



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
La République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'Enseignement Supérieur la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد بن باديس – مستغانم
Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الهندسة الميكانيكية
Département Génie Mécanique



N° d'ordre : M...../GM/2021

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

ETUDE D'UNE TURBINE HYDRAULIQUE DE PELTON

Présenté par :

- ❖ MISSENGUE MBAYA Pelé
- ❖ ZOUBOYE Haj

Soutenu le 11/07 / 2021 devant le jury composé de :

Président	Pr. RETIEL Noureddine	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. KHALDI Abdelaziz	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Dr. GUERMAT Abdelkader	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2020 / 2021

Dédicaces

Nous dédions ce travail à :

**Nos parents qui nous ont soutenus tout au long de nos
études,**

**Aux membres de nos familles respectives ainsi qu'à nos
amis,**

A tout le département de génie mécanique.

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, Pr RETIEL Nouredine ainsi que l'examineur Dr KHALDI Abdelaziz 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.

Table des matières

Résumé	
Abstract	
Nomenclature	
Listes des figures	
Listes des tableaux	
Introduction générale	
I. CHAPITRE I.....	2
GENERALITES SUR LES CENTRALES HYDRO-ELECTRIQUES	2
I.1 Introduction	3
I.2 Notions sur les Centrales hydro-électriques	3
I.2.1 Définition et principe de fonctionnement d'une centrale hydro-électrique.....	3
I.2.2 Classification des centrales hydroélectriques	4
I.2.3 Catégories de centrales hydroélectriques	4
I.2.4 Avantages et inconvénients des centrales hydroélectriques	5
I.3 Constitution des centrales hydroélectriques	6
I.3.1 L'ouvrage de prise d'eau	6
I.3.2 Les ouvrages d'amenée et de mise en charge.....	6
I.3.3 Les équipements de production	6
I.3.4 Les ouvrages de restitutions	6
I.4 Différents types de turbines hydrauliques	7
I.4.1 Les turbines à Réaction.....	7
I.4.2 Les turbines à Action	10
I.4.3 Critères de choix d'une turbine hydraulique	13
I.5 Comparaison entre centrales hydroélectrique et thermique à vapeur	15
I.6 Revue bibliographique	16
II. CHAPITRE II	18
DEFINITION ET ELEMENTS DE CALCUL THEORIQUE D'UNE TURBINE PELTON	18
II.1 Introduction.....	19
II.2 Généralités sur la turbine de Pelton	19
II.2.1 Historique	19
II.2.2 Composants d'une turbine de Pelton.....	19
II.2.3 Caractéristiques de la turbine de Pelton	24
II.2.4 Différents types de turbine Pelton	24

II.4 Modélisation de la turbine Pelton	25
II.3.1 Schéma de modélisation et théorème de Bernoulli	25
II.3.2 La vitesse à la sortie	25
II.3.3 La vitesse d'emballement.....	26
II.3.4 Diamètre du jet	27
II.3.5 Diamètre de la buse d'injecteur.....	28
II.3.6 Vitesse spécifique.....	29
II.3.7 Puissance hydraulique <i>Phyd</i>	30
II.3.8 Puissance mécanique <i>Pmec</i>	30
II.3.9 Puissance indiquée <i>Pi</i>	30
II.3.10 Le couple	31
II.3.11 Paramètres unitaire et adimensionnels	31
II.3.12 Lois de similitude	32
III. CHAPITRE III	34
Étude des performances d'un cas concret de turbine de Pelton	34
III.1 Introduction	35
III. 2 Démarche d'étude.....	35
III.2.1 Choix d'une turbine Pelton	35
III.2.2 Données principales de la centrale hydroélectrique Bieudron.....	35
III.2.3 Hypothèses	36
III.2.4 Méthode d'étude	36
III.3 Résultats et interprétations.....	37
III.3.1 Vérification de la vitesse spécifique	37
III.3.2 Étude des courbes caractéristiques de la turbine Pelton choisie	38
III.3.3 Études des similitudes.....	45
III.4 Bilan.....	48
IV. Conclusion générale	49
V. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	51

Résumé

Dans ce travail nous avons mené une étude sur les turbines hydrauliques de Pelton sous plusieurs aspects.

Pour notre étude nous avons choisi la plus grande centrale hydraulique contenant les turbines de Pelton, en l'occurrence les turbines de la centrale de Bieudron. Et pour l'étudier, nous avons fait le calcul (par les formules classiques et les lois de similitudes des turbines hydrauliques) de quelques paramètres dans quatre cas pour connaître l'influence de ces paramètres les uns sur les autres dans les différents cas et cela en traçant les courbes caractéristiques, et à la fin de cette étude nous pouvons dire :

- La hauteur et le débit ont un effet positif sur le rendement de la turbine Pelton jusqu'à un certain seuil,
- Le rendement d'une turbine pourra varier de quelques pourcents entre un modèle et son exécution,
- Plusieurs jets sur la roue Pelton, de façon à répartir la charge optimise les performances de la turbine,
- Le couple est maximum au démarrage,
- La vitesse d'emballement reste constante pour cas des courbes caractéristiques à vitesse de rotation variable.

Mot clés : Centrale hydro-électrique, Turbine Pelton, Turbine hydraulique, Similitude, Courbes caractéristiques.

Abstract

In this work we have carried out a study on Pelton turbines in several aspects.

For our study we have chosen the largest hydropower plant containing Pelton turbines, namely the turbines of the Bieudron power plant. In order to study it, we have calculated (by the classical formulas and the laws of similitude of hydraulic turbines) some parameters in four cases to know the influence of these parameters on each other in the different cases and this by drawing the characteristic curves, and at the end of this study we can say:

- The height and the flow rate have a positive effect on the efficiency of the Pelton turbine up to a certain threshold,
- The efficiency of a turbine may vary by a few percent between a model and its execution,
- Several jets on the Pelton wheel, in order to distribute the load, optimises the performance of the turbine,
- The torque is maximum at start-up,
- The runaway speed remains constant for variable speed characteristic curves.

Keywords: Hydroelectric power plant, Pelton turbine, Hydraulic turbine, Similarity, Characteristic curves.

Nomenclature

P_1 et P_0 = Pression atmosphérique [atm]

A = Coefficient de puissance []

A' = Coefficient de couple []

V_{jet} = Vitesse du jet [m/s]

C_C = Coefficient de contraction []

D = Diamètre de la turbine [m]

d_{jet} ou d_s = Diamètre du jet [m]

d_b = Diamètre de la buse [m]

D_m = Diamètre de référence [m]

g = Accélérateur de la pesanteur [m/s^2]

H = Hauteur de la chute [m]

H_{net} = Hauteur nette [m]

N = Vitesse de rotation [tr/min]

N_{max} = Vitesse maximale [tr/min]

N_s ou n_q = Vitesse spécifique []

N_{11} = Vitesse de rotation unitaire [$m^{1/2}.t/min$]

P = Puissance [w]

P_{hyd} = Puissance hydraulique [w]

$P_{méc}$ = Puissance mécanique [w]

R = Rayon de la turbine [m]

Q = Débit [m^3/s]

Q_{11} = Débit unitaire [$m^{1/2}/s$]

T = Couple [Nm]

T_{11} =Couple unitaire [N/m^3]

w =Vitesse relative [m/s]

V_{jet} =Vitesse du jet [m/s]

ρ =Masse volumique [kg/m^3]

ψ = Coefficient d'énergie unitaire []

φ =Coefficient de débit []

η =Rendement [%]

β =Angle de vitesse [°]

Z_i =Nombre d'injecteurs []

1,2: Entrée et Sortie

Liste des figures

Figure I-1 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique[2].....	3
Figure I-2 Image schématique d'une turbine à réaction[5].....	8
Figure I-3 Turbine de Kaplan[5].....	9
Figure I-4 Turbine de Francis[5].....	9
Figure I-5 Schéma d'une turbine à action avec ses paramètres de fonctionnement et ses composants[5].....	11
Figure I-6 Turbine de Cross flow[5].....	12
Figure I-7 Turbine Pelton[4].....	13
Figure I-8 Rendements relatifs des turbines hydrauliques pour débits relatifs variables [2].....	14
Figure I-9-Abaque de choix H-Q [6].....	15
Figure I-10-Abaques de sélection H-Ns (v) [4].....	15
Figure II-1 Turbine de Pelton monobloc à axe vertical à distributeur de 4 jets.....	20
Figure II-2 Injecteur de la turbine de Pelton[9].....	20
Figure II-3 défecteur et injecteur.....	21
Figure II-4 Roue à auget de la turbine de Pelton[9].....	22
Figure II-5 Auget d'une roue de la turbine de Pelton[8].....	23
Figure II-6 Bâti d'une turbine de Pelton.....	24
Figure II-7 Bâti d'une turbine de Pelton[9].....	25
Figure II-8 Dispersion du jet sur un auget Pelton [9].....	26
Figure III-1 Courbe de la hauteur en fonction du débit.....	38
Figure III-2 Courbe de la puissance en fonction du débit.....	39
Figure III-3 Courbe du rendement en fonction du débit.....	39
Figure III-4 Courbe de ψ en fonction de φ	40
Figure III-5 Courbe du débit en fonction de la vitesse de rotation.....	41
Figure III-6 Courbes des puissances a débits différents en fonction de la vitesse de rotation.....	42
Figure III-7 Courbe du rendement en fonction de la vitesse de rotation.....	42
Figure III-8 Courbes des couples a différents débits en fonction de la vitesse de rotation.....	43
Figure III-9 Courbe du débit unitaire en fonction de la vitesse de rotation unitaire.....	43
Figure III-10 Courbe du couple unitaire en fonction de la vitesse de rotation.....	44
Figure III-11 Courbe de la hauteur en fonction du débit.....	45
Figure III-12 Courbe de la Puissance en fonction de débit.....	46
Figure III-13 Courbe du rendement en fonction de débit.....	46
Figure III-14 Courbe de la hauteur en fonction du débit.....	47
Figure III-15 Courbe de la puissance en fonction du débit.....	47

Liste des tableaux

Tableau I-1 Classification des centrales hydroélectrique selon la taille de l'installation [3].	4
Tableau I-2 Comparaison des deux centrales [7].	16
Tableau II-1 Lois de similitude pour une turbine donnée.	32
Tableau III-1 Tableau des paramètres au rendement maximal.	40
Tableau III-2 Tableau des paramètres à vide	40
Tableau III-3 Tableau des paramètres au rendement maximal	44
Tableau III-4 Tableau des paramètres à vide	44
Tableau III-5 Tableau des paramètres d'emballement	44

Introduction générale

Dans le monde actuel, la consommation de l'énergie électrique connaît une augmentation significative avec l'évolution de la population et du niveau de vie. Plusieurs sources d'énergies sont envisageables : comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne ou la biomasse dans la mesure où, pour cette dernière, sa consommation est équilibrée par des plantations équivalentes ; les ressources en électricité fournies par la force d'écoulement de l'eau sont susceptibles de répondre, en divers endroits, à l'énorme demande d'électricité, quand les conditions hydrologiques s'y prêtent. Or, c'est une énergie propre et renouvelable pouvant satisfaire un besoin local avec un impact social et environnemental maîtrisé.

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 EDF2).

En outre, divers types de turbines hydrauliques peuvent être mis à disposition pour l'exploitation de l'énergie de l'eau et pour sa transformation en énergie électrique à travers les centrales hydroélectriques.

Le cadre principal étudié dans ce travail est celui de l'étude d'une turbine hydraulique de Pelton. Pour mener à bien ce travail nous avons choisi de structurer ce travail 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 Pelton (définition, caractéristiques, composants, différents types) et éléments de calcul théorique 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.

I. CHAPITRE I
**GENERALITES SUR LES CENTRALES HYDRO-
ELECTRIQUES**

I.1 Introduction

De plus en plus dans les quatre coins du monde, la production de l'électricité d'origine renouvelable se développe de manière très significative de jour en jour réduisant ainsi la dépendance aux énergies fossiles.

Ce premier chapitre englobe une vue générale sur les centrales hydro-électriques, leurs caractéristiques ainsi que leurs composants essentiels ; un accent est mis sur les éléments indispensables de ces centrales, à savoir les turbines hydrauliques sous plusieurs aspects (différents types de turbines, principe de fonctionnement, critères de choix, etc....) et enfin une comparaison entre les centrales hydro-électriques et les centrales thermiques à vapeur.

I.2 Notions sur les Centrales hydro-électriques

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

Une centrale hydro-électrique exploite l'énergie cinétique et potentielle des cours d'eau pouvant provenir d'un fleuve, d'une rivière, d'une chute d'eau, d'un courant marin, etc. L'énergie du fluide est transformée en énergie mécanique à l'aide d'une turbine. Enfin, cette énergie est transformée en électricité grâce à un alternateur. La figure I.1 expose le principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique utile [1].

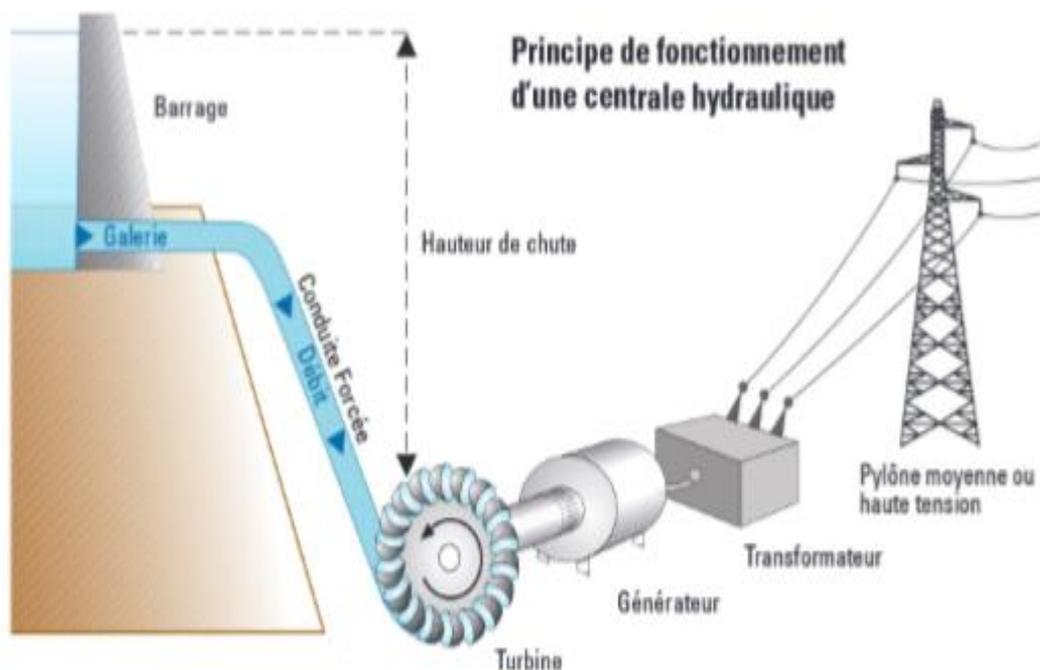


Figure I-1 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique[2]

Un barrage retient l'écoulement naturel de l'eau, de grandes quantités d'eau s'accumulent et forment alors un lac de retenues. Une fois l'eau stockée, des vannes sont ouvertes au niveau du barrage pour que l'eau s'engouffre dans de longs tuyaux appelés conduite forcée, ces tuyaux à taille

humaine, conduisent l'eau vers la centrale hydraulique située en contrebas. Pour préserver le milieu aquatique, un débit minimal est maintenu dans le milieu naturel entre le barrage et la centrale. Dans la centrale, à la sortie de la conduite, la force de l'eau fait tourner une turbine qui fait à son tour tourner un générateur. A l'intérieur du générateur, l'interaction entre le rotor et les bobines de fils de cuivre du stator produit un courant électrique, un transformateur élève ensuite la tension de ce courant à 225 ou à 400 V pour qu'il puisse être transporté plus facilement dans les lignes à très hautes tension du réseau. Enfin, l'eau turbinée qui a perdu de sa puissance rejoint le nid naturel de la rivière par un canal spécial appelé canal de fuite [2].

I.2.2 Classification des centrales hydroélectriques

En général, la classification se fait selon les tailles des installations comme montré dans le tableau suivant :

Classification	Puissance en KW
Grande centrale	> 10 000 KW
Petite centrale	1000 KW < P < 10 000 KW
Mini centrale	10 KW < P < 1000 KW
Microcentrale	< 10 KW

Tableau I-1 Classification des centrales hydroélectrique selon la taille de l'installation [3].

I.2.3 Catégories de centrales hydroélectriques

On distingue quatre grandes catégories de centrales hydroélectriques [1] :

I.2.3.1 Les centrales au fil de l'eau

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. Les centrales au fil de l'eau utilisent des turbines de type Kaplan.

I.2.3.2 Les centrales fonctionnant en éclusées

Ces centrales possèdent un réservoir de stockage dont le volume correspond à une période d'accumulation assez courte, en général, moins de 400 heures. Le réservoir est rempli aux heures les moins chargées en consommation électrique et le turbinage est activé aux heures de pointes.

Elles sont surtout installées en moyenne montagne et dans les régions de bas-reliefs. Elles sont caractérisées par un débit moyen et un dénivelé assez fort avec une chute comprise entre 30 et 300 m. Les centrales d'éclusee utilisent des turbines de type Francis.

I.2.3.3 Les centrales 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. Les centrales de lac utilisent des turbines de type Pelton. Ces centrales sont généralement utilisées pour répondre aux pics de consommation électrique.

I.2.3.4 Les STEP (Stations de Transfert d'Energie par Pompage)

Elles sont reliées à deux bassins ; un bassin en altitude et un bassin inférieur. Entre les deux, est placé un système permettant à la fois le pompage et le turbinage. Le pompage de l'eau dans le réservoir supérieur permet de stocker de l'énergie pendant les heures creuses et, à l'inverse, le turbinage permet de répondre aux pics de consommation. Ces centrales ne sont pas réellement considérées comme moyen de production à base d'énergie renouvelable car elles consomment de l'électricité pour remonter l'eau qui sera turbinée par la suite. Elles sont plus vues comme un moyen de stockage d'énergie.

I.2.4 Avantages et inconvénients des centrales hydroélectriques

- Les centrales hydro-électriques ont le gros avantage d'être généralement viables. En effet, malgré les investissements souvent colossaux nécessaires à l'installation de ce type de centrale, leur durée de vie est très importante (supérieure à 100 ans).
- Les centrales hydro-électriques ont aussi un autre grand avantage, par rapport aux autres énergies renouvelables, de permettre l'ajustement en temps réel de l'équilibre hors demande en électricité.
- L'ensemble des centrales au fil de l'eau permettent de fournir une énergie à peu près constante au cours du temps. Les autres types de centrale permettent, elles, de fournir de l'électricité uniquement lorsque l'approvisionnement à base d'énergie nucléaire et thermique ne suffit plus.
- Lorsque la consommation est faible, les STEP sont utilisées en tant que système de pompage afin de stocker de l'énergie qui sera restituée en temps voulu.
- Ils ont toutefois plusieurs inconvénients vis-à-vis du fonctionnement des écosystèmes, du transport de sédiments et de la navigation. En effet, après le transport de l'électricité dans le réseau, l'eau rejoint enfin le cours d'eau, parfois avec un débit important, ce qui peut perturber les écosystèmes et entraîner un risque de noyade.
- Les barrages sont le seul moyen de stocker d'énorme quantité d'énergie que l'on peut consommer en temps utile [1].

I.3 Constitution des centrales hydroélectriques

Une centrale hydroélectrique est composée de quatre éléments essentiels : les ouvrages de prise d'eau, les ouvrages d'amenée et de mise en charge, les équipements de production, les ouvrages de restitution.

I.3.1 L'ouvrage de prise d'eau

La forme et les dimensions de cet ouvrage sont adaptées à la nature du terrain ou à la conformation du lit du cours d'eau. Il est construit en enrochements, en gabions, en terre, en maçonnerie ou en béton. Il peut parfois tirer parti des faciès naturels et ne nécessite aucun aménagement. La prise d'eau peut également être installée sur un canal d'irrigation ou sur une adduction d'eau potable [3].

I.3.2 Les ouvrages d'amenée et de mise en charge

Un canal d'amenée, en terre ou en béton, et la conduite forcée le plus souvent en acier ou en polyéthylène dirigent l'eau vers la centrale. Le canal est muni d'une grille qui retient les corps solides charriés par le cours d'eau. Un système de vannes répond à différentes utilisations : protection contre les crues, isolement du canal, isolation de la turbine, etc. Une chambre de mise en charge si le canal d'amenée est à écoulement libre, ou une cheminée d'équilibre si il s'agit d'une conduite en charge, assure la jonction avec la conduite forcée qui alimente en eau la turbine [3].

I.3.3 Les équipements de production

La turbine hydraulique, avec ses accessoires, est le cœur des équipements de production d'une centrale hydroélectrique. En effet, la turbine hydraulique, qui est une machine tournante, constituée principalement d'une roue à aubes, reçoit l'énergie du fluide, sous forme d'énergie de pression ou d'énergie cinétique et la transforme en énergie mécanique directement utilisable sur un arbre en rotation (autrement elles servent à transformer l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique lors de l'écoulement d'un réservoir supérieur à un réservoir inférieur).

L'autre équipement, plus important lui aussi dans le travail d'une centrale hydro-électrique, est le générateur ou la génératrice qui produit l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique de la turbine [3].

I.3.4 Les ouvrages de restitutions

A la sortie de la centrale, les eaux turbinées sont renvoyées 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 [3].

I.4 Différents types de turbines hydrauliques

Il existe de nombreux types de turbines hydrauliques s'adaptant aux différentes contraintes imposées par chaque site.

Les types de turbines hydrauliques sont regroupés en deux catégories : les turbines à action et les turbines à réaction, et pour chaque type, une large plage de caractéristiques. Le choix sera fonction de plusieurs paramètres notamment de la hauteur de chute et du débit du site sélectionné pour l'installation d'une centrale [2].

I.4.1 Les turbines à Réaction

A-Principe de fonctionnement

Une turbine à réaction est une machine fermée (noyée) qui utilise à la fois la vitesse de l'eau (énergie cinétique) et une différence de pression. Les turbines à réaction fonctionnent complètement immergées. Le transfert d'énergie à la turbine dépend des conditions de l'écoulement avant et après la roue.

Deux principes sont à la base de son fonctionnement :

- a. La création d'un tourbillon (vortex) au moyen d'une bêche spirale, d'aubages directeurs, ou les deux à la fois,
- b. La récupération du mouvement circulaire du tourbillon par les aubages d'une roue en rotation qui dévient les filets d'eau pour leur donner une direction parallèle à l'axe de rotation.

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.

Les turbines à réaction les plus fréquemment rencontrées sont les turbines Francis et les turbines axiales. La turbine axiale peut avoir les aubes fixes (turbine hélice) ou mobiles (turbine Kaplan).

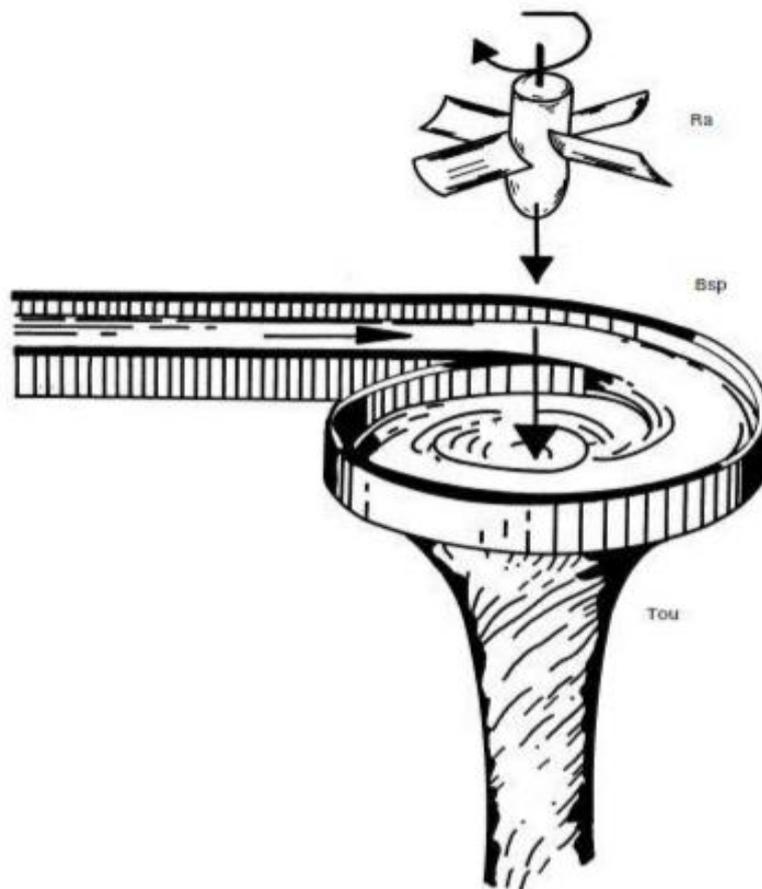


Figure I-2 Image schématique d'une turbine à réaction[5].

Bsp : canal à tourbillon figurant la bache spirale

Ra : roue à palettes figurant la roue à aubes de la turbine, placée dans le tourbillon d'eau Tou

B-Exemples de turbines à réaction

B.1- Turbine Kaplan

Les turbines Kaplan (ou turbines hélice) sont les turbines les mieux adaptées pour les faibles chutes (environ 2m) et des débits importants de l'ordre de 300 l/s à 15000 l/s. Elles conviennent bien pour des débits variables et leur rendement est bon (84-90% maximum) en dépit d'une vitesse de rotation faible. La roue de la turbine Kaplan est semblable à une hélice de bateau et les pâles sont orientables pour optimiser le coefficient de rendement de la turbine. La turbine Kaplan offre une analogie intéressante avec les turbines éoliennes sur l'aspect du réglage de l'orientation des pâles [2].

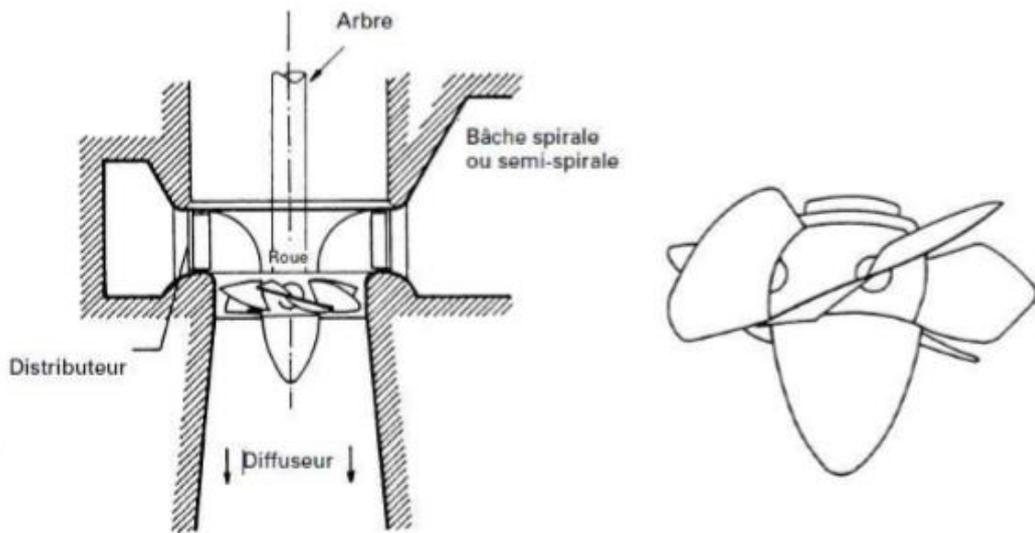


Figure I-3 Turbine de Kaplan[5].

B.2-Turbine Francis

La turbine Francis est utilisée pour des faibles variations de débit (débits moyens entre 100 l/s et 6000 l/s). Elle s’adapte bien aux chutes moyennes de 10m à 100m. Elle a un bon rendement et une vitesse de rotation élevée (1000 tr/min). Le rendement mécanique d’une petite turbine Francis issue de développement en laboratoire est d’environ 92 % [2].

Dans ce type de machine, le tourbillon est créé par une bâche 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].

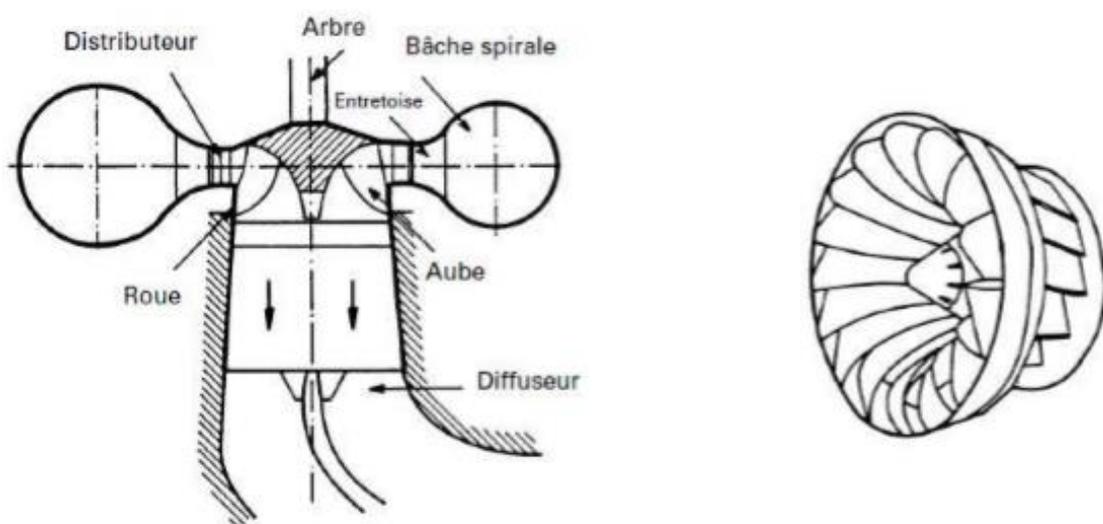


Figure I-4 Turbine de Francis[5].

B.3 Pompe 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.

Son fonctionnement peut se comparer à celui d'une turbine Francis dont le distributeur resterait en position fixe.

Il s'agit d'une machine simple et bon marché (prix inférieur à la moitié de celui d'une turbine construite sur mesure) [5].

I.4.2 Les turbines à Action

A-Principe de fonctionnement

La famille des turbines à action (appelée aussi à impulsion) comprend : les turbines Pelton et Banki-michell (crossflow). Les pales de ces turbines à impulsion (action) recueillent l'énergie d'un jet d'eau à haute vitesse puis finissent leur course dans l'air.

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 [4].

Un jet libre agit sur des augets ou des aubes profilées placées sur la périphérie d'une roue (action). Ce jet exerce une force sur l'auget en mouvement de rotation, qui est transformée 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.

La figure suivante présente schématiquement une turbine à action :

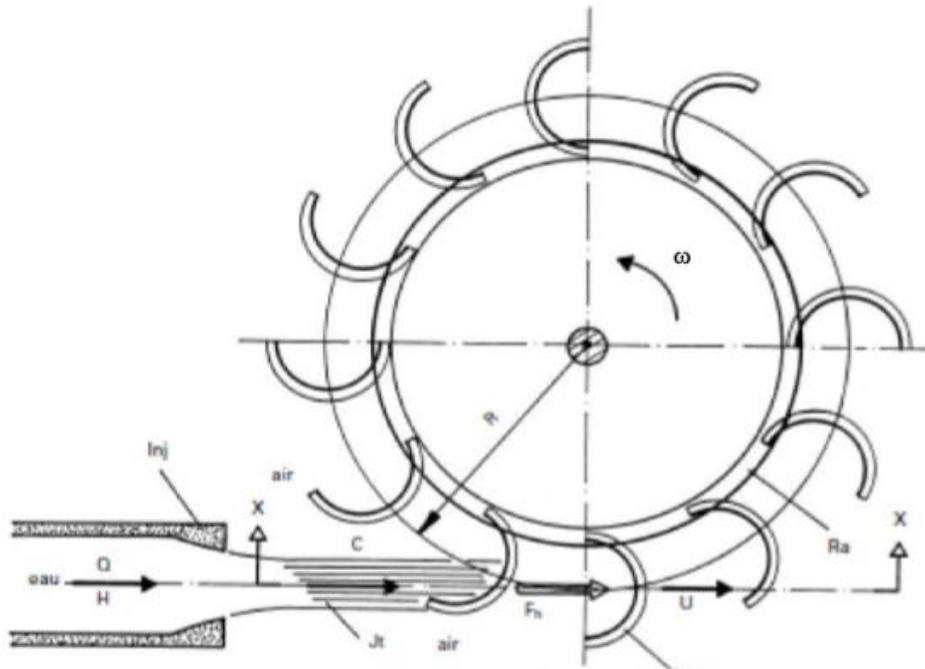


Figure I-5 Schéma d'une turbine à action avec ses paramètres de fonctionnement et ses composants[5].

Inj (injecteur), Ra (roue de la turbine),

Jt (jet d'eau), Aug (auget ou aube profilée).

B-Exemples de turbines à action

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

La turbine Cross flow, appelé aussi turbine à flux traversant, est une machine à action qui a la particularité que l'eau traverse deux fois la roue. De construction simple, elle est constituée de trois parties principales [2] :

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

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

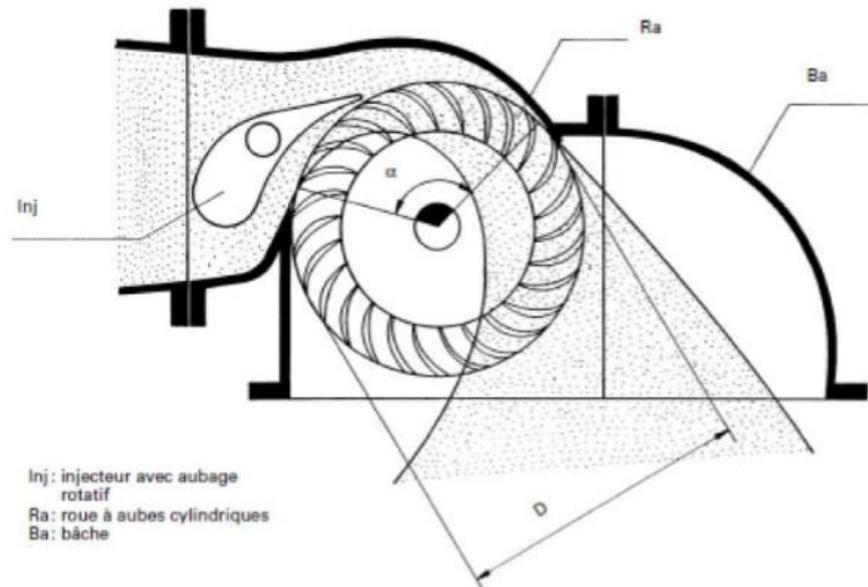


Figure I-6 Turbine de Cross flow[5].

B.2-Turbine Pelton

La turbine Pelton est constituée par une roue à augets qui est mise en mouvement par un jet d'eau provenant d'un injecteur. Les augets sont profilés pour obtenir un rendement maximum tout en permettant à l'eau de s'échapper sur les côtés de la roue. La vitesse nominale de la turbine varie de 500 tr/min à 1500 tr/min [2].

Ce type de turbine est utilisé dans les petites centrales hydrauliques (PCH) de haute chute. En effet, elle est performante pour des hauteurs de chute supérieures à 100m et des débits compris (0,2 - 8m³/s). La puissance maximale développée par la turbine de Pelton est de l'ordre de 350MW [4].

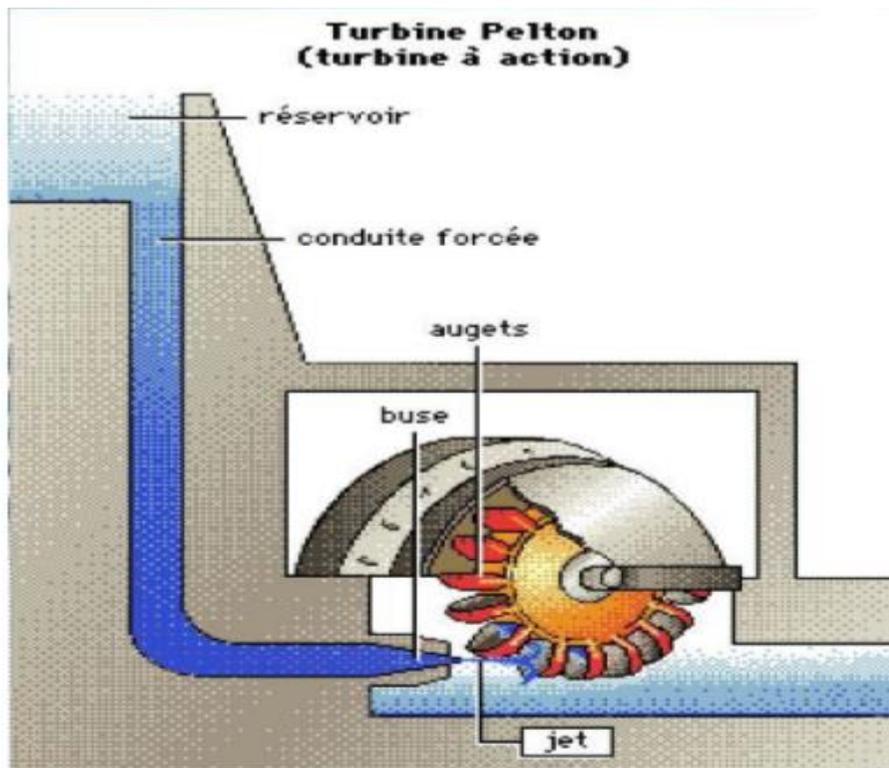


Figure I-7 Turbine Pelton[4].

I.4.3 Critères de choix d'une turbine hydraulique

I.4.3.1 Critères généraux

Il existe plusieurs critères de choix de turbines hydrauliques qui sont basés sur la connaissance de leurs caractéristiques (rendement, vitesse spécifique, etc.) et de celles du site où elles vont être installées (hauteur de chute, débit, etc.).

Pour le rendement des turbines, il se situe généralement entre 80 et 90 % ; il croît avec la taille des roues et aussi avec le débit.

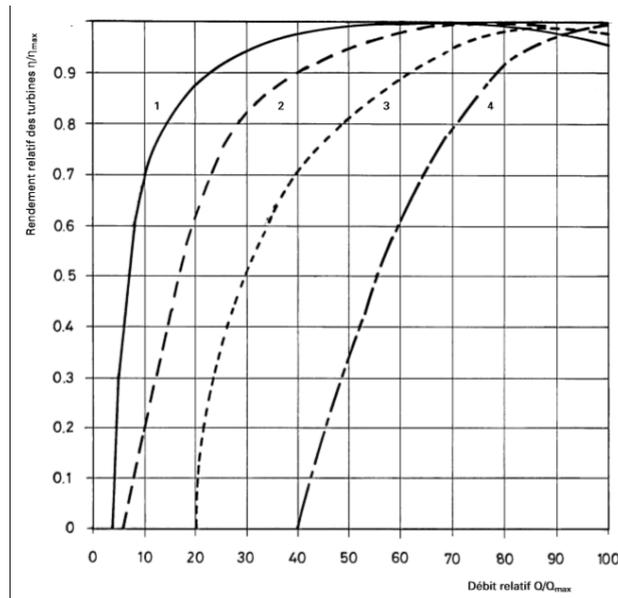


Figure I-8 Rendements relatifs des turbines hydrauliques pour débits relatifs variables [2].

Courbe 1 : Turbine Pelton $\eta_{\max} = 84 - 90\%$

Turbine Crossflow à 2 cellules $\eta_{\max} = 78 - 84\%$

Courbe 2 : Turbine Kaplan $\eta_{\max} = 84 - 90\%$

Courbe 3 : Turbine Francis $\eta_{\max} = 84 - 90\%$

Turbine Crossflow à 1 cellule $\eta_{\max} = 78 - 84\%$

Courbe 4 : Pompe inversée $\eta_{\max} = 75 - 90\%$

Les turbines utilisées dans les installations dont la chute est élevée sont généralement les turbines à impulsion (action).

Les petites turbines hydrauliques peuvent atteindre des rendements avoisinant 90 %. Pour la plupart des petites centrales au fil de l'eau où le débit varie considérablement, il est préférable de faire appel à des turbines à réaction qui donnent un bon rendement dans une vaste gamme de débits (ex. : Kaplan, et turbine Francis). On peut également utiliser plusieurs turbines qui fonctionnent dans une plage limitée de débits et à vitesse variable pour s'adapter aux variations du débit [2].

I.4.3.2 Abaques de choix

Ces abaques permettent à partir des premières données de connaître le type de turbine utilisée (dans ces deux cas, 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).

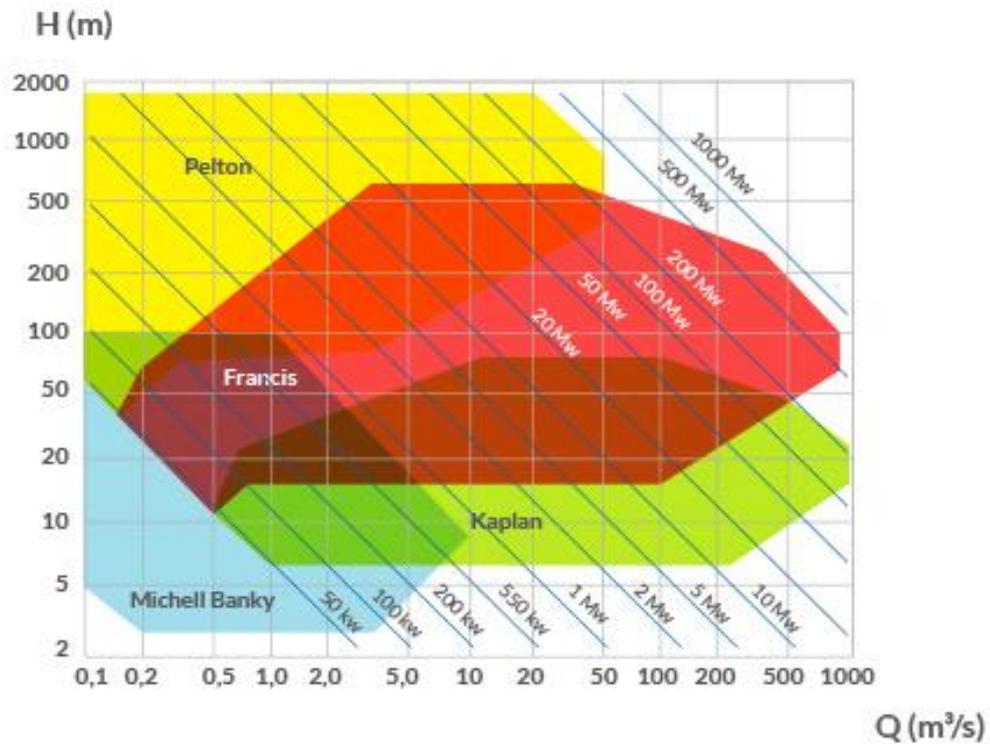


Figure I-9-Abaque de choix H-Q [6]

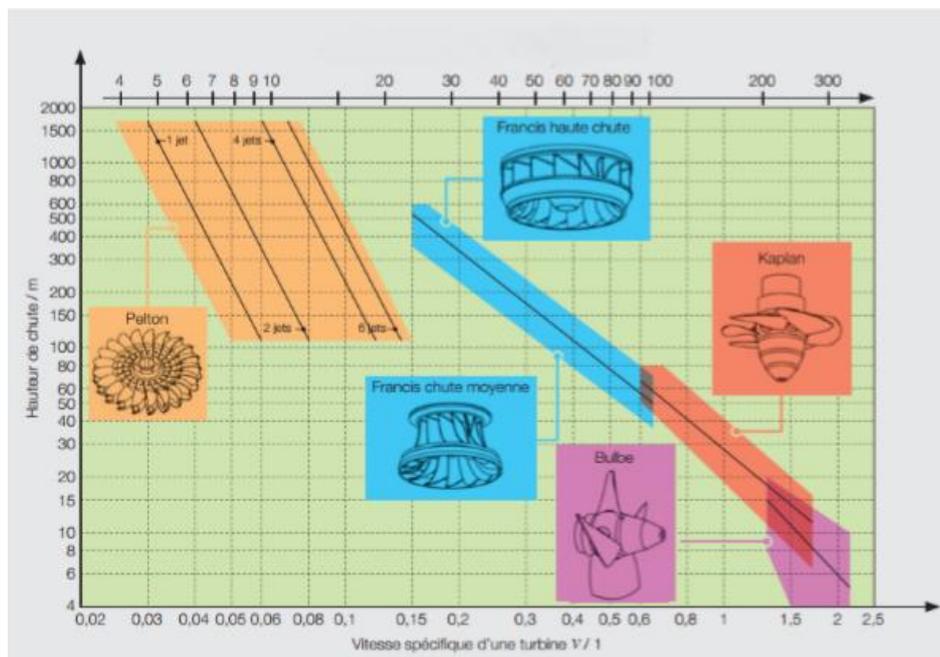


Figure I-10-Abaques de sélection H-Ns (v) [4]

I.5 Comparaison entre centrales hydroélectrique et thermique à vapeur

Ces deux centrales possèdent une turbine actionnée par l'eau (vapeur ou liquide) mais elles sont différentes sur plusieurs aspects que nous résumons dans le tableau suivant :

	Avantages	Inconvénients
Centrale hydroélectrique	<ul style="list-style-type: none"> ● énergies renouvelables illimitées 	<ul style="list-style-type: none"> ● les sites potentiels se situent généralement en montagne entraînant des surcoûts importants de construction, le nombre de ces sites n'est pas infini et, même relativement faible. ● ce système implique de noyer des vallées entières de terre cultivable, où les hommes vivent bien souvent depuis des lustres.
Centrale thermique	<ul style="list-style-type: none"> ● On peut s'en servir quand on le veut. ● Elles sont puissantes... ● Elles permettent de faire de la cogénération : lorsque l'on a besoin à un endroit déterminé (agglomération, industries chimiques, serres, ...) de chaleur en grande quantité, il est intéressant de créer une centrale thermique qui produit de l'électricité et dont le circuit de refroidissement sert de source de chaleur pour l'application désirée. (C'est une manière de rentabiliser les inévitables pertes de ce type de centrales.) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Les sources d'énergie fossiles ont le défaut de ne pas être inépuisables. De plus elles sont polluantes.

Tableau I-2 Comparaison des deux centrales [7].

I.6 Revue bibliographique

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

Une étude d'une Micro Turbine Pelton Multi-jet. Les travaux dans ce mémoire se portent sur l'étude d'un micro turbine Pelton multi-jet en analysant théoriquement et cinématiquement le comportement de l'eau transmise à la turbine, ensuite le dimensionnement des éléments la constituant en fonction de certains paramètres tels que la hauteur de chute, le débit d'eau et la vitesse de rotation de l'alternateur sans oublier la mise en avant des avantages du choix d'utilisation de plusieurs jets [4].

Une étude sur la Simulation d'écoulement instable de la turbine Pelton à différentes vitesses de rotation dont le but était d'étudier le changement de débit dans une turbine Pelton à différentes vitesses de rotation. Des simulations instables ont été menées sur une turbine Pelton à double jet entière comprenant deux injecteurs réels et le boîtier. Les résultats numériques ont été comparés aux données expérimentales pour validation, et les caractéristiques d'écoulement dans différentes conditions de fonctionnement ont été analysées en détail [11].

Une autre étude physique et numérique de l'écoulement dans un dispositif d'injection de turbine Pelton qui avait pour but de comprendre les phénomènes influençant le jet et son interaction avec les augets. Pour cela deux actions différentes ont été menées. Une première a visé à caractériser expérimentalement la fragmentation d'un jet de turbine Pelton. La seconde s'est attachée à développer une méthode numérique pouvant mener à la simulation précise de jets réels de turbines Pelton [12].

II. CHAPITRE II

DEFINITION ET ELEMENTS DE CALCUL THEORIQUE

D'UNE TURBINE PELTON

II.1 Introduction

Les turbines sont des appareils tournants conçus par l'homme afin de favoriser le déplacement de tous types de fluides en transformant leur énergie. L'évolution des turbines de Pelton depuis une cinquantaine d'années est caractérisée par l'amélioration des tracés hydrauliques qui a permis une augmentation des vitesses et puissances spécifiques, ainsi que des rendements, afin de répondre à la demande de la consommation convenable d'électricité.

Dans ce second chapitre, nous allons tout d'abord voir d'une manière générale, les caractéristiques, les composants d'une turbine de Pelton, un accent sur les différents types de turbine de Pelton, et mettre au clair les différentes formules de calcul afin de pouvoir faire par la suite une étude numérique et enfin une revue bibliographique succincte de quelques travaux sur les turbines de Pelton est présentée.

II.2 Généralités sur la turbine de Pelton

II.2.1 Historique

La turbine Pelton porte le nom de son inventeur l'américain Lester Pelton qui l'a mise au point en 1880. Le brevet pour la toute première roue Pelton fut déposé par Lester Pelton en 1878. Ce brevet décrit la forme de l'auget ainsi que les différentes manières de le fixer sur la roue. Le nom de Pelton a traversé les âges, mais rendons justice à un autre acteur important dans l'histoire de cette turbine : W. Abna Doble. Doble est en réalité l'inventeur de la conception de l'auget moderne en 1899. Il a également imaginé l'injecteur constitué d'un pointeau.

II.2.2 Composants d'une turbine de Pelton

Une turbine Pelton comporte de façon générale : le distributeur, la roue et le tout est entouré d'une bache en tôle d'acier destinée à protéger la roue et à évacuer l'eau [8].

II.2.2.1 Distributeur

Le distributeur d'une turbine Pelton est formé d'un ou de plusieurs injecteurs avec leurs accessoires ; on distingue ainsi les turbines à un jet et les turbines à jets multiples.

L'injecteur est constitué d'une tuyère appelée buse dont la section de passage est réglable par le déplacement d'un pointeau ou aiguille d'injection. Un déflecteur coiffe l'extrémité de la buse d'un nez demi-cylindrique qui enveloppe et affleure le jet sortant de l'injecteur.

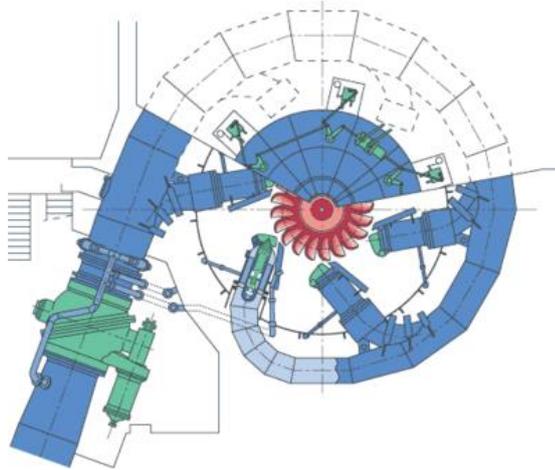


Figure II-1 Turbine de Pelton monobloc à axe vertical à distributeur de 4 jets.

❖ Injecteur

L'injecteur est un organe phare de la turbine Pelton. Cet organe a deux fonctions principales : opérer la transformation d'énergie de pression en énergie cinétique en créant un jet homogène et réguler avec précision le débit en introduisant peu de pertes de charges.

L'injecteur est composé :

- D'un corps, se terminant du côté de la sortie d'eau par un trou d'ajutage appelé « buse »,
- D'une aiguille, se déplaçant dans le corps et servant au réglage du débit d'eau,
- D'un vérin hydraulique de manœuvre.

Le corps ressemble à un tube, monté en bout de la conduite forcée. Fabriqué en acier coulé, il est rectiligne ou coudé. À la sortie du corps, la buse est soumise à une forte érosion de l'eau et comporte une partie démontable appelée « bec de buse ». Cette pièce réalisée en acier inoxydable peut être donc remplacée suivant son usure.

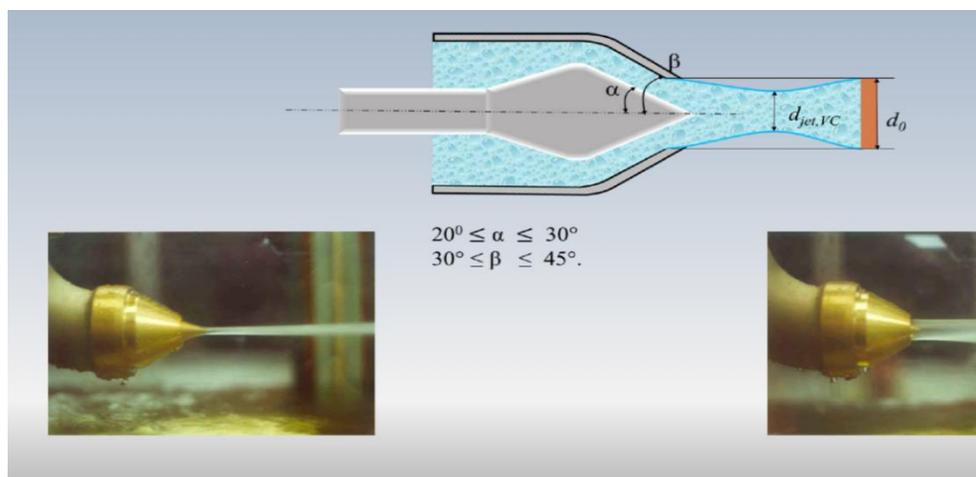


Figure II-2 Injecteur de la turbine de Pelton[9].

➤ **Pointeau**

Il permet de réguler le débit et aussi de l'annuler complètement. L'actionnement des pointeaux se fait par l'intermédiaire de vérins hydrauliques. Le choix de vérins hydrauliques et non électriques est motivé par la sécurité de fonctionnement de la machine. En cas de dysfonctionnement de la turbine (par exemple un emballement de la roue), il faut pouvoir fermer les injecteurs indépendamment de tout problème électrique. Cette fermeture est régie par un ressort qui tend à pousser le pointeau vers le bout de l'injecteur et un étrangleur sur le circuit hydraulique qui évite une fermeture trop brusque afin de ne pas engendrer un coup de bélier dans les conduites.

❖ **Défecteur**

Le déflecteur est un organe de sécurité, il est chargé de dévier le jet hors de la roue Pelton en cas d'emballement de la turbine. Il fonctionne donc de pair avec le pointeau, mais a l'avantage de pouvoir être actionné très rapidement sans aucun risque de coup de bélier et ainsi permettre au pointeau de se refermer doucement par la suite.

Le déflecteur est composé :

- D'un étrier en acier, pivotant perpendiculairement devant la sortie du jet d'eau de l'injecteur,
- D'un vérin hydraulique de manœuvre.

Après une manœuvre du déflecteur, la roue n'est plus entraînée par le jet, et ce dernier peut être diminué lentement par l'injecteur sans risque. L'efficacité du déflecteur est assurée par sa position tangente au jet d'eau en position normale. Le déflecteur est une pièce le plus souvent forgée, à cause des contraintes importantes qu'il subit.

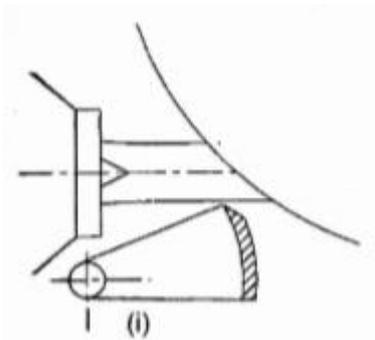


Figure II-3 déflecteur et injecteur

II.2.2.2 Roue à augets

Les turbines Pelton utilisent la roue dite « à augets ». Cette roue ressemble à un disque équipé d'augets ressemblant à des demi-coquilles de noix, placés en circonférence.

L'axe du jet sortant d'un injecteur est tangente à la circonférence de la roue dont le diamètre est par définition le diamètre nominal de la machine. L'eau frappe les demi-augets symétriquement par rapport à l'arête qui les sépare, elle sort de l'injecteur à une vitesse à peu près double de la vitesse tangentielle moyenne des augets : la forme de l'échancrure et le nombre d'augets sont déterminés de telle sorte que la totalité du débit travaille dans les augets sans perte.

La forme de ces augets est très évoluée et permet au jet d'eau qui les frappe de se séparer en 2 jets déviés sur les côtés de la roue.

L'axe de la roue est habituellement horizontal. L'alternateur peut être commandé par une ou deux roues, avec les dispositions suivantes :

Une roue : l'alternateur et la roue sont placés côte à côte.

Deux roues : l'alternateur est placé entre les deux roues.

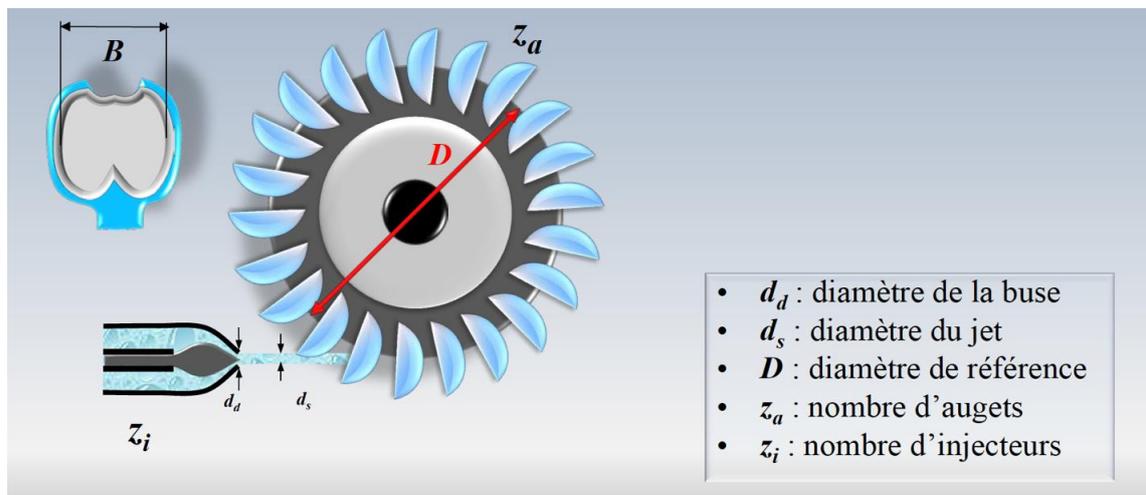


Figure II-4 Roue à auget de la turbine de Pelton[9].

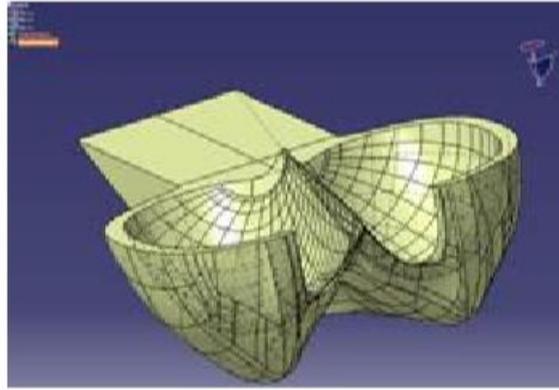


Figure II-5 Auget d'une roue de la turbine de Pelton[8].

II.2.2.3 Bâche

La bâche est la partie enveloppant la roue, contenant ainsi la terre d'eau (valable uniquement pour les turbines à axe horizontal), cette bâche est composée :

- D'un bâti fixe en partie basse, ancré dans le béton,
- D'une capote démontable, permettant l'accès à la roue pour les contrôles et réparations.

Le plan de joint entre le bâti et la capote est donc horizontal et passe par l'axe de rotation de la roue. Après chaque démontage, l'étanchéité de ce plan de joint est refaite, par application de pâte d'étanchéité ou par remplacement du joint torique placé dans une gorge du bâti.

D'autre part, des boucliers métalliques appelés « renvois d'eau » sont fixés dans la partie inférieure du bâti. Ces pièces permettent de récolter l'eau projetée et de la guider vers la fosse d'évacuation.

➤ Bâti

Il s'agit d'un élément crucial ayant pour rôle de canaliser l'eau vers la sortie de la machine. Il existe donc des règles de bonne pratique concernant les dimensions minimales du bâti, comme par exemple le diamètre intérieur, ou encore l'espace entre la roue et le sommet du bâti, qui garantissent la bonne évacuation de l'eau. Dans le cas de figure où le bâti ne remplit pas correctement sa fonction, des pertes de rendement seront observées au niveau de la turbine. En effet, après que la veine de fluide soit passée dans un auget de la roue, elle ne contient plus d'énergie. Si elle vient à entrer à nouveau en intersection avec la roue, cela engendre des pertes significatives (cela peut également altérer la qualité du courant électrique produit) [8].

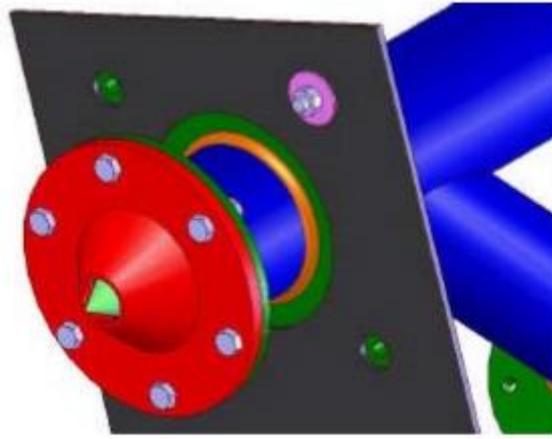


Figure II-6 Bâti d'une turbine de Pelton

II.2.3 Caractéristiques de la turbine de Pelton

Les turbines de Pelton sont simples par eux-mêmes, on peut noter toutefois certaines caractéristiques :

- La turbine Pelton est une machine à action, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de différence de pression entre l'entrée (la sortie de l'injecteur) et la sortie de la roue. En réalité, la pression à l'intérieur du bâti est la pression atmosphérique.
- Elles ont de plus un bon rendement pour les petites et moyennes puissances (de quelques centaines de watts à quelques centaines de kilowatts), ce qui est souvent le cas des applications dans les pays en voie de développement. Enfin, elles sont relativement faciles à réaliser localement.
- Les turbines de Pelton sont adaptées aux chutes supérieures à 100 mètres et de puissance maximale possible de 300 mégawatts ;

II.2.4 Différents types de turbine Pelton

Ils existent des turbines à roue d'axe vertical et à roue d'axe horizontal.

Pour les turbines à axe vertical, le nombre de jets peut être plus élevé. On construit des machines comportant jusqu'à six injecteurs. C'est la solution retenue pour les grosses machines.

Pour les turbines à axe horizontal, afin de limiter l'encombrement de l'amenée, le nombre de jets est pratiquement limité à deux, l'angle entre ces deux jets variant entre 75° et 90° .

Il existe aussi des turbines Pelton dites à contre pression, où la pression dans le bâti est choisie par l'utilisateur. Ces turbines sont très utilisées dans les réseaux de distribution d'eau par exemple [8].

II.4 Modélisation de la turbine Pelton

II.3.1 Schéma de modélisation et théorème de Bernoulli

Ce schéma représente une vue d'ensemble d'un barrage avec quelques paramètres où l'on peut utiliser le théorème de Bernoulli afin de pouvoir retrouver quelques formules de calculs.

Appliquons le théorème de Bernoulli entre le point haut du barrage ou bassin (Point 0 ou début de chute) et le point bas situé à la sortie de l'injecteur (point 1), on obtient :

$$\frac{1}{2}\rho_1 C_1^2 + \rho_1 g H_1 + P_1 = \frac{1}{2}\rho_0 C_0^2 + \rho_0 g H_0 + P_0 \quad (\text{II.1})$$

On considère que :

- ρ_1 et ρ_0 sont égaux (liquide incompressible),
- P_1 et P_0 sont égaux (pression atmosphérique)
- H_0 = altitude niveau bassin supérieur
- H_1 = altitude niveau pointeau
- H = hauteur de chute = $H_0 - H_1$

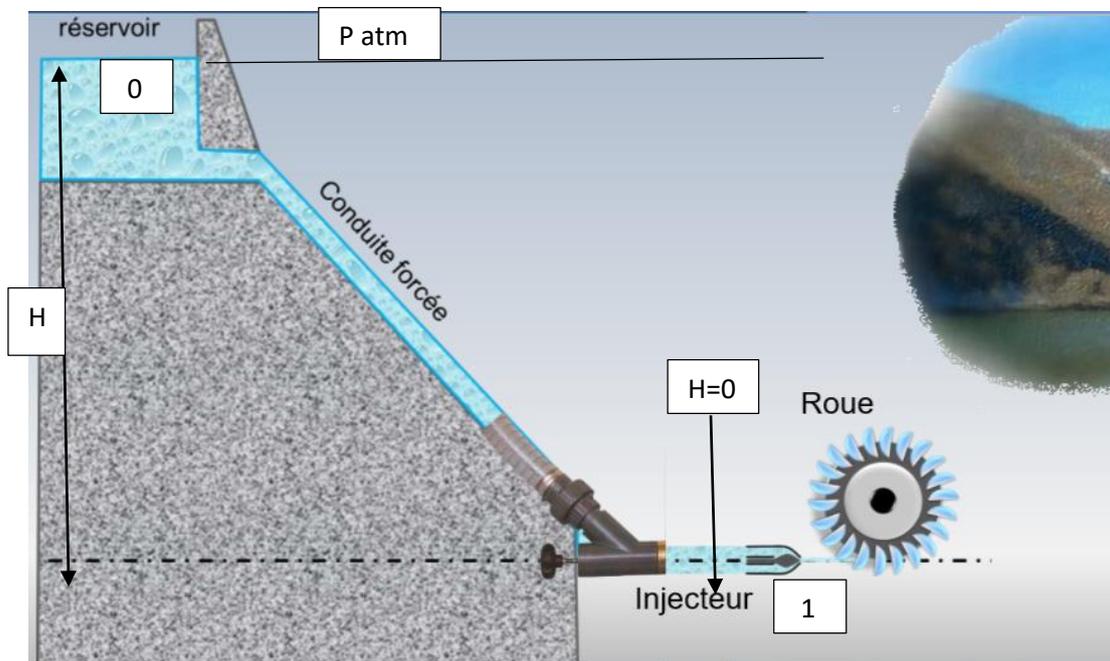


Figure II-7 Bâti d'une turbine de Pelton[9].

II.3.2 La vitesse à la sortie

Le diagramme des vitesses sur les augets de la turbine de Pelton se présente comme suit :

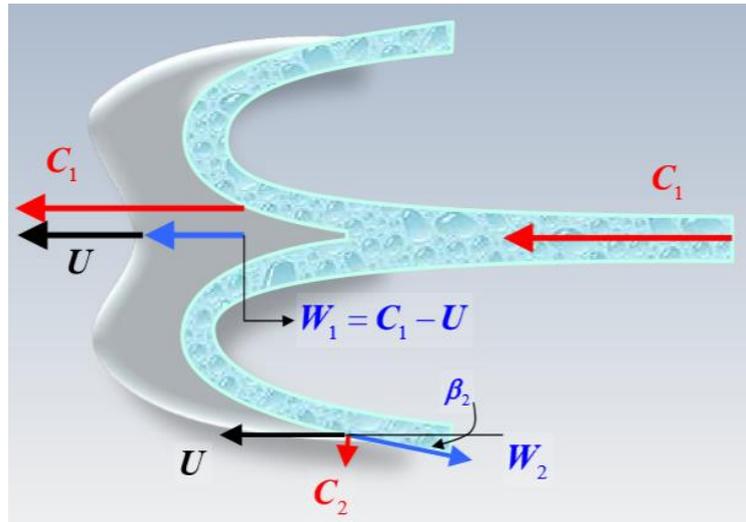


Figure II-8 Dispersion du jet sur un auget Pelton [9]

Elle est déterminée depuis l'équation de Bernoulli :

$C_0 = 0$ = vitesse eau à l'entrée de la conduite.

La simplification de l'équation de Bernoulli permet de déduire la vitesse à la sortie de la conduite :

$$\frac{1}{2} \rho (0 - C_1^2) = -\rho g (H_1 - H_0) \quad (\text{II. 2})$$

$$C_1 = C = \sqrt{2 * g * H} \quad (\text{II. 3})$$

A l'entrée de l'auget, les vitesses absolues C_1 et d'entraînement U_1 ont même direction et sens.

$$W_1 = C_1 - U_1 \text{ et } C_{u1} = C_1 .$$

$$W_2^2 + U^2 - 2 * W_2 * U * \cos\beta_2 = C_2^2 \quad (\text{II. 4})$$

En fait, l'angle β_1 de la face de l'auget ne peut être rigoureusement nul et il se produit une composante de choc que nous négligeons. A la sortie, la direction de la vitesse relative W_2 est définie par l'angle β_2 .

II.3.3 La vitesse d'emballlement

La vitesse d'emballlement est la vitesse maximale que peut atteindre la turbine lorsqu'elle n'a aucun moyen de dissiper l'énergie qu'elle produit. Ce cas de figure se produit quand la charge sur le générateur devient nulle suite à un dysfonctionnement quelconque dans l'installation électrique.

$$N_{max} = (1.5 - 3.5) * N [10] \quad (II. 5)$$

La vitesse d'emballage moyenne est définie comme étant $1,8 \times N_{nominale}$. Une telle vitesse est susceptible d'endommager la turbine mais surtout le générateur dont les bobinages risquent de céder sous l'effet de la vitesse angulaire élevée. C'est pourquoi la sécurité est généralement enclenchée pour une vitesse 1,25 fois supérieure à la vitesse nominale.

II.3.4 Diamètre du jet

A partir de la section contractée du jet sortant d'un injecteur Pelton, on observe une modification d'aspect. Au lieu de rester cylindrique, ainsi que le voudraient les lois de l'hydrodynamique théorique, le jet change de structure, après une section de diamètre minimal ou section contractée, le jet s'élargit en fonction de la distance. En effet, le jet est constitué d'une zone centrale convergente ne renfermant que de l'eau et une zone de section annulaire croissante renfermant une émulsion d'eau et d'air.

Pour assurer la bonne qualité du jet, c'est-à-dire dispersion et ovalisation minimales, on a certaines conditions dans le tracé de l'injecteur.

Afin de déterminer le débit d'un injecteur (q_i), le débit principal (Q) est divisé par le nombre de jets :

$$q_i = \frac{Q}{z_i} \quad (II. 6)$$

Avec z_i le nombre de jet.

En ayant le débit et la vitesse ainsi que le nombre d'injecteurs, l'expression du diamètre est la suivante [4] :

$$d_{jet} = \sqrt{\frac{4 * Q}{2 * \pi * v_{jet}}} \quad (II. 7)$$

Il est aussi important de définir le rapport $2R/d$ entre le rayon de la roue R et le diamètre du jet d qui est utile pour que le rendement soit convenable. Cette relation est de la forme [10]

$$9 < \frac{2 * R}{d} < 30 \quad (II. 8)$$

$$d_{jet} = \frac{2 * R}{9} \quad (II. 9)$$

II.3.5 Diamètre de la buse d'injecteur

L'injecteur a pour rôle d'alimenter la roue en eau et de permettre le réglage du débit. L'eau pénètre dans l'injecteur à faible vitesse et en sort à grande vitesse. Il y a donc dans l'injecteur une transformation de l'énergie de pression en énergie cinétique.

A débit maximale Q , le jet sortant de l'injecteur a la forme d'un cylindre de diamètre d_{jet} . Mais le diamètre de l'orifice à la sortie de la buse doit avoir une valeur d_b supérieur à d_{jet} en raison de la contraction subie par la veine liquide s'échappant de l'injecteur [4].

On a:

$$d_b = a d_{jet} \quad (II. 10)$$

Avec

$$a = \frac{1}{C_c} \quad (II. 11)$$

C_c : coefficient de contraction.

En partant de l'équation de Bernoulli :

Avec P_1 la pression avant l'orifice, P_2 celle après l'orifice, V_1 et V_{jet} respectivement les vitesses d'un côté et de l'autre.

En admettant que les hauteurs H_1 et H_2 sont identiques, la différence entre le carré des vitesses est donnée selon :

$$V_{jet}^2 - V_1^2 = \frac{2}{\rho} (P_1 - P_2) \quad (II. 12)$$

Le coefficient de contraction C_c est défini de la manière suivante

$$C_c = \frac{d_{jet}}{d_b} \quad (II. 13)$$

Le nombre d'augets répond à une formule issue de l'expérience des constructeurs, soit :
 $Z=15+D/2d$

Avec Z = nombre d'augets, $D = \emptyset$ primitif, $d = \emptyset$ du jet d'eau.

Leur nombre varie de 15 à 25 en pratique.

II.3.6 Vitesse spécifique

La vitesse de rotation spécifique est le principal nombre caractéristique des turbines hydrauliques. Elle mesure le rapport entre la vitesse de l'eau et la vitesse de rotation. Elle est indispensable dans le choix des turbines hydrauliques en fonction des données de départ et constitue la première étape avant tout calcul des performances de la turbine et même on peut recourir à la vérification de ce paramètre après les calculs.

Sur la base de cette vitesse spécifique, on distingue les turbines lentes, pour lesquelles la vitesse de l'eau est nettement supérieure à la vitesse périphérique, et les turbines rapides, pour lesquelles c'est le contraire [5].

Par ailleurs, on définit un certain nombre de vitesses spécifiques :

❖ Vitesse spécifique en fonction de la puissance

Nous rappellerons d'abord que la théorie de la similitude des turbines hydrauliques conduit à envisager un nombre appelé " vitesse spécifique " et dont la valeur est donnée par :

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{4/5}} \quad (\text{II. 14})$$

Cette formule a pour inconvénient que le rendement de la turbine est inclus dans la puissance P.

N est le nombre de tours par minute ;

P puissance en CV ;

H la chute en mètres.

La valeur de N_s permet de préciser le type de turbine à employer, pour un débit et sous une chute donnée, et même d'évaluer le rendement hydraulique maximum qu'on peut atteindre [4].

❖ Vitesse spécifique en fonction du débit

En pratique, H et Q étant donnés, et N imposé, le type de turbine à utiliser est immédiatement déduit de la valeur de N_s .

Si cette valeur correspond à un mauvais rendement ou à une zone d'utilisation incertaine, on fractionne le débit en augmentant le nombre de groupes prévus dans l'installation envisagée ; en d'autres termes, on change Q, ce qui donne pour N_s une nouvelle valeur. Enfin, on pourrait influencer aussi sur la valeur de la vitesse de rotation N.

Prenons $N = 1000$ tours par minute, et supposons H constant. La courbe représentative des variations de N_s en fonction de Q a pour équation

$$N_s = \frac{3660N\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (\text{II. 15})$$

Formule que nous considérerons désormais [4].

❖ Vitesse spécifique nq

Vitesse de rotation, en t/min, d'une turbine travaillant sous une chute de 1 m avec un débit de $1\text{ m}^3/\text{s}$ [5]

$$nq = N \cdot \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (\text{II. 16})$$

$$\text{Conversion : } Ns = 3,13 \cdot \sqrt{\eta} \cdot nq \cong 3,0 nq \quad (\text{II. 17})$$

Vitesse spécifique v

$$v = \omega \cdot \frac{(Q/\pi)^{1/2}}{(2 \cdot g \cdot H)^{3/4}} = \frac{\varphi^{1/2}}{\psi^{3/4}} \quad (\text{sans dimensions}) \quad (\text{II. 18})$$

v est un chiffre équivalent à nq , mais sans dimensions

$$v = 0,00634 \cdot nq \quad (\text{II. 19})$$

II.3.7 Puissance hydraulique P_{hyd}

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 (débit volumique par masse spécifique) [5] :

$$P_{hyd} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \quad (\text{II. 20})$$

II.3.8 Puissance mécanique P_{mec}

De par les lois de la physique, la puissance mécanique est donnée par le produit du couple par la vitesse de rotation [5]:

$$P_{mec} = \omega \cdot T \quad (\text{II. 21})$$

Ou encore

$$P_{mec} = \eta_t * P_{hyd} \quad (\text{II. 22})$$

II.3.9 Puissance indiquée P_i

Elle sera calculée par la formule suivante [10] :

$$P_i = A\rho Q_v(N_{\max} - N)N \quad (\text{II. 23})$$

A : Coefficient adimensionnel,

$$A = (2 * \pi * R)^2 * (1 - \cos\beta_2) \quad (\text{II. 24})$$

N_{\max} : vitesse d'emballement maximale,

$$N_{\max} = \frac{V_{\text{jet}}}{2\pi R} \text{ (Vitesse de rotation maximale)} \quad (\text{II. 25})$$

$$V_{\text{jet}} = \sqrt{2gH} \text{ (Vitesse du jet);} \quad (\text{II. 26})$$

II.3.10 Le couple

La formule suivante sert à calculer le couple [10] :

$$T_i = A' \rho Q_v (N_{\max} - N) \quad (\text{II. 27})$$

$$A' = \frac{AN}{\omega} \text{ (Coefficient adimensionnel)} \quad (\text{II. 28})$$

ω : vitesse angulaire.

II.3.11 Paramètres unitaire et adimensionnels

On mentionne que la chute H et le débit étaient habituellement convertis en chiffres adimensionnels φ et ψ , tenant compte des lois similitude [5]

Leur définition est la suivante :

- **Coefficient d'énergie** (sans unité)

$$\psi = \frac{g.H}{\omega^2.D^2} \quad (\text{II. 29})$$

- **Coefficient de débit** (sans unité)

$$\varphi = \frac{Q}{\pi.\omega.D^3} \quad (\text{II. 30})$$

- **Débit unitaire**

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2.\sqrt{H}} \text{ (} m^{1/2}/s \text{)} \quad (\text{II. 31})$$

- **Vitesse de rotation unitaire**

$$n_{11} = \frac{n.D}{\sqrt{H}} \text{ (} m^{1/2}.t/\text{min} \text{)} \quad (\text{II. 32})$$

- **Couple unitaire**

$$T_{11} = \frac{T}{D^3.H} \quad \left(\frac{N}{m^3} \right) \quad (\text{II. 33})$$

II.3.12 Lois de similitude

❖ 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 [5] :

<i>Chute (m)</i>	H_1	H_1
<i>Débit (m³/s)</i>	Q_1	$Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}$
<i>Vitesse de rotation (tr/min)</i>	n_1	$n_2 = n_1 \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}$
<i>Couple (Nm)</i>	T_1	$T_2 = T_1 \cdot \frac{H_2}{H_1}$
<i>Puissance (W ou KW)</i>	P_1	$P_2 = P_1 \cdot \frac{H_2^{1,5}}{H_1^{1,5}}$

Tableau II-1 Lois de similitude pour une turbine donnée.

❖ 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 [5].

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

Modèle : diamètre de référence D_m

Exécution : diamètre de référence D

$$\text{Rapport des chutes : } \frac{H}{H_m} = \left(\frac{N}{N_m}\right)^3 * \left(\frac{D}{D_m}\right)^5 \quad (\text{II. 34})$$

$$\text{Rapport des débits : } \frac{Q}{Q_m} = \left(\frac{N}{N_m}\right) * \left(\frac{D}{D_m}\right)^3 \quad (\text{II. 35})$$

$$\text{Rapport des couples : } \frac{T}{T_m} = \left(\frac{N}{N_m}\right)^2 * \left(\frac{D}{D_m}\right)^5 \quad (\text{II. 36})$$

$$\text{Rapport des puissances : } \frac{P}{P_m} = \left(\frac{N}{N_m}\right)^3 * \left(\frac{D}{D_m}\right)^5 \quad (\text{II. 37})$$

II.3.13 Rendement de la turbine

Toute transformation d'énergie dans la machine donne lieu à des pertes. Il s'ensuit que la puissance obtenue à l'arbre de la turbine, et qui sert à entrainer 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 [5].

$$\eta_t = \frac{P_{\text{mec}}}{P_{\text{hyd}}} \quad (\text{II. 38})$$

III. CHAPITRE III

Étude des performances d'un cas concret de turbine de Pelton

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier et présenter des résultats obtenus grâce aux différentes formules de calcul d'une turbine de Pelton. Les calculs évoqués déterminent l'influence des paramètres à la sortie du réservoir jusqu'à la sortie de la turbine de Pelton à savoir la vitesse, les puissances, les débits, les rendements

Cette étude permet d'avoir une idée sur les performances et les paramètres pouvant les influencer tout au long de la phase de pré-production d'électricité. Ce chapitre englobe une vue générale sur la configuration étudiée, les détails de calculs de différentes formules et enfin les résultats et leurs discussions.

III. 2 Démarche d'étude

III.2.1 Choix d'une turbine Pelton

Pour notre étude nous avons décidé de choisir la plus grande centrale hydroélectrique avec les turbines de Pelton qui n'est d'autre que la centrale hydroélectrique de Bieudron dont les informations constructives sont disponibles sur le web [13]. Sa construction fut commencée en 1993, sera mise en service en automne 1998 et elle se situe en Suisse. La centrale de Bieudron détient trois records mondiaux (état en 2010) : la plus haute chute d'eau (1883 mètres), la plus grande puissance par turbine Pelton (400 MW), la plus grande puissance par pôle des alternateurs (35,7 MVA).

Elle possède les données techniques complémentaires suivantes :

- 3 vannes sphériques comme organes de fermeture, diamètre 1,4 m, poids 120 t ;
- 3 turbines Pelton à 5 jets d'une puissance nominale de 423 MW, diamètre de la roue 3 m, poids 28 t, vitesse de l'eau à la sortie des jets 600 km/h ;
- 3 alternateurs synchrones triphasés, puissance nominale 465 MVA à 428,6 min⁻¹, entièrement refroidis à l'eau, poids 800 t chacun ;
- 3 transformateurs de bloc triphasés d'une puissance nominale de 465 MVA ; rapport de transformation 21/410 Kv ;

III.2.2 Données principales de la centrale hydroélectrique Bieudron

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

Chute brute maximale : 1883 m ;

Débit d'eau nominal total : 75 m³/s ;

Débit d'eau nominal unitaire : 25 m³/s ;

Vitesse de rotation nominal : 428 tr/min ;

Diamètre primitif de la turbine Pelton : 3 m ;

Puissance nominale : 423 MW

Puissance maximale de l'installation : 1180 MW ;

III.2.3 Hypothèses

- Les pertes dans les conduites sont considérées nulles ;
- La turbine de Pelton choisie a un degré de réaction nulle donc pas de variation de la pression;
- Le fluide utilisé, évidemment, est de l'eau qui est considérée incompressible.

III.2.4 Méthode d'étude

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

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

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

La vitesse de rotation et le diamètre du jet étant donnés, nous savons calculé le débit a partie duquel on n'a tiré la vitesse du jet puis la hauteur, nous avons calculer les deux puissances ($P_{méc}$ et P_{hy}) et le rendement. Et pour finir nous avons tracer 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 ψ en fonction de φ .

- *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 diamètre de jet (D_{jet}) à partir duquel on a tiré le débit, 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 des courbes de similitudes :*

- *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 ont comme importance de tester l'efficacité et de prédire le comportement d'une turbine pour les différentes conditions d'exploitation, pour une même turbine ou pour d'autres turbines de tailles différentes mais semblables à la 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 obéissent aux conditions d'utilisation de la turbine Pelton par le biais de l'abaque du chapitre II. Pour cela nous allons d'abord calculer la vitesse de rotation spécifique :

$$v = 0,00634.nq$$

$$nq = N \cdot \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}} = 428 \cdot \frac{5}{285.85} = 7.486$$

$$v = 0.00634 \cdot 7.486 = 0.047$$

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

III.3.2 Étude des courbes caractéristiques de la turbine Pelton 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 (ψ et φ). Les calculs seront avec les conditions suivantes :

Le débit est varié de 6 à 16 m^3 /seconde.

A1- Courbe H-Q_v :

La formule suivante permet de calculer la hauteur :

$$H = \frac{v_{jet}^2}{2 \cdot g}$$

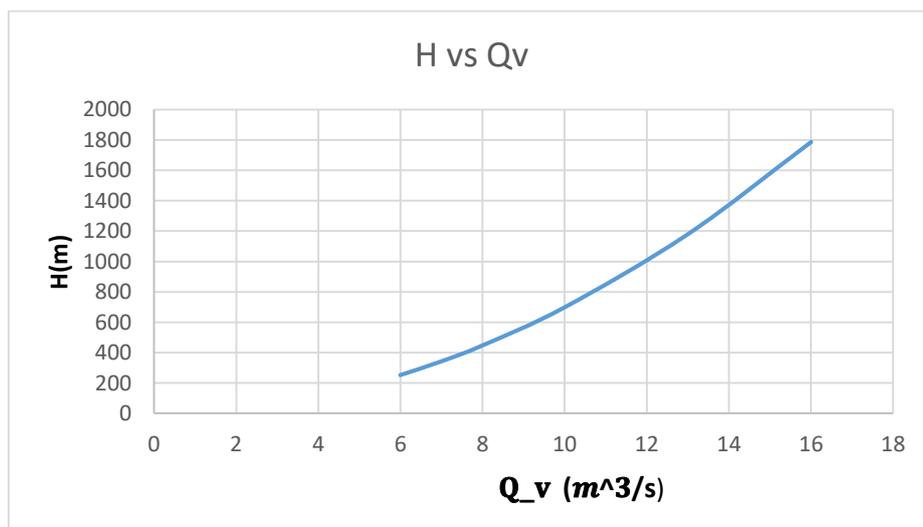


Figure III-1 Courbe de la hauteur en fonction du débit

Nous constatons une croissance de la hauteur en fonction de débit.

A2- Courbe P-Q_v :

L'expression suivante permet de calculer la puissance mécanique :

$$P_{mec} = A\rho Q_v(N_{max} - N)N;$$

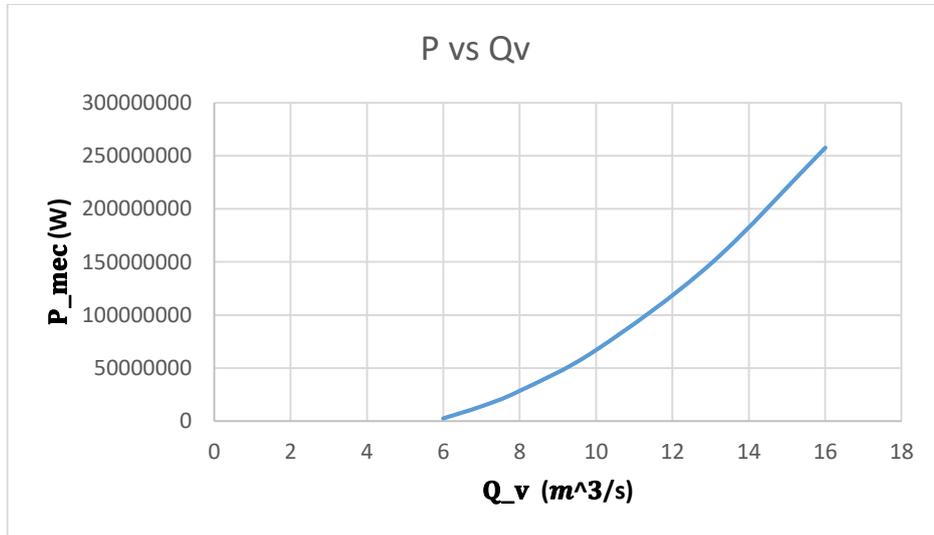


Figure III-2 Courbe de la puissance en fonction du débit

Nous constatons une hausse de la puissance avec l'augmentation du débit.

A3- Courbe η_t -Q_v :

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

$$\eta_t = \frac{P_{mec}}{P_{hyd}} ; P_{hyd} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H;$$

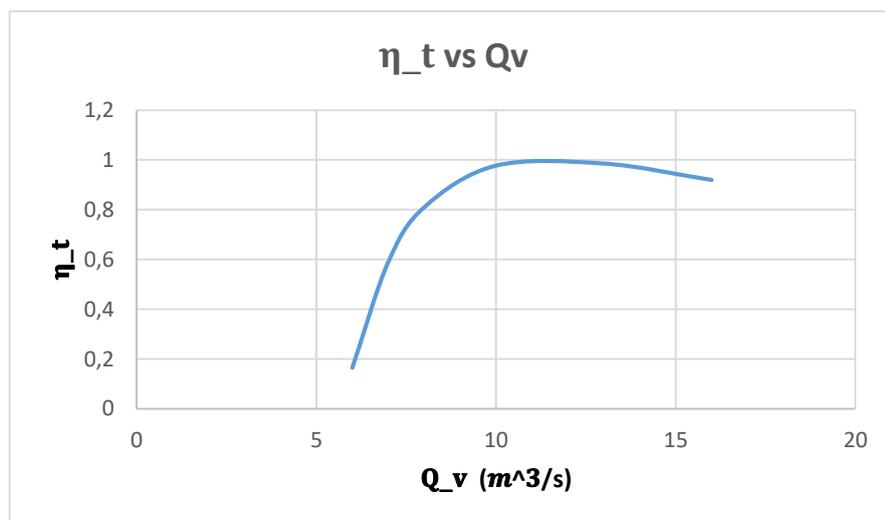


Figure III-3 Courbe du rendement en fonction du débit

Pour cette courbe, nous voyons une croissance puis une décroissance du rendement avec l'augmentation du débit.

$$\psi = \frac{8.g.H}{\omega^2.D^2} ; \varphi = \frac{8.Q}{\pi.\omega.D^3} ;$$

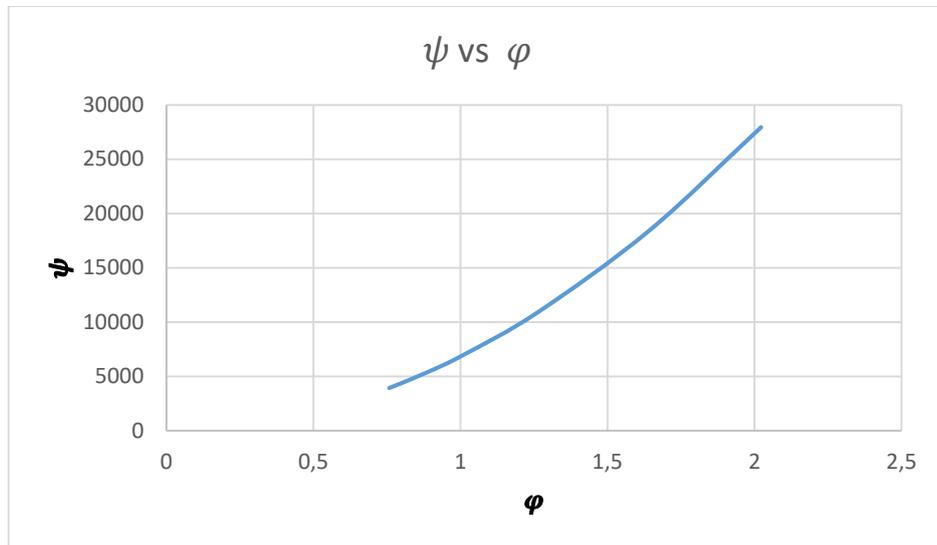


Figure III-4 Courbe de ψ en fonction de φ .

Il y'a un accroissement de ψ en fonction de φ .

Conditions extrêmes ou particulières :

η_t Max	Q_v (m^3/s)	H(m)	P(W)
0,9851	13	1178,67	148081224

Tableau III-1 Tableau des paramètres au rendement maximal.

Hv(m)	P v(W)
0	4,5

Tableau III-2 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 (Q11, T11 et N11). Les calculs seront avec les conditions suivantes :

- Le diamètre du jet est varié de 0.1 mètre à 0.33 mètre,
- La vitesse de rotation de 100 à 1200 tour/minute.

B1- Courbe Q_v -N :

Le débit est calculé par l'expression suivante

$$Q_v = \frac{V_{jet} * \pi * d_{jet}^2}{4};$$

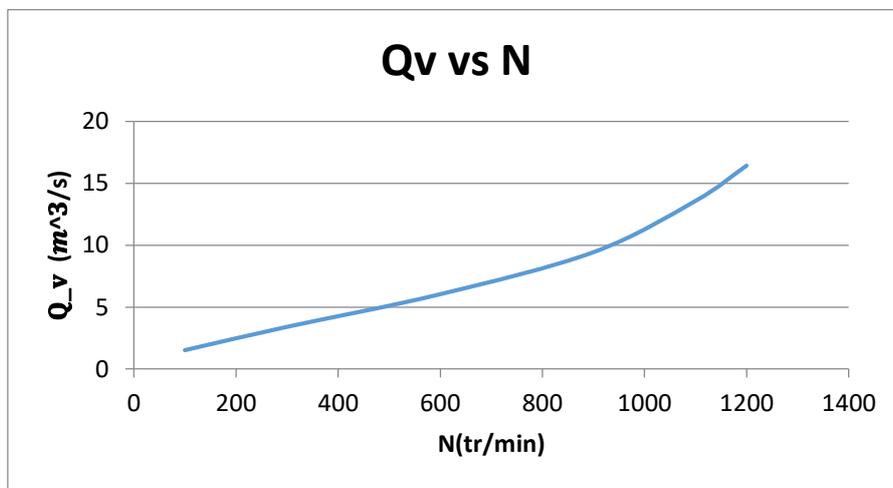


Figure III-5 Courbe du débit en fonction de la vitesse de rotation

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

B2- Courbe P_{mec} -N :

La puissance mécanique est calculée par cette formule :

$$P_{mec} = A\rho Q_v(N_{max} - N)N;$$

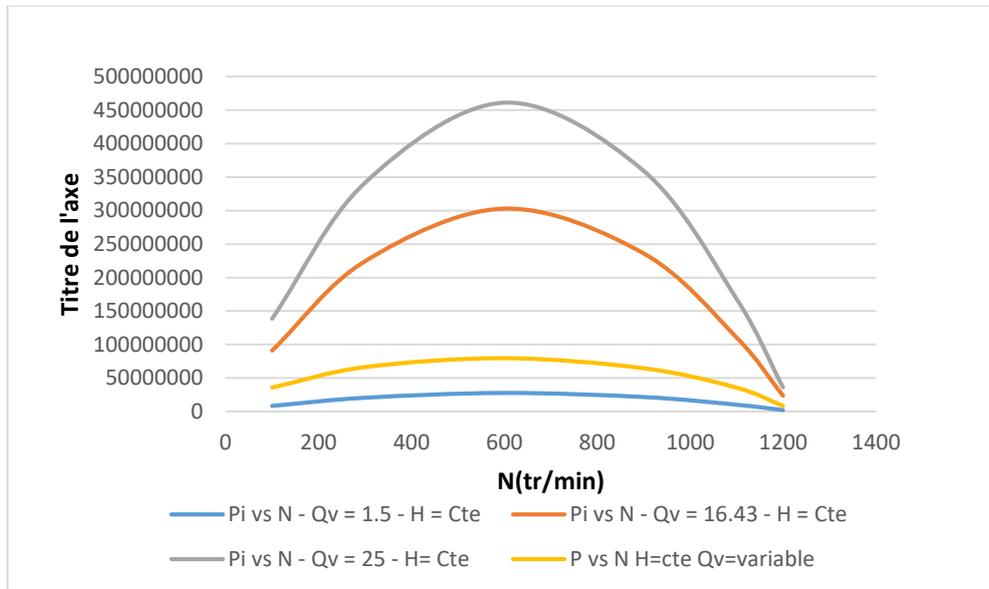


Figure III-6 Courbes des puissances a débits différents en fonction de la vitesse de rotation

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- Courben_t-N :

Le rendement et la puissance hydraulique sont calculés par les formules suivantes :

$$\eta_t = \frac{P_{mec}}{P_{hyd}} ; P_{hyd} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H;$$

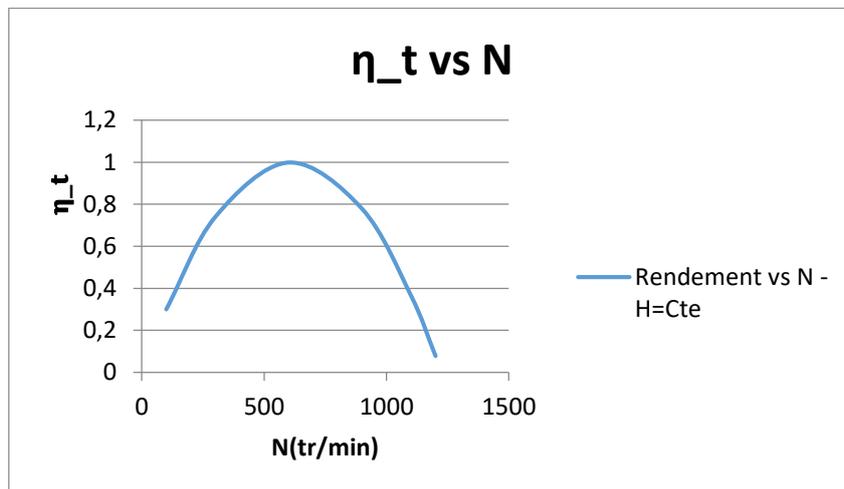


Figure III-7 Courbe du rendement en fonction de la vitesse de rotation

Nous constatons une augmentation du rendement avec l'augmentation de la vitesse de rotation jusqu'à un seuil (dans ce cas Rendement max=600 tr/min) pour ensuite rechuter.

B4- Courbe T-N :

Le couple est calculé par cette expression : $T = A' \rho Q_v (N_{\max} - N)$

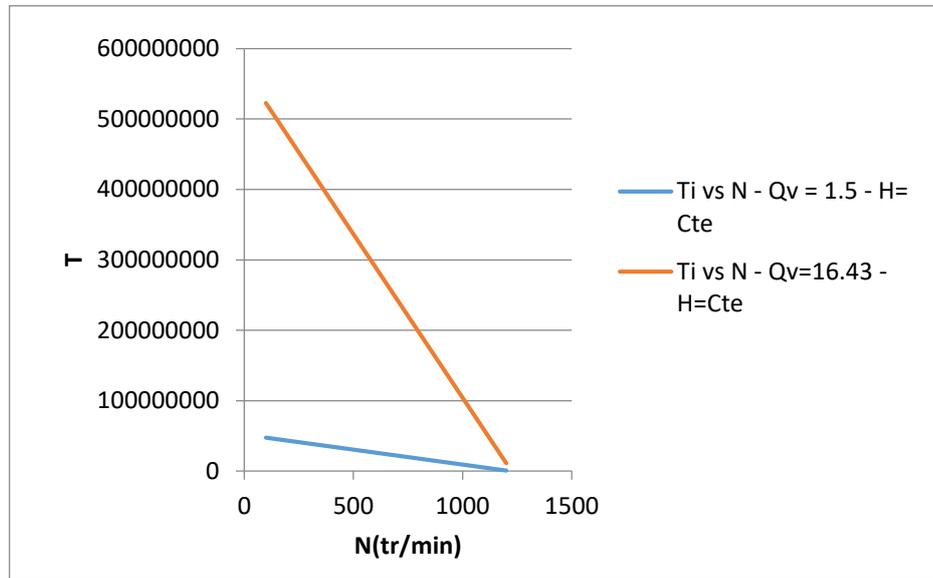


Figure III-8 Courbes des couples a différents débits en fonction de la vitesse de rotation

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 :

$$N_{11} = \frac{N.D}{\sqrt{H}}; Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{H}}$$

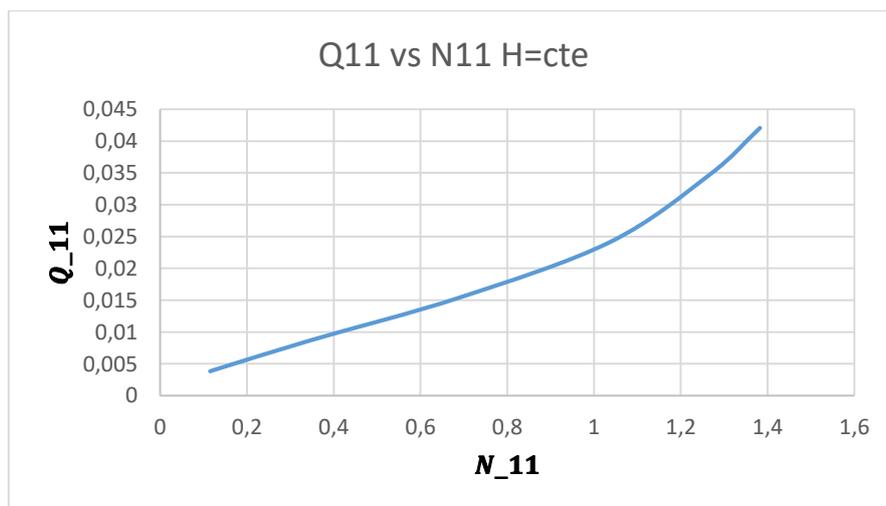


Figure III-9 Courbe du débit unitaire en fonction de la vitesse de rotation unitaire

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

B6- Courbe T_{11} - N_{11} :

Le couple et la vitesse de rotation unitaire sont calculés par les formules suivantes :

$$N_{11} = \frac{N.D}{\sqrt{H}}; T_{11} = \frac{T}{D^3.H};$$

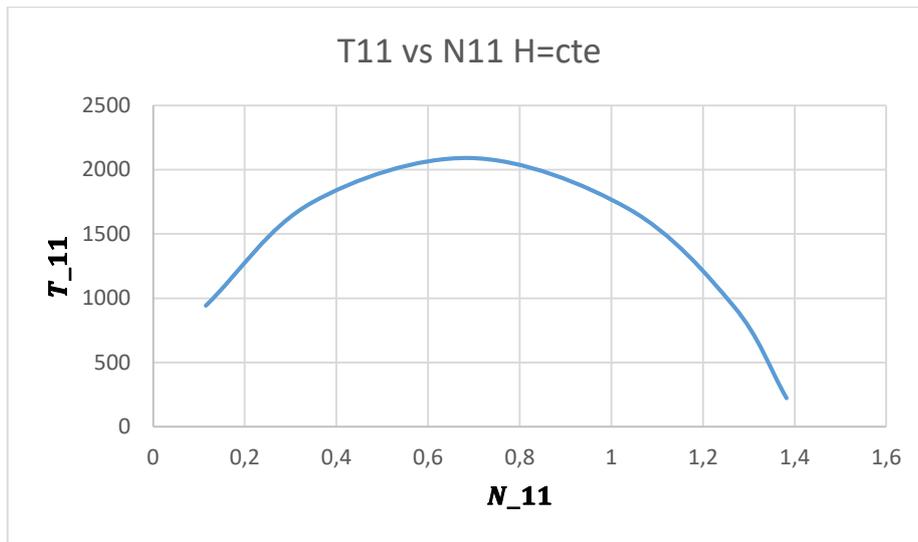


Figure III-10 Courbe du couple unitaire en fonction de la vitesse de rotation

Nous voyons une croissance du couple unitaire avec l'augmentation de la vitesse de rotation unitaire jusqu'à un seuil avant de décroître.

Conditions extrêmes ou particulières :

η_t Max	N(tr/min)	Q_v (m^3/s)	P (W)	T (Q=1,5)	T (Q=16,43)
0,9983	600	6,0353	79354668,9	26437513,5	290107648

Tableau III-3 Tableau des paramètres au rendement maximal

Q_v	T_v ($Q_v=1,25$)	T_v ($Q_v=16,43$)	P_v
0	1291,1	1180,64	1265,88

Tableau III-4 Tableau des paramètres à vide

N_e (tr/min)	$\eta_{t e}$	P_e (W)	T_e ($Q_v=1,5$)	T_e ($Q_v=16,43$)	Q_e (m^3/s)
1200	0,0776	8397134,06	1027569,77	11275865,6	16,43

Tableau III-5 Tableau des paramètres d'emballement

III.3.3 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 la similitude.

Dans ce cas nous avons fait varier la hauteur de 100 mètres à 2000 mètres.

A1- Courbe H vs Qv:

L'expression suivante permet de calculer le débit :

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{H_2}{H_1}};$$

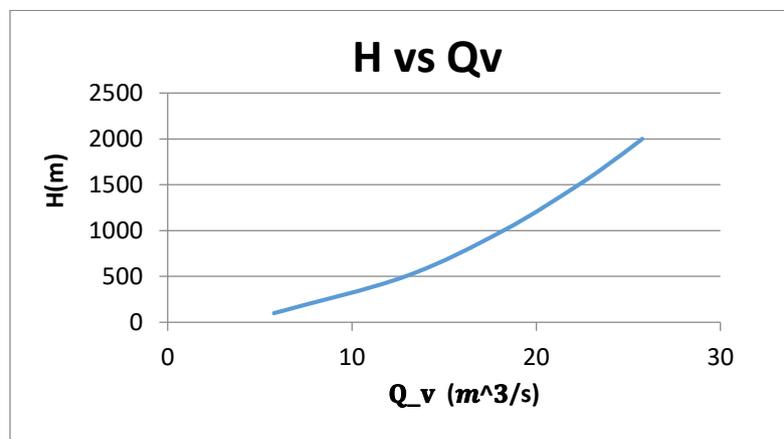


Figure III-11 Courbe de la hauteur en fonction du débit

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

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

$$P_{\text{mec}} = A\rho Q_v(N_{\text{max}} - N)N,$$

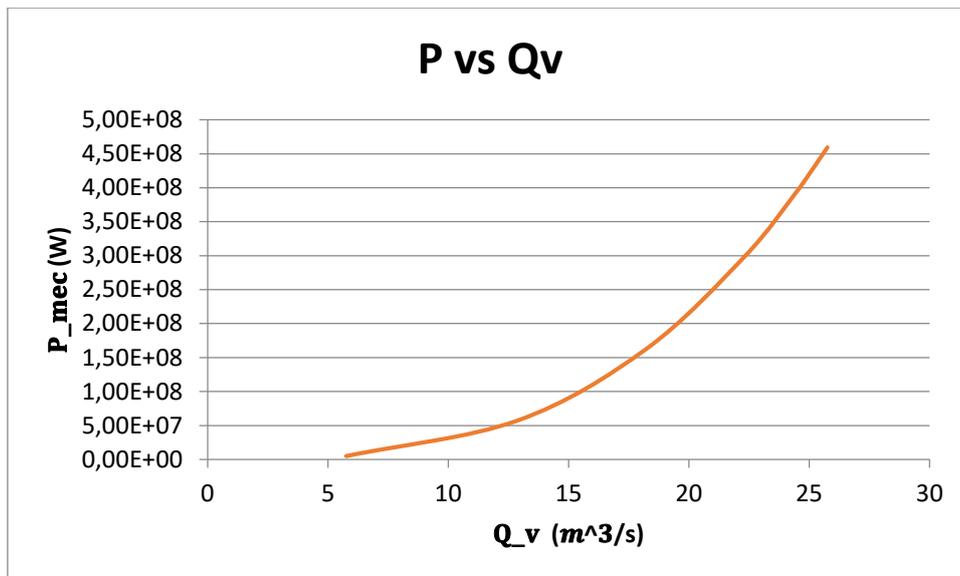


Figure III-12 Courbe de la Puissance en fonction de débit

A3- Courbe η_t vs Qv :

La puissance hydraulique et le rendement ont été calculés par :

$$\eta_t = \frac{P_{mec}}{P_{hyd}} ; P_{hyd} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H;$$

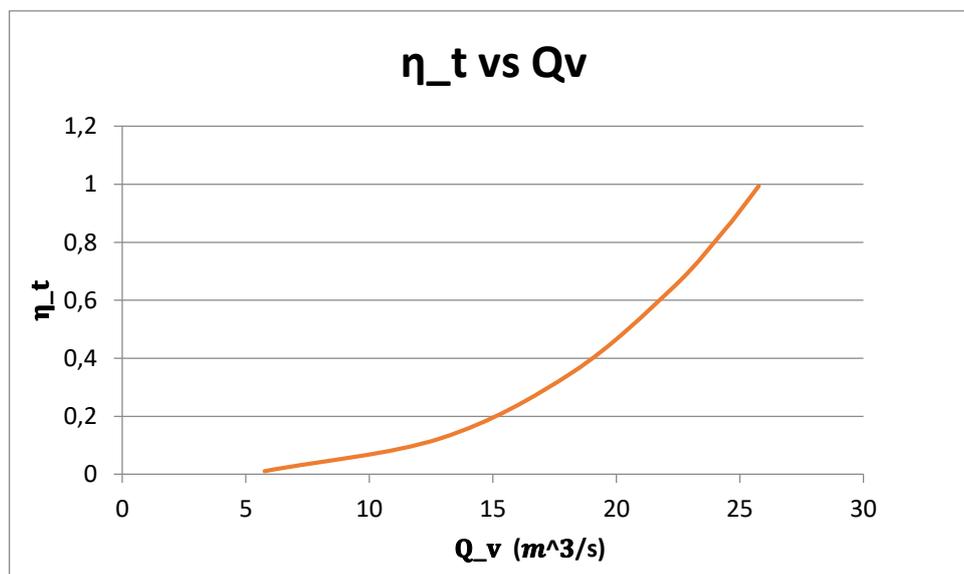


Figure III-13 Courbe du rendement en fonction de débit

Pour les **Figure III.12** et **Figure III.13**, le débit à un effet positive sur la puissance et le rendement.

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 :

$$\frac{Q}{Q_m} = \left(\frac{N}{N_m}\right) * \left(\frac{D}{D_m}\right)^3,$$

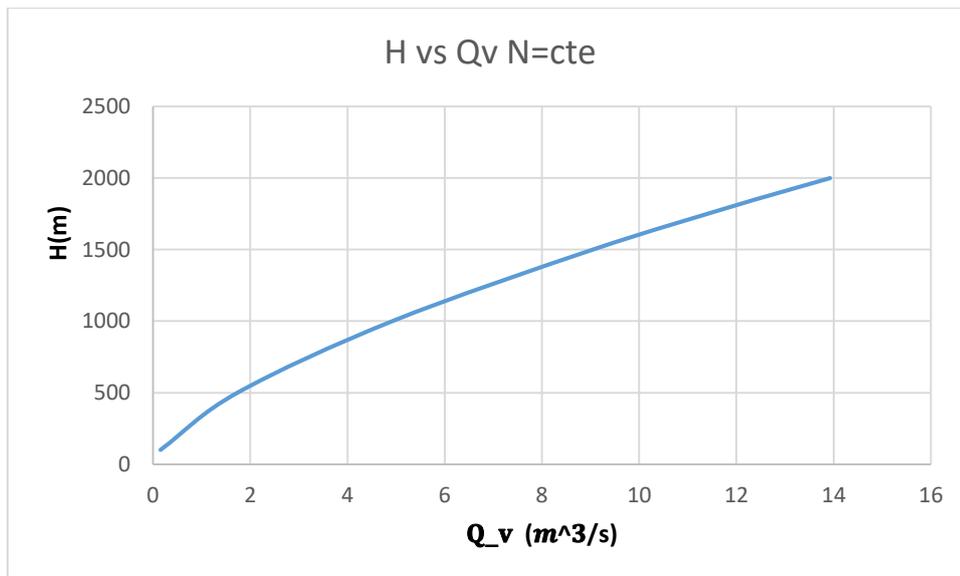


Figure III-14 Courbe de la hauteur en fonction du débit

B2- Courbe P vs Q :

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

$$\frac{P}{P_m} = \left(\frac{N}{N_m}\right)^3 * \left(\frac{D}{D_m}\right)^5,$$

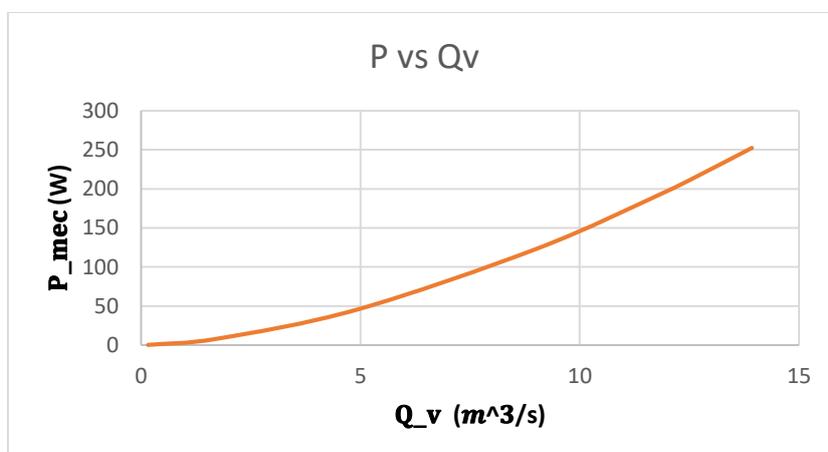


Figure III-15 Courbe de la puissance en fonction du débit

Pour les **Figure III.14** et **Figure III.15** nous constatons une hausse de la hauteur et de la puissance avec l'augmentation de la vitesse de rotation.

III.4 Bilan

Nous pouvons dire que plus le débit croit plus la hauteur augmente, et plus la vitesse de rotation augmente et tend vers la vitesse d'emballement.

La puissance augmente aussi avec la hauteur, le débit et la vitesse de rotation.

Le couple est maximum au démarrage.

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.

La turbine Pelton a pour avantages un très bon rendement sur toute la plage des débits, ainsi que sa simplicité mécanique.

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).

Le rendement garanti restera donc toujours du domaine de responsabilité du constructeur.

IV. Conclusion générale

L'énergie hydraulique est une énergie propre (elle ne produit pas de gaz à effet de serre susceptibles de provoquer de profonds changements climatiques) et renouvelable (le combustible est l'eau, eau qui n'est pas consommée lors du procédé de génération d'électricité).

Ainsi, dans le domaine énergétique des turbines, l'étude d'une turbine Pelton nous a permis de voir qu'avec son fonctionnement simple et la facilité de sa maintenance, il est possible de subvenir à un besoin en puissance électrique pour une population locale avec une turbine à petite dimension. Cette énergie renouvelable contribue au développement économique et social des zones rurales.

Cette étude a permis d'une part de mieux comprendre la conversion d'énergie cinétique de l'eau en énergie mécanique, et d'autre part l'étude complète d'une turbine hydraulique de Pelton

Au terme de cette étude nous pouvons dégager les constatations suivantes :

- La hauteur et le débit ont effet positive sur le rendement de la turbine Pelton jusqu'à un certain seuil (ce seuil dépend de la turbine choisi), au-delà de ce seuil l'effet sera négative.
- Le couple est maximum au démarrage.
- La vitesse d'emballement reste constante pour cas des courbes caractéristiques à vitesse de rotation variable.
- Pour une hauteur de chute donnée, l'augmentation de la puissance d'une turbine nécessite un accroissement correspondant du débit d'eau. Pour une machine Pelton, cela peut se faire soit en accroissant le diamètre du jet, et donc aussi les dimensions de la machine puisque le rayon de la roue doit être proportionné au diamètre du jet, soit en augmentant le nombre de jets.
- Plusieurs jets sur la roue Pelton, de façon à répartir la charge optimise les performances de la turbine ;
- Le rendement d'une turbine pourra varier de quelques pourcents entre un modèle et son exécution,
- 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).
- Le rendement garanti restera donc toujours du domaine de responsabilité du constructeur.

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.

V. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Guilhem Dellinger. Etude expérimentale et optimisation des performances hydrauliques des vis d'Archimède utilisées dans les micros centrales hydroélectriques. Construction hydraulique. Université de Strasbourg, 2015. Français.
- [2] : Mr Haddar Ryad & Mr Hail Akli : Commande indirecte en couple d'une MADA dédiée à une centrale hydro-électrique, Mémoire de fin d'étude-2018.
- [3] : Tiré du rapport complet du projet TNA Report) -Evaluation des besoins en technologies et plans d'actions technologiques pour l'atténuation des changements Climatiques – MALI : Fiche de la Technologie de centrale hydraulique, Document en ligne.
- [4] : Rasendra Fu Nam Christophe & Rakotonirina Dinarisoa : Etude d'une Micro Turbine Pelton Multi-jet, Mémoire de fin d'étude-2018.
- [5] : Pacer : Petites centrales hydrauliques (Turbines hydrauliques), Revue-1995, 134 pages.
- [6] : www.eve.eus consulté le 03/07/2021.
- [7] : La centrale électrique : le point de vue énergétique, Document en ligne.
- [8] : Ing. R. Vermeulen & Ir V. Kelner : Conception d'une turbine hydraulique de type Pelton à axe vertical, Revue Scientifique des Ingénieurs Industriels n°32, 2018.
- [9] : Turbomachines, Document en ligne.
- [10] : Mathieu Jenny : Machines à fluides – Turbomachines, document de cours-TD-2015.
- [11]: Munson, BR, Okiishi, TH, Huebash, WW. Mécanique des fluides. 7e éd. Singapour : John Wiley & Sons, 2013, pp. 694 - 702.
- [12] : Julien Leduc. Etude physique et numérique de l'écoulement dans un dispositif d'injection de turbine Pelton. Autre. Ecole Centrale de Lyon, 2010. Français.
- [13] : www.hydrelect.info consulté le 06/07/2021.