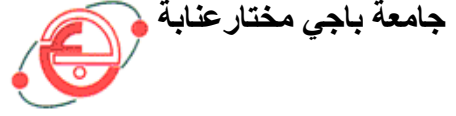


وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

**Étude des paramètres influant sur les performances
optimales d'une turbine hydraulique du type Francis**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : ÉNERGETIQUE ET ENVIRONNEMENT

PRESENTE PAR : RAMDANE TARFAYA

DIRECTEUR DU MEMOIRE : Pr. H. MZAD

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : S. AZZOUZ (MCA) Université Badji Mokhtar - Annaba

EXAMINATEURS : A. DJEMILI (MCA) Université Badji Mokhtar – Annaba

F. MECHIGHEL (MCB) Université Badji Mokhtar – Annaba

Année: 2013/2014

Remerciement

Arrivé au terme de ce travail, je suis heureux de pouvoir remercier toutes les personnes qui en ont permis ou facilité la réalisation par leur appui scientifique ou leur collaboration.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à mon directeur de mémoire, Mr. Hocine MZAD, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé ma réflexion et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches.

J'ai été également très honoré que Messieurs S. Azzouz, F. Mechiguel et A. Djemili aient accepté de faire partie du jury de thèse.

Je remercie mes très chers parents, *Omar* et *Nassima*, qui ont toujours été là pour moi, « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ».

Je remercie mes frères *Mohammed* et *Chiheb*, et mes sœurs *Hiba*, *Amina* et *Djihed* pour leur encouragement.

Je tiens à remercier tous mes amis que j'aime tant, *Hako*, *Rabeh*, *Haroune*, *Chakib*, *Redouane*, *Hichem*, *Rahim*, *Sohaib* et *Lamine* pour leur amitié, leur soutien inconditionnel et leur encouragement.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude du système hydroélectrique et la production électrique renouvelable qui présente une solution sérieuse pour le défi énergétique globale généralement et Algérien en particulier avec un grand potentiel loin d'être exploiter.

Une centrale hydroélectrique est composée de trois parties :

- ❖ Le barrage qui retient l'eau ;
- ❖ La centrale qui produit l'électricité ;
- ❖ Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique.

Ce mémoire porte sur l'étude de la centrale hydroélectrique en terme générale et d'un type particulier des turbines utilisées est celle de Francis.

Mots clés : turbine hydraulique, hélice, turbomachine, turbine Francis, centrale hydroélectrique

Abstract

This project focuses on the study of the hydroelectric system and the renewable electricity production which presents a serious solution to the global energy challenge generally and Algerian's especially with all this great potential to be further exploited.

A hydroelectric power plant is composed of three parts:

- ❖ The dam that holds water ;
- ❖ The plant that produces electricity;
- ❖ Power lines that discharge and transport electrical energy.

This thesis focuses on the study of the hydroelectric plant in general term and on a particular type of the used turbines is that of Francis.

Keywords : hydraulic turbine, propeller, turbomachine, Francis turbine, hydroelectric power plant.

ملخص

وتركز هذه الأطروحة على دراسة نظام الكهرومائية و إنتاج الكهرباء المتجددة التي تمثل حلا جدي لتحدي و مشكل الطاقة في العالم بشكل عام و في الجزائر تحديدا, خصوصا م ع الإمكانيات الكبيرة التي تتربع عليها و التي تظل بعيدة كل البعد عن الاستغلال.

تتكون محطة الطاقة الكهرومائية من ثلاثة أجزاء:

- ❖ السد و وظيفته تجميع المياه
- ❖ المحطة التي تنتج الكهرباء
- ❖ الخطوط الكهربائية التي تتمثل مهمتها في تصريف ونقل الكهرباء المنتجة.

وتركز هذه الأطروحة على دراسة محطة الطاقة الكهرومائية بشكل عام, و نوع معين من التوربينات المستخدمة و المتمثل في التوربين فرانسيس.

الكلمات الرئيسية: التوربينات الهيدروليكية, المروحة, محرك, توربين فرانسيس, محطة طاقة مائية.

Liste des tableaux

Tableau III.1 : La classification des centrales hydroélectriques	31
Tableau IV. 1 : variation de la pression atmosphérique	86
Tableau IV. 2 : variation de la pression de dégagement de vapeur	86
Tableau IV. 3 : Rapport vitesse d’emballement /vitesse nominale	88
Tableau IV. 4 : Rapport débit d’emballement / débit nominal	88

Liste des figures

Figure I.1 : Organigramme de classification de l'électricité.....	9
Figure I.2 : Forces générées par deux atomes chargés.....	12
Figure II.1 : Barrage de Trois-Gorges-Chine.....	21
Figure II.2 : Barrage d'Itaipu- Brésil /Paraguay	21
Figure II.3 : Barrage Grand Inga- Congo.....	22
Figure II.4 : Principaux producteurs de l'hydroélectricité dans le monde par zone géographique en 2011	22
Figure II.5 : Part de l'électricité produite par l'énergie hydraulique	23
Figure II.6 : Production de l'électricité- hydroélectricité (% de la production totale), Algérie.....	24
Figure II.7 : L'aménagement De l'oued Agrioun.....	25
Figure II.8 : Centrale hydroélectrique en Algérie	26
Figure II.9 : Production d'énergie hydraulique de 1947 à 1953-Algérie.....	26
Figure II.10 : Proportions d'énergie hydraulique et thermique de 1947 à 1953- Algérie	27
Figure III.1 : Constituants d'une centrale hydroélectrique.....	31
Figure III.2 : Centrale hydroélectrique	32
Figure III.3 : Transformation de l'énergie cinétique de l'eau par une turbine en énergie mécanique.....	33
Figure III.4 : Schéma d'une turbine à action avec ses paramètres de fonctionnement	34

Figure III.5 : Turbine Francis à axe horizontal.....	35
Figure III.6 : Vue schématique d'une turbine à réaction de type Kaplan.....	36
Figure III.7 : Vue schématique d'une turbine à action de type Pelton	37
Figure III.8 : Domaine d'utilisation des différents types de turbines (chutes nettes, débits, puissances)	38
Figure III.9 : Résumé des principaux types de turbines à action	40
Figure III.10 : Résumé des principaux types de turbines à réaction	41
Figure III.11 : Forme des courbes de rendement de différentes turbines pour des débits variables	42
Figure III.12 : turbine hydraulique	44
Figure III.13 : Composants et profil en long d'une petite centrale hydraulique.....	46
Figure III.14 : Ligne d'énergie (ou ligne de charge) d'une petite centrale hydraulique	49
Figure III.15 : Paramètre pour le calcul de la puissance hydraulique d'une turbine	51
Figure III.16 : Forces, couple, vitesse de rotation et puissance mécanique d'une turbine	53
Figure III.17 : Alternateur électrique.....	54
Figure III.18 : Composants d'alternateur électrique.....	55
Figure III.19 : Principe de fonctionnement de l'alternateur	56
Figure III.20 : Bloc fonctionnel d'un Alternateur	57
Figure III.21 : Groupe Turbo-alternateur	59
Figure III.22 : Centrale Hydroélectrique de basse chute	60
Figure III.23 : Centrale Hydroélectrique de moyenne chute	61
Figure III.24 : Centrale Hydroélectrique de haute chute	61
Figure IV.1 – Rendements des divers types de turbines	65

Figure IV.2 : Turbine Francis à axe horizontal : centrale de Vianden (Luxembourg).....	66
Figure IV.3: Composantes d'une turbine de type Francis.	68
Figure IV.4 : Turbine Francis.....	69
Figure IV.5: Colline de rendement d'une turbine Francis	70
Figure IV.6: Vitesses d'écoulement : décomposition cylindrique et triangles de vitesse à l'entrée et à la sortie d'une aube de turbine Francis.....	72
Figure IV.7: Triangles de vitesses à la sortie d'une roue de turbine Francis à différents régimes	73
Figure IV.8 : Hauteur d'aspiration H_s pour différents types de turbines	75
Figure IV.9.a: Phénomène de cavitation sur un aubage de turbine.....	78
Figure IV.9.b : Dégâts par cavitation sur des roues de pompes et de turbines	79
Figure IV.10 : Représentation d'une torche de cavitation à la sortie d'une turbine Francis et répartition des vitesses et pressions absolues à la sortie de la roue.....	82
Figure IV.11: Pressions utiles pour le calcul de la hauteur d'aspiration limite d'une turbine à réaction ou d'une pompe	85
Figure IV.12.a : Chute nette et hauteur d'aspiration pour différents types de turbines	90
Figure IV.12.b : Coefficient de cavitation des turbines à réactions.....	92
Figure IV.12.c : Exemples de turbines basse chute et leurs implantation	94
Figure V.1: Passe à poisson avec turbinage d'un débit d'attrait	99
Figure V.2 : Chute nette et hauteur d'aspiration pour différents types de turbines	102
Figure V.3 : Abaque de sélection de différents types de turbines.....	104

<i>Symbole</i>	<i>Description</i>	<i>Unité</i>
H_s	Hauteur d'aspiration	m
E	Énergie hydraulique massique absorbée	J/Kg
Q	Débit volumique	m^3/s
R	Rayon de la roue	m
C_a	Composante axiale de la vitesse absolue	m/s
C_r	Composante radiale de la vitesse absolue	m/s
C_u	Composante périphérique de la vitesse absolue	m/s
C_m	Composante méridienne de la vitesse absolue	m/s
T	Couple	$N.m$
g	Accélération de la pesanteur	$N.m$
U	Vitesse périphérique	m/s^2
P_{hyd}	Puissance hydraulique	m/s
P_{mec}	Puissance mécanique	W
W	Vitesse relative	W
P	Pression	Pa
T	Température	K
F	Forces volumiques	N
L	Dimension caractéristique	m

Symboles grecs

α	Angle découlement absolue	<i>rad</i>
β	Angle d'écoulement relatif	<i>rad</i>
ω	Vitesse angulaire	<i>rad/s</i>
γ	Angle d'ouverture de distributeur	°
η	Rendement hydraulique	%
Ψ	Coefficient de charge	-
ϕ	Coefficient de débit	-
v_s	Vitesse spécifique	-
ρ	Masse volumique	<i>Kg/m³</i>

Sommaire

Introduction générale

I. L'électricité

I.1 Introduction.....	7
I.2 Historique.....	8
I.3 Intérêt et définition.....	10
I.4 Moyens de production.....	11
I.5 Nature de l'électricité.....	12
I.6 Stockage de l'électricité.....	13

II. L'hydroélectricité

II.1 Introduction	16
II.2 Avantages de la production	17
II.3 Réhabilitation.....	18
II.4 Développement.....	19
II.5 L'hydroélectricité dans le monde	20

III. La centrale hydraulique

III.1 Introduction	31
III.2 La turbine hydraulique	32

III.2.1 Définition.....	32
III.2.2 Différents types des turbines hydrauliques.....	34
III.3 Composants d'une turbine hydraulique.....	36
III.3.1 Exemple d'une turbine à réaction de type Kaplan.....	36
III.3.2 Exemple d'une turbine à action de type Pelton	37
III.4 Classification des turbines hydrauliques	38
III.4.1 Classification des turbines – débit et hauteur de chute.....	38
III.4.2 Classification des turbines – vitesse spécifiques	38
III.5 Paramètres commun à tous les types de turbines	44
III.5.1 Composants, profil en long et ligne d'énergie d'une petite centrale hydraulique	45
III.5.2 Puissance hydraulique d'une turbine	50
III.5.3 Couple, vitesse de rotation, puissance mécanique et rendement d'une turbine	52
III.6 L'alternateur	54
III.6.1 Définition.....	54
III.6.2 Intérêt.....	54
III.6.3 Principaux constituants d'un alternateur	55
III.6.4 principes de fonctionnement.....	55
III.7 groupe Turbine – Alternateur (turbo-alternateur)	57
III.8 types des centrales hydroélectriques	59
III.8.1 Centrale hydroélectrique de basse chute	60
III.8.2 Centrale hydroélectrique de moyenne chute	60
III.8.3 Centrale hydroélectrique de haute chute	61

IV. La turbine Francis

IV.1 introduction	64
IV.2 Description de la turbine Francis	65
IV.2.1 Principe de fonctionnement.....	65
IV.2.2 Éléments de construction.....	67
IV.2.3 Paramètres de fonctionnement	69
IV.2.4 Coefficients adimensionnels.....	70
IV.2.5 Écoulement d'une turbine à réaction.....	71
IV.3 Implantation d'une turbine à réaction	74
IV.3.1 Hauteur d'aspiration	74
IV.3.2 hauteur d'aspiration et cavitation	76
IV.3.3 Torche de vapeur	80
IV.3.4 Calcul de la hauteur d'aspiration limite d'une turbine à réaction	83
IV.4 vitesse et débit d'emballage d'une turbine à réaction.....	87
IV.5 Sélection d'un ou plusieurs types de turbines (implantation de la turbine).....	89

V. Étude de cas

V.1 Description	97
V.2 Données du projet.....	97
V.3 But de l'étude	100
V.4 Sélection et caractéristique de la turbine	100

Conclusion

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le contrôle des ressources énergétiques telles que le charbon, le pétrole, le gaz et le nucléaire qui ne date que d'un siècle environ a contribué à élever considérablement le niveau de vie des populations et particulièrement celui de celles des pays développés.

D'ici l'an 2025, la population mondiale va basculer de 6,7 à 8 milliards d'êtres humains. La consommation d'énergie primaire passera de 12 Gtep¹ à 17 Gtep. Les réserves d'énergie fossile sont estimées à 50 ans pour le pétrole, 60 ans pour le gaz et l'uranium et 150 ans pour le charbon. Les émissions de gaz à effet de serre (GES) vont passer de 27 à 42 Gt.équ.CO₂. La planète sera confrontée à une menace énergétique double, le manque de réserves suffisantes et sûres à des prix convenables d'une part, celle de nuire à l'environnement (aggravation de l'effet de serre) par consommation exagérée d'autre part. Le climat et l'énergie sont intimement liés et les enjeux sont universels. Selon les expertises du Groupement d'experts intergouvernemental pour l'étude du climat (Giec), le protocole de Kyoto, signé en 1997, impose à 159 pays industrialisés de réduire leurs émissions de GES d'ici à 2012. En décembre 2008, l'Union européenne a signé l'engagement des trois 20 en 2020 : 20 % d'énergies renouvelables, 20 % de GES en moins, 20 % d'efficacité énergétique en plus, et 10 % de biocarburants.

¹La tonne d'équivalent pétrole (symbole TEP) est une unité d'énergie. Elle est notamment utilisée dans l'industrie et l'économie. Elle vaut, selon les conventions, 41,868 GJ parfois arrondi à 42 GJ, ce qui correspond au pouvoir calorifique d'une tonne de pétrole "moyenne". Cette unité a remplacé, de fait, la tonne équivalent charbon. Elle ne fait pas partie du système international d'unités où l'énergie s'exprime en joule²

La production d'électricité renouvelable (incluant la production des centrales de pompage-turbinage) a atteint 4699,2 TWh en 2012 dans le monde, franchissant nettement le seuil des 20% de la production d'électricité mondiale (20,8 %). Les combustibles fossiles demeurent le noyau dur de la production d'électricité mondiale avec plus des deux tiers du total (68,1% en 2012), et un peu plus d'un électron sur dix (10,9%) est d'origine nucléaire. Les 0,2% restants sont apportés par la combustion des déchets qualifiés de non renouvelables.

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.

Le potentiel hydroélectrique total de la planète serait d'environ 15 000 TWh, soit trois fois plus que le niveau d'exploitation actuel. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2009 était de 3,214 TW (selon EDF²).

Hydroélectricité ou énergie hydraulique représenterait 19% de la production totale d'électricité dans le monde en 2009. Par exemple, le barrage chinois des Trois-Gorges produit nettement plus que tous les barrages français réunis.

Pour 5 des 10 premières producteurs d'énergie hydrauliques, l'hydraulique représente plus de la moitié de leur électricité (Norvège, Brésil, Venezuela, Canada, Suède).

À la lumière de ces données, l'hydroélectricité présente une solution sérieuse pour le défi énergétique. Malgré le fort potentiel Algérien (doté de 50 barrages en exploitation, 11 sont en cours de réalisation et 50 autres barrages à l'étude), la production hydroélectrique reste toujours faible avec une production annuelle de sa meilleure valeur de 389 GWh qui présente un maigre 0,7% de la production nationale d'électricité et 0,0106% de la production hydroélectrique mondiale.

Le cadre principale étudié dans ce travail est celui de convertir l'énergie (cinétique) de l'eau en énergie mécanique, ce qui permettra la production d'une énergie électrique verte, moins chers et durable.

² EDF : Électricité de France

Le présent mémoire est structuré comme suit : un premier chapitre qui décrit l'énergie électrique en général : l'importance, l'historique et les moyens de production ainsi que la possibilité de stockage. Dans le deuxième chapitre, on s'intéresse à l'hydroélectricité, ses avantages et les efforts de développement de ce domaine. Le chapitre trois s'intéresse à une centrale hydroélectrique, principaux constituants, types et classification. Dans le quatrième chapitre, une description de la turbine Francis, paramètres de fonctionnement et implantation. Le cinquième et dernier chapitre présente une étude de cas d'une grande centrale hydroélectrique de grande puissance et le choix de la turbine adapté aux données.

I.1 Introduction

Toute activité, toute action ou fonction, humaine ou non humaine a besoin d'énergie pour réaliser son objectif. A chaque fois que quelque chose est fait on a besoin d'énergie, car l'énergie est la cause de toute action, en son absence rien ne peut se faire. Pour se chauffer, pour courir, pour manger on a besoin de consommer de l'énergie. On l'utilise aussi pour s'éclairer, faire fonctionner des appareils ou des machines etc. C'est grâce à elle que tous les organismes vivants peuvent se développer aussi.

“Énergie” vient du mot grec “energeia” qui signifie “force en action”. Elle est la capacité d'exercer une force et de produire quelque chose.

Selon Einstein, l'énergie se transforme, on ne peut ni la créer ni la détruire. L'énergie est partout dans la nature depuis la création de notre planète. Elle se manifeste de différentes manières : chaleur, lumière du soleil, force de l'eau ou du vent, etc.

Notre principale source d'énergie c'est le soleil qui fournit une partie de son énergie sous forme de lumière et de chaleur.

Les énergies qui disparaissent quand on les utilise sont des énergies non renouvelables comme le pétrole. Elles sont constituées de substances qui mettent des millions d'années à se reconstituer. Les énergies qui sont presque inépuisables sont celles renouvelables comme le soleil. Mais certaines énergies peuvent disparaître aussi si on ne les protège pas.

Il existe deux grands types d'énergies non renouvelables :

- l'énergie nucléaire qui est produite à partir d'un minerai appelé uranium. La fission des atomes d'uranium libère une très grande quantité d'énergie dont on se sert pour chauffer de l'eau permettant de produire de l'électricité ;
- les énergies fossiles qui sont le charbon, le pétrole et le gaz naturel proviennent de la décomposition de végétaux et d'organismes vivants qui ont été enfouis sous la terre. Les ressources diminuent quand on les utilise car il leur faut longtemps pour se reconstituer.

Les sources d'énergies renouvelables qui nous entourent sont innombrables, sur la terre ou en dessous. Le soleil en est la plus importante car il nous éclaire, nous réchauffe et contribue au développement naturel ou technique comme l'utilisation de sa chaleur pour créer de l'électricité. L'eau, comme le soleil, est indispensable à la vie. La force créée par les courants des rivières ou des chutes d'eau est exploitée pour faire tourner la roue d'un moulin qui est utilisée pour faire tourner des turbines qui produisent de l'électricité. La force du vent permet aussi de faire tourner les ailes des moulins à vent pour pomper de l'eau ou moudre du grain et fait tourner des éoliennes qui permettent de produire de l'électricité.

Les matières organiques végétales ou animales sont utilisées pour produire de la chaleur. On appelle cette énergie la biomasse. C'est la deuxième énergie renouvelable de notre planète. La combustion du bois est la plus ancienne des utilisations de cette énergie : dès la préhistoire les hommes ont appris à utiliser le feu pour s'éclairer, se chauffer et cuire les aliments.

I.2 Historique

Électricité est un mot provenant du grec « ἤλεκτρον » êlektron signifiant ambre jaune. Les anciens Grecs avaient découvert qu'en frottant l'ambre jaune, celui-ci produisait une attirance sur d'autres objets et, parfois des étincelles. Ils ont donc appelé cette force électricité.

L'électricité est la grande découverte dans l'histoire de l'humanité. On la trouve partout, de la médecine jusqu'au l'art, dans la maison et dans la rue, pour communiquer et pour le transport, dans le domaine du loisir et même temps dans la sécurité. Elle est un élément majeur dans notre vie. Ça c'est pour le côté consommation, le côté production c'est une autre chose.

Alessandro Volta inventa la pile électrique en 1799 et en 1868 le belge Zénobe Gramme réalise la première dynamo. En 1879 Thomas Edison présente sa première ampoule électrique à incandescence, une centrale hydraulique de 7 kW est construite la même année à Saint-Moritz, puis, en 1883, Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs créent la première ligne électrique. En 1889, une ligne de 14 kilomètres est construite dans la Creuse, entre la Cascade des Jarrauds lieu de production et la ville de Bourgneuf.

L'électricité se développe alors progressivement pendant le vingtième siècle, d'abord dans l'industrie, l'éclairage public et le chemin de fer avant d'entrer dans les foyers. Différents moyens de production de l'électricité se développent : Centrales hydraulique, thermique, éolien, puis nucléaire, etc.

Comment se fait la production de l'électricité ? Pour créer un petit circuit électrique on force les électrons des atomes à se déplacer d'un point à un autre. Pour créer une grosse quantité d'électricité c'est le même fonctionnement que le petit circuit électrique. Simplement, il est reproduit à très grande échelle. On utilise une source d'énergie qui peut être de l'eau, de la vapeur ou un gaz. Cette énergie fait tourner une énorme turbine qui est reliée à un alternateur. L'alternateur agit comme un aimant et il attire les électrons, ce qui les oblige à se déplacer (les électrons portent des charges électriques négatives). Et le déplacement des électrons génère le courant électrique.

L'électricité est la même, mais les moyens de productions diffèrent. Cette différence est reliée au type d'énergie utilisé pour faire tourner la turbine. L'homme a utilisé plusieurs sources d'énergies pour faire tourner la turbine, on peut les classer en deux grandes familles :

- Énergie non renouvelable ;
- Énergie renouvelable.

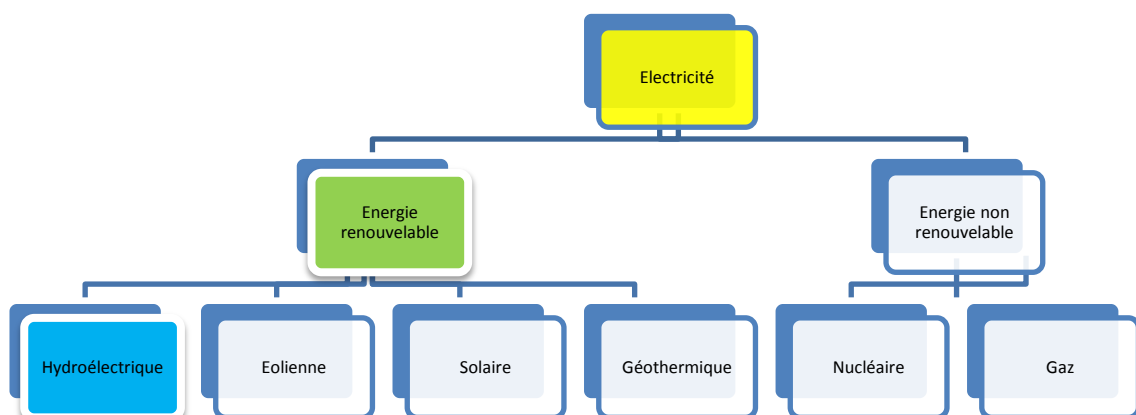


Figure I.1 : Organigramme de classification de l'électricité

I.3 Intérêt et définition

L'électricité occupe une place importante dans la vie de l'humanité et primordiale dans son quotidien. Elle est indispensable, à tel point qu'on ne pourrait plus s'en passer. Elle est vieille comme le monde, mais cela fait à peine 200 ans que l'homme a réussi à la maîtriser. On l'appelle la fée électricité¹ parce que cette magicienne a transformé notre vie de tous les jours. Et lorsqu'elle vient à manquer, on réalise alors à quel point elle nous rend service.

L'électricité n'a pas été inventée c'est un phénomène naturel, que les hommes ont peu à peu découvert et maîtrisé.

L'électricité est un phénomène physique dû aux différentes charges électriques de la matière, se manifestant par une énergie. L'électricité désigne également la branche de la physique qui étudie les phénomènes électriques et leurs applications. Pour les scientifiques, l'électricité est très liée au magnétisme, ils ont donc créé une discipline, l'électromagnétisme, qui regroupe l'étude des phénomènes électriques et magnétiques.

A partir du XVII^{ème} siècle, avec l'essor de la science, des savants de différents pays ont cherché à comprendre des phénomènes qu'ils avaient observés. Galvani et Volta en Italie, l'Abbé Nollet puis Arago et Ampère en France, Benjamin Franklin aux États-Unis, d'autres encore en Allemagne, au Danemark échangent le résultat de leurs expériences et contribuent à la construction d'un savoir technique et scientifique sur l'électricité.

C'est au cours du XIX^{ème} siècle que les propriétés de l'électricité ont commencées à être comprises. Sa maîtrise a permis l'avènement de la seconde révolution industrielle. Aujourd'hui l'énergie électrique est omniprésente dans les pays développés : à partir de différentes sources d'énergie (hydraulique, thermique, nucléaire, etc.) l'électricité est de nos jours un vecteur énergétique employé à de très nombreux usages domestiques ou industriels.

¹ La Fée électricité est une immense fresque réalisée en 1937 par le peintre Raoul Dufy. Cette œuvre spectaculaire retrace l'histoire de l'électricité de l'Antiquité au 20^{ème} siècle.

I.4 Moyens de production

L'électricité représente environ un tiers de l'énergie consommée dans le monde. L'électrotechnique est la science des applications domestiques et industrielles (production, transformation, transport, distribution et utilisation) de l'électricité.

La méthode la plus courante pour produire de grandes quantités d'électricité est d'utiliser un générateur, convertissant une énergie mécanique en une tension alternative. Cette énergie d'origine mécanique est la plupart du temps obtenue à partir d'une source de chaleur, issue elle-même d'une énergie primaire, telle que les énergies fossiles comme le pétrole, nucléaires ou une énergie renouvelable, l'énergie solaire. On peut également directement utiliser une énergie mécanique, comme l'énergie hydraulique ou l'énergie éolienne. Bien évidemment la source n'est pas forcément mécanique, exemple les piles ou les panneaux solaires.

Il existe plusieurs moyens qui fonctionnent tous à partir du déplacement des électrons. La seule différence c'est l'énergie utilisée, renouvelable ou non.

- La centrale thermique à flamme utilise la force de la vapeur dégagée en brûlant des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) ou de la biomasse (déchets végétaux ou ménagers) ;
- La centrale thermique nucléaire utilise le procédé de fission des atomes d'uranium. Cela produit de la chaleur qui se transforme ensuite en vapeur et fait tourner la turbine ;
- La centrale hydraulique utilise la force de l'eau créée par un puissant déplacement. Il peut s'agir d'une chute d'eau naturelle, de l'eau stockée dans un barrage, des mouvements de la marée ou des courants marins ;
- La centrale géothermique utilise l'eau qui est chauffée par la chaleur de la Terre ou la vapeur qui s'en dégage. Ce procédé s'appelle la géothermie ;
- Les éoliennes utilisent la force du vent qui actionne leurs hélices ;

- Les panneaux solaires, appelés panneaux photovoltaïques, produisent de l'électricité grâce au soleil. C'est un moyen pratique pour alimenter des lieux isolés non raccordés au réseau électrique ;
- La biomasse est une énergie constituée de matières organiques végétales ou animales (déchets ménagers ou agricoles). Sa combustion permet de produire de l'électricité.

I.5 Nature de l'électricité

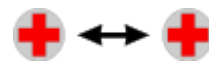
C'est le mouvement des charges électriques de la matière qui est à l'origine de l'électricité. Comme la masse, la charge électrique (propriété intrinsèque de la matière) permet d'expliquer l'origine de certains phénomènes. Si personne n'a jamais observé directement une charge électrique, les scientifiques remarquent des similitudes de comportement de certaines particules : ils en déduisent que ces particules partagent des caractéristiques communes, dont les propriétés coïncident avec leurs observations.

Contrairement à la masse, deux types de charges électriques se comportent comme si elles étaient « opposées » l'une à l'autre : Par convention, l'une est dite « positive » et l'autre « négative ». Un atome possède une charge positive lorsque le nombre de protons est supérieur au nombre d'électrons.

Des charges, égales, de natures opposées s'annulent : une particule qui possède autant de charges positives que négatives se comporte comme si elle n'en possédait aucune. On dit qu'elle est « électriquement neutre ».



a) Deux charges de nature opposée s'attirent



b) Deux charges de même nature (ici deux charges positives) se repoussent

Figure I.2 : Forces générées par deux atomes chargés

I.6 Stockage de l'électricité

Des moyens de stockage sont aussi utilisés, comme les stocks de charbon ou de gaz sur le site des centrales électriques. Le moyen principal de stockage de l'électricité est les barrages hydroélectriques, en particulier ceux des centrales de pompage-turbinage.

L'énergie hydroélectrique est aujourd'hui la plus puissante des énergies renouvelables car elle permet de produire environ 20% de l'électricité consommée dans le monde. La productivité d'une turbine de barrage est d'environ $30W/m^3$, sachant qu'à régime normal, un barrage laisse passer $140 m^3$ d'eau par seconde. On en déduit qu'une turbine peut délivrer environ $15,5 MWh$ par seconde. L'inconvénient des barrages hydroélectriques est leur construction qui implique la réduction de la surface des terres habitables par l'inondation de vallées, qui est d'impact environnemental.

Table des matières

I.1 Introduction.....	7
I.2 Historique.....	8
I.3 Intérêt et définition.....	10
I.4 Moyens de production.....	11
I.5 Nature de l'électricité.....	12
I.6 Stockage de l'électricité.....	13

II.1 Introduction

L'utilisation de la force hydraulique dans le domaine de la production d'électricité était depuis longtemps majoritaire. Après la seconde guerre mondiale les avantages financiers liés au bas prix des matières fossiles, les hauts coûts d'installation des ouvrages hydrauliques ainsi que l'avènement du nucléaire qui reléguèrent cette source de production d'énergie au second plan. La crise pétrolière de 1973 ainsi que l'hostilité croissante du public envers les centrales thermiques et nucléaires ont petit à petit influencé le contexte de la production électrique.

Compte tenu des évolutions prévisibles, la consommation mondiale d'énergie devrait tripler d'ici à la seconde moitié de ce siècle. Comment relever un tel défi ? Ce fait, nous disposons de trois sources pour couvrir ces besoins futurs : les combustibles fossiles, la force nucléaire et les agents renouvelables. Les parts prises par chacune d'elles dépendront de leurs réserves respectives, mais aussi de leurs coûts et des limites imposées par la protection de l'environnement.

Les potentiels solaire et éolien sont considérables, Malgré un effort de développement gigantesque, leur part restera encore modeste. La production mondiale atteint aujourd'hui 2500 térawattheures par an, représentant 6% de son potentiel théorique qui est de 40 000 térawattheures par an. Bien que le potentiel hydraulique soit très loin d'être exploité, en particulier dans les pays semi- ou non industrialisés et en voie de développement.

L'hydroélectricité est la plus importante et la plus économique des énergies renouvelables. Elle offre une densité de puissance élevée (kilowatt par kilogramme d'installation), un très bon rendement de transformation et un excellent facteur de rendement (nombre de kilowattheures produits pendant la durée de vie en comparaison de l'énergie investie dans la construction de l'installation). Aussi elle est favorable à la protection de l'environnement, car elle ne produit pas de gaz à effet et de serre, susceptibles de provoquer de profonds changements climatiques. La technologie actuelle repose sur un siècle de développement continu. Elle peut être mise en œuvre sans problème dans l'ensemble des pays en voie de développement et d'industrialisation. Le coût du kilowattheure ne dépend pas, comme pour les énergies fossiles, des prix des combustibles, soumis

aux fluctuations du marché mondial. L'hydroélectricité est donc un facteur d'indépendance énergétique pour le pays qui l'exploite.

D'après ce contexte, il est bien clair que l'hydroélectricité est l'une des ressources énergétiques propre les plus importantes et les plus prometteuses dans le monde, d'où la nécessité et l'exigence d'améliorer le design de ces machines productrices de cette énergie.

C'est grâce à l'expérimentation que l'on a pu approfondir et mieux comprendre certains phénomènes physiques régissant le fonctionnement de ces machines, et des fois la démarche expérimentale reste la seule voie pour l'amélioration éventuelle des futurs projets.

De ce fait, cette énergie n'est pas réellement en concurrence avec les agents fossiles ou nucléaires. Mais son intérêt réside dans la multiplicité de ses avantages qui sont d'écrits dans la section §II.2, tout particulièrement en matière de protection de l'environnement.

II.2 Avantages de la production hydroélectrique

C'est la plus importante et la plus économique des énergies renouvelables. Elle est exploitable de façon compétitive dans une économie de marché. Elle offre une densité de puissance élevée (kilowatt par kilogramme d'installation), un très bon rendement de transformation et un excellent facteur de rendement (nombre de kilowattheures produits pendant la durée de vie en comparaison de l'énergie investie dans la construction de l'installation) ;

Elle est favorable à la protection de l'environnement, car elle ne produit pas de gaz à effet de serre, susceptibles de provoquer de profonds changements climatiques ;

La technologie actuelle repose sur un siècle de développement continu. Elle peut être mise en œuvre sans problème dans l'ensemble des pays en voie de développement et d'industrialisation ;

Le coût du kilowattheure ne dépend pas, comme pour les énergies fossiles, des prix des combustibles, soumis aux fluctuations du marché mondial. L'hydroélectricité est donc un facteur d'indépendance énergétique pour le pays qui l'exploite ;

Un ouvrage hydraulique permet souvent d'exercer des fonctions multiples : production d'énergie, irrigation des cultures, réserve d'eau potable et industrielle. Il offre encore une protection contre les inondations. Ce secteur de production ne peut donc 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.

II.3 Réhabilitation

L'industrie hydroélectrique connaît un regain d'activité dû à la nécessité de doper les installations vieillissantes. La réhabilitation de centrale constitue actuellement, avec la mini-hydraulique, le pôle principal de développement de nouvelles réalisations dans le domaine des turbines Francis.

La production d'énergie additionnelle résultant de l'accroissement de la puissance d'anciens ouvrages s'avère particulièrement rentable. D'autant plus que les centrales et de nombreux équipements électromécaniques sont largement amortis. Les avantages que constitue la réhabilitation d'une centrale existante sont multiples.

- Elle permet l'augmentation de la puissance et du rendement général de l'installation en disposant de matériel plus performant ;

- Elle diminue les coûts élevés d'entretien ainsi que le manque à gagner consécutif aux arrêts plus fréquents des vieilles machines devenues pour la plupart obsolètes et dont la plage de fonctionnement est souvent mal adaptée aux nouvelles conditions de production ;
- Elle permet enfin une plus grande disponibilité des centrales au niveau de leur gestion globale simultanée sur un bassin ou une vallée donnée.

Outre la rénovation des ouvrages civils dont la géométrie ne peut être que faiblement modifiée sans entraîner de trop grands coûts de réalisation, c'est sur le groupe électromécanique que s'effectue l'essentiel du travail de réhabilitation. L'augmentation de puissance est possible en augmentant le débit traversant l'installation. Ce point est particulièrement intéressant pour les centrales de pointe.

II.4 Développement

L'augmentation continue de la densité de puissance n'est pas limitée aux ouvrages de réhabilitation. Il en va de même pour les nouvelles installations, grâce à des progrès technologiques dans différents domaines.

- La disponibilité de moyens de calcul toujours plus performants permet d'aborder des calculs d'écoulement inimaginables voici quelques années encore. La possibilité d'optimiser par le calcul les géométries ouvre ainsi la voie à la conception de machines plus efficaces dans des plages de fonctionnement toujours plus étendues ;
- Les progrès de la métallurgie repoussent les frontières du réalisable. Des alliages plus résistants, plus homogènes rendent possible la construction de turbines fonctionnant à des niveaux d'énergie plus élevés. D'autres alliages résistants à l'érosion permettent d'accroître la puissance spécifique des turbines sans les exposer à la destruction par la cavitation ;

- Avec les développements du réglage automatique, la commande à distance des unités de production crée les conditions pour une gestion plus rationnelle des ressources en énergie à l'échelle continentale.

II.5 L'hydroélectricité dans le monde

Les pays industrialisés et en voie de développement intensifient l'exploitation de leurs précieuses ressources en eau en tant que source d'énergie renouvelable. C'est ce que montre une étude du Worldwatch Institute : la consommation hydraulique mondiale a augmenté de plus de 5% entre 2009 et 2010. Fin 2010, elle atteignait un pic historique de 3427 térawatt-heure (TWh), c'est près de 16,1% de la consommation mondiale d'électricité, poursuivant ainsi l'accélération observée depuis 2003. 40 à 45 milliards de dollars ont été investis dans des grands projets hydrauliques dans le monde en 2010.

À l'heure actuelle, l'installation ayant la plus grande puissance de production jamais construite est le barrage des Trois Gorges en Chine. L'installation produit de l'électricité en utilisant 26 turbines - 8 unités de plus (6 x 700 MW, 2 x 50 MW), dont la construction est achevée en 2011. Chacune des unités opérationnelles actuelles a une puissance de 700 MW, soit une puissance totale installée de 22 500 MW, soit presque le triple de la puissance installée de la plus grande centrale nucléaire, la centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa (7 réacteurs), puissance installée totale 8 212 MW. L'achèvement complet du barrage des Trois Gorges a eu lieu en 2011, la puissance installée totale atteinte est de 22 500 MW, à comparer à la puissance de la deuxième centrale électrique, le barrage d'Itaipu à la frontière entre le Brésil et le Paraguay (14 000 MW).



Figure II.1 : Barrage de Trois-Gorges-Chine



Figure II.2: Barrage d'Itaipu- Brésil /Paraguay

Actuellement un projet, le barrage Grand Inga au Congo, s'il se réalise, dépassera toutes les centrales existantes, y compris le barrage des Trois Gorges, si la construction débute comme prévu en 2014. Le projet prévoit une puissance installée de 39 000 MW, presque deux fois celle des Trois Gorges. Au moment de la première proposition du projet, cette puissance répondait à la demande en électricité du continent africain.



Figure II.3: Barrage Grand Inga-Congo

Si 150 pays produisent de l'hydroélectricité, cette production apparaît comme très concentrée au plan géographique. La zone Asie pacifique représente environ 32 % de la production hydroélectrique mondiale en 2010 alors que l'Afrique, avec un maigre 3 %, recèle le plus gros potentiel d'augmentation.

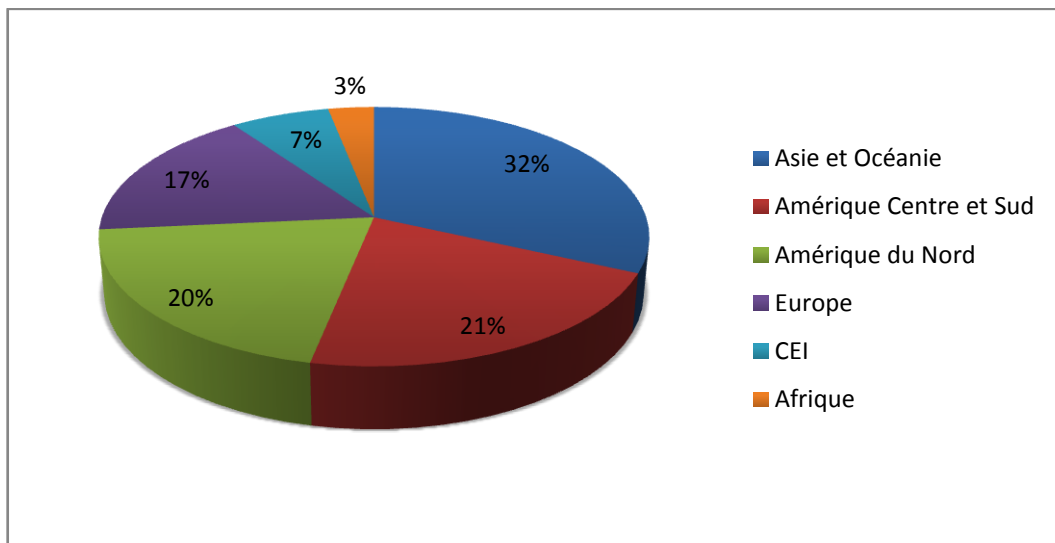


Figure II.4: Principaux producteurs de l'hydroélectricité dans le monde par zone géographique en 2011

En 2008, quatre pays : l'Albanie, le Bhoutan, le Lesotho, et le Paraguay tirent la totalité de leur électricité de centrales hydroélectriques, et 15 autres plus de 80 %.

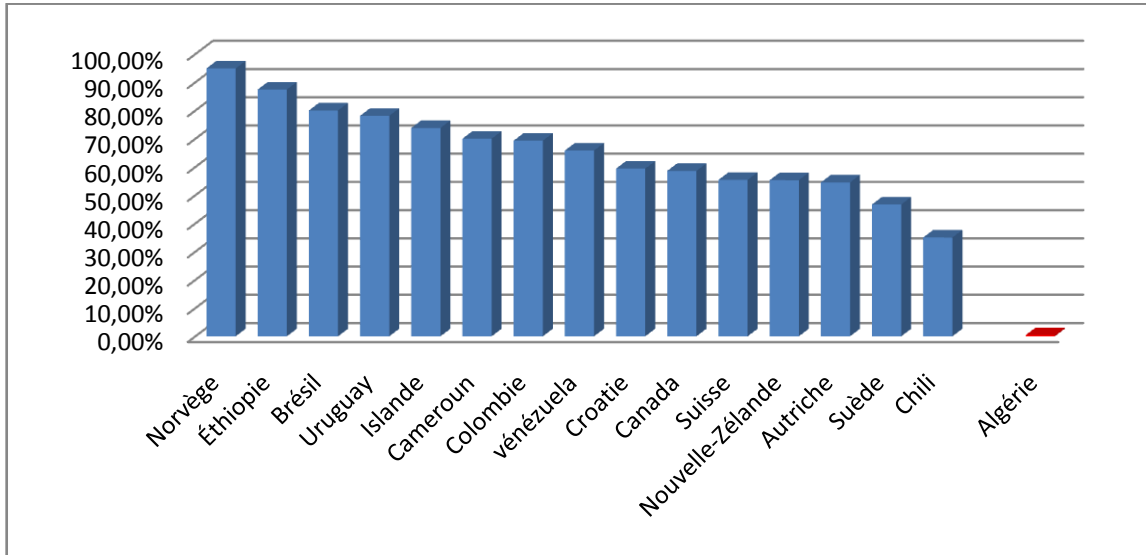


Figure II.5: Part de l'électricité produite par l'énergie hydraulique

Quid de l'Algérie ? Disposant de vastes étendues désertiques, d'une façade maritime de 1 200 km et d'une superficie de 2 millions et demi de km², largement ouverte aux vents, notre pays pourrait utiliser diverses techniques à même de produire en grande quantité de l'électricité. Les experts ainsi que les responsables des institutions concernées estiment que si dans notre pays la production d'électricité renouvelable est en devenir, la quasi-totalité de la production électrique algérienne repose actuellement sur les combustions fossiles (99,6%). Les sources renouvelables assurent le complément et se répartissent entre l'hydroélectricité (0,4% du total) et le solaire (0,01% du total).

La production hydroélectrique du pays a fortement diminué en 2010, après avoir atteint un pic de production en 2009. Elle a représenté en 2010 un niveau de production inférieur à celui observé en moyenne sur la même période de référence (267 GWh). Les statistiques des organismes spécialisés précisent, en outre, que la production d'électricité issue des combustibles fossiles ne se soucie pas de variations de la production hydroélectrique et croît de manière continue sur la période (+5,6% par an en moyenne).

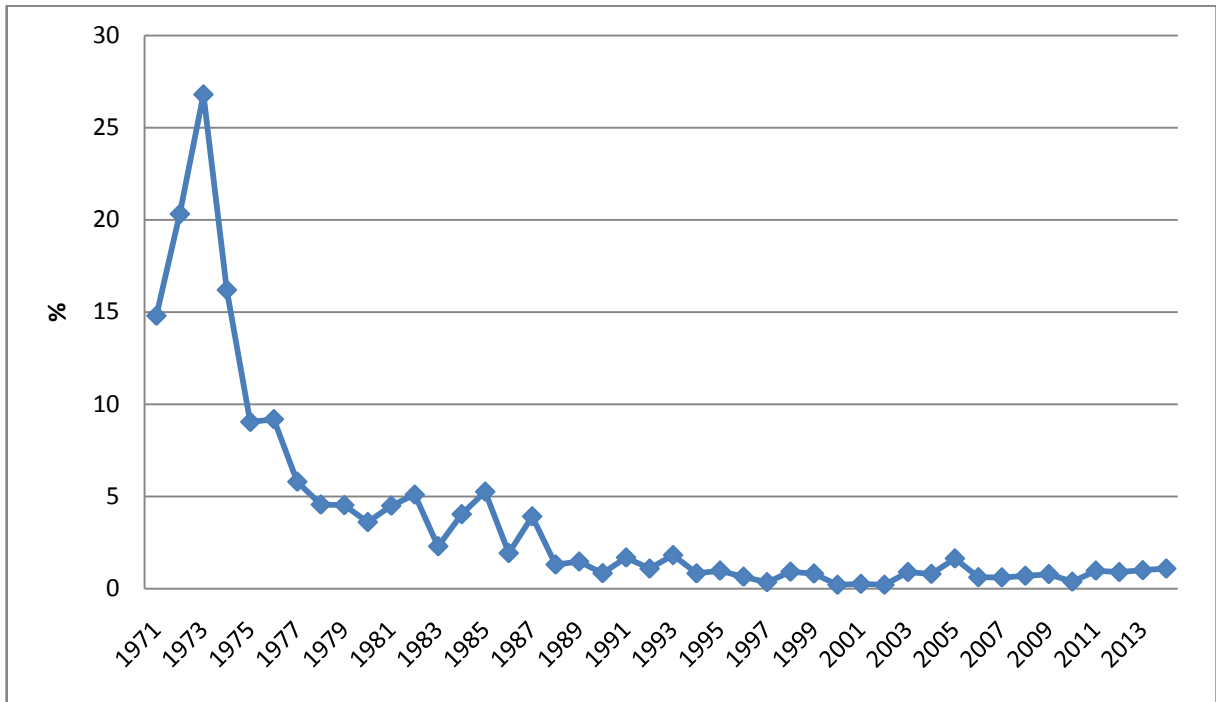


Figure II.6: Production de l'électricité- hydroélectricité (% de la production totale), Algérie

La Petite Kabylie est la région d'Algérie la plus favorisée sous le rapport des précipitations atmosphériques : en certains points, la précipitation totale annuelle atteint 2 000 mm ; une partie de ces précipitations a lieu sous forme de neige, qui, sur les hauts sommets (Monts Babors) persiste durant plusieurs mois et contribue ainsi à une certaine régularisation naturelle du débit des rivières. D'autre part, la région est accidentée et les hautes altitudes n'y sont pas rares. La Petite Kabylie remplit donc les conditions optima pour l'équipement de chutes d'eau : forts débits, grandes dénivellations.

Aussi ces conditions ont-elles permis la réalisation de grands aménagements hydroélectriques régularisés, à l'échelle de ceux de l'Europe.

La première réalisation de ce genre a été l'aménagement de l'Oued Agrioun, actuellement en voie d'achèvement : c'est un complexe de trois chutes, situées sur le territoire des communes de Kerrata et Oued Marsa mixte.

Aux environs de Kerrata, l'Oued Agrioun est formé de la réunion de quatre rivières (Oued Berd, Oued Atteba, Oued Embarelç, Oued Takarboust) de régimes hydrologiques différents :

l'ensemble du bassin versant couvre 652 km². Les apports liquides annuels sont en moyenne de 180 millions de m³.

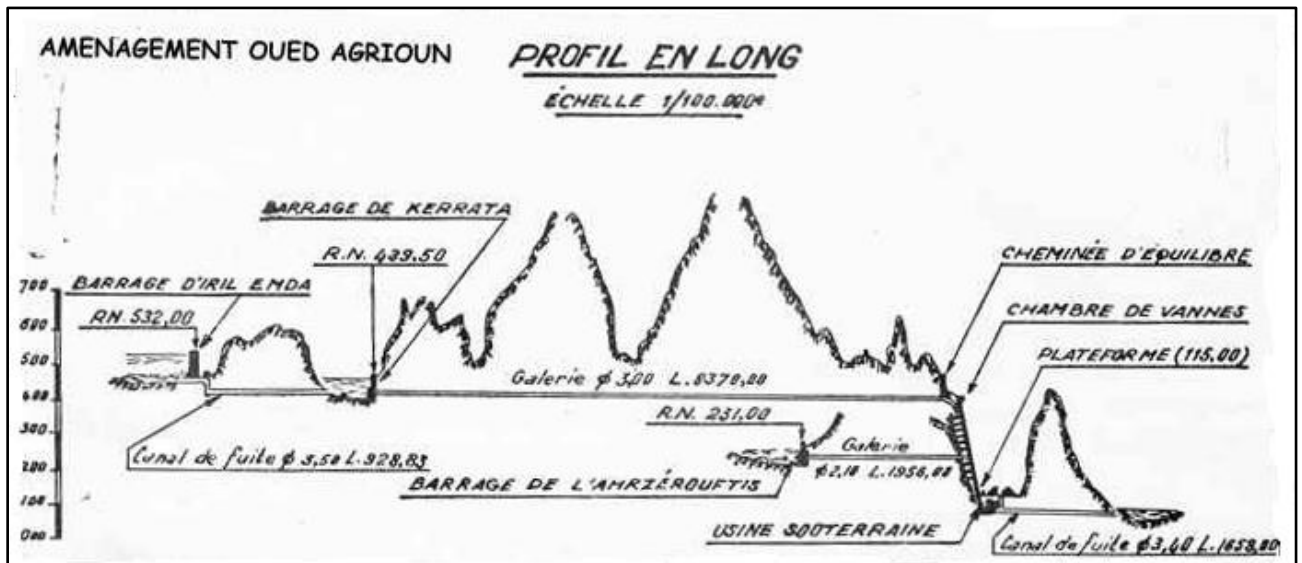


Figure II.7: L'aménagement De l'oued Agrioun

Les aménagements, de moyenne et petite puissance comprennent :

Les hautes chutes au fil de l'eau de Grande Kabylie de Boghni-aval, de Souk el Djemaa (près Michelet) et du Gouriet (près Maillot).

L'usine de Tessala, près d'Aïn-Témouchent est une usine de rupture de charge de la conduite d'alimentation en eau de la ville d'Oran, issue du barrage de Beni-Bandel, sur la Tafna.

L'usine de Foum-el-Gherza (sur l'Oued el Abiod, près de Biskra) aménagée au pied du barrage et fonctionnant au fil des irrigations, est une usine souterraine. . .

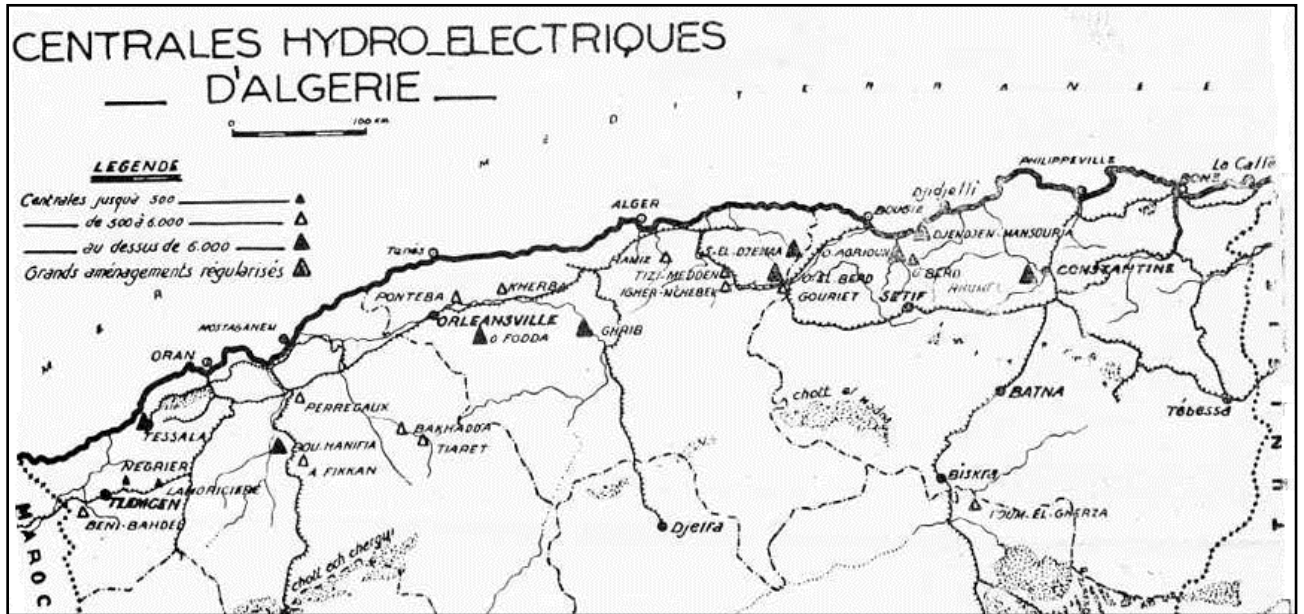


Figure II.8 : Centrale hydroélectrique en Algérie

Selon Perspective monde (organisme spécialisé en statique) l'utilisation des agents renouvelables reste faible, notre pays a affiché sa volonté de recourir aux sources renouvelables pour produire son électricité. Selon les explications du ministère de l'Énergie et des Mines, notre pays a besoin d'investir jusqu'à 120 milliards de dollars (85 milliards d'euro) dans les énergies renouvelables d'ici 2030. Voulant vraisemblablement se positionner ainsi en pays incontournable en méditerranée dans le secteur de la production de l'énergie en général et de l'électricité en particulier, sous différentes formes, l'Algérie, via le groupe Sonelgaz, a mis en œuvre un vaste programme de réhabilitation et de renouvellement de son parc de production pour conserver le niveau actuel de capacité de production.

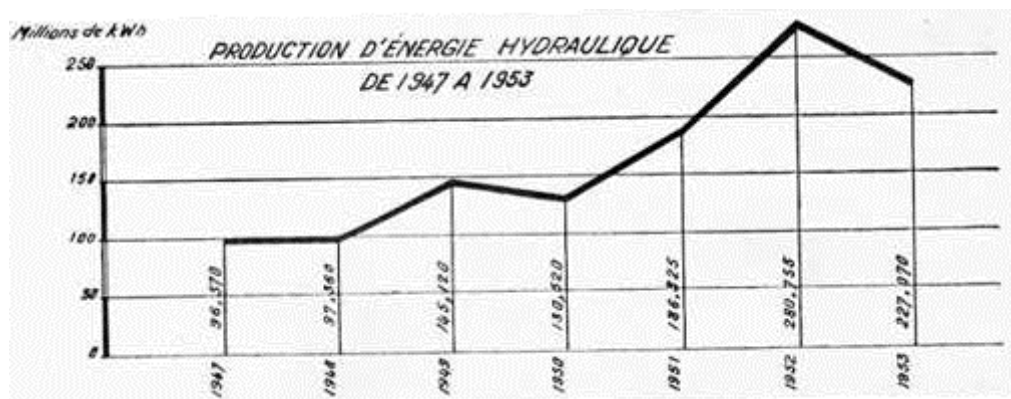


Figure II.9 : Production d'énergie hydraulique de 1947 à 1953-Algérie

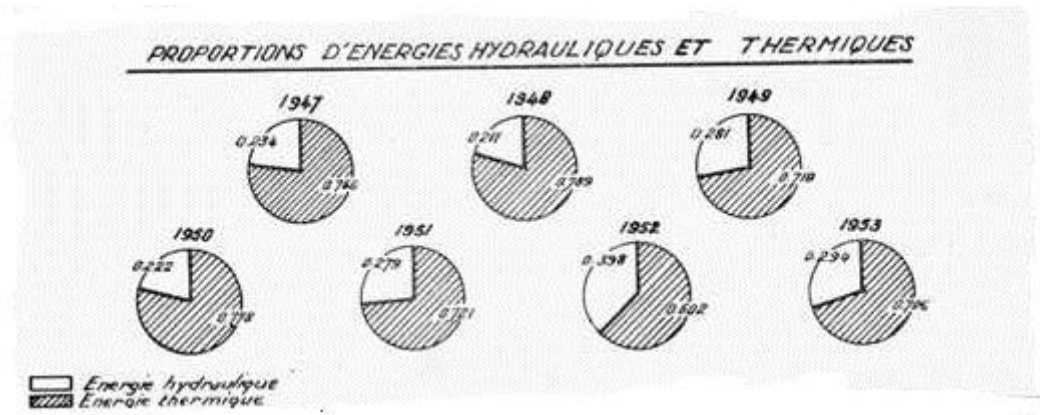


Figure II.10 : Proportions d'énergie hydraulique et thermique de 1947 à 1953- Algérie

Table des matières

II.1 Introduction	16
II.2 Avantages de la production hydroélectrique	17
II.3 Réhabilitation.....	18
II.4 Développement.....	19
II.5 L'hydroélectricité dans le monde	20

III.1 Introduction

Une centrale hydroélectrique transforme l'énergie sauvage d'une chute d'eau en énergie mécanique grâce à une turbine puis en énergie électrique grâce à un alternateur.

En d'autres termes, une centrale hydroélectrique est une centrale de production d'électricité dans laquelle le flux créé par l'eau amené par écoulement libre (canaux) ou par des conduites en charge (conduites forcées) actionne la rotation des turboalternateurs, avant de retourner à la rivière. C'est une forme d'énergie renouvelable, propre et non polluante.

On peut la définir aussi comme une installation de production énergétique transformant l'énergie hydroélectrique d'un cours d'eau en énergie électrique.

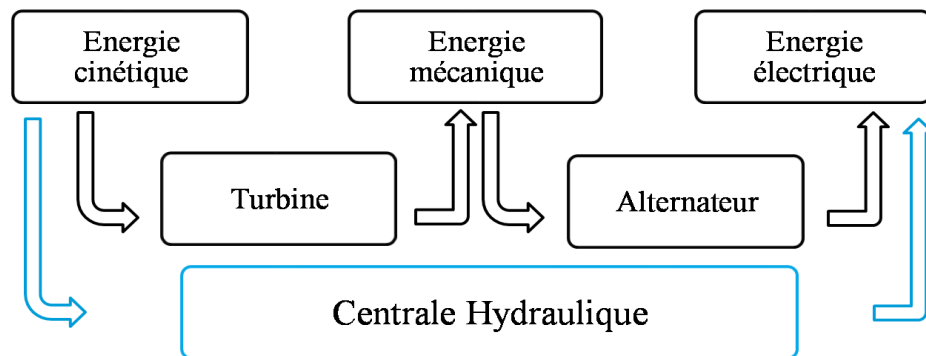


Figure III.1 : Constituants d'une centrale hydroélectrique

La taille et la puissance des ouvrages sont très variables, de plusieurs MW à quelques KW, de l'équivalent de plusieurs tranches nucléaires à la consommation d'un refuge de montagne.

La classification de l'énergie hydraulique selon les tailles d'installations est la suivante :

<i>Classification</i>	<i>Puissance en KW</i>
Grande Hydraulique	> 10 000 KW
Petite Hydraulique	1000 KW < P < 10 000 KW
Micro Hydraulique	10 KW < P < 1000 KW
Pico Hydraulique	< 10 KW

Tableau III.1 : La classification des centrales hydroélectriques

L'énergie hydraulique était déjà utilisée il y a plus de 2 000 ans ! D'abord utilisée pour produire de l'énergie mécanique (entraînement de scies, soufflets de forges et machines diverses), elle est utilisée pour produire de l'électricité dès la fin du 19^{ème} siècle. Le département de l'Isère accueille les premières installations.

Aujourd'hui, selon la DGEMP (Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières), l'énergie hydraulique contribue à environ 11,1% (soit environ 60,9 TWh) de la part de la production d'électricité française (contre près de 78,1% pour le Nucléaire).

La plupart des centrales en France sont de type Grande hydroélectricité. Cependant de nombreux moulin pourraient être rénovés en centrales du type mini, micro ou petite hydroélectricité. L'ADEME estime que le potentiel de puissance est de 2000MW.



Figure III.2 : Centrale hydroélectrique

III.2 La turbine hydraulique

III.2.1 Définition

Une turbine hydraulique est une machine tournante qui produit une énergie mécanique à partir d'eau en mouvement (cours d'eau ou marée) ou potentiellement en mouvement (barrage). Elle constitue le composant essentiel des centrales hydroélectriques destinées à produire de l'électricité à partir d'un flux d'eau. Elle a été inventée par Benoît Fourneyron¹ en 1832.

¹ Né le 1^{er} novembre 1802, à Saint-Étienne, mort le 8 juillet 1867, à Paris, est un inventeur et un industriel français dont la renommée est associée à l'invention de la turbine hydraulique et de la conduite forcée.

En d'autres termes, une turbine hydraulique est en effet un appareil de transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie mécanique. On peut la définir aussi comme un dispositif mécanique qui sert à transformer l'énergie potentielle associée à une hauteur en travail utile (énergie mécanique). Les turbines hydrauliques modernes sont le résultat de plusieurs années de développement progressif, qui ont abouti à l'élaboration de très grandes unités (plus de 800 MW de capacité) avec des rendements qui sont parfois de plus de 95%.



Figure III.3 : Transformation de l'énergie cinétique de l'eau par une turbine en énergie mécanique

Les roues hydrauliques ont animé pendant longtemps les moulins à céréales, mais aussi des installations artisanales ou industrielles. L'invention de la turbine hydraulique puis de l'alternateur ont ouvert une voie vers l'hydroélectricité qui constitue la source d'énergie propre la plus utilisée dans le monde.

Le principe consiste à créer un réservoir d'eau en barrant le cours d'une rivière, et à utiliser l'énergie potentielle de l'eau accumulée. Selon la hauteur de chute, on distingue des centrales de haute chute, de moyenne chute, et les usines au fil de l'eau.

La turbine est l'organe qui transforme l'énergie potentielle et cinétique de l'eau en énergie mécanique. La roue en est la partie mobile entraînant l'arbre de rotation qui transmettra l'énergie mécanique au générateur. Cette énergie est égale à :

$$W_t = 9,81 \cdot \eta_t \cdot Q \cdot h_n$$

Avec :

W_t : Puissance [KW] ;

η_t : Rendement de la turbine ;

Q : débit [m^3/s] ;

h_n : Hauteur de la chute nette à l'entrée de la turbine [m].

III.2.2 Différents types des turbines hydrauliques

III.2.2.1 Turbines à action (Pelton, Crossflow)

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 est dénuyée et tourne dans l'air. La figure III.4 présente schématiquement une turbine à action et ses paramètres de fonctionnement.

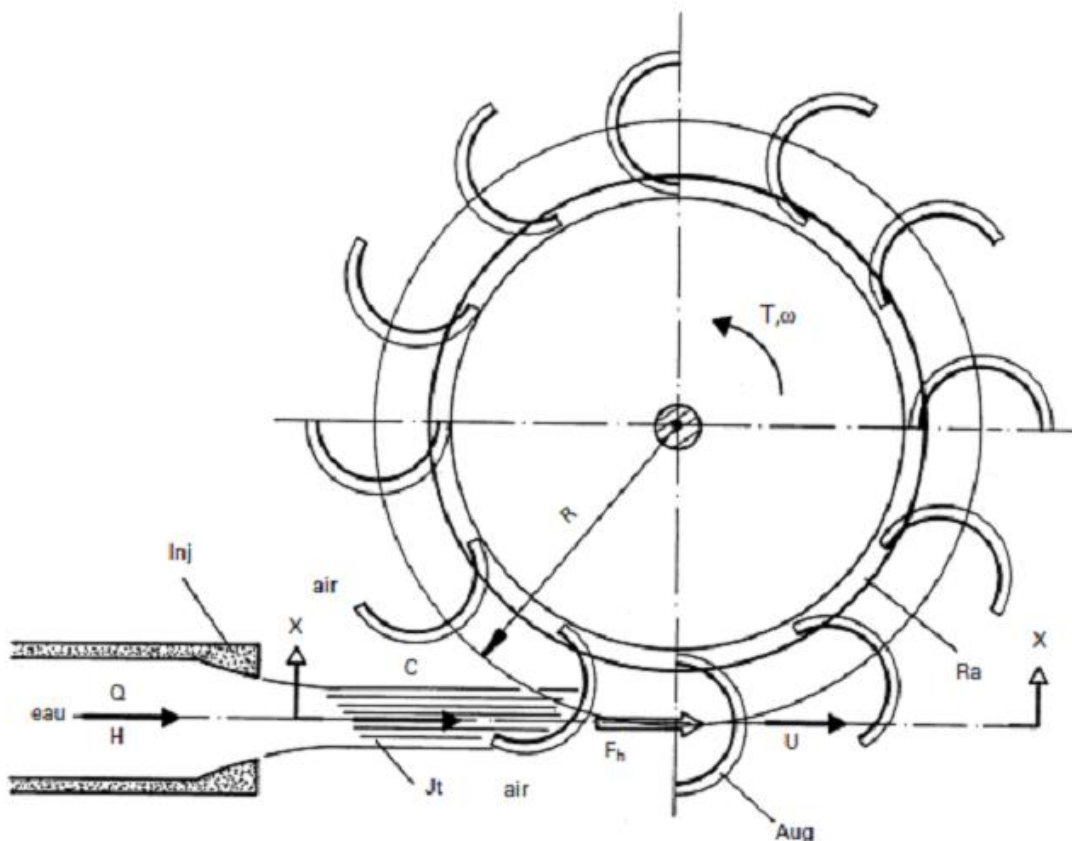


Figure III.4 : Schéma d'une turbine à action avec ses paramètres de fonctionnement

Composants :

Inj: injecteur ;

Ra : roue de la turbine ;

Jt : jet d'eau ;

Aug : auget ou aube profilée.

III.2.2.2 Turbines à réaction (Francis, Kaplan, Hélice, Pompe inversée)

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. Deux principes sont à la base de son fonctionnement :

- la création d'un tourbillon au moyen d'une bache spirale, d'aubages directeurs, ou les deux à la fois;
- 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 ;
- Comme pour une aile d'avion, la force portante résulte d'une différence de pression entre les deux faces du profil (intrados et extrados).

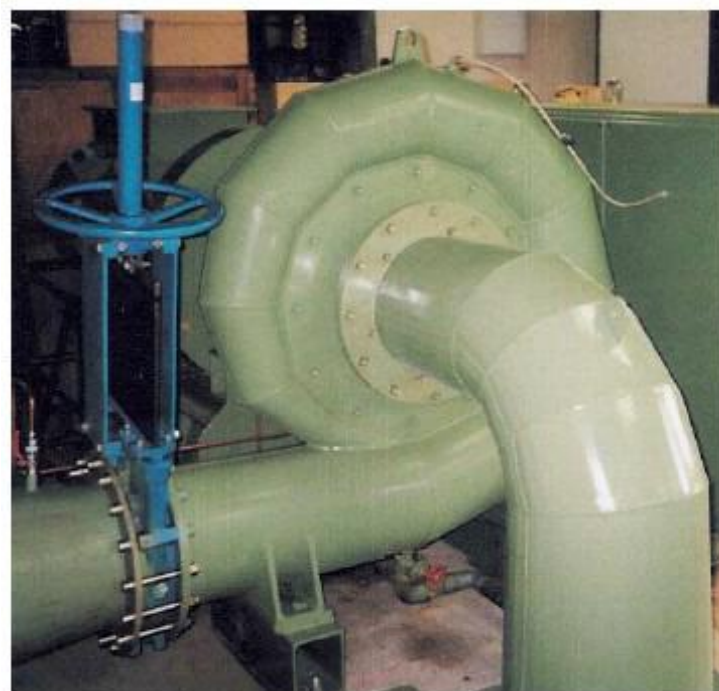


Figure III.5 : Turbine Francis à axe horizontal

III.3 Composants d'une turbine hydraulique

III.3.1 Exemple d'une turbine à réaction de type Kaplan

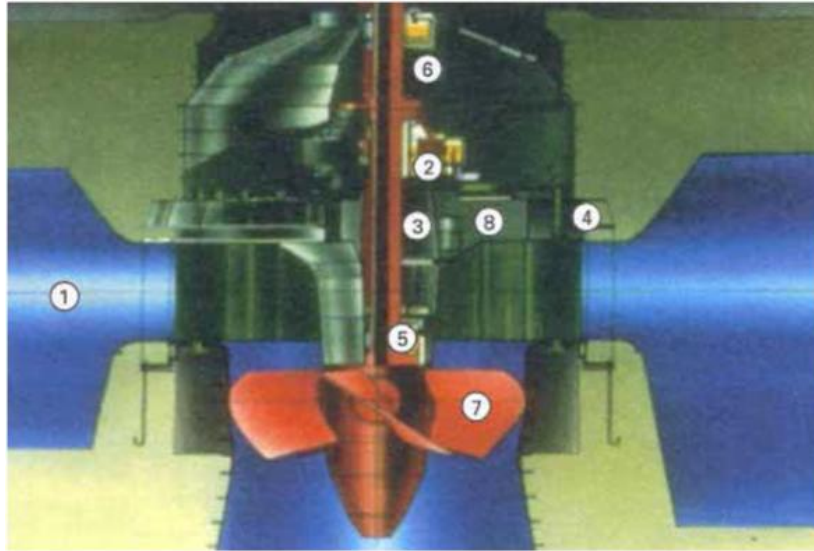


Figure III.6 : Vue schématique d'une turbine à réaction de type Kaplan

(1) bâche frontospirale en béton ; (2) pivot à membranes ; (3) fond support de pivot démontable ; (4) flasque supérieur scellé (externe) ; (5) palier à cuve tournante ; (6) palier intermédiaire avec croisillon support, type coque ; (7) pale ; (8) flasque interne.

III.3.2 Exemple d'une turbine à action de type Pelton

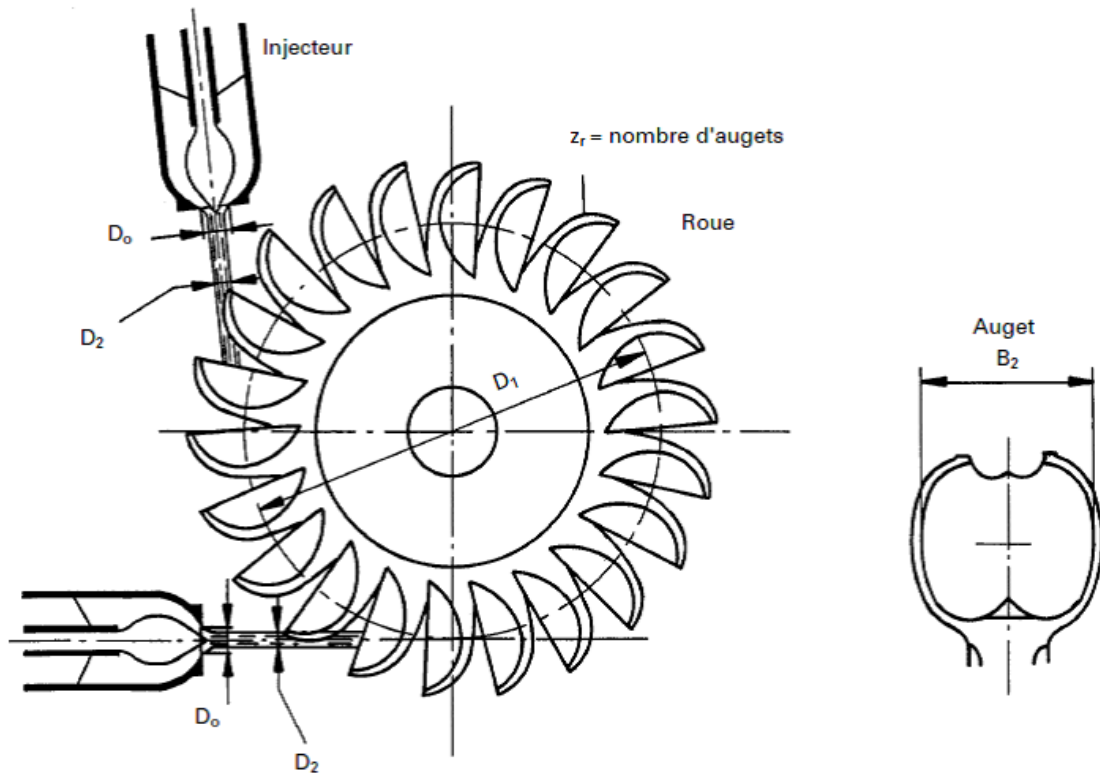


Figure III.7 : Vue schématique d'une turbine à action de type Pelton

III.4 Classification des turbines hydrauliques

III.4.1 Classification des turbines - débit et hauteur de chute

Le choix du type des turbines dépend de ces deux variables : la hauteur nette h_n et le débit Q . Les turbiniers proposent des abaques pour le choix de leur fabrication (Figure III.8).

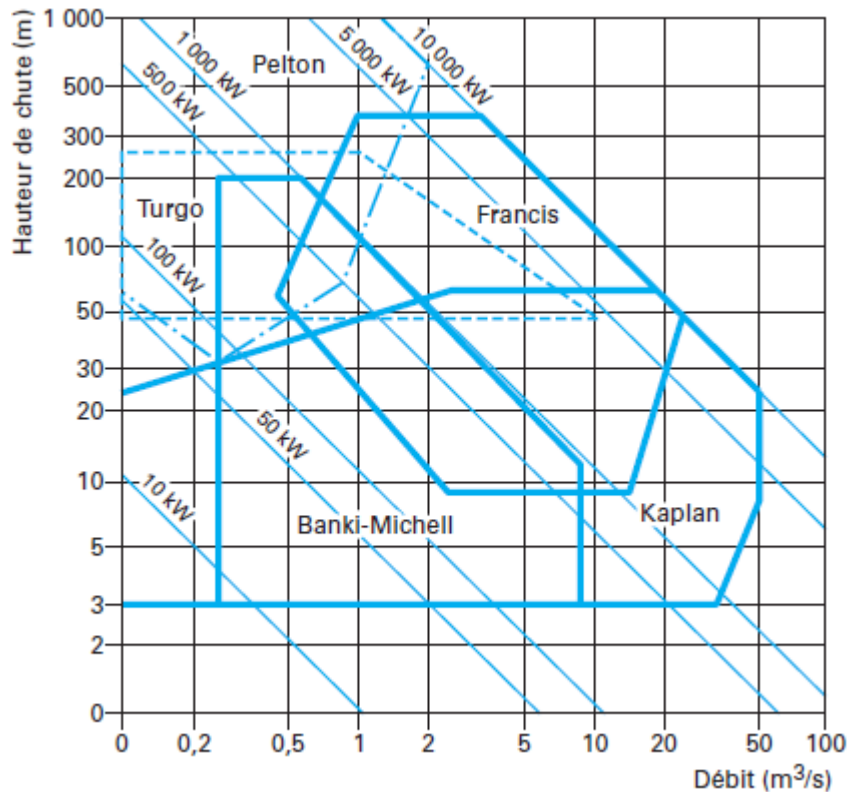


Figure III.8 : Domaine d'utilisation des différents types de turbines (chutes nettes, débits, puissances)

III.4.2 Classification des turbines - vitesse spécifique

III.4.2.1 Vitesse spécifique N_s

Vitesse de rotation, en t / min, d'une turbine travaillant sous une chute de 1 m et délivrant une puissance de 1 kW :

$$N_s = n \cdot \frac{P^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}}$$

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

III.4.2.2 Vitesse spécifique n_q

La vitesse de rotation, en t / min, d'une turbine travaillant sous une chute de 1 m avec un débit de 1 [m³/s].

$$n_q = n \cdot \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}}$$

$$\rightarrow N_s \cong 3,0 \cdot n_q$$

III.4.2.3 Vitesse spécifique V

$$V = \omega \cdot (Q/\pi)^{\frac{1}{2}} / (2 \cdot g \cdot H)^{\frac{3}{4}} \quad [\text{sans dimension}]$$

V est un chiffre équivalent à η_q , mais sans dimensions.

$$V = 0.00634 \cdot n_q$$

Unités :

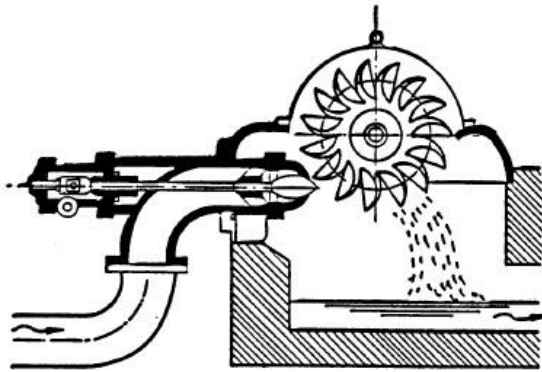
H [m] ;

Q [m³/s] ;

n [t/min] ;

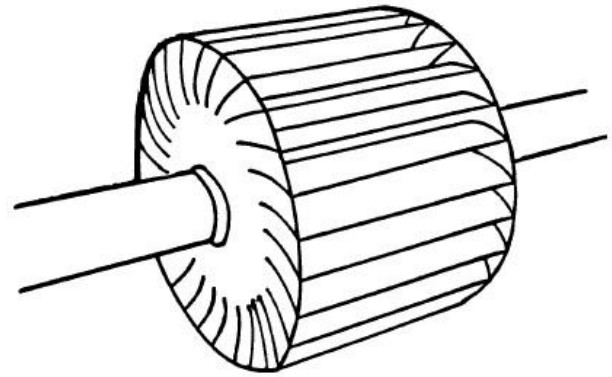
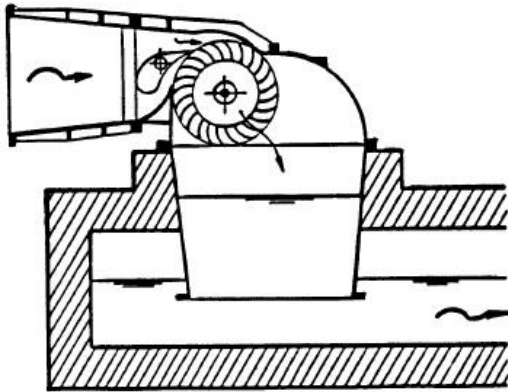
P [KW] ;

ω [rad/s].



Turbine PELTON

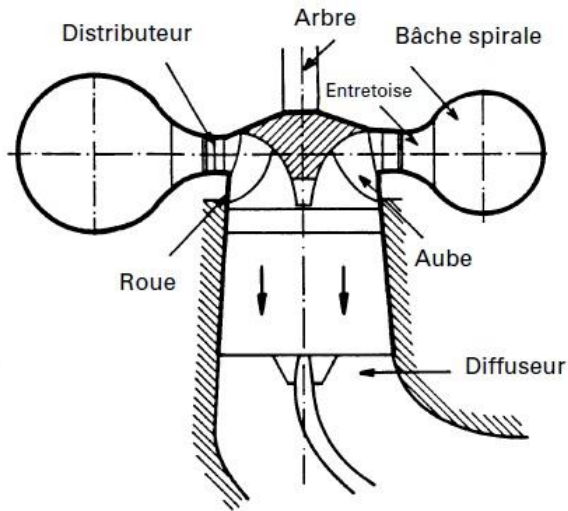
Q petit	$N_s = 6 \dots 60$
H grand	$n_q = 2 \dots 20$
	$v = 0.01 \dots 0.11$



Turbine CROSSFLOW

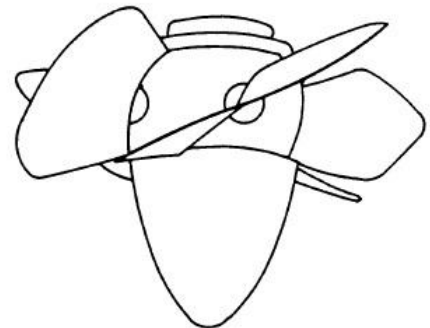
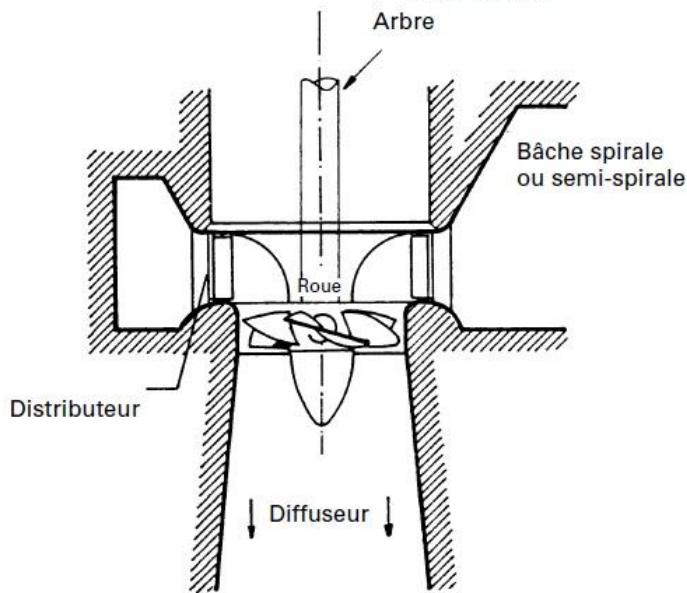
Q petit à moyen	$N_s = 30 \dots 210$
H moyen à petit	$n_q = 10 \dots 70$
	$v = 0.06 \dots 0.45$

Figure III.9 : Résumé des principaux types de turbines à action



Turbine FRANCIS

Q moyen $N_s = 50 \dots 350$
 H moyen $n_q = 16 \dots 120$
 $v = 0,1 \dots 0,75$



Turbine KAPLAN

Q grand $N_s = 200 \dots 950$
 H petit $n_q = 65 \dots 300$
 $v = 0,4 \dots 2,0$

Figure III.10 : Résumé des principaux types de turbines à réaction

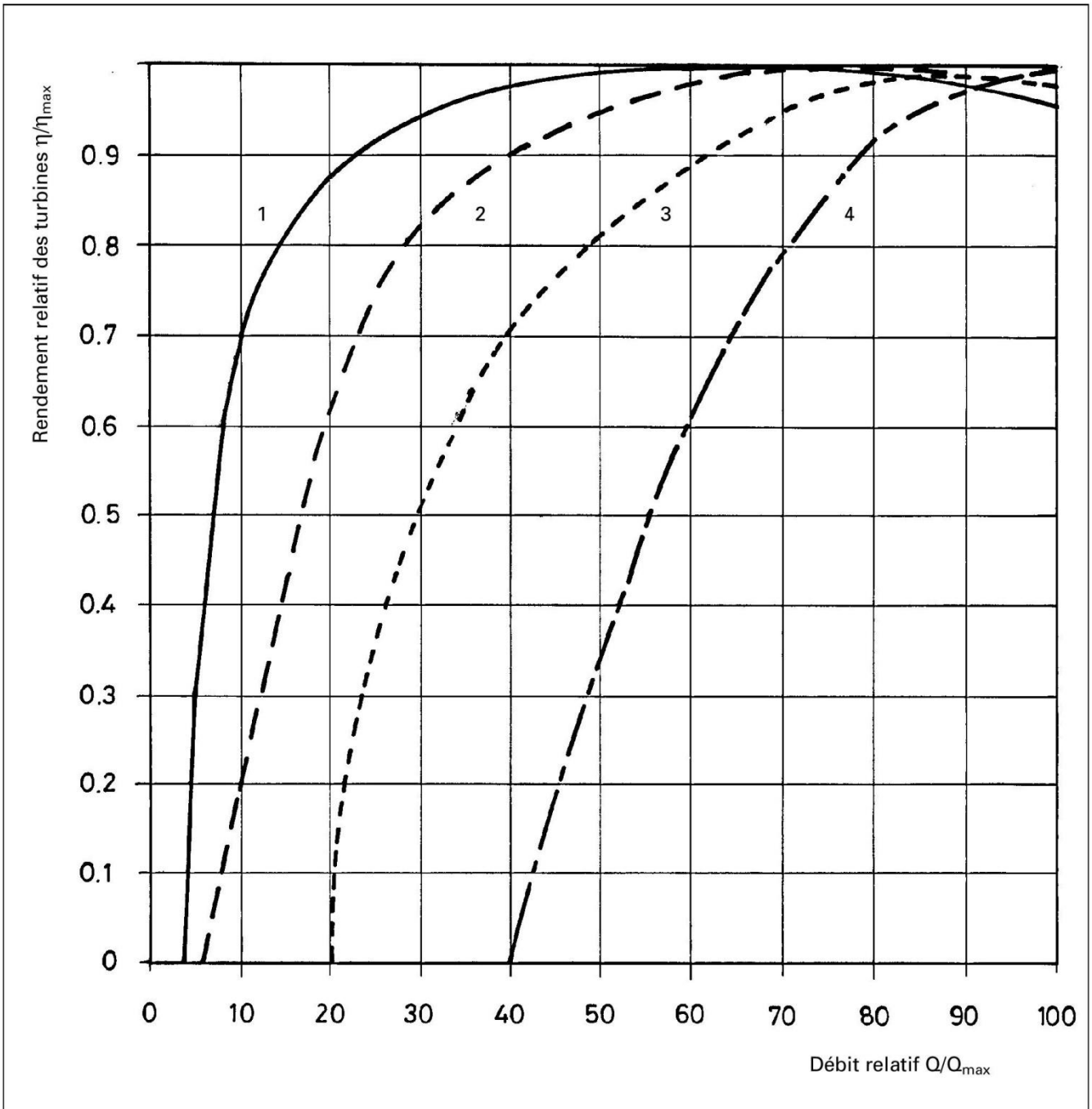


Figure III.11 : Forme des courbes de rendement de différentes turbines pour des débits variables

Ordre de grandeur des rendements maximum η_{max} :

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 inversé

$$\eta_{max} = 75 - 90\%$$

III.5 Paramètres communs à tous les types de turbines

Depuis la roue à aubes entraînant un moulin, les machines hydrauliques ont subi une évolution technique considérable.

Il existe actuellement plusieurs types de turbines, et pour chaque type, une large plage de caractéristiques.

Il est donc important pour l'ingénieur s'occupant de l'acquisition d'une turbine, de posséder un certain nombre de connaissances au sujet de ces machines, de leur implantation et de leur fonctionnement.

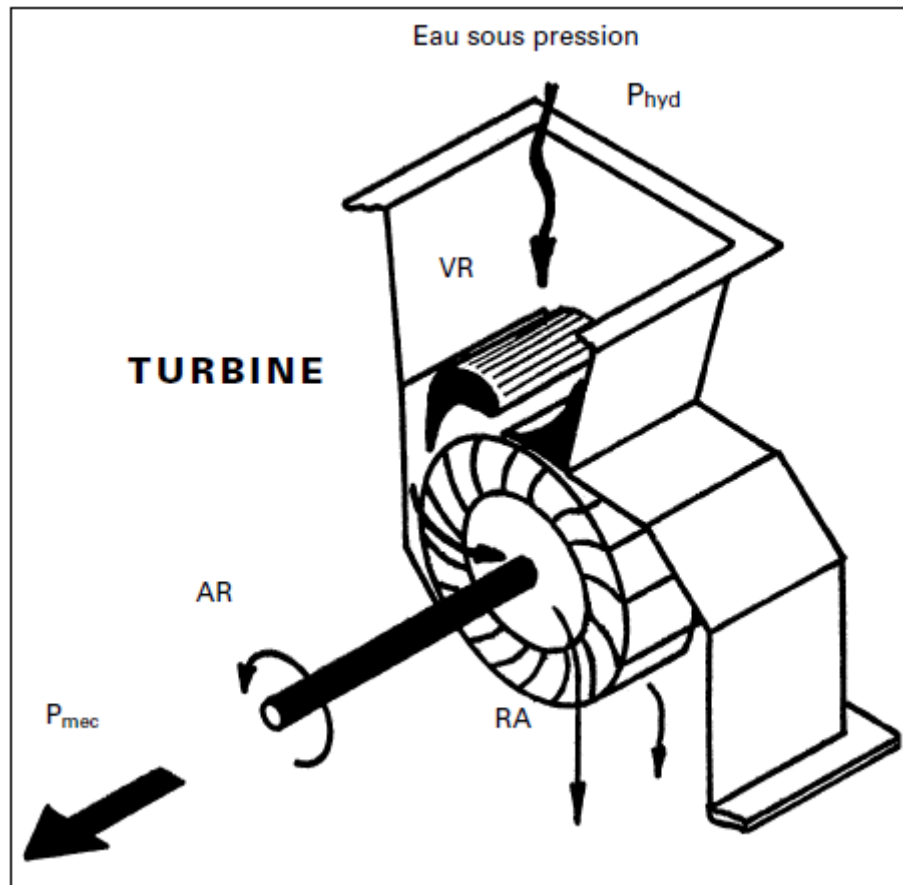


Figure III.12 : Turbine hydraulique

Machine alimentée en eau sous pression, qui met en mouvement une roue à aubes et produit de la force, ou puissance mécanique, par l'intermédiaire d'un arbre en rotation

VR: vanne de réglage du débit d'eau (nommée distributeur ou injecteur selon le type de turbine).

Celle-ci permet de régler la puissance en fonction des besoins du consommateur et de l'eau à disposition ;

RA: roue à aubes ou à augets ;

AR: arbre en rotation ;

P_{hyd} : puissance hydraulique fournie à la turbine par un débit d'eau sous pression ;

P_{mec} : puissance mécanique délivrée par la turbine.

III.5.1 Composants, profil en long et ligne d'énergie d'une petite centrale hydraulique

Le schéma de la figure III.13 présente le profil en long d'une petite centrale avec ses différents composants et les lignes d'énergie et de pression.

Pour plus de clarté, les paramètres sont redéfinis sur une figure simplifiée, la figure III.14.

Définitions :

Débit Symbole: Q Unité : [m^3/s]

Le débit est le volume d'eau par unité de temps qui transite par l'aménagement pour alimenter la turbine.

Chute brute Symbole: H_b Unité : [m]

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 Symbole: H Unité : [m]

La chute nette représente l'énergie hydraulique à disposition de la turbine. Elle est égale à la chute brute 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 grilles et 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 : $H_L = A \cdot Q^2$ ce qui permet de calculer la chute nette pour différents débits turbinés :

$$H = H_b - A \cdot Q^2$$

Le coefficient A peut être calculé à partir des pertes de charge connues pour un point de fonctionnement, nominal par exemple :

$$A = H_L / Q^2$$

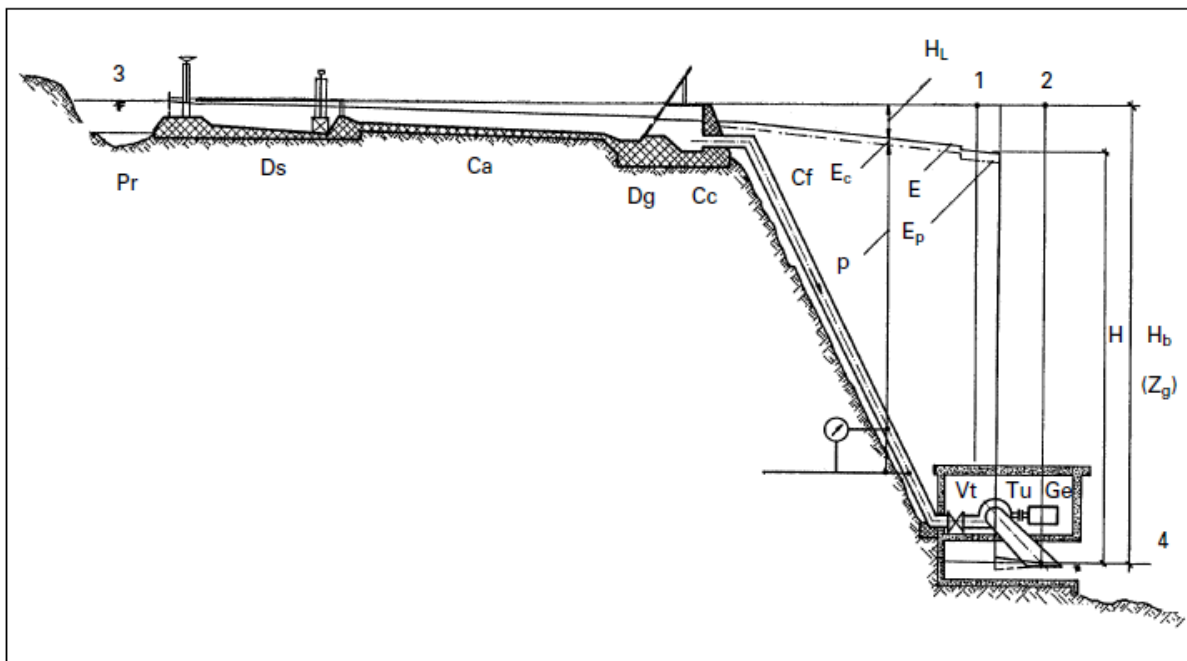


Figure III.13 : Composants et profil en long d'une petite centrale hydraulique

P_r : prise d'eau ;
 Ds : dessableur ;
 Ca : canal / conduite d'amenée ;
 Dg : dégrilleur ;
 Cc : chambre de mise en charge ;
 Cf : conduite forcée ;
 Vt : vanne turbine ;
 Tu : turbine ;
 Ge : générateur ;
1 : point de référence amont de la turbine ;
2 : point de référence aval de la turbine ;
3 : point de référence amont de l'aménagement ;
4 : point de référence aval de l'aménagement ;
 E : ligne d'énergie ;
 E_c : énergie cinétique ;
 E_p : énergie de pression ;
 P : pression ;
 H_b : chute brute ;
 H : chute nette.

Énergie hydraulique massique Symbole: E Unité : [J/kg]

Selon la loi de Bernoulli, l'énergie hydraulique est la somme de :

L'énergie de pression P/ρ [J / kg]

avec : **pression** Symbole: p Unité : [N/m^2 , 1 bar = $10^5 N/m^2$]

1 bar = 10,2 m de colonne d'eau lue sur un manomètre et représentée par la hauteur manométrique $P/\rho g$ en [m] de colonne d'eau.

L'énergie géodésique gz [J / kg]

avec : **hauteur géodésique** Symbole: z Unité : [m]

hauteur entre l'axe du manomètre et le plan de référence X de la mesure de l'énergie (note: Z peut être négatif).

L'énergie cinétique de l'eau Symbole: $E_c = V^2/2$ Unité : [J/ kg]

avec $V = Q/S$ [m/s], vitesse de l'eau, S étant la section de passage du canal ou de la conduite au point considéré (m^2).

Par exemple en un point X de la conduite forcée, nous avons l'énergie hydraulique suivante (voir figure III.10).

$$E_X = gH_X = P_X/\rho + V_X^2/2 + gz_X$$

calculée en joule/ kg [J / kg]

avec

$g = 9.81$ [m/s^2] = accélération de la pesanteur

et

$\rho =$ masse volumique de l'eau = 1000 [kg/m^3]

La relation entre l'énergie hydraulique massique et la hauteur d'eau, souvent définie par le terme de charge dans le domaine du génie civil est la suivante :

$$H_X = E_X/g \quad \text{ou} \quad E_X = gH_X$$

L'énergie hydraulique massique $E = gH$ absorbée par la turbine est la différence entre l'énergie massique $E_1 = gH_1$ à l'entrée de la turbine et l'énergie massique $E_2 = gH_2$ à la sortie.

$$gH = gH_1 - gH_2 \quad \text{ou} \quad E = E_1 - E_2 \quad [J/kg]$$

avec

$$E_1 = gH_1 = \frac{P_1}{\rho} + gz_1 + \frac{V_1^2}{2} \quad [J/kg]$$

$$E_2 = gH_2 = \frac{P_2}{\rho} + gz_2 + \frac{V_2^2}{2} \quad [J/kg]$$

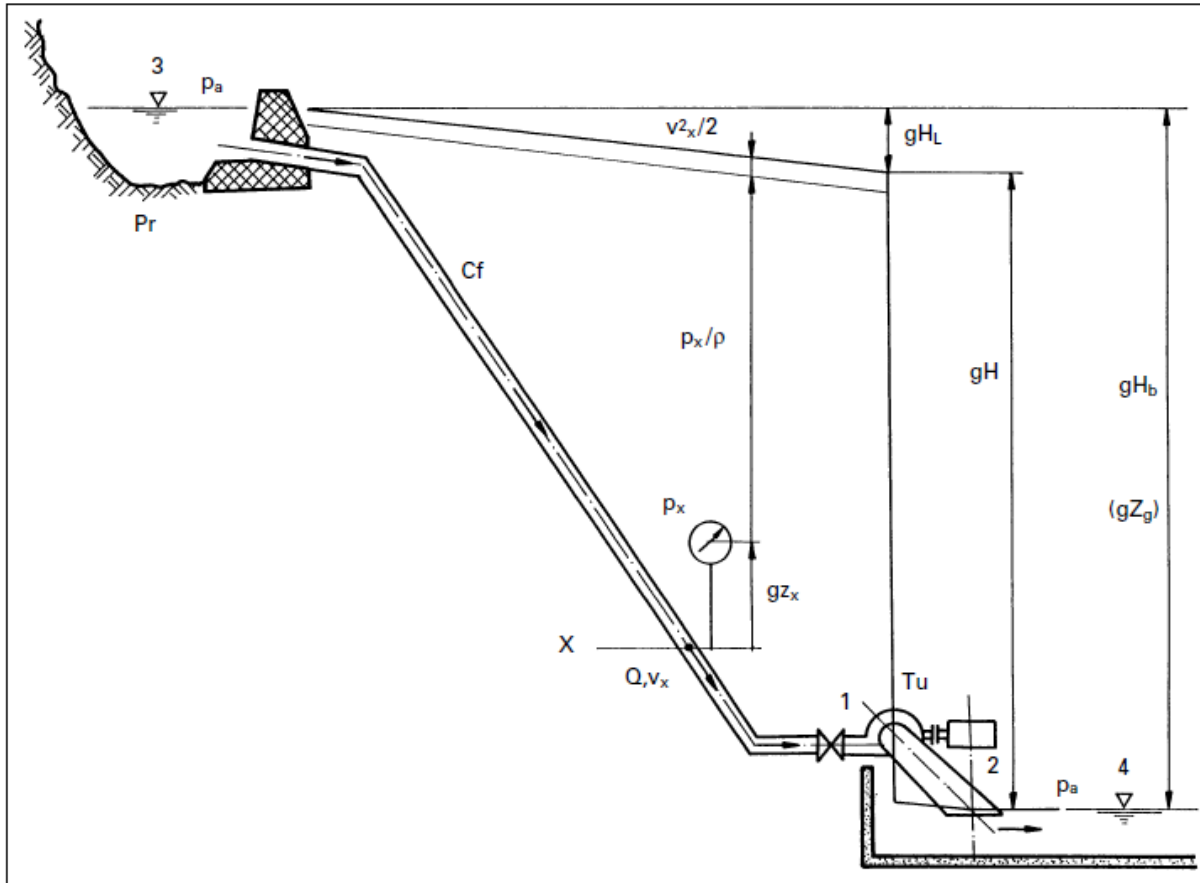


Figure III.14 : Ligne d'énergie (ou ligne de charge) d'une petite centrale hydraulique

Pr : prise d'eau ;

Cf : conduite forcée ;

Tu : turbine ;

1 : point de référence amont turbine ;

2 : point de référence aval turbine ;

H_b : chute brute [m] ;

H : chute nette [m] ;

H_L = A · Q² : pertes de charge [m] ;

Q : débit [m³/s].

Énergie E_X (ou charge H_X) au point X:

$$E_X = gH_X = \frac{p_X}{\rho} + \frac{v_X^2}{2} + gz_X \quad [\text{J/kg}]$$

$$g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]};$$

$$\rho = 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]};$$

$$P_X : \text{pression en [N/m}^2\text{]} \quad 10^5 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ bar} ;$$

$$V_X : \text{vitesse d'écoulement [m/s].}$$

Note: P_X est généralement la pression relative (sur- ou souspression) mesurée par rapport à la pression atmosphérique P_a .

III.5.2 Puissance hydraulique d'une turbine

Puissance hydraulique Symbole: P_{hyd} Unité : [W]

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) $\rho \cdot Q$.

$$P_{hyd} = \rho \cdot Q \cdot gH \quad [W]$$

Les normes suisse ASE 3055.1974 et internationale CEI 41 concernant les essais de réception des turbines hydrauliques définissent les points de référence à l'amont (1) et à l'aval (2) de la turbine entre lesquels est mesurée la chute (ou l'énergie) nette.

C'est en ces points que sont placés les instruments servant à mesurer la pression ou le niveau (manomètres ou limnimètres).

La figure III.15 montre le principe de mesure et de calcul de la chute nette et autres paramètres nécessaires à la détermination de la puissance hydraulique de la turbine.

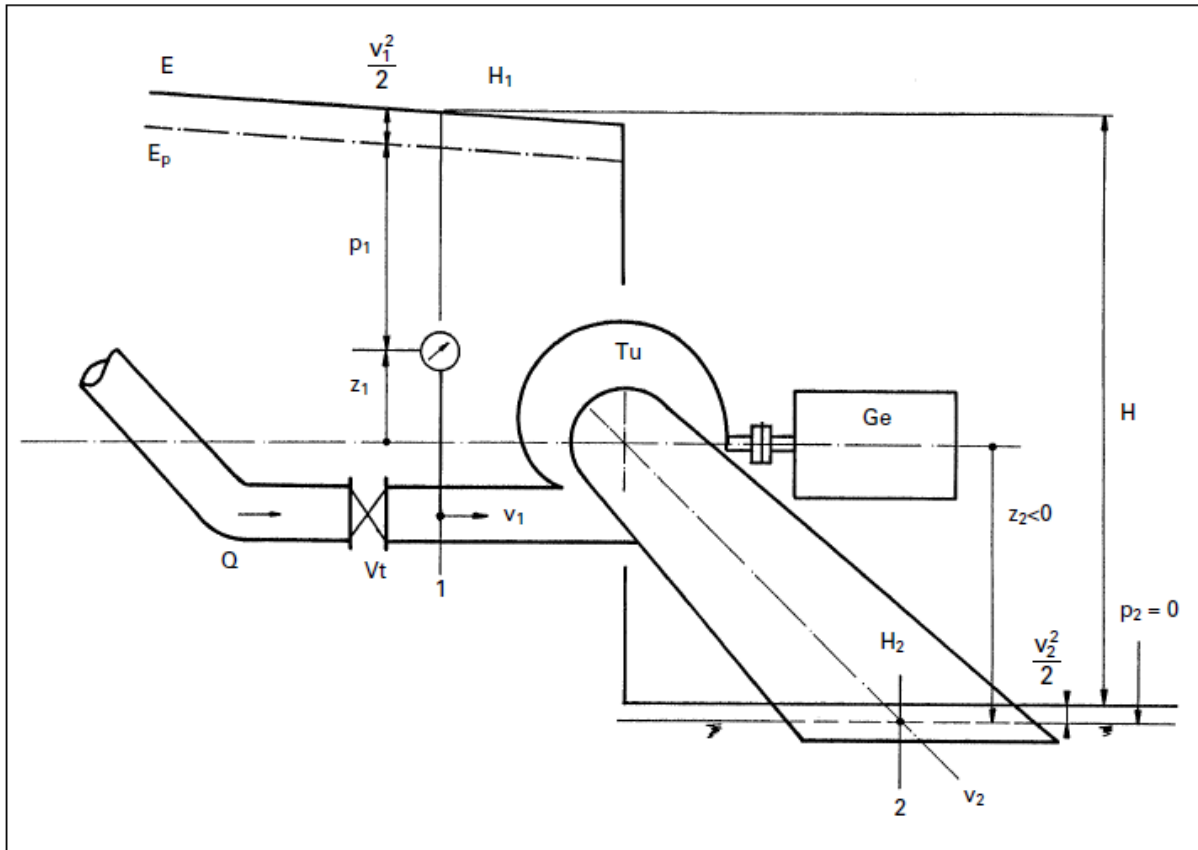


Figure III. 15 : Paramètres pour le calcul de la puissance hydraulique d'une turbine

Vt : vanne turbine ;

Tu: turbine ;

Ge: générateur ;

1 : point de référence amont turbine ;

2 : point de référence aval turbine ;

E: ligne d'énergie (de charge) ;

E_p: ligne de pression.

Énergie entrée turbine :

$$E_1 = gH_1 = \frac{p_1}{\rho} + gz_1 + \frac{v_1^2}{2} \quad [\text{J/kg}]$$

Énergie sortie turbine :

$$E_2 = gH_2 = \frac{p_2}{\rho} + gz_2 + \frac{v_2^2}{2} \quad [\text{J/kg}]$$

Énergie (chute) nette :

$$E = E_1 - E_2 = gH_1 - gH_2 \quad [\text{J/kg}]$$

Puissance hydraulique :

$$P_{hyd} = \rho \cdot Q \cdot gH \quad [W]$$

III.5.3 Couple, vitesse de rotation, puissance mécanique et rendement d'une turbine

Couple Symbole: T Unité : [Nm]

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.

Vitesse de rotation Symbole: n Unité : [t/min]

$$\omega \quad [rad/s]$$

$$\text{avec : } \omega = \pi \cdot n / 30$$

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

Puissance mécanique Symbole: P_{mec} Unité : [W]

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

$$P_{mec} = \omega T$$

Rendement Symbole: η Unité : – [ou %]

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

$$\eta_t = P_{mec} / P_{hyd}$$

$$\rightarrow P_{mec} = \eta_t \cdot P_{hyd}$$

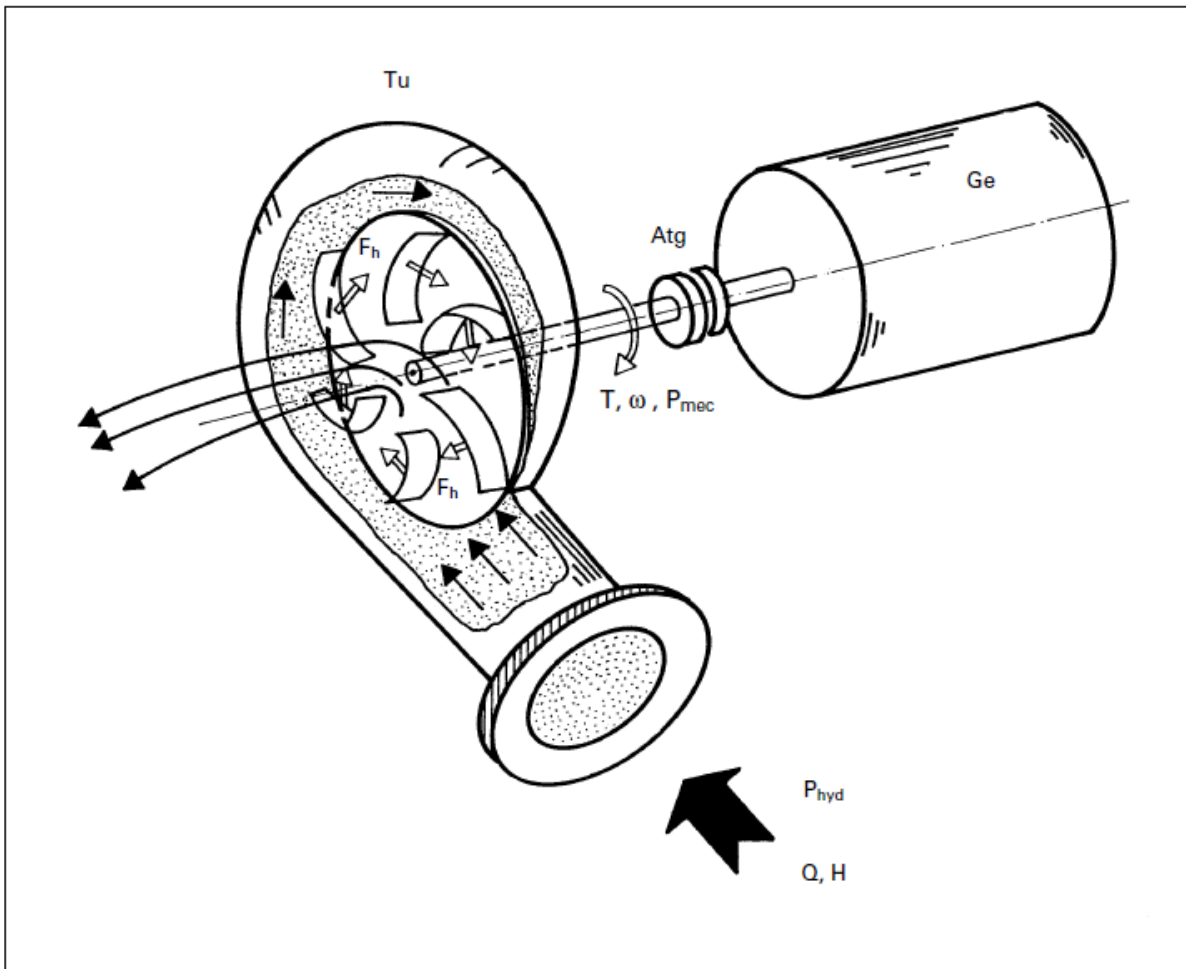


Figure III.16 : Forces, couple, vitesse de rotation et puissance mécanique d'une turbine

Tu : turbine ;

Ge: générateur ;

Atg: accouplement turbine-générateur ;

P_{hyd} : puissance hydraulique [W] ;

F_h : force hydrodynamique agissant sur une pale de la roue de la turbine ;

T: couple créé par les forces hydrodynamiques F_h [Nm] ;

ω : vitesse de rotation [rad/s] (ou n en t/min).

$P_{mec} = \omega \cdot T$: puissance mécanique à l'arbre de la turbine [W] ;

$\eta_t = P_{mec} / P_{hyd}$: rendement de la turbine.

III.6 L'alternateur

III.6.1 Définition

Générateur permettant de créer un champ magnétique pour fournir de l'électricité. L'énergie électrique est produite sous forme de courant alternatif lorsque le rotor est entraîné par une turbine ou un moteur.

En d'autres termes, un alternateur est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie.

On peut le définir aussi comme un convertisseur d'énergie mécanique en énergie électrique.



Figure III.17 : Alternateur électrique

III.6.2 Intérêt

- Convertit de la puissance mécanique en puissance électrique ;
- Principe simple et rendement très important ($\approx 100\%$) ;
- Peut être intégré dans des systèmes embarqués et dans des installations de puissance ;
- Sa taille est négligeable par rapport à la puissance délivrée ;

Exemple : un alternateur de centrale = plusieurs dizaines de MVA pour un diamètre de plusieurs dizaines de mètres.

- L'alternateur est la base de presque toute la production d'énergie électrique mondiale.

III.6.3 Principaux constituants d'un Alternateur

Un alternateur possède deux éléments distincts essentiels : le stator et le rotor. (Voir la figure ci-après).

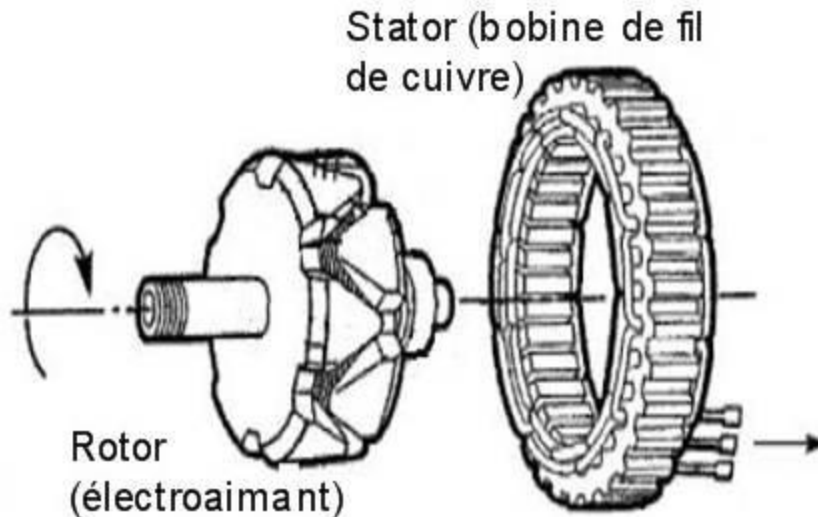


Figure III.18 : Composants d'alternateur électrique

- Le STATOR (pièce statique c'est à dire qui ne tourne pas dans l'alternateur (*stator* provient de *statique* qui veut dire immobile)) est une bobine de cuivre donc conductrice et sensible aux phénomènes *électromagnétiques*.
- Le ROTOR (pièce qui tourne (*rotor* provient de *rotation* qui signifie en mouvement tournant) est un *aimant* qui produit un *champ magnétique*. Cette pièce possède un axe. Cet axe est solidaire du rotor et lorsque l'axe est entraîné, il fait tourner le rotor.

III.6.4 Principes de fonctionnement

On produit du courant électrique en transformant une énergie mécanique (ou énergie motrice) en énergie électrique grâce à un phénomène appelée induction magnétique.

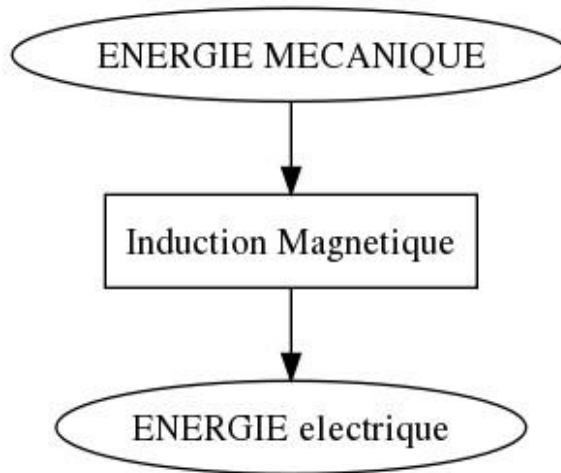


Figure III.19 : Principe de fonctionnement de l'alternateur

Le principe physique qui permet de produire de l'électricité avec un alternateur est donc le magnétisme. Le rotor est un aimant : il est magnétique. Grâce à son magnétisme, on va produire de l'électricité d'où son nom d'électroaimant.

En tournant, le rotor produit un champ magnétique. Sous son effet, dans le cuivre de la bobine du stator, il va se créer naturellement, un courant électrique. C'est ce courant « induit » qui est récupéré et utilisé en sortie de l'alternateur.

Dans les centrales, l'alternateur est souvent couplé avec une turbine ou un multiplicateur de vitesse (Ex : éolienne) par un axe (ou arbre) de transmission (dans certain cas, la transmission peut se faire à l'aide d'une courroie ou d'une chaîne). C'est cet axe qui transmet le mouvement rotatif au rotor.

Le schéma bloc fonctionnel suivant montre le lien entre les éléments de l'alternateur et leur fonction.

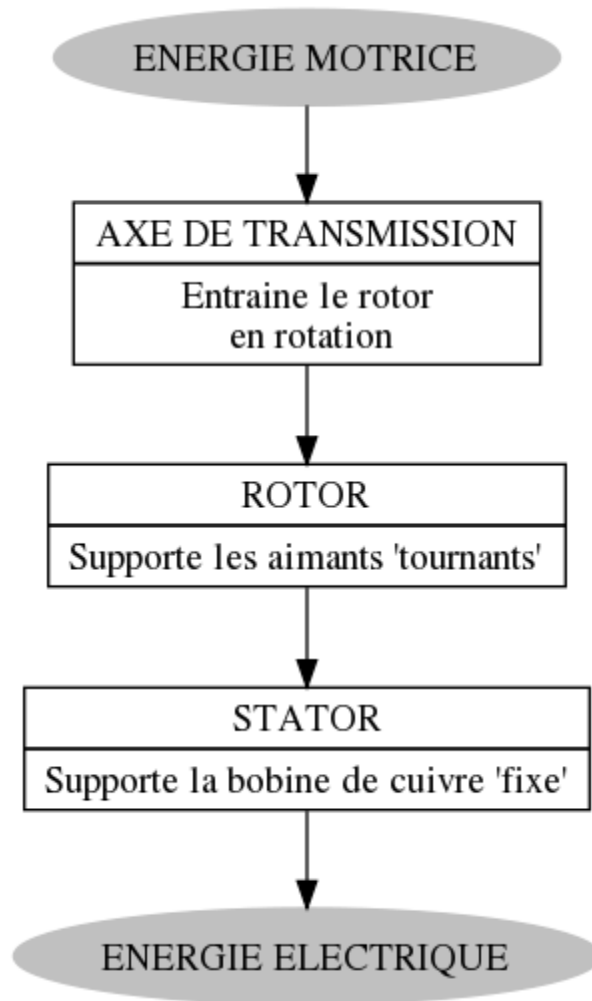


Figure III.20 : Bloc fonctionnel d'un Alternateur

III.7 Groupe Turbine-Alternateur (Turbo-alternateur)

Le rôle de la turbine est de transformer l'énergie de l'eau, de la vapeur ou du vent en énergie mécanique, de manière à faire tourner un alternateur. L'alternateur, à son tour, transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans le cas des centrales hydroélectriques, on appelle groupe turbine-alternateur la turbine et l'alternateur qui fonctionnent ensemble.

L'eau parvient au groupe turbine-alternateur par la conduite forcée qui l'achemine à la bêche spirale (conduit en colimaçon). Elle fait tourner les aubes et se dirige ensuite vers l'axe de la turbine pour s'écouler dans l'aspirateur situé en dessous. L'énergie mécanique produite par la puissante

pression exercée par l'eau sur la turbine est transmise à l'alternateur qui la transforme en énergie électrique.

Lorsque le rotor de l'alternateur (couplé avec la turbine) tourne dans le stator, les électrons présents dans les barres de cuivre « vibrent ». Le mouvement des électrons crée un courant électrique, un peu comme dans l'expérience de Faraday¹, réalisée en 1831 et portant sur l'induction électromagnétique, mais à très grande échelle.

Il est impératif que tous les groupes turbines-alternateurs d'un réseau soient rigoureusement synchronisés, c'est-à-dire qu'ils maintiennent très exactement leur vitesse de rotation. Pourquoi ? Afin de produire une énergie électrique de qualité. Les appareils qui consomment de l'électricité sont conçus en fonction d'un courant alternatif dont la fréquence est précise. Cette fréquence dépend de la vitesse de rotation du groupe, c'est-à-dire du nombre de fois par seconde que les aimants du rotor passent devant les barres de métal conductrices du stator. Cette fréquence s'exprime en cycles par seconde ou hertz (Hz), du nom du physicien allemand Heinrich Hertz, qui démontra l'existence des ondes radio.

En Amérique du Nord, le cycle normalisé du courant alternatif est de 60 fois par seconde, tandis qu'en Europe, il est de 50 fois par seconde. Cela signifie qu'une horloge dont le moteur est conçu pour tourner à 60 Hz prendrait du retard si elle était branchée dans une prise européenne, car elle fonctionnerait plus lentement.

¹ Découverte du phénomène de l'induction électromagnétique par le physicien et chimiste britannique Michael Faraday : celui-ci produit un courant électrique en déplaçant un aimant vers l'avant et vers l'arrière à l'intérieur d'un bobinage métallique. La découverte fait boule de neige : on s'empresse d'appliquer les principes innovateurs de Faraday pour satisfaire les besoins de production de l'ère industrielle. Ainsi, le premier générateur électrique, véritable précurseur des groupes turbines-alternateurs d'aujourd'hui, découle des principes de Faraday. Les expériences de Faraday amènent d'autres chercheurs à inventer notamment le premier moteur électrique et le premier transformateur, appareil essentiel au transport de l'électricité.

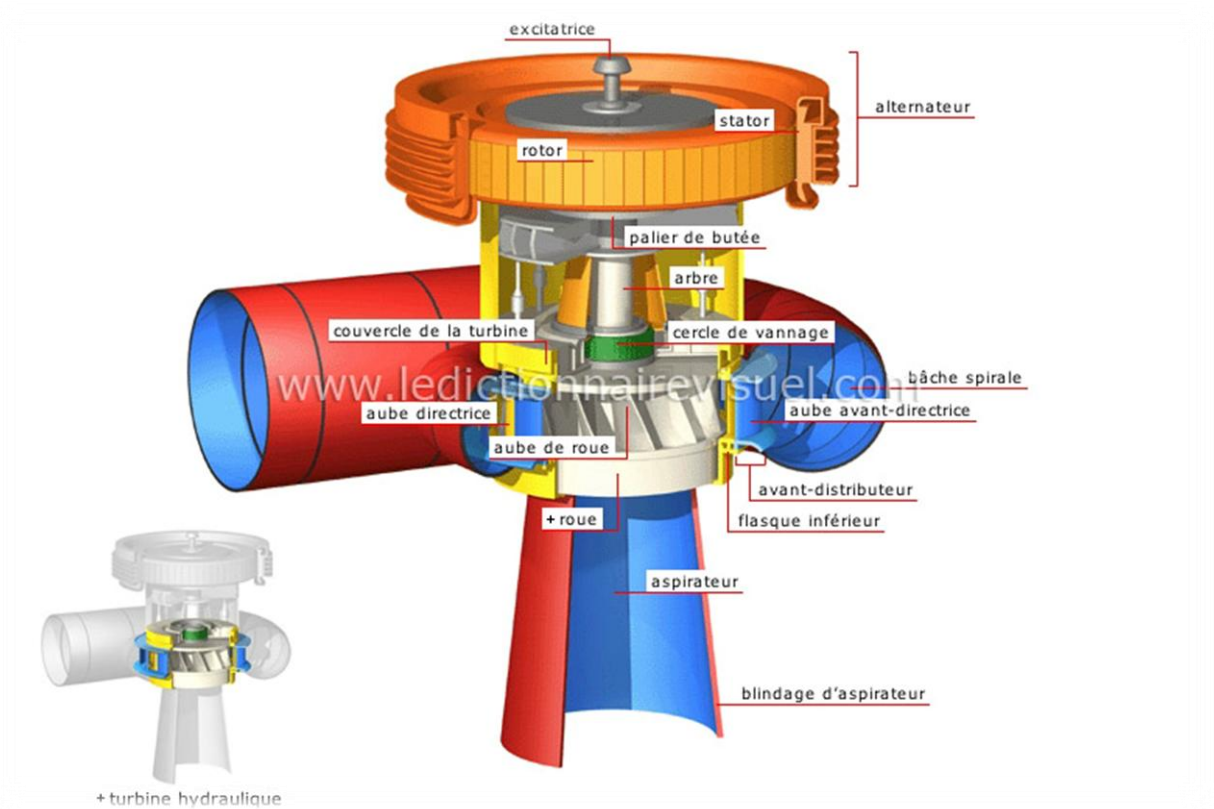


Figure III.21 : Groupe Turbo-alternateur

III.8 Types des centrales hydroélectriques

Le groupe Turbo-alternateur est le cœur de presque toutes les centrales de production d'électricité (sauf celle correspondante à l'énergie solaire), et notamment les centrales hydroélectriques.

La plus grande centrale en activité au monde, d'une puissance de 15 000 MW, est celle de la Grande, au Québec avant qu'elle ait été détrônée en 2009 par celle des trois gorges, en Chine. En France, la plus grande centrale est celle de Grand Maison, dans les Alpes (1800 MW). Pour une même puissance, une centrale hydroélectrique peut donc être alimentée soit par un faible débit tombant d'une grande hauteur de chute, soit par un débit important tombant d'une faible hauteur.

Ainsi, on distingue en pratique trois types d'aménagements selon ces deux facteurs (le débit de l'eau et la hauteur de chute).

III.8.1 Centrales Hydroélectrique de basse chute

Une **Centrale hydroélectrique** de basse chute est une centrale qui utilise une chute d'eau utile de 2 à 20 m. Généralement cette chute est équipée de turbines Kaplan, c'est à dire de turbines à hélices avec des directrices et pales fixes ou orientables. Ces turbines sont dites à réaction.

Les centrales sont dites de basse chute lorsqu'elles sont installées sur de grands fleuves à faible pente et à très fort débit (en France, le Rhin ou le Rhône). Dans ce cas l'électricité est produite en continu au fil de l'eau.



Figure III.22 : Centrale Hydroélectrique de basse chute

III.8.2 Centrales Hydroélectrique de moyenne chute

Une Centrale hydroélectrique de moyenne chute est une centrale qui utilise une chute d'eau utile de 5 à 100 m. Généralement cette chute est équipée de turbine Francis, c'est à dire de turbine ont le corps a la forme d'un escargot et la roue est à aube fixe. Le distributeur est généralement orientable.

Les centrales sont dites de moyenne chute lorsque celles-ci atteignent quelques dizaines de mètres. Les ouvrages sont généralement édifiés dans des régions de moyennes montagnes. L'usine où est produite l'électricité est le plus souvent située au pied du barrage.



Figure III.23 : Centrale Hydroélectrique de moyenne chute

III.8.3 Centrales Hydroélectrique de haute chute

Une Centrale hydroélectrique de haute chute est une centrale qui utilise une chute d'eau utile de plus de 50 m. Généralement cette chute est équipée de turbines Pelton, c'est à dire de turbines dites à action. C'est l'action directe de l'eau sur les augets de la roue qui produit l'énergie mécanique. La plus haute chute en service est celle de Reisseck Autriche 1765m.

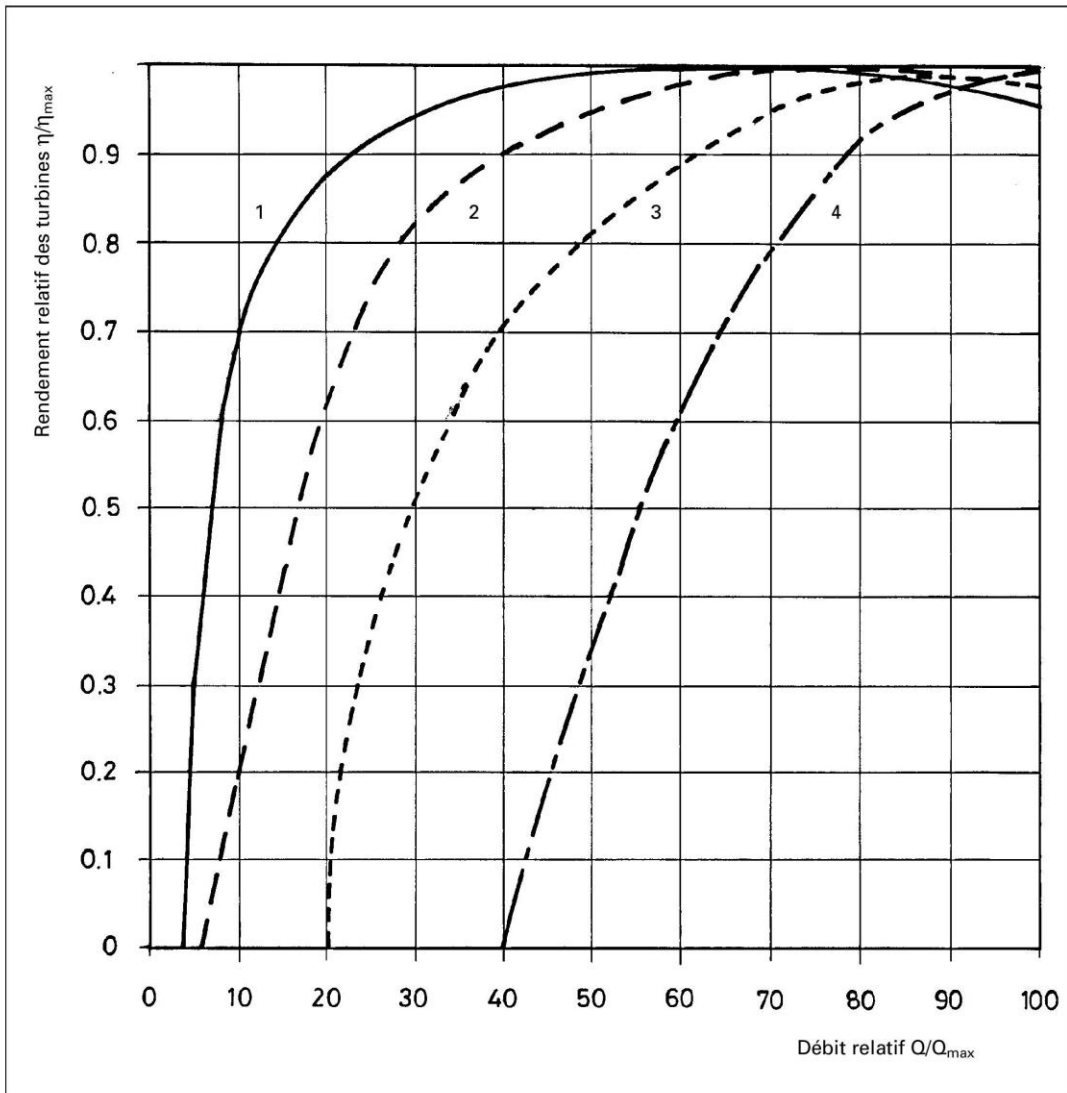


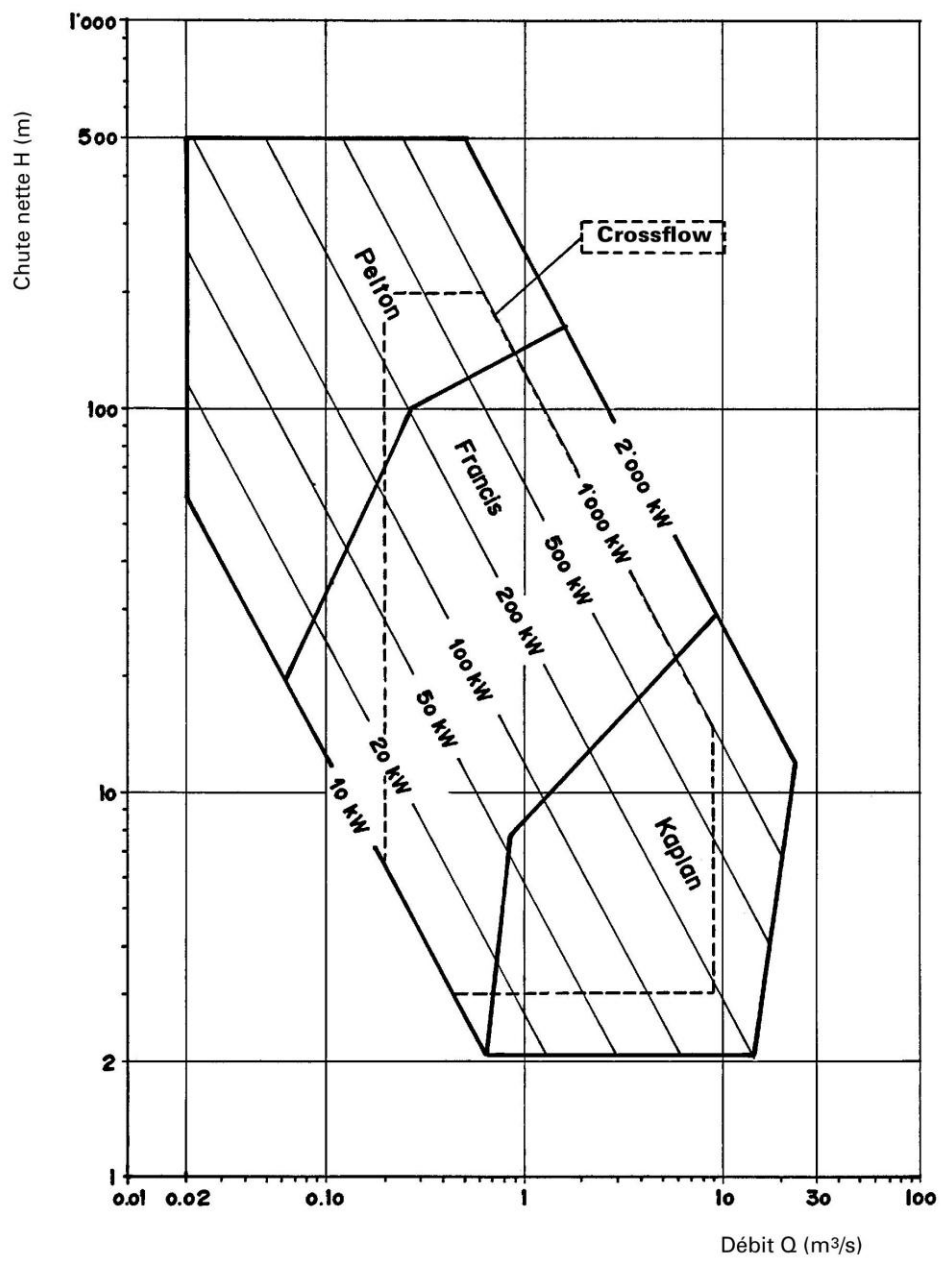
Figure III.24 : Centrale Hydroélectrique de haute chute

Table des matières

III.1 Introduction	31
III.2 La turbine hydraulique	32
III.2.1 Définition.....	32
III.2.2 Différents types des turbines hydrauliques.....	34
III.2.2.1 Turbine à action (Pelton, Crossflow).....	34
III.2.2 Turbine à réaction (Francis, Kaplan, Hélice, Pompe inversée)	35
III.3 Composants d'une turbine hydraulique.....	36
III.3.1 Exemple d'une turbine à réaction de type Kaplan.....	36
III.3.2 Exemple d'une turbine à action de type Pelton	37
III.4 Classification des turbines hydrauliques	38
III.4.1 Classification des turbines – débit et hauteur de chute.....	38
III.4.2 Classification des turbines – vitesse spécifiques	38
III.4.2.1 Vitesse spécifique N_s	38
III.4.2.2 Vitesse spécifique n_q	39
III.4.3 Vitesse spécifique V	39
III.5 Paramètres commun à tous les types de turbines	44
III.5.1 Composants, profil en long et ligne d'énergie d'une petite centrale hydraulique	45
III.5.2 Puissance hydraulique d'une turbine.....	50
III.5.3 Couple, vitesse de rotation, puissance mécanique et rendement d'une turbine	52
III.6 L'alternateur	54

III.6.1 Définition.....	54
III.6.2 Intérêt.....	54
III.6.3 Principaux constituants d'un alternateur	55
III.6.4 principes de fonctionnement.....	55
III.7 groupe Turbine – Alternateur (turbo-alternateur)	57
III.8 types des centrales hydroélectriques	59
III.8.1 Centrale hydroélectrique de basse chute	60
III.8.2 Centrale hydroélectrique de moyenne chute	60
III.8.3 Centrale hydroélectrique de haute chute	61





IV.1 Introduction

On a vu dans le chapitre précédent qu'il y a trois types des centrales hydroélectrique classé selon deux facteurs, le débit de l'eau et la hauteur de chute.

La recherche de solutions techniquement sûres et économiquement viables pour l'exploitation des sites hydrauliques a imposé au fil des ans un petit nombre de types de turbines. Chacun de ces types a un domaine d'application privilégié. On distingue trois familles de turbines pour la production hydroélectrique industrielle.

La turbine Pelton s'impose généralement pour les énergies massiques supérieures à 4000 J/kg ;

La turbine Kaplan et ses variantes (turbines hélices et bulbes) offrent souvent la meilleure solution pour les énergies hydrauliques massiques inférieures à 300 J/kg ;

Entre ces deux limites, on trouve le domaine d'application privilégié de la turbine Francis. Dans des applications spéciales, on voit même ces turbines concurrencer les autres types.

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.

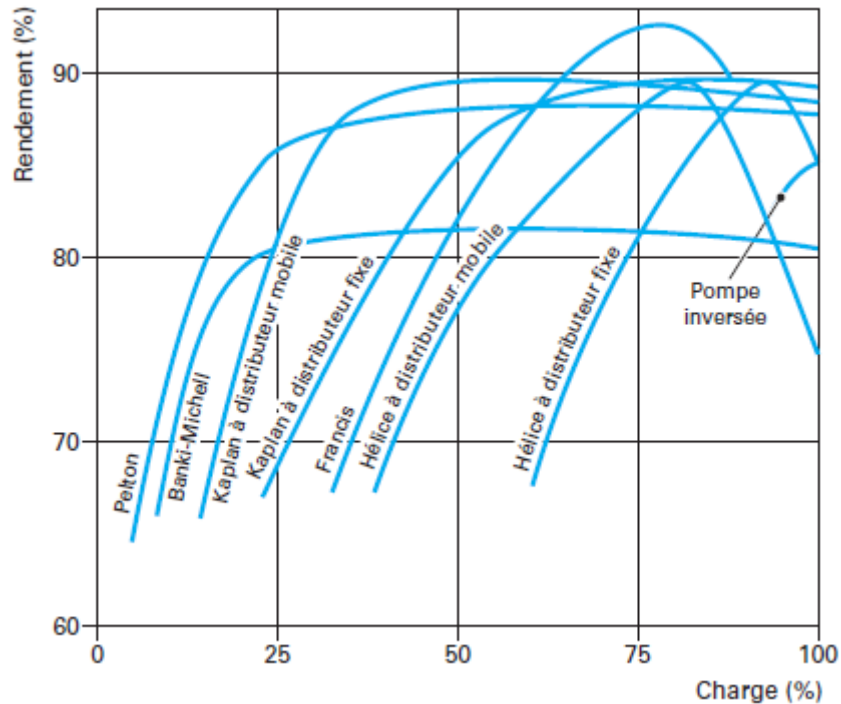


Figure IV.1– Rendements des divers types de turbines

Ce chapitre est consacré à l'étude d'une turbine spécifique est celle de Francis.

IV.2 Description de la turbine Francis

IV.2.1 Principe de fonctionnement

Une turbine Francis est une turbine hydraulique de type à réaction¹. 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).

¹ On les appelle turbines à réaction lorsque la pression à l'entrée de la roue est supérieure à la pression de sortie de la roue.

Chapitre IV

La turbine Francis

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.

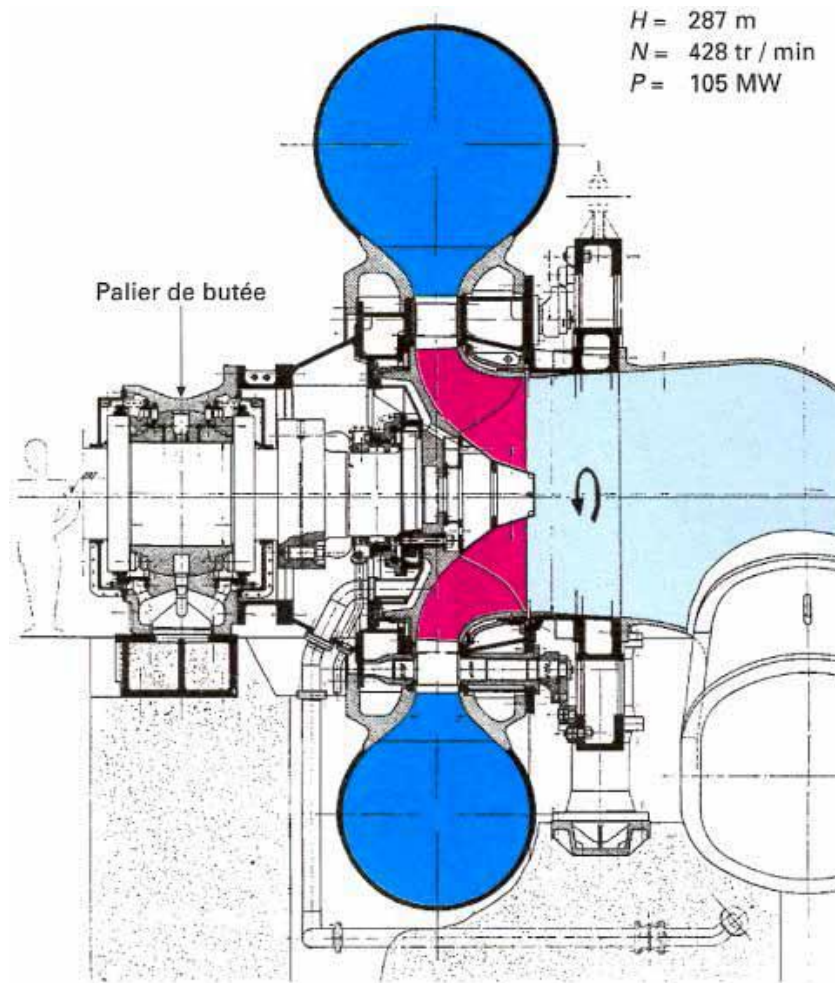


Figure IV.2 : Turbine Francis à axe horizontal : centrale de Vianden (Luxembourg)

IV.2.2 Éléments de construction

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

- Une bêche spirale reçoit l'eau sous pression de la conduite forcée et la distribue vers l'intérieur de l'anneau qu'elle forme. Sa tenue mécanique est assurée par un cercle d'entretoises profilées.
- Le distributeur est placé au milieu de l'anneau de la bêche spirale. Ses vingt à trente aubes orientables, placées dans le prolongement des entretoises, permettent d'ajuster le débit-volume turbiné.
- Une roue à admission radiale centripète, à sortie axiale 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 dévient pour ne lui laisser qu'une rotation minimale. Le moment cinétique ainsi absorbé produit le couple transmis à l'arbre de la turbine.
- 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.

Deux principes sont à la base de son fonctionnement : le premier est la création d'un tourbillon au moyen de la bêche spirale et d'aubages directeurs, le deuxième est 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.

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 : lorsqu'une aube se déplace dans l'eau, il se produit sur une des faces (intrados) une zone de surpression et sur l'autre (extrados) une zone de dépression. Cette différence de pression produit le mouvement de rotation de la roue. L'arbre de la turbine est couplé au générateur qui réalise la transformation en énergie électrique.

L'eau sort de la roue avec une énergie cinétique résiduelle, le diffuseur se charge de la ralentir, transforme l'énergie cinétique en énergie de pression, et conduit l'eau jusqu'au réservoir en aval.

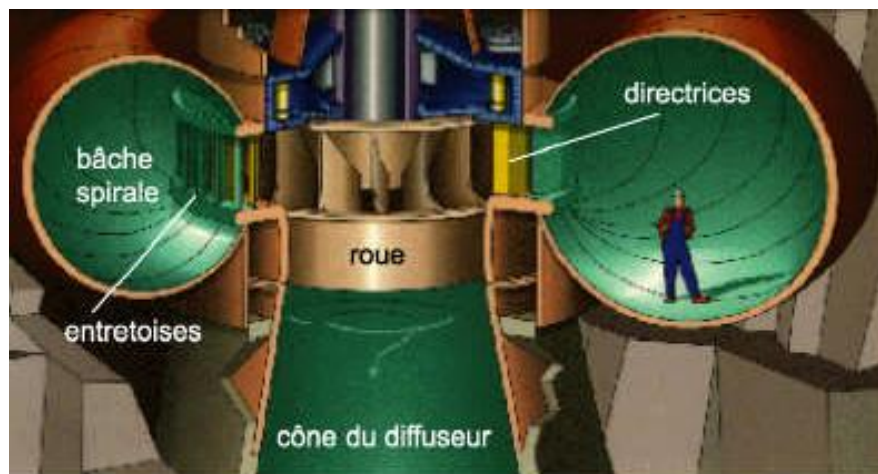


Figure IV.3: Composantes d'une turbine de type Francis.

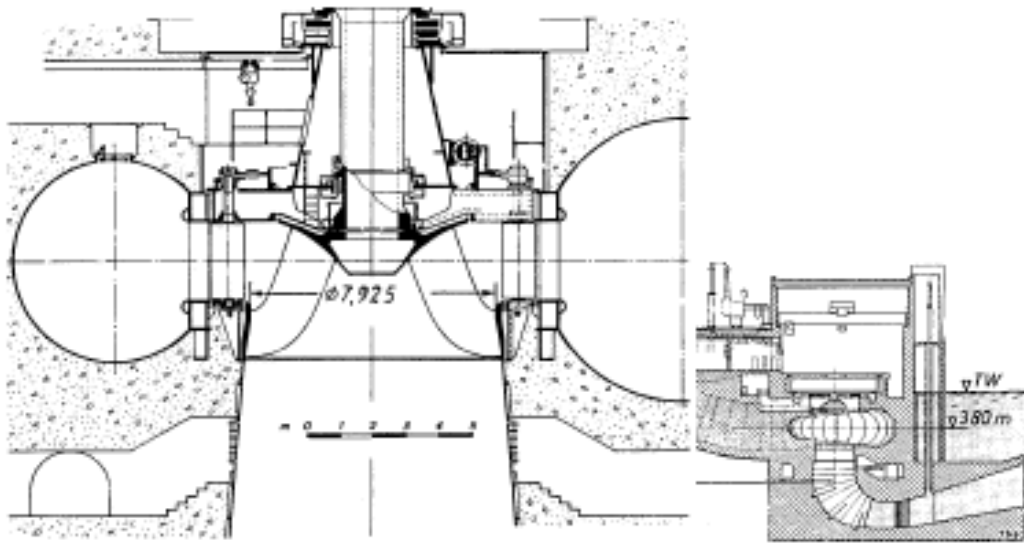


Figure IV.4 : Turbine Francis

IV.2.3 Paramètres de fonctionnement

Les conditions d'écoulement dans une turbine Francis de géométrie donnée sont entièrement déterminées par l'énergie hydraulique massique absorbée E , le débit volumique Q et la vitesse angulaire ω . Comme les turbines hydrauliques entraînent généralement des alternateurs couplés sur un réseau de distribution électrique, la vitesse angulaire ne varie pas. On représente donc la caractéristique de fonctionnement de la machine dans un diagramme E-Q à vitesse constante. Des courbes indiquent E en fonction Q de pour différents angles d'ouverture γ des aubes directrices. En effet, γ est définie comme l'angle entre direction du fluide et corde du profil. L'efficacité de la transformation de puissance hydraulique en puissance mécanique est reportée sous forme de courbes d'égal rendement η , et vaut à la caractéristique le nom de colline de rendement.

IV.2.4 Coefficients adimensionnels

Des coefficients sans dimension sont utilisés pour comparer des machines ayant des géométries, des vitesses de rotation ou d'autres paramètres différents. Les conditions de fonctionnement, ou points de fonctionnement, peuvent être décrites par les deux coefficients suivants : le coefficient de débit ϕ , et le coefficient de charge Ψ .

$$\Psi = \frac{2E}{R^2\omega^2}$$

$$\phi = \frac{Q}{\pi R^3\omega}$$

Où R le rayon de la roue à l'attache de l'arête basse pression de l'aube sur la couronne extérieure, est la dimension de référence de la turbine.

La colline de rendement adimensionnelle $\eta(\Psi, \phi)$, avec les courbes $\Psi(\gamma, Q)$ (figure IV.5) est semblable à la colline dimensionnelle $\eta(E, Q)$ avec les courbes $\eta(\gamma, Q)$ à R et ω constants.

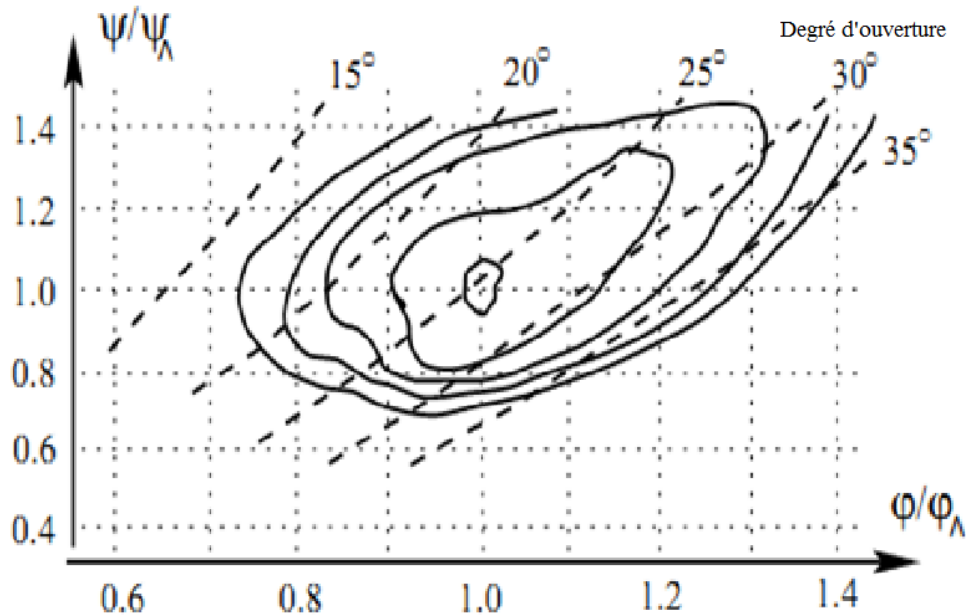


Figure IV.5: Colline de rendement d'une turbine Francis

La vitesse spécifique V_s est un paramètre adimensionnel résultant de la combinaison du coefficient d'énergie et de débit faisant disparaître la grandeur géométrique R . Des turbine de tracés hydrauliques différents, de dimensions éventuellement différentes mais travaillant au même régime hydraulique peuvent être comparées grâce à la vitesse spécifique.

$$V_s = \frac{\phi^{1/2}}{\psi^{3/4}}$$

Au point nominal, V_s est un critère de classification des tracés des machines. Les turbines Francis ont des vitesses spécifiques comprises entre 0.14 et 0.65. On parle de turbines lentes pour $V_s \leq 0.35$, rapides pour $V_s \geq 0.65$ et moyennes pour des vitesses spécifique comprises entre les deux.

IV.2.5 Écoulement dans une turbine Francis

Il y a deux décompositions courantes des vitesses d'écoulement, présentées dans les figures IV.5 et IV.6. La première, plus expérimentale, donne les trois composantes orthogonales du vecteur de vitesse dans un référentiel cylindrique fixé par la roue: C_a est la composante axiale, C_r la composante radiale et C_u la composante périphérique de la vitesse d'écoulement.

La seconde, qui permet de raisonner plus facilement sur l'interaction entre le fluide en mouvement et les aubes fixes ou en rotation, décompose le vecteur vitesse dans un plan normal au plan méridien et tangent à la ligne de courant méridienne au point considéré : C_m vitesse débitante, dans le plan méridien et C_u dans la direction perpendiculaire. C_u , composante périphérique de la vitesse d'écoulement, est ainsi directement comparable à U , vitesse périphérique de la roue au rayon du point considéré. La vitesse relative du fluide par rapport à l'aube de roue est $\vec{W} = \vec{C} - \vec{U}$. Les angles d'écoulement absolue α et relatif

d'aubage β , que forment la vitesse absolue \vec{C} et la vitesse relative \vec{W} avec la vitesse périphérique \vec{U} sont directement lisibles sur ce triangle de vitesses (figure IV.6).

Le théorème du moment moteur, démontré par Euler, établit un lien entre l'énergie hydraulique massique transférée par le fluide à l'aubage et les vitesses aux limites de l'aubage :

$$E_t = U_1 C_{u1} - U_2 C_{u2} \quad [\text{J/kg}]$$

Un raisonnement qualitatif global peut s'appuyer sur un triangle de vitesses qu'on estime représentatif de tout l'écoulement en sortie de roue au régime de tracé (figure IV.7). Pour fixer les idées, disons que la composante circonférentielle C_{u2} de la vitesse d'écoulement est nulle au régime optimal, afin de minimiser les pertes par vitesse restante.

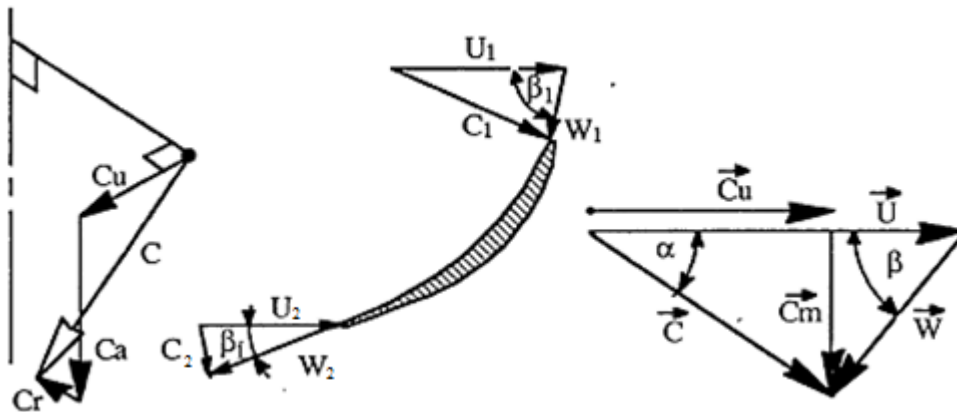


Figure IV.6: Vitesses d'écoulement : décomposition cylindrique et triangles de vitesse à l'entrée et à la sortie d'une aube de turbine Francis

Si le débit-volume augmente, toutes autres choses égales, et si le fluide quitte l'aubage tangentiellement à son squelette, la croissance de la vitesse méridienne C_m ne peut se faire que

par ouverture de l'angle d'écoulement α , avec apparition d'une vitesse C_{u2} négative. Si en revanche le débit-volume est réduit, C_m plus petite impose C_{u2} positive. Les variations de régime de fonctionnement de la charge partielle à la forte charge feront donc apparaître une inversion du sens de rotation de l'écoulement à la sortie de la roue, avec une plage de rotation minimale autour du régime pour lequel la roue est principalement conçue.

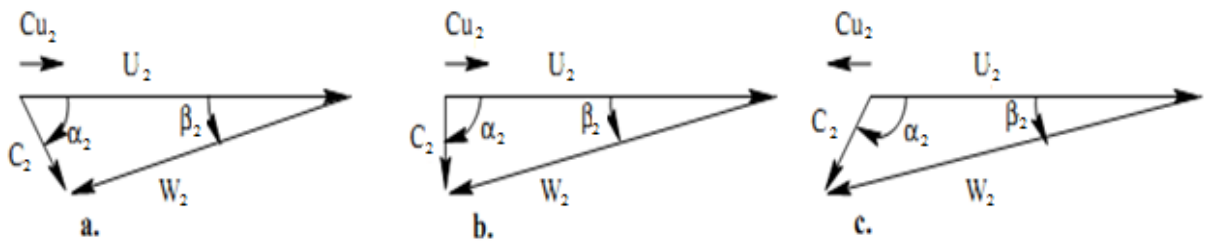


Figure IV.7: Triangles de vitesses à la sortie d'une roue de turbine Francis à différents régimes:

- a.** charge partielle, rotation résiduelle dans le même sens que la roue **b.** régime optimal, rotation résiduelle minimale **c.** forte charge, rotation résiduelle opposée à celle de la roue.

La détermination des paramètres hydrauliques est possible à partir de la connaissance de l'écoulement dans la turbine. Les méthodes traditionnelles d'analyse en mécanique des fluides sont utilisées. Par contre, concernant la conception et l'analyse des performances et malgré les grands efforts menés dans ce domaine, l'expérimentation ne représente pas la solution la plus abordable pour accomplir cette tâche. C'est donc pour quoi la simulation numérique des écoulements et l'application de la CFD (*Computational Fluid Dynamics*) est devenue un outil puissant dans la voie de la détermination des performances des turbines hydrauliques.

IV.3 Implantation d'une turbine à réaction

IV.3.1 Hauteur d'aspiration

La hauteur d'aspiration H_s d'une turbine à réaction, définie sur la figure IV.8, est mesurée entre le plan d'eau aval et l'axe de la roue de la turbine. La valeur de H_s est positive si la turbine se trouve au-dessus du niveau d'eau aval et négative dans le cas contraire.

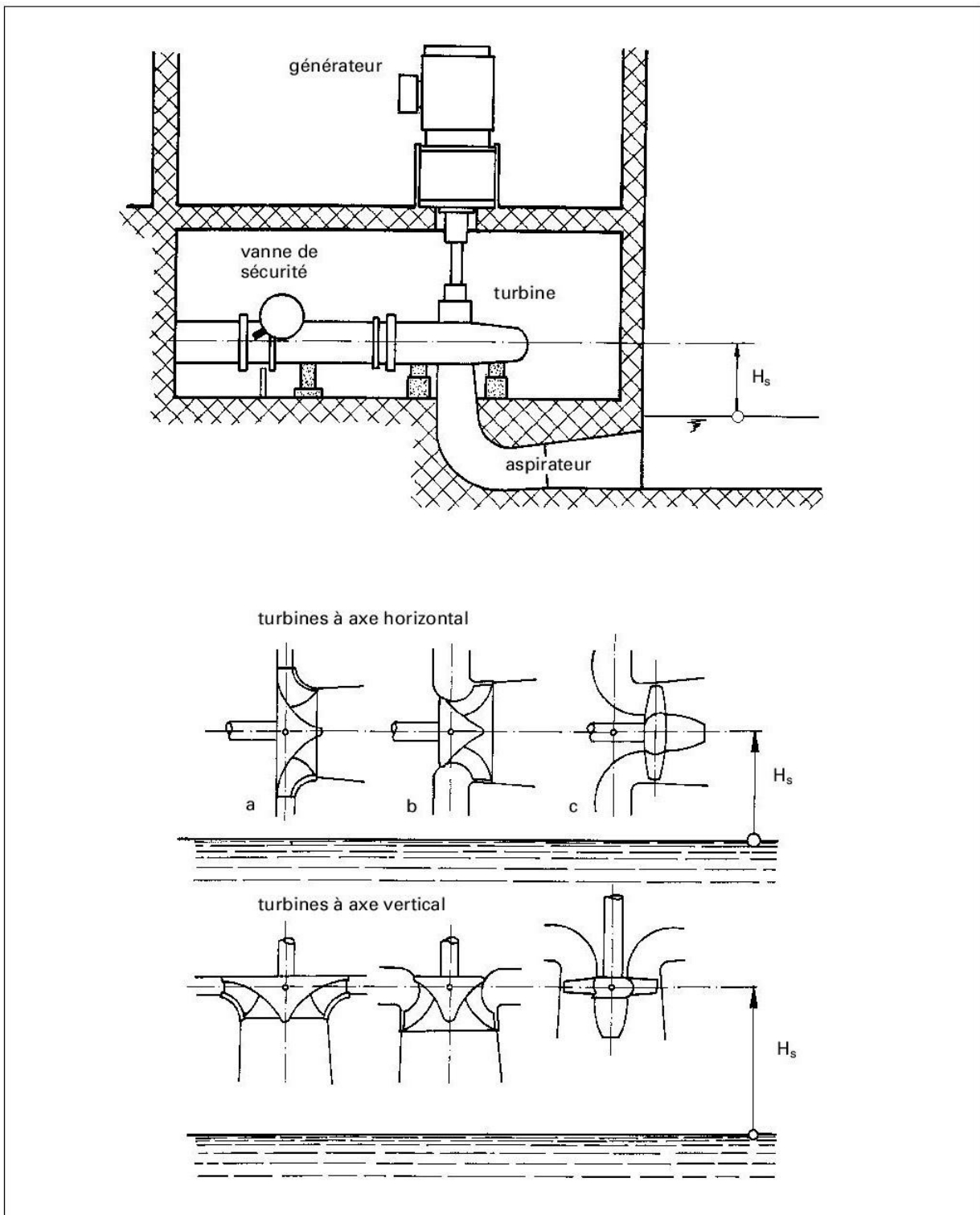


Figure IV.8 : Hauteur d'aspiration H_s pour différents types de turbines

a) turbine Francis lente (n_q petit) ; c) turbine Kaplan ou hélice ;

b) turbine Francis rapide (n_q grand) ; H_s positif ; niveau de l'eau aval plus bas que la turbine

IV.3.2 Hauteur d'aspiration et cavitation

Pour réduire les frais de construction du génie civil, une turbine à réaction sera placée le plus haut possible par rapport au niveau aval (H_s maximum).

Mais, en surélevant la turbine, la pression devient négative à la sortie de la roue de la turbine (dépression).

A la dépression statique, égale à la hauteur d'aspiration, se soustrait encore la dépression dynamique due à l'écoulement de l'eau autour du profil de l'aube (voir aussi §IV.3.4).

En effet, lorsqu'un profil d'aube de turbine se déplace dans l'eau, il se produit sur une de ses faces (l'intrados) une zone de surpression et sur l'autre (l'extrados) une zone de dépression.

Ce sont ces différences de pressions entre intrados et extrados qui créent la force hydrodynamique sur le profil qui mettra la turbine en rotation. La figure IV.9.a représente la répartition des pressions dynamiques autour d'un profil.

En augmentant la hauteur d'aspiration, la dépression sur l'extrados ajoutée à la dépression statique atteint localement la pression de vaporisation de l'eau. Il y a alors formation de bulles de vapeur qui se détachent de la surface de l'aube en suivant l'écoulement.

Dès qu'elles atteignent une zone où la pression est plus élevée, les bulles de vapeur implosent en créant de fortes ondes de pression dynamique.

Ces implosions de bulles de vapeur ont pour conséquence un crépitement caractéristique, ou bruit de cavitation, et provoquent avec le temps l'érosion par enlèvement de matière de la surface de l'aubage.

La figure IV.9.a présente schématiquement le phénomène de la cavitation, et les photos de la figure IV.9.b en montrent les dégâts sur des roues de pompes et de turbines.

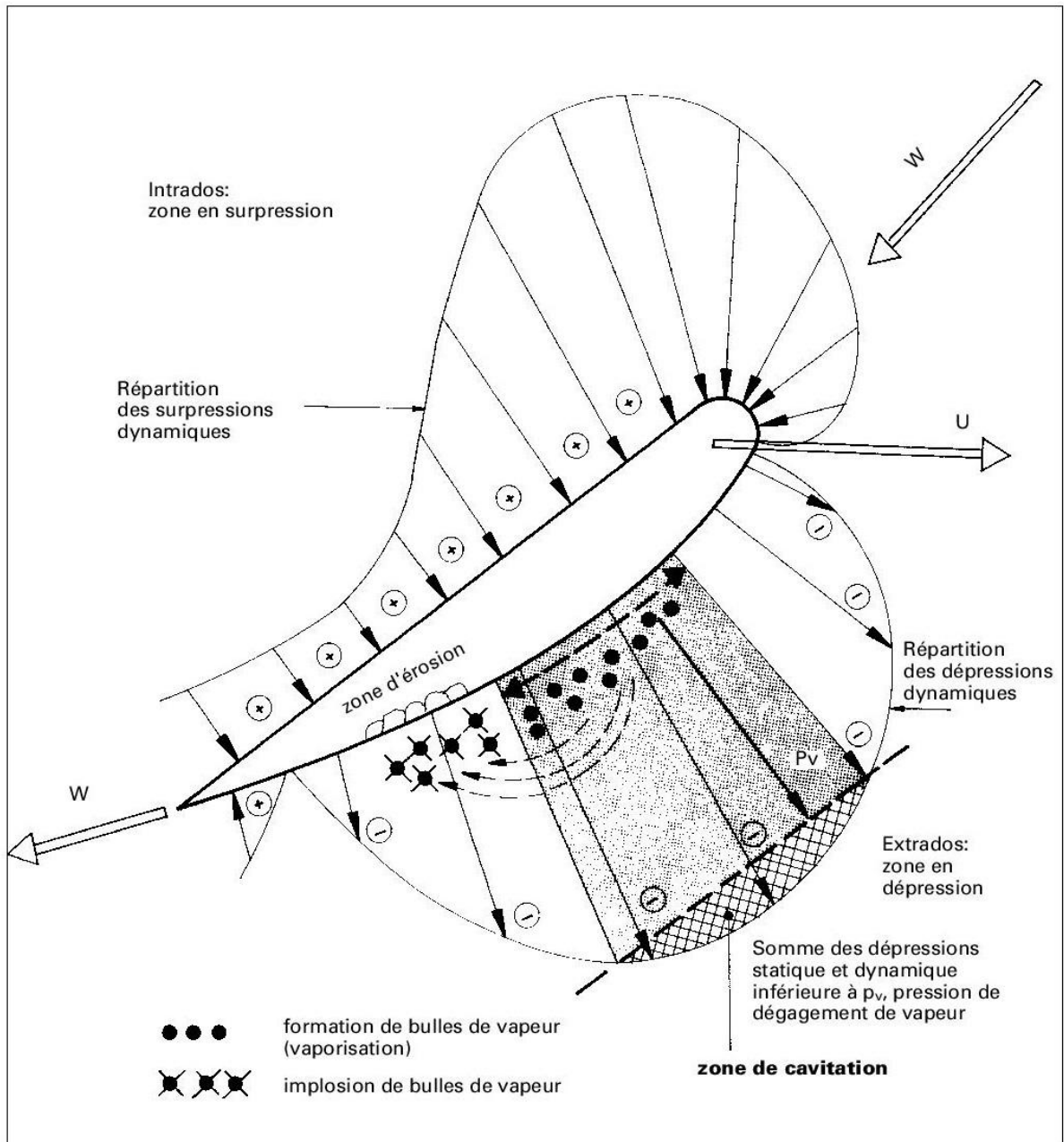


Figure IV.9.a: Phénomène de cavitation sur un aubage de turbine

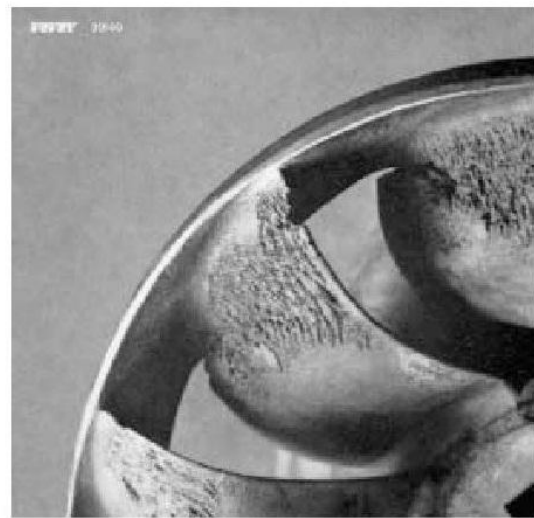
W : vitesse relative de l'eau par rapport à l'aubage en rotation ;

U : vitesse de l'aubage.



Roue de turbine Francis
érodée par cavitation

Plages cavitées sur l'extrados
de l'aubage d'une roue Francis



Roue de pompe radiale
détruite par cavitation

Figure IV.9.b : Dégâts par cavitation sur des roues de pompes et de turbines

IV.3.3 Torche de la vapeur

L'écoulement dans une turbine à réaction se compose d'un tourbillon à l'entrée de la roue, et d'un tourbillon à la sortie de la roue. Ce dernier ne disparaît complètement qu'au point de fonctionnement optimum de la turbine (point de meilleur rendement η^{\wedge}).

Pour d'autres débits, en particulier pour les débits inférieurs, entre 40 et 60 % du débit nominal, le tourbillon de sortie devient très intense, et il peut provoquer de violentes instabilités. Un même type de phénomène peut se produire en surcharge avec une torche qui devient axiale.

Ces instabilités sont dues au phénomène de la torche de cavitation : au cœur du tourbillon de sortie, là où la pression est basse, il se forme une colonne, ou torche de vapeur d'eau.

Plus en avant dans l'aspirateur, cette torche de vapeur implose violemment. Il s'en suit des chocs à basse fréquence qui peuvent mettre en danger l'installation :

- en provoquant des charges dynamiques élevées sur la machine et les fondations ;
- en induisant des pulsations de pression dans la conduite et par là des fluctuations de débit et de puissance.

Ce phénomène peut être difficile à prévoir ; un des remèdes efficace le plus connu consiste à injecter de l'air dans l'aspirateur au droit de la sortie de la roue.

Cet air permet d'amortir les chocs et éventuellement de modifier les fréquences des pulsations, mais il peut entraîner une baisse de rendement de la turbine de 1 à 2%.

Il est utile d'indiquer le domaine de fonctionnement prévu de la turbine dans le cahier d'un appel d'offres, afin que le fournisseur de la machine ne néglige pas le phénomène de la torche et prenne le cas échéant les mesures préventives nécessaires.

La figure IV.10 montre schématiquement une torche de cavitation à la sortie d'une turbine Francis et les points possibles pour l'injection d'air.

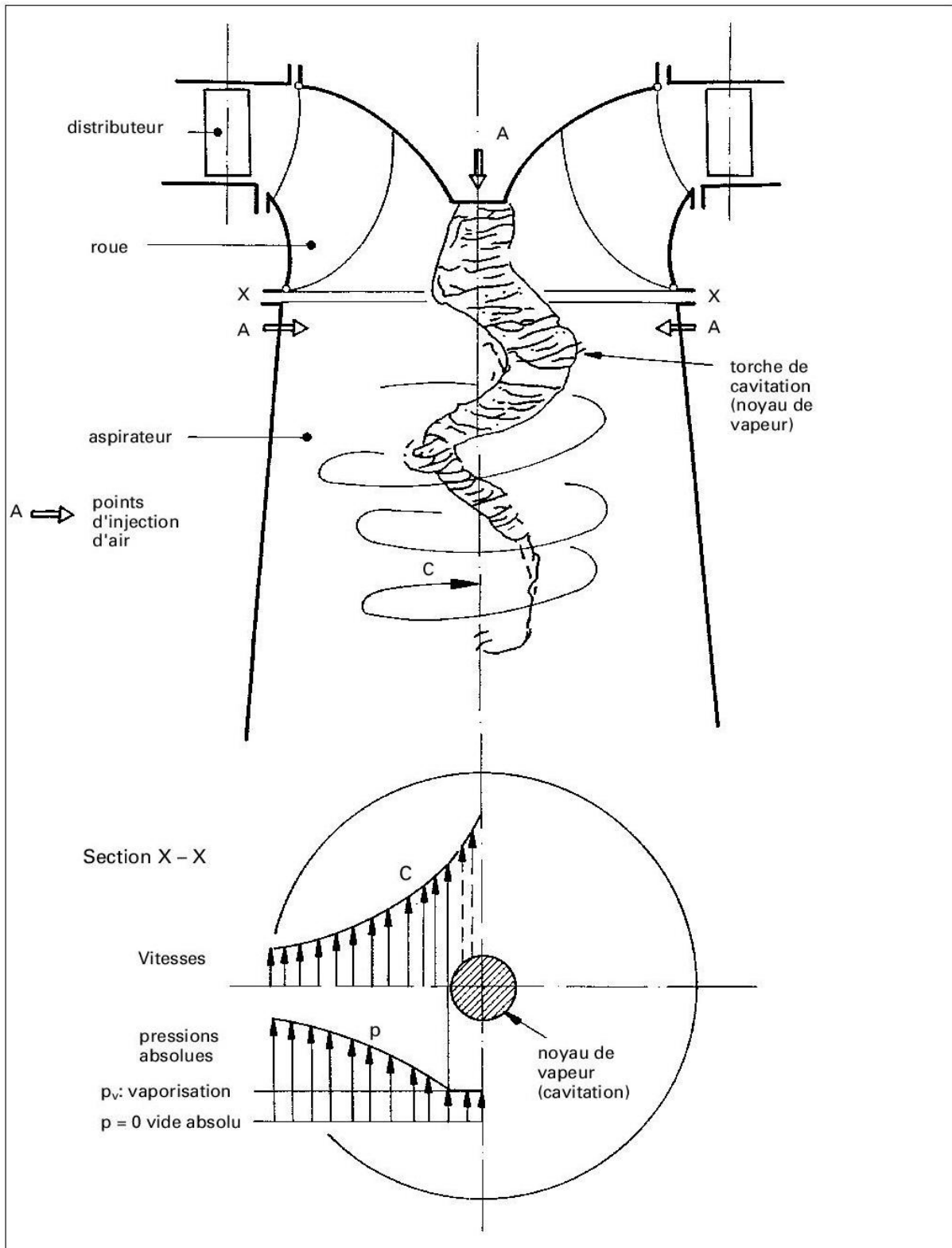


Figure IV.10 : Représentation d'une torche de cavitation à la sortie d'une turbine Francis et répartition des vitesses et pressions absolues à la sortie de la roue

IV.3.4 Calcul de la hauteur d'aspiration limite d'une turbine à réaction

Hauteur d'aspiration théorique :

Sans tenir compte des effets dynamiques dus à la vitesse de l'eau, la pression de dégagement de vapeur est atteinte lorsque :

$$H_{sth} = H_a - H_V$$

ou :

H_{sth} = hauteur d'aspiration théoriquement possible en m ;

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 .

Les survitesses et dépressions locales sur l'aubage de la turbine (voir figure IV.9.a) font que la pression de dégagement de vapeur est atteinte pour une valeur de H_s inférieure à la valeur théorique susmentionnée.

Pour tenir compte de ce phénomène, les praticiens ont introduit une hauteur d'aspiration complémentaire $\sigma \cdot H$ induite par l'écoulement

ou

H est la chute nette de la turbine en m

et

σ un coefficient sans dimension, dit coefficient de Thoma.

La valeur H_{sth} est donc réduite à :

$$H_s = H_{sth} - \sigma \cdot H$$

H_s : hauteur d'aspiration limite au-delà de laquelle apparaît une cavitation suffisante pour endommager la roue.

La figure IV.11 représente schématiquement la répartition des pressions à l'aval d'une turbine à réaction.

Des valeurs indicatives de ρ ont été établies sur des bases statistiques pour les turbines et pour les pompes. Elles sont fonction de la vitesse spécifique de la machine hydraulique considérée.

Les courbes utiles pour un prédimensionnement (calcul estimatif de H_s) sont représentées dans la figure IV.12.b .

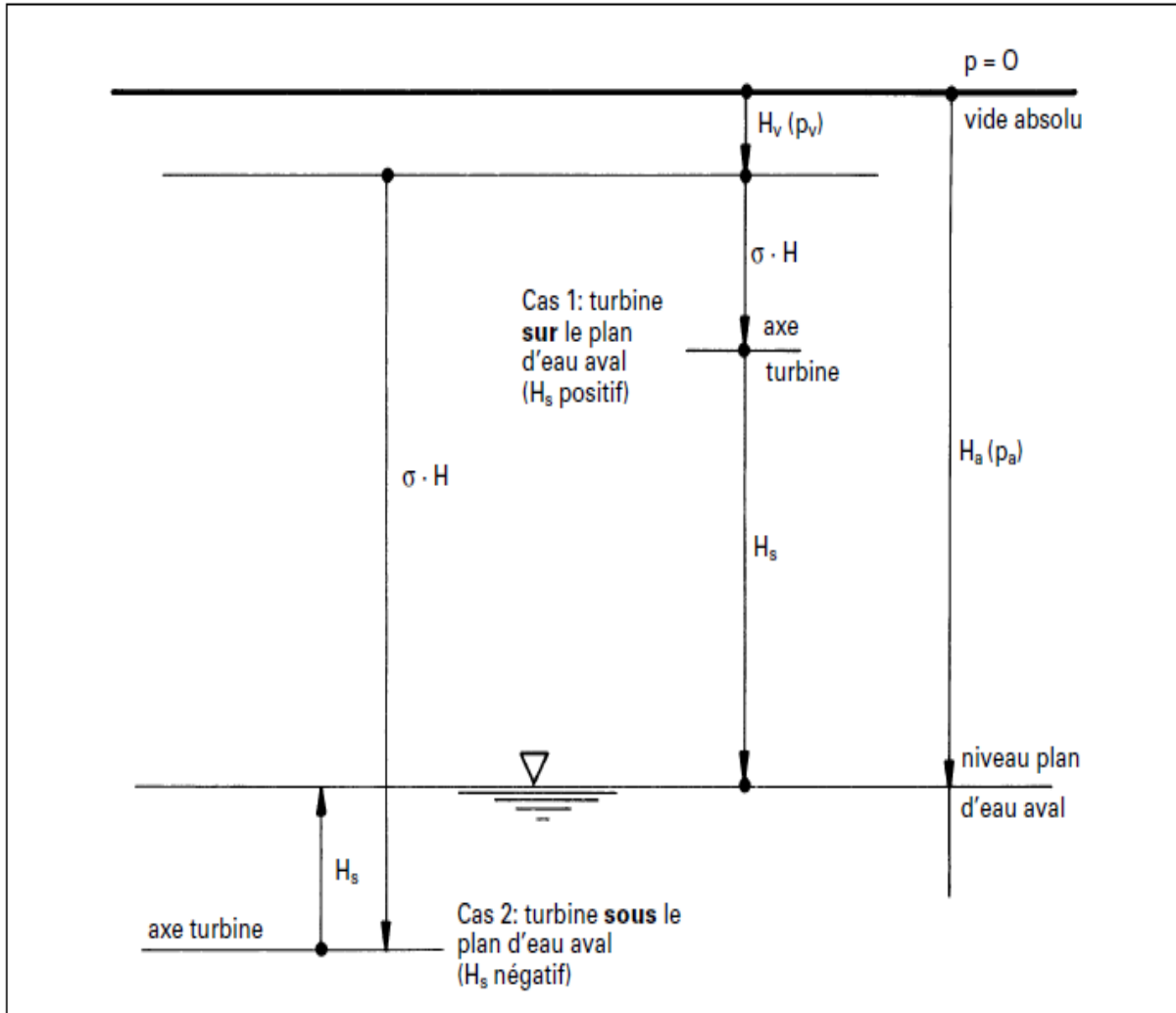


Figure IV.11: Pressions utiles pour le calcul de la hauteur d'aspiration limite d'une turbine à réaction ou d'une pompe

$H_a(P_a)$: pression atmosphérique (pression sur niveau d'eau aval) (m);

H_s : hauteur d'aspiration limite de la turbine (seuil critique de cavitation) (m);

$\sigma \cdot H$: hauteur pour compensation de la dépression dynamique de l'écoulement autour de l'aubage (m);

$H_v(P_v)$: pression de dégagement de vapeur (m).

Chapitre IV

La turbine Francis

Altitude	0	500	1000	2000	(m)
H_a	10	9,42	8,87	7,84	(m)

Tableau IV. 1 : variation de la pression atmosphérique

Température	8	10	15	20	25	30	°C
H_V	0,105	0,125	0,155	0,24	0,325	0,435	(m)

Tableau IV. 2 : variation de la pression de dégagement de vapeur

(atmosphère normalisée internationale INA)

Les pressions sont exprimées en hauteur de colonne d'eau

Relation entre pression P_i et hauteur H_i :

$$P_i = \rho \cdot g \cdot H_i \text{ ou } H_i = P_i / \rho \cdot g$$

P_i : pression (N/m^2 ; 1 bar = $10^5 N/m^2$) ;

H_i : hauteur équivalente en colonne d'eau [m];

ρ : masse volumique de l'eau ($1000 kg/m^3$) ;

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

Ces valeurs sont indicatives et elles devront être confirmées et précisées par le fabricant de la turbine dans le cadre de son offre.

Pour le calcul de la hauteur d'aspiration, la formule suivante sera donc utilisée :

$$H_s = H_a - H_V - \sigma \cdot H$$

Lors d'une étude d'un projet, il conviendra de se souvenir que :

La pression atmosphérique P_a ou H_a varie avec l'altitude et la température de l'air à l'emplacement de la centrale hydraulique ;

la pression de dégagement de vapeur P_V (ou H_V) varie avec la température de l'eau.

Quelques valeurs de ces paramètres sont indiquées à la figure IV.11.

H_s est une valeur déterminante pour fixer le niveau de la turbine par rapport au plan d'eau aval (voir § IV.5).

IV.4 Vitesse et débit d'emballlement d'une turbine à réaction

Pour les turbines à action, la vitesse d'emballlement ne dépend que de la chute et du diamètre de la roue de la turbine, quel qu'en soit le type.

Ce n'est plus le cas pour les turbines à réaction, dans lesquelles l'écoulement du fluide est plus complexe. En particulier, si l'écoulement dans la roue de la turbine est radial, il se produit lors de l'emballlement un effet de «pompage», dû à l'effet de la force centrifuge, qui limite la vitesse d'emballlement et diminue le débit.

Ce phénomène est plus particulièrement marqué pour les pompes centrifuges utilisées comme turbine, dont le diamètre de la roue est plus grand que celui d'une turbine Francis équivalente.

Une turbine axiale n'offrira que peu de résistance à l'eau lors de l'emballlement. L'aubage aura tendance à se « visser » dans la spirale du tourbillon généré par la bêche spirale

ou le distributeur. Les turbines axiales auront, en conséquence, des vitesses d'emballement très élevées, jusqu'à 3 fois la vitesse nominale, ce qui aura une incidence sur la conception mécanique de la génératrice.

Il est donc important que le fournisseur de la turbine indique clairement dans son offre, pour une chute nette donnée, la vitesse et le débit d'emballement de sa machine.

A titre indicatif pour un avant projet, adopter les valeurs suivantes :

Type de turbine	Rapport n_e/n_n <i>vitesse d'emballement/vitesse nominale</i>
Francis, $n_q = 40 \dots 80$	1,7 2,0
Francis, $n_q = 80 \dots 120$	2,0 2,2
Hélice, à pales et distributeur fixes	1,8 2,2
Kaplan, à pales et à distributeur fixe	2,4 2,8
Kaplan, à pales et à distributeur réglable	2,4 3,2
Pompes inversées, $n_q = 30 \dots 100$	1,4 1,8

Tableau IV. 3 : Rapport vitesse d'emballement /vitesse nominale n_e/n_n

$n_q < 100$	$Q_e < Q_n$
$n_q \cong 100$	$Q_e \cong Q_n$
$n_q > 100$	$Q_e > Q_n$

Tableau IV. 4 : Rapport débit d'emballement / débit nominal

IV.5 Sélection d'un ou plusieurs types de turbines (implantation de la turbine)

Pour les chutes hautes à moyennes, la turbine sera très certainement alimentée par une conduite forcée et installée au-dessus du niveau aval.

Selon le type de turbine choisi, l'énergie aval, c'est-à-dire la hauteur entre l'axe de la turbine et le niveau d'eau dans le canal de fuite sera partiellement ou totalement perdue :

– Turbines Pelton :

énergie aval perdue (roue dénoyée)

– Turbines Crossflow:

50 à 75 % de l'énergie aval pourra être récupérée par l'aspirateur (attention: hauteur d'aspiration limitée à env. 3 m pour raison de cavitation)

– Turbines à réaction :

(Francis, Kaplan, pompes inversées) l'énergie aval peut être totalement récupérée (pertes incluses dans le rendement de la turbine). La hauteur d'aspiration sera définie par le coefficient de cavitation de la turbine.

La figure IV.12.a montre ces trois cas.

La figure IV.12.b présente les valeurs du coefficient de cavitation ρ en fonction de la vitesse spécifique n_q des turbines à réaction.

Cette courbe permet, au stade de l'avant-projet, de définir provisoirement la hauteur d'implantation de la machine.

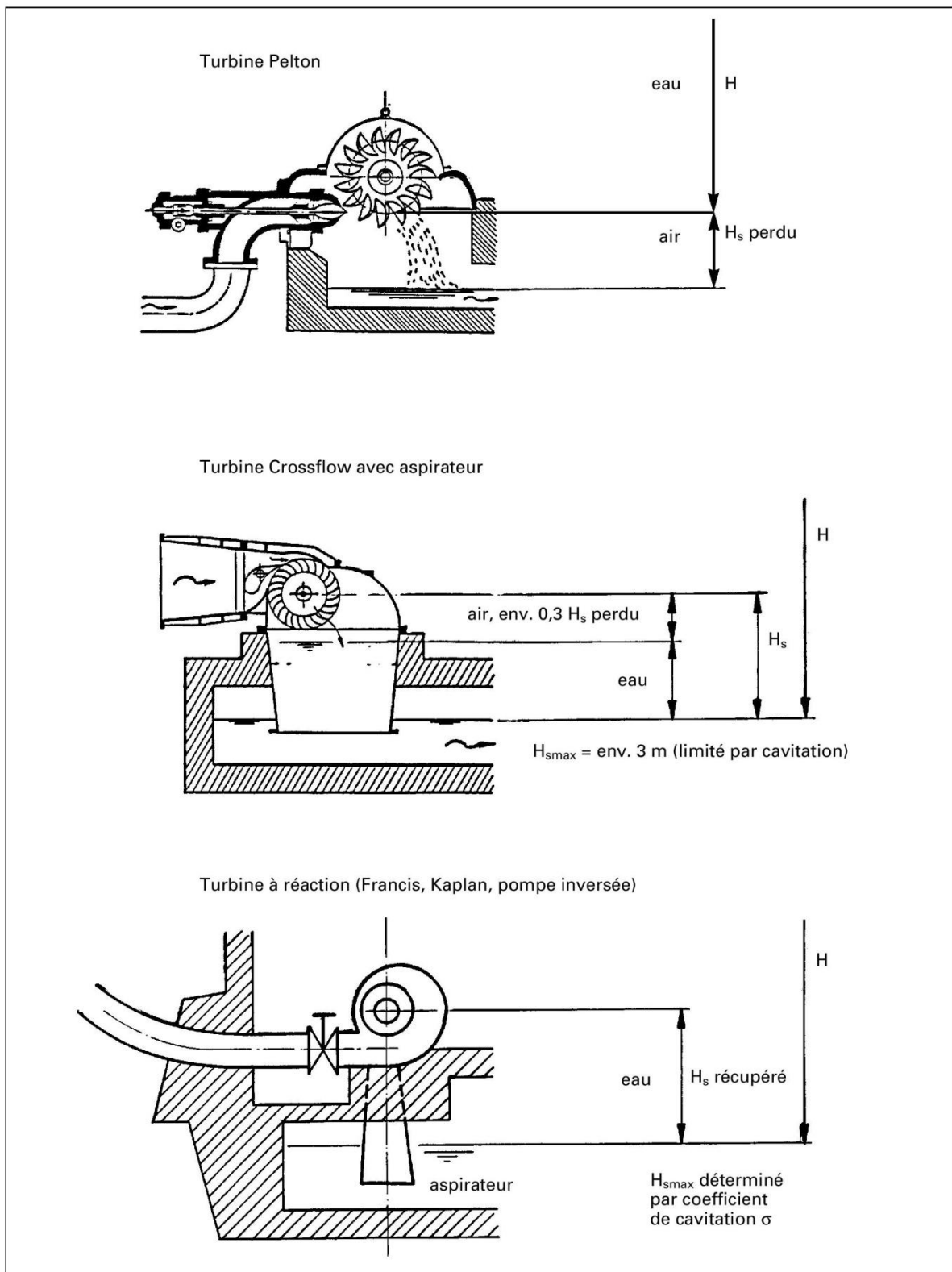


Figure IV.12.a: Chute nette et hauteur d'aspiration pour différents types de turbines

Pour les basses chutes, il existe une variété de possibilités d'implantation des turbines, qui peuvent avoir un impact important sur les ouvrages de génie civil.

Dans ce contexte, le prix de la turbine n'est pas un critère déterminant, mais bien plutôt les économies que le type de machine choisi peut permettre de réaliser sur l'ensemble des ouvrages.

Implantations possibles :

- turbine Francis ou Kaplan en chambre d'eau ouverte placée à l'extrémité du canal, axe de la machine horizontal ou vertical ;
- turbine Kaplan ou hélice type S, en conduite ;
- turbine Kaplan, type bulbe ;
- turbine Kaplan ou hélice en siphon.

Dans ces cas, il est recommandé d'examiner à l'aide du diagramme de la figure IV.12.b la hauteur d'implantation de l'axe de la turbine par rapport au niveau aval d'étiage (hauteur d'aspiration maximum).

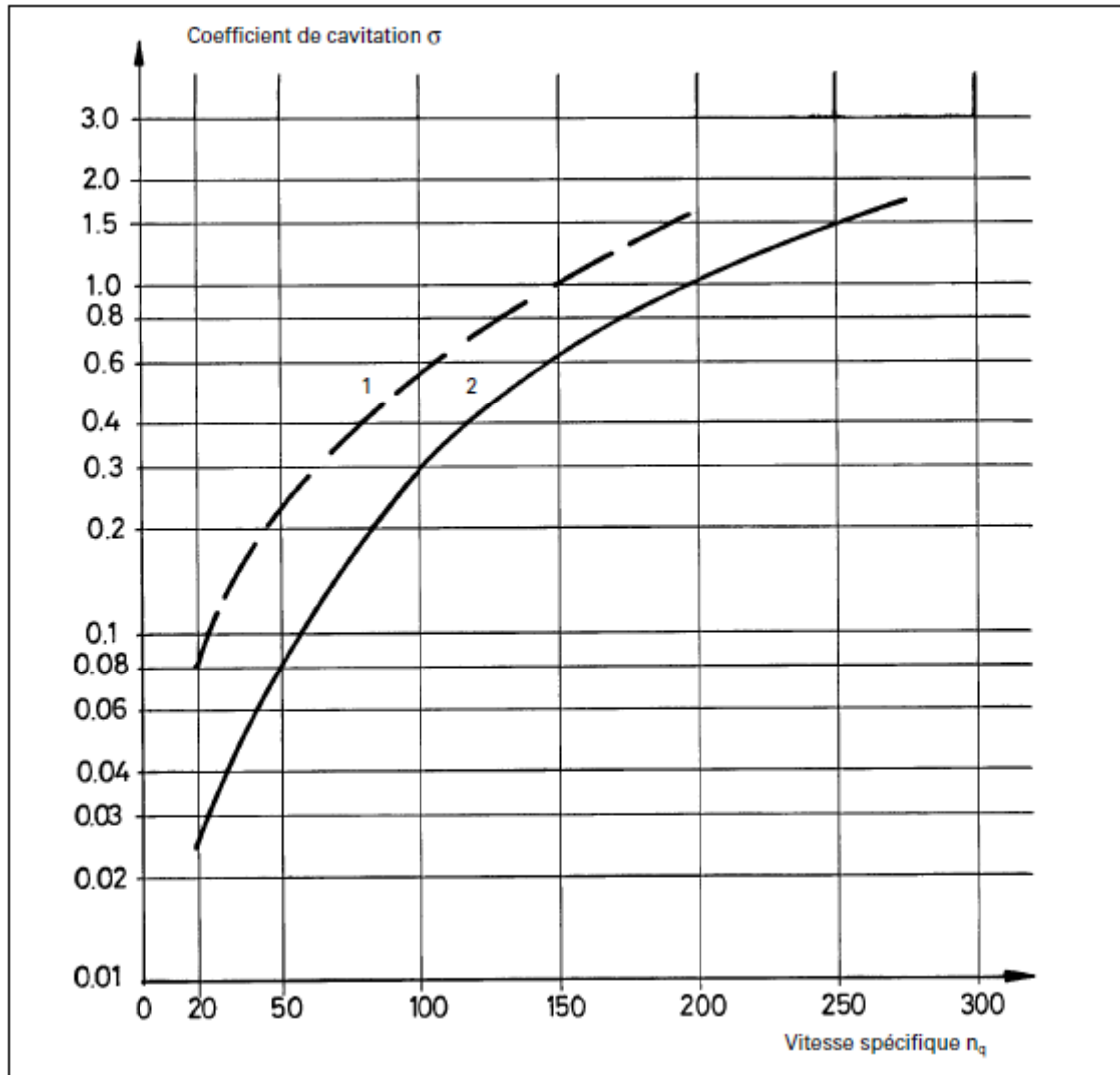


Figure IV.12.b : Coefficient de cavitation des turbines à réaction

Courbe 1: σ pompes, à utiliser pour pompes inversées ;

Courbe 2: σ turbines Francis et Kaplan.

Calcul de la hauteur d'aspiration H_s :

$$H_s = H_a - H_V - \sigma \cdot H$$

H_a = pression atmosphérique

altitude 500 m

$$H_a \cong 9,5 \text{ m}$$

altitude 1000 m

$$H_a \cong 9,0 \text{ m}$$

H_V = pression de dégagement de vapeur de l'eau (m), fonction de la température de l'eau T.

$$T = 8^{\circ}C \quad H_V = 0,1 \text{ m}$$

$$T = 24^{\circ}C \quad H_V = 0,3 \text{ m}$$

H = chute nette maximum au débit maximum de la turbine (m)

Voir aussi figure IV.11

Figure IV.12.c présente quelques implantations de turbines basse chute parmi les nombreuses possibilités offertes par les constructeurs.

Chapitre IV
La turbine Francis

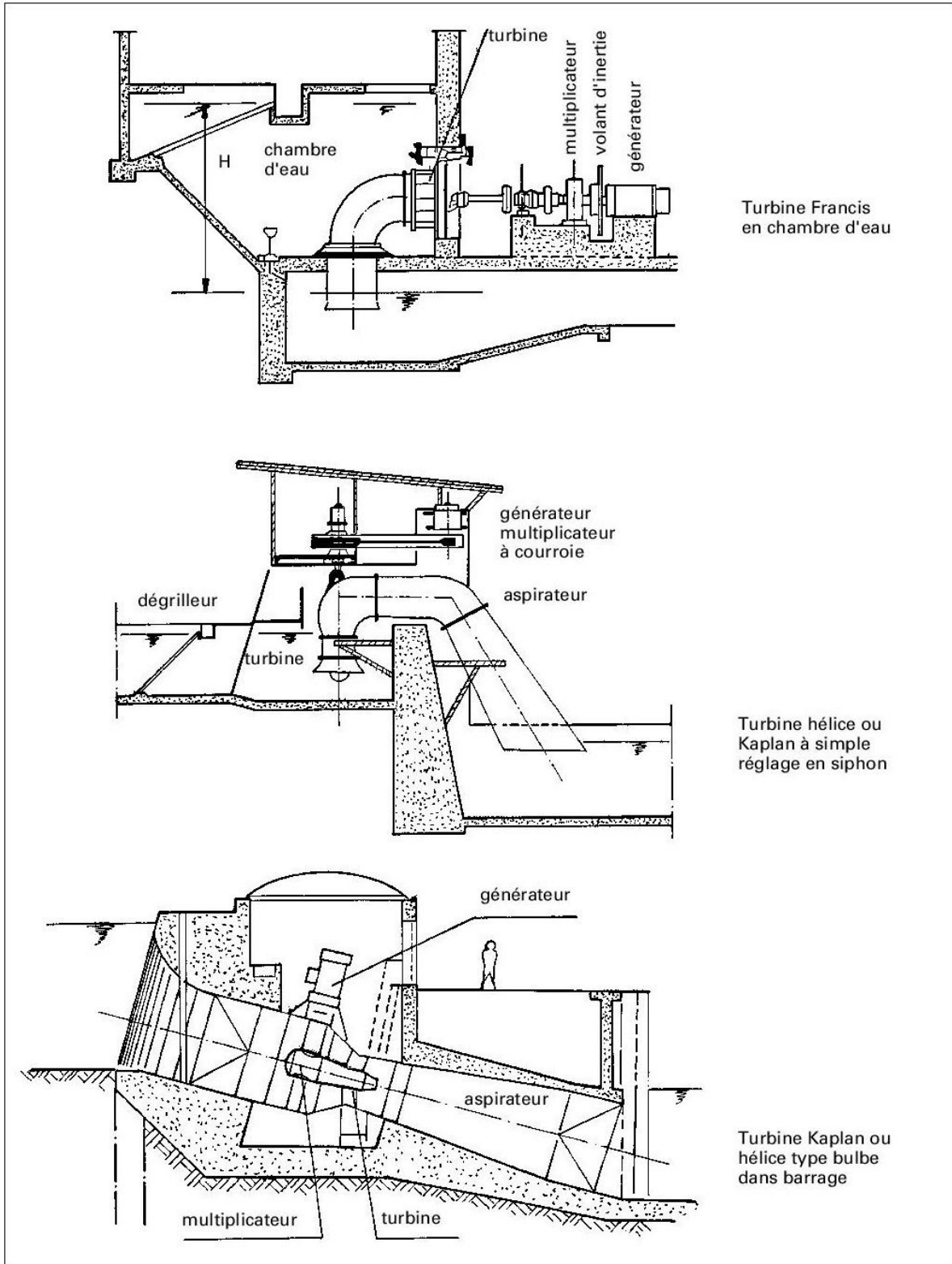


Figure IV.12.c : Exemples de turbines basse chute et de leur implantation

Table des matières

IV.1 Introduction.....	64
IV.2 Description de la turbine Francis	65
IV.2.1 Principe de fonctionnement.....	65
IV.2.2 Éléments de construction	67
IV.2.3 Paramètres de fonctionnement	69
IV.2.4 Coefficients adimensionnels	70
IV.2.5 Écoulement dans une turbine Francis	71
IV.3 Implantation d'une turbine à réaction.....	74
IV.3.1 Hauteur d'aspiration.....	74
IV.3.2 Hauteur d'aspiration et cavitation	76
IV.3.3 Torche de la vapeur.....	80
IV.3.4 Calcul de la hauteur d'aspiration limite d'une turbine à réaction	83
IV.4 Vitesse et débit d'emballement d'une turbine à réaction	87
IV.5 Sélection d'un ou plusieurs types de turbines (implantation de la turbine)	89

V. Étude de cas

Sélection de turbines hydrauliques dans le cadre d'avant-projets

V.1 Description du projet

Une centrale hydraulique de grande puissance doit être dotée d'une passe à poissons. Celle-ci est conçue comme suit :

- Une échelle à poissons par laquelle s'écoule un débit d'environ 700 l/s.
- Tenant compte du débit du cours d'eau, le débit de l'échelle au point de rejet aval ne provoque pas un remous suffisant pour attirer les poissons dans la passe. Il est donc nécessaire d'augmenter le débit à cet endroit par injection d'un débit complémentaire transitant parallèlement à l'échelle à poissons, d'environ 2000 l/s, dans la dernière chambre.

L'énergie hydraulique de ce débit supplémentaire, dit débit d'attrait, sera récupérée par une petite centrale hydraulique.

Le système proposé est représenté schématiquement à la figure V.1.

V.2 Données du projet

Chute brute $H_b = 21.0 \text{ m}$ (maximum, temps sec)
20.0 m (moyen)
18.0 m (minimum, hautes eaux)

Le niveau amont est constant (régulé par le barrage).

Le niveau aval varie en fonction du débit du cours d'eau.

Débit d'attrait turbiné : $Q = 2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ pour H_b moyen

Conduite forcée : Longueur: $L = 200 \text{ m}$

Diamètre : $D = 1000 \text{ mm}$

Calcul des pertes de charge

Formule de Strickler :

$$H_L = V^2 \cdot L / (K^2 \cdot R_H^{4/3}) \quad [m]$$

avec:

V = vitesse d'écoulement [m/s] ;

L = longueur conduite [m] ;

K = coefficient de rugosité = $75 [m^{1/3}/s]$;

$R_H = D/4$ = rayon hydraulique ;

Implantation de la turbine : 0.5 m au-dessus du niveau d'eau aval maximum ;

Température de l'eau : maximum 20°C ;

Altitude du site : 500 m .

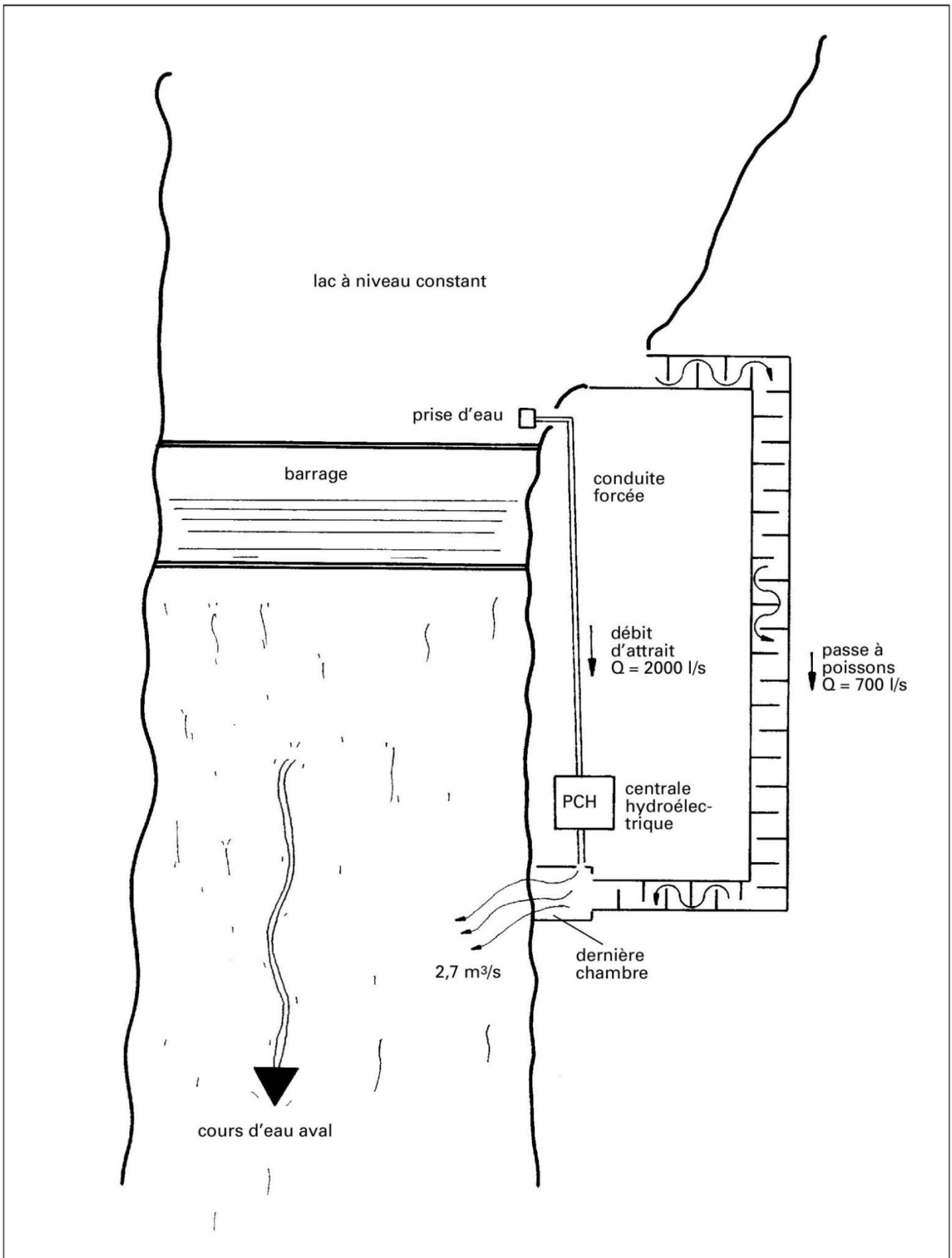


Figure V.1: Passe à poissons avec turbinage d'un débit d'attrait

V.3 But de l'étude de cas

Déterminer le type et les caractéristiques principales de la turbine la mieux adaptée à ce site.

Quelle sera approximativement la production annuelle d'électricité (rendement de la génératrice $\eta_g = 95\%$).

V.4 Sélection et caractéristiques de la turbine

Calcul de la chute nette H :

Débit $Q = 2.0 \text{ m}^3/s$;

Vitesse d'écoulement : $V = Q.4/\pi.D^2$;

Pertes de charge calculées selon § V.2 $H_L = 1.47 \text{ m}$;

Chute brute :

$H_b = \text{min. } 18,0 \quad \text{moyen } 20,0 \quad \text{max. } 21,0 \quad [m]$

Perte de charge :

$H_L = \text{min. } 1,47 \quad \text{moyen } 1,47 \quad \text{max. } 1,47 \quad [m]$

Chute nette :

$H = \text{min. } 16,53 \quad \text{moyen } 18,53 \quad \text{max. } 19,53 \quad [m]$

Puissance hydraulique :

$P_{hyd} = 9,81 . 2 . 18.53 = 364 \text{ kW}$ (page 38)

Type de turbine :

Figure III.8 : Francis ou Crossflow

Rendement probable (Figure III.1) :

$$\text{Francis : } \eta = 90\%$$

$$\text{Crossflow : } \eta = 84\%$$

$$\text{Pompe inversée : } \eta = 90\%$$

Hauteur d'aspiration :

$$H_{bmin} : H_s = 0,5 \text{ m (donnée)}$$

$$H_{bmoyen} : H_s = 0,5 \text{ m} + H_{bmoyen} - H_{bmin} = 2,5 \text{ m}$$

$$H_{bmax} : H_s = 0,5 \text{ m} + H_{bmax} - H_{bmin} = 3,5 \text{ m}$$

Perte de chute pour la turbine Crossflow (figure V.2)

$$0,3 H_s = 0,75 \text{ m pour } H_s = 2,5 \text{ m (moyen)}$$

Chute nette turbine Crossflow :

$$H_{moyen} = 18,53 - 0,75 = 17,78 \text{ m}$$

$$\text{d'où une perte de } 17,78/18,53 = 0,96 : 4\%$$

Le rendement effectif de la turbine Crossflow sera de : $84 - 4 = 80\%$

la PCH travaille à débit constant¹, seul le rendement maximum est important d'où
turbine recommandée :

Francis à aubes directrices fixe

ou

Pompe inversée à double flux

¹ Pour un débit constant (eau excédentaire en permanence) on utilise une turbine à ouverture fixe, par exemple pompe inversée, turbine hélice à pales fixes, Pelton à injecteur fixe.

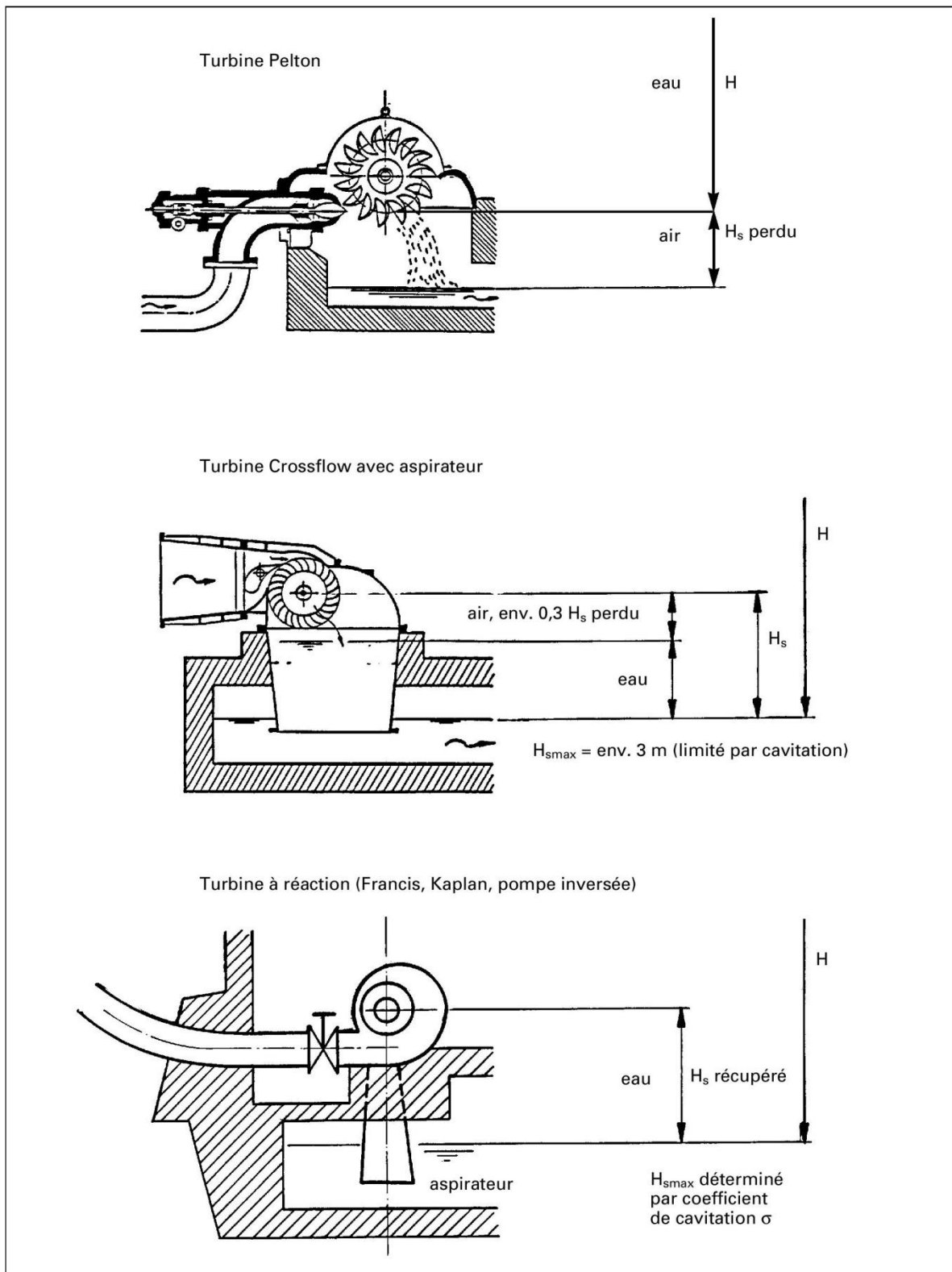


Figure V.2: Chute nette et hauteur d'aspiration pour différents types de turbines

Vitesse de rotation de la turbine Francis :

$$\text{Coefficient de cavitation} = (H_a - H_V - H_s)/H$$

$$H_a = 9,5 \text{ m} \quad (\text{altitude } 500 \text{ m})$$

$$H_V = 0,24 \text{ m} \quad (\text{température } 20^\circ\text{C})$$

Pour

$$H_{max} \text{ et } H_{smax} : \sigma = (9,5 - 0,24 - 3,5)/19,53 = 0,30$$

Figure IV.12.b, § IV.5: $\sigma = 0,3$ vitesse spécifique $n_q = 100$

$$\text{Figure V.3 : } H = 18,53 \mid Q = 2,0 \text{ m}^3/\text{s} \mid n_q = 100 = n \cdot Q^{\frac{1}{2}}/H^{\frac{3}{4}}$$

$$\text{Vitesse de rotation : } n = n_q \cdot H^{\frac{3}{4}}/Q^{\frac{1}{2}} = 631 \text{ t/min}$$

Une vitesse plus basse peut être adoptée (n_q et σ deviennent plus petit, donc H_s admissible plus grand).

La vitesse synchrone la plus proche qui permette l'entraînement direct du générateur par la turbine est : $n = 600 \text{ t/min}$.

Production d'énergie :

$$\text{Puissance à l'arbre : } P_{mec} = 0,9 \cdot 364 \text{ kW} = 328 \text{ kW} \text{ (page 41)}$$

$$\text{Puissance électrique : } P_{el} = \eta_g \cdot P_{mec} = 0,95 \cdot 328 = 311 \text{ kW}$$

Production annuelle : 8760 heures/année donnent 2 725 000 kWh.

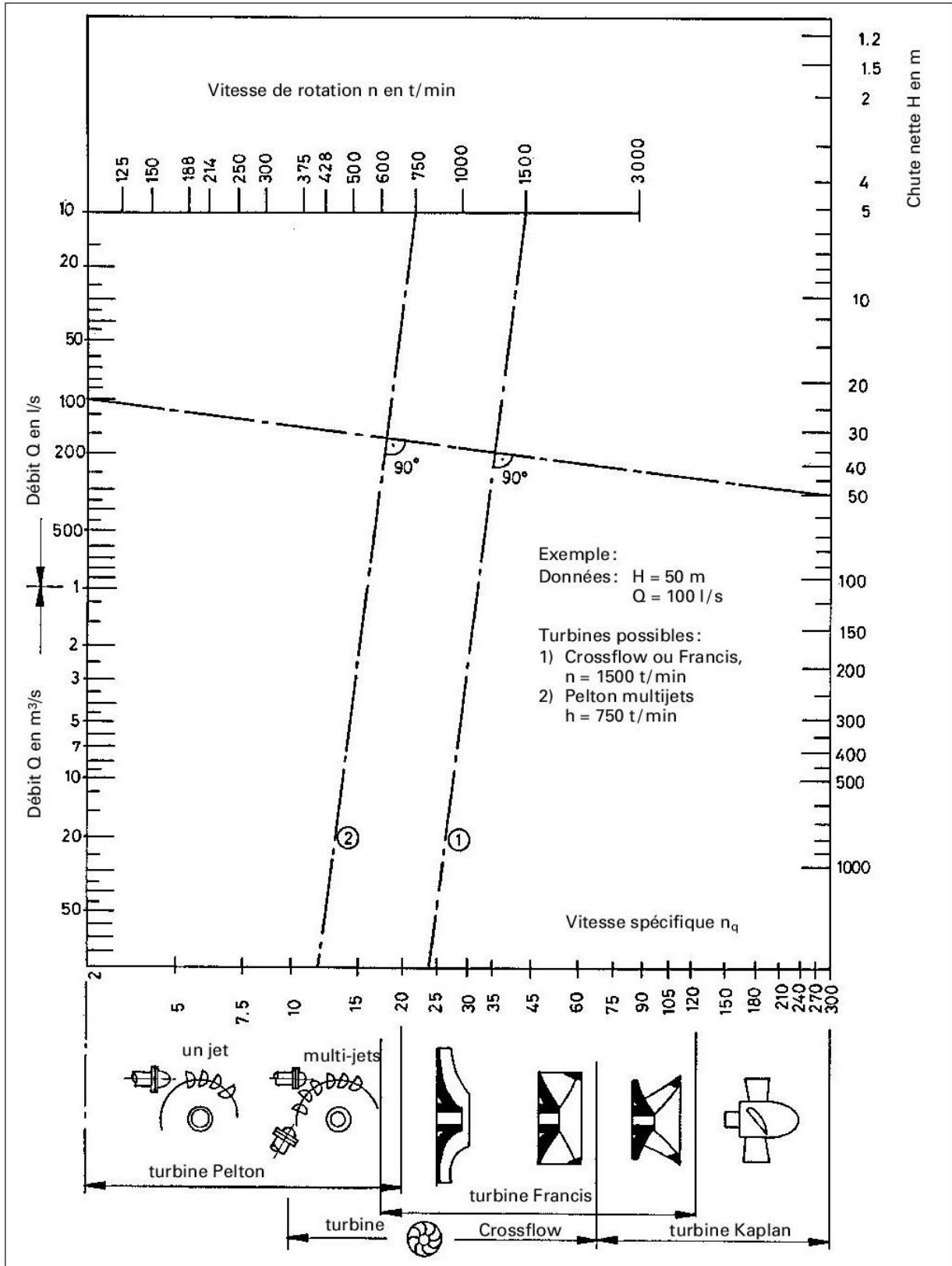


Figure V.3 : Abaque de sélection de différents types de turbines

Table des matières

V. Étude de cas.....	97
V.1 Description du projet	97
V.2 Données du projet.....	97
V.3 But de l'étude de cas.....	100
V.4 Sélection et caractéristiques de la turbine.....	100

Les pays industrialisés et en voie de développement intensifient l'exploitation de leurs précieuses ressources en eau en tant que source d'énergie renouvelable. C'est ce que montre une étude du Worldwatch Institute : la consommation hydraulique mondiale a augmenté de plus de 5% entre 2009 et 2010. Fin 2010, elle atteignait un pic historique de 3427 térawatt-heure (TWh), c'est près de 16,1% de la consommation mondiale d'électricité, poursuivant ainsi l'accélération observée depuis 2003. 40 à 45 milliards de dollars ont été investis dans des grands projets hydrauliques dans le monde en 2010.

À l'heure actuelle, l'installation ayant la plus grande puissance de production jamais construite est le barrage des Trois Gorges en Chine. L'installation produit de l'électricité en utilisant 26 turbines - 8 unités de plus (6 x 700 MW, 2 x 50 MW), dont la construction est achevée en 2011. Chacune des unités opérationnelles actuelles a une puissance de 700 MW, soit une puissance totale installée de 22 500 MW, soit presque le triple de la puissance installée de la plus grande centrale nucléaire, la centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa (7 réacteurs), puissance installée totale 8 212 MW. L'achèvement complet du barrage des Trois Gorges a eu lieu en 2011, la puissance installée totale atteinte est de 22 500 MW, à comparer à la puissance de la deuxième centrale électrique, le barrage d'Itaipu à la frontière entre le Brésil et le Paraguay (14 000 MW).



Figure C.1 : Barrage de Trois-Gorges-Chine



Figure C.2: Barrage d'Itaipu- Brésil /Paraguay

Actuellement un projet, le barrage Grand Inga au Congo, s'il se réalise, dépassera toutes les centrales existantes, y compris le barrage des Trois Gorges, si la construction débute comme prévu en 2014. Le projet prévoit une puissance installée de 39 000 MW, presque deux fois celle des Trois Gorges. Au moment de la première proposition du projet, cette puissance répondait à la demande en électricité du continent africain.

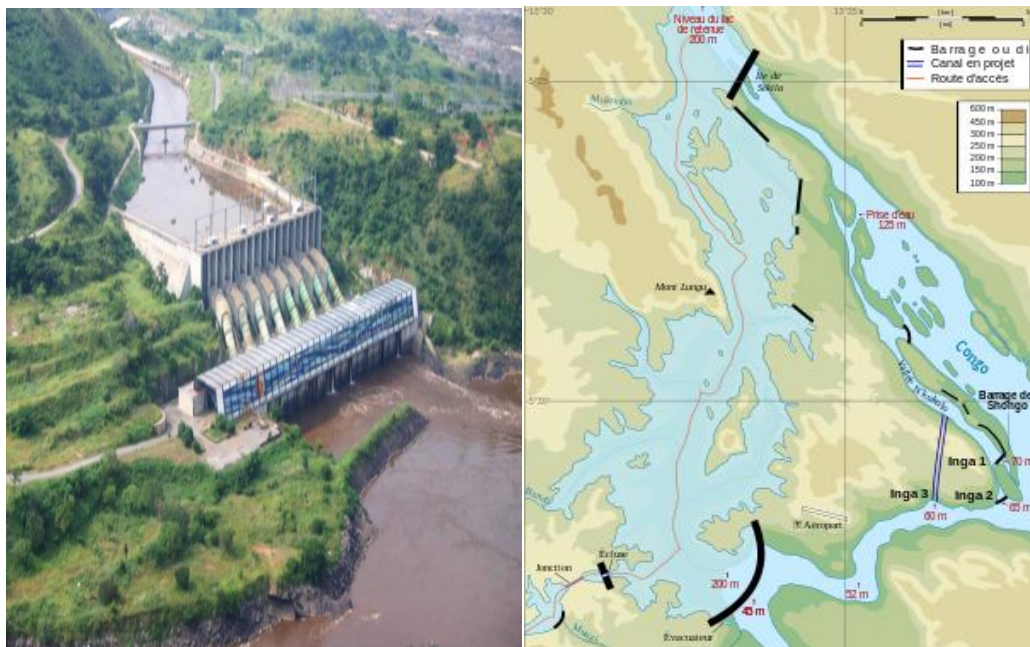


Figure C.3: Barrage Grand Inga- Congo

Si 150 pays produisent de l'hydroélectricité, cette production apparaît comme très concentrée au plan géographique. La zone Asie pacifique représente environ 32 % de la production hydroélectrique mondiale en 2010 alors que l'Afrique, avec un maigre 3 %, recèle le plus gros potentiel d'augmentation.

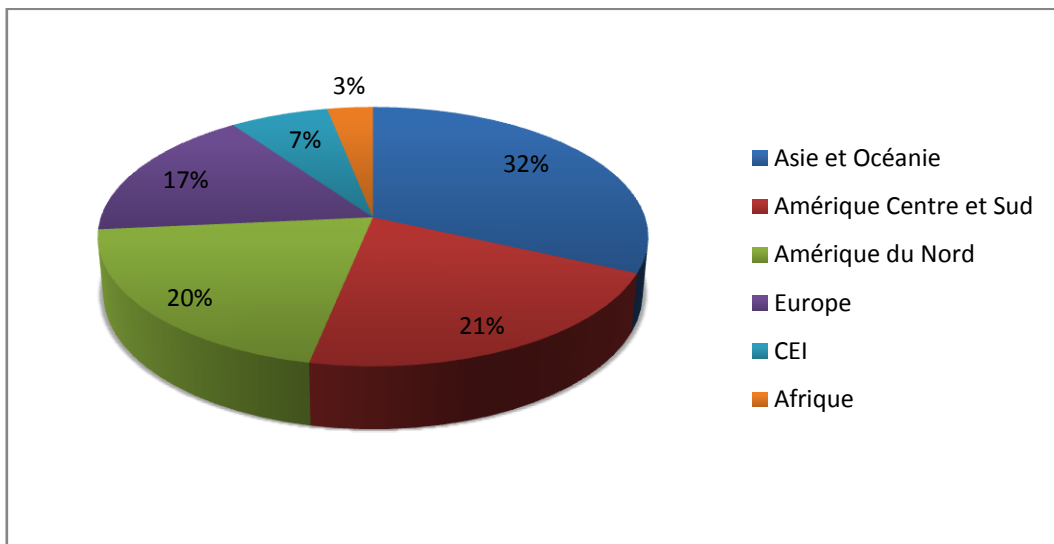


Figure C.4: Principaux producteurs de l'hydroélectricité dans le monde par zone géographique en 2011

En 2008, quatre pays : l'Albanie, le Bhoutan, le Lesotho, et le Paraguay tirent la totalité de leur électricité de centrales hydroélectriques, et 15 autres plus de 80 %.

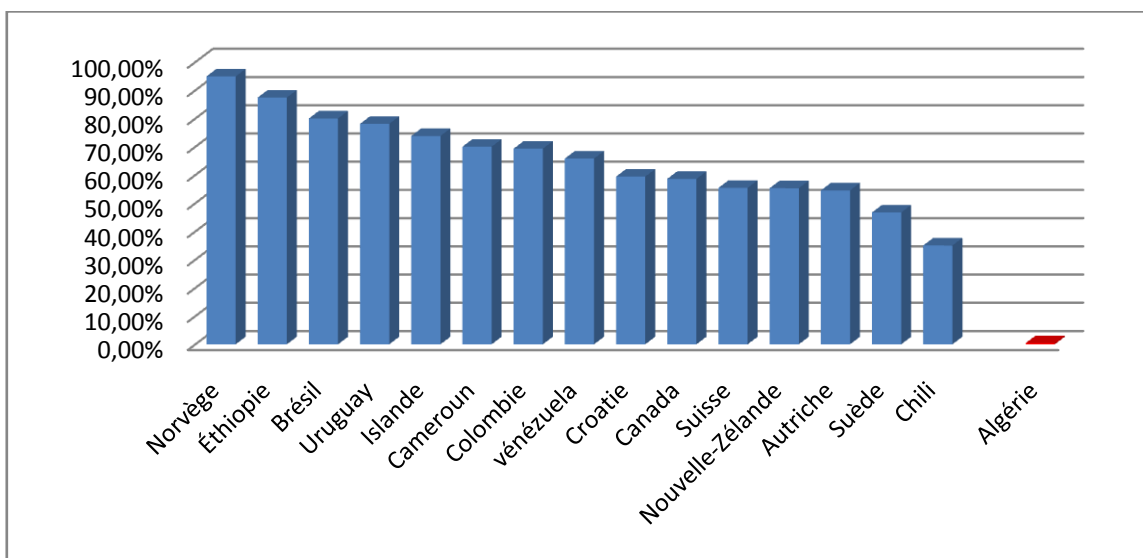


Figure C.5: Part de l'électricité produite par l'énergie hydraulique

Quid de l'Algérie ? Disposant de vastes étendues désertiques, d'une façade maritime de 1 200 km et d'une superficie de 2 millions et demi de km², largement ouverte aux vents, notre pays pourrait utiliser diverses techniques à même de produire en grande quantité de l'électricité. Les experts ainsi que les responsables des institutions concernées estiment que si dans notre pays la production d'électricité renouvelable est en devenir, la quasi-totalité de la production électrique algérienne repose actuellement sur les combustions fossiles (99,6%). Les sources renouvelables assurent le complément et se répartissent entre l'hydroélectricité (0,4% du total) et le solaire (0,01% du total).

La production hydroélectrique du pays a fortement diminué en 2010, après avoir atteint un pic de production en 2009. Elle a représenté en 2010 un niveau de production inférieur à celui observé en moyenne sur la même période de référence (267 GWh). Les statistiques des organismes spécialisés précisent, en outre, que la production d'électricité issue des combustibles fossiles ne se soucie pas de variations de la production hydroélectrique et croît de manière continue sur la période (+5,6% par an en moyenne).

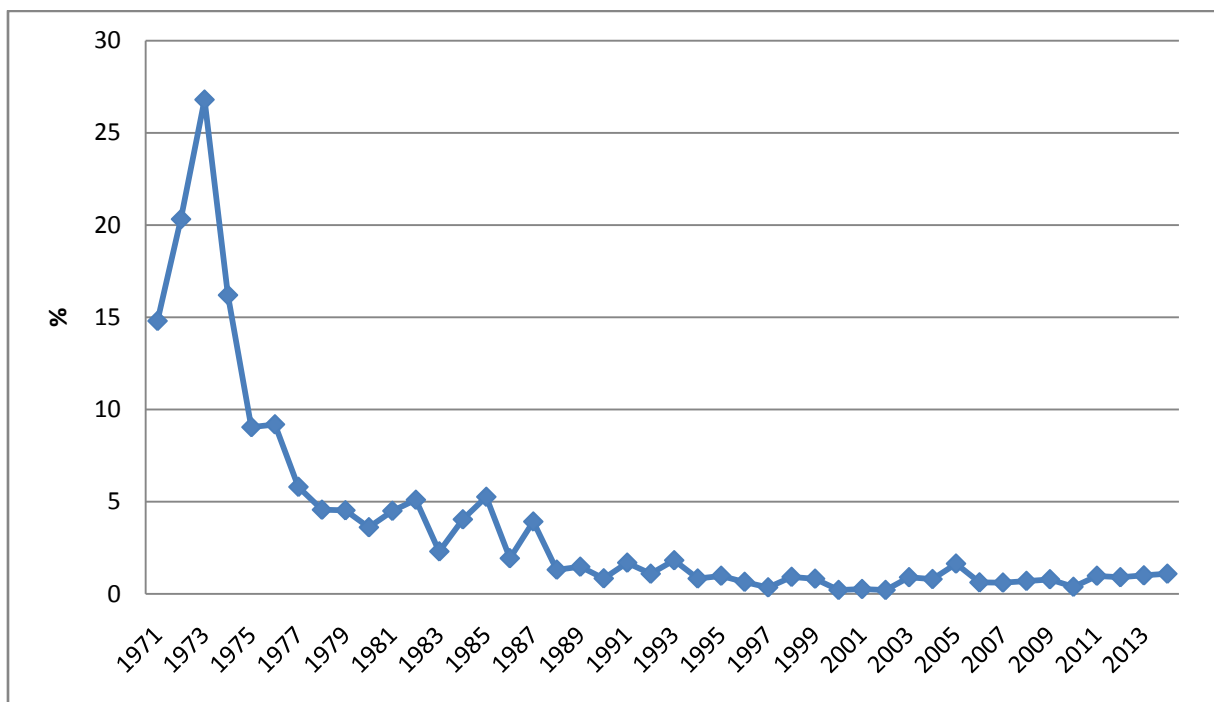


Figure C.6: Production de l'électricité- hydroélectricité (% de la production totale), Algérie

Les mêmes sources ajoutent que la filière solaire recensée dans le pays reste, cependant, faible depuis l'année 2008, avec un volume qui ne dépasse pas les 4 GWh. Toutefois, notre pays a affiché sa volonté de recourir aux sources renouvelables pour produire son électricité. Selon les explications du ministère de l'Énergie et des Mines, notre pays a besoin d'investir jusqu'à 120 milliards de dollars (85 milliards d'euro) dans les énergies renouvelables d'ici 2030. Voulant vraisemblablement se positionner ainsi en pays incontournable en méditerranée dans le secteur de la production de l'énergie en général et de l'électricité en particulier, sous différentes formes, l'Algérie, via le groupe Sonelgaz, a mis en œuvre un vaste programme de réhabilitation et de renouvellement de son parc de production pour conserver le niveau actuel de capacité de production.

Pour conclure, cette étude a permis d'une part de mieux comprendre la conversion d'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique, et d'autre part l'étude complète des projets hydroélectrique et le choix de la turbine mieux adapté à l'environnement du projet.