

Faculty of Sciences and Technology  
التكنولوجيا  
Department of Mechanical Engineering

كلية العلوم و  
قسم الهندسة الميكانيكية

N° d'ordre : M2/GM/2022

# MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

## *Thème*

ÉTUDE DE CARACTÉRISATION TECHNIQUE D'UNE TURBINE  
HYDRAULIQUE DE FRANCIS

Présenté par :

- ❖ ETHALI CHAOUKI DJAMEL EDDINE
- ❖ HAMDAN TARIQ

*Soutenu le 12 / 07 / 2022 devant le jury composé de :*

Président	Dr MEDJAHED Bendida	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr FLITTI Abdelmadjid	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Dr GUERMAT Abdelkader	Université de Mostaganem UMAB

**Année Universitaire : 2021 / 2022**

## **Dédicaces**

**Nous dédions ce travail d'abord et pas des moindres à tous les Palestiniens, de leurs vivants à leurs martyrs et des plus vieux aux plus petits, comme nous le dédions en fin de compte à nos familles, nos frères et nos amis et tous ceux qui étaient avec nous sur notre chemin, et un salut particulier à nos parents.**

## **REMERCIEMENTS**

Nous tenons tout d'abord à remercier le tout puissant ALLAH pour tout.

Nos remerciements honorables à notre encadrant, Dr GUERMAT Abdelkader, d'avoir accepté de nous encadrer, pour sa disposition malgré ses occupations et sa considération envers nous ainsi que tous les efforts qu'il a fournis dans l'élaboration de ce travail.

Nous remercions le président du jury, Dr MEDJAHED Bendida ainsi que l'examineur Dr FLITTI Abdelmadjid d'avoir disposé de leur temps pour apporter une attention particulière à notre travail.

Nous remercions également tous les professeurs du département des Sciences et Technologies ainsi que ceux du département de Génie Mécanique pour la bonne formation qu'ils nous ont permis d'acquérir.

## Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude de caractérisation technique d'une turbine hydraulique de Francis et la production électrique renouvelable en terme générale avec un accent particulier sur un type de turbine utilisée qui est celui de la turbine de Francis.

L'étude numérique a été menée sur un cas concret de cette turbine en moyennant différentes formules énergétiques classiques et celles de similitudes appliquées aux turbines hydrauliques dans le but de comprendre les éléments techniques régissant la conception et le bon fonctionnement de ces machines et aussi de maîtriser l'adaptation de l'utilisation d'une turbine donnée aux différentes conditions qui peuvent se poser en pratique.

Quatre cas d'étude ont été envisagés durant ce travail lesquels sont le cas de vitesse de rotation constante, le cas de la vitesse de rotation variable, le cas de la variation du degré de réaction de la turbine et le cas de l'étude des similitudes pour la même géométrie (sans changement de taille, et avec changement de taille) pour voir l'impact sur différents facteurs tels que le rendement, le couple, les puissances, la vitesse de rotation unitaire, le couple unitaire, le débit unitaire, etc. A l'issue de chaque cas d'étude, des courbes caractéristiques ont été tracées.

Les résultats obtenus sous forme de valeurs numériques et de courbes tracées sont riches en informations sur les différentes phases de fonctionnement de la turbine et peuvent constituer un guide d'utilisation pour l'ingénieur en fonction des besoins qui peuvent se présenter.

Enfin, cette étude montre d'une part le chemin vers la possibilité d'installation de ce type de turbine, au moins pour une production énergétique locale, en exploitant les conditions géographiques qui existent pratiquement dans tout le territoire nord du pays (littoral et haut plateau), et d'autre part peut constituer une solution sérieuse pour le défi énergétique globale généralement et algérien en particulier avec un grand potentiel qui est loin d'être exploiter.

**Mots clés :** Turbine hydraulique, Turbomachine motrice, Turbine Francis, Centrale hydroélectrique.

## **Abstract**

This thesis focuses on the technical characterization study of a Francis hydraulic turbine and the renewable electricity production in general terms with a particular emphasis on a type of turbine used which is that of the Francis turbine. The numerical study was carried out on a concrete case of this turbine by averaging different classic energy formulas and those of similarities applied to hydraulic turbines in order to understand the technical elements governing the design and the proper functioning of these machines and also to control adapting the use of a given turbine to the different conditions that may arise in practice. Four case studies were considered during this work which are the case of constant rotation speed, the case of variable rotation speed, the case of the variation of the degree of reaction of the turbine and the case of the study of the similarities for the same geometry (without size change, and with size change) to see the impact on different factors such as efficiency, torque, powers, unit rotational speed, unit torque, unit flow, etc At the end of each case study, characteristic curves were plotted. The results obtained in the form of numerical values and plotted curves are rich in information on the different operating phases of the turbine and can constitute a user guide for the engineer according to the needs that may arise. Finally, this study shows, on the one hand, the path towards the possibility of installing this type of turbine, at least for local energy production, by exploiting the geographical conditions that exist practically throughout the northern territory of the country (coastal and high plateau), and on the other hand can constitute a serious solution for the overall energy challenge generally and Algerian in particular with a great potential which is far from being exploited.

Keywords: Hydraulic turbine, Turbomachine, Francis Turbine, Hydroelectric power station.

## الملخص

تركز هذه الأطروحة على دراسة الخصائص الفنية لتوربينات فرانسيس الهيدروليكية وإنتاج الكهرباء المتجددة بشكل عام مع التركيز بشكل خاص على نوع التوربينات المستخدمة وهو توربين فرانسيس.

تم إجراء الدراسة العددية على حالة ملموسة لهذا التوربين من خلال حساب متوسط صيغ الطاقة الكلاسيكية المختلفة وتلك الخاصة بأوجه التشابه المطبقة على التوربينات الهيدروليكية من أجل فهم العناصر التقنية التي تحكم التصميم والتشغيل السليم لهذه الآلات وكذلك للتحكم في تكيفها. استخدام توربين معين للظروف المختلفة التي قد تنشأ في الممارسة.

تمت دراسة أربع دراسات حالة خلال هذا العمل وهي حالة سرعة الدوران الثابت ، حالة سرعة الدوران المتغيرة ، حالة اختلاف درجة تفاعل التوربين وحالة دراسة أوجه التشابه لنفس الهندسة. (بدون تغيير الحجم ، ومع تغيير الحجم) لمعرفة التأثير على عوامل مختلفة مثل الكفاءة ، وعزم الدوران ، والقوى ، وسرعة دوران الوحدة ، وعزم دوران الوحدة ، وتدفق الوحدة ، إلخ. في نهاية كل دراسة حالة ، تم رسم منحنيات مميزة.

النتائج التي تم الحصول عليها في شكل قيم عددية ومنحنيات مخططة غنية بالمعلومات حول مراحل التشغيل المختلفة للتوربين ويمكن أن تشكل دليل مستخدم للمهندس وفقاً للاحتياجات التي قد تنشأ.

أخيراً ، توضح هذه الدراسة ، من ناحية أخرى ، المسار نحو إمكانية تركيب هذا النوع من التوربينات ، على الأقل لإنتاج الطاقة المحلية ، من خلال استغلال الظروف الجغرافية الموجودة عملياً في جميع أنحاء الإقليم الشمالي من البلاد (الساحلية والهضبة المرتفعة). ) ، ومن ناحية أخرى يمكن أن يشكل حلاً جاداً لتحدي الطاقة بشكل عام والجزائري بشكل خاص مع إمكانات كبيرة بعيداً عن الاستغلال.

الكلمات المفتاحية: التوربينات الهيدروليكية ، التوربينات التوربينية ، توربين فرانسيس ، محطة الطاقة الكهرومائية.

# Liste de matières

<b>Résumé</b> .....	4
<b>Abstract</b> .....	5
<b>Liste des figures</b> .....	9
<b>Liste des tableaux</b> .....	10
<b>Nomenclature</b> .....	11
<b>Introduction générale</b> .....	13
<b>CHAPITRE I</b> .....	15
<b>GENERALITES SUR LES CENTRALES HYDROELECTRIQUES</b> .....	15
I.1 Introduction .....	16
I.2 Notions sur les centrales hydro-électriques .....	16
I.2.1 Définition et principe de fonctionnement d'une centrale hydro-électrique .....	16
I.2.2 Les composantes principales des centrales hydroélectriques .....	17
I.2.3 Classification des centrales hydroélectriques .....	18
I.3 Avantages et inconvénients des centrales hydroélectriques .....	19
I.4 Différents types de turbines hydrauliques .....	20
I.4.1 Les turbines à Action .....	20
I.4.2 Les turbines à Réaction .....	22
I.5 Sélection d'un ou plusieurs types de turbines .....	25
I.5.1 Critères généraux .....	25
I.5.2 Abaques de choix .....	26
I.6 Comparaison et différence entre turbine Francis et turbine Kaplan .....	27
I.7 Comparaison entre centrale thermique et centrale hydroélectrique .....	28
I.8 Revue bibliographique .....	29
<b>CHAPITRE II</b> .....	30
<b>MODELISATION DE LA TURBINE FRANCIS</b> .....	30
II.1 Introduction .....	31
II.2 Présentation de la turbine Francis .....	31
II.2.1 Définition .....	31
II.2.2 Technologie .....	31
II.2.3 Différents types .....	33
II.2.4 Utilisation .....	34
II.2.5 Les caractéristiques principales de la turbine Francis .....	34
II.3 Calcul de la turbine hydraulique de Francis .....	35
II.3.1 Paramètres communs à tous les types de turbines .....	35
II.3.2 Paramètres spécifiques de la turbine Francis .....	39

II.3.3 Etude des similitudes .....	43
<b>CHAPITRE III .....</b>	<b>47</b>
<b>ETUDE NUMERIQUE D'UN CAS CONCRET DE TURBINE DE FRANCIS .....</b>	<b>47</b>
III.1 Introduction.....	48
III. 2 Démarche d'étude .....	48
III.2.1 Schéma générale de la turbine Francis étudiée.....	48
III.2.2 Données principales de la centrale hydroélectrique.....	49
III.2.3 Hypothèses .....	49
III.2.4 Etapes de l'étude .....	49
III.3 Résultats et interprétations .....	51
III.3.1 Vérification de la vitesse spécifique .....	51
III.3.2 Étude des courbes caractéristiques de la turbine Francis choisie .....	52
III.4 Bilan .....	65
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>69</b>

## Liste des figures

Figure I-1 Principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique. ....	16
Figure I-2 Schéma d'une turbine à action avec ses paramètres de fonctionnement et ses composants. ....	21
Figure I-3 Principe de fonctionnement d'une turbine Pelton. ....	22
Figure I-4 Schéma d'une turbine à réaction ....	23
Figure I-5 Principe de fonctionnement d'une turbine Francis ....	24
Figure I-6 Principe de fonctionnement d'une turbine Kaplan. ....	25
Figure I-7 Domaine d'utilisation des différents types de turbines ....	26
Figure I-8 Abaque de choix H-Q ....	26
Figure I-9 Abaques de sélection H-Ns ....	27
Figure I-1 Principe de fonctionnement de turbine Francis ....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure II-2 Turbine de Francis à axe horizontale ....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure III-3 Turbine de Francis à axe vertical ....	34
Figure IV-4 Composants et profil en long d'une petite centrale hydraulique. ....	35
Figure V-5 Triangle et diagramme des vitesses à l'entrée et à la sortie de la turbine. ....	37
Figure VI-6 Schéma de fonctionnement d'une turbine de Francis ....	39
Figure II-7 Rendement des turbines hydrauliques en fonction de la vitesse spécifique ....	43
Figure III-1 Dimensions principales d'une roue de turbine Francis ....	49
Figure III-2 Courbe de la hauteur en fonction du débit. ....	52
Figure III-3 Courbe de la puissance en fonction du débit ....	53
Figure III-4 Courbe du rendement en fonction du débit ....	54
Figure III-5 Courbe de $\Psi$ en fonction de $\phi$ ....	55
Figure III-6 Courbe du débit en fonction de la vitesse de rotation ....	56
Figure III-7 Courbes des puissances a débits différents en fonction de la vitesse de rotation ....	57
Figure III-8 Courbe du rendement en fonction de la vitesse de rotation. ....	57
Figure III-9 Courbes des couples a différents débits en fonction de la vitesse de rotation ....	58
Figure III-10 Courbe du débit unitaire en fonction de la vitesse de rotation unitaire ....	59
Figure III-11 Courbe de la puissance unitaire en fonction de la vitesse de rotation ....	60
Figure III-12 Courbe degré de réaction théorique en fonction du débit. ....	61
Figure III-13 Courbe de la hauteur en fonction du débit. ....	62
Figure III-14 Courbe de la Puissance en fonction de débit ....	62
Figure III-15 Courbe du rendement en fonction de débit. ....	63
Figure III-16 Courbe de la hauteur en fonction du débit. ....	64
Figure III-17 Courbe de la puissance en fonction du débit ....	65

## **Liste des tableaux**

Tableau 1 Avantages et inconvénients des centrales hydroélectriques. ....	20
Tableau 2 Comparaison et différence entre turbine Francis et turbine Kaplan .....	28
Tableau 3 Comparaison des deux centrales.....	29
Tableau 4 Lois de similitude pour une turbine donnée .....	45
Tableau 5 Tableau des paramètres au rendement maximal. ....	55
Tableau 6 Tableau des paramètres à vide.....	55
Tableau 7 Tableau des paramètres au rendement maximal.....	60
Tableau 8 Tableau des paramètres d'emballement .....	60
Tableau 9 Tableau des paramètres au rendement maximal.....	63
Tableau 10 Tableau des paramètres à vide.....	63

## Nomenclature

### Lettres latines

<i>Symbole</i>	<i>Paramètres</i>	<i>Unité</i>
$P_0, P_1$	Pression atmosphérique	atm
$A$	Coefficient de puissance	/
$A'$	Coefficient de couple	/
$D$	Diamètre de la turbine	m
$D_m$	Diamètre de référence	m
$g$	Accélérateur de la pesanteur	$m/s^2$
$H$	<i>Hauteur de la chute</i>	m
$H_{net}$	Hauteur nette	m
$H_b$	Hauteur brute	m
$H_l$	Perte de charge	m
$N$	Vitesse de rotation	tr/min
$N_{max}$	Vitesse maximale	tr/min
$N_s$ ou $N_q$	Vitesse spécifique	/
$P$	Puissance	w
$P_{hy}$	Puissance hydraulique	w
$P_{mec}$	Puissance mécanique	w
$R$	Rayon de la turbine	m
$Q$	Débit	$m^3/s$
$T$	Couple	N.m
$N_{II}$	Vitesse réduite	$(tr.m^{0.5})/min$
$Q_{II}$	Débit réduit	$s/(m^{0.5})$
$P_{II}$	Puissance réduite	$W/(m^{3.5})$
$C$	vitesse absolue de l'eau	m/s
$C_u$	Une composante circonférentielle	m/s
$C_r$	Une composante radiale	m/s
$U$	vitesse périphérique de la roue	m/s
$W$	vitesse relative de l'eau par rapport à l'aubage de la roue	m/s

### Lettres grecques :

<i>Symbole</i>	<i>Paramètres</i>	<i>Unité</i>
$\rho$	Masse volumique	$kg/m^3$
$\psi$	Coefficient d'énergie	/
$\phi$	Coefficient de débit	/

$\eta$	Rendement	%
$\alpha, \beta$	Angle de vitesse	°
$\xi_1, \varphi_1, \lambda_1, \mu_1, K_1$	coefficients empiriques	/
$\sigma$	coefficient de Thoma.	/
$\omega$	Vitesse de rotation angulaire	Rad/s
$\omega_s$	Vitesse spécifique adimensionnel	/

### Indice :

1,2: Entrée et Sortie

## Introduction générale

À l'heure actuelle, la consommation de l'énergie électrique connaît une augmentation significative avec l'évolution de la population et du niveau de vie, ce qui a entraîné le déplacement de la recherche des énergies fossiles vers les énergies renouvelables et propres, comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne ou la biomasse, sans oublier l'énergie hydraulique. Cette dernière étant due à la puissance de l'eau qui coule et d'autres facteurs naturels cède la place à une énergie plus propre et renouvelable qui peut répondre aux besoins locaux.

L'hydroélectricité est la troisième source de production électrique mondiale après le charbon et le gaz : c'est donc la première source d'énergie renouvelable dans le monde.

La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2009 était de 3,214 TW (19% de la production totale d'électricité dans le monde) et le potentiel hydroélectrique total de la planète serait d'environ 15 000 TWh, soit trois fois plus que le niveau d'exploitation actuel selon EDF [1].

D'autre part, il existe différents types de turbines hydrauliques pour exploiter l'énergie hydraulique et la convertir en énergie électrique via des centrales hydroélectriques d'où la nécessité d'explorer ce domaine, très important pour les ingénieurs et techniciens, afin de mieux comprendre et maîtriser les outils de conception et de commande de ce genre de machines en vue d'une meilleure utilisation.

Le cadre principal étudié dans ce travail est celui de l'étude d'une turbine hydraulique de Francis, très répandue dans les milieux à géographie basse à moyenne car elle ne nécessite pas une hauteur de chute très élevée.

Pour mener à bien ce travail nous avons choisi de le structurer en trois (03) chapitres :

- Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les centrales hydroélectriques, sa constitution, l'énumération de quelques caractéristiques et les critères de choix de la turbine.
- Le second chapitre est réservé à la définition de la turbine hydraulique choisie, en l'occurrence la turbine de Francis (définition, différents types, la technologie, l'utilisation et caractéristiques), éléments de calcul théorique et les paramètres de cette turbine (différentes formules de calcul).

- Dans le troisième chapitre qui est le dernier, nous allons présenter un cas réel de turbine à étudier sous plusieurs aspects. Une démarche d'étude a été adoptée qui a mené à des résultats qui ont fait l'objet d'une analyse et de discussions.

**CHAPITRE I**  
**GENERALITES SUR LES**  
**CENTRALES**  
**HYDROELECTRIQUES**

## I.1 Introduction

L'hydroélectricité est l'une des énergies les plus renouvelables dans la production d'électricité et représente 15% de l'énergie électrique produite dans le monde. On peut aussi la considérer comme l'une des énergies les moins chères et les plus pures.

Les centrales hydroélectriques sont des éléments clés pour le développement de nouvelles énergies renouvelables, sa production n'entraîne pas d'émissions de CO<sub>2</sub> et ne génère pas de déchets toxiques. Les ressources hydriques sont des énergies primaires gratuites et peuvent contribuer à la sécurisation de l'approvisionnement en électricité du pays [1].

Ce chapitre comprend un aperçu des centrales hydroélectriques, de leurs principales caractéristiques et composants, à savoir les turbines hydrauliques sous plusieurs aspects (différents types de turbines, principe de fonctionnement, critères de choix, etc...). Et enfin, ses avantages et ses inconvénients, et sa comparaison avec d'autres turbines thermiques (classique ou nucléaire). Une revue bibliographique succincte de quelques travaux sur les turbines de Francis est présentée pour conclure cette partie.

## I.2 Notions sur les centrales hydro-électriques

### I.2.1 Définition et principe de fonctionnement d'une centrale hydro-électrique

Le barrage situé dans le cours habituel de la rivière accumule de l'eau pour former le réservoir et cela permet à l'eau d'acquérir une énergie potentielle qui sera ensuite transformée en électricité ; une vanne permet de contrôler l'arrivée de l'eau. Une fois à l'intérieur de celle-ci, il est conduit par un tuyau appelé conduite forcée vers la salle des machines de l'usine [2].

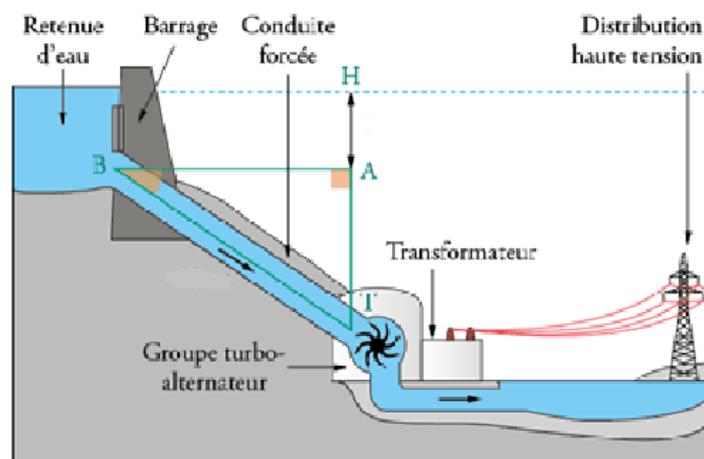


Figure I-1 Principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique.

Au fur et à mesure que l'eau, sous pression, circule dans les tuyaux, l'énergie potentielle est transformée en énergie cinétique, c'est-à-dire qu'elle perd de la force et acquiert de la vitesse en arrivant de la salle des machines l'eau qui frappe sur les pales de la turbine transformant son énergie cinétique en mécanique de rotation. L'axe de la turbine est lié à celui du générateur électrique qui transforme l'énergie de rotation en électricité. Une fois que l'eau abandonne son énergie elle est conduite en aval par un canal de drainage appelé canal de fuite [2].

### **I.2.2 Les composantes principales des centrales hydroélectriques**

#### **I.2.2.1 Le réservoir ou le barrage**

C'est un grand endroit pour retenir l'eau afin d'augmenter l'énergie potentielle de la quantité d'eau retenue et d'augmenter la quantité d'énergie électrique générée. Les barrages sont utilisés parce que l'énergie est directement dérivée de la rivière et l'eau fluctue en raison de sa dépendance aux changements saisonniers et aussi de la montée et de la descente des niveaux d'eau [3].

#### **I.2.2.2 La conduite forcée de l'eau**

C'est un tube ou plusieurs gros tubes qui se trouvent au fond du barrage et amènent l'eau à l'entrée de la turbine. L'eau s'écoule à travers ces tubes à grande vitesse et la vitesse de l'eau est contrôlée par une vanne au début du tube et une valve au bout [4].

#### **I.2.2.3 Groupe Turbo-alternateur**

La turbine et le générateur sont conçus pour être sur le même axe et le générateur est installé au-dessus de la turbine (si elle est verticale) ou sur le même axe de la turbine (si elle est horizontale).

La turbine convertit l'énergie cinétique de l'eau en énergie mécanique faisant ainsi tourner son axe relié un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique [3].

#### **I.2.2.4 Les ouvrages de restitutions**

A la sortie de la centrale, l'eau turbinée est renvoyée dans la rivière par un canal de fuite. Ce canal est établi soit à l'air libre, soit en galerie dans le cas où la centrale est souterraine.

### I.2.2.4 Appareils et machines auxiliaires

Certains dispositifs et équipements tels que pompes, vannes, équipements de régulation de vitesse, appareils de mesure et de contrôle sont placés afin d'assurer le fonctionnement de la station.

### I.2.3 Classification des centrales hydroélectriques

Les centrales hydroélectriques sont classées selon plusieurs aspects pour connaître la différence entre elles et choisir ce qui convient aux exigences et aux besoins.

#### A- Par puissance :

On distingue :

- Les grandes centrales hydroélectriques (GCH), d'une puissance de plus de 10 MW.
- Centrales hydroélectriques moyennes (MCH) (5 MW à 10 MW).
- Les petites centrales hydroélectriques (PCH), subdivisées en petites centrales (500 kW à 5 MW), microcentrales (20 kW à 500 kW) et pico-centrales (moins de 20 kW) [5].

#### B- Par mode de production :

Selon le mode de production, il y a trois types de centrales hydroélectriques :

##### *a- Les centrales gravitaires :*

Les centrales gravitaires utilisent le flot d'eau amené par la gravité et le cycle de l'eau. L'eau est utilisée directement dans le cas des centrales au fil de l'eau, ou après l'avoir stockée derrière un barrage dans le cas des centrales-écluses et des centrales-lacs.

##### *b- Les stations de transfert d'énergie par pompage (Step) :*

Une Step (station de transfert d'énergie par pompage) est un moyen de stocker l'électricité qui exploite la différence d'énergie potentielle entre deux bassins. Est placé un système permettant à la fois le pompage et le turbinage. Lorsqu'il y a un surplus d'énergie, une pompe puise l'eau dans le bassin inférieur pour l'acheminer vers le bassin supérieur. Lors des pics de consommation, l'eau du bassin supérieur est relâchée vers le bassin inférieur et alimente une turbine qui produit de l'électricité.

##### *c- Une centrale marémotrice :*

Elle produit à partir de la marée de l'électricité à l'échelle industrielle. Son principe de fonctionnement repose sur l'utilisation du dénivelé créé par l'amplitude des marées pour remplir son réservoir et produire de l'électricité [5].

### **C- par hauteur :**

Enfin, on peut classer les ouvrages en fonction de leur hauteur de chute, c'est-à-dire de la différence d'altitude entre le miroir théorique du réservoir plein et la turbine. Il existe 3 grandes catégories d'aménagements hydrauliques :

#### ***a- De lac ou de haute chute :***

Elles sont surtout présentes dans les sites de haute montagne. Elles sont caractérisées par un débit faible et un dénivelé très fort avec une chute supérieure à 300 m. Le barrage s'oppose à l'écoulement naturel de l'eau pour former un lac de retenue. Ce lac est alimenté par l'eau des torrents, la fonte des neiges et des glaciers.

#### ***b- D'éclusée ou de moyenne chute :***

Elles sont surtout installées en moyenne montagne et dans les régions de bas-relief. Elles sont caractérisées par un débit moyen et un dénivelé assez fort avec une chute comprise entre 30 et 300 m.

#### ***C -Au fil de l'eau ou de basse chute :***

Elles sont implantées sur le cours de grands fleuves ou de grandes rivières. Elles sont caractérisées par un débit très fort et un dénivelé faible avec une chute de moins de 30 m. Dans ce cas, il n'y a pas de retenue d'eau et l'électricité est produite en temps réel [5].

### **I.3 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.

Certains de ses avantages et inconvénients sont cités dans le tableau suivant :

Avantages	Inconvénients
élimination du coût du carburant, elle a besoin d'eau comme carburant, et c'est le carburant le moins cher et le plus simple disponible.	Les centrales hydroélectriques qui utilisent des barrages submergent de vastes étendues de terres en raison de l'exigence d'un réservoir.
Il n'entraîne pas de pollution de l'air par la fumée et ne pollue pas l'environnement.	Variation de la quantité d'énergie électrique générée de temps à autre.
Frais d'exploitation journaliers bon marché.	Coûts initiaux élevés pour construire la centrale.
l'hydroélectricité émet très peu de gaz à effet de serre (GES).	Difficulté à effectuer la maintenance.

Tableau 1 Avantages et inconvénients des centrales hydroélectriques [6].

### I.4 Différents types de turbines hydrauliques

Les turbines hydrauliques sont le cœur des centrales hydroélectriques. Elles sont des machines qui développent un couple à partir de l'action dynamique et de la pression de l'eau. Elles peuvent être regroupées en deux types.

#### I.4.1 Les turbines à Action

La famille des turbines à action (appelée aussi à impulsion) utilise l'énergie cinétique d'un jet d'eau à grande vitesse pour transformer l'énergie de l'eau en énergie mécanique.

Les turbines à action sont dénoyées, c'est à dire qu'elles ne sont pas entourées d'eau. L'énergie produite dépend uniquement des conditions de l'écoulement avant la roue. Les aubes d'une turbine à impulsion sont généralement en forme de tronçon afin qu'elles attrapent le fluide et le dirigent sous un angle [7].

#### A-Principe de fonctionnement :

Un jet libre agit sur les augets (aubes) d'une roue (turbine). Ce jet exerce une force sur l'auget en mouvement de rotation, qui est transformé en couple et puissance mécanique sur l'arbre de la turbine.

La turbine à action est caractérisée par le fait que l'énergie à disposition de l'aubage est entièrement sous forme d'énergie cinétique. L'échange d'énergie entre l'eau et l'aubage a

lieu à pression constante, généralement la pression atmosphérique. La roue de la turbine dénoyée tourne dans l'air.

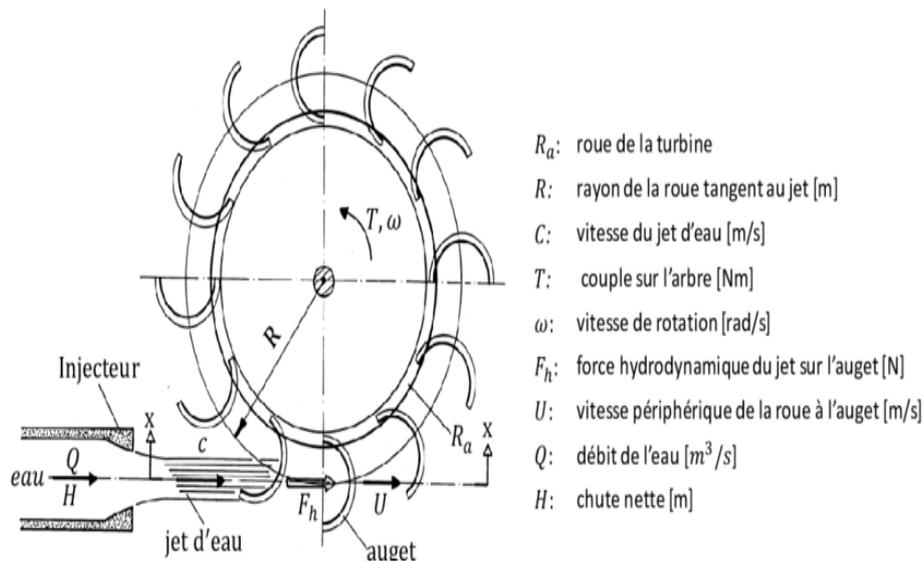


Figure I-2 Schéma d'une turbine à action avec ses paramètres de fonctionnement et ses composants.

## B-Exemples de turbines à action :

### B.1- Turbine Cross flow (ou Banki Mitchell):

Une turbine Banki a un flux transversal. C'est-à-dire que l'eau s'écoule au travers des pales de la turbine. Comme pour une roue à aubes, l'eau entre par un côté de la turbine et ressort par le côté opposé. L'eau traverse ainsi deux fois les pales de la turbine. Il n'y a pas de gain d'efficacité à espérer de ce type de turbine ; le choix dépend du débit, de la hauteur de chute et du rendement souhaité. Ce type de turbine opère à basse vitesse, car il serait inefficace à grande vitesse et grand débit.

C'est une turbine très simple avec un rendement moyen si on la compare aux turbines Pelton, et son rendement est relativement faible, généralement cette turbine est placée dans un ruisseau comme un fleuve [7].

### B.2- Turbine Pelton :

Ce sont des turbines composées d'augets qui ressemblent à des coquilles de demi-noix et cette forme n'est pas aléatoire.

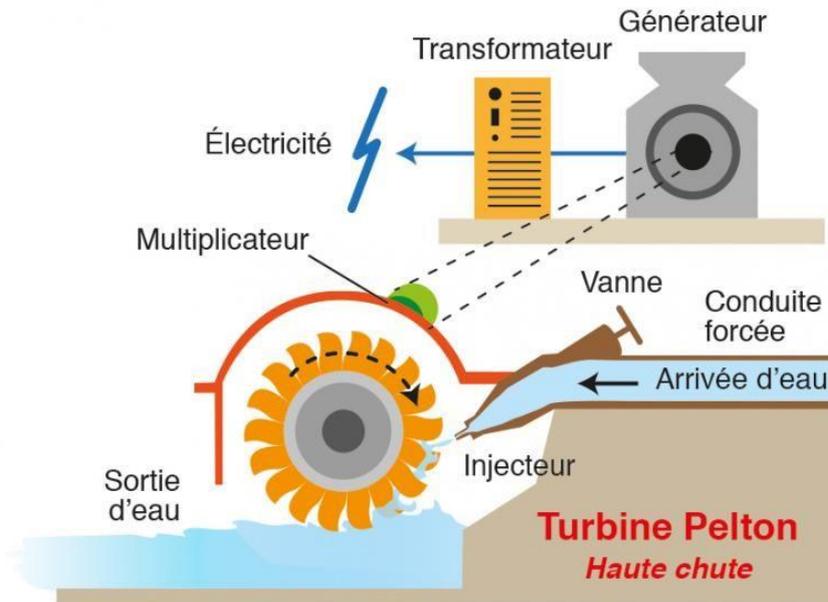


Figure I-3 Principe de fonctionnement d'une turbine Pelton.

Elle permet la séparation du flux d'eau, qui frappe les augets en deux, et qui dévie du côté de la roue permettant à l'eau de s'évacuer.

Les injecteurs sont disposés autour de la turbine et permettent l'alimentation en eau. L'énergie cinétique de l'eau sortant de l'injection est directement convertie en énergie mécanique grâce au choc de l'eau sur les augets.

Les turbines Pelton sont simplement une version améliorée des moulins à eau à noter que l'axe de rotation des turbines est horizontal, et sont utilisées pour les barrages à haute chute, et des débits compris (0,2 – 8 m<sup>3</sup>/s). La puissance maximale développée par cette turbine est de l'ordre de 350MW [3].

### I.4.2 Les turbines à Réaction

Une turbine à réaction est une machine fermée (noyée) qui développe de l'énergie à partir de l'action combinée de l'énergie de pression et de l'énergie cinétique de l'eau. Les turbines à réaction fonctionnent complètement immergées et peuvent également être divisées en plusieurs types, dont deux types principaux sont Francis et Kaplan [7].

#### A-Principe de fonctionnement :

Les turbines à réaction transforment l'énergie de pression de l'eau en énergie cinétique dans le distributeur et dans le rotor. Le distributeur est alimenté en eau par un carter en

spirale. Ce carter crée un tourbillon (vortex). L'eau en écoulement est accélérée dans le distributeur par les aubes directrices réglables et dirigées sur les aubes mobiles. Le changement de direction et l'accélération continue de l'eau dans le rotor génèrent une impulsion qui est transmise au rotor.

Ces aubages se comportent comme une aile d'avion : l'écoulement de l'eau provoque sur le profil de l'aube une force hydrodynamique qui induit un couple sur l'arbre de la turbine.

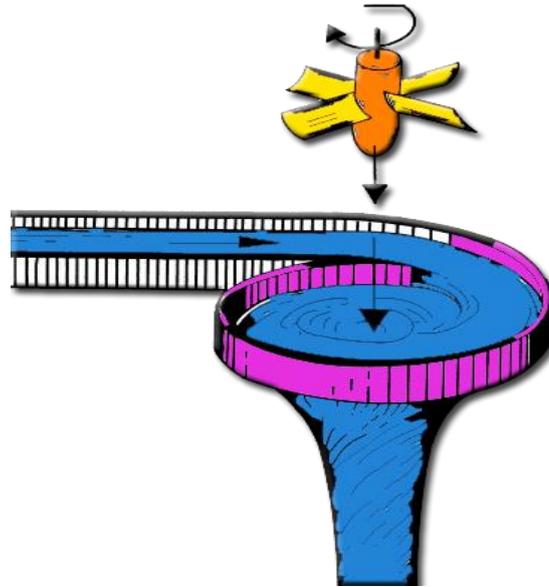


Figure I-4 Schéma d'une turbine à réaction

### **B-Exemples de turbines à réaction :**

#### ***B.1- Turbine Francis :***

Les machines Francis sont des machines compactes, robustes et particulièrement adaptées Aux moyennes chutes. Elles réalisent la transformation d'énergie hydraulique en énergie mécanique avec un rendement élevé dans une plage de fonctionnement étendue.

Dans ce type de machine, le tourbillon est créé par une bache spirale, l'angle final de l'écoulement tourbillonnaire étant défini par le distributeur, en règle générale mobile. L'eau s'écoule radialement pour changer de direction à travers la roue et en ressortir axialement [4].

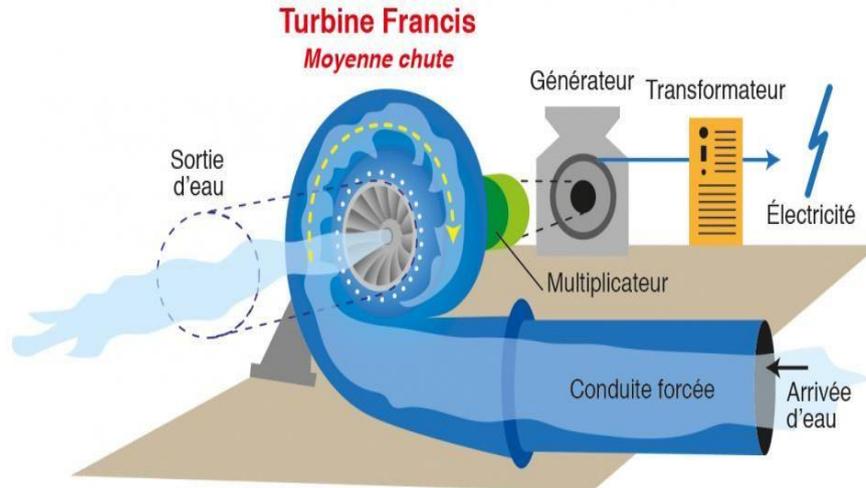


Figure I-5 Principe de fonctionnement d'une turbine Francis

### **B.2- Pompe centrifuge inversée :**

La pompe inversée est une pompe standard qui est utilisée comme turbine en inversant le sens de l'écoulement de l'eau ainsi que celui de la rotation de l'arbre. Génère ainsi un couple mécaniquement utilisable sur l'arbre. Toutes les pompes centrifuges peuvent être utilisées pour le turbinage pratiquement sans modification. Il s'agit d'une machine simple et bon marché. Son débit faible à moyen, et sa hauteur manométrique (hauteur de chute) moyenne à grande [3].

### **B.3- Turbines hélice et Kaplan :**

Les turbines hélice et Kaplan sont les plus appropriées pour le turbinage des faibles chutes. Elles se particularisent par leur roue qui est similaire à une hélice de bateau, et dont les pales sont fixes (turbine Hélice) ou réglables en marche (turbine Kaplan) [3].

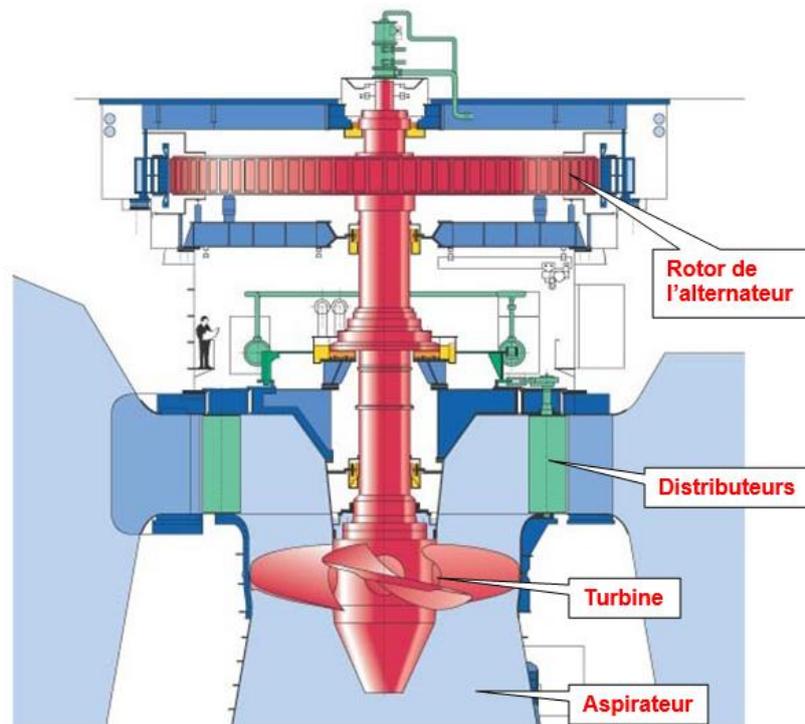


Figure I-6 Principe de fonctionnement d'une turbine Kaplan

### I.5 Sélection d'un ou plusieurs types de turbines

La sélection d'un type de turbine va être fonction non seulement de la chute nette et du débit, mais aussi des données spécifiques au site sur lequel la machine sera installée.

#### I.5.1 Critères généraux

Avant de commencer la construction d'une centrale hydroélectrique, il faut d'abord vérifier quelques données préliminaires qui peuvent influencer sur l'efficacité de la turbine et que nous résumons dans :

- en fonction du débit (pertes de charge) ;
- en fonction des conditions hydrologiques extrêmes (par exemple élévation du niveau aval en cas de crue) ;
- en fonction du concept de l'aménagement (hauteur de chute variable dans un réservoir d'accumulation par exemple).

Les abaques permettent de présélectionner un type de turbine en fonction de la chute et du débit, vitesse spécifique, et rendement [3].

## I.5.2 Abaques de choix

Ces abaques permettent à partir des premières données de connaître le type de turbine utilisée (dans les deux cas suivants, on a un abaque de la hauteur  $H$  en fonction du débit  $Q$  et un autre abaque de la hauteur en fonction de la vitesse spécifique  $v$ ).

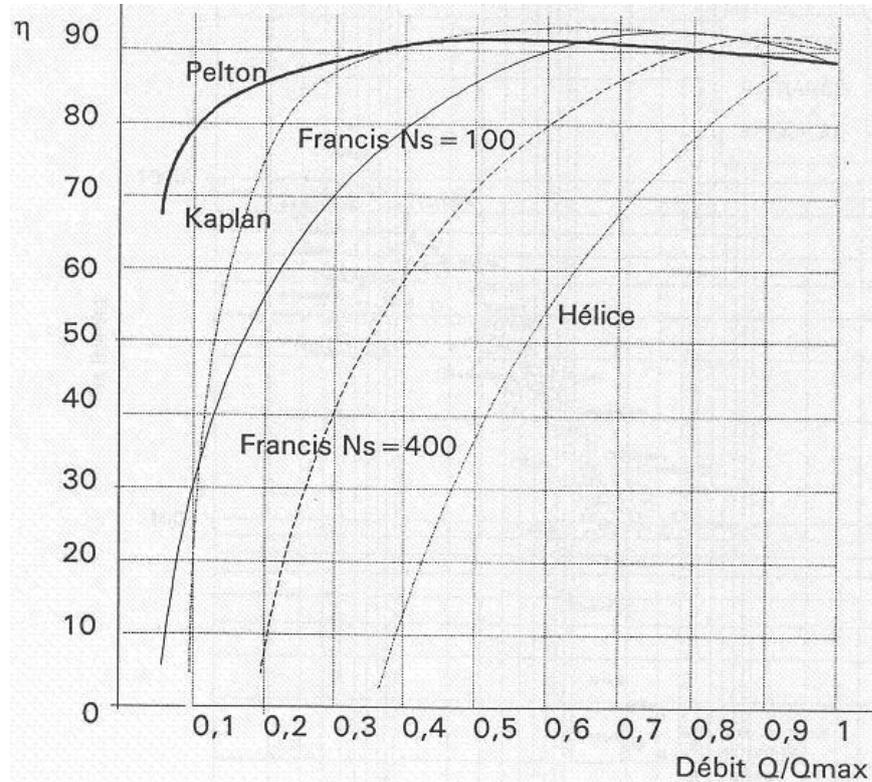


Figure I-7 Domaine d'utilisation des différents types de turbines [3]

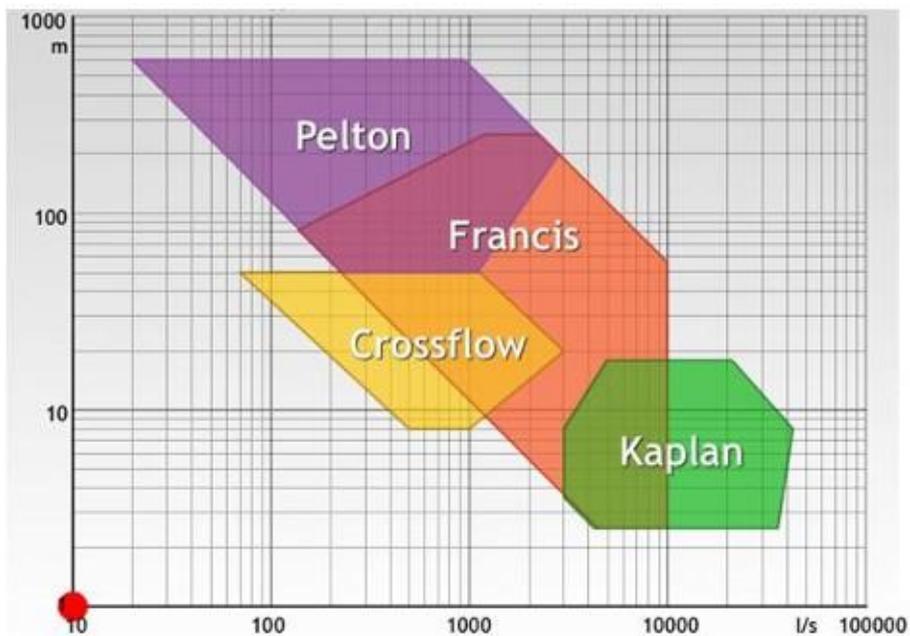


Figure I-8 Abaque de choix H-Q [3]

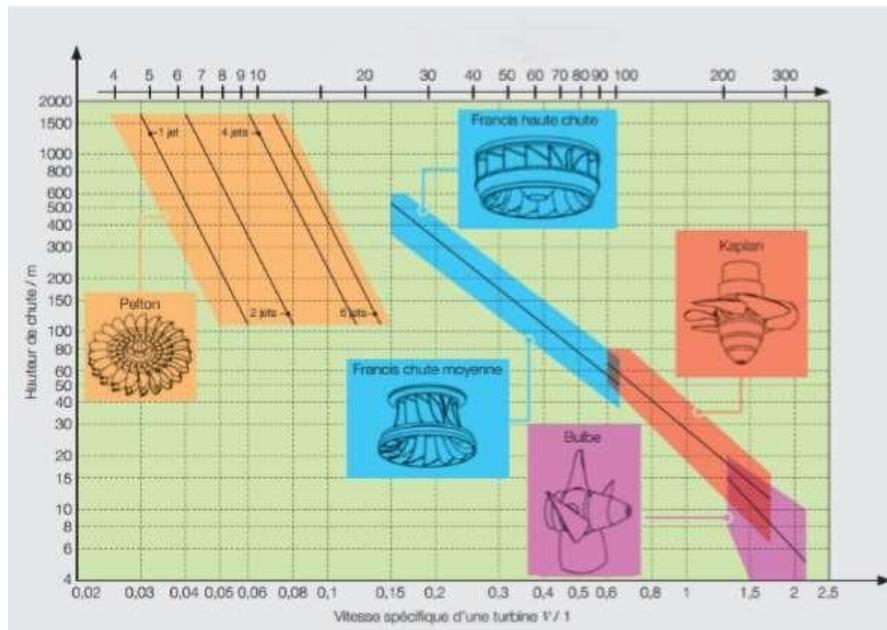


Figure 1-9 Abaques de sélection H-Ns [3]

### I.6 Comparaison et différence entre turbine Francis et turbine Kaplan

turbine Francis	turbine Kaplan
l'eau pénètre radialement dans les aubes de roue et sort axialement, on peut donc l'appeler turbine à flux mixte.	l'eau entre et sort des aubes de roue de turbine dans la direction axiale.
le nombre de pales dans la roue est généralement compris entre 16 et 24.	le nombre de pales dans la roue est généralement compris entre 3 et 8.
la perte d'énergie due au frottement des pales est plus importante en raison du grand nombre de pales.	la perte d'énergie due au frottement des pales est moindre du fait du petit nombre de pales.
l'efficacité de la turbine Francis est inférieure à celle de la turbine Kaplan.	l'efficacité de la turbine Kaplan est supérieure à celle de la turbine Francis.
la taille de la turbine Francis est relativement grande par rapport à la turbine Kaplan.	la turbine Kaplan est plus petite et compacte par rapport à la turbine Francis.
la position de l'arbre peut être verticale ou	la position de l'arbre est toujours dans le

horizontale selon l'exigence.	sens vertical car il s'agit d'une turbine à flux axial.
la vitesse de rotation (RPM) est relativement inférieure à celle de la turbine Kaplan.	la vitesse de rotation (RPM) est relativement plus élevée que celle de la turbine Francis.
La turbine Francis nécessite un débit d'eau moyen.	la turbine Kaplan nécessite un débit d'eau élevé.
la turbine Francis nécessite une plage de hauteur d'eau moyenne (100 à 400m).	La turbine Kaplan fonctionne à très faible hauteur de chute, l'exigence de hauteur de chute est généralement de 100 mètres.
La turbine Francis fonctionne sur une plage de vitesse moyenne spécifique, varie de (60 à 300).	nécessite une valeur élevée de vitesse spécifique car il s'agit d'un travail à faible hauteur de chute. généralement la plage de vitesse spécifique varie de (600 à 1000).
le servomoteur est situé à l'extérieur de l'arbre du rotor.	les servomoteurs sont situés à l'intérieur de l'arbre creux de la roue de turbine.

Tableau 2 Comparaison et différence entre turbine Francis et turbine Kaplan [8]

### **I.7 Comparaison entre centrale thermique et centrale hydroélectrique**

Les centrales électriques transforment des sources d'énergie naturelles en énergie électrique, afin d'alimenter en électricité. Ces deux centrales, thermique et hydroélectrique, possèdent une turbine actionnée par l'eau (vapeur ou liquide) mais elles sont différentes sur plusieurs aspects que nous résumons dans le tableau suivant:

centrale thermique	centrale hydroélectrique
une source d'énergie stable et qui s'adapte aux besoins	énergie renouvelable sans des émissions de dioxyde de carbone
produire de l'énergie de façon très rapide	produire de l'énergie selon l'état du centrale qui correspondent
il faut très peu de temps pour allumer une centrale thermique et produire de l'électricité	Excellentes performances et efficacité de production, facilement ajustable à la demande

Les emplacements potentiels sont n'importe où, ce qui n'entraîne pas de coûts de construction supplémentaires importants	Les emplacements possibles sont généralement dans les montagnes, ce qui entraîne des coûts de construction supplémentaires importants
Les centrales de cogénération utilisent également une partie de la chaleur perdue pour d'autres applications	Les centrales de cogénération n'utilisent jamais de la chaleur perdue

Tableau 3 Comparaison des deux centrales [3], [7]

### I.8 Revue bibliographique

De nombreuses études ont été menées sur la turbine de Francis ainsi que ces éléments constitutifs et parmi ces études on peut citer :

- Une étude sur la simulation de l'écoulement turbulent dans les aspirateurs de turbines hydrauliques dont le but était d'étude des paramètres influençant la résolution numérique stationnaire des écoulements dans les aspirateurs de turbines hydrauliques à l'aide de modèles de turbulence à deux équations. L'impact des conditions limites imposées en amont et en aval du domaine de calcul ainsi que celui du maillage ont été analysés afin de prédire avec plus d'assurance l'écoulement dans les aspirateurs [9].
- Une autre étude présente une vue générale des paramètres influant sur les performances optimales d'une turbine hydraulique du type Francis comme la hauteur, le débit et la vitesse de rotation spécifique avec ses relations, dont le but est déterminé le type et les caractéristiques principales de la turbine la mieux adaptée à ce site [10].
- Étude du comportement dynamique des turbines Francis qui permet de le contrôle active de leur stabilité de fonctionnement grâce un système, Le système de contrôle actif développé permet une réduction efficace des fluctuations hydrauliques à une fréquence précise pour un coût énergétique très encourageant [11].

Une autre étude pour la simulation numérique de l'écoulement de charge partielle dans les turbines Francis qui avait pour but l'analyse de la topologie et de la dynamique des vortex inter-aubes, ce travail a permis d'avoir une meilleure compréhension de la dynamique de l'écoulement de charge partielle dans une turbine Francis[12].

**CHAPITRE II**  
**MODELISATION DE LA TURBINE**  
**FRANCIS**

### II.1 Introduction

Les turbomachines hydrauliques Francis sont des machines compactes, robustes et particulièrement adaptées aux moyennes chutes. Elles réalisent la transformation d'énergie hydraulique en énergie mécanique avec un rendement élevé dans une plage de fonctionnement étendue.

Ce sont des machines très utilisées pour la production électrique locale notamment pour les villes ne présentant pas une prédisposition géographique particulière telles que les montagnes et les reliefs de haute altitude comme les turbines de Pelton d'où la nécessité de les étudier en vue d'une éventuelle application pour la majorité de nos villes soit en remplacement des centrales thermiques ou pour venir en assistance à celles-ci dans les périodes de forte consommation.

Dans ce second chapitre, nous allons tout d'abord présenter la définition de la turbine Francis et découvrir de manière générale, ses caractéristiques, ses composants, un accent sur ses différents types, et mettre au clair les différentes formules de calcul afin de pouvoir faire par la suite une étude numérique.

### II.2 Présentation de la turbine Francis

#### II.2.1 Définition

La turbine Francis est un type de turbine hydraulique. Il s'agit d'une turbine à réaction à écoulement entrant qui combine les concepts d'écoulement radial et axial. Les turbines Francis sont les turbines hydrauliques les plus couramment utilisées aujourd'hui au vu de leur facilité d'adaptation et de mise en œuvre et peuvent atteindre un rendement de plus de 95 %.

#### II.2.2 Technologie

##### II.2.2.1 Principe de fonctionnement

Une turbine Francis est une turbine dans laquelle le fluide entre sous une grande pression et transmet son énergie aux pales solidaires du rotor. Une partie de l'énergie est transmise par le fluide sur les pales en raison du changement de pression tandis que le reste de l'énergie est extraite par la spirale qui entoure la turbine. À la sortie, le fluide a une vitesse faible et peu d'énergie. La forme du tube de sortie est conçue pour décélérer le fluide, et le faire remonter en pression [12].

Une turbine Francis est une turbine hydraulique de type à réaction c'est à dire que la pression varie au cours de l'évolution de l'écoulement de l'entrée à la sortie de la turbine. Elle

est adaptée pour des hauteurs de chute moyennes (de 20 à 350 mètres), pour des puissances et débits moyens (de quelques kilowatts à plusieurs centaines de mégawatts avec des débits jusqu'à 30 000 l/s).

La turbine Francis est celle dont le domaine d'utilisation est le plus vaste. Elle peut fonctionner dans des conditions de hauteur de chute très étendues : de quelques dizaines de mètres jusqu'à 800 m. La puissance unitaire peut atteindre des valeurs considérables, et rien n'interdit d'envisager des groupes de 1 000 MW où même davantage [10].

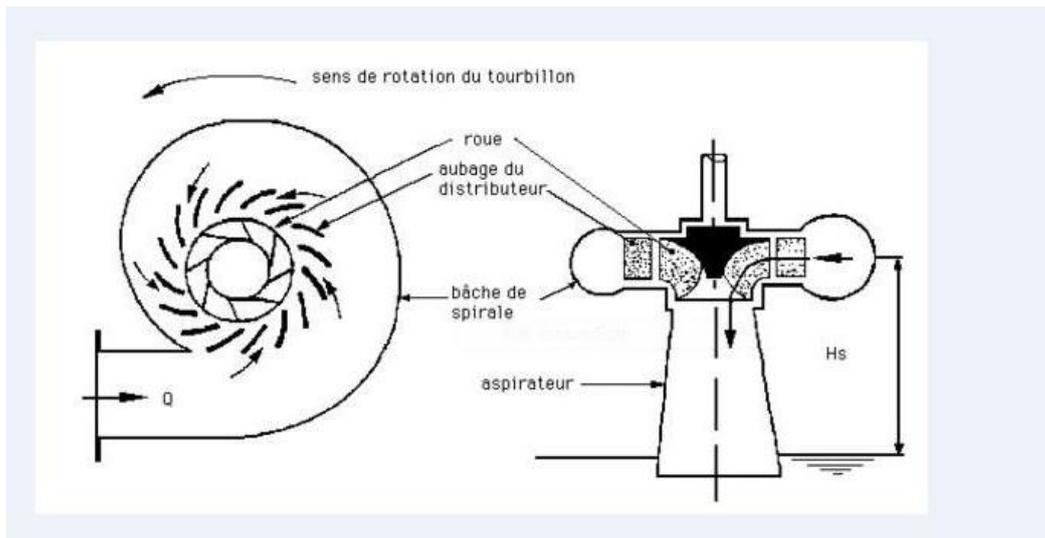


Figure IVII-1 Principe de fonctionnement de turbine Francis [8]

### II.2.2.2 Les composants et leur rôle

La turbine Francis, dans sa forme moderne, est composée des éléments suivants :

- Une bêche spirale ou volute qui reçoit l'eau sous pression de la conduite forcée et la distribue vers l'intérieur de l'anneau qu'elle forme. La forme en spirale ou en escargot permet à la vitesse moyenne du fluide de rester constante.
- Pré-distributeur : Composé de lames fixes qui ont une fonction structurelle. La conception hydrodynamique permet de minimiser les pertes hydrauliques.
- Le distributeur est placé au milieu de l'anneau de la bêche spirale. composé de pales mobiles (réglables) pour diriger l'eau vers les pales de la roue (qui est fixée sur l'arbre du générateur) et réguler le débit admis. Le distributeur permet d'orienter le fluide pour améliorer les performances et ajuster la puissance aux variations de charge du réseau électrique.

- Une roue à admission radiale centripète et à sortie axiale. Elle forme le cœur de la turbine. C'est la seule pièce tournante. Elle compte dix à vingt aubes non orientables, de géométrie tridimensionnelle non développable. Les aubes de la roue reçoivent l'écoulement en rotation à la sortie du distributeur et le dévie pour ne lui laisser qu'une rotation minime. Le moment cinétique ainsi absorbé produit le couple transmis à l'arbre de la turbine hydrodynamique ce qui permet de minimiser les pertes hydrauliques.
- Le diffuseur reçoit l'eau à la sortie de la roue et la conduit à la sortie de la turbine. Comme son nom l'indique, il permet d'abaisser la pression en sortie de la roue, sous l'effet du dénoyage éventuel de la machine et grâce à une augmentation progressive de sa section de passage [10] [13].

### II.2.3 Différents types

- **Turbines Francis à axe horizontal :**

La turbine et le générateur sont conçus pour être sur le même axe de la turbine.

Ce type se distingue par sa compacité maximale qui fait de lui un modèle durable.



*Figure VIII -2 Turbine de Francis à axe horizontale [14]*

- **Turbines Francis à axe vertical**

La turbine et le générateur sont conçus pour être sur le même axe vertical et le générateur est installé au-dessus de la turbine.

Les turbines à spirale Francis à axe vertical sont principalement conçues comme des machines compactes. Des conceptions modernes, fiables, testées, mesurées, garantissent les plus hautes

performances hydrauliques et permettent d'obtenir à maintes reprises une hauteur d'aspiration élevée et contribuent ainsi à une nette réduction des coûts d'ouvrage.



*Figure IX-3 Turbine de Francis à axe vertical [14]*

### II.2.4 Utilisation

Les turbines Francis peuvent être utilisées de manière universelle. Après tout, les turbines en spirale ont un rendement plus élevé (jusqu'à 95 %) que les turbines sans carter en spirale et sont utilisées à des hauteurs de chute allant jusqu'à 700 m et à des débits moyens.

Cependant, ils ne sont pas très efficaces lorsque les volumes d'eau fluctuent fortement, par exemple, dans les centrales électriques à basse pression sur les rivières ou à des hauteurs allant jusqu'à 700 m [15].

Cette turbine peut être installée dans des centrales hydroélectriques à pompage-turbinage. Dans ce type de centrale hydroélectrique, il y a deux réservoirs à des hauteurs différentes. Lorsqu'il y a un surplus d'énergie, le réservoir supérieur est rempli d'eau pompée par la turbine qui assure la fonction de pompe [16].

### II.2.5 Les caractéristiques principales de la turbine Francis

- Elle est à réaction (énergie sous forme cinétique et de pression).
- Adaptée surtout aux chutes élevées et moyennes (300 - 15 m) et à vitesse de rotation souvent élevée: 60 à 400 tr/min [1].
- Débits faibles à moyens (de centaines de Litre/s à 200 m<sup>3</sup>/s).
- Roue comportant un certain nombre d'aubes (de 7 à 19) fixées à un arbre disposé horizontalement ou verticalement. Entrée de l'eau en périphérie et sortie axiale (en général en dessous).

- Rendement : 80-95 %.

### II.3 Calcul de la turbine hydraulique de Francis

Comme nous l'avons vu, toutes les turbines hydrauliques ont des paramètres communs, cependant, elles diffèrent les unes des autres par d'autres paramètres, et pour le savoir, nous prendrons l'exemple de la turbine Francis.

#### II.3.1 Paramètres communs à tous les types de turbines

##### II.3.1.1 Composants et ligne d'énergie d'une centrale hydraulique

D'une manière générale et quelque soit le type de turbine, une centrale hydraulique, vue de l'extérieur, possède la même architecture qui est composée des paramètres géométriques suivants qui constituent le potentiel énergétique de la centrale :

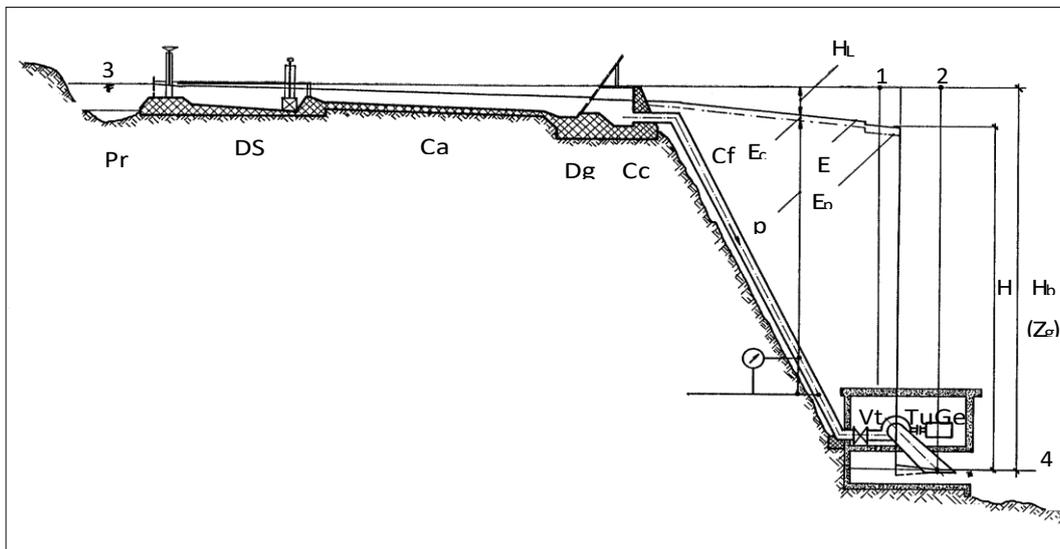


Figure XI-4 Composants et profil en long d'une petite centrale hydraulique [13]

- **Chute brute**

La chute brute est la différence d'altitude entre le niveau à la prise d'eau (point de référence 3) et le niveau à l'aval de la centrale (point de référence 4). Elle est souvent appelée hauteur géodésique  $Z_g$ .

- **Chute nette**

La chute nette représente l'énergie hydraulique à disposition de la turbine. Elle est égale à la chute brute  $H_b$  moins les pertes de charge  $H_l$  entre la prise d'eau et le point de

référence amont de la turbine (1) d'une part, et le point de référence aval de la turbine (2) et le niveau aval de la sortie de la centrale d'autre part.

Les pertes de charge correspondent à l'énergie nécessaire pour faire passer l'eau à travers les grilles et les vannes et vaincre le frottement contre les parois du canal d'amenée et de la conduite forcée. Les pertes de charge varient selon la loi [13] :

$$Hl = A * Q^2$$

ce qui permet de calculer la chute nette pour différents débits turbinés :

$$H = Hb - A * Q^2$$

- **Energie hydraulique massique :**

Selon la loi de Bernoulli :

$$E = gH = p/\rho + (v^2)/2 + gz \quad (\text{II.1})$$

L'énergie hydraulique est la somme de l'énergie de pression  $p/\rho$  , l'énergie géodésique  $gz$  et L'énergie cinétique de l'eau :

$$Ec = (v^2)/2 . \quad (\text{II.2})$$

### II.3.1.2 Equation d'Euler

La formule d'Euler qui est basée sur le principe de quantité de mouvement permet de calculer le travail technique ou l'énergie développée par la turbine et qui est égale à :

$$E = g * H = (U1 * Cu1) - (U2 * Cu2) \quad (\text{II.3})$$

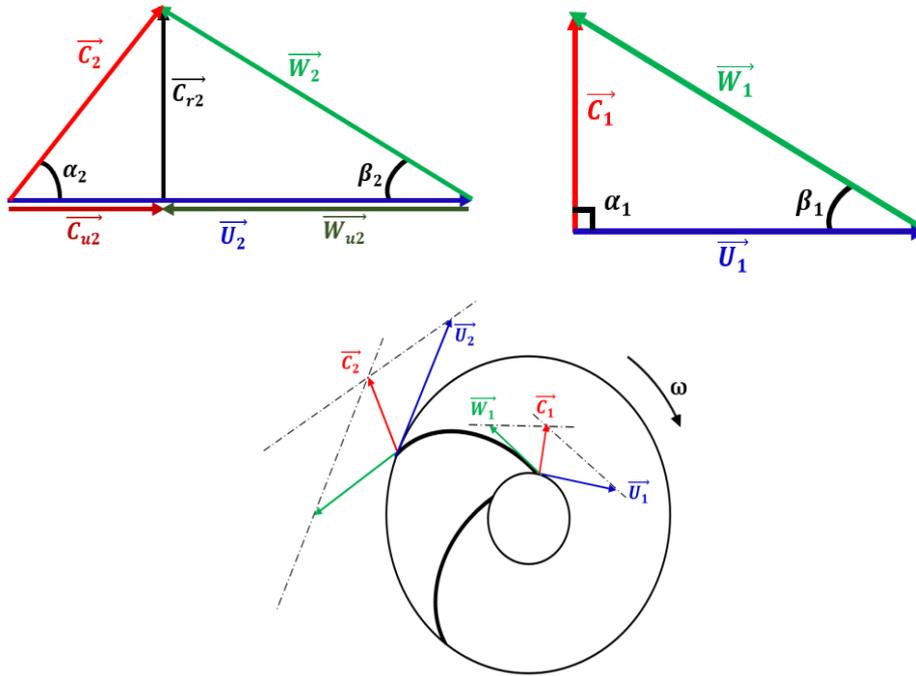


Figure IIXI-5 Triangle et diagramme des vitesses à l'entrée et à la sortie de la turbine [17]

Avec :

$C$ : vitesse absolue de l'eau

$C_u$ : Une composante circonférentielle

$C_r$ : Une composante radiale

$U$ : vitesse périphérique de la roue

$W$ : vitesse relative de l'eau par rapport à l'aubage de la roue

$\alpha$ : (Angle de calage) formé par les vitesses  $U$  et  $C$

$\beta$ : (Angle de construction) formé par les vitesses  $U$  et  $W$

$\omega$ : vitesse de rotation angulaire.

### II.3.1.3 Puissance hydraulique d'une turbine

La puissance hydraulique est la puissance fournie à la turbine par l'eau qui l'alimente.

Elle est donnée par le produit de l'énergie hydraulique  $gH$  avec le débit massique :

$$P_{hyd} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \quad (II.4)$$

### II.3.1.4 Couple, vitesse de rotation, puissance mécanique et rendement d'une turbine [13]

- **Couple**

L'eau sous pression qui entre dans la turbine exerce une force hydrodynamique sur les pales ou augets de la roue. Cette force crée un couple qui met la roue en rotation.

$$T = A' * \rho * Qv * (Nmax - N) \quad (II.5)$$

$$A' = (AN)/\omega$$

$A'$  : Coefficient adimensionnel.

$$A = (\pi * d)^2 * (1 - \cos\beta)$$

$\omega$ : vitesse angulaire.

$Nmax$  : vitesse d'emballement.

$$Nmax = \frac{v_{eau}}{2\pi R} \quad (\text{Vitesse de rotation maximale})$$

Une fois mise en mouvement, la turbine va tourner à une vitesse de rotation déterminée par les conditions d'exploitation [13].

- **Puissance mécanique ou à l'arbre de la turbine**

De par les lois de la physique, la puissance mécanique est donnée par le produit du couple par la vitesse de rotation [13] :

$$P_{méc} = A' * \rho * Qv(Nmax-N)*N \quad (II.6)$$

- **Rendement**

Toute transformation d'énergie dans une machine donne lieu à des pertes. Il s'ensuit que la puissance obtenue à l'arbre de la turbine, et qui sert à entraîner la génératrice, est inférieure à la puissance hydraulique.

Le rapport entre ces deux puissances est le rendement qui est un paramètre définissant la qualité de la turbine [10] :

$$\eta_t = P_{méc}/P_{hyd} \quad (II.7)$$

### II.3.1.5 Conditions d'exploitation d'une turbine

Une turbine travaille habituellement à vitesse de rotation constante, que ce soit pour entraîner directement une machine (scie, moulin, pompe, etc.) ou pour produire de l'électricité.

Dans le cas de la production électrique de courant alternatif, la fréquence, directement proportionnelle à la vitesse de rotation du groupe turbogénérateur, est maintenue à une valeur constante par un régulateur pour assurer un fonctionnement correct des appareils consommateurs.

En marche parallèle, c'est la fréquence du réseau qui détermine la vitesse de rotation de la génératrice.

### II.3.2 Paramètres spécifiques de la turbine Francis

Le schéma de structure et de fonctionnement de la turbine de Francis (et de la majorité des turbines hydrauliques) est représenté dans la figure suivante :

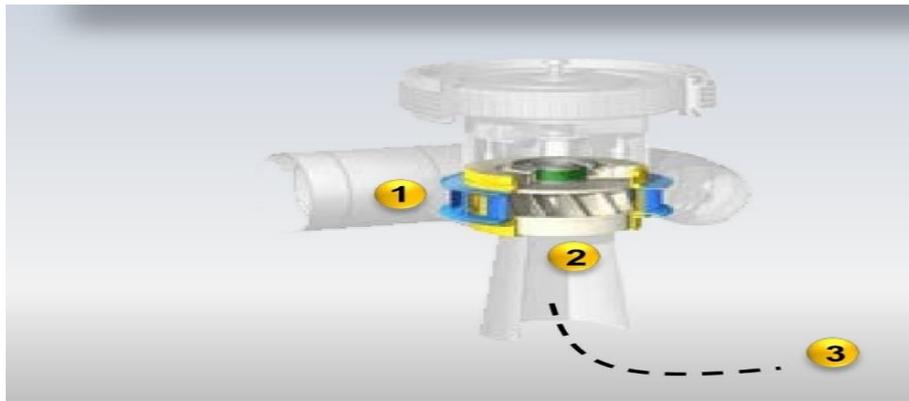


Figure XII-6 Schéma de fonctionnement d'une turbine de Francis [18]

On définit les paramètres techniques qui peuvent caractériser une turbine de Francis dans ce qui suit :

#### II.3.2.1 Hauteur d'aspiration théorique

La hauteur d'aspiration  $H_s$  d'une turbine Francis, est la distance entre le plan d'eau aval et l'axe de la roue de la turbine. Sa valeur est positive si la turbine se trouve au-dessus du niveau d'eau aval et négative dans le cas contraire [19].

La hauteur d'aspiration théorique  $H_{sth}$  est calculée à l'aide de l'équation :

$$H_{sth} = H_a - H_v \quad (II.8)$$

Où

$H_a$  : Hauteur d'eau en m équivalent à la pression atmosphérique  $P_a$ ,

$H_v$  : Hauteur d'eau en m équivalent à la pression de dégagement de vapeur (pression de vaporisation)  $P_v$ .

#### II.3.2.2 Hauteur d'aspiration

La hauteur d'aspiration  $H_s$  d'une turbine à réaction à axe horizontale peut s'exprimer comme suit:

$$H_s = H_{sth} - \sigma H_n \quad (\text{II.9})$$

Où  $H_n$  est la hauteur nette.

$\sigma$  Un coefficient sans dimension, dit coefficient de Thoma.

$H_s$  Est un paramètre déterminant pour fixer le niveau de la turbine par rapport au plan d'eau aval [13].

### II.3.2.3 Vitesse spécifique

Les vitesses spécifiques sont des paramètres qui caractérisent les turbines hydrauliques. Elles sont déterminées à l'aide des formules suivantes [10] :

a) La vitesse spécifique en fonction de la puissance à l'arbre « $N_s$ »,

$$N_s = N * \frac{Ph^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad (\text{II.10})$$

$Ph$  en [Pa]

b) La vitesse spécifique en fonction du débit « $N_q$ »,

$$N_q = N * \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{H^{\frac{4}{3}}} \quad (\text{II.11})$$

### II.3.2.4 La vitesse d'écoulement de l'eau

Elle est obtenue par la formule suivante [10] :

$$v = \sqrt{2 * g * Hb} \quad (\text{II.12})$$

### II.3.2.5 Coefficient de débit et coefficient d'énergie

Ce sont des paramètres des lois de similitude (avec changement de taille ou sans changement de taille et/ou avec changement des conditions de fonctionnement). Ils traduisent en chiffre la chute nette  $H$  et le débit  $Q$ . Ils sont exprimés de la manière suivante [21]:

• Coefficient d'énergie sans dimension :

$$\Psi = \frac{g * H}{K\psi * N^2 * D^2} \quad (\text{II.13})$$

• Coefficient de débit sans dimension :

$$\phi = \frac{Q}{K\phi * N * D^3} \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Où } K\psi = \frac{\pi^2}{2} \text{ et } K\phi = \frac{\pi^2}{4} \quad (\text{II.15})$$

### II.3.2.6 Conception de la roue de la turbine Francis

Le nombre d'aubes  $Z$  peut être calculé par la formule empirique suivante [19] :

$$Z = \frac{250}{Ns^3} \quad (\text{II.16})$$

### II.3.2.7 Triangles de vitesses

Les différentes vitesses sont calculées comme suit [21] :

$$U = r\omega$$

$$U1 > U2$$

$$C1m = C1\sin\alpha1 = W1m \quad ; \quad C2m = C2\sin\alpha2 = W2m \quad (\text{II.17})$$

$$C1u = C1\cos\alpha1 = U1 + W1\cos\beta1 \quad ; \quad C2u = C2\cos\alpha2 = U2 - W2\cos\beta2 \quad (\text{II.18})$$

$$\tan\beta1 = \frac{W1m}{W1u} = \frac{C1\sin\alpha1}{C1\cos\alpha1 - U1} \quad ; \quad \tan\beta2 = \frac{W2m}{W2u} = \frac{C2\sin\alpha2}{U2 - C2\cos\alpha2} \quad (\text{II.19})$$

### II.3.2.8 La puissance

$$P = M\omega \quad (\text{II.20})$$

$$M = \dot{m} * (r2 * C2u - r1 * C1u) \quad (\text{II.21})$$

$$= \rho * Q * (r2 * C2u - r1 * C1u)$$

$$= \rho * Q * [r2 * (U2 - W2\cos\beta2) - r1 * C1 * \cos\alpha1]$$

$$= \rho * Q * [r2 * (r2\omega - W2\cos\beta2) - r1 * C1 * \cos\alpha1]$$

$$P = \rho * Q * \omega * [r2 * (r2\omega - W2\cos\beta2) - r1 * C1 * \cos\alpha1]$$

### II.3.2.9 Les coefficients empiriques

Dans l'industrie, on utilise des coefficients empiriques pour quantifier diverses vitesses dans la turbine en fonction de la vitesse maximale théorique générée par la chute H.

En particulier [21] :

$$U1 = \xi1 * \sqrt{2 * g * Hn} \quad (\text{II.22})$$

$$C1 = \varphi1 * \sqrt{2 * g * Hn} \quad (\text{II.23})$$

$$W1 = \lambda1 * \sqrt{2 * g * Hn} \quad (\text{II.24})$$

$$C1u = \mu1 * \sqrt{2 * g * Hn} \quad (\text{II.25})$$

$$C1m = K1 * \sqrt{2 * g * Hn} \quad (\text{II.26})$$

### II.3.2.10 Degré de réaction

Le degré de réaction caractérise le taux d'énergie échangé avec le rotor de la turbine. S'il est nul donc pas de variation de pression au niveau du rotor alors c'est une turbine à action pure et s'il est différent de zéro, c'est une turbine à réaction. Il est calculé comme suit [17] :

$$R = \frac{(U_2^2 - U_1^2) - (W_2^2 - W_1^2)}{2 * W_i} \quad (\text{II.27})$$

Ou en fonction des coefficients empiriques :

$$R = 1 - (\varphi_2^2 - \varphi_1^2)$$

### II.3.2.11 Rendement

Plusieurs niveaux de rendement peuvent spécifier une turbine hydrauliques mais les plus utilisés sont le rendement hydraulique  $\eta_h$  dont sa valeur est pratique tirée des conditions cinématiques de fonctionnement (calcul aval) et on définit aussi le rendement théorique  $\eta_{th}$  qui constitue un critère de choix de la turbine de Francis ou autre, tiré, celui-là, d'abaques empiriques (calcul amont).

Le rendement hydraulique pratique  $\eta_h$  se calcule par la relation suivante :

$$\eta_h = \frac{C_{2u} * U_2 - C_{1u} * U_1}{g * H_n} \quad (\text{II.28})$$

Le rendement théorique de la turbine peut être déterminé en utilisant la figure II.6. Pour cela, il faut d'abord déterminer la vitesse spécifique adimensionnel  $\omega_s$  qui s'exprime par [20] :

$$\omega_s = \frac{\pi N}{30} * \frac{Q^{0.5}}{(g * H_b)^{\frac{3}{4}}} \quad (\text{II.29})$$

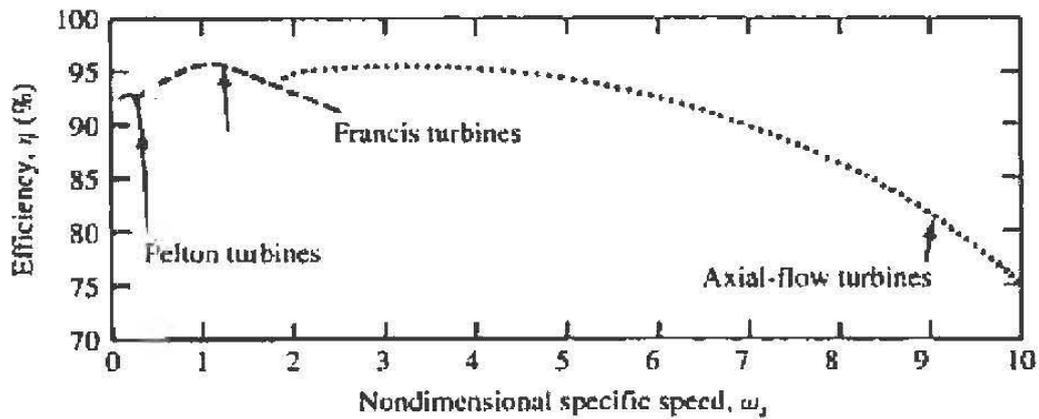
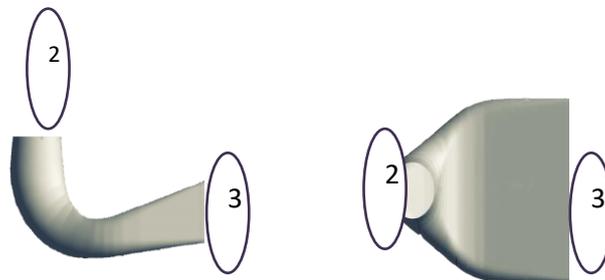


Figure XIII-7 Rendement des turbines hydrauliques en fonction de la vitesse spécifique [20]

### II.3.2.11 Aménagement et aspirateur

À la sortie de la roue (2), l'écoulement possède encore une vitesse et donc une énergie cinétique qui n' a pas été convertie en électricité.

Afin de récupérer le maximum de cette énergie, on ajoute le diffuseur (2-3) dont le rôle est de ralentir l'écoulement et créer une zone de dépression en aval du rotor. On obtiendra ainsi une plus grande extraction d'énergie par la turbine [18].



$$H1 = H_0 - H_l = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z \quad (\text{II.30})$$

$$H1 - \frac{v_3^2}{2g} = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z - \frac{v_3^2}{2g} = (H_0 - H_l) - \frac{v_3^2}{2g}$$

$$\frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z = 0 + \frac{v_3^2}{2g} + 0$$

$$\frac{P_2}{\rho g} = - \left( Z + \frac{v_2^2 - v_3^2}{2g} \right)$$

$P_2 \Rightarrow$  La Pression induite par l'aspirateur est "négative"

### II.3.3 Etude des similitudes

### II.3.3.1 Vitesse-Diamètre spécifiques

La vitesse spécifique et le diamètre spécifique, sont deux concepts issus de l'étude des lois de similitude des turbomachines.

En fait, avec ces chiffres adimensionnels, on peut déterminer la turbomachine la plus adéquate pour une application donnée [18].

$$Ds = D * \frac{H^{\frac{1}{4}}}{Q^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{II.31})$$

$$Ns = N * \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{H^{\frac{1}{4}}} \quad (\text{II.32})$$

### II.3.3.2 Variables réduites

En pratique industrielle, on définit pour les turbines hydrauliques, des variables dites réduites. Elles correspondent à un fonctionnement en similitude avec une chute H de 1 m et un rotor ayant un diamètre D de 1 m. On note ces variables avec un double indice 1.

- Vitesse angulaire réduite N11  $\Rightarrow N11 = \frac{N*D}{H^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{II.33})$

- Débit réduit Q11  $\Rightarrow Q11 = \frac{Q}{D^2 * H^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{II.34})$

- Puissance réduite P11  $\Rightarrow P11 = \frac{P}{D^2 * H^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{II.35})$

Les valeurs de N11, Q11 et P11 dépendent du système d'unités utilisé [18].

### II.3.3.3 Changement des caractéristiques et de la taille d'une turbine

Les lois de similitude de l'hydraulique permettent de démontrer que les turbines peuvent être classées en fonction de leur forme géométrique, indépendamment de leur taille. C'est ainsi qu'il est possible, à partir d'un modèle réduit, de connaître les performances de toutes les turbines de forme géométriquement semblables au modèle [7].

Les caractéristiques de fonctionnement sont directement dépendantes d'un diamètre de référence mesuré sur la roue de la turbine.

**Modèle** : diamètre de référence  $Dm$

**Exécution** : diamètre de référence  $D$

$$\text{Rapport des chutes : } \frac{H}{H_m} = \left(\frac{N}{N_m}\right)^3 * \left(\frac{D}{D_m}\right)^5 \quad (\text{II.36})$$

$$\text{Rapport des débits : } \frac{Q}{Q_m} = \left(\frac{N}{N_m}\right) * \left(\frac{D}{D_m}\right)^3 \quad (\text{II.37})$$

$$\text{Rapport des couples : } \frac{T}{T_m} = \left(\frac{N}{N_m}\right)^2 * \left(\frac{D}{D_m}\right)^5 \quad (\text{II.38})$$

$$\text{Rapport des puissances : } \frac{P}{P_m} = \left(\frac{N}{N_m}\right)^3 * \left(\frac{D}{D_m}\right)^5 \quad (\text{II.39})$$

**II.3.3.4 Changement des caractéristiques de fonctionnement d’une turbine donnée**

Une turbine de dimensions connues peut travailler sous une chute variable avec une ouverture géométrique donnée, et dans ce cas, il faut recalculer certains paramètres. Les relations entre les différents paramètres sont les suivantes :

Chute (m)	H1	H2
Débit $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Q1	$Q2 = Q1 * \sqrt{\frac{H2}{H1}}$
Vitesse de rotation (tr/min)	N1	$N2 = N1 * \sqrt{\frac{H2}{H1}}$
Couple (Nm)	T1	$T2 = T1 * \frac{H2}{H1}$
Puissance (W ou KW)	P1	$P2 = P1 * \frac{H2^{1.5}}{H1^{1.5}}$

Tableau 4 Lois de similitude pour une turbine donnée [13]

A l’aide de ces formules, il est possible de calculer les nouvelles caractéristiques d’une turbine construite pour un site donné et déplacée sur un autre, de chute différente. Ce cas peut se produire lors de l’achat d’une turbine d’occasion.

**II.3.2.5 Phénomène de Cavitation et hauteur d'aspiration**

Le phénomène de cavitation se définit comme l’apparition de bulles ou poches de vapeur dans un liquide causées par une diminution de pression sans apport de chaleur.

Dans un écoulement, la durée de vie des poches est extrêmement brève (de l’ordre de la milli-seconde). Lorsque l’écoulement atteint des régions de haute pression, les bulles

implosent et ce phénomène répétitif et violent peut causer des érosions importantes sur les parois.

Le phénomène engendre dans les turbines hydrauliques plusieurs effets néfastes notamment [20] :

- les bruits anormaux,
- la chute des performances (puissance, rendement, etc.),
- les vibrations excessives,
- l'érosion,
- etc.

➤ **Coefficient de cavitation :**

D. Thomas, en 1923 dans le contexte des turbines et des pompes, a proposé un nombre adimensionnel qui peut être utilisé pour caractériser la cavitation dans les turbines hydrauliques à réaction (Francis et Kaplan) [20] :

$$\sigma = \frac{Hb - Hs}{H}$$

$Hb$  Est la pression atmosphérique en mètre colonne d'eau (mce),

$Hs$  Est la pression de succion à la sortie du rotor de la turbine,

$H$  Est la chute en m.

Ce nombre peut également être calculé au moyen de l'équation [20]:

$$\sigma = K\sigma * n * \frac{Q^{0.5}}{gHb^{0.75}}$$

**CHAPITRE III  
ETUDE NUMERIQUE D'UN CAS  
CONCRET DE TURBINE DE  
FRANCIS**

### III.1 Introduction

Dans le but d'avoir des idées sur les performances et les normes qui peuvent affecter le fonctionnement de la turbine de Francis et acquérir une bonne maîtrise de l'ingénierie d'utilisation de cette machine, l'étude d'un cas réelle constitue une étape fondamentale dans la finalisation de cette étude.

Dans ce chapitre, nous allons étudier et présenter les résultats obtenus grâce aux différentes formules mathématiques régissant la turbine Francis. Cette partie comprend également une vue générale sur la configuration étudiée, les spécifications techniques et les détails de calculs des différentes formules et enfin les résultats et leurs discussions.

### III. 2 Démarche d'étude

Après plusieurs recherches sur l'utilisation de la turbine Francis au niveau de notre pays l'Algérie en particulier et au niveau mondial en général, nous avons vu que dans le premier cas il n'existe pas ce type de turbine, du fait de la focalisation de notre pays sur la production de l'électricité à partir des centrales thermiques basées sur des ressources comme le gaz. Dans le second cas, nous n'avons pas trouvé suffisamment d'informations détaillées pour aider à entreprendre le problème que nous étudions, il était donc nécessaire de prendre les caractéristiques moyennes de la référence [11] et de nous assurer qu'elles étaient compatibles avec notre projet.

#### III.2.1 Schéma générale de la turbine Francis étudiée

Une coupe transversale d'une turbine Francis est présentée dans la figure ci-dessous indiquant les différents paramètres géométriques principaux qui la définissent ; ainsi, on trouve le diamètre d'entrée  $D_1$ , le diamètre de sortie  $D_2$  et les largeurs d'entrée  $e_1$  et de sortie  $e_2$ .

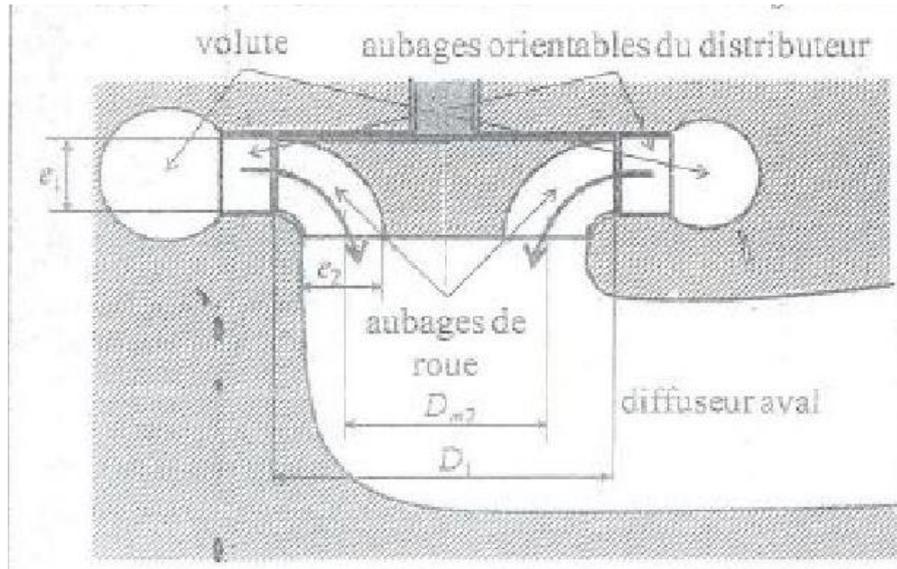


Figure III-1 Dimensions principales d'une roue de turbine Francis [22]

### III.2.2 Données principales de la centrale hydroélectrique

Les données de l'installation essentielles pour effectuer notre projet de fin d'étude et atteindre nos objectifs tracés au départ sont comme suit :

Chute brute maximale	60 m
La puissance hydraulique	1177.2 KW
La puissance mécanique	1166.8 KW
Le rendement nominal	90 %
Débit d'eau	2 m <sup>3</sup> /s
Vitesse de rotation	300 tr/min
Diamètre	1 m

### III.2.3 Hypothèses

- Les pertes dans les conduites sont considérées nulles.
- Les seules pertes considérées sont les pertes internes.
- Le fluide utilisé, évidemment, est de l'eau qui est considérée incompressible.
- Régime permanent.
- Problème de cavitation non pris en considération.

### III.2.4 Etapes de l'étude

Après avoir choisie notre turbine nous avons tracé une méthode d'étude, basée sur la littérature, qui consiste en les trois (03) étapes suivantes :

1- Faire une vérification générale de notre choix pour voir si on est dans le domaine d'utilisation de la turbine Francis, et cette vérification est faite à partir du calcul de la vitesse spécifique.

2- Si le choix de la turbine Francis est vérifié, ce qui est le cas, on procède à l'étude opérationnelle de notre turbine pour plusieurs configurations de celle-ci ; cette étude est traduite par le traçage des courbes caractéristiques pour différents cas à savoir :

- courbes caractéristiques à vitesse de rotation constante.
- courbes caractéristiques à vitesse de rotation variable.
- courbe du degré de réaction.
- et les courbes de similitude pour la même géométrie :
  - sans changement de taille,
  - et avec changement de taille.

**Remarque :** Au début et au cours de variation des paramètres de chaque cas, nous avons fait la même vérification pour voir si nous sommes toujours dans l'intervalle d'utilisation de la turbine Francis.

- **Pour le cas de courbes caractéristiques à vitesse de rotation constante :**

La vitesse de rotation, le débit, le rendement et la hauteur étant donnés, nous avons calculé la vitesse de l'eau, les deux puissances ( $P_{mec}$  et  $hyd$ ) et le rendement. Et pour finir nous avons tracé la courbe de la hauteur en fonction de débit, courbe de la puissance en fonction de débit, courbe du rendement en fonction du débit, Courbe de  $\psi$  en fonction de  $\varphi$ .

- **Pour le cas de courbes caractéristiques à vitesse de rotation variable :**

La hauteur étant une donnée constante ( $H$ ) et la vitesse de rotation ( $N$ ) imposée, nous avons calculé le débit à partir du diamètre, et puis nous avons calculé les deux puissances, les couples, le rendement, vitesse de rotation unitaire, couple unitaire et le débit unitaire. Les courbes tracées : courbe du débit en fonction de la vitesse de rotation, courbes des puissances à débits différents en fonction de la vitesse de rotation, courbe du rendement en fonction de la vitesse de rotation, courbes des couples à différents débits en fonction de la vitesse de rotation, courbe du débit unitaire en fonction de la vitesse de rotation unitaire, courbe du couple unitaire en fonction de la vitesse de rotation.

- **Pour le cas de calcul du degré de réaction :**

La vitesse de rotation, le débit et la hauteur étant donnés, nous avons calculé le degré de réaction théorique. Et pour finir nous avons tracé la courbe du degré de réaction théorique en fonction de débit.

- **Pour le cas des courbes de similitudes :**

Cette partie est réalisée pour deux cas :

- ❖ **Changement des caractéristiques de fonctionnement d'une turbine donnée :**

Ayant une turbine de référence avec les données, nous avons imposé la hauteur d'exécution puis à partir des formules de similitudes pour une même turbine nous avons calculé le débit, la vitesse de rotation, la puissance, et le rendement. Pour finir nous avons tracé les courbes suivantes : la hauteur en fonction du débit, la puissance en fonction du débit et le rendement en fonction du débit.

- ❖ **Changement des caractéristiques et de la taille d'une turbine :**

Ayant une turbine de référence avec les données, nous avons imposé la hauteur d'exécution puis à partir des formules de similitudes avec changement de taille de la turbine nous avons calculé les diamètres, les débits, la vitesse de rotation, la puissance, et le rendement. Et pour finir nous avons tracé : courbe de la hauteur en fonction du débit et courbe de la puissance en fonction du débit.

3- Pour une meilleure interprétation des courbes et des résultats, pour la majorité des courbes on va tirer les paramètres aux conditions extrêmes et particulières à savoir : à vide, au rendement maximal et d'emballement.

### III.3 Résultats et interprétations

Les courbes caractéristiques sont importantes pour les tests de l'efficacité et la prédiction du comportement de la turbine pour différentes conditions de fonctionnement pour la même turbine ou autre turbines de tailles différentes mais similaire à une turbine de référence.

#### III.3.1 Vérification de la vitesse spécifique

Pour mener à bien notre étude, nous allons vérifier si les turbines de la centrale hydraulique répondent aux conditions d'utilisation de la turbine Francis à l'aide du biais de

l'abaque des chapitres II et I. Pour cela nous allons d'abord calculer la vitesse de rotation spécifique :

$$Nq = N * \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} = \frac{300}{60} * \frac{(2)^{0.5}}{(60)^{0.75}} = 0.3279$$

Après lecture sur l'abaque, cette valeur de la vitesse de rotation spécifique répond bien aux conditions d'utilisation de la turbine Francis, donc nous pouvons commencer notre étude.

### III.3.2 Étude des courbes caractéristiques de la turbine Francis choisie

#### A- Courbes caractéristiques à vitesse de rotation constante :

Le fonctionnement normal d'une turbine est à vitesse constante. Il est donc naturel de présenter les courbes caractéristiques pour ce cas de fonctionnement. Dans ce cas, les calculs sont faits avec une vitesse de rotation constante, une chute et un débit variables.

Dans cette partie nous allons tracer les paramètres en fonction du débit (la hauteur, la puissance mécanique et le rendement). À la fin nous tracerons les courbes des paramètres adimensionnelles ( $\psi$  et  $\varphi$ ). Les calculs seront avec les conditions suivantes:

- Le débit et la hauteur sont variés de (2 à 12 m<sup>3</sup>/s) et (15 à 300m).

#### A1- Courbe H-Qv:

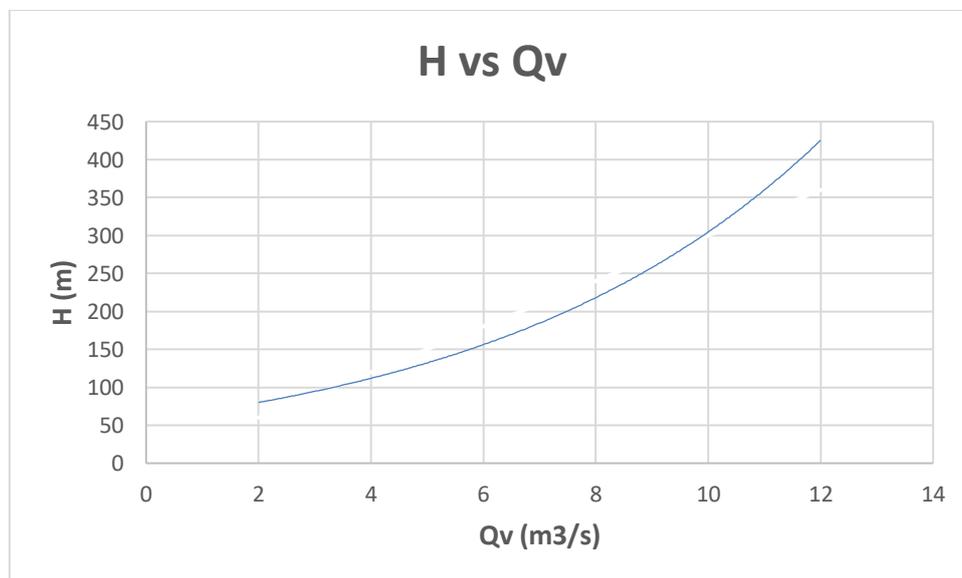


Figure III-2 Courbe de la hauteur en fonction du débit

Nous constatons une croissance de la hauteur en fonction de débit qui du type parabolique.

### A2- Courbe P-Qv:

L'expression suivante permet de calculer la puissance mécanique :

$$P_{méc} = \eta \cdot \rho \cdot Q \cdot g \cdot H; \quad (\text{III-1})$$

Exemple :  $P_{méc} = 1000 \cdot 2 \cdot 9.81 \cdot 60 \cdot 0.9 = 1059480 \text{ W}$

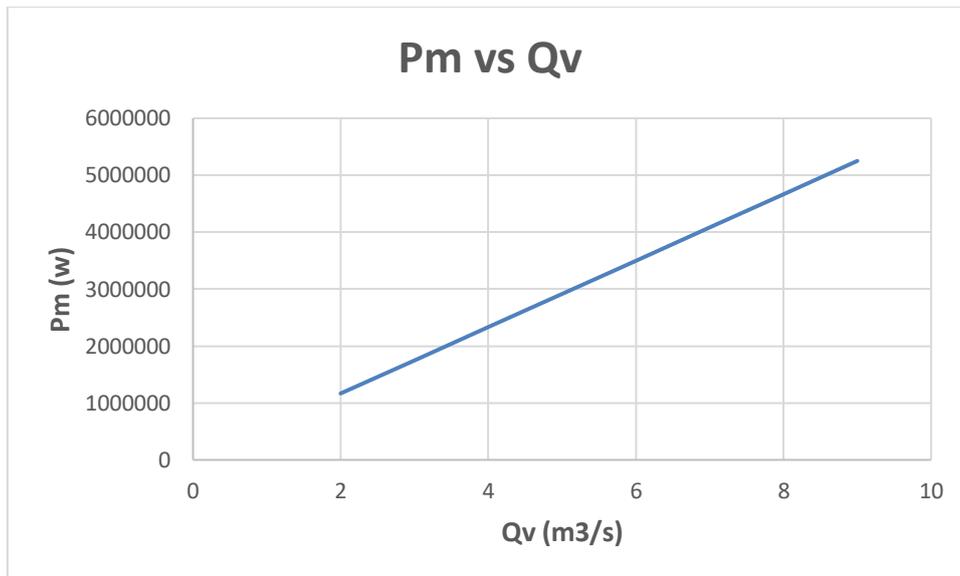


Figure III-3 Courbe de la puissance en fonction du débit

Nous constatons une hausse de la puissance avec l'augmentation du débit, l'évolution est linéaire.

### A3- Courbe $\eta$ -Qv:

Les formules suivantes permettent de calculer le rendement et la puissance mécanique :

$$\eta = \frac{P_{méc}}{P_{hyd}}; \quad (\text{III-2})$$

$$P_{hyd} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H; \quad (\text{III-3})$$

Exemple :  $\eta = \frac{1059480}{1177200} = 0.9 \%$

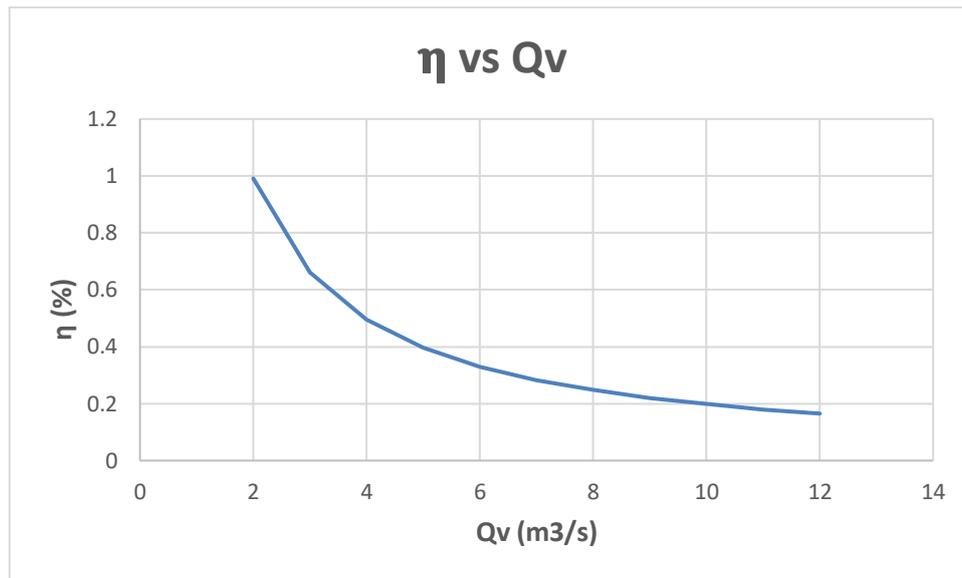


Figure III-4 Courbe du rendement en fonction du débit

Pour cette courbe, nous voyons une décroissance du rendement avec l'augmentation du débit. Pour un débit égal à 2 m3/s, le rendement est proche de 1, ce qui est tout à fait normal, car en ce point nous avons les conditions nominales (rendement nominal et débit nominal) qui sont cités dans le tableau de départ.

#### A4- Courbe $\Psi - \phi$ :

Les formules suivantes permettent de calculer Coefficient de débit et coefficient d'énergie :

$$\Psi = \frac{g \cdot H}{K\psi \cdot N^2 \cdot D^2} \quad (\text{III-4})$$

$$\phi = \frac{Q}{K\phi \cdot N \cdot D^3} \quad (\text{III-5})$$

Avec  $\Psi$  en axe des ordonnées et  $\phi$  en axe des abscisses.

$$\Psi = \frac{9.81 \cdot 60}{K\psi \cdot 300^2 \cdot 1^2} = 0.0022$$

$$\phi = \frac{2}{K\phi \cdot 300 \cdot 1^3} = 0.0011$$

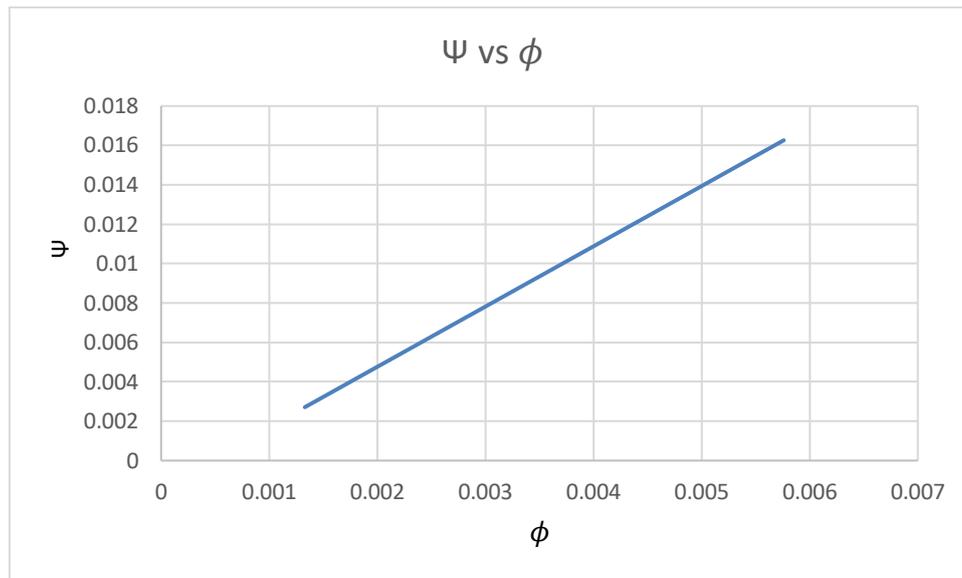


Figure III-5 Courbe de  $\Psi$  en fonction de  $\phi$

Nous constatons une croissance en ligne droite de  $\Psi$  en fonction de  $\phi$ . L'importance de cette courbe est de pouvoir faire une extrapolation (et évidemment une interpolation) pour connaître les conditions de fonctionnement dans d'autres situations pour la même géométrie de turbine.

➤ **Conditions extrêmes ou particulières :**

$\eta t$ Max	$Qv(m^3/s)$	H(m)	P (W)
0.99119266	2	60	1166832

Tableau 5 Tableau des paramètres au rendement maximal.

$Qv(m)$	$P v(W)$
0	931497

Tableau 6 Tableau des paramètres à vide.

**B- Courbes caractéristiques à vitesse de rotation variable :**

Pour connaître le comportement de la turbine pendant les régimes transitoires (démarrage, mise en décharge brusque et emballement), il est utile d'en connaître les courbes caractéristiques à vitesse variable. Dans ce cas, les calculs sont faits sous une chute constante, un débit et une vitesse de rotation variables.

Dans cette partie nous allons tracer les paramètres en fonction de la vitesse de rotation (le débit, la puissance et le rendement). À la fin nous tracerons les courbes des paramètres unitaires ( $Q_{11}$ ,  $T_{11}$  et  $N_{11}$ ). Les calculs seront avec les conditions suivantes :

- Le diamètre est varié de 0.1 mètre à 1 mètre,
- La vitesse de rotation de 60 à 400 tour/minute.

### B1- Courbe $Qv$ -N :

Le débit est calculé par l'expression suivante :

$$Qv = V * \frac{\pi * d^2}{4} \quad (\text{III-6})$$

Exemple :  $34.31 * \frac{\pi * (0.1)^2}{4} = 0.2693 \text{ (m}^3/\text{s)}$

Avec  $N$  en axe des ordonnées et  $Qv$  en axe des abscisses.

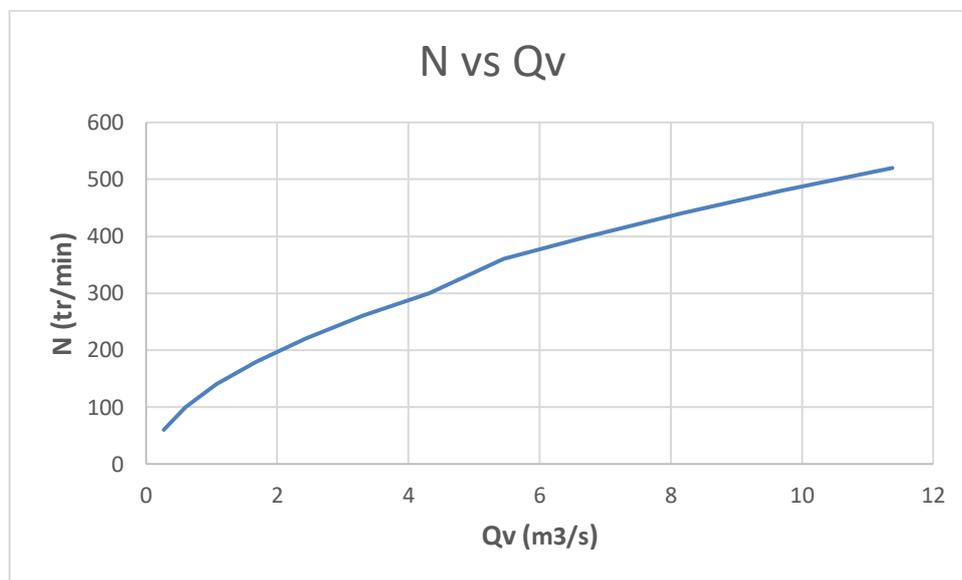


Figure III-6 Courbe du débit en fonction de la vitesse de rotation

Lorsque la vitesse de rotation augmente, il y'a aussi augmentation du débit.

### B2- Courbe $P_{méc}$ -N :

La puissance mécanique est calculée par cette formule :

$$P_{méc} = A' * \rho * Qv(N_{max}-N)*N \quad (\text{III-7})$$

$$N_{max} = V_{eau} / \pi D, \quad (\text{III-8})$$

$$V_{eau} = (2gH)^{1/2} \quad (\text{III-9})$$

Exemple :  $P_{méc} = 1000 * 19.71 * 0.2 * (10.92 - 1) * 1 = 39104.64 \text{ W}$

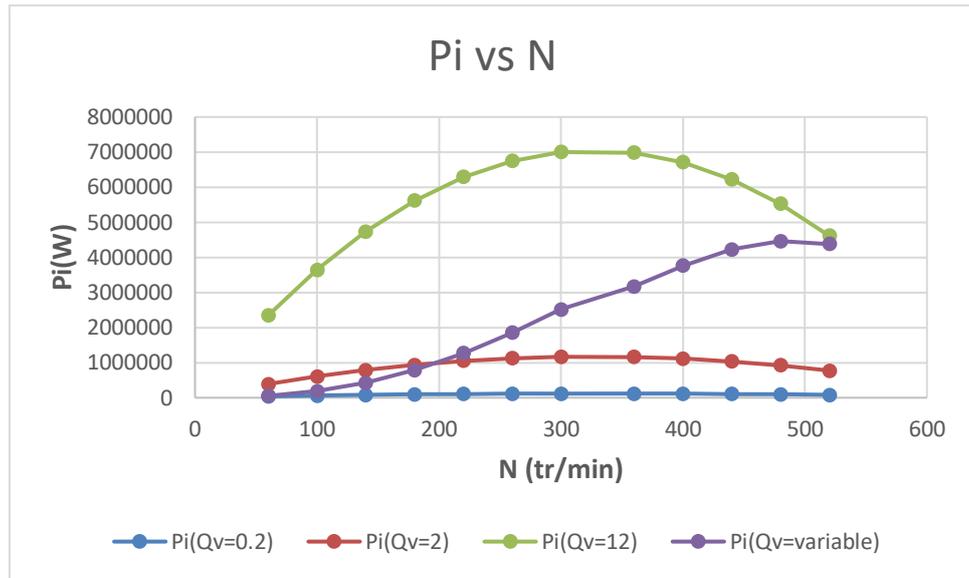


Figure III-7 Courbes des puissances a débits différents en fonction de la vitesse de rotation

Pour ces courbes de la puissance nous remarquons une hausse de la puissance avec l'augmentation de la vitesse de rotation jusqu'à un maximum avant de diminuer.

### B3- Courbe $\eta$ --N :

La formule suivante permet de calculer le rendement:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{hyd}} ; \quad \eta = \frac{39104.64}{1000 \cdot 9.81 \cdot 0.2 \cdot 60} = 0.33218 \%$$

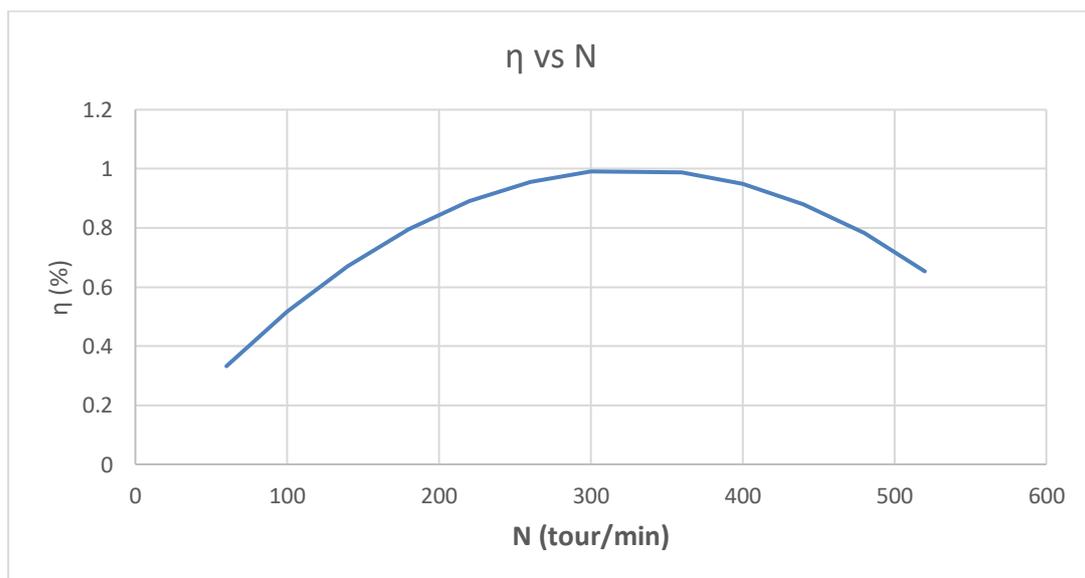


Figure III-8 Courbe du rendement en fonction de la vitesse de rotation

Nous constatons une augmentation du rendement avec l'augmentation de la vitesse de rotation jusqu'à un seuil (dans ce cas rendement max correspondant à une vitesse de rotation égale à 300 tr/min) pour ensuite rechuter.

### B4- Courbe T-N :

Le couple est calculé par cette expression :

$$T = A' * \rho * Qv * (N_{max} - N) \quad (\text{III-10})$$

Exemple :  $188.31 * 1000 * 0.2 * (10.92 - 1) = 3736070 \text{ N}$

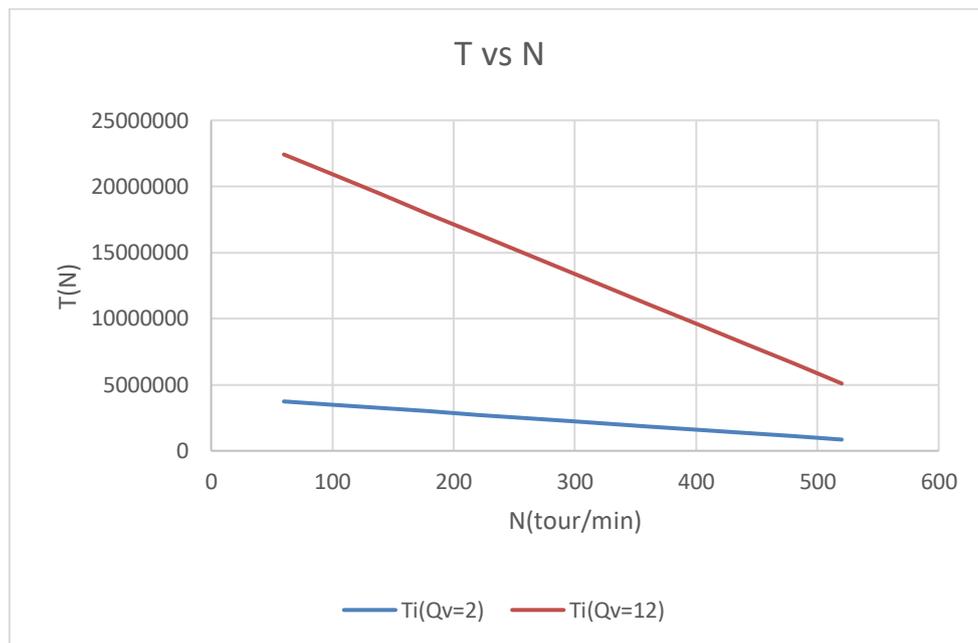


Figure III-9 Courbes des couples a différents débits en fonction de la vitesse de rotation

Pour ces courbes du couple nous constatons une diminution du couple avec l'augmentation de la vitesse de rotation.

### B5- Courbe Q11-N11:

Le débit et la vitesse de rotation unitaire sont calculés par les expressions suivantes :

$$N11 = \frac{N * D}{H^2} \quad (\text{III-11})$$

$$Q11 = \frac{Q}{D^2 * H^2} \quad (\text{III-12})$$

$$\text{Exemple : } N11 = \frac{60 * 0.2}{60^2} = 0.774597$$

$$Q11 = \frac{0.263467}{0.2^2 * 60^2} = 0.000145$$

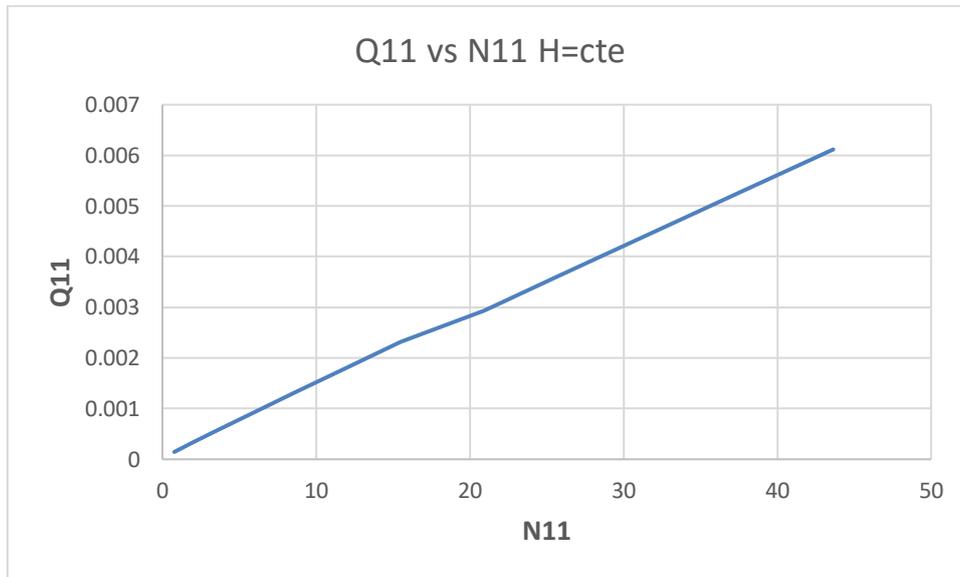


Figure III-10 Courbe du débit unitaire en fonction de la vitesse de rotation unitaire

Nous constatons une augmentation du débit unitaire avec l'augmentation de la vitesse de rotation unitaire.

**B6- Courbe P11-N11:**

La puissance et la vitesse de rotation unitaire sont calculées par les formules suivantes :

$$N11 = \frac{N \cdot D}{H^{\frac{1}{2}}} \quad \text{(III-13)}$$

$$P11 = \frac{P}{D^2 \cdot H^{\frac{3}{2}}} \quad \text{(III-14)}$$

Exemple :  $N11 = \frac{60 \cdot 0.2}{60^{\frac{1}{2}}} = 0.774597$

$$P11 = \frac{52660.9477}{0.2^2 \cdot 60^{\frac{3}{2}}} = 1133.083$$

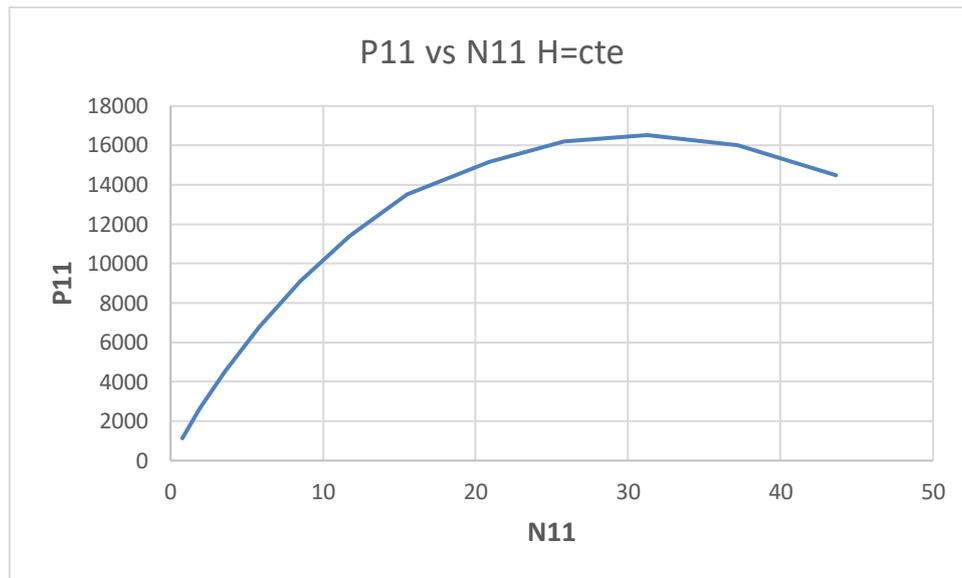


Figure III-11 Courbe de la puissance unitaire en fonction de la vitesse de rotation

Nous constatons une augmentation de la puissance unitaire avec l'augmentation de la vitesse de rotation unitaire jusqu'à un maximum avant de diminuer.

➤ **Conditions extrêmes ou particulières**

$\eta t_{Max}$	N (tr/min)	$Qv(m^3/s)$	P (W)	T (Q=0.2)	T (Q=12)
0,9983	320	1.4	822178.6	210405.04	12624302.4

Tableau 7 Tableau des paramètres au rendement maximal

Ne (tr/min)	$\eta te$	Pe (W)	Te (Qv=0.2)	Te (Qv=12)	Qe( $m^3/s$ )
400	0.949520897	6706656	160189	9611342.4	12

Tableau 8 Tableau des paramètres d'emballement

**III.3.3 Pour le cas du calcul du degré de réaction.**

**A1-Courbe Rth vs Qv:**

L'expression suivante permet de calculer le degré de réaction théorique :

$$R = \frac{(C_e2^2 - C_e1^2) - (W2^2 - W1^2)}{2 * W_i} \quad (III-15)$$

Exemple :  $R = ((7.85)^2 - (15.7)^2) - ((8.471417)^2 - (21.48624)^2) / (2 * 1166.832) = 0.087856$

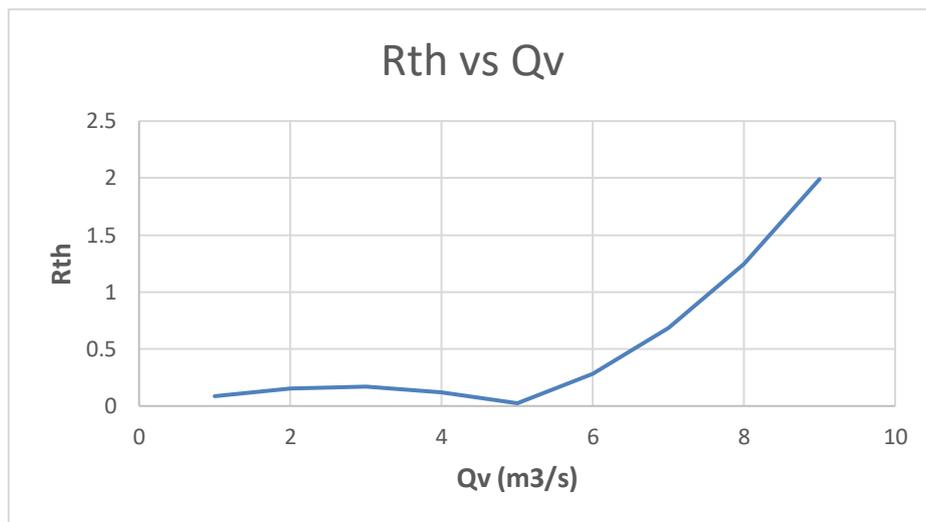


Figure III-12 Courbe degré de réaction théorique en fonction du débit

On constate que le degré de réaction commencera à augmenter à partir d'une valeur du débit qui est égale à 5(m3/s), c'est-à-dire que la turbine sera pratiquement une turbine à réaction à partir de cette valeur et la différence de pression commence à se ressentir.

### III.3.4 Études des similitudes

#### A- Changement des caractéristiques de fonctionnement d'une turbine donnée :

Il est possible de calculer les nouvelles caractéristiques d'une turbine construite pour un site donné et déplacée sur un autre, de chute différente, et pour se faire nous utilisons les relations de similitude citées ci-après.

- Dans ce cas nous avons fait varier la hauteur de 15 mètres à 300 mètres.

#### A1-Courbe H vs Qv:

L'expression suivante permet de calculer le débit :

$$Q_2 = Q_1 * \sqrt{\frac{H_2}{H_1}} \quad (\text{III-16})$$

Exemple :  $Q_2 = 2 * \sqrt{\frac{15}{60}} = 1 \quad (\text{m}^3/\text{s})$

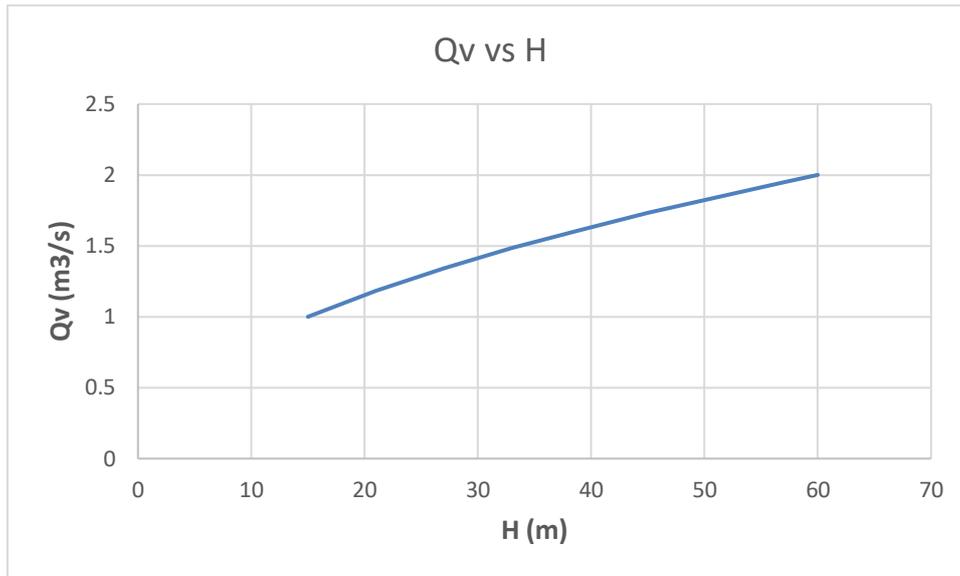


Figure III-13 Courbe de la hauteur en fonction du débit

La hauteur étant imposé, la régulation du débit doit suivre l'évolution de la hauteur.

**A2-Courbe P vs Qv:**

La formule suivante a été utilisée pour le calcul de la puissance mécanique :

$$P2 = P1 * \frac{H2^{1.5}}{H1^{1.5}} \quad (III-17)$$

Exemple :  $P2 = 146091.234 * \frac{15^{1.5}}{60^{1.5}} = 18261.40426$

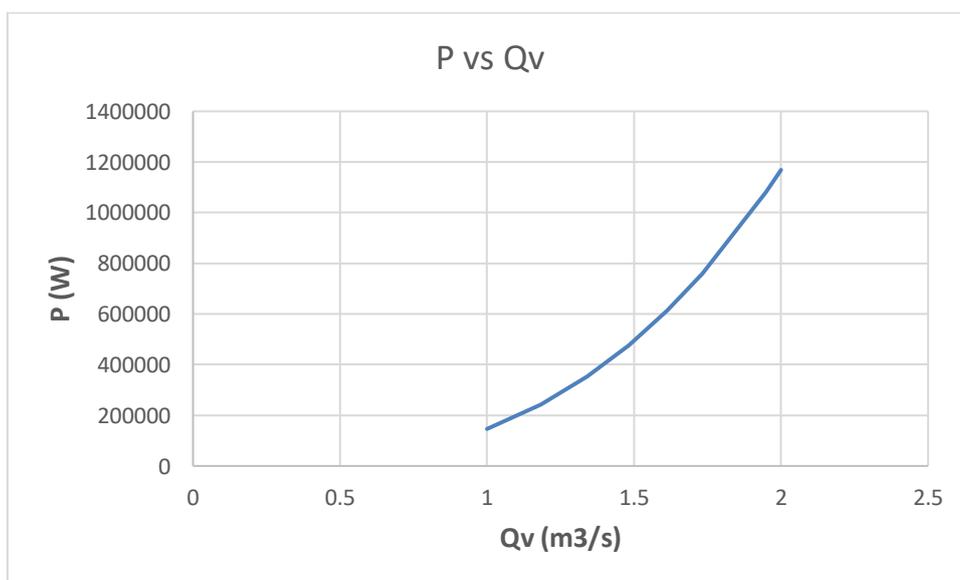


Figure III-14 Courbe de la Puissance en fonction de débit

Evidemment, la puissance suit toujours le débit massique ou volumique.

**A3- Courbe  $\eta$  vs  $Q_v$  :**

La formule suivante a été utilisée pour le calcul du rendement :

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{hyd}} ;$$

Exemple :  $\eta = \frac{18261.40426}{147150} = 0.124100607 \%$

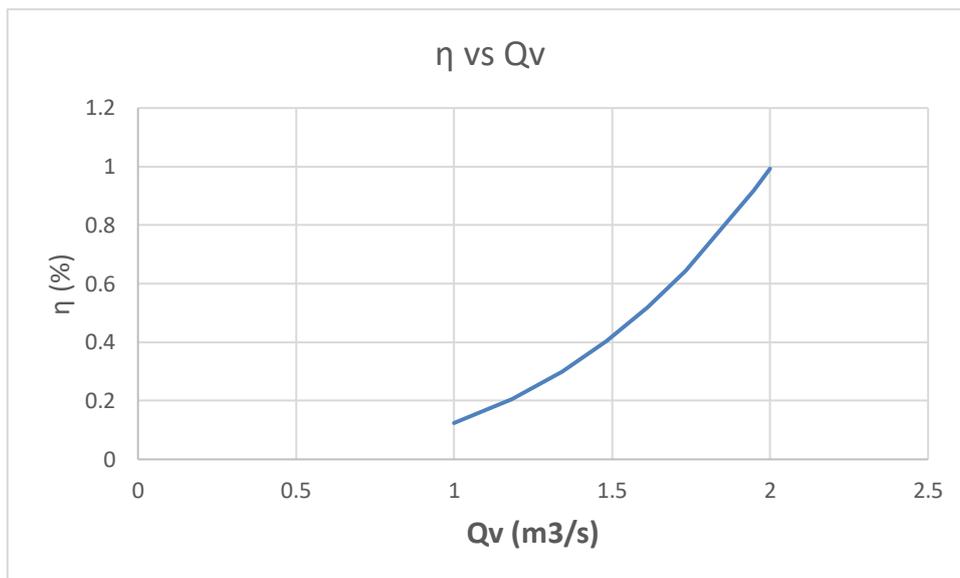


Figure III-15 Courbe du rendement en fonction de débit

Pour les Figure III.14 et Figure III.15, le débit à un effet positif sur la puissance et le rendement.

➤ **Conditions extrêmes ou particulières :**

$\eta t$ Max	$Q_v(m^3/s)$	H(m)	P (W)
0.99119266	<b>2</b>	<b>60</b>	1166832

Tableau 9 Tableau des paramètres au rendement maximal.

$Q_v(m)$	$P_v(W)$
<b>0</b>	<b>21569</b>

Tableau 10 Tableau des paramètres à vide

### B- Changement des caractéristiques et de la taille d'une turbine :

Les lois de similitude de l'hydraulique permettent aussi de démontrer que les turbines peuvent être classées en fonction de leur forme géométrique, indépendamment de leur taille. C'est ainsi qu'il est possible, à partir d'un modèle réduit, de connaître les performances de toutes les turbines de forme géométriquement semblables au modèle.

#### B1- Courbe H vs Q :

Le débit est tiré de la formule suivante :

$$\frac{Q}{Q_m} = \left(\frac{N}{N_m}\right) * \left(\frac{D}{D_m}\right)^3 \quad (\text{III-18})$$

$$\text{Exemple : } \frac{Q}{Q_m} = \left(\frac{150}{300}\right) * \left(\frac{2}{1}\right)^3 = 4$$

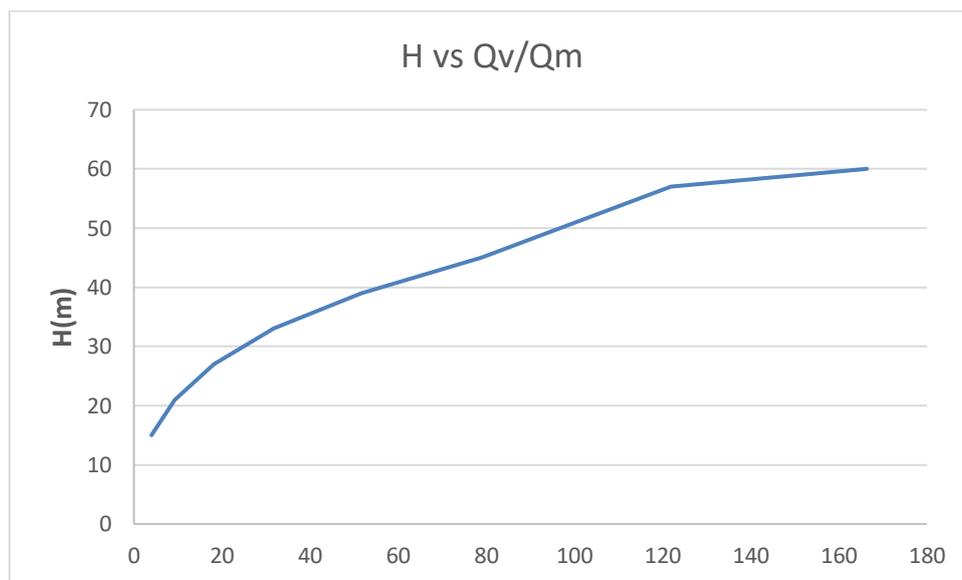


Figure III-16 Courbe de la hauteur en fonction du débit

#### B2- Courbe P vs Q :

La puissance mécanique a été tirée de l'expression ci-dessous :

$$\frac{P}{P_m} = \left(\frac{N}{N_m}\right)^3 * \left(\frac{D}{D_m}\right)^5 \quad (\text{III-19})$$

Avec Pmec (W) en axe des ordonnées et Qv (m<sup>3</sup>/s) en axe des abscisses.

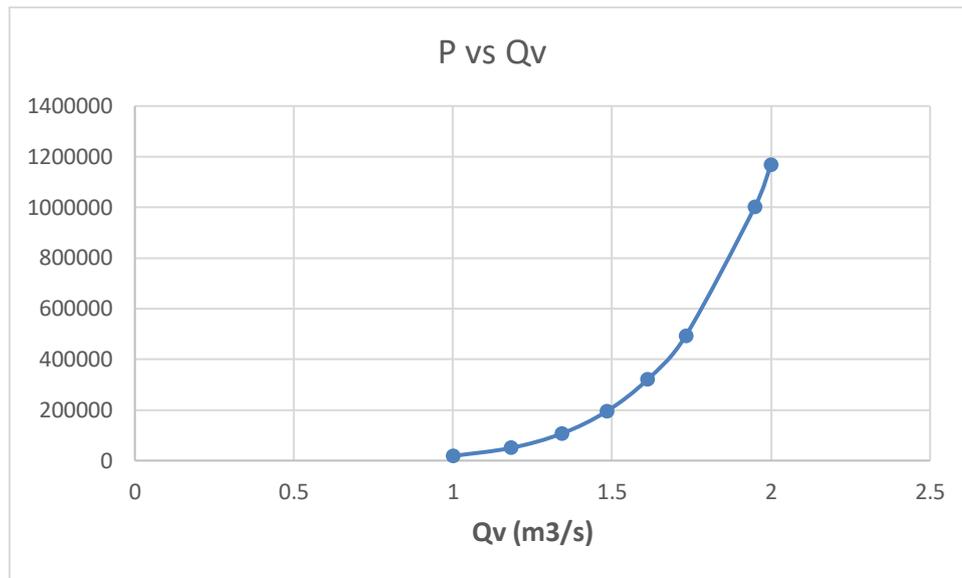


Figure III-17 Courbe de la puissance en fonction du débit

Pour les Figure III.16 et Figure III.17 nous constatons une hausse de la hauteur et de la puissance avec l'augmentation de la vitesse de rotation.

### III.4 Bilan

- On peut dire que plus le débit augmente plus la hauteur augmente, et en parallèle la vitesse de rotation augmente et tend vers la vitesse d'emballement.
- Évidemment, on confirme que la puissance augmente avec la hauteur, le débit et la vitesse de rotation.
- Le couple est maximum au démarrage, c'est-à-dire aux faibles vitesses de rotation.
- La vitesse d'emballement reste constante pour cas des courbes caractéristiques à vitesse de rotation variable.
- La vitesse de rotation et le débit sont bénéfiques pour le rendement jusqu'à une certaine valeur, au-delà de cette valeur elle est nuisible car le rendement sera décroissant.
- Le rendement d'une turbine pourra varier de quelques pourcents entre un modèle et son exécution en grandeur réelle. Les différences sont influencées par:
  - le rapport des dimensions entre modèle et exécution;
  - la qualité de la fabrication (respect des formes, précision et qualité de la finition);
  - les conditions d'exploitation (chute, débit, vitesse de rotation).

En fin de compte, le rendement garanti restera donc toujours du domaine de responsabilité du constructeur et du bon usage.

## Conclusion générale

Au terme de ce travail, nous pouvons conclure que l'hydroélectricité n'est pas seulement une énergie propre (elle ne produit pas de gaz à effet de serre pouvant causer de profonds changements climatiques) et renouvelable (carburant c'est de l'eau, l'eau qui n'est pas consommée pendant le processus de production d'électricité) mais elle est très efficace sur le plan des performances énergétiques en comparaison à d'autres sources énergétiques.

Ainsi, dans le domaine énergétique des turbines, l'étude de la turbine Francis nous a permis de le constater avec son fonctionnement simple et sa très faible variance de rendement dans le temps. Son coût de maintenance est inférieur à celui d'autres types de turbines et il est possible de répondre aux besoins en énergie électrique des grandes villes. Cette énergie renouvelable peut aussi contribuer au développement économique et social des zones rurales et industrielles.

Cette étude a permis d'une part de mieux comprendre la conversion de l'énergie cinétique de l'eau en énergie mécanique, et d'autre part maîtriser l'étude complète des propriétés hydrauliques des turbines de Francis.

Au bout du compte de cette étude, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La hauteur et le débit ont un effet négatif sur le rendement de la turbine Francis pour le cas de vitesse de rotation constante.
- Le couple est maximum au démarrage.
- La vitesse d'emballage reste constante pour le cas des courbes caractéristiques à vitesse de rotation variable.
- Pour une hauteur de chute donnée, l'augmentation de la puissance d'une turbine nécessite une augmentation correspondante du débit d'eau. Pour une machine Francis, cela peut se faire soit en augmentant le diamètre du distributeur et donc aussi les dimensions de la machine puisque le diamètre de la roue doit être proportionné au diamètre du distributeur.
- Le degré de la réaction commence à apparaître lorsque le volume d'eau d'entrée par unité de temps égal à 5 (m<sup>3</sup>/s).
- L'efficacité de la turbine peut varier légèrement entre le modèle et la mise en œuvre.
- Les différences sont affectées par :
  - le rapport des dimensions entre le modèle et l'implantation.
  - qualité de fabrication (respect des formes, précision, qualité de finition).
  - Conditions de fonctionnement (chute, débit, vitesse de rotation)

- Le rendement garanti restera donc toujours du domaine de responsabilité du constructeur et de la bonne utilisation qui peut être basée sur les courbes caractéristiques.

Ce secteur de production ne doit pas être mis au second plan en matière de développement. Les recherches dans le domaine de l'optimisation des composants hydroélectriques se multiplient autant dans le domaine expérimental ou numérique que dans la gestion des ressources ou de la régulation.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: Energie Hydraulique (2ED) Auteur : GINOCCHIO ROGER, VIOLLET PIERRE LOUIS  
Directeur Collection : EDF
- [2]: [https://youtu.be/mIT24EBD5\\_w](https://youtu.be/mIT24EBD5_w) (consulté le 20-4-2022)
- [3]: MISSENGUE MBAYA Pelé ZOUBOYE Haj : Etude d'une turbine hydraulique de Pelton, mémoire de fin d'étude master académique Année Universitaire : 2020 / 2021
- [4]: RASENDRA Fu Nam Christophe & RAKOTONIRINA Dinarisoa : Etude d'une Micro Turbine Pelton Multi-jet, 2018.
- [5]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Turbine\\_Francis](https://fr.wikipedia.org/wiki/Turbine_Francis) (consulté le 21-4-2022)
- [6]: Francesco Carrasco: Introduction to Hydropower Published by: The English Press  
4735/22 Prakash deep Bldgs., Ansari Road, Darya Ganj, Delhi – 110002.
- [7]: C. C. Warick Hydropower Engineering-Prentice Hall, Professor of Civil  
Engineering University of Idaho Moscow, Idaho
- [8]: <https://www.youtube.com/channel/UC87Kw9ViFfDEHtvQAOjtLow> le 25-3 2022
- [9]: Félix-Antoine Payette: Simulation de écoulement turbulent dans les aspirateurs de turbines hydrauliques, Mémoire de fin d'étude-2008
- [10]: RAMDANE TARFAYA : Étude des paramètres influant sur les performances optimales d'une turbine hydraulique du type Francis, diplôme de master Année: 2013/2014
- [11]: Gino BLOMMAERT : Etude du comportement dynamique des turbines Francis, grade de docteur ès sciences techniques.
- [12]: ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Turbine\\_Francis](https://fr.wikipedia.org/wiki/Turbine_Francis)) (Consulté le 9 mai 2022)
- [13]: J.-M. Chapallaz, ingénieur EPFL/SIA 1450 Ste-Croix: Petites centrales hydrauliques (Turbines hydrauliques), Revue-1995.
- [14]: Kochendörfer Wasserkraftanlagen Turbinen-Maschinenbau e. K.  
<https://kochendoerfer.fr/turbinen-francis> (consulté le 7 avril 2022)
- [15]: Stellba Hydro GmbH; Co KG I Eiffelstr. 4 I D-89542 Herbrechtingen,  
<https://www.stellba-hydro.de/fr/turbines-hydrauliques/turbine-francis/>
- [16]: Auteur : Oriol Planas - Ingénieur Technique Industriel, spécialité mécanique

[17] : BENTATA O. Turbomachines 1 A Fluides incompressibles Cours et Exercices, Département de Génie Mécanique Université des Sciences et de la Technologie d'Oran.

[18]: James B. Francis: experiments on hydraulic motors « Waterfall » (1961)  
Lithographie de M.C.ESCHER

[19]: T. Baumeister, E. A. Vallone et T. Baumeister III, Standard Hand book For Mechanical Engineers, and all Extended Surface Heat Transfer 1972.

[20]: Kifumbi Francis Mafuta : conception et modélisation numérique d'un simulateur de mini-centrale hydroélectrique muni des turbines francis, pelton et cross-flow pour la caractérisation des performances et l'étude de la cavitation, de la maîtrise en ingénierie en juin 2018.

[21]: François Doussot. Simulation numérique de l'écoulement de charge partielle dans les turbines Francis : analyse de la topologie et de la dynamique des vortex inter-aubes. Autre. Université Grenoble Alpes, 2019. Français.

[22]: machines hydrauliques et thermiques, André LALLEMAND, alpistes 2014.