



## MEMOIRE DE MASTER

*Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique*

**Option : Conception Des Systèmes D'assainissement**

### **THEME :**

**Turbinages des eaux usées**

### **Présenté par :**

**TABATOUCH Safa**

**Devant les membres du jury**

<b>Nom et Prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
Mme DJOUDAR/HALLAL Dahbia	M.C.A	Président
Mme TOUAHIR Sabah	M.A.A	Examineur
Mr DERNOUNI Youcef	M.A.A	Examineur
Mr DAHMANE Mouloud	M.C.B	Examineur
Mr ZAIBAK Issam	M.A.A	Promoteur

**Session Octobre 2023**

# Remerciements

Tout d'abord, je remercie ALLAH de m'avoir donné la volonté et la sagesse d'accomplir ce travail.

Je tiens encore une fois à remercier mes chers parents pour leur aide, leur soutien, leur confiance, leurs encouragements etc.

Je tiens à remercier ma sœur unique, ma jumelle, qui m'a accompagné tout au long de mon parcours académique.

Merci Rajaa.

Je remercie ma chère tante, qui est mon amie et ma sœur, de m'avoir soutenu jusqu'à la dernière minute

Merci Hibat Allah

Une grande reconnaissance envers mon promoteur Mr

ZAIBAK Issam

Pour sa disponibilité et ses judicieux conseils.

Finalement je remercie toute, le corps pédagogique de l'ENSH et toute personne qui a contribué de près ou de loin au parachèvement de ce modeste travail.

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail d'abord, à mon père et ma mère pour leur soutien.*

*A ma chère sœur jumelle : Rajaa*

*A tous mes familles*

*A tous mes amis qui m'ont accompagné dans mon parcours académique*

*A tous mes enseignants de l'ENSH qui ont contribué à ma formation. Et à tous ceux qui vont lire ce travail.*

## ملخص:

ونظراً للأضرار السلبية التي يلحقها إنتاج الطاقة من الوقود الأحفوري بالبيئة أو بالإنسانية، فإن العالم يسعى إلى إيجاد بدائل لإنتاج الطاقة من مصادر حيوية وطبيعية وغير ضارة بالطبيعة أو الإنسان كالهواء والماء والرياح.....  
ومن البدائل المقترحة نجد إنتاج الطاقة الكهربائية من خلال استغلال مياه الصرف الصحي سواء قبل أو بعد المعالجة باستخدام المحطات الكهرومائية الصغيرة.

**الكلمات المفتاحية:** محطات الطاقة الكهرومائية الصغيرة؛ توربينات، المياه المستعملة.

## Résumé :

Compte tenu des dommages négatifs que la production d'énergie à partir de combustibles fossiles provoque sur l'environnement ou sur l'humanité, le monde cherche à trouver des alternatives à la production d'énergie à partir de sources vitales, naturelles et non nocives pour la nature ou pour l'homme, comme l'air, l'eau, le vent et le soleil.

Parmi les alternatives proposées, on retrouve la production d'énergie électrique grâce à l'exploitation des eaux usées, que ce soit avant ou après traitement, à l'aide de petites centrales hydroélectriques.

**Mots clés :** les petites centrales hydroélectrique ; turbinage ; les eaux usées.

## Abstract:

Given the negative damage that energy production from fossil fuels causes to the environment or to humanity, the world seeks to find alternatives to producing energy from vital, natural sources that are not harmful to nature or humans, such as air, water...

Among the proposed alternatives, we find the production of electrical energy through the exploitation of wastewater, whether before or after treatment using small hydroelectric stations.

**Keywords:** small hydroelectric power plants; turbines; Wastewater.

## Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	2
<b>Chapitre I : les petites centrales hydro-électriques</b> .....	4
<b>Introduction :</b> .....	4
<b>I.1 Définition de petite centrale et leur classification :</b> .....	4
<b>I.2 Choix de lieu de centrale :</b> .....	5
<b>I.3 Le principe de fonctionnement :</b> .....	6
<b>I.4 Les éléments fondamentaux et leurs fonctionnements :</b> .....	7
<b>I.4.1 Les ouvrages de Gini civil :</b> .....	8
<b>I.4.1.3 Chambre de mise en charge :</b> .....	8
<b>I.4.1.2 La centrale :</b> .....	9
<b>I.4.2 Les équipements hydrauliques :</b> .....	10
<b>I.4.2.1 Les turbines :</b> .....	10
<b>I.4.2.2 Le régulateur (5):</b> .....	14
<b>I.4.3 Les équipements électriques :</b> .....	15
<b>I.4.3.1 Le générateur :</b> .....	15
<b>I.4.3.2 Les autres équipements :</b> .....	17
<b>Conclusion :</b> .....	17
<b>Chapitre II : turbinage des eaux usées</b> .....	19
<b>Introduction :</b> .....	19
<b>II.1 Problématique :</b> .....	19
<b>II.2 Les types d'installation de turbines sur le réseau d'assainissement :</b> .....	19
<b>II.2.1 Turbinage avant traitement :</b> .....	19
<b>II.2.2 Turbinage après le traitement :</b> .....	21
<b>II.3 Description technique :</b> .....	22
<b>II.3.1 Le système de dessableur/ dégrilleur :</b> .....	22
<b>II.3.2 Le bassin de décantation :</b> .....	23
<b>II.3.3 Les conduits forcés :</b> .....	23
<b>II.3.4 Le groupe turbogénérateur :</b> .....	23
<b>II.3.5 Autres équipements :</b> .....	23
<b>II.4 Les avantages et les inconvénients de turbinage des eaux usées :</b> .....	24
<b>II.5 La méthodologie :</b> .....	25
<b>II.5.1 Evaluation de potentiel électrique :</b> .....	25
<b>II.5.2 Le choix de type de turbine :</b> .....	26
<b>II.6.2 L'énergie électrique :</b> .....	29

## Table des matières

---

<b>II.6.3 Production électrique annuelle :</b> .....	30
<b>Conclusion :</b> .....	30

**Liste des figures :**

**Chapitre I : les petites centrales hydro-électriques**

<b>Figure I.1</b> : principe de fonctionnement d'une petite centrale hydroélectrique.....	7
<b>Figure I.2</b> : Différents composants d'une microcentrale hydroélectrique.....	7
<b>Figure I.3</b> : Turbine Francis.....	11
<b>Figure I.4</b> : Turbine Kaplan.....	11
<b>Figure I.5</b> : Turbine Pelton.....	13
<b>Figure I.6</b> : Turbine de Cross flow.....	13
<b>Figure I.6</b> : Principe de régulation « vitesse débit ».....	14
<b>Figure I.7</b> : Principe de régulation « charge fréquence ».....	15

**Chapitre II : turbinage des eaux usées**

<b>Figure II.1</b> : turbinage avant épuration.....	20
<b>Figure II.2</b> : turbinage après épuration.....	21
<b>Figure II.3</b> : plan d'évaluation de la station.....	25
<b>Figure II.2</b> : la plage de fonctionnement des turbines.....	26
<b>Figure II.3</b> : vis d'Archimède.....	27
<b>Figure II.4</b> : procédure de rentabilité.....	28



*Introduction générale*

## Introduction générale

L'hydroélectricité est une énergie électrique renouvelable obtenue en convertissant l'énergie hydraulique de divers flux d'eau naturels en électricité. L'énergie cinétique du courant d'eau est convertie en énergie mécanique par une turbine hydraulique, puis en énergie électrique par un générateur électrique.

Considérant que le monde connaît de grands développements dans le domaine des énergies renouvelables, des tentatives sont faites pour trouver une alternative au pétrole et le remplacer par une énergie renouvelable basée sur des ressources vitales telles que l'eau, l'air et le soleil. L'un des derniers développements dans ce domaine est la production d'énergie électrique à l'aide de turbines à eaux usées.

Le but de ces travaux est d'introduire des turbines à eaux usées et la possibilité d'implanter une petite centrale hydroélectrique sur le réseau d'égouts, dans le but d'exploiter le potentiel énergétique contenu dans cette eau.

Nous divisons notre travail principalement en deux chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous avons présenté la petite centrale hydraulique à travers sa définition et son principe de fonctionnement ainsi que les différents équipements qui composent la petite centrale notamment le génie civil et électromécanique.
- Le chapitre 2 présente les aspects techniques des turbines d'épuration, leurs avantages et inconvénients, et mentionne les normes et exigences qui doivent être respectées dans les petites centrales hydroélectriques.

*Chapitre I : les petites centrales hydro-électriques*

## Chapitre I : les petites centrales hydro-électriques

### Introduction :

Les flux énergétiques d'origine naturelle sont utilisés pour produire des énergies renouvelables (soleil, vent, eau, végétation, géothermie...). Les énergies renouvelables constituent donc à bien des égards une alternative aux énergies fossiles, car elles sont inépuisables, permettent une production distribuée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux, n'émettent pas de gaz à effet de serre, ne génèrent pas de déchets et jouent un rôle important dans la protection de l'environnement.

Aujourd'hui, l'hydroélectricité est la principale source de production d'énergie renouvelable dans le monde, les pays européens couvrant plus de 30 % de leurs besoins nationaux en électricité.

L'hydroélectricité est le processus de conversion de l'énergie hydraulique en énergie électrique en utilisant l'énergie des rivières et des chutes, de sorte que l'eau utilise son poids et sa vitesse pour faire fonctionner des turbines et convertir l'énergie hydraulique en énergie mécanique. La turbine entraîne ensuite un générateur qui convertit l'énergie mécanique en électricité. (1)

Ce chapitre présente les petites centrales hydroélectriques basées sur des mini-centrales électriques, qui deviennent de plus en plus populaires.

### I.1 Définition de petite centrale et leur classification :

Une petite centrale hydro-électrique est définie comme une installation de production d'électricité d'une puissance inférieure à 10 qui s'appuie sur la force hydraulique. On classe les petites centrales hydro-électriques en plusieurs catégories suivant la puissance :

- Pré- électrification pour une puissance inférieure à 1 MW.
- « kits » hydro-domestique pour une puissance entre 500 Watts et 2KW ;
- Pico-centrale pour une puissance de 2 à 50 KW ;
- Microcentrale de 50-500KW, et pour des certaines instances internationales mettent la limite de microcentrale à 300KW, d'autre à 1MW ;
- Mini-centrale entre 500 et 2000 KW ;

- Petite centrale jusqu'à 10 MW, et aux états unis jusqu'à 30 MW.(2)

La classification de petite centrale hydroélectrique est basée sur la manière dont l'eau est captée et acheminé par la turbine, l'emplacement de la turbine et la hauteur de chute utilisée. Il existe deux grandes catégories de petites centrales électriques :

- Installations à basse pression : sont situées le long d'un cours d'eau ou d'un canal de dérivation. Dans ces installations, la prise d'eau est la structure la plus cruciale. Le but est de rediriger le débit requis vers la turbine ou un canal de dérivation, tout en permettant les crues. Soit la centrale électrique est rattachée au barrage, soit positionnée à chaque extrémité d'un canal existant. Les chutes tombent entre 2 et 20 mètres, avec une pression de seulement 0,2 à 2 bars dans la turbine.
- Utilisation de systèmes moyenne et haute pression dans les rivières, les sources de montagne, les réseaux d'eau potable et les circuits hydrauliques industriels, et le tuyau est l'élément principal de cette petite centrale électrique. En plus des éléments répertoriés dans la première catégorie, il existe une clôture située entre l'alimentation en eau et la centrale électrique. (3)

## I.2 Choix de lieu de centrale :

L'emplacement de la centrale hydroélectrique est déterminé par les précipitations et les conditions du terrain, ce qui en fait l'emplacement le plus approprié pour la petite ville de Kabylie en Algérie. Les principaux éléments qui caractérisent une centrale hydroélectrique sont : la Hauteur de la chute et le débit nominal.

Le débit instantané du canal dépend des précipitations et des conditions glaciaires, ainsi que de la quantité d'eau que le barrage peut retenir, et est fonction de la saison. Le débit instantané varie d'un jour à l'autre, mais est généralement à son plus bas vers la fin de la saison sèche si elle marqué. Le concept de débit moyen permet de mieux évaluer le potentiel énergétique d'une installation lors de la planification des infrastructures de stockage. Le faible débit, soit le débit minimum de la rivière sur une période de 24 heures, détermine la performance potentielle minimale du système. Si des observations hydrologiques (mesure de la vitesse de l'eau) sont effectuées sur plusieurs années, une valeur moyenne peut être déterminée pour Connaître le débit minimum à atteindre chaque année (4)

### I.3 Le principe de fonctionnement :

Le principe de base est qu'un objet tombant soumis à la gravité terrestre fournit de l'énergie. Il en va de même pour les cascades. L'eau courante est donc une source potentielle d'énergie, quelle que soit sa destination. Ce principe s'applique particulièrement aux canalisations situées dans les zones montagneuses. Chaque région montagneuse dispose de nombreux réseaux d'approvisionnement (eau potable et irrigation) et d'évacuation des eaux usées (eaux usées), et les dénivelés entre l'amont et l'aval jouent un rôle important.

Cette différence de hauteur entraîne souvent une pression trop élevée pour la conduite. Par la suite, il devra être démantelé au moins partiellement pour assurer la pérennité du réseau. La méthode traditionnelle consiste à installer un dispositif de décompression dans le réseau. Ces dispositifs de réduction de pression sont conçus pour réduire la pression de l'eau en dessous d'une certaine limite de charge. Or, la pression est de l'énergie potentielle. Au lieu de libérer et de perdre de l'énergie via ces détendeurs, l'énergie peut être convertie en électricité en intégrant des turbines hydroélectriques dans le réseau d'eau. L'énergie disponible est ainsi proportionnelle à la chute de l'eau (objet sous gravité), mais est également fonction de la masse volumétrique (et donc du débit) de l'eau. Ces deux informations de base déterminent les performances de tout système. Le principe utilisé dans ce type de centrale est de convertir l'énergie générée par la chute de la masse d'eau en énergie mécanique à l'aide d'une roue hydraulique. Ce dernier utilise un générateur ou générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. (5)

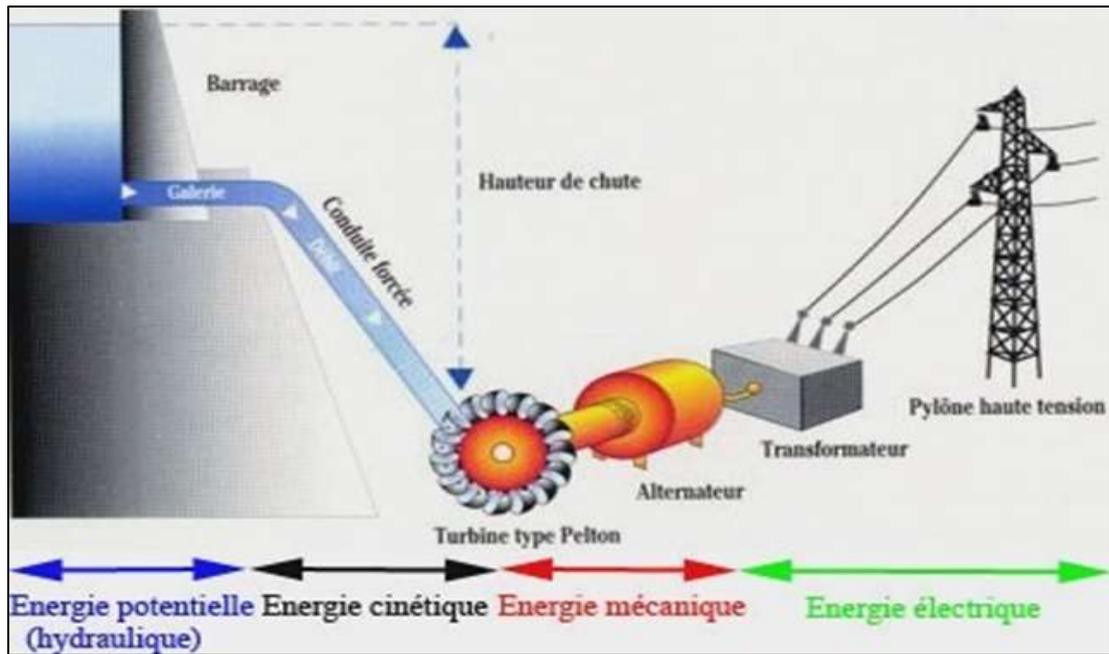


Figure I.1: principe de fonctionnement d'une petite centrale hydroélectrique (6)

#### I.4 Les éléments fondamentaux et leurs fonctionnements :

On distingue trois types de travaux pour la réalisation d'une microcentrale hydroélectrique : Les ouvrages de génie civil, les équipements hydrauliques et les équipements électriques.

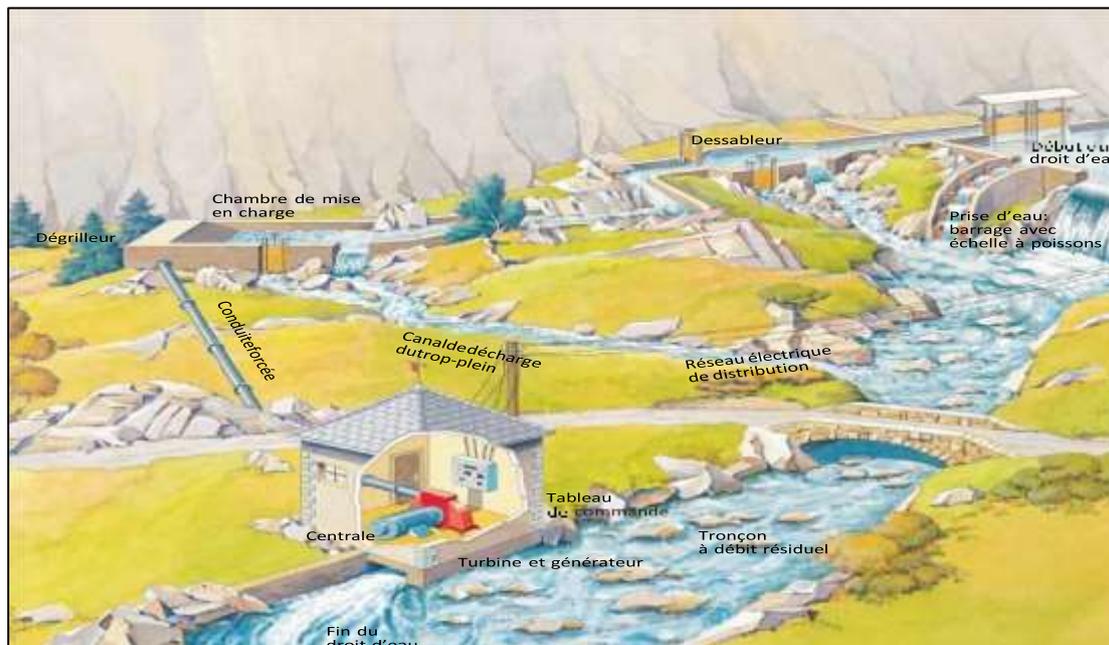


Figure I.2 : Différents composants d'une microcentrale hydroélectrique (3)

### **I.4.1 Les ouvrages de Gini civil :**

Les principaux ouvrages de Gini civil d'une petite centrale hydraulique généralement sont : la prise d'eau, les conduites d'eau et la centrale elle-même. Ces ouvrages correspondent aux aménagements préalables à la mise en place du matériel de production de courant.

#### **I.4.1.1 La prise d'eau :**

La topographie et la forme du cours d'eau déterminent la forme et les dimensions de ces ouvrages. Ils peuvent être construits à partir de roches, de terre, de terre (pierre), de maçonnerie ou de béton. Parfois, des éléments naturels sont utilisés et aucun aménagement paysager n'est requis.(7)

La prise d'eau peut également être installée sur un canal d'irrigation ou sur une adduction d'eau potable.

#### **I.4.1.2 Le dessableur : (2)**

Lorsque l'eau est dirigée dans un canal par la prise d'eau, elle peut potentiellement transporter avec elle des quantités considérables de sédiments (comme le sable et le gravier) et de matières en suspension (comme les boues). Si ces substances ne sont pas éliminées, le canal se bouchera et les vannes et les turbines subiront des dommages à un rythme alarmant.

Le bassin connu sous le nom de dessableur a une plus grande largeur que le canal lui-même. Cette différence de largeur entraîne une diminution de la vitesse de l'écoulement, permettant ainsi aux particules solides de se y déposer.

Généralement, à la fin du dessableur, une grille fine est installée pour filtrer les particules résiduelles.

Un nettoyage régulier est une nécessité absolue, et il est impératif de prévoir une vanne correspondante.

#### **I.4.1.3 Chambre de mise en charge :**

Il s'agit d'un petit bac qui garantit que la conduite forcée est toujours remplie d'eau. Il fait office de tampon entre la prise d'eau et la conduite.

Lors de la régulation hydromécanique d'une turbine, un contrôle de niveau est généralement situé dans la chambre de mise en charge et est utilisé pour réguler le débit de la turbine. (2)

#### **I.4.1.4 Les conduites d'eau :**

Parmi les principales canalisations d'eau de la petite centrale hydroélectrique on retrouve :

- L'entrée d'eau : Elle est équipée d'un réseau installé sur le canal, suivi du bassin de chargement et du parc. L'arrivée d'eau est généralement réalisée en béton armé, avec des grilles en acier et des vannes en bois ou en acier.
- Une conduite forcée : elle prend parfois la forme de tunnel souterrain qui achemine l'eau vers les turbines de la centrale électrique. Elle est généralement fabriquée en acier galvanisé, en fer et, plus rarement, en fibre de verre, en plastique ou en béton.
- L'entrée et la sortie des turbines : ils comprennent les soupapes et les vannes qui sont nécessaires pour arrêter l'écoulement de l'eau lorsque la turbine est arrêtée pour des raisons de maintenance. Ces éléments sont généralement en acier.
- Canal de fuite : qui achemine l'eau de la sortie de la turbine vers la rivière. Ce canal est généralement creusé et équipé de vanne en bois pour permettre les travaux d'entretien. (8)

#### **I.4.1.2 La centrale :**

Une centrale est une installation qui contient une turbine et la plupart des équipements mécaniques et électriques. Les petites centrales hydroélectriques sont généralement de taille minimale, mais offrent néanmoins une infrastructure adéquate, un accès à la maintenance et un certain niveau de sécurité. La centrale a été construite à partir de béton et d'autres matériaux locaux.

Pour réduire les coûts, la principale préoccupation des projets de petite hydroélectricité est une conception simple, en mettant l'accent sur des structures pratiques et faciles à construire. (8)

## I.4.2 Les équipements hydrauliques :

### I.4.2.1 Les turbines :

Pour une petite centrale électrique donnée, le type de turbine approprié est sélectionné en fonction de la hauteur de chute et du débit du site. Il existe de nombreux types de turbines s'adaptant aux différentes contraintes imposées par chaque site, on peut les classer en deux groupes :

- Turbines à action
- Turbines à réaction

#### ❖ Turbine à réaction :

Une turbine à réaction est une machine immergée qui utilise à la fois l'énergie cinétique et la différence de pression de l'eau. L'eau sous pression exerce une force sur la face des aubes de la roue. Au fur et à mesure que l'eau circule dans la turbine, la pression diminue. La roue de la turbine immergée et son châssis doivent résister aux pressions de fonctionnement. (9)

Les turbines de ce type les plus courantes sont les turbines Francis et les turbines Kaplan :

#### A. Turbine Francis :

La turbine la plus courante dans les installations anciennes à basse chute est sans aucun doute la turbine Francis. Selon la puissance, la hauteur d'installation varie de 3 mètres (installée dans une chambre d'eau ouverte) à plus de 100 mètres (turbine à réservoir en spirale, d'apparence similaire à une pompe centrifuge). Les roues de ce type de turbine, appelée turbine à réaction, sont entièrement immergées dans l'eau.

La roue est constituée d'une série des aubages profilées qui forment des canaux à travers lesquels l'eau est accélérée et déviée. La régulation du débit est assurée par des aubes mobiles placées sur la circonférence de la roue et on les appelle des aubes directrices. En raison de sa structure complexe et de son prix d'achat élevé, ce type de turbine est rarement installé dans les petites centrales hydroélectriques. (3)

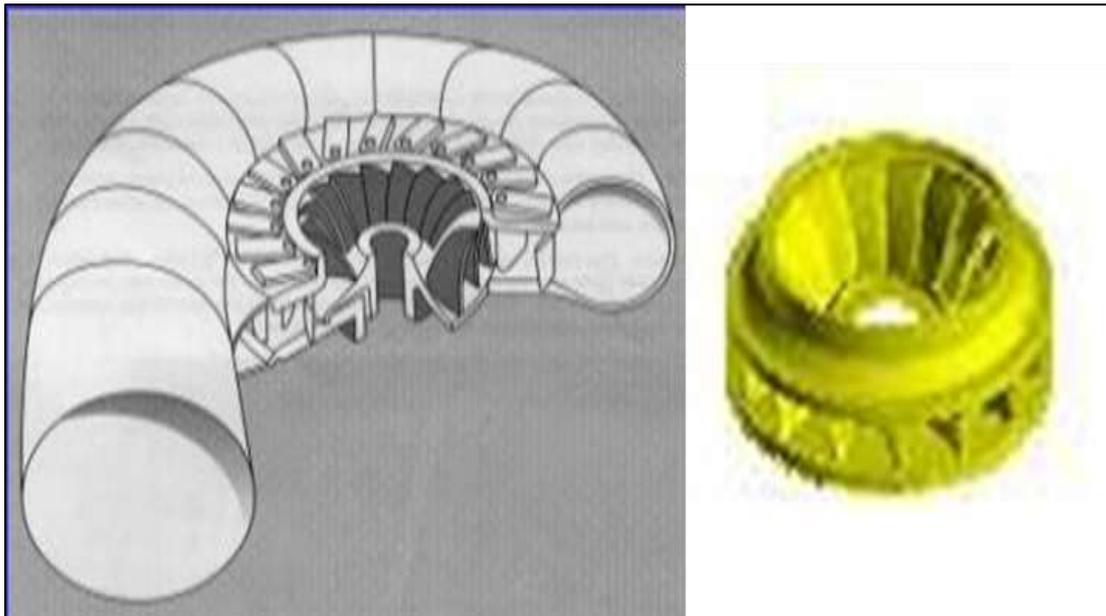


Figure I.3 : Turbine Francis (4)

**B. Turbine Kaplan :**

Les turbines Kaplan sont un autre type de turbine à réaction où la turbine est complètement immergée dans l'eau. Dans la plupart des cas, le débit est contrôlé en changeant la direction des pales de la roue, en ajustant parfois les aubes directrices en parallèle, comme dans les turbines Francis, pour améliorer l'efficacité. Ce type de turbine est utilisé dans les petites centrales électriques de faible hauteur (2-20 m) et à fort débit (plus de 1 m<sup>3</sup>/s) et remplace pour la plupart les anciennes turbines Francis.

(3)

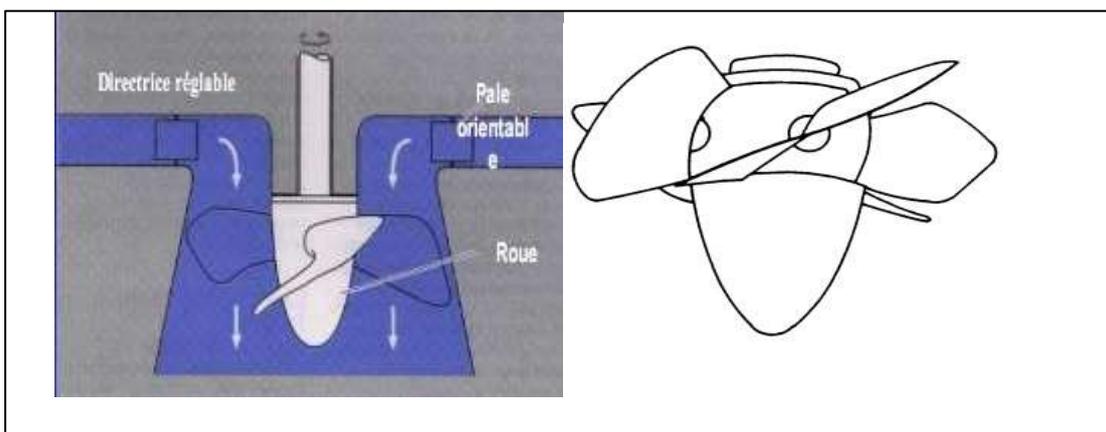


Figure I.4 : Turbine Kaplan (4)

### C. Les pompes inversées :

Une pompe inverse est une pompe standard utilisée comme turbine, changeant le sens d'écoulement (l'eau entre par le côté pression et sort par le côté aspiration) et le sens de rotation. Elle fonctionne comme une turbine à réaction Francis, mais le débit est fixe. Il est peu coûteux, rapide à installer et ne nécessite pas de système de réglage.

Ce type de machine est principalement utilisé lorsque le débit peut être maintenu constant dans le temps, notamment comme turbines régénératives pour les réseaux d'eau potable ou les installations industrielles (équipements pétrochimiques, etc.) et pour rétablir les débits en pied de barrage. (3)

#### ❖ Turbine à action :

La pression de l'eau générée par le jet est entièrement convertie en énergie cinétique avant de rencontrer la turbine et de lui transférer son énergie. La particularité d'une turbine en état de marche est que l'énergie disponible pour les pales est entièrement sous forme d'énergie cinétique. L'échange d'énergie entre l'eau et les ailes s'effectue à pression constante (généralement la pression atmosphérique). La roue de la turbine n'est pas mouillée et tourne dans la zone.(9)

Les turbines de ce type les plus courantes sont les turbines Pelton et les turbines cross flow :

#### A. Turbine à Pelton :

Les turbines Pelton sont constituées d'une roue entraînée par un jet d'eau éjecteur. Les augets sont conçus pour une efficacité maximale tout en permettant à l'eau de s'échapper des côtés des roues. Ils disposent d'une encoche qui assure une pénétration optimale et progressive de la douche dans le seau. L'injecteur est conçu pour produire un jet cylindrique aussi uniforme que possible avec le moins de dispersion possible. (10)

Les turbines Pelton sont le plus souvent utilisées là où les hauteurs de chute varient de 30 m à 500 m ou plus.(3)

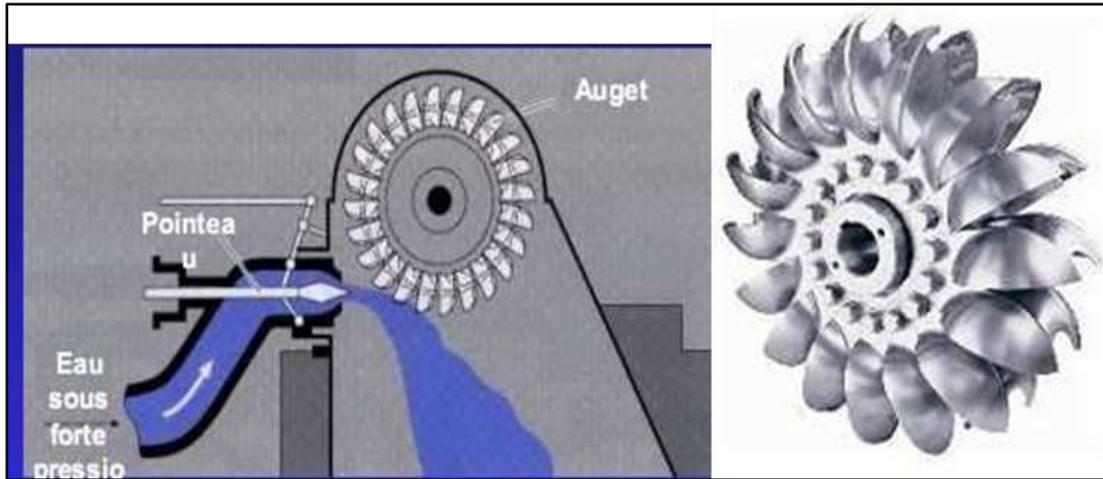


Figure I.5 : Turbine Pelton (4)

**B. Turbine cross flow :**

Les turbines à cross flow, ou turbines dites à flux croisés, se caractérisent principalement par leur durabilité, leur construction simple et leur faible besoin de surveillance et de maintenance. Cependant, le rendement est légèrement inférieur à celui des autres turbines.

Il se compose d'une roue cylindrique traversée par un jet d'eau rectangulaire. Des aubes rotatives régulent le débit.

Son domaine d'application est une forme intermédiaire des turbines Kaplan et Pelton, avec une turbine basse et moyenne et une alternative aux turbines Francis. (3)

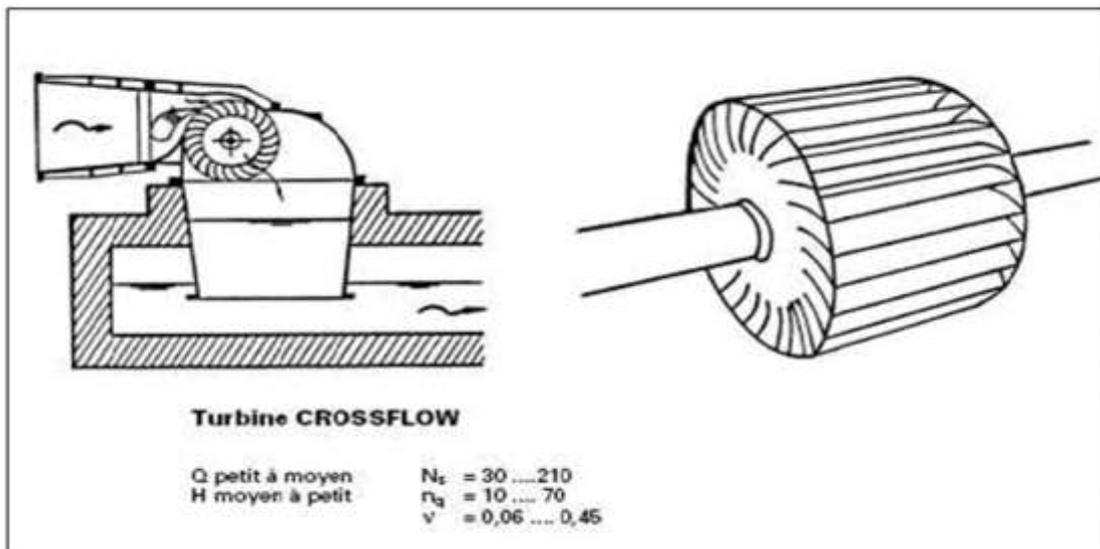


Figure I.6 : Turbine de Cross flow (4)

### I.4.2.2 Le régulateur (5):

Un système de contrôle doit être installé pour le bon fonctionnement de la turbine. Cette dernière doit permettre que la vitesse de la turbine soit égale à la consommation électrique et au débit d'eau consommé. Ce contrôle doit permettre que la vitesse de rotation reste la plus constante possible afin que le réseau reste en phase avec sa fréquence propre (50 Hz dans ce cas).

#### ❖ Régulation « vitesse débit » :

Elle consiste à régler le débit d'eau pour ajuster la vitesse de rotation. En général, la commande de la vanne s'effectue au moyen d'actionneurs commandés selon le principe du feedback. La vitesse de rotation en sortie de turbine est mesurée par un capteur ou fréquence principale, après quoi la donnée est transmise au microcontrôleur qui calcule la course donnée aux cylindres en fonction du débit. Les meilleurs réglages sont du type PID (Proportional Integral Differential), qui permet une correction à la fois précise et rapide.

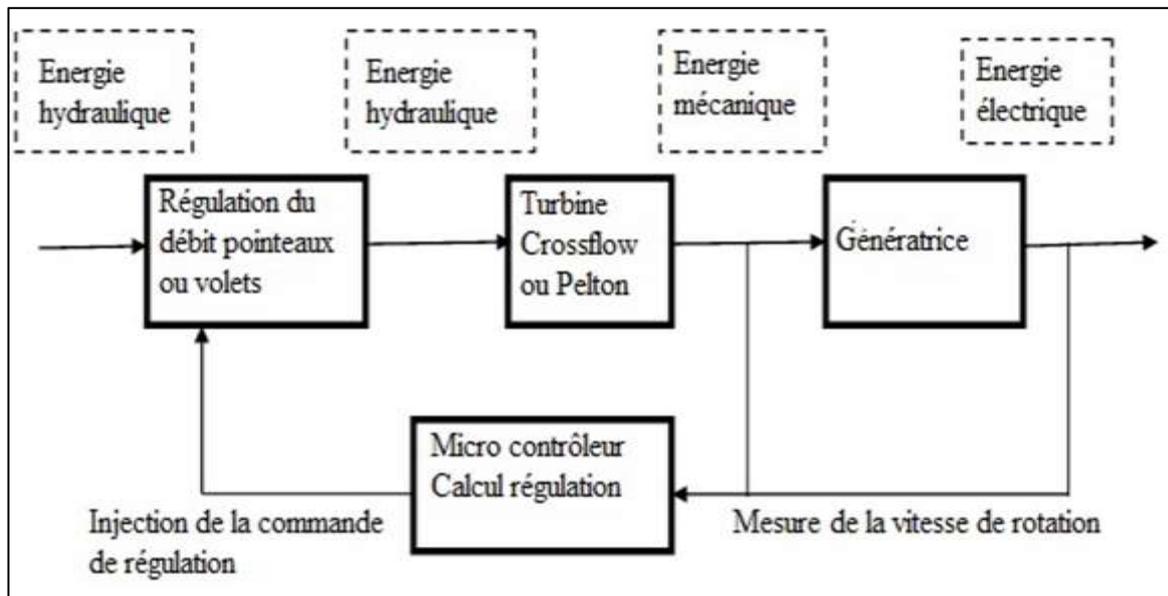


Figure I.6 : Principe de régulation « vitesse débit » (5)

#### ❖ Régulation «charge fréquence »

Il maintient constante la charge électrique sur le réseau sans système de contrôle du courant. La régulation s'effectue en éliminant l'excès d'énergie des charges résistives. Toute énergie inutilisée est canalisée vers la batterie à résistance.

La centrale électrique fonctionne donc toujours à sa capacité maximale et produit sa puissance nominale.

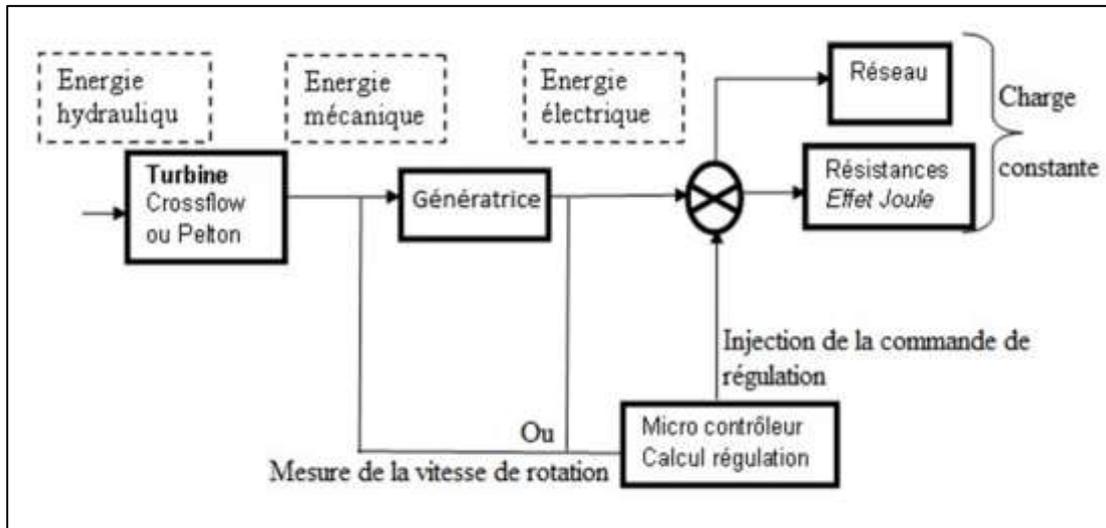


Figure I.7 : Principe de régulation « charge fréquence » (5)

### I.4.3 Les équipements électriques :

#### I.4.3.1 Le générateur :

Le choix du générateur et du système de contrôle dépend en grande partie du mode de fonctionnement de la microcentrale, c'est-à-dire. Soit à côté du réseau de distribution, soit de manière indépendante.

Dans le même temps, le système alimente le réseau électrique local, tandis que la microcentrale électrique fonctionnant de manière autonome alimente un seul consommateur (alpage, hôtel ou refuge de montagne). Il est également possible de combiner ces deux formules, mais c'est plus compliqué et plus coûteux. (3)

Il y a deux types de générateur (5):

#### A. Le générateur synchrone triphasé :

Les machines synchrones sont largement utilisées comme générateurs. Une machine synchrone se compose de deux éléments principaux : un rotor (bobine) alimenté en courant continu ou par aimants permanents et un stator (induit) alimenté en courant alternatif. Un stator triphasé est constitué de trois groupes de conducteurs disposés dans des fentes. Pour former trois bobines identiques, une pour chaque phase, avec un angle électrique de  $120^\circ$ , elles créent un champ tournant passionnant. Le rôle du rotor est de

générer le champ tournant nécessaire à générer la tension alternative induite sur le stator. Dans un rotor alimenté par des enroulements inducteurs, le flux magnétique (tension induite) peut varier en fonction du courant continu ou inducteur introduit dans l'enroulement.

**B. Le générateur asynchrone triphasé :**

Les machines asynchrones, également appelées machines à induction ou synchrone, présentent l'avantage que leur structure mécanique est simple et durable, et que le rotor n'est pas connecté à une source de tension externe, sauf pour les rotors bobinés notamment. De plus, leur inconvénient est la consommation d'énergie réactive, qui est obtenue du réseau ou compensée par des batteries de condensateurs qui permettent un fonctionnement indépendant.

Il existe deux types de machines asynchrones : les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

❖ **Le mode de fonctionnement d'une petite :**

**1. Fonctionnement parallèle :**

Les microcentrales électriques uniquement parallèles d'une capacité inférieure à 300 kW sont généralement équipées d'un générateur asynchrone. La tension et la fréquence sont déterminées par le réseau électrique et sont constantes. (3)

**2. Fonctionnement en régime isolé :**

En mode autonome ou en îlot, le groupe turbogénérateur doit être capable de maintenir indépendamment une tension et une fréquence constantes. La puissance produite par le générateur doit être égale à la puissance consommée par l'utilisateur. Sinon, la fréquence et la tension changeront, ce qui peut endommager les équipements consommateurs (moteurs, lampes, composants électroniques) ainsi que les équipements de production.

La plupart des microcentrales autonomes sont équipées de générateurs synchrones capables d'alimenter toutes sortes d'équipements grand public. La tension est maintenue constante par un régulateur électronique intégré au générateur. La fréquence est déterminée par la vitesse de la turbine, qui est aujourd'hui presque exclusivement contrôlée électroniquement ou électro mécaniquement. (3)

### I.4.3.2 Les autres équipements :

Les autres composants du système sont :

- Système de protection et de contrôle électrique, tableau avec boîtier d'alimentation.
- Appareils de commutation électrique ;
- Transformateurs auxiliaires et transformateurs de transport d'énergie.
- Services auxiliaires comprenant l'éclairage ainsi que les systèmes de contrôle d'alimentation et les équipements de commutation électrique.
- Système de ventilation.

Un autre élément très important est le pylône. Son rôle est de porter des câbles électriques dans un réseau aérien. Il doit pouvoir supporter le poids de ces câbles et composants fixés au sommet du mât tout en résistant aux contraintes mécaniques et aux agressions chimiques du milieu extérieur. Il existe plusieurs types de pylônes tels que : pylône en bois, pylône en béton armé et pylône en acier. (5)

### Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu de toutes les petites centrales électriques utilisées dans les centrales hydroélectriques de différentes capacités, selon la classe. Une petite centrale électrique comporte quatre composantes principales : des fonctions de consommation d'eau, des fonctions d'alimentation ou de recharge, des fonctions de production et des fonctions d'intervention. L'équipement de production comprend des turbines, des générateurs et des systèmes de contrôle.

Le chapitre suivant examine la possibilité d'utiliser ces petites centrales hydroélectriques comme turbines pour les eaux usées.

## *Chapitre II : turbinage des eaux usées*

## Chapitre II : turbinage des eaux usées

### Introduction :

À la lumière du formidable développement auquel le monde est témoin dans le domaine des énergies renouvelables, il cherche à trouver une alternative au pétrole et à le remplacer par une énergie renouvelable qui repose sur des sources vitales telles que l'eau, l'air, le soleil, etc. Les développements récents dans ce domaine incluent la production d'énergie électrique à l'aide de turbines à eaux usées.

### II.1 Problématique :

Compte tenu de l'intérêt généralisé pour les stations d'épuration des eaux usées en raison de rôle important dans la protection de l'environnement, le monde a recours à la création et au développement de stations d'épuration des eaux usées afin de traiter ces eaux.

Ces stations d'épuration consomment de grandes quantités d'énergie électrique et sont coûteuses. Pour preuve, la consommation totale des stations d'épuration en suisse est estimée à environ 0.5 Twh par année, soit l'équivalent de la consommation de 100000 familles, avec une augmentation attendue de la consommation d'environ 15%(11).

### II.2 Les types d'installation de turbines sur le réseau d'assainissement :

Il existe deux types de conceptions pouvant être appliquées au réseau d'assainissement, parmi lesquelles :

#### II.2.1 Turbinage avant traitement :

Ce type permet de turbiner les eaux usées avant d'être traitées dans une station d'épuration (12).

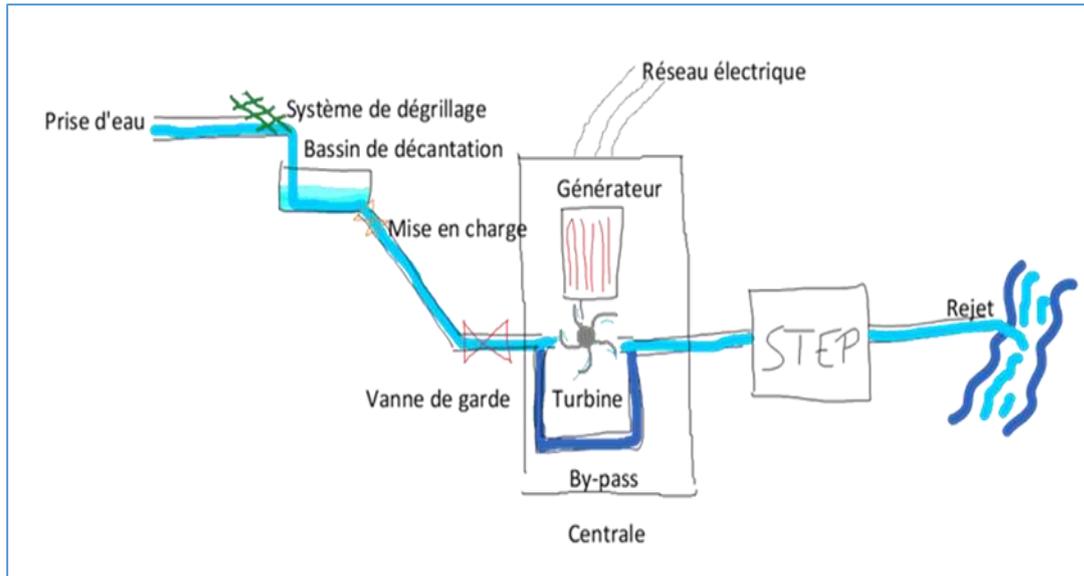


Figure II.1 : turbinage avant épurateur (12)

❖ **Difficultés de turbinage avant traitement :**

Ses difficultés sont les suivantes (13):

- Pour éliminer les matières solides présentes dans l'eau non traitée, il est nécessaire de construire un bassin de prétraitement et, souvent coûteux, afin d'éviter le colmatage des canalisations et des turbines.
- la présence de dessableur/dégrilleur est nécessaire pour éliminer les sables et les graviers. il est ajusté en fonction de la sensibilité à l'usure de la turbine sélectionnée. de plus, connaître le type de réseau en amont et son ratio-séparatiste et unitaire permet de connaître la présence de sable.
- Les turbines Pelton sont très sensibles à l'érosion du sable et limitent le passage des grosses particules ; Dans cette installation, il est préférable d'utiliser une vis d'Archimède comme turbine car elle présente une grande résistance à la corrosion.
- cette installation implique une maintenance/entretien importante de la turbine malgré la présence du bassin de prétraitement car elle contient des éléments fibreux nécessitant un nettoyage et la présence d'éléments corrosifs.
- Le débit de pointe après des tempêtes complique le dimensionnement des turbines et nécessite une canalisation de by-pass. Cela crée également des dépôts de matière dans les canalisations.

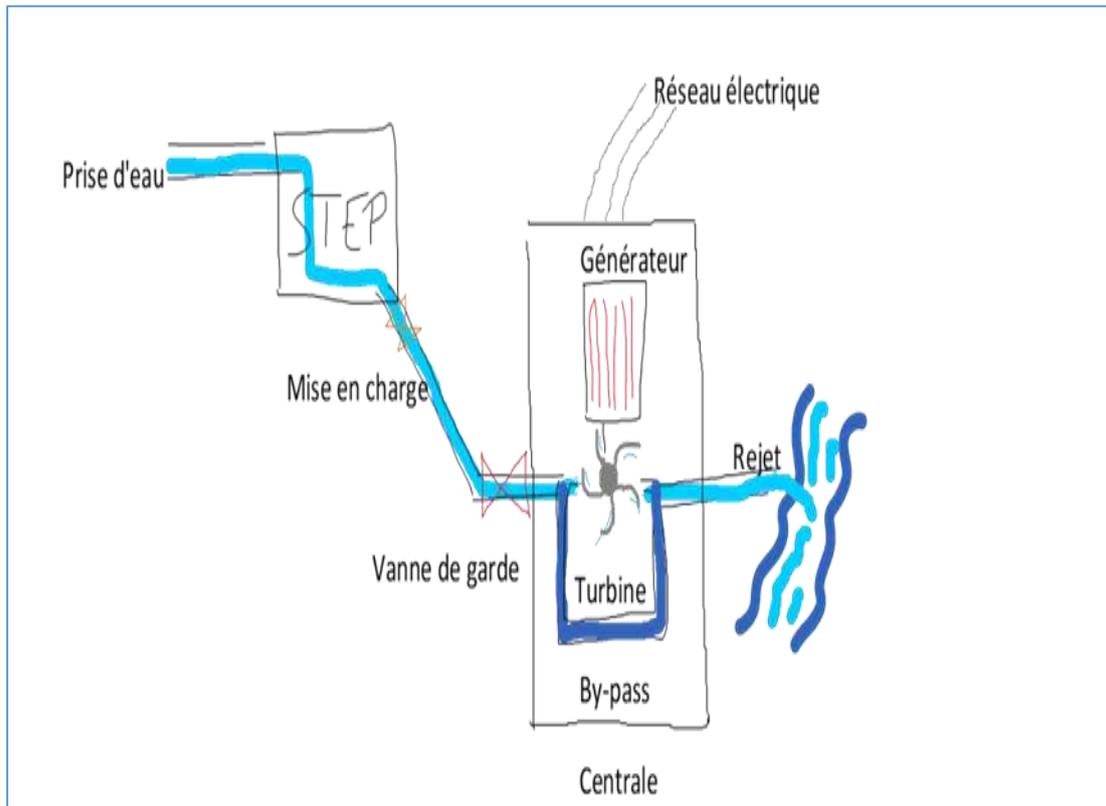
❖ **Les solutions proposées :**

Les solutions proposées pour éviter ces difficultés sont (13) :

- Regroupement de communes.
- Trouver l'emplacement de bassin de prétraitement est l'élément clé du dimensionnement, car il contrôle la chute et le débit accumulé vers la turbine.
- Sélection améliorée des turbines.
- Évitez les obstacles (coudes, obliques)
- Faciliter l'accès à l'appareil pour la maintenance.
- Établir des diamètres plus grands pour tenir compte de la sédimentation à l'intérieur des canalisations

**II.2.2 Turbinage après le traitement :**

Ce type permet de turbiner les eaux usées après d'être traitées dans une station d'épuration (12).



**Figure II.2 :** turbinage après épuration (12)

❖ **Difficultés de turbinage après traitement :**

Ses difficultés sont les suivantes (13):

- Les stations d'épuration des eaux usées sont souvent situées à proximité ou à proximité des niveaux de rejet, il y a donc de petites chutes. Pour compenser cela, il est nécessaire d'avoir un débit élevé.

❖ **Les solutions proposées :**

Les solutions proposées pour éviter ces difficultés sont (13):

- Groupement des communes pour avoir de très haut débit.
- La sélection des emplacements où il y a un dénivelé entre la station d'épuration et le point de rejet.

**II.3 Description technique :**

Comme nous l'avons dit plus tôt, il existe deux types d'installations possibles sur le réseau d'égouts. Les deux types d'installations ont les mêmes équipements et éléments, à l'exception de l'installation située avant le STEP, il est nécessaire de prévoir un système de dégrillage/dessableur ainsi qu'un bassin de décantation, qui sert également d'un bassin de mise en charge pour retenir les éléments grossiers et traiter les arroses d'abord. L'eau est ensuite transportée vers la turbine de la même manière que dans un PCH classique (12).

Les éléments les plus importants nécessaires à la réalisation d'une station de turbinage des eaux usées sont résumés comme suit (12):

**II.3.1 Le système de dessableur/ dégrilleur :**

Le système de dessableur/degrilleur élimine les matériaux grossiers et le sable. La taille du filtre est ajustée en fonction des débris que la turbine peut traiter et du débit de l'appareil, permettant au tamis de ne pas laisser passer d'objets plus grands que la taille spécifiée. Les plus petites particules finissent dans le bassin de sédimentation en aval.

### II.3.2 Le bassin de décantation :

Un bassin de décantation ou de sédimentation permet à une partie des matières en suspension de se déposer au fond. Cette cuve se nettoie manuellement ou automatiquement si elle est équipée d'un chalumeau ou d'un grattoir.

### II.3.3 Les conduits forcés :

Les conduites forcées utilisées dans les petites centrales électriques sont des conduites de dimensions standards en Polyéthylène (PE), PVC, en fonte ou acier :

- Les tuyaux en plastique résistent à la corrosion mais sont exposés aux rayons du soleil (UV) éblouissants. Il faut l'enterrer dans des endroits bien particuliers. Il est doté d'une résistance aux chocs et d'une rugosité inférieure à celles des tuyaux en acier inoxydable ou en fonte.
- Les tubes en polyéthylène sont inertes et stables face à une variété de réactifs chimiques, tout comme les tubes en plastique. Il est suffisamment rigide pour ne pas se déformer lors de l'enfouissement, et suffisamment souple sur toute sa longueur pour permettre sa flexion.
- Les tuyaux en fonte sont résistants à la rouille et durables, peuvent résister à une forte pression et résister à la corrosion.
- Les tubes en acier actuels sont en acier inoxydable, avec une bonne résistance aux chocs et une flexibilité limitée. Cependant, il est très résistant dans le temps.

### II.3.4 Le groupe turbogénérateur :

La turbine est sélectionnée en fonction de la chute et du débit disponibles. Les différentes turbines pouvant être utilisées sont les turbines Francis, Kaplan, Pelton, les pompes inverseurs que nous avons expliquées dans le chapitre précédent, ainsi que les vis d'Archimède.

La turbine est reliée à un générateur, lui-même relié au réseau de distribution électrique via un transformateur de puissance.

### II.3.5 Autres équipements :

- ❖ **By-pass** : Un by-pass est installé parallèlement à la turbine pour assurer l'acheminement des eaux usées vers STEP à tout moment ainsi que pendant la

période de maintenance de la turbine. Il laisse également une marge de manœuvre en termes de débit. Par exemple, lors de fortes tempêtes, qui font que le débit accepté par la turbine dépasse le niveau admissible, il permet une dérivation partielle du débit. Cette observation n'est vraie que lorsque les eaux de pluie sont collectées avec les eaux usées.

- ❖ **Un système de protection :** Il devrait y avoir un système pour protéger les personnes, les machines et les réseaux de distribution, comme pour les centrales électriques à grande échelle. En cas de panne du réseau électrique, la turbine doit être arrêtée pour éviter toute mise hors service, tout en évitant tout transfert d'énergie de la centrale vers le réseau.

#### II.4 Les avantages et les inconvénients de turbinage des eaux usées :

Les turbines sanitaires présentent de nombreux avantages dont les plus importants sont (13):

- Son impact sur l'environnement est minime.
- Coopération dans le domaine des infrastructures à travers la contribution des réseaux d'assainissement à la production d'énergie électrique et son transfert vers les réseaux électriques.
- Il n'est pas nécessaire de dériver les cours d'eau et d'inonder les surfaces.
- Les débits sont généralement bien documentés.
- La production d'énergie est ajustée en fonction de la courbe de consommation.

Le turbinage des eaux usées présente aussi des inconvénients que l'on retrouve dans (12):

- Nous constatons un impact négatif dans la détermination de débit d'équipement dans les zones touristiques qui se caractérisent par des débits quotidiens et saisonniers différents, ce qui rend processus sensible.
- Les canalisations et les turbines se bouchent à cause des matières premières présentes dans les eaux usées, ce qui peut entraîner un remplacement fréquent des équipements et une maintenance accrue.
- Un système de sécurité supplémentaire est nécessaire pour protéger les turbines et autres équipements contre les dommages dus à la vitesse élevée de l'eau pendant le nettoyage.

- Un autre facteur clé est l'eau de pluie qui contient également du sable et des minéraux très abrasifs pouvant endommager les turbines.

## II.5 La méthodologie :

La méthodologie est divisée en trois étapes principales, comme le montre la figure II.1 :

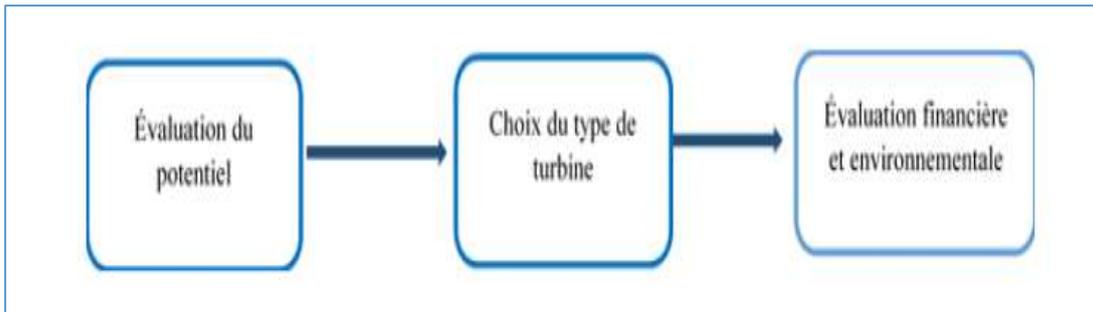


Figure II.3 : plan d'évaluation de la station (14)

### II.5.1 Evaluation de potentiel électrique :

Après avoir collecté les principales données et choisi la meilleure alternative, les informations de base pour évaluer le potentiel électrique sont :

#### ❖ Détermination de débit :

La détermination du débit sera basée sur la courbe des débits classés à la sortie de la station d'épuration des eaux usées.

Nous classons les débits en fonction de leur occurrence au cours de l'année et le débit journalier moyen est conservé et classé du plus grand au plus petit, de cette manière nous avons tracé la courbe de débit.

Ensuite, du débit classé, nous extrayons le débit des équipements qui est généralement présent pendant au moins 50 jours pour permettre à la turbine de fonctionner plus longtemps avec un bon rendement (12).

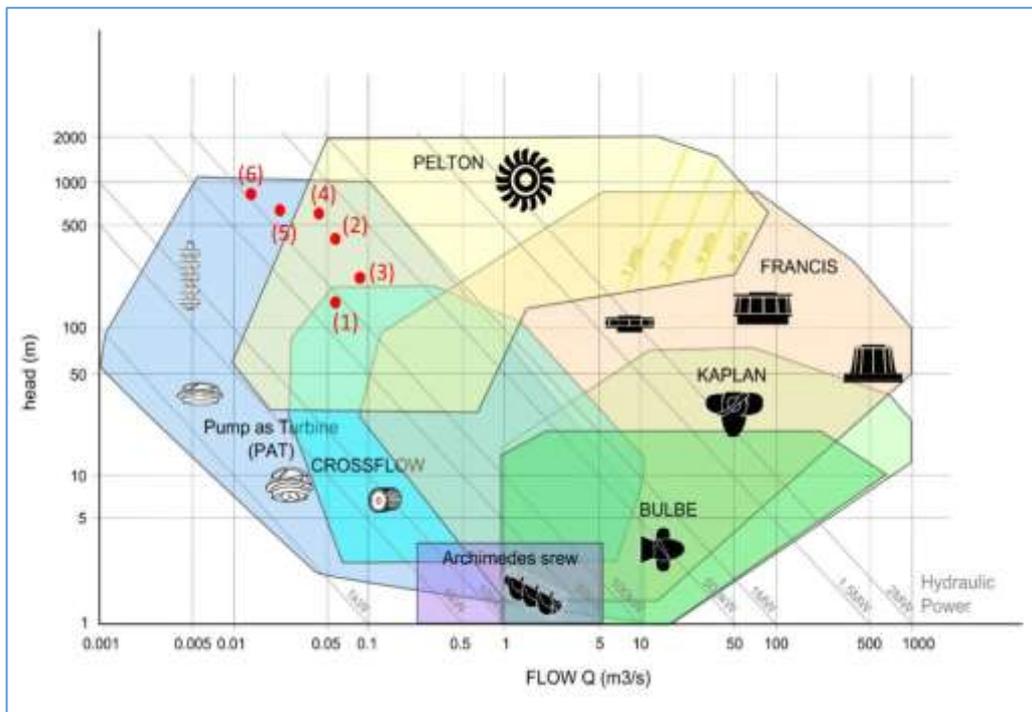
#### ❖ Détermination de chute :

Les chutes sont déterminées grâce à l'utilisation de systèmes d'information géographique et en fonction de l'implantation sur le réseau d'assainissement :

- Pour le turbinage après le STEP : Nous calculons la chute brute entre la station et le point de rejet vers le milieu naturel (11).
- Pour le turbinage avant le STEP : nous calculons la chute brute entre le point de collecte principal de toutes les eaux du système d'égouts et la station d'épuration (11).

### II.5.2 Le choix de type de turbine :

Pour le turbinage des eaux usées, plusieurs type sont disponible notamment les turbines Francis, les turbines Kaplan, les turbines Pelton, les pompes réversibles et également les vis d'Archimède. Les différentes turbines et leurs plages de fonctionnement sont représentées sur la figure II.2 (12).



**Figure II.2 :** la plage de fonctionnement des turbines (12)

Le choix de turbine se fait en fonction de la chute et le débit d'équipement :

#### ❖ Vis d'Archimède :

La vis d'Archimède est couramment utilisée pour l'élévation des eaux usées dans les stations d'épuration par exemple. Son utilisation comme turbine pour la production d'électricité a été proposé pour la première fois en 1992 par Karl August Radlik.

Une petite centrale électrique à vis d'Archimède se compose d'une vis tournant à l'intérieur d'un réservoir d'eau fixe et ouvert. L'énergie potentielle du fluide circulant dans le luminaire est convertie en énergie mécanique grâce à la rotation de la vis. Cette énergie mécanique est ensuite convertie en électricité à l'aide d'un générateur.

Ces petites centrales électriques ont une grande capacité avec de petites cascades et de faibles débits. La hauteur maximale est d'environ 10 mètres et le débit est de 10 m<sup>3</sup>/s. Les principaux avantages de ce type de système comprennent, premièrement, la capacité de maintenir un rendement élevé malgré les fluctuations du débit ; Le débit peut donc varier de plus ou moins 20 % autour du débit nominal sans affecter le rendement. (Guilhem Dellinger *et al.* 2015)



**Figure II.3 :** vis d'Archimède (13)

Quant au reste des turbines, nous en avons parlé dans le chapitre précédent et nous résumerons les limites de leurs utilisations comme suit :

- ❖ **Turbine Pelton :** Cette turbine est plus adaptée pour les chutes de 30 à 500 mètres (3)
- ❖ **Turbine français :** La plage d'application de cette turbine est d'environ 3 à 100 mètres en chute (3)
- ❖ **Turbine Kaplan :** Les turbines Kaplan sont des machines de réaction et d'injection complètes adaptées aux faibles chutes de 2 à 20 mètres et aux débits élevés de l'ordre de 1 mètre cube par seconde (3).

- ❖ **Les pompes inversées :** Le domaine d'application de ces turbines est de quelques mètres à plusieurs centaine de mètre pour la chute est de quelques litre /sec à 1000 litre /sec pour le débit (16).

### II.5.3 Rentabilité du site (17):

- Toutes les tailles possibles sont évaluées en fonction de la vitesse de l'eau dans le tuyau, du débit attendu et de la pulsation pour chaque emplacement spécifique.
- Choisissez la taille la plus rentable (carat/kWh) pour une période de récupération allant jusqu'à 25 ans.
- Calculer la valeur actuelle nette (VAN) après 25 ans pour évaluer la rentabilité. Une valeur NPV supérieure à 0 indique une position rentable.

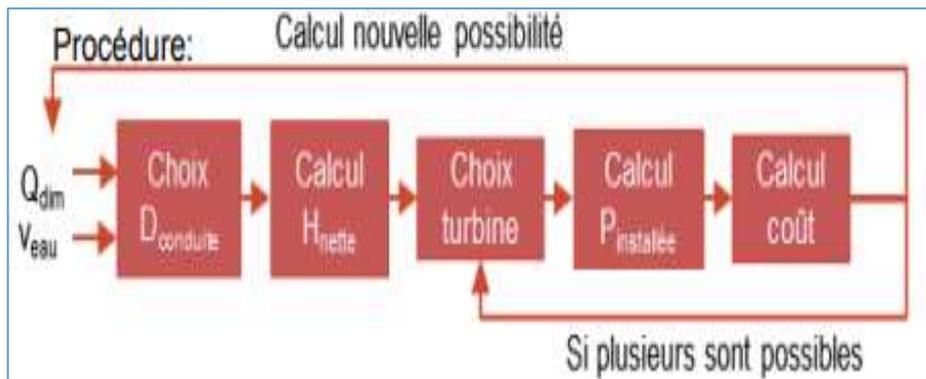


Figure II.4 : procédure de rentabilité (17)

### II.6 Evaluation du potentiel énergétique (5):

Les recherches sur la potentielle énergétique micro hydraulique visent à déterminer la localisation des sites permettant d'exploiter cette énergie. Mais l'objectif principal de cette étape est de calculer la capacité et les performances attendues.

#### II.6.1 L'emplacement du site :

La localisation du site susceptible de présenter un faible potentiel énergétique hydraulique se fait d'abord en observant la configuration du réseau. Pour les réseaux installés en zone montagneuse, la tension est localisée à l'emplacement des réducteurs de pression. Pour les réseaux dont l'installation est prévue, le potentiel sera situé à l'entrée ou à la sortie du STEP. Ces observations seront ensuite corroborées par la détermination de la puissance électrique et de la production d'énergie.

### II.6.2 L'énergie électrique :

En général, l'énergie qui peut être extraite d'une cascade dépend non seulement de la hauteur de la chute mais aussi du débit de l'eau. A ces deux données principales et nécessaires au calcul de la capacité électrique, il faut ajouter un facteur de performance qui inclut les différents rendements des machines (turbine, générateur, transformateur) ainsi que la pression qui prend en compte la perte de charge dans le tube de liaison. Par conséquent, le choix d'un emplacement pour construire une centrale hydroélectrique dépend de ces facteurs.

Nous donnons la formule de puissance hydraulique, en KW, par la formule suivante :

$$Ph = 10^{-3} \times r \times Q \times g \times HB \times hc \quad (\text{II.1})$$

Tel que :

- $r$  : la masse volumique de l'eau (1000 kg/m<sup>3</sup>)
- $Q$  : le débit [m<sup>3</sup>/s]
- $g$  : l'accélération de la pesanteur (9.81 m/s<sup>2</sup>)
- $HB$  : la chute brute [m]
- $hc$  : le rendement de la conduite.

Et la puissance mécanique fournie par la turbine est calculée selon la formule suivante :

$$Pmec = Ph \times hT \quad (\text{II.2})$$

Tel que :

- $hT$  : le rendement de la turbine.

Finalement, la puissance électrique, en kW, est calculée selon la formule suivante :

$$Pe = 10^{-3} \times r \times Q \times g \times Hn \times h \quad (\text{II.3})$$

Et : 
$$h = hg \times hT \quad (\text{II.4})$$

Tel que :

- $h$  : le rendement hydroélectrique de l'installation ;
- $hg$  : le rendement du générateur.

### II.6.3 Production électrique annuelle :

Après avoir calculé la capacité de puissance, déterminer la puissance annuelle est très intéressant. Il s'agit en fait de la période pendant laquelle l'électricité est produite.

La production annuelle d'électricité est exprimée en kilowattheures et peut être calculée à l'aide de l'expression suivante :

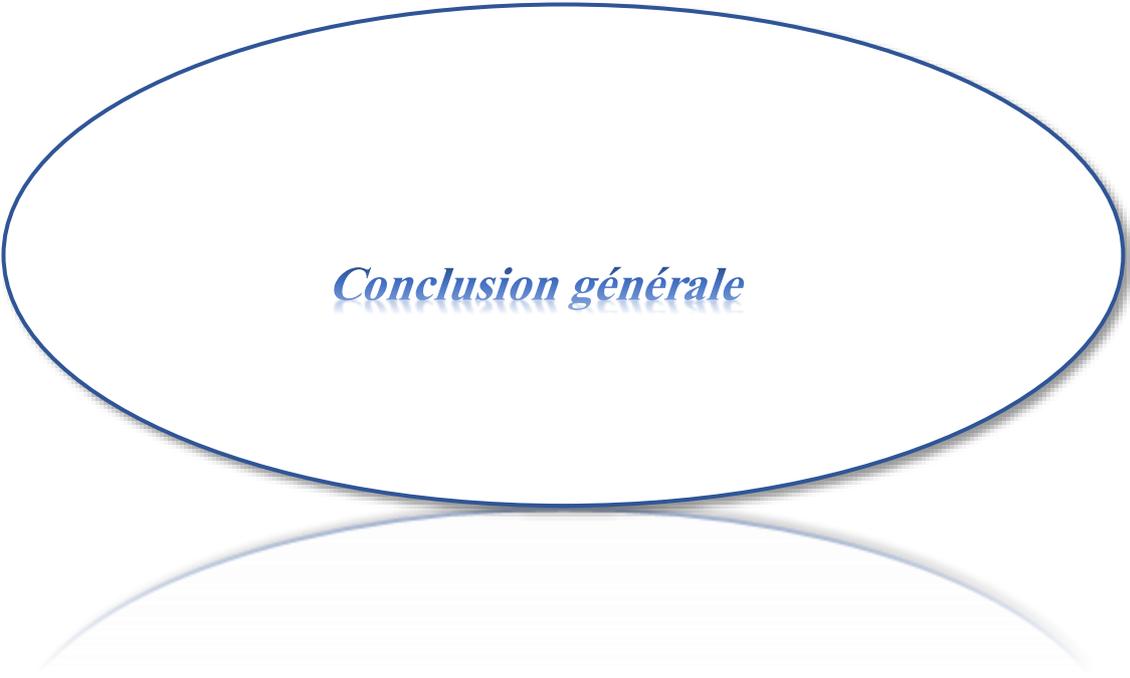
$$E = \Delta t \times Q \times g \times Hn \times h \quad (\text{II.5})$$

Telque :

- $\Delta t$  : la durée de fonctionnement de l'installation. C'est le temps pendant lequel la turbine va turbiner l'eau,
- $h$  : le rendement hydro-électrique global moyen de l'installation.

### Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons évoqué les enjeux les plus importants qui ont conduit à l'émergence des turbines d'assainissement, puis nous avons présenté les avantages et les inconvénients des turbines d'assainissement et les types possibles de leur installation sur le réseau d'eau et d'égout. Nous avons également identifié les principaux composants utilisés pour les turbines à eaux usées et la méthodologie suivie.



*Conclusion générale*

## **Conclusion générale :**

Cette étude a démontré la possibilité d'intégrer de petites centrales hydroélectriques dans les réseaux d'assainissement pour une utilisation efficace des eaux usées.

Nous avons discuté des avantages et des inconvénients, ainsi que des éléments importants nécessaires à ce processus.

Il existe également deux types de formulations : une à installer avant traitement et une à installer après traitement des eaux usées, et nous avons également décrit les difficultés de chaque formulation.

Nous avons également discuté des types de turbines utilisées dans ce procédé et de leurs caractéristiques.

## Références bibliographiques :

1. DIMITRIOS A. GÉORGAKÈLLOS. Les éléments nécessaires pour la gestion d'un projet de microcentrale hydroélectrique Etude de cas d'une PCH en Grèce. . 2005.
2. RIAED: RÉSEAU INTERNATIONAL D'ACCÈS AUX ÉNERGIES DURABLES. *Petites centrales hydroélectriques : généralités* [en ligne]. 2007. Disponible à l'adresse: <http://www.riaed.net>
3. JEAN GOTTESMANN, CHRISTOPH MOR, JEAN-MARC CHAPALLAZ, et SCHWEIZ. *guide pour la réalisation de petites centrales hydrauliques*. . Bern : Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, 1993. Impulsprogramm PACER Erneuerbare Energien. ISBN 978-3-905232-20-2.
4. AMIAR FADILA, HOSNI KAHINA, et TERKI RAZIKA. *etude et simulation d'une micro-centrale hydroélectrique connectée au réseau*. [en ligne]. memoire de fin d'étude. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU, 2012. Disponible à l'adresse: [https://www.ummtto.dz/dspace/bitstream/handle/ummtto/9009/TerkiRazika\\_HosniKahina\\_AmiarFadila.pdf?sequence=1](https://www.ummtto.dz/dspace/bitstream/handle/ummtto/9009/TerkiRazika_HosniKahina_AmiarFadila.pdf?sequence=1)
5. AITHAMOU YAMINA, BOUNOUAR TAOUS, et BEN HAMOU FATIHA. *Etude de l'implantation d'une mini centrale hydroélectrique sur le réseau d'eau potable à Tizi Ouzou*. . memoire de fin d'étude. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU, 2011.
6. ACCESMAD. l'énergie hydraulique. [en ligne]. 2018. Disponible à l'adresse: [http://mediatheque.accesmad.org/educmad/pluginfile.php/48872/mod\\_resource/content/0/Energie%20hydraulique.pdf](http://mediatheque.accesmad.org/educmad/pluginfile.php/48872/mod_resource/content/0/Energie%20hydraulique.pdf)
7. JEAN MARC PAGES. *ademe\_guide\_pour\_le\_montage\_de\_projets\_de\_petite\_hydroelectricite\_2003.pdf*. 2003. ADEME.
8. RIAED: RÉSEAU INTERNATIONAL D'ACCÈS AUX ÉNERGIES DURABLES. MicroCentrale-Hydraulique. [en ligne]. 2016. Disponible à l'adresse: <https://www.reseau-cicle.org/wp-content/uploads/riaed/pdf/MicroCentrale-Hydraulique.pdf>
9. RAFANOMEZANTOSOA ANDRIANIRINA HERINIAINA et ANDRIANAHARISON YVON. *l'ingénierie de projet de micro et mini centrales hydroélectriques en site isolés*. . memoire de fin d'étude. UNIVERSITE D'ANTANANARIVO ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE Département de Génie Electrique Formation IIIème Cycle en Génie Electrique, 2015.
10. J.M.CHAPALLAZ. *turbines hydrauliques*. 1995.
11. BOUSQUET, Cécile, HELLER, Philippe, MANSO, Pedro, ROSSI, Luca, SAMORA, Irene et SCHLEISS, Anton. Turbinage des eaux usées, quel potentiel pour

la Suisse? [en ligne]. 2015. [Consulté le 13 octobre 2023]. Disponible à l'adresse: <https://core.ac.uk/works/47897254>

**12.** MARIE MUSOLLA. *Turbinage des eaux usées du Haut-Plateau de Crans-Montana / Swiss Open Access Repository*. [en ligne]. 2019. Haute Ecole d'Ingénierie Valais. [Consulté le 14 octobre 2023]. Disponible à l'adresse:

**<https://sonar.ch/hesso/documents/317635>**

**13.** IRENE SAMORA. TURBINAGE DES EAUX USÉES – POTENTIEL ET EXEMPLES. [en ligne]. 2018. Disponible à l'adresse: [https://www.arpea.ch/wp-content/uploads/2018/04/SeminaireAquaPro2018-04\\_Samora.pdf](https://www.arpea.ch/wp-content/uploads/2018/04/SeminaireAquaPro2018-04_Samora.pdf)

**14.** A IGUERCHA, S ZOUAOUI, K MOHAMMEDI, M BOUAZIZ, et D KARI. Location Optimization of a Hydraulic Turbine for Koudiet Acerdoune Water Treatment Plants. . 2022.

**15.** GUILHEM DELLINGER, ABDELALI TERFOUS, ABDELLAH GHENAIM, et PIERRE-ANDRÉ GARAMBOIS. Optimisation d'une vis d'Archimède pour la production d'énergie dans les microcentrales hydroélectriques. [en ligne]. 2015. Disponible à l'adresse:

<https://www.researchgate.net/publication/279264689>

**16.** ABDERRZAK AFROUKH. *contribution a la production d'énergie hydroelectrique dans le reseau d'adduction TAKSEBT - BOUDOUAOU-SPIK*. . Alger : Ecole nationale polytechnique, 2015.

**17.** CÉCILE BOUSQUET, IRENE SAMORA, PEDRO MANSO, et LUCA ROSSI. *Evaluation du potentiel hydroélectrique des eaux usées en Suisse*. [en ligne]. 2015. Disponible à l'adresse: <https://www.researchgate.net/publication/313646596>