes et turbines hydrauliques, les résultats obtenus ont montré qu'à peu près un dixième (1/10) du besoin de l'énergie électrique de la ville de Mostaganem peut être assuré par l'introduction du système de pompage-turbinage dans le réseau existant d'AEP et qu'à peu près 90% du besoin de l'énergie électrique de la ville peut être obtenu en construisant une nouvelle installation travaillant par pompage-turbinage dans le Mont d'El-Hchem relié à la station de dessalement. Cette énergie électrique obtenue par notre système peut couvrir une période pouvant aller jusqu'à 5h par jour en été et plus de 5h par jour en hiver.

La conclusion de ce travail est que ce projet est très faisable dans la ville de Mostaganem et celles ayant les mêmes caractéristiques géographiques et peut ainsi contribuer à l'amélioration de l'alimentation en électricité sans oublier l'impact écologique positif de ce système.

**Mots clés :** Centrale hydroélectrique, Stockage d'énergie, Pompage-turbinage, Energie renouvelable.

## ملخص

يركز المشروع على تخزين واستخدام الطاقة الكهرومائية في مستغانم، ويصف تركيب نظام تخزين بالضخ يمكن استخدامه في محطة للطاقة الكهرومائية محليا بهدف دعم محطة للطاقة الحرارية خاصة في فترات انقطاع استهلاك الكهرباء و تحليل حدود الطاقة أو عدم جدواها في منطقة مستغانم.

أظهرنا من خلال هذا المشروع أن مدينة مستغانم تتمتع بإمكانيات كبيرة من حيث تركيب محطة للطاقة الكهرومائية الموجودة أو بإنشاء محطة AEP القائمة او عن طريق انشاء محطة كهربائية جديدة مرتبطة بمحطة تحلية المياه بالمدينة بحساب أداء الطاقة للمضخات الهيدروليكية والتوربينات، أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن ما يقرب من عُشر (10/1) احتياجات الطاقة من إمدادات الكهرباء لمدينة مستغانم يمكن ضمان ذلك من خلال إدخال نظام التخزين بالضخ في الحالية ويمكن الحصول على ما يقرب من 90% من احتياجات المدينة من الطاقة الكهربائية من خلال بناء منشأة AEP شبكة جديدة تعمل عن طريق تخزين الضخ في جبل الحشم المتصل بمحطة تحلية المياه. يمكن لهذه الطاقة الكهربائية التي يحصل عليها نظامنا أن تغطي فترة تصل إلى 5 ساعات يوميًا في الصيف وأكثر من 5 ساعات يوميًا في الشتاء و خلاصة هذا العمل هي أن هذا المشروع مجدي للغاية في مدينة مستغانم وتلك التي لها نفس الخصائص الجغرافية وبالتالي يمكن أن يساهم في تحسين إمدادات الكهرباء دون إغفال الأثر البيئي الإيجابي لهذا النظام.

**كلمات مفتاحية:** محطة توليد الطاقة الكهرومائية، تخزين الطاقة، نظام الضخ والتوربين، الطاقة المتجددة.

## Abstract :

The project focuses on the storage and use of hydroelectric energy in Mostaganem, describing the installation of a pumped-storage system that can be used in a hydroelectric plant locally to support a thermal power plant, especially during periods of electrical consumption disruption. It also analyzes its energy limits and/or feasibility in the Mostaganem region.

Through this project, we have demonstrated that Mostaganem has considerable potential for installing a pumped-storage hydroelectric plant, either by utilizing the existing electricity network or by establishing a new plant linked to the city's desalination station.

By applying the laws of hydraulics and the fluid mechanics, as well as those related to calculating the energy performance of pumps and hydraulic turbines, the results have shown that approximately one-tenth ( $1/10$ ) of Mostaganem's electrical energy needs can be met by introducing pumped-storage systems into the existing electricity network. Moreover, about 90% of the city's electricity demand can be fulfilled by constructing a new pumped-storage installation in the Mont of El-Hchem, connected to the desalination station. This electrical energy generated by our system can cover periods of up to 5 hours per day in summer and more than 5 hours per day in winter.

In conclusion, this study demonstrates that this project is highly feasible in Mostaganem and in cities with similar geographical characteristics. It can significantly improve electricity supply and has a positive ecological impact.

**Keywords:** hydroelectric power plant, energy storage, pumped-storage, renewable energy.

# Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements .....	iii
Liste des figures .....	v
Liste des tableaux .....	vii
Liste des abréviations .....	viii
Résumé .....	1
Introduction Générale.....	- 1 -
<b>Chapitre I : GENERALITES SUR LES CENTRALES HYDRO-ELECTRIQUES.....</b>	<b>3</b>
-	
I.1 Introduction.....	-3-
I.2 Définition et Principe de fonctionnement.....	-3-
I.3 Différents types de centrales.....	-4-
I.3.1 Centrale au fil de l'eau.....	-4-
I.3.2 Centrale dites d'éclusées.....	-5-
I.3.3 Centrale de lacs (barrages de haute chute) .....	-5-
I.3.4 centrale STEP.....	-6-
I.4 Taille des centrales.....	-7-
I.5 Les équipements électromécaniques.....	-7-
I.5.1 Pompes.....	-8-
I.5.2 Alternateur.....	-8-

I.5.3	Transformateur.....	-8-
I.5.4	Turbine.....	-9-
I.6	Avantages et inconvénients des centrales hydroélectriques.....	-9-
I.7	Conclusion.....	-10-
<b>Chapitre II : Description et calcul du système de pompage turbinage.....</b>		<b>-11-</b>
II.1	Introduction.....	-11-
II.2	Définition et principe de fonctionnement.....	-11-
II.3	Caractéristiques et composants d'un système de pompage-turbinage.....	-12-
II.3.1	Différents groupes de pompage-turbinage.....	-12-
II.3.1.1	Les groupes ternaires.....	-12-
II.3.1.2	Les groupes réversibles.....	-12-
II.3.1.3	Les groupe isogyres .....	-13-
II.3.2	Modélisation du groupe pompe- turbine – conversion hydraulique-mécanique.....	-13-
II.3.3	Modes de fonctionnement.....	-13-
II.3.3.1	Mode Turbinage.....	-13-
II.3.3.2	Mode Pompage.....	-15-
II.4	Eléments de calcul théorique.....	-17-
II.4.1	Calcul des pertes de charge .....	-17-
II.4.2	Paramètres principaux des turbomachines .....	-19-
II.4.2.1	Débit.....	-19-
II.4.2.2	Hauteur manométrique .....	-20-
II.4.2.3	Estimation des puissances.....	-20-

II.4.2.4 Débit de pompage et de turbinage .....	-20-
II.4.2.5 Puissance d'une centrale et sa production énergétique.....	-22-
II.4.2.6 Quantité d'énergie E (en kWh).....	-24-
II.4.3 Critère de fonctionnement normal du système de pompage-turbinage.....	-25-
II.4.4 Rendement du cycle pompage-turbinage.....	-25-
II.4.5 Choix de la turbine.....	-25-
II.5 Avantages et inconvénients du système pompage-turbinage.....	-27-
II.6 Conclusion.....	-27-
<b>Chapitre III : Etude technique et énergétique d'un système de pompage-turbinage dans la localité de Mostaganem.....</b>	<b>-28-</b>
III.1 Introduction.....	-28-
III.2 Description du système d'AEP de la wilaya .....	-28-
III.3 Caractéristiques et règles générales d'une STEP.....	-39-
III.4. Déroutement du projet.....	-40-
III.4.1. Solution 1 (installation existante).....	-41-
III.4.1.1. Données de départ.....	-41-
III.4.1.2. Détermination des temps de pompage et turbinage.....	-42-
III.4.1.3. Calcul énergétique .....	-43-
III.4.1.3.1. Phase de pompage.....	-43-
III.4.1.3.2. Phase de turbinage.....	-42-
III.4.1.4. Estimation globale des potentialités de pompage-turbinage à Mostaganem.....	-48-
III.5 Solution 2 (Nouvelle installation).....	-48-



III.5.1 Principe.....	-48-
III.5.2 Phase de pompage.....	-51-
III.5.3 Phase de turbinage.....	-53-
III.6 Conclusion.....	-57-
Conclusion générale et recommandations.....	- 55
-	
Bibliographie.....	- 57
-	

## Introduction Générale

L'eau est un élément essentiel à toute vie. Outre son utilisation dans les différents domaines de l'industrie et de l'agriculture, grâce à son cycle éternel, l'eau peut être aménagée pour fournir de l'énergie électrique à l'humanité. L'eau s'écoulant sous pression est d'abord convertie en énergie mécanique, puis en énergie électrique.

L'énergie électrique couvre environ un quart du besoin énergétique mondial ; et pour les pays en voie de développement, elle est un enjeu majeur. Elle est généralement produite à partir d'hydrocarbures et de charbon, qui malheureusement émettent beaucoup de gaz à effet de serre ; toutefois, une part non négligeable de l'énergie électrique provient de sources renouvelables, et qui pour l'essentiel vient de la conversion hydroélectrique.

L'énergie électrique produite dans le monde provient ainsi à 39 % du charbon, 15 % du nucléaire, 20 % du gaz et 7 % du pétrole, et à une grande part de 19 % des énergies renouvelables [1].

L'enjeu actuel est de trouver un ratio optimal entre les différentes sources de production afin de satisfaire la croissance de la demande tout en tenant compte de l'accessibilité et du prix des ressources, de la sécurité d'approvisionnement des matières, et des émissions de CO<sub>2</sub>. L'électricité renouvelable provient à 89 % de l'hydroélectricité (grande et petite), à 5,7 % de la biomasse (biomasse solide, biomasse liquide, biogaz et déchets ménagers renouvelables), à 3,5 % de l'énergie éolienne, 1,58 % de l'énergie géothermique, 0,2 % de l'énergie solaire (centrales thermiques ou solaires thermodynamiques, centrales photovoltaïques) et 0,02 % de l'énergie marines [1]. Depuis 2004 la croissance de l'électricité renouvelable est devenue supérieure à celles des filières conventionnelles, atteignant 18,6 % en 2006 [1]. Cette accélération de la croissance de l'électricité renouvelable s'explique en grande partie par la mise en service de nouvelles capacités de production hydroélectrique et par une meilleure hydraulité, notamment en Asie et en Amérique du Sud.

En Algérie la production de l'électricité est essentiellement basée sur les conversions d'énergie fossiles. Et pour s'affranchir de cette dépendance dans les énergies non renouvelables, il est impératif de s'intéresser au secteur de la production d'énergie renouvelable, notamment celui de la production hydroélectrique.

Notre étude vise à fournir un aperçu sur le stockage de l'énergie électrique et sur le potentiel hydroélectrique exploitable dans la ville de Mostaganem (Algérie). Le travail abordé dans ce mémoire est organisé comme suit :

Une introduction générale, dont on présente l'intérêt de l'énergie hydraulique et les parts de production d'énergies renouvelables.

Un premier chapitre, qui est consacré à la définition et à la présentation du principe de fonctionnement, des différents types de centrales hydroélectriques, les équipements électromécaniques, le stockage d'énergie par le pompage, avantages et inconvénients des centrales hydroélectriques.

Un deuxième chapitre consacré à la définition du système de pompage-turbinage et la description de son principe de fonctionnement, ses caractéristiques et ses composants, ses modes de fonctionnement, les éléments de calcul théorique et les avantages et inconvénients du système.

Dans le troisième et dernier chapitre, on aborde la quantification du potentiel hydroélectrique dans la ville de Mostaganem, avec le calcul des puissances théoriques et les autres performances énergétiques, qui pourraient ainsi être exploités par l'installation d'un système de pompage-turbinage pour la production électrique locale à des heures déterminées.

# Chapitre I :

## GENERALITES SUR LES CENTRALES HYDRO-ELECTRIQUES.

### I.1 Introduction

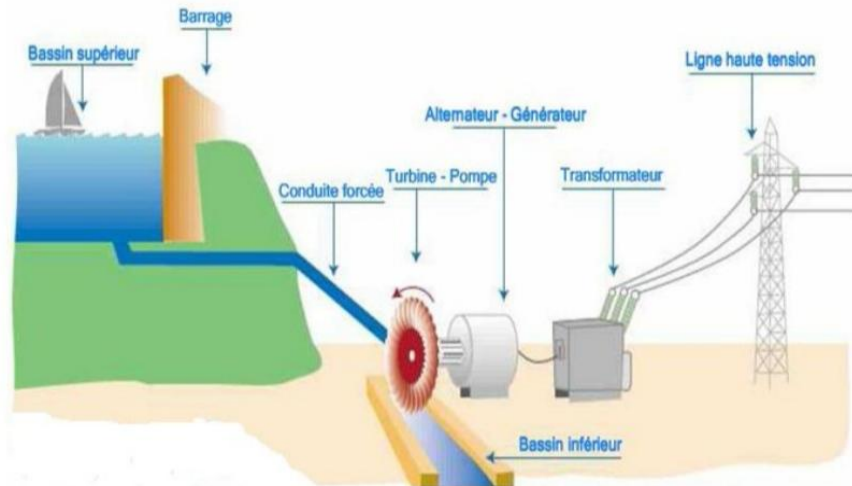
Le présent chapitre est consacré à la présentation d'un aperçu sur la production d'énergie gravitaire ou Station de Transfert d'Energie par Pompage (STEP). Où on va citer les domaines d'utilisation des centrales, leurs constitutions et enfin une définition de la machine asynchrone A doublé alimentation et son fonctionnement.

### I.2 Définition et Principe de fonctionnement

L'hydroélectricité ou énergie hydroélectrique exploite l'énergie potentielle des flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins, etc.). L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur.

Les centrales hydrauliques sont constituées de 2 principales unités :

- Une retenue ou une prise d'eau (dans le cas des centrales au fil de l'eau) qui permet de créer une chute d'eau, avec généralement un réservoir de stockage afin que la centrale continue de fonctionner, même en période de basses eaux. Un canal de dérivation creusé peut permettre de dériver latéralement l'excédent d'eau arrivant vers un étang de barrage. Un évacuateur de crues permet de faire passer les crues de la rivière sans danger pour les ouvrages ;
- La centrale, appelée aussi usine, qui permet d'utiliser la chute d'eau afin d'actionner les turbines puis d'entraîner un alternateur [2].

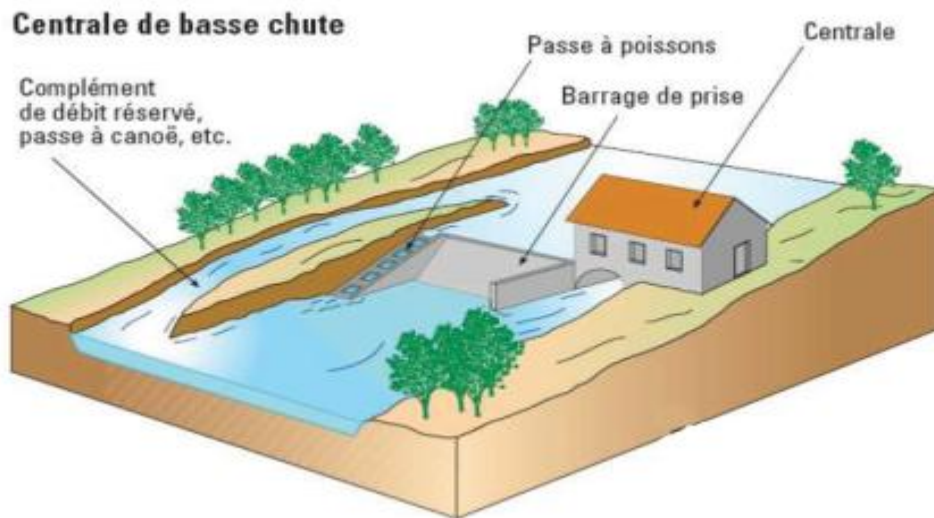


**Figure I.1:** Principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques. [3]

### I.3. Différents types de centrales :

#### I.3.1- Centrale au fil de l'eau

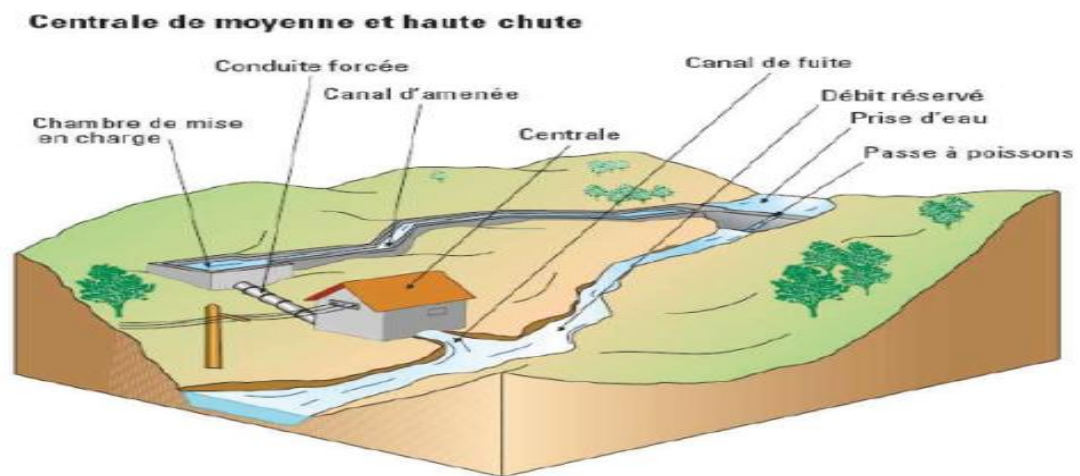
Elles utilisent le débit du fleuve tel qu'il se présente, sans capacité significative de modulation par stockage. Le débit du fleuve varie en fonction de la période de l'année. Par exemple, le débit du Bas-Rhône peut passer de 2 000 m<sup>3</sup>/s pour un mois de mars à 1 000 m<sup>3</sup>/s pour un mois d'août. Les installations de récupération d'énergie seront alors dimensionnées pour le débit maximum [4].



**Figure I.2:** Centrale au fil de l'eau ou de basse chute [4].

### I.3.2- Centrale dites d'éclusées

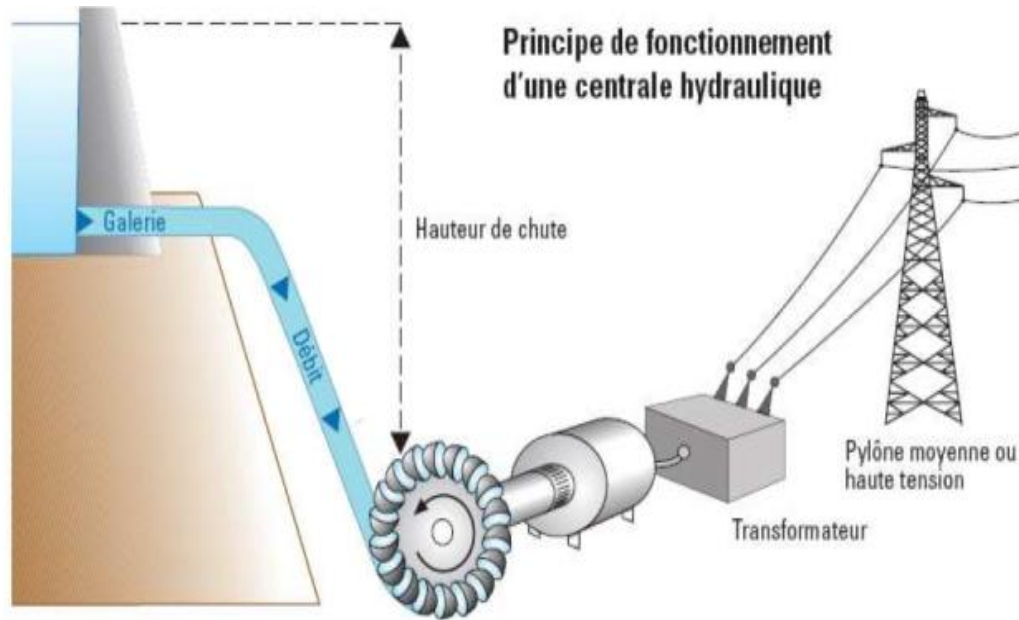
Les centrales éclusées sont généralement situées en moyenne montagne, sur des cours d'eau à débits importants associés à des lacs, leur permettant ainsi une modulation dans la journée voire la semaine. Leur gestion permet de suivre la variation de la consommation sur ces horizons de temps (pics de consommation du matin et du soir, différence entre jours ouvrés et weekend...). Pour assurer la production électrique durant les heures de forte demande, ces centrales sont utilisées à leur puissance maximale, en tirant sur la réserve : c'est le fonctionnement dit en éclusée [4].



**Figure I.3 :** Centrale de moyenne et haute chute [4].

### I.3.3- centrale de lacs (barrages de haute chute)

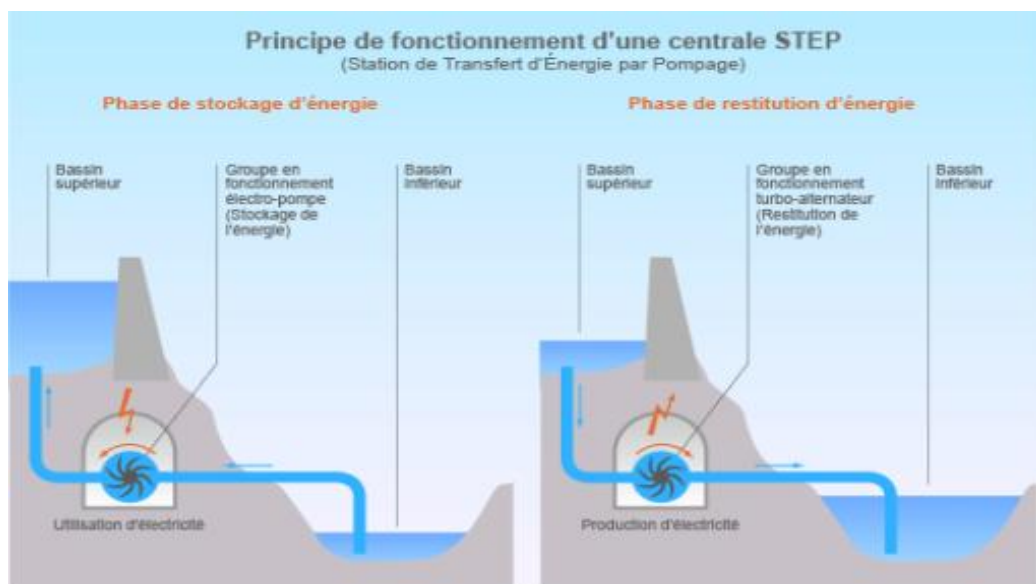
Les centrales-lacs correspondent aux ouvrages présentant les réservoirs les plus importants. Ceux-ci permettent un stockage saisonnier de l'eau, et une modulation de la production pour passer les pics de charge de consommation électrique : l'été pour les pays où la pointe de consommation est déterminée par la climatisation, l'hiver pour ceux où elle est déterminée par le chauffage. Ces centrales, typiques des aménagements réalisés en moyenne et haute montagne, sont capables d'augmenter très rapidement leur production [4].



**Figure I.4 :** Schéma de principe d'un barrage de haute chute [4].

### I.3.4-Centrale STEP

Les "Stations de Transfert d'Énergie par Pompage" (STEP), possèdent un dispositif de pompage. En effet deux réservoirs à des altitudes différentes sont utilisés et l'eau est successivement pompée du bassin inférieur vers le bassin supérieur avec les excédents d'électricité disponibles pendant les heures creuses (nuit), puis "turbinée" pendant les heures de pointe. Ce sont des installations consommatrices nettes d'énergie [4].



**Figure I.5 :** Principe de fonctionnement d'une centrale STEP [4].

## I.4 Taille des centrales

La classification se fait aussi par quantité d'électricité produite.

Centrales	Puissance
Grande	$P > 10\text{MW}$
Petite Moyenne	$10\text{MW} > P > 1\text{MW}$
Mini petite	$1\text{MW} > P > 10\text{kW}$
Micro	$P < 10\text{kW}$

**Tableau I.1 :** classification des centrales d'après leur puissance

## I.5. Les équipements électromécaniques

Les principaux composants électriques et mécaniques d'une petite centrale sont la turbine et la génératrice qui peuvent être en plusieurs exemplaires. Différents types de turbines ont été conçues afin de s'adapter à tous les types de sites hydroélectriques se trouvant dans le monde. Les turbines utilisées dans les petites centrales sont des versions réduites de celles qui équipent les grandes centrales classiques.

### I.5.1 Pompes

Les pompes hydrauliques sont des générateurs de débit, elles transforment l'énergie Mécanique en énergie hydraulique, vers des récepteurs. Le rendement des pompes se situe généralement entre 70% (pour les pompes centrifuges) et 90% (pour les pompes volumétrique).

Le choix d'un type de pompes doit être fait en accord avec les caractéristiques Hydrauliques de l'installation envisagée (débit, hauteur manométrique) :

- Les pompes centrifuges sont adaptées aux débits moyens et élevés pour des hauteurs limites.
- Les pompes volumétriques sont destinées à des faibles débits et grand hauteur.



### **I.5.2 Générateurs (moteurs-alternateurs)**

La puissance mécanique est transformée en puissance électrique par un générateur électrique. Il est mis en rotation par la turbine ; en général par un Accouplement direct ou par un système de transmission.

Les générateurs synchrones sont généralement utilisés en réseau autonome, pour des unités de grande puissance, souvent supérieure à 2 000 kW, raccordés au réseau National [5].

Les générateurs asynchrones, quant à eux, sont essentiellement utilisés lorsque la production de la centrale est prévue pour une vente, car dans ce cas, la génératrice est pilotée par le réseau qui régule la fréquence et la tension du courant produit. Ils sont utilisés pour des puissances inférieures à 2 000 kW.

### **I.5.3 Transformateur**

Les transformateurs sont des appareils extrêmement divers, par leur fonction, mais aussi par leur taille et leur coût.

Les deux grandes catégories sont les transformateurs de puissance et les transformateurs de mesure.

Les transformateurs de puissance sont indispensables quand la centrale doit débiter sur un Réseau de tension 20 KV ou plus.

### **I.5.4 Turbine**

Une turbine hydraulique est une machine tournante, constituée principalement d'une roue à aubes, qui reçoit l'énergie d'un fluide, sous forme d'énergie de pression ou d'énergie cinétique et qui la transforme en énergie mécanique directement utilisable sur un arbre en rotation.

Il existe plusieurs types de turbines dont le choix est fonction de la hauteur de chute et du débit de site sélectionné pour l'installation d'une centrale (turbine Francis, Kaplan, Pelton, à hélices).

## **I.6 Avantages et inconvénients des centrales hydroélectriques**

- Les centrales hydro-électriques ont le gros avantage d'être généralement viables. En effet, malgré

Les investissements souvent colossaux nécessaires à l'installation de ce type de centrale, leur durée De vie est très importante (supérieure à 100 ans).

- Les centrales hydro-électriques ont aussi un autre grand avantage, par rapport aux autres Energies Renouvelables, de permettre l'ajustement en temps réel de l'équilibre hors demande en Électricité.

- Lorsque la consommation est faible, les STEP sont utilisées en tant que système de pompage afin de stocker de l'énergie qui sera restituée en temps voulu.

- Les barrages sont le seul moyen de stocker d'énorme quantité d'énergie que l'on peut consommer en temps utile.

## **I.7 Conclusion**

L'avantage du système de stockage d'énergie hydroélectrique par pompage offre une haute performance pour la compensation des fluctuations de puissance des sources d'énergie renouvelables. La technologie à vitesse variable dans les pompes-turbines permet le stockage et la production d'énergie avec une réactivité rapide, la régulation de la fréquence du réseau et l'optimisation de l'efficacité des centrales hydrauliques.

Il est nécessaire dans la suite d'expliquer en détail les caractéristiques du système de pompage-turbinage et développer les éléments de calcul théoriques. Ceci est l'objet du chapitre suivant.

# **Chapitre II :**

## **Description et calcul du système de pompage turbinage**

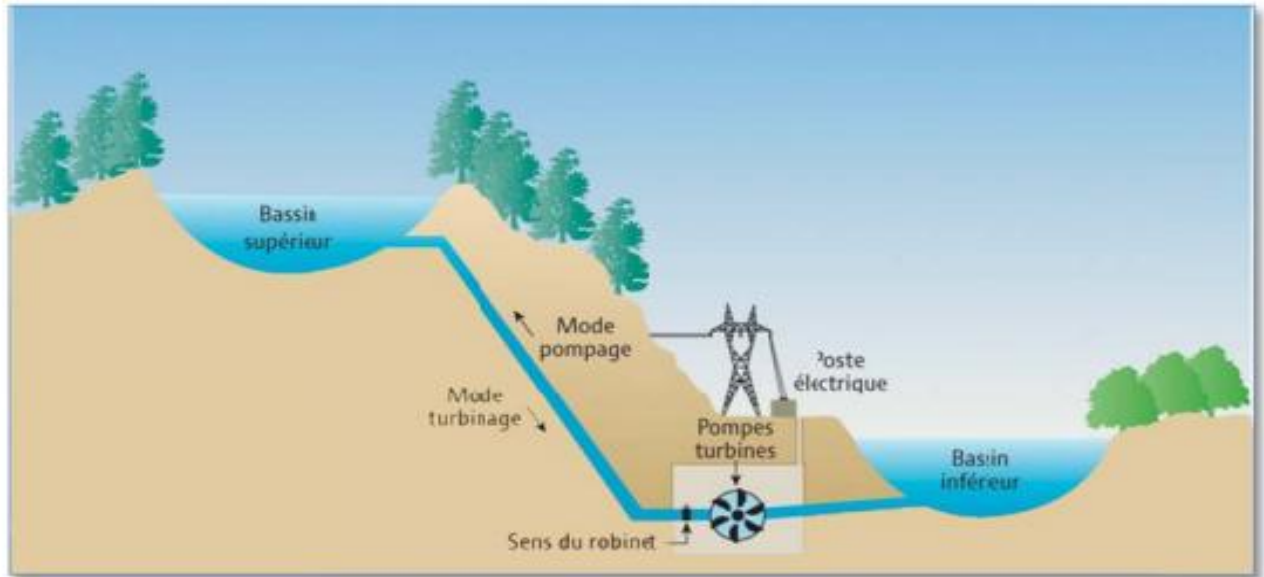
### **II.1 Introduction**

Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) ou les systèmes de pompage-turbinage permettent de stocker l'énergie et d'éviter le gaspillage d'énergie pendant les heures creuses (nuit, week-end) et de produire de l'électricité pendant les heures de pointes en assistance à d'autres systèmes classiques tels que les centrales thermiques. Les systèmes par pompage-turbinage hydraulique tiennent une des meilleures places grâce à leur simplicité technique, leur sûreté, leur propreté et à leurs avantages économiques.

### **II.2. Définition et principe de fonctionnement**

Le principe est d'accumuler de l'énergie sous forme d'énergie potentielle hydraulique entre un bassin en hauteur et un réservoir d'eau inférieur. L'eau du réservoir inférieur peut être ainsi pompée vers le bassin supérieur en période d'excès d'énergie et être ensuite turbinée vers le réservoir inférieur en période de demande d'énergie [8].

L'énergie potentielle gravitationnelle est tout d'abord convertie en énergie cinétique. L'eau en écoulement est accélérée à une vitesse la plus élevée possible à l'intérieur d'un distributeur ou d'une buse. L'impulsion du fluide est rendue exploitable comme force périphérique en le déviant dans une roue.



**Figure II.1** : schéma d'illustration du principe de fonctionnement du pompage –turbinage [6]

## **II.3 : Caractéristiques et composants d'un système de pompage-turbinage**

### **II.3.1. Différents groupes de pompage-turbinage**

On distingue trois types d'architecture de groupes de pompage-turbinage qui peuvent équiper les centrales [9] :

- Des groupes ternaires regroupant sur un même arbre mécanique une turbine, un moteur-générateur électrique et une pompe.
- Des groupes réversibles regroupant une pompe-turbine réversible accouplée à un moteur-générateur.
- Des groupes isogyres.

#### **II.3.1.1 Les groupes ternaires :**

Dans cette configuration la turbine est une Pelton obligatoirement calée au-dessus du niveau aval maximal. L'avantage de cette architecture est de pouvoir concevoir chacune des deux machines, pompe et turbine, pour leur domaine propre de fonctionnement optimal.

#### **II.3.1.2 Les groupes réversibles :**

Dans ce type d'architecture, la pompe et la turbine ne constituent qu'une seule machine réversible. La pompe turbine est équipée de roues de type Francis dont le tracé résulte d'un compromis acceptable entre les rendements optimum en pompe et en turbine.

### II.3.1.3 Les groupes isogyres :

Synthèse des deux précédents. Dans ce groupe, le rotor, unique, est divisé en deux parties, chacune de celles-ci étant spécialisée, l'une pour le pompage, l'autre pour le turbinage.

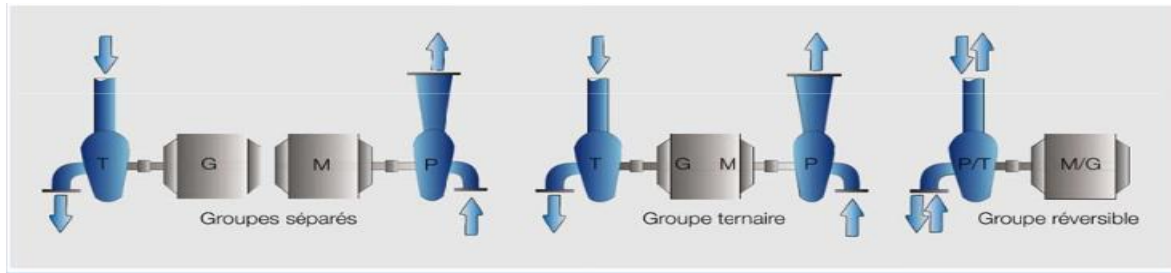


Figure.II.2: Différentes architectures de groupes de pompage –turbinage [7]

### II.3.2. Modélisation du groupe pompe- turbine – conversion hydraulique-mécanique

Dans le cas d'un système conventionnel, le groupe pompe-turbine est connecté à une source d'énergie contrôlable ; ainsi :

- La puissance électrique envoyée à la pompe sera telle qu'elle fonctionne à rendement maximal.
- Le débit d'eau sera choisi de telle manière que le turbinage se fasse à rendement optimal en mode turbinage.

### II.3.3. Modes de fonctionnement

Il existe deux modes de fonctionnement :

#### II.3.3.1: Mode Turbinage (max puissance min de débit Q):

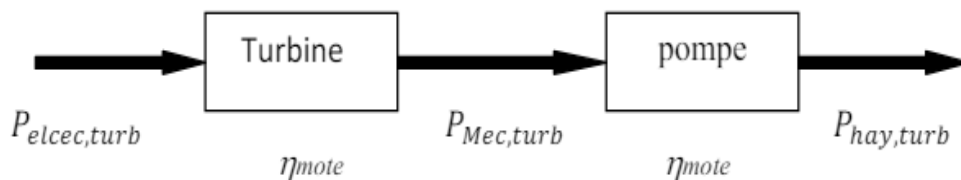


Figure II.3: Mode Turbinage [8]

L'objectif est de déterminer le débit d'eau  $Q_{v,turb}$  à utiliser par la turbine pour qu'elle produise une puissance électrique  $P_{elc,t}$  à un instant donné :

$$P_{elc,t} \rightarrow P_{Mec,t} \rightarrow P_{hy,t} \rightarrow P_t$$

A chaque instant, une puissance électrique  $P_{elc,t}$  doit être produite pour satisfaire la charge complètement ou partiellement, à partir d'une ou de plusieurs turbines, fonctionnant chacune à un pourcentage de leur charge maximale. Le choix du nombre de turbines et du régime de fonctionnement sera réalisé de manière à ce que l'ensemble du groupe turbinage fonctionne de manière optimale, c'est-à-dire produisant la puissance appelée en utilisant le débit minimal d'eau, c'est l'optimisation qui sera développée dans le paragraphe suivant.

Si on considère un rendement de l'alternateur  $\eta_{alt}$  la puissance mécanique nécessaire pour produire  $P_{elc,t}$  est :

$$P_{Mec,t} = \frac{P_{elc}}{\eta_{alt}} \quad (II\ 1)$$

Or la puissance mécanique est reliée à la puissance hydraulique par :

$$P_{Mec,t} = \eta_t P_{hy,t} \quad (II\ 2)$$

Avec :

$$P_{hy,t} = \rho_{eau} g \Delta H Q_t \quad (II\ 3)$$

$\rho_{eau}$  est la masse volumique de l'eau égale à  $1000\text{ kg.m}^{-3}$ ,  $g$  l'accélération de la pesanteur  $g=9,81\text{ m.s}^{-2}$  et  $\Delta H$  la hauteur manométrique.

Le rendement de la turbine dépend du débit d'eau qui la traverse :

$$\eta_t = f(Q_t) \quad (II\ 4)$$

Ainsi l'équation devient :

$$P_{Mec,t} = f(Q_t) \rho_{eau} g \Delta H Q_t \quad (II\ 5)$$

De la même manière, l'alternateur a un rendement qui dépend de la puissance mécanique de la turbine à laquelle il est couplé :

$$\eta_{alt} = g (P_{Mec,t}) \quad (\text{II } 6)$$

Ainsi, nous obtenons

$$P_{Mec,t} = \eta_{alt} f(Q_t) \rho_{eau} g \Delta H Q_t = g (f(Q_t) \rho_{eau} g \Delta H Q_t) \quad (\text{II } 7)$$

$$P_{Mec,p} = g (P_{elc,p}) P_{elc,p} \Rightarrow P_{elc,p} = P_{Mec,p} / g (P_{elc,p}) \quad (\text{II } 8)$$

$$P_{elc,p} = (P_{hy,p} / f(Q_p)) g (P_{elc,p}) \quad (\text{II } 9)$$

$$P_{elc,p} = (\rho_{eau} g \Delta H f(Q_p)) g (P_{elc,p}) \quad (\text{II } 10)$$

La relation liant directement la puissance électrique de la turbine au débit d'eau qui la traverse, le maximum de puissance avec le minimum de débit.

### II.3.3.2 : Mode Pompage (min puissance max de débit Q)

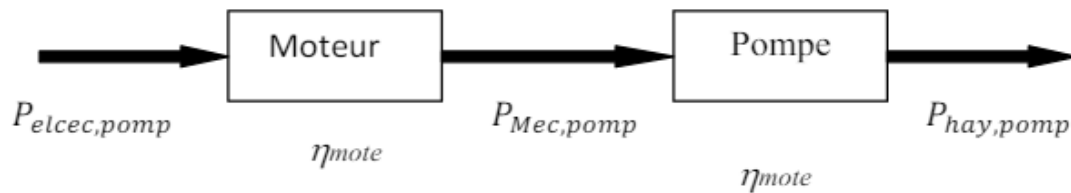


Figure II.4 : Mode Pompage [8]

De même que pour le turbinage, en mode pompage l'objectif aussi est de déterminer le débit d'eau  $Q_p$  à remonter par la ou les pompes :

$$P_{elc,p} \rightarrow P_{Mec,p} \rightarrow P_{hy,p} \rightarrow P_p$$

A un instant donné, une puissance électrique  $P_{elc,p}$  est fournie à la ou aux pompes, si on

Considère un rendement du moteur  $\eta_{mot}$  la puissance mécanique produite  $P_{Mec,p}$  sera:

$$P_{Mec,t} = \eta_{mot} P_{elc,p} \quad (\text{II } 11)$$

Le rendement électrique du moteur  $\eta_{mot}$  dépend de la puissance électrique qu'il reçoit du réseau électrique :

$$\eta_{mot} = g ( P_{Mec,p} ) \quad (II\ 12)$$

Ainsi :

$$P_{Mec,p} = g ( P_{elc,p} ) P_{elc,p} \quad (II\ 13)$$

Or la puissance mécanique est reliée à la puissance hydraulique par:

$$P_{Mec,p} = P_{hy,p} \eta_p \quad (II\ 14)$$

Avec :

$$P_{hy,p} = \rho_{eau} g \Delta H Q_p \quad (II\ 15)$$

Or le rendement de la pompe dépend du débit d'eau remontée :

$$\eta_{mot} = f ( Q_p ) \quad (II\ 16)$$

Ce qui donne :

$$P_{Mec,p} = \rho_{eau} g \Delta H Q_p / f ( Q_p ) \quad (II\ 17)$$

Nous obtenons ainsi :

$$P_{Mec,p} = g ( P_{elc,p} ) P_{elc,p} \quad (II\ 18)$$

$$P_{elc,p} = P_{Mec,p} g ( P_{elc,p} ) \quad (II\ 19)$$

$$P_{elc,p} = ( P_{hy,p} f ( Q_p ) ) g ( P_{elc,p} ) \quad (II\ 20)$$

$$P_{elc,p} = ( \rho_{eau} g \Delta H Q_p f ( Q_p ) ) g ( P_{elc,p} ) \quad (II\ 21)$$

Il conviendra donc de trouver une relation liant directement la puissance électrique de la pompe au débit d'eau remontée et ce de manière optimale c'est-à-dire en remontant le maximum d'eau.



## II.4. Eléments de calcul théorique

### II.4.1. Calcul des pertes de charge :

Déterminer avec le plus de précision possible les différentes sources de pertes de charge.

Rappelons que les pertes de charge dans un réseau hydraulique sont fonction de la vitesse de l'écoulement, et s'expriment par :

$$H_{tot} = \sum_{i=1}^n K_i * \frac{V_i^2}{2g} \quad (\text{II } 22)$$

$H_{tot}$ [m] : Hauteur totale correspondant aux pertes de charge dans le réseau

$n$  [-] : nombre d'éléments amenant des pertes de charge

$V_i$ [m/s] : vitesse de l'écoulement au droit de l'obstacle

$g$  [m/s<sup>2</sup>] : gravité,

$K_i$ [-] : coefficient de pertes de charge

$$K_i = \lambda_i * \frac{L_i}{D_i} \quad (\text{II } 23)$$

Le calcul des pertes de charge se fait pour les pertes linéaires ou régulières et pour les pertes singulières.

#### Pertes linéaires :

Rappelons que les pertes de charge en long s'obtiennent par :

$$\Delta H = \lambda * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} = \frac{8\lambda}{\pi^2 g} * \frac{L}{D^5} * Q_v^2 \quad (\text{II } 24)$$

$\Delta H$  [m] : pertes de charge

$\lambda$  [-] : coefficient de pertes de charge (qui est fonction de la rugosité de la conduite et du nombre de Reynolds)

L [m] : longueur du tronçon

V [m/s] : vitesse de l'écoulement

g [m/s<sup>2</sup>] : gravité

### **Pertes de charge singulières:**

Les pertes de charge singulières sont dues aux variations géométriques de la section de la conduite, accidentelles ou pas. On compte donc les changements de direction (coudes, raccords en T), les réductions de section, les vannes ou robinets,

Les pertes de charge singulières se produisent quand il y a perturbation de l'écoulement normal par décollement du fluide des parois ou par formation de tourbillons.

La formule utilisée est :

$$\Delta H = \lambda * \frac{\rho v^2}{2} \quad (\text{II 25})$$

Avec :

$\Delta P$  (où :  $\Delta H$ ) : perte de charge singulière en pascal (ou en mètre)

$\lambda$ : coefficient de perte de charge singulière

$\rho$  : masse volumique du fluide [kg/m<sup>3</sup>]

v : vitesse du fluide [m/s]

### **Calcul du coefficient de pertes de charge :**

Le régime étant turbulent, on utilise l'expression suivante :

$$\lambda = 0.3164 \text{ Re}^{-0.25}$$

### **Calcul le nombre de Reynolds :**

Du type d'écoulement, donc du nombre de Reynolds : en deçà de  $Re = 2000$  le régime est laminaire, au-delà le régime est turbulent.

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad (\text{II } 26)$$

$\nu$  : viscosité cinématique [ $m^2/s$ ],

D : diamètre en [m],

V : la vitesse en [m/s].

## II.4.2 Paramètres principaux des turbomachines :

### II.4.2.1. Débit :

C'est la quantité du liquide qui passe à travers la pompe (la section d'écoulement) pendant l'unité de temps. Cette quantité peut être mesurée en unité de volume, de masse ou de poids. C'est pourquoi on distingue les débits suivants :

#### - Débit volumique :

$$Q_v = S . V \text{ [} m^3/s \text{]} \quad (\text{II } 27)$$

Avec :

S = section du conduit en  $m^2$

V = vitesse dans le conduit en m/s

#### - Débit massique :

$$Q_m = Q_v \rho \text{ [kg/s]} = m / t \text{ unité : kg/s} \quad (\text{II } 28)$$

Avec :

m = masse d'eau en kg

t = temps en s

$\rho$  La masse volumique de l'eau:  $\rho = 1000 \text{ kg}/m^3$

#### - Débit en poids

$$Q_p = Q_m g \text{ [N/s]}. \quad (\text{II } 29)$$

g l'accélération de la pesanteur  $g = 9,81 \text{ m}^{-2}$

#### II.4.2.2: Hauteur manométrique

C'est une colonne géométrique du liquide ou bien est une énergie du liquide nécessaire pour surmonter les pertes de charges dans les conduites.

La hauteur créée par la pompe peut être évalué par l'équation de Bernoulli comme la variation de la hauteur entre deux sections d'une conduite :

$$H_m = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1 + \Delta P \quad \text{en (m)} \quad (\text{II 30})$$

#### II.4.2.3. Puissances de pompage et de turbinage:

Les débits de turbinage et de pompage auront évidemment un impact sur la durée d'un cycle, mais aussi sur la puissance de l'installation.

En effet la puissance d'une turbine est donnée par :

$$P_t = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \cdot \eta_t \quad (\text{II 31})$$

Et celle d'une pompe par :

$$P_p = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot Q}{\eta_p} \quad (\text{II 32})$$

Avec :

- P [kW] : la puissance
- $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] : la masse volumique de l'eau
- g [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] : la gravité
- H [m] : la hauteur d'eau disponible
- Q [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] : le débit passant dans la turbine/pompe
- $\eta$  : le rendement de la turbine/pompe

La puissance est donc directement proportionnelle au débit par le terme Q, mais aussi indirectement proportionnelle de par le terme H.

En effet, si on prend l'exemple du turbinage, la hauteur d'eau disponible dans la turbine ( $H$ ) s'obtient à partir de l'équation de Bernoulli sur une ligne de courant allant du point A au point B.

A chaque instant :

$$Z_A + \frac{v_A^2}{2g} + \frac{P_A}{\rho g} = Z_B + \frac{v_B^2}{2g} + \frac{P_B}{\rho g} + \Delta H_{\text{pert de charge}} + H_t \quad (\text{II } 33)$$

Avec :

—  $Z_A$  [m] : l'altitude du point A

—  $Z_B$  [m] : l'altitude du point B

—  $v_A$  [m/s] : la vitesse de l'écoulement au point A

—  $v_B$  [m/s] : la vitesse de l'écoulement au point A

—  $P_A$  [Pa] : la pression au point A

—  $P_B$  [Pa] : la pression au point B

—  $\Delta H_{\text{pert de charge}}$  [m] : la hauteur d'eau "dissipée" par les pertes de charge

—  $H_t$  [m] : la hauteur disponible pour le turbinage

L'expression de la hauteur dans la turbine se réduit à :

$$H_t = Z_A - Z_B - \Delta H_{\text{pert de charge}} \quad (\text{II } 34)$$

Le même raisonnement peut être appliqué pour le pompage, pour obtenir :

$$H_p = Z_A - Z_B + \Delta H_{\text{pert de charge}} \quad (\text{II } 35)$$

#### II.4.2.4. Puissance d'une centrale et sa production énergétique :

L'énergie potentielle est:

$$W = M g H_b \quad (\text{II } 36)$$

Avec : W : énergie potentielle en Joules

M : masse de l'eau en Kg

g : accélération de la pesanteur en  $m/s^2$  ( $g = 9,81$ ).

$H_b$  : Hauteur de la chute d'eau en m.

La définition de la puissance est :

$$P = \frac{W}{t} \quad (\text{II } 37)$$

Avec :

P : puissance utile de la chute d'eau en W,

t : temps.

On peut alors calculer la puissance d'une chute d'eau en fonction de sa hauteur et de son débit:

$$P = \frac{M.g.H_b}{t} \quad (\text{II } 38)$$

$$M = V. \rho \quad (\text{II } 39)$$

Donc :

$$P = \frac{V.\rho.g.H_b}{t} \quad (\text{II } 40)$$

On retrouve le débit, qui n'est rien d'autre que le rapport d'un volume par le temps :

$$P = Q.\rho.g.H_b \quad (\text{II } 41)$$

Avec : Q : débit de la chute d'eau en  $m^3/s$ .

$\rho$  : masse volumique de l'eau en  $kg/m^3$ .

On voit que, pour avoir une puissance importante, le produit  $Q.H_b$  doit être le plus élevé possible. L'idéal est d'avoir un grand débit sur une grande hauteur de chute. Malheureusement ces deux conditions sont rarement réunies.

$$P = Q. g.H_b \quad (\text{II } 42)$$

La quantité d'énergie produite par une chute peut se calculer par la formule suivante :

$$P = Q \cdot g \cdot H_b \cdot \eta \quad (\text{II } 43)$$

Avec : P : puissance produite mesurée (kW)

Q : débit moyen mesuré ( $m^3/s$ )

$\eta$  : rendement de la centrale (compris entre 0.6 et 0.9)

#### **II.4.2.5. Quantité d'énergie E (en kWh) :**

**Énergie produite par la turbine :** C'est l'énergie électrique générée par la turbine lors de la phase de turbinage. Elle peut être calculée en connaissant la puissance de la turbine (Pt) et le temps de turbinage (tt):

$$\text{Énergie produite par la turbine} = P_t * t_t \quad (\text{II } 44)$$

**Énergie consommée par la pompe :** C'est l'énergie électrique consommée par la pompe lors de la phase de pompage. Elle peut être calculée en connaissant la puissance de la pompe (Pp) et le temps de pompage ( $t_p$ ) :

$$\text{Énergie consommée par la pompe} = p_p * t_p \quad (\text{II } 45)$$

Que ce soit en pompage ou en turbinage, elle est égale à la puissance en kWh multipliée par le nombre d'heures de fonctionnement :

En pompage  $E_p = P_p * h_p$

En turbinage  $E_t = P_t * h_t$

Avec Pp : Puissance de pompage (kW).

hp : Nombre d'heures de pompage (h).

Pt : Puissance de turbinage (kW)

ht : Nombre d'heures de turbinage (h).

#### **II.4.3. Critère de fonctionnement normal du système de pompage-turbinage**

L'équilibre entre le pompage et le turbinage qui permet par la suite de calculer le rendement du cycle pompage-turbinage doit être assuré par la relation suivante [14] :

$$h_{\text{pompage}} * q_{v \text{ pompage}} = h_{\text{turbinage}} * q_{v \text{ turbinage}} = \text{volume bassin inferieur} \quad (\text{II } 47)$$

#### II.4.4. Rendement du cycle pompage-turbinage :

$\eta_{\text{sys-pt}} = (\text{Énergie produite par la turbine (en kWh)} / \text{Énergie consommée par la pompe (en kWh)})$

$$\eta_{\text{sys-pt}} = E_t / E_p \quad (\text{II } 48)$$

#### II.4.5: Choix de la turbine :

Le choix de la turbine dépend du cas d'étude et prend en compte l'aspect économique et les coûts d'exploitation.

Selon la combinaison du débit disponible et de la hauteur manométrique en amont de la turbine, la turbine la plus adéquate pour le site d'installation est choisie. La sélection s'effectue sur la base de zones d'applications préalablement connues pour chaque type de turbine.

Les turbines Pelton et Francis couvrent une grande partie des zones d'application. Les turbines « Cross flow » (ou Banki-Michel) présentent des modifications par rapport aux turbines Pelton. Les turbines Kaplan, quant à elles, sont utilisées pour de faibles hauteurs manométriques et de grands débits. Les principales caractéristiques des turbines hydrauliques sont présentées dans le Tableau :

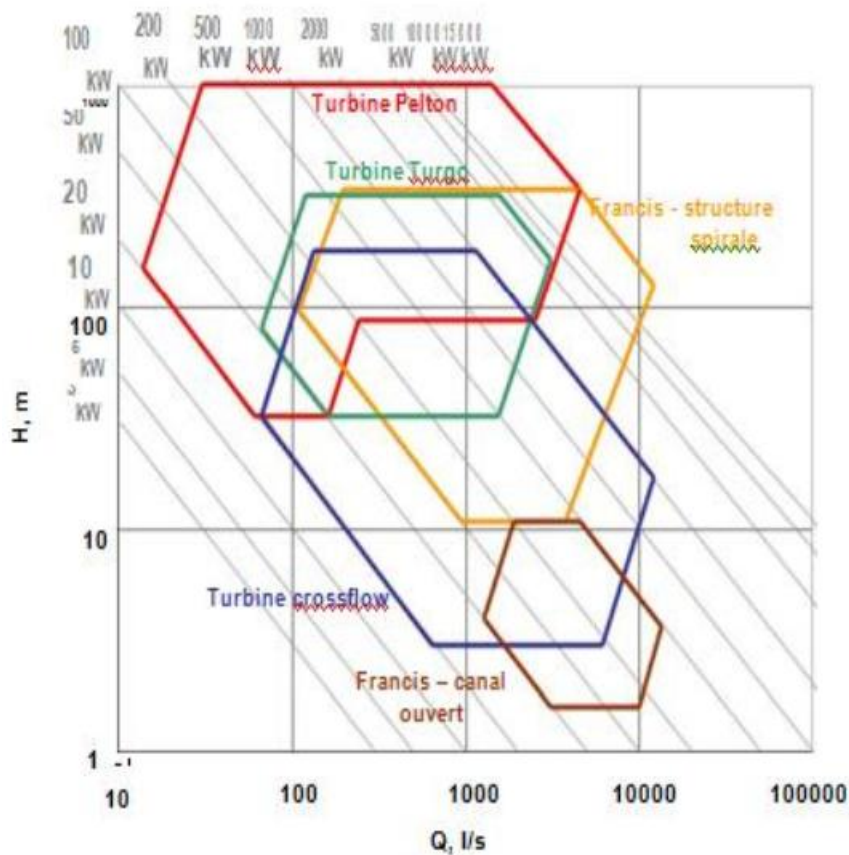


Types de Turbine	Hauteur de chute (m)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Rendement mécanique	Barrages	Puissance	Types de fonctionnement
Pelton	200-2000	4-15	Jusqu'à 90% pour les petites turbines	réservoirs de haute montagne	jusqu'à 15 MW	Turbine à action
Crossflow	1-150	1-10	Jusqu'à 82% limitée		jusqu'à 2000 kW	
Francis	10-700	4-55	Jusqu'à 92% pour les petites turbines	centrales au fil de l'eau	jusqu'à 15 MW	Turbine à réaction
Kaplan	0-30	1-350	Jusqu'à 92% pour les petites turbines	centrales au fil de l'eau	Puissance jusqu'à 15 MW	Turbine à réaction

Activi  
Accède

**Tableau II.2. Types des turbines hydrauliques [8]**

Les hauteurs de chute citées dans le Tableau III.2. Sont valables pour des puissances élevées. Pour les faibles puissances, les hauteurs de chute peuvent être beaucoup plus petites. Les zones de fonctionnement des petites turbines sont présentées sur Figure. II.6



**Figure II.6. Zones d'application des différentes turbines [8].**

## **II.5. Avantages et inconvénients du système pompage-turbinage**

- Energie propre.
- Facilité de mise en œuvre.
- L'investissement, au départ, certes qu'il est un peu élevé mais l'installation est plus durable.
- L'équation économique est une question délicate qu'on doit prendre en considération.
- Les coûts de fonctionnement comprennent le coût de l'énergie utilisée pour le pompage et les coûts de maintenance et d'exploitation usuels en plus des frais d'investissement.
- En Algérie, le coût d'accès au réseau n'est appliqué que sur la différence entre l'énergie consommée par pompage et l'énergie produite par turbinage.
- La vente de l'électricité turbinée ne peut rapporter un bénéfice brut que si le rapport entre les prix de l'électricité heure creuse et heure pleine est inférieure au rendement global de la STEP.

## **Chapitre III :**

# **Etude technique et énergétique d'un système de pompage-turbinage dans la localité de Mostaganem.**

### **III.1. Introduction**

La ville de Mostaganem, située sur les rives de la Méditerranée en Algérie, fait face à des défis complexes en matière de gestion de l'eau et de l'énergie. Cette étude technique et énergétique se concentre sur l'évaluation et l'analyse d'un système de pompage-turbinage dans la localité de Mostaganem. Le pompage-turbinage, une technologie éprouvée dans de nombreuses régions du monde, offre un potentiel considérable pour répondre à plusieurs défis auxquels la ville est confrontée, notamment la gestion de l'eau et la production d'énergie. L'objectif principal de cette étude est de déterminer la viabilité technique, économique et environnementale de l'implémentation d'un tel système dans le contexte spécifique de Mostaganem.

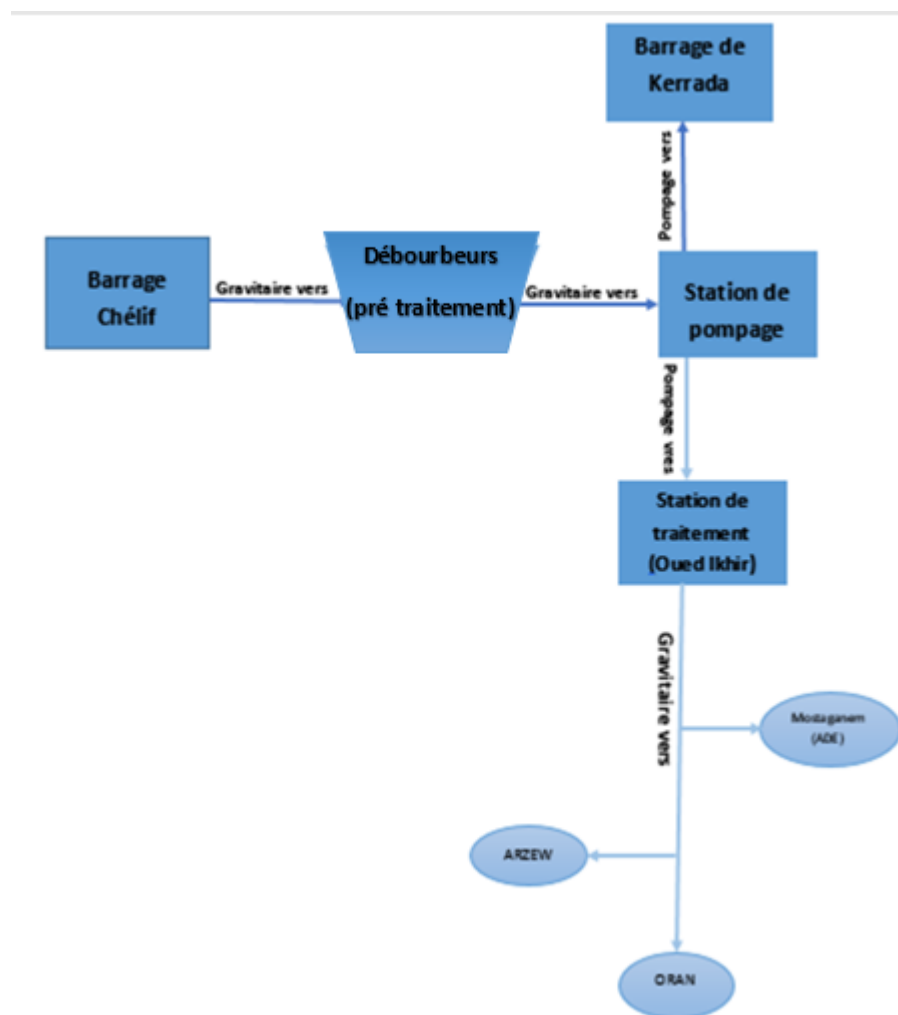
Nous espérons que cette étude contribuera à éclairer les décideurs locaux, les professionnels de l'énergie et les chercheurs sur les opportunités et les implications d'une telle initiative pour le développement durable de la région.

### **III.2. Description du système d'AEP de la wilaya**

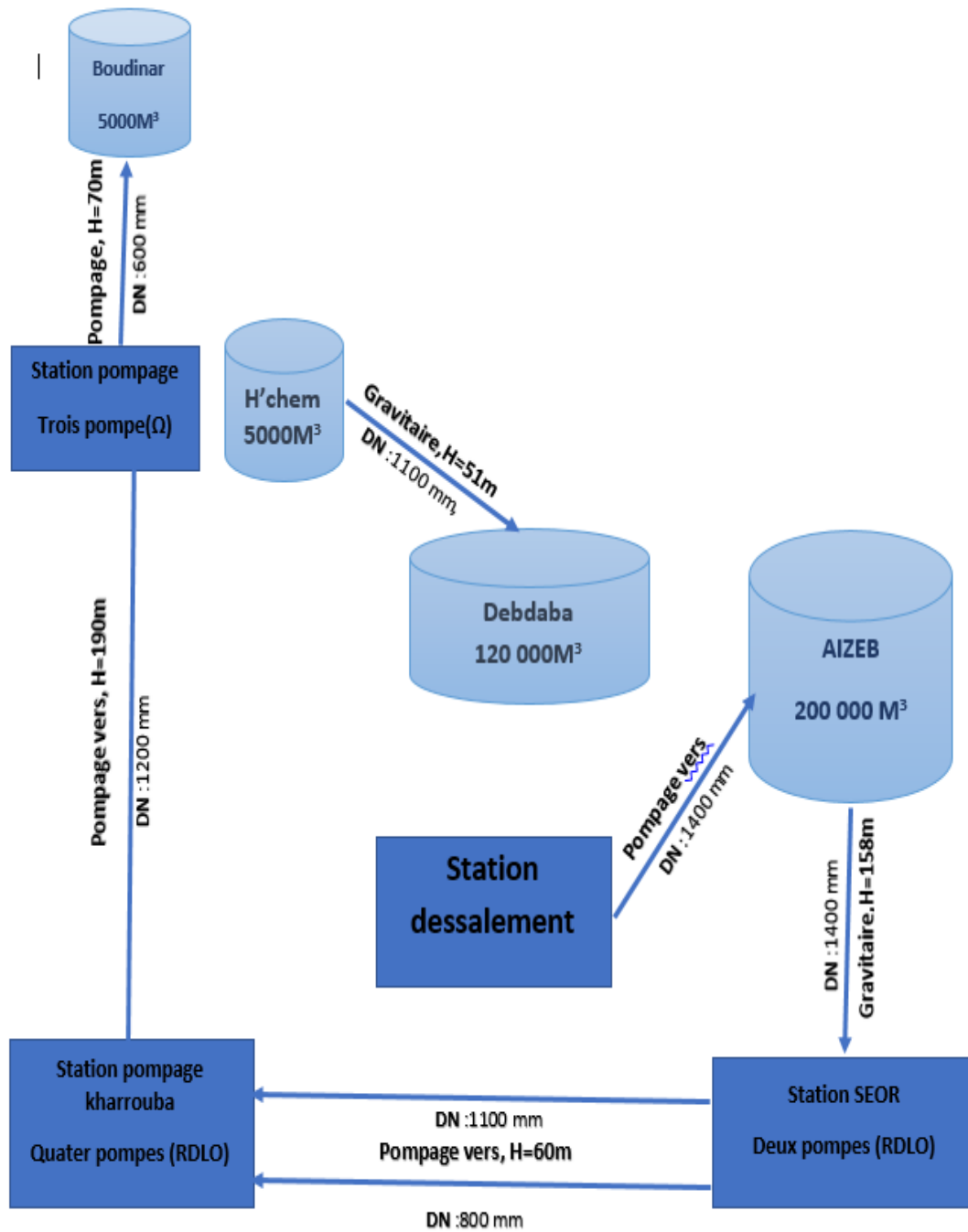
Le système d'Approvisionnement en Eau Potable (AEP) de la wilaya de Mostaganem est un réseau complexe d'infrastructures conçu pour fournir de l'eau potable à la population de la région. Voici une description générale de ce système :

**1. Sources d'eau :** Le système d'AEP de Mostaganem puise ses sources d'eau à partir de diverses ressources telles que les nappes souterraines, station dessalement, barrage (MAO).

**2. Captage, traitement et acheminement :** L'eau brute est captée et acheminée vers des stations de traitement où elle subit différents processus de purification, y compris la filtration, la désinfection et éventuellement la désalinisation selon les caractéristiques de la source, ensuite elle est acheminée vers les réservoirs et les châteaux d'eau pour être distribuée au consommateur.



**Figure III.1:** Schéma reliant la source et la station de traitement MAO [13].



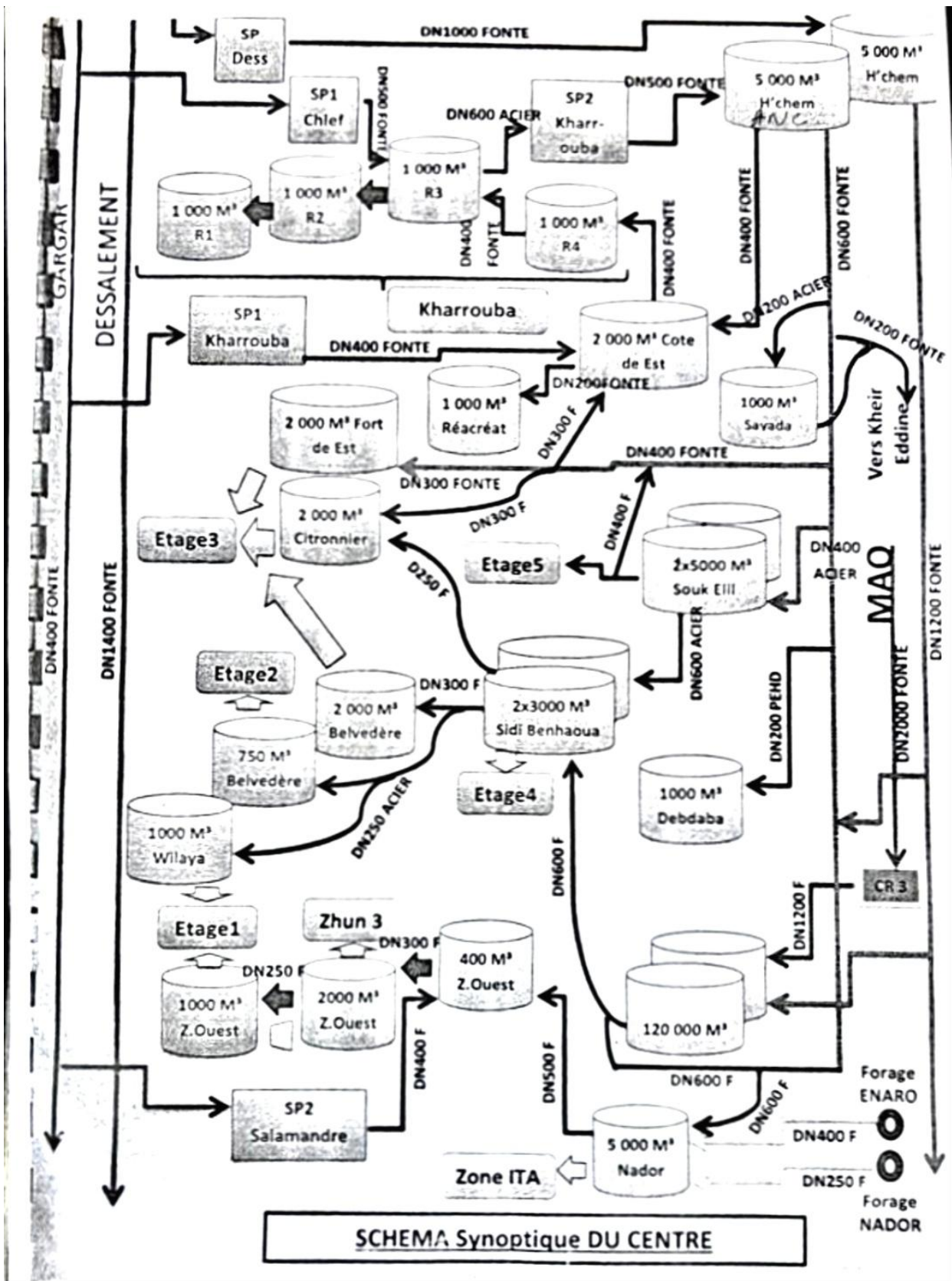
**Figure III.2:** Schéma d'acheminement de l'eau [9]

**3. Services aux usagers :** Les usagers accèdent à l'eau potable via des bornes-fontaines publiques, des branchements domiciliaires ou des points de distribution communautaires, selon leur localisation et leur situation socio-économique.

**4. Maintenance et gestion :** Le système d'AEP est géré et entretenu par les autorités locales, qui assurent la maintenance régulière des infrastructures, la surveillance de la qualité de l'eau et la gestion des ressources hydriques.

**5. Développement et expansion :** Avec la croissance démographique et le développement urbain, le système d'AEP de Mostaganem est régulièrement étendu et amélioré répondre aux besoins croissants de la population et garantir un accès continu à une eau potable de qualité.

**6. Réseau de distribution :** Une fois traitée, l'eau potable est pompée à travers un vaste réseau de canalisations vers les zones urbaines et rurales de la wilaya de Mostaganem. Ce réseau comprend des conduites principales, des réservoirs de stockage et des stations de pompage pour assurer une distribution fiable et efficace.



**Figure III.3:** plan de distribution d'eau potable au centre de Mostaganem [9]

## 6.2 Les étages de distribution

Le réseau de distribution de la ville de Mostaganem est composé de cinq étages de distribution, chaque étage est alimenté par un ou plusieurs réservoirs [9] :

**Etage n°1** : Côte 0 à 40 NGA. Sa mise en charge est assurée par :

- Réservoir 1000 m<sup>3</sup> Wilaya,
- Réservoir R1 Kherroubi,
- Réservoir 1000 m<sup>3</sup> Hadika,
- Réservoir Kherroubi plage,
- Réservoir 1000 m<sup>3</sup> zone Ouest.

**Etage n°2** : Côte 40 à 70 NGA. Sa mise en charge est assurée par :

- Réservoir 750 m<sup>3</sup> Belvédère 2
- Réservoir R2 Kharouba 1000 m<sup>3</sup>
- Réservoir zone ouest 2000 m<sup>3</sup>

**Etage n°3** : Côte 70 à 100 NG. Sa mise en charge est assurée par

- Réservoir 2000 m<sup>3</sup> Belvédère 1
- Réservoir fort de l'Est 2000 m<sup>3</sup>
- Réserve R3 Kherroubi 1000 m<sup>3</sup>
- Réservoir Citronnier 2000 m<sup>3</sup>

**Etage n°4** : Côte 100 à 140 NGA. Sa mise en charge est assurée par

- Réservoir 2x3000 m<sup>3</sup> Sidi Benhaoua
- Réservoir Radar (côte Est) 2000 m<sup>3</sup>
- Réservoir R4 Kherroubi 1000 m<sup>3</sup>

**Etage n°5** : Côte 140 à 200 NGA. Sa mise en charge est assurée par

- Réservoir 2x5000 m Souk Elil
- Réservoir Nador 5000 m<sup>3</sup>



### 6.3 Zones de distribution

Le réseau de distribution de la ville de Mostaganem est réparti en dix-sept zones :

**Zone n°1 (étage 1)** Elle est alimentée à partir du réservoir Wilaya 1000 m<sup>3</sup> (69 NGA) et concerne les quartiers suivants :

- Pépinière (partie basse)
- Port
- Plateau (partie basse)

**Zone n°2 (étage 2)** Elle est alimentée à partir du réservoir Belvédère 750 (100 NGA) et concerne les quartiers suivants :

- Cité des 400 logements route d'Oran
- Coopératives UMA1 et UMA2
- Pépinière (partie basse)

**Zone n°3 (étage 3)** Elle est alimentée à partir du réservoir Belvédère 2000 m<sup>3</sup> (133 NGA) et concerne les quartiers suivants :

- Cité CIA
- Cité des 100 logements
- Pépinière (partie haute)

**Zone n°4 (étage 4)** Elle est alimentée à partir du réservoir Sidi Benhaoua (174 NGA) et concerne les quartiers suivants :

- Cité 5 Juillet
- Beymouth
- Cité Akidlotfi
- Cité HLM
- Cité Mandarins
- Belvédère
- Cité Algérie

**Remarque :** Le réseau de la cité du 5 juillet 1962 était raccordé sur la conduite inter-réservoir DN 350 correspondant à l'étage 4. Lors de la réhabilitation du réseau de distribution, ce raccordement a été supprimé sans aucune étude préalable. Aujourd'hui, seul le branchement situé à l'entrée Est de la cité assure son alimentation.

**Zone n°5 (étage 5)** Elle est alimentée à partir du réservoir Souk Elil (231 NGA) et concerne les quartiers suivants :

- Cité 5 juillet (partie haute)
- Cité policière
- Cité Bory
- Cite Djebli (partie haute)
- Communiquer avec sayada

**Zone n°6 (étage 3)** Elle est alimentée à partir du réservoir Fort de l'Est, 2000 m<sup>2</sup> (145 NGA) et concerne les quartiers suivants :

- Centre-ville
- Derb et Tabana
- Avenue Raynal

**Zone n°7 (étage 4)** Elle est alimentée à partir du réservoir Radar (côte Est), 2000 m<sup>2</sup> (185 NGA) et concerne les quartiers suivants :

- Cité ALN (ex 800 logs)
- La maison de Hana
- Cité des 400 logs
- Cité AADL
- Cité des 308 logs
- Cité des 348 logs
- Cité des 350 logs
- Pôle Université
- 600 logs

**Zone n°8 (étage 1)** Elle est alimentée à partir du R1 Kharouba, 1000 m<sup>2</sup> (95 NGA) et concerne le quartier de Kherroubi 1 étage

**Zone n°9 (étage 2)** Elle est alimentée à partir du Réservoir R2 Kharouba 1000 m<sup>2</sup> (127 NGA) et concerne le quartier de Kharouba 2" étage

Groupement AQUATEC/SGI/INFRABEL 31

**Zone n°10 (étage 3)** Elle est alimentée à partir du R3 Kharouba 1000 m (133 NGA) et concerne la cité des 600 logements et le pôle universitaire. Remarque : Le réservoir R3 a été conçu au départ pour alimenter la cité des 600 logements, la cité universitaire, le complexe sportif universitaire... Mais en raison d'une faible pression cette zone continue d'être alimentée à partir du réservoir Côte Est. Par ailleurs, suite à l'étude du système d'alimentation de la ville de Mostaganem (25 000 m<sup>3</sup>/j à partir de l'ancienne station de traitement du Chéelif), le réservoir R3 a été utilisé comme bac tampon et ses conduites de distribution ont servi à raccorder la deuxième station de pompage située en contrebas.

**Zone n°11 (étage 4)** Elle est alimentée à partir du R4 kharouba 1000 m (160 NGA) et concerne les quartiers suivants

- Pole de la santé
- Protection civile
- Centre de formation professionnelle (CFPA)

**Zone n°12 (étage 1)** Elle est alimentée à partir du réservoir de la Forêt récréative (93 NGA) et concerne la cité des 544 lots. Remarque : La zone 12, reliée au réservoir de la Forêt récréative, était auparavant alimentée par la source moulin Bigorre. Avec l'augmentation de la population et l'évolution de la demande, l'alimentation du réservoir a été opérée directement sur le réseau de distribution de la zone 7 qui lui est limitrophe. Cette opération est contre indiquée, car elle perturbe le fonctionnement du réseau amont en provoquant des chutes de pression aux heures de pointe

**Zone n°13 (étage 1)** Elle est alimentée à partir du réservoir 250 m (50 NGA) et concerne Kharouba plage.

Groupement AQUATEC/SGI/INFRABEL 32

**Zone n°14 (étage 5)** Elle est alimentée à partir du réservoir Nador 5000 m<sup>3</sup> (205 NGA) et concerne les quartiers suivants :

- Zone ITA
- Cité 5 juillet (partie ouest)
- Zone OAIC
- Belvédère

**Remarque :** Pendant la sécheresse, la zone 14 qui comprend de nombreux logements et des équipements importants (cliniques, cité universitaire...) avait fait l'objet d'une étude. Spécifique. Une jonction a été faite sur le réseau de cette zone pour alimenter les cités limitrophes (Belvédère, Bory et coopératives) Une seconde jonction a été opérée par la suite sur la conduite d'adduction pour alimenter la partie Ouest (Zone 15 et zone 16 situées sur la route d'Oran et Salamandre) qui compte environ deux fois plus d'habitants que la zone 14 Nador.

**Zone n°15 (étage 2)** Elle est alimentée à partir du réservoir Chemin des Crêtes 2000 m<sup>3</sup>(112 NGA) et ZHUN III et la route d'Oran.

**Zone n°16 (étage 1)** Elle est alimentée à partir d'un réservoir situé face à l'Enasucre 1000 m<sup>3</sup> (83 NGA) et concerne les quartiers suivants :

- Cités des 1700 logements LSP Salamandre
- Zone OROLAIT
- Zone Raquettes

**Zone n°17 (étage 3)** Elle est alimentée à partir du réservoir Citronnier (130 NGA) et concerne Tigditt.

### 6.1 Récapitulatif :

<u>Les étages</u>	<u>Les Zones</u>
Etage N°1	1, 8, 12, 16,13
Etage N°2	2, 9,15
Etage N°3	3, 6,10 ,17
Etage N°4	4, 7, 11
Etage N°5	5, 14

**Tableau III.1** : Les étages de distribution de Mostaganem

### III.3. Caractéristiques et règles générales d'une STEP

On peut poser comme règle générale qu'un (1) m<sup>3</sup> d'eau à une altitude de 100 m a une énergie potentielle de 0,272 kWh [10]. A partir de cette règle, les STEP doivent donc mobiliser des grands volumes d'eau pour stocker une quantité significative d'énergie.

Pour choisir quel type d'installation serait la plus adaptée pour un site donné, une STEP est généralement caractérisée par sa puissance de pompage-turbinage, son rendement sur un cycle, l'énergie qu'elle peut stocker et restituer ainsi que la durée totale d'un cycle. Ces différentes caractéristiques sont en réalité fonction d'un facteur important à exploiter et qui est le volume du bassin inférieur.

Le bassin supérieur étant créé par le réservoir, son volume, sa courbe "hauteur-volume", sa surface... sont définis et fixes.

### III.3: Déroulement du projet :

Après analyse du réseau de distribution d'eau potable au niveau de la localité de Mostaganem et après investigations sur le terrain avec le soutien des ingénieurs des services

d'hydraulique et d'ADE dans le but de trouver un site ou des sites pour l'implantation de notre système de pompage-turbinage, nous avons opté pour deux solutions :

**Solution1** : exploitation de l'installation ou des installations existantes (tuyères et pompes) utilisant aussi les réservoirs sur place.

En effet et d'après les schémas du réseau d'AEP, nous estimons que plusieurs sites sont favorables à l'installation de notre centrale de pompage-turbinage, appuyés surtout par la géographie spécifique de la ville de Mostaganem qui dispose de plusieurs monts et hauteurs nécessaires pour l'installation de centrale hydroélectriques (beau coup de parties du réseau fonctionne sur le principe de gravité).

**Solution2** : proposer une nouvelle installation.

Profitant aussi de la nature géographique de la ville de Mostaganem, nous avons mené une étude sur terrain et sur le plan théorique pour prouver qu'en effet un tel système peut être envisageable et pourra avoir beaucoup d'avantages énergétique pour cette ville et il pourra même être généralisé à d'autres villes disposant des mêmes atouts que la ville de Mostaganem.

#### **III.4.1. Solution 1 : Exploitation des installations existantes**

A titre d'exemple, nous allons proposer le site reliant le réservoir de H'chem et celui de Debdaba comme illustré sur la figure suivante pour faire les calculs nécessaires à l'évaluation des performances énergétiques de cette nouvelle installation :

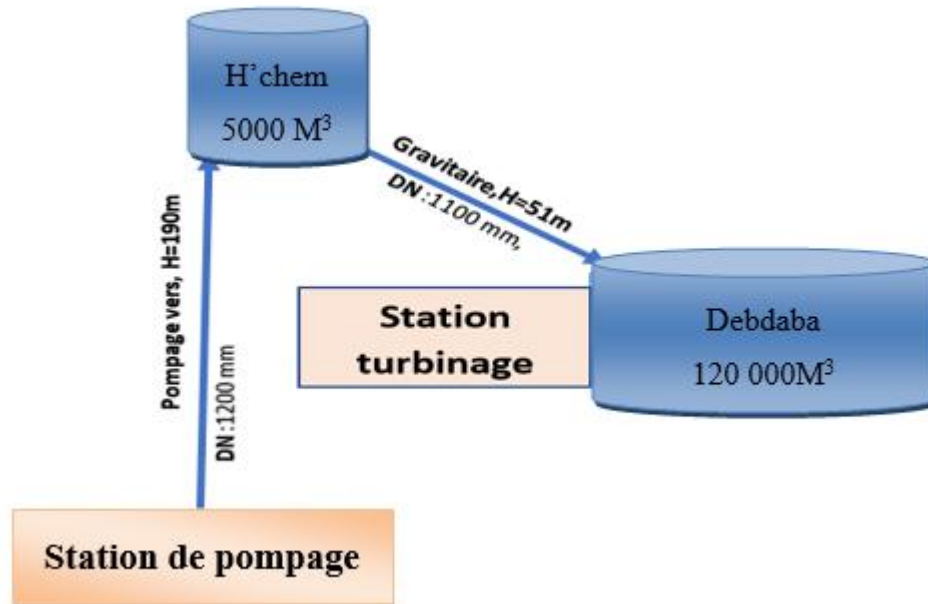


Figure. III-4 : Station pompage-turbinage

#### III.4.1.1. Données de départ :

Quelques données de départ sont nécessaires pour mener à bien ce projet :

- D'abord, on doit savoir que le pompage, dans cette première solution n'a pas une grande importance car il existe déjà sans notre système (station de pompage de Kharrouba pour acheminer l'eau jusqu'au réservoir d'El'Hchem) mais pour calculer le cycle de pompage-turbinage, nous aurons besoin de savoir la durée de pompage spécifique pour le turbinage.
- Par ailleurs, le turbinage est la seule opération nouvelle dans ce système. Il dépend de deux critères :
  - Le niveau du réservoir inférieur de Debdaba : il ne faut pas qu'il soit plein ou à la rigueur il faut qu'il y soit une consommation régulière (débit sortant vers le citoyen important et régulier),

- La consommation du citoyen : elle doit être supérieure ou égale au débit du turbinage.
- Pour le choix du groupe turbine-pompe, l'installation existante nous impose de séparer la turbine de la pompe (groupe séparé) étant donné que les deux conduites celle de pompage et celle de turbinage sont séparées elles même.
- Dans cette étude, le rendement des pompes sera fixé à 0,8 et le rendement des turbines à 0.9, donc :

$$\eta_{p-t} = \eta_p * \eta_t = 0,9 * 0,8 = 0,72$$

- Données complémentaires : viscosité cinématique de l'eau  $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  et masse volumique de l'eau  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ .

#### **III.4.1.2.Détermination des temps de pompage et turbinage :**

Théoriquement, nous avons plusieurs scénarios possibles :

**Cas1** : Réservoir supérieur plein ou semi-plein.

**Scénario1** : Réservoir inférieur vide (le cas optimal pour le turbinage).

**Scénario2** : Réservoir inférieur plein mais débit de consommation sortant du réservoir  $\geq$  débit turbine (turbinage possible).

**Scénario3** : Réservoir inférieur plein mais débit consommation faible  $\Rightarrow$  pas de turbinage.

**Cas 2** :

**Scénario4** : Réservoir supérieur pas suffisamment plein ou vide  $\Rightarrow$  pas de turbinage.

Le problème pour notre étude est que nous ne disposons pas de statistiques sur la consommation quotidienne de l'eau par le citoyen mostaganémois ni aussi sur la



consommation de l'électricité, mais pour une première estimation basée sur l'analyse intuitive et pratique des habitudes de notre société, on peut supposer que le turbinage commence à 14h00 jusqu'à minuit soit 10 heures de turbinage et ceci en respect de la règle (Eq. II.47) de fonctionnement du système de pompage-turbinage qui, pour rappel, stipule que :

$$t_{\text{pompage}} * q_v \text{ pompage} = t_{\text{turbinage}} * q_v \text{ turbinage} = \text{volume réservoir}$$

On trouve alors les heures de fonctionnement suivantes :

$$t_{\text{pompage}} = 1\text{h} ; t_{\text{turbinage}} = 10\text{h}$$

### III.4.1.3. Calcul énergétique :

#### III.4.1.3.1.Phase de pompage :

##### 1- Calcul des pertes de charge :

###### ❖ Pertes de charge singulières :

Puisque nous ne disposons pas d'informations détaillées sur les sources de pertes de charge singulières d'une part, et d'autre part, généralement elles sont négligeables devant les pertes linéaires, il est impératif de les négliger dans notre étude.

###### ❖ Pertes de charge linéaires (régulières) :

- La conduite sur le terrain (utilisée par les services d'hydraulique) est en acier et d'après la littérature le coefficient des pertes de charge linéaire  $\lambda$  dans notre cas est compris entre [0.01 et 0.02] [10].
- Sachant que le débit de pompage est égal à  $Q_{v_p} = 1.678 \text{ m}^3/\text{s}$  (soit  $6041.7 \text{ m}^3/\text{h}$ ) (donnée fournie par l'ADE), on calcule le nombre de Reynolds par la relation (II 26) et on obtient :

$Re = 1780413$  donc régime turbulent.

- Ensuite on calcule le coefficient des pertes de charge  $\lambda$  à partir de la relation :

$\lambda = 0.01$  (compris dans l'intervalle de la littérature).

- Calcul des pertes de charge linéaires  $\Delta H_{Lp}$  :

A partir de la relation (II 24) on calcule les pertes de charge linéaires au niveau de la conduite de pompage. Sachant que la longueur est égale à  $L = 1300$  m on obtient :

$$\Delta H_{Lp} = 1.22 \text{ m}$$

### **2- Calcul de la hauteur manométrique de la pompe :**

Elle est obtenue par la relation (II 35) :

$$H_p = 191.22 \text{ m}$$

### **3- Calcul de la puissance de la pompe :**

A partir de la relation (II 32) :

$$P_p = 3934633 \text{ W} = 3934.633 \text{ KW} = 3.9 \text{ MW}$$

### **4- Calcul de la quantité d'énergie consommée en pompage $E_p$ :**

$$E_p = 3934.6 \text{ kWh}$$

#### **III.4.1. 3.2. Phase de turbinage :**

##### **1- Calcul des pertes de charge :**

Partant de la même remarque sur les pertes de charge singulières en pompage qui seront négligées aussi en turbinage sur la base des mêmes conditions de fonctionnement, on va calculer seulement les pertes régulières (linéaires).

- Sachant que le débit de turbinage est égal à  $Q_{v_t} = 162 \text{ l/s}$  (soit  $583.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ) (donnée fournie par l'ADE), on calcule le nombre de Reynolds par la relation (II 26) et on obtient :

$Re = 187513$  donc régime turbulent.

- Ensuite on calcule le coefficient des pertes de charge  $\lambda$  à partir de la relation :

$\lambda = 0.015$  (compris dans l'intervalle de la littérature).

- Calcul des pertes de charge linéaires  $\Delta H_{L_t}$  :

A partir de la relation (II 35) on calcule les pertes de charge linéaires au niveau de la conduite de turbinage. Sachant que la longueur est égale à  $L = 9000 \text{ m}$  on obtient :

$$\Delta H_{L_t} = 0.18 \text{ m}$$

- 2- Calcul la hauteur de la turbine est donc égale :** par la relation (II 34)

$$H_t = 50.82 \text{ m}$$

- 3- Calcul la puissance de la turbine :** par la relation (II 31)

$$P_t = 72673 \text{ w} = 72.673 \text{ kW} \quad (\text{II 31})$$

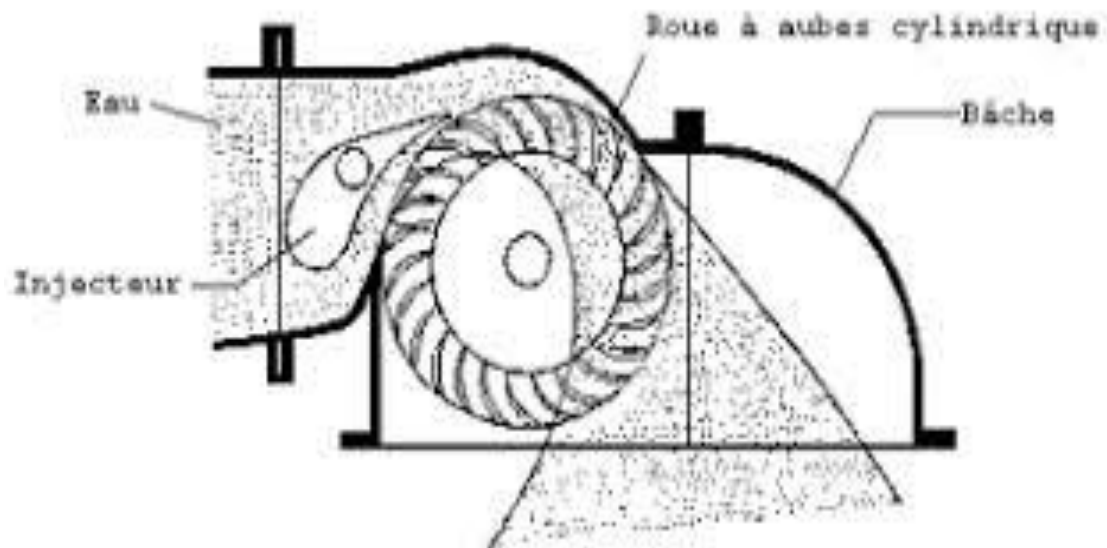
- 4- Choix du type de turbine :**

A partir du tableau et du diagramme de classification et de choix des turbines et en tenant compte des données et résultats obtenus (Débit de turbinage, hauteur et puissance), la turbine qui répond à nos conditions de travail est : **la turbine Cross flow.**

- **Présentation de la turbine Banki-Mitchell (Cross flow):**

La turbine Cross flow, appelé aussi turbine à flux traversant, est une machine à action qui a ceci de particulier que l'eau traverse deux fois la roue. De construction simple, elle est constituée de trois parties principales.

- Un injecteur de section rectangulaire et dont le débit est réglé à l'aide d'une aube profilée rotative, similaire à une vanne papillon.
- Une roue en forme de tambour, dotée d'aubes cylindriques profilées.
- Un bâti enveloppant la roue et sur lequel sont fixés les paliers de la turbine.



**Figure III-5:** Turbine Cross flow [10]

En général sa vitesse de rotation est faible, ce qui justifie l'emploi d'un multiplicateur pour la coupler à une génératrice.

- **Calcul de la quantité d'énergie stockée en turbinage Et :**

$$Et = 581.38 \text{ kWh}$$

-Nous résumons les résultats dans le tableau suivant :

	Pompage	Turbinage
Volume Réservoir (m <sup>3</sup> )	5000	5000
Longueur (m)	700	9000
Diamètre (m)	1.2	1.1
$\lambda$	0.01	0.015
$\eta$	0.8	0.9
Débit (m <sup>3</sup> /s)	1.678	0.162
Nombre de Reynolds	1780413	187513
Pertes de charge(m)	1.22	0.18
Hauteur de la pompe (m)	190.64	50.81
Hauteur manométrique (m)	190	51
Puissance (kW)	3900	72.745
Heures de fonctionnement(h)	1	10
Energie (kWh)	3934.6	727.45

**Tableau III.2** : les résultats d'installation existante.

**A- Calcul du rendement du cycle pompage-turbinage :**

$$\eta_{\text{sys\_P-T}} = 0.185 = 18.5 \%$$

**B- Vérification de la normalité des résultats obtenus :**

Sachant que, d'après la référence [10], un m<sup>3</sup> d'eau à une hauteur de 100 m produit une quantité d'énergie de turbinage équivalente à 0.272 kWh, notre système pour cette première solution produit une énergie qui presque équivalente à cette valeur de référence, soit :

$$Et_{unitaire} = \frac{Et}{V_{reservoir}} \times \frac{100}{Ht} = \frac{727.45}{5000} \times \frac{100}{51} = 0.285 \text{ kWh}$$

Pour rappel, la valeur de référence est égale à 0.272 kWh.

$Et_{unitaire}$  : Energie de turbinage obtenue pour un (1) m<sup>3</sup>.

#### **III.4.1.4. Estimation globale des potentialités de pompage-turbinage à Mostaganem :**

L'étude menée a été faite sur un exemple mais l'analyse du réseau d'AEP montre que les potentialités d'installation de systèmes de pompage-turbinage à partir d'installations déjà existantes sont multiples, on peut citer :

- Entre le réservoir d'El'Hchem et le réservoir de Sayada,
- Entre le réservoir de Debdaba et le réservoir de Sidi Benhaoua,
- Entre le réservoir de Sidi Benhaoua et le réservoir de Belvédère.

Si on tient compte de ces potentialités la puissance de turbinage obtenue peut s'élever à plusieurs centaines de kW et le rendement peut aussi s'améliorer.

#### **III.5. Solution 2 (Nouvelle installation) :**

##### **III.5.1. Principe et données initiales :**

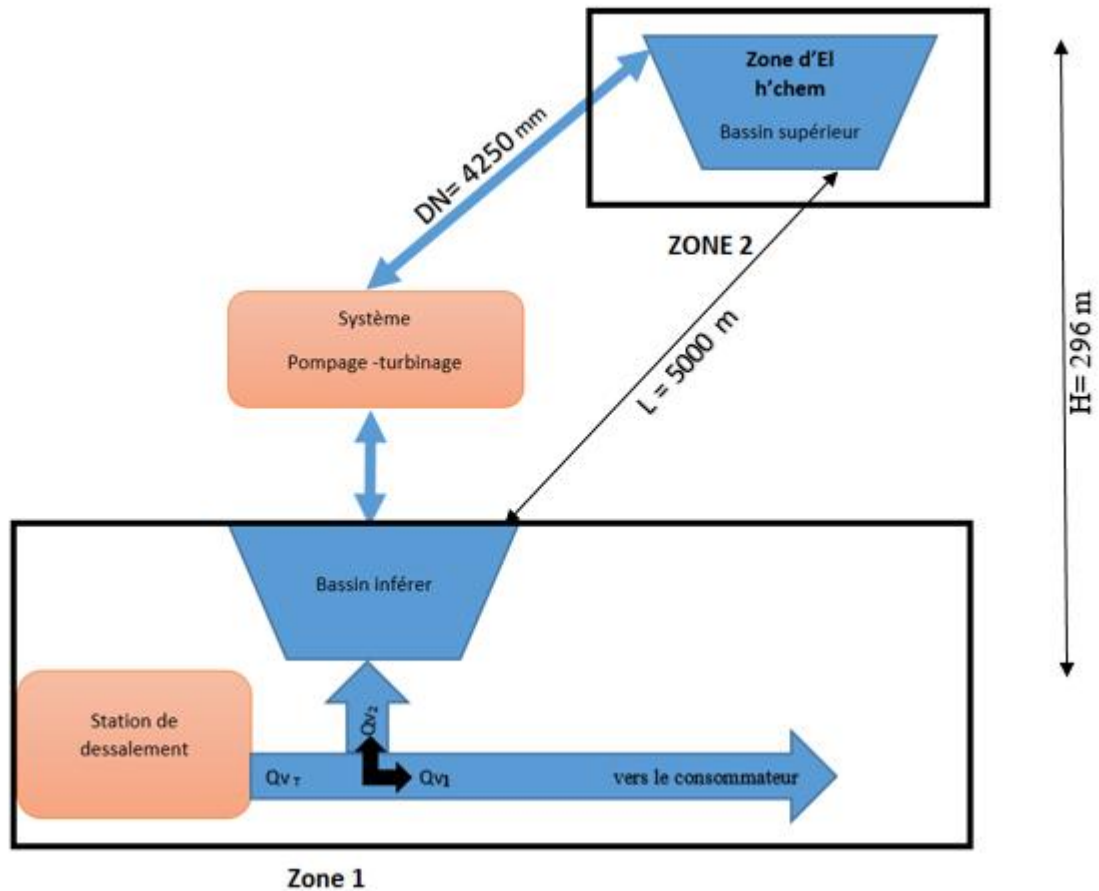
- La nouvelle installation est reliée à la station de dessalement.
- Au niveau de cette station on a deux débits, le premier pour la consommation usuelle et le deuxième sera destiné à la nouvelle station de pompage turbinage.
- La nouvelle station de pompage-turbinage fonctionnera qu'en période de non consommation ou de moindre consommation usuelle (pour le pompage) qui sera acheminée vers le Réservoir supérieur (nouveau) qui sera placé sur le Mont d'El'Hchem ⇒ une énergie importante sera stockée et disponible à tout moment pour le turbinage qui sera opéré par un nouveau bassin inférieur placé au-dessous du bassin supérieur.



**Figure III-6** : station dessalement de Mostaganem



**Figure III-7** : endroit du bassin supérieur



**Figure. III-8:** nouveau système pompage-turbinage

- En raison de l'isolation de cette installation par rapport au réseau d'AEP, le groupe pompe-turbine est du type ternaire (turbine et pompe ensemble).
- On estime que la zone géographique choisie (Fig. III-7) pour installer le réservoir supérieur peut accueillir un grand réservoir avec un volume allant jusqu'à 50000 m<sup>3</sup>.
- Le réservoir inférieur aura la même capacité que le réservoir supérieur et sera placé au même niveau et à côté de la station de dessalement (Fig. III-8).

$$V_{\text{bassin sup}} = V_{\text{bassin inf}} = (100 \times 100 \times 5) = 50000 \text{ m}^3$$

### III.5.2. Phase de pompage :



## 1- Nombre d'heure de pompage :

Deux Critères pour le pompage :

- Faible consommation électrique (pour activer les pompes en prélevant de l'énergie électrique du réseau).
- Faible consommation d'eau pour remplir le bassin supérieur.

A partir de ces deux critères, on estime que le pompage peut être fait de (7h  $\Rightarrow$  12h) = 5h de pompage.

## 2-Calcul des pertes de charge :

### ❖ Pertes de charge singulières :

Etant donné que les conduites de pompage et de turbinage ne sont pas assez longues et ne disposant pas de beaucoup de sources de pertes de charge singulières, il est impératif de les négliger devant les pertes linéaires.

### ❖ Pertes de charge linéaires (régulières) :

- La conduite est en acier et d'après la littérature le coefficient des pertes de charge linéaire est compris entre [0.01 et 0.02].
- Sachant que le débit de pompage est égal à  $Q_{v_p} = 2780 \text{ l/s} = 2.78 \text{ m}^3/\text{s}$  (d'après l'équation (II 45)), on calcule le nombre de Reynolds par la relation (II 26) et on obtient :

$Re = 832848.5$  donc régime turbulent.

- Ensuite on calcule le coefficient des pertes de charge  $\lambda$  à partir de la relation :

$\lambda = 0.01$  (compris dans l'intervalle de la littérature).

- Calcul des pertes de charge linéaires  $\Delta H_{Lp}$  :

A partir de la relation (II 24) on calcule les pertes de charge linéaires au niveau de la conduite de pompage sachant que la longueur est égale à  $L = 5000$  m on obtient :

$$\Delta H_{Lp} = 0.023 \text{ m}$$

**3-Calcul la hauteur de la pompe est donc égale :**

Par la relation (II 35), on obtient :  $H_p = 296.023$  m

**4-Calcul la puissance de la pompe :**

Par la relation (II 32),  $P_p = 10091350\text{W} = 10091.35\text{kW} = 10.09$  MW

**5-Calcul de la quantité d'énergie consommée en pompage  $E_p$  :**

$$E_p = 50457 \text{ kWh}$$

### **III.5.3. Phase de turbinage :**

**1- Nombre d'heure de turbinage :**

Le turbinage sera fait aux heures de forte consommation électrique. On va prendre l'exemple de la consommation électrique en été, a priori, elle atteint son pic pendant deux périodes,

(13h  $\Rightarrow$  17h) et (20h  $\Rightarrow$  00h) = 8h de turbinage.

**2- Calcul des pertes de charge :**

Partant de la même remarque sur les pertes de charge singulières en pompage qui seront négligées aussi en turbinage sur la base des mêmes conditions de fonctionnement, on va calculer seulement les pertes régulières (linéaires).

**Pertes de charge linéaires (régulières) :**

Partant de la même remarque sur les pertes de charge singulières en pompage qui seront négligées aussi en turbinage sur la base des mêmes conditions de fonctionnement, on va calculer seulement les pertes régulières (linéaires).

- La conduite est la même pour le pompage et turbinage
- Sachant que le débit de turbinage est égal à  $Q_{v_t} = 1740 \text{ l/s} = 1.74 \text{ m}^3/\text{s}$  à partir l'équation (II 45), on calcule le nombre de Reynolds par la relation (II 26) et on obtient :

$Re = 521279.2$  donc régime turbulent.

Ensuite on calcule le coefficient des pertes de charge  $\lambda$  à partir de la relation :

$\lambda = 0.01$  (compris dans l'intervalle de la littérature).

- Les pertes de charge linéaires au niveau de la conduite de turbinage sachant que la longueur est égale à  $L = 5000 \text{ m}$  :

$\Delta H_{L_t} = 0.01 \text{ m}$

**3-Calcule la hauteur de la turbine est donc égale :**

Par la relation (II 34),  $H_t = 295.99 \text{ m}$

**4-Calcule la puissance de la turbine :**

Par la relation (II 31),  $P_t = 4547134.5 \text{ W} = 4547.134 \text{ kW} = 4.5 \text{ MW}$

**5-Calcul de la quantité d'énergie stockée en turbinage Et :**

$E_t = 36377 \text{ kWh}$

**6-Choix du type de turbine :**

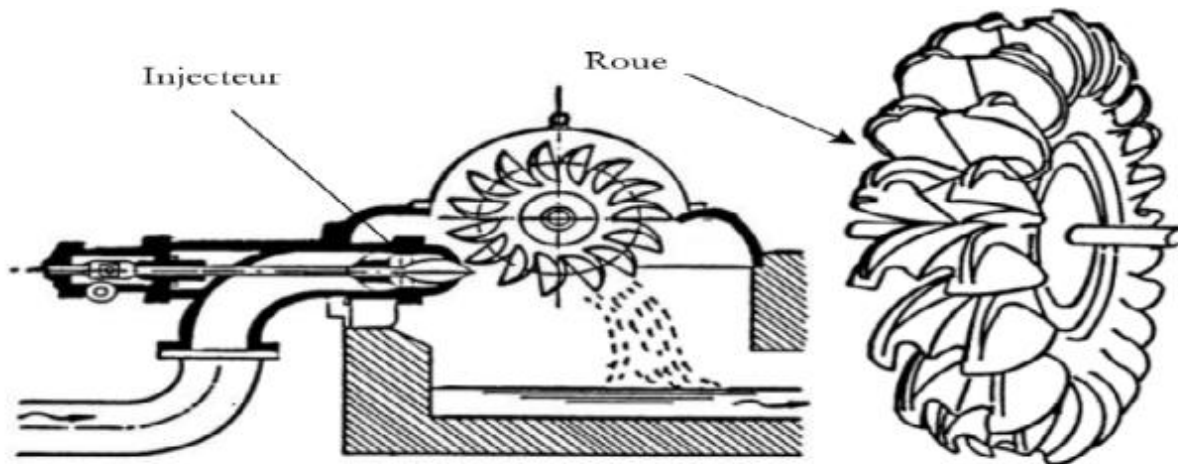
A partir du tableau et du diagramme de classification et de choix des turbines et en tenant compte des données et résultats obtenus (Débit de turbinage, hauteur et puissance), la turbine qui répond à nos conditions de travail est : **la turbine Pelton ou la turbine Francis.**

- **Présentation de la turbine Pelton :**

Elles sont utilisées généralement pour les centrales de hautes chutes, à faible débit. Elles sont très peu présentes sous nos contrées.

La turbine Pelton est une machine à action dont l'axe peut être vertical ou horizontal. Celle-ci est composée d'une roue mobile garnie à sa périphérie d'augets en double cuillère et dont le distributeur est fait d'injecteurs ; leur nombre peut varier de 1 à 6.

La vitesse nominale de la turbine varie de 500 tr/min à 1500 tr/min, ce qui permet un couplage direct sans multiplicateur à la génératrice électrique [11].

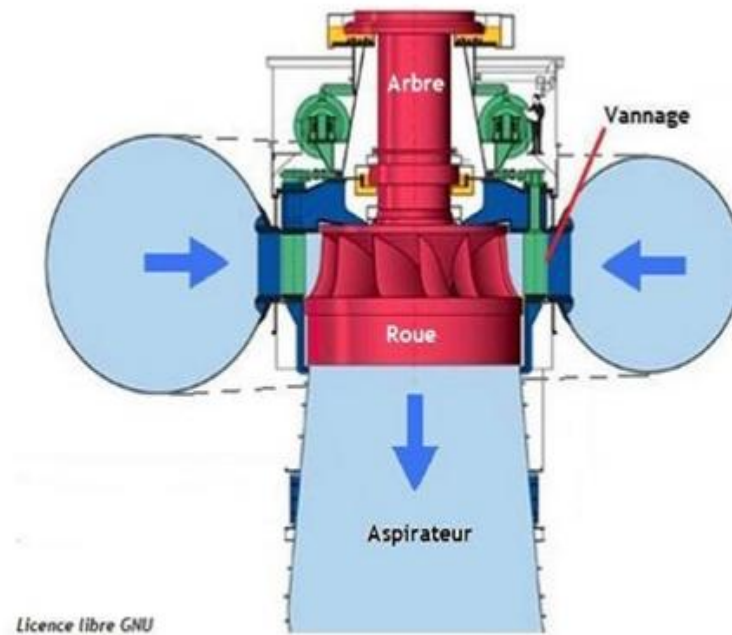


**Figure III-9 :** Schéma représentatif de la turbine Pelton [12]

- **Présentation de la turbine Francis :**

La turbine Francis est utilisée pour des faibles variations de débit (débits moyens entre 100 l/s et 6000 l/s). Elle s'adapte bien aux chutes moyennes de 10m à 100m. Elle a un bon

rendement et une vitesse de rotation élevée (1000 tr/min). La turbine Francis est une turbine à réaction de type radial à axe vertical. Et est adaptée pour des hauteurs et débits moyens. Son distributeur est enroulé autour de la turbine, l'entrée de l'eau se fait par toute sa périphérie. La sortie de l'eau se fait de manière axiale dans le diffuseur (qui fait office d'aspirateur).



**Figure III-10 : Turbine Francis [12]**

-Nous résumons les résultats dans le tableau suivant :

	Pompage	Turbinage
Volume réservoir (m <sup>3</sup> )	50000	50000 (100×100×5)
Longueur (m)	5000	5000
Diamètre (m)	4.25	4.25
$\lambda$	0.01	0.01
$\eta$	0.8	0.9
Débit (m <sup>3</sup> /s)	2.78	1.74
Nombre de Reynolds	832848.5	521279.2

Pertes de charge(m)	0.023	0.01
Hauteur de la pompe (m)	296.023	295.99
Hauteur manométrique (m)	296	296
Puissance (MW)	10.09	4.5
Heures de fonctionnement(h)	5	8
Energie (kWh)	50457	36377

**Tableau III.3** : les résultats d'une nouvelle installation

**C-Calcul du rendement du cycle pompage-turbinage :**

$$\eta_{\text{Sys\_PT}} = 0.72 = 72\%$$

**D-Vérification de la normalité des résultats obtenus :**

Pour cette deuxième solution, notre système produit une énergie qui est très proche de la valeur de référence, soit :

$$Et_{\text{unitaire}} = \frac{Et}{V_{\text{reservoir}}} \times \frac{100}{Ht} = \frac{36377}{50000} \times \frac{100}{296} = 0.246 \text{ kWh} \cong 0.272 \text{ kWh}$$

**III.6. Conclusion :**

L'étude technique et énergétique d'un système de pompage-turbinage à Mostaganem démontre son potentiel significatif pour contribuer à une production d'énergie durable tout en répondant aux besoins énergétiques et environnementaux locaux. Cependant, cela nécessite une gestion proactive des défis techniques et environnementaux pour assurer une mise en œuvre efficace et durable.



## Conclusion générale et recommandations

En premier lieu et à travers la recherche documentaire qu'on avait faite sur le système de pompage-turbinage, il est important de mentionner que cette technologie représente une solution innovante pour les centrales hydroélectriques, permettant de stocker l'énergie excédentaire pendant les périodes de faible demande pour la réutiliser lorsque la demande est élevée. Cela peut soutenir efficacement les centrales thermiques pendant les interruptions de consommation électrique, améliorant ainsi la stabilité du réseau électrique.

Malgré ces limites, le pompage-turbinage offre un grand potentiel pour diversifier le mix énergétique et améliorer la résilience du réseau électrique, en particulier dans les régions vulnérables aux fluctuations de la demande. Après avoir étudié ce projet dans la ville de Mostaganem, il sera indispensable d'exploiter cette énergie, compte tenu de ses avantages et de ses contraintes particulières, pour déterminer l'étendue de sa viabilité à long terme.

Ainsi, cette étude a montré que la ville de Mostaganem possède des potentialités non négligeables en matière d'installation d'une centrale hydroélectrique travaillant par système de pompage-turbinage que ce soit en exploitant le réseau d'AEP existant ou par l'implantation d'une nouvelle centrale liée à la station de dessalement de la ville. Les résultats obtenus ont montré qu'à peu près un dixième (1/10) du besoin de l'énergie électrique de la ville de Mostaganem peut être assuré par l'introduction du système de pompage-turbinage dans le réseau existant d'AEP et qu'à peu près 90% du besoin de l'énergie électrique de la ville peut être obtenu en construisant une nouvelle installation travaillant par pompage-turbinage dans le Mont d'El-Hchem relié à la station de dessalement tout en ayant un rendement du système tout à fait raisonnable. Cette énergie électrique obtenue par notre système peut couvrir une période pouvant aller jusqu'à 5h par jour en été et plus de 5h par jour en hiver.

Cependant, la mise en œuvre de ce système pose de nombreux défis. En matière d'énergie, la rentabilité dépend des coûts de construction et d'entretien, ainsi que des pertes énergétiques liées au stockage et à la valorisation. A titre de recommandations, pour appuyer



la faisabilité locale de ce système à Mostaganem, il est nécessaire de faire une évaluation minutieuse des ressources en eau disponibles, de la topographie et des infrastructures existantes sans oublier l'analyse statistique de la consommation journalière des citoyens de mostaganem en électricité et en eau potable heure par heure et pendant toute l'année.

## Bibliographie

- [1] : (En ligne), available : <http://www.goodplanet.info/Energie-climat/Electricite/>, consulter le 15 avril 2024.
- [2] : *BP Statistical Review of World Energy*, juin 2019. Fiche du SER sur l'hydroélectricité Site France Hydroélectricité.
- [3] : D. Picault « Exploitation d'un parc éolien en association avec du stockage Énergétique »; Rapport de Projet de Fin d'Études de master en Génie Électrique de L'Institut National Polytechnique de Grenoble; 2007.
- [4] : (en ligne), Différents types de centrales hydroélectriques, available : <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/jeunes-enseignants/pour-les-jeunes/lenergie-de-a-a-z/produire-de-lelectricite/les-differents-types-de-centrales-hydrauliques>, consulter le 22 avril 2024.
- [5] : C. Ferlat, « Le stockage hydraulique gravitaire et la production hydroélectrique sur les Pentas réunionnaises – Etude du stockage de l'énergie photovoltaïque ». [www.island-news.org](http://www.island-news.org), 2009.
- [6] : François Avellan, Pompes et turbines hydrauliques, Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur, Institut de génie mécanique, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2016.
- [8] : Ghelab Rami, Mémoire de Master Hydraulique, [Stockage d'énergie par pompage turbinage] Université Mohamed khider – Biskra, Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Civil et d'Hydraulique, 2018.
- [9] : Données d'ADE Mostaganem.
- [10] : (en ligne), Connaissance des énergies. Hydroélectricité : stations de transfert d'énergie par Pompage (step) (<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite-stations-de-transfert-d-energie-par-pompage-step>), consulté le 20.05.2024.

## BIBLIOGRAPHIE

---

[11] : L. Pestour. Vérification du dimensionnement et procédures de manoeuvres des vannes – barrage de la gileppe, 2016. Université de Liège.

[12] : Rapport (PACER), en Suisse (Petites centrales hydrauliques –le choix, le Dimensionnement et les essais de réception d'une mini-turbine), ISBN 724.747.f 1995.

[13] : Données Direction d'hydraulique de Mostaganem.

[14] : Daniello, Stockage d'énergie : le vrai défi de demain. Technique de l'ingénieur,2016.