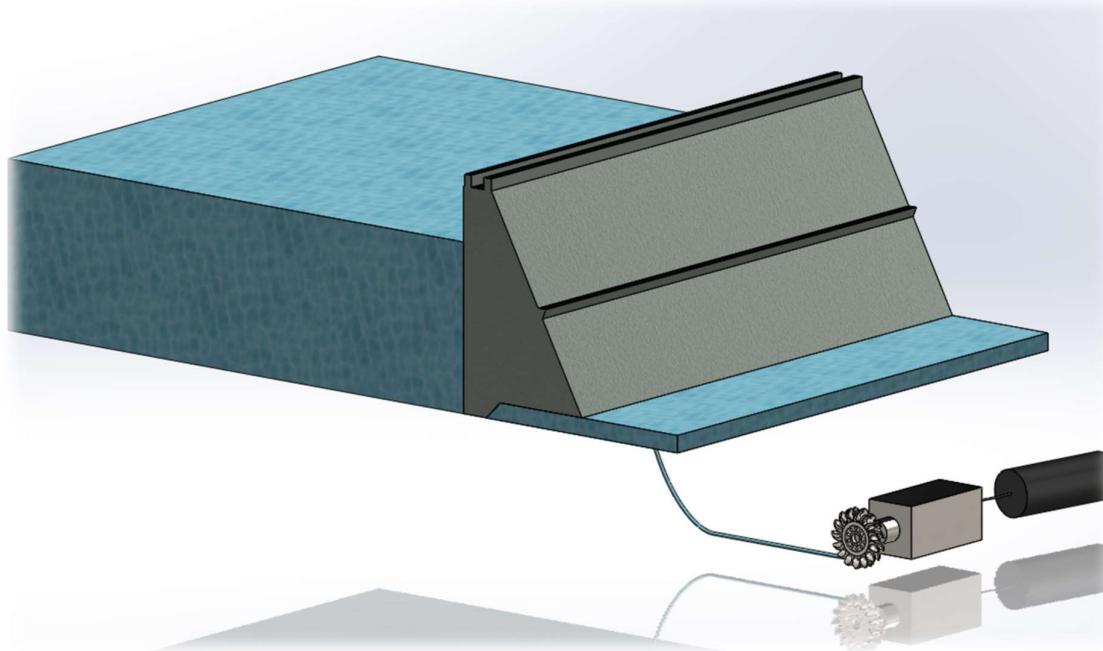


Projet de physique

Travaux du 18.09.2020 au 15.01.2021

Centrales hydrauliques



Par Fornerod Quentin, Hugi Samuel, Rodriguez Michaël et Vieux Adriano

Table des matières

Cahier des charges.....	1
But	1
Répartition des tâches.....	1
Introduction.....	1
Histoire des barrages.....	2
Système électrique :	3
La turbine	3
Alternateur	4
Equation du turbo-alternateur.....	5
Transformateur	6
Equations du transformateur	7
Adaptation de la production en fonction du besoin	8
Différents types de barrages	10
Caractéristiques.....	10
Dimensionnement d'un barrage	11
Hydrostatique	11
Turbines hydrauliques.....	14
Caractéristiques.....	14
Turbines à action	14
Turbine à réaction	21
Pompes hydrauliques	28
Principe de fonctionnement.....	28
Utilisation des pompe-turbine	28
Turbopompe	29
Rendement des différents types de turbines.....	30
Vitesse spécifique	30
Classification des turbines d'après leur utilisation.....	32
Rendement	32
Aménagement d'une centrale hydraulique et d'un barrage	33
Aménagement à haute ou moyenne chute	34
Aménagement au fil de l'eau (base chute)	34
Analyse des avantages des centrales hydrauliques	35
Comparaison des productions.....	35
Développement logiciel.....	37
Situation	37
Architecture logicielle.....	37
Connaissances supplémentaires	37
Objectifs	38

Structure du code	38
Modification des objectifs.....	38
Utilisation de Matlab.....	38
Description de fonctionnement	39
Détail partie 1 :	39
Détail partie 2 :	40
Détail partie 3 :	40
Formules mathématiques	40
Rampe de puissance.....	40
Fonctions	41
Analyse des résultats.....	42
Suite du projet.....	43
License.....	43
Installation.....	43
Conclusion	44
Fornerod Quentin.....	44
Hugi Samuel.....	44
Rodriguez Michaël.....	45
Vieux Adriano	45

Table des figures

Figure 1 : Photographie des roues d'un moulin à eau	2
Figure 2:Illustration de principe d'une centrale hydraulique.....	3
Figure 3: Photo d'une turbine	3
Figure 4: Principe d'un alternateur électrique	4
Figure 5: Exemple d'alternateur à deux paires de pôles	4
Figure 6: Alternateur de la centrale de Bieudron.....	5
Figure 7: Illustration d'un transformateur	6
Figure 8: Principe du transformateur.....	7
Figure 9: Image d'un transformateur de puissance	7
Figure 10 : Capture de la courbe de fréquence instantanée du réseau.....	8
Figure 11 : Photographie des trois groupes de Bieudron.....	9
Figure 12: image barrage-poids (Grande Dixence).....	10
Figure 13:image barrage-voûte	10
Figure 14: exemple de barrage avec contreforts	10
Figure 15: barrage digue Boukerdane.....	10
Figure 16: prisme triangulaire d'un fluide	11
Figure 17: DCL pression d'un fluide sur un barrage	12
Figure 18: schéma d'une pression de fluide sur un barrage	12
Figure 19: schéma des pressions exercées sur un barrage	13
Figure 20: Coupe schématique d'un auget soumis à un jet d'eau	14
Figure 21: graphique de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine	16
Figure 22: Turbine Pelton en position verticale Figure 23: Turbine Pelton	17
Figure 24: Turbine Pelton en position horizontale.....	18

Figure 25: Schéma représentatif de l'équation de Bernoulli	18
Figure 26 : Chemin du fluide dans la turbine Banki	20
Figure 27: Schéma du fonctionnement des turbine à réaction.....	21
Figure 28: Schémas dessinés d'une turbine à réaction radial.....	22
Figure 29: Schémas dessinés d'une turbine à réaction axial.....	22
Figure 30: Turbine Francis	24
Figure 31: représentation schématique du fonctionnement d'une turbine Francis.....	24
Figure 32: dessin de la cotation fonctionnelle d'une turbine Francis	25
Figure 33: roue d'une turbine Kaplan.....	26
Figure 34: Coupe d'une turbine Kaplan de la centrale de Jupià au Brésil, puissance 103 MW	26
Figure 35: Turbine hélice Straflo	27
Figure 36 : Représentation du groupe bulbe	27
Figure 37: coupe d'une turbopompe	29
Figure 38: coupe d'une turbopompe axiale	29
Figure 39: Coupe d'une pompe multicellulaire, centrale de Roncovalgrande.....	30
Figure 40: graphique de la hauteur de chute en fonction de la vitesse spécifique	31
Figure 41: Graphique représentatif du rendement relatif en fonction du débit volumique relatif.....	32
Figure 42: schéma d'un aménagement à Moyenne chute à accumulation	33
Figure 43 : dessin schématique de la centrale marémotrice de la Rance en France	34
Figure 44: Tableau comparatif entre différents types de production.....	35
Figure 45: Structure du code	37
Figure 46: Vue principale.....	39
Figure 47: Affichage des valeurs.....	39
Figure 48: Paramétrage des champs	40
Figure 49: Boutons de navigation.....	40
Figure 50: Rampe de puissance	41
Figure 51: Résultats de la simulation	42

Table des équations

Équation 1: Alternateur - fréquence de rotation	5
Équation 2: Alternateur - pulsation de rotation.....	5
Équation 3: Transformateur - Rapport de spires.....	7
Équation 4: Transformateur - Rendement	7
Équation 5: Transformateur - Puissance	7
Équation 6: Transformateur - Puissance décomposition	7
Équation 7: Principe de Pascal	11
Équation 8: Pression hydrostatique moyenne	12
Équation 9: force de réaction normal du barrage sur le sol.....	13
Équation 10: Pression barrage sur le sol	13
Équation 11: vitesse de sortie de l'eau	14
Équation 12: Force du jet d'entrée.....	15
Équation 13: débit massique	15
Équation 14: moment de force d'une turbine à action.....	15
Équation 15: puissance mécanique d'une turbine à action	16
Équation 16: Puissance mécanique maximale d'une turbine à action.....	16
Équation 17: équation de Bernoulli.....	18

Équation 18: Rayon turbine Pelton	19
Équation 19: section du jet entrant.....	19
Équation 20: Relation d'Euler.....	21
Équation 21: coefficient d'énergie	21
Équation 22: vitesse relative de l'eau par rapport à l'aube	23
Équation 23: coefficient de débit	23
Équation 24: débit volumique	24
Équation 25: Diamètre d'entrée turbine Francis	25
Équation 26: Diamètre de sortie turbine Francis	25
Équation 27: vitesse de rotation d'une turbine	30
Équation 28: vitesse spécifique	31
Équation 29: Production - Equation de l'énergie	35
Équation 30: Partie 1 rampe de puissance.....	41
Équation 31: Partie 2 rampe de puissance.....	41
Équation 32: Partie 3 rampe de puissance.....	41

Cahier des charges

But

Découvrir et comprendre le fonctionnement d'une centrale hydraulique.

Répartition des tâches

Tâches	Responsable
Historique de l'évolution de l'hydraulique au travers de l'histoire	Hugi Samuel
Système électrique	Vieux Adriano
Système de régulation	Hugi Samuel
Caractéristique des différents types de turbines, pompes et barrage, dimensionnement d'un barrage par le principe de Pascal (hydrostatique)	Rodriguez Michaël
Aménagement d'une centrale hydraulique et d'un barrage	Rodriguez Michaël
Maquette 3D	Rodriguez Michaël
Analyse des avantages de l'énergie hydraulique par rapport à d'autres	Vieux Adriano
Simulation logiciel du fonctionnement d'une centrale	Fornerod Quentin
Organisation d'une visite ¹	Vieux Adriano

Introduction

Dans le cadre du projet de cours de physique 2, nous avons décidé d'étudier les centrales hydrauliques notamment dans la production d'électricité. Ce sujet se fond parfaitement dans le contexte de nos formations respectives, nous permettant de mettre à profit nos connaissances, tel que l'électricité, la régulation, le design 3D ainsi que la programmation. Ces diverses notions nous permettent d'appréhender la base du sujet avec assurance ainsi que d'étendre nos connaissances notamment grâce au cours spécial² de M. Mirko Croci qui nous a été dispensé.

¹ Finalement annulé, les visites étant impossible en période de covid19.

² Scan du cours sur les centrales hydrauliques disponible à la fin du document

Histoire des barrages

Depuis bien longtemps, l'homme cherche à retenir l'eau, la dévier ou même s'en protéger. C'est pour cela que les barrages sont apparus bien avant notre ère. Ces premiers barrages servaient pour des réserves d'eau potable, à faire des viviers, à faire des piscicultures ou tout simplement faire des irrigations.

Ces premières constructions étaient assez simples avec des matériaux basiques. C'est au fil des siècles que les différentes améliorations et les différents types de barrages sont apparus partout dans le monde.

Durant cette évolution, l'homme, ayant acquis beaucoup de choses en mathématique et en physique surtout ce qui concerne la technique des fluides, a pu concevoir les premières turbines. Bien que rudimentaire, cette invention a permis de produire de l'énergie mécanique grâce au mouvement de l'eau. Dans un premier temps, comme il n'y avait pas encore l'électricité, l'énergie produite devait être directement utilisée sur place. Malgré ce problème, l'homme a réussi à simplifier certains travaux grâce à cette énergie. Par exemple, cette énergie mécanique était utilisée pour des moulins.



Figure 1 : Photographie des roues d'un moulin à eau³

Ce n'est que durant le 19^{ème} siècle que sont arrivées les premières centrales hydroélectriques dans les Alpes. Durant le siècle suivant, il y a eu une très grande évolution comme il y a eu l'arrivée de nouveaux ferro-alliages et l'évolution des systèmes électriques. Depuis ce jour, nous avons fait qu'améliorer nos machines et nous sommes arrivés à faire des barrages avec un très bon rendement entre l'énergie consommée et l'électricité produite de l'ordre de 80%.

³ https://cdn.futura-sciences.com/buildsv6/images/mediumoriginal/d/e/e/dee04a1271_112181_04-1177.jpg
Sources recherches : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage> / <https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/histoirebarrages.pdf>

Système électrique :

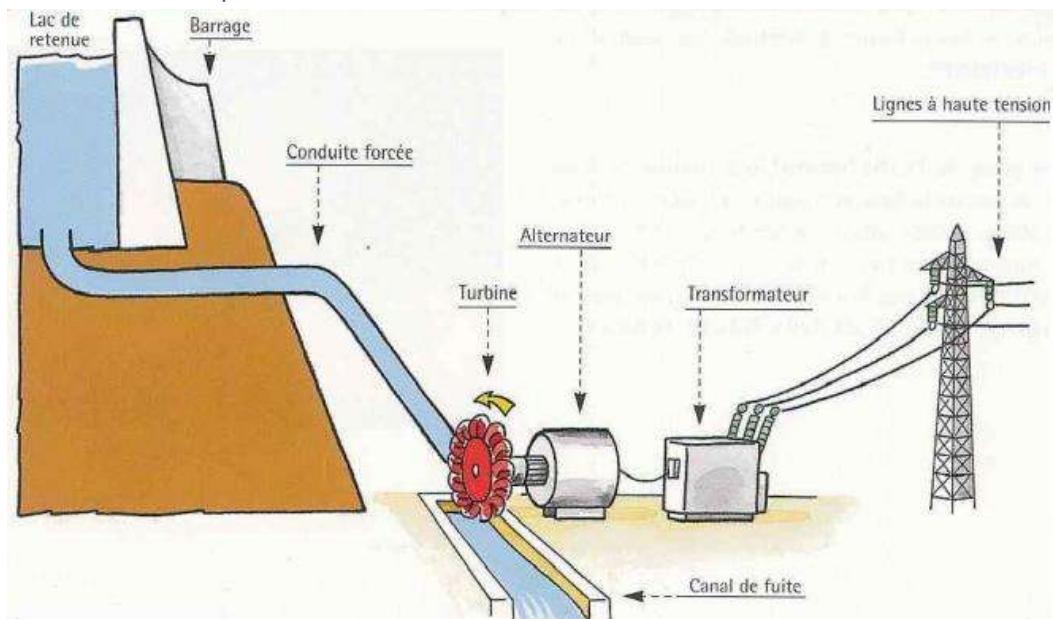


Figure 2: Illustration de principe d'une centrale hydraulique⁴

Concernant les barrages, il y a trois « grands » groupes : la turbine, l'alternateur et le transformateur.

La turbine

La turbine sert à convertir l'énergie du flux d'eau entrant en énergie mécanique. Il peut y avoir plusieurs injecteurs d'eau disposé autour de la turbine, comme sur la photo ci-dessous. Elle transfert l'énergie mécanique vers l'alternateur via un arbre de transmission.



Figure 3: Photo d'une turbine⁵

⁴ <http://baissedurhin.e-monsite.com/pages/fonctionnement-des-differentes-centrales/centrale-hydroelectrique/fonctionnement-des-centrales-hydroelectrique.html>

⁵ https://www.researchgate.net/figure/423-MW-MicroGuss-TM-Pelton-runner-Bleudron-power-plant-Switzerland-1_fig2_268778936

Alternateur

L'alternateur convertit l'énergie mécanique reçue de la turbine en énergie électrique. L'axe qui tourne au centre de l'alternateur entraîne la rotation d'un aimant (également appelé une paire de pôles) à l'intérieur d'une bobine. Un courant alternatif, dont la fréquence dépend de la vitesse de rotation et du nombre de paires de pôles, est induit dans la bobine. A noter que l'assemblage entre l'alternateur et la turbine s'appelle un « turbo-alternateur ».

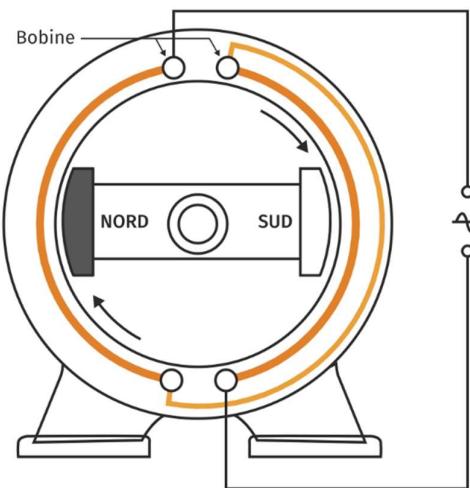


Figure 4: Principe d'un alternateur électrique⁶

Dans le cas d'un alternateur avec plus d'une paire de pôles, les pôles « nord » et « sud » s'alternent en fonction de leurs « voisins ».

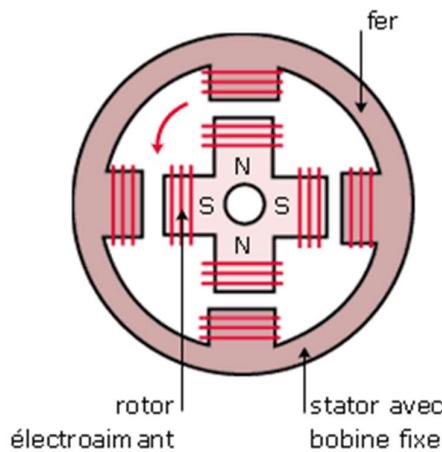


Figure 5: Exemple d'alternateur à deux paires de pôles⁷

⁶ <https://www.lelivrescolaire.fr/page/76946>

⁷ <https://www.maxicours.com/se/cours/principe-de-l-alternateur/>

Equation du turbo-alternateur

$$f_r = \frac{f_c}{n}$$

Équation 1: Alternateur - fréquence de rotation

$$\omega_r = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_c}{n}$$

Équation 2: Alternateur - pulsation de rotation

ω_r = pulsation de rotation [rad/s]

f_c = fréquence du courant induit [Hz]

f_r = fréquence de rotation [Hz]

n = nombre de paire de pôle



Figure 6: Alternateur de la centrale de Bieudron⁸

⁸ <https://library.e.abb.com/public/7d5874fd347170f3c1256ddd0034704a/48-50m471.pdf>

Transformateur

Le transformateur sert d'adaptateur entre le barrage et le réseau électrique pour lequel il produit. En effet, afin que toutes les centrales électriques puissent travailler ensemble sur le même réseau, elles doivent s'accorder sur deux points : La fréquence et la tension. En ce qui concerne la fréquence, c'est géré par la vitesse de rotation de la turbine de manière à atteindre les 50Hz avec précision. La tension en revanche, dépend du courant induit et n'est pas forcément au seuil choisi, d'où l'utilité du transformateur qui va adapter cette tension.

Un transformateur est un élément permettant justement de « transformer » la tension à l'entrée en une tension différente (plus grande ou plus faible). Sur le principe, celui-ci est constitué de deux bobinages placés côté à côté. Une tension est appliquée aux bornes de la première bobine, un courant circule donc au travers. Le courant alternatif engendre un champ magnétique et donc un flux magnétique. Le dit flux va influencer le deuxième bobinage et induira un courant dans celui-ci et donc une tension à ses bornes. Le rapport de transformation de la tension dépend directement du rapport de spires entre les bobines, on adapte donc ces valeurs en fonction de ce dont nous avons besoin. Notons que l'entrée et la sortie sont respectivement nommées « primaire » et « secondaire ».

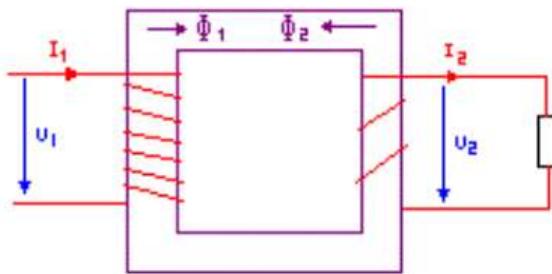


Figure 7: Illustration d'un transformateur⁹

Dans le cas d'un transformateur théorique, la puissance en entrée se retrouve à l'identique à la sortie. Dans le cas d'un transformateur pratique, nous avons les pertes suivantes dans le circuit :

- Les « pertes cuivre » que l'on retrouve dans le bobinage au primaire et secondaire. Cette perte est due à l'effet Joule.
- Les « pertes fer » que l'on retrouve sur la structure du transformateur. Elles sont produites par les courants de Foucault.

Ces pertes provoquent une différence entre les puissances du primaire et du secondaire, nous avons donc une notion de rendement qui entre en compte, celui-ci est malgré tout extrêmement élevé, tournant autour de 99%.

⁹ <http://www.installations-electriques.net/Apelm/Transfo.htm>

Equations du transformateur

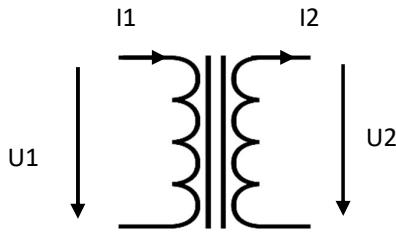


Figure 8: Principe du transformateur

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

Équation 3: Transformateur - Rapport de spires

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{cu} + P_{fe}}$$

Équation 4: Transformateur - Rendement

$$P_2 = P_1 \cdot \eta$$

Équation 5: Transformateur - Puissance

$$U_2 \cdot I_2 = U_1 \cdot I_1 \cdot \eta$$

Équation 6: Transformateur - Puissance décomposition

η : Rendement

P_{cu} : Perte cuivre [W]

P_{fe} : Perte fer [W]

P_1 : Puissance au primaire [W]

P_2 : Puissance au secondaire [W]

I_1 : Courant au primaire [A]

I_2 : Courant au secondaire [A]

U_1 : Tension au primaire [V]

U_2 : Tension au secondaire [V]

N_1 : Nombre de spire au primaire

N_2 : Nombre de spire au secondaire



Figure 9: Image d'un transformateur de puissance¹⁰

¹⁰ <http://www.hydroelectricite.ca/fr/les-composantes-dune-centrale-et-leur-fonctionnement.php>

Adaptation de la production en fonction du besoin

Un des grands défis des centrales est la quantité de production d'électricité. Il est important de produire la quantité la plus exacte possible car cette énergie n'est malheureusement pas stockable. Car, il ne faut pas gaspiller de l'énergie en fabriquer un surplus qui sera perdu et au contraire en fabriquer pas assez et que des consommateurs n'aient pas d'électricité. Cela nous amène à une régulation de production d'énergie en permanence.

Comme le réseau électrique suisse est connecté aux pays voisins et que nous avons les mêmes règles de régulation de fréquence, il est facile de se transmettre de l'énergie électrique. En Suisse, nous avons l'entreprise SwissGrid qui s'occupe du marché énergétique interne au pays et l'achat et la vente avec les pays voisins. Cette entreprise essaie au mieux de faire des prévisions en prenant le maximum de facteurs en compte que ce soit la météo, la saison, l'heure, ... En fonction de ces prévisions, nous avons une estimation des futures consommations et pouvons adapter notre production.

Afin d'expliquer au mieux la régulation sur le réseau, nous allons parler du tableau ci-dessous venant directement du site de SwissGrid. Ce tableau représente la fréquence du réseau.

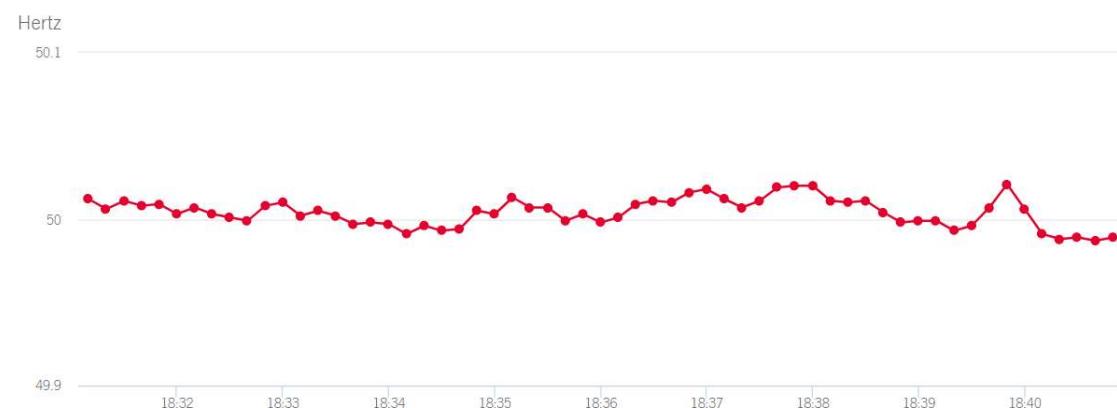


Figure 10 : Capture de la courbe de fréquence instantanée du réseau¹¹

Nous pouvons voir sur le graphique que la fréquence varie de quelques millihertz autour des 50 Hz voulu. Si la fréquence est plus haute que 50 Hz, c'est que nous avons une production trop élevée et qu'il faudra ralentir le rythme. Au contraire, si la fréquence est en dessous des 50 Hz, cela veut dire que nous ne fabriquons pas assez d'énergie électrique.

¹¹ <https://www.swissgrid.ch/fr/home/operation/regulation/frequency.html>

Sources des recherches : <https://www.gymnasecite.ch/wp-content/uploads/energie-hydraulique.pdf> / M. Francis Vieux / <https://www.swissgrid.ch/fr/home/operation/grid-data/current-data.html>

Toutes les centrales ont une certaine puissance installée. C'est-à-dire la capacité de production électrique qu'elles peuvent fournir. Afin de faire une régulation sur le réseau, chaque centrale va réguler de façon proportionnelle à sa puissance installée. Par exemple, une grande installation avec une forte puissance installée aura une plus grande régulation à faire qu'une petite installation. Lors de l'utilisation, la vitesse de la turbine doit rester constante. Ainsi que sa fréquence de rotation sera égale à la fréquence du réseau. C'est pour cela que si la consommation augmente, il y aura un plus grand effort à fournir pour garder la turbine à la bonne vitesse.

Pour les petites centrales ne disposant que d'un seul groupe (turbine, alternateur, ...), la régulation est assez basique. Si la consommation diminue, le générateur produira trop d'énergie et la vitesse augmentera. Alors, il faudra réduire le débit arrivant sur la turbine. Inversement, si la consommation augmente, il faudra ouvrir un peu plus la vanne pour que la vitesse ne chute pas. Sur des plus grandes installations, on peut retrouver plusieurs groupes. De ce fait, si la demande est trop importante, il y a la possibilité de le démarrer et de gérer les groupes sur le même principe expliqué précédemment. Toute cette gestion se fait automatiquement par des systèmes de régulation.



Figure 11 : Photographie des trois groupes de Bieudron¹²

Un des grands avantages des centrales hydroélectriques par rapport aux autres est qu'elles peuvent s'arrêter en quelques minutes seulement. Comme certaines centrales mettent beaucoup plus de temps pour s'arrêter, il est plus intéressant de les faire tourner en permanence. Alors, comme durant la nuit le kilowattheure est moins cher, nous utilisons cette énergie électrique afin de pomper l'eau et la remonter en amont du barrage. De ce fait, nous recréons de l'énergie cinétique qui sera réutilisable à un moment plus opportun.

¹² <http://www.grande-dixence.ch/docs/default-source/documentation/cleuson-dixence/Cleuson-Dixence-a-la-decouverte-d%27un-amenagement-hydroelectrique-unique-au-monde.pdf?sfvrsn=5>

Différents types de barrages¹³

Caractéristiques

¹⁴Barrage-voûte

Barrage de forme arquée, la poussée de l'eau est remontée sur les flancs de la vallée verticalement et horizontalement. On peut décrire la force de poussée que produit l'eau sur le barrage comme une force répartie sur un arc. Contrairement à une surface plane, cette forme de voûte permet au barrage de résister à de plus grande force de poussées.



Figure 13: image barrage-voûte

¹⁵Barrage-poids

Selon le principe de pascale, la force répartie que l'eau exerce sur la surface plane d'un barrage poids peut être représentée, en regardant latéralement, comme un triangle rectangle. La coupe du barrage-poids est également un triangle rectangle symétrique à celui de l'eau et en condition d'équilibre on peut constater que son propre poids suffit à contenir la poussée de l'eau (démonstration plus bas).



Figure 12: image barrage-poids (Grande Dixence)

Barrage à contreforts

¹⁶Un grand mur en béton appuie sur des contreforts en laissant des évidements pour économiser du béton. Ces contreforts relativement minces, conduisent les efforts jusqu'au fondation. Il existe plusieurs catégories de contrefort, à tête arrondi, à masque amont, à voûte multiple. On peut également voir des contreforts ajoutés à d'autre type de barrage si cela est nécessaire.



Figure 14: exemple de barrage avec contreforts

La digue

¹⁷La coupe verticale de ce type de barrage est beaucoup plus large, en générale on trouve en son centre un noyau étanche, retenu de part et d'autre par des remblais en terre ou en enrochement. Un revêtement étanche en béton ou en asphalte est prévu sur la face amont du barrage. On peut voir de telles barrages dans les installations au fil de haut ou installations marémotrices.



Figure 15: barrage digue Boukerdane

¹³ <http://www.swissdams.ch/fr/les-barrages/les-different-types-de-barrages>

¹⁴ Souce image : <https://lc.cx/J8I2ykvmG>

¹⁵ Souce image : <https://lc.cx/BnTSn2FD9>

¹⁶ Source image : <https://lc.cx/9RvHAKXn2>

¹⁷ Source image : <https://lc.cx/f0HK8sFj4>

Dimensionnement d'un barrage¹⁸

Le dimensionnement d'un barrage se réfère aux lois de la pression hydrostatique, en effet, la structure du barrage doit être capable de supporter la pression qu'exerce l'eau sur la surface immergée.

La manière dont le barrage résiste à cette pression dépend de sa forme (type de barrage, et de sa dimension), par exemple un barrage poids retiens le basculement par son propre poids alors que le barrage-vôûte permet une répartition de la pression sur les extrémités du barrage.

Hydrostatique

¹⁹Selon le principe de Pascal, la pression d'un fluide est identique dans toutes les directions, la démonstration de ce principe se fait en établissant l'équilibre d'un prisme triangulaire infinitésimal de fluide.

Les forces normales latérales n'ont pas d'influence sur le principe de Pascal, elles s'équilibrivent d'elles-mêmes.

Ce principe démontre que la pression d'un fluide augmente avec la profondeur ou diminue vers le haut de la colonne

Cette pression est définie par la relation suivante :

$$P = P_0 + \rho \cdot g \cdot H$$

Où P_0 est la pression à la surface du liquide à $H = 0$, si il s'agit de la pression atmosphérique il est courant de définir la valeur de la pression comme suit :

$$P = \rho \cdot g \cdot H \quad [Pa]$$

Équation 7: Principe de Pascal

Si l'on s'intéresse à la pression qu'exerce une certaine quantité d'eau sur un barrage poids par exemple, nous savons que selon l'étude sur les forces réparties et la pression des fluides, que la pression hydraulique qu'exerce l'eau sur la surface d'un barrage est représentée comme un triangle rectangle dont la force de poussée est exercée à la hauteur totale du bassin divisé par trois. Avec ces informations, on peut effectuer une estimation (simplifiée) des dimensions d'encombrement du barrage.

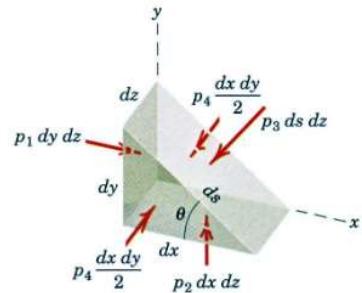


Figure 16: prisme triangulaire d'un fluide

¹⁸ Polycopier cours de statique 2 Carl Schmitt chapitre 8.5.2 Pression d'un fluide et 8.5.3 Pression hydrostatique

¹⁹ Image Polycopier cours de statique 2 Carl Schmitt chapitre 8.5.2 page 2

²⁰Schéma situation

21

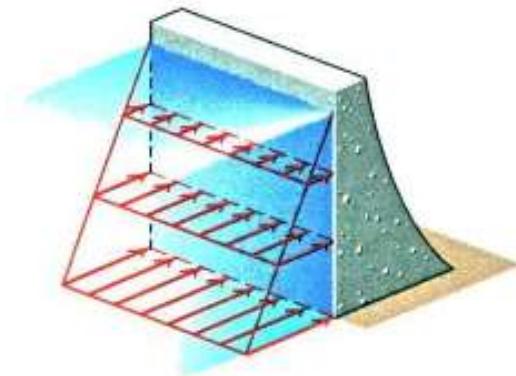


Figure 18: schéma d'une pression de fluide sur un barrage

Schéma technique DCL

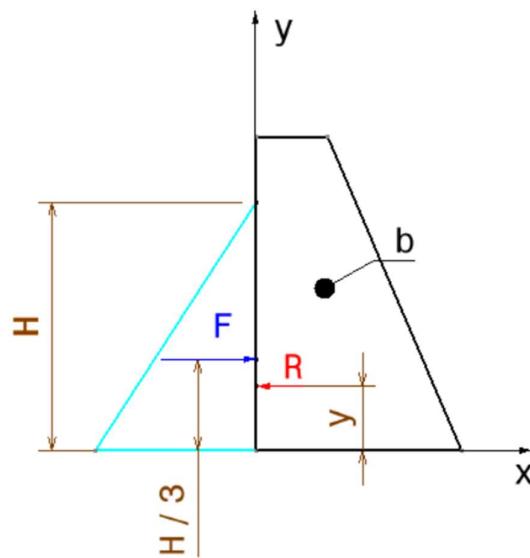


Figure 17: DCL pression d'un fluide sur un barrage

On sait que la pression est définie par la relation suivante :

$$P = \frac{F}{S}$$

donc :

$$F = P \cdot S$$

$$P_{eau} = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{2} \quad [Pa]$$

Équation 8: Pression hydrostatique moyenne

$$\text{D'où} \quad F = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{2} \cdot H \cdot b \quad [N]$$

b = largeur du barrage [m]

H = hauteur de chute [m]

Conditions d'équilibre du schéma technique (DCL) :

$$(1) \quad \Sigma F_x = 0 = F - R$$

$$F = R = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \cdot b}{2} \quad [N]$$

$$(2) \quad \Sigma M = 0 = F \cdot \frac{H}{3} - R \cdot y$$

$$y = \frac{F \cdot H}{R \cdot 3} = h \quad [m]$$

On peut donc en déduire que la résultante de force exercée par l'eau sur le barrage et la pression, augmente en fonction de la hauteur d'eau.

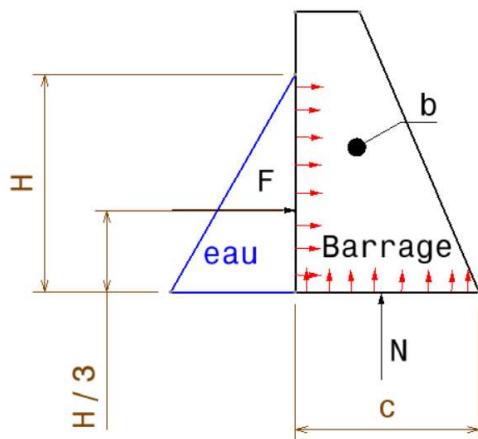
²⁰Image créée par Michaël Rodriguez sur Catia V5

²¹ Source image Polycopier cours de statique 2 Carl Schmitt chapitre Chap. 8 : Forces réparties page 3

Si l'on s'intéresse maintenant à la pression qu'exerce le barrage sur le sol, cette pression, pour assurer une condition d'équilibre doit être plus grande ou égale à la pression exercée par l'eau sur le barrage. Cela nous permet d'estimer la surface du barrage en contact avec le sol. Comme la largeur b du barrage et la hauteur de chute H sont connues, puisqu'elles dépendent de l'environnement dans lequel évolue le barrage, on peut chercher à connaître la profondeur de la base du barrage que nous appellerons c .

²²Inconnu : C

variables connues :



b = largeur barrage [m]

H = hauteur de chute [m]

m = masse barrage [kg]

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

On sait que la force de réaction

$$N = m \cdot g \quad [N]$$

Équation 9: force de réaction normale du barrage sur le sol

Figure 19: schéma des pressions exercées sur un barrage

Équilibre des pressions :

Pression du bassin d'eau sur le barrage = P_N équation 8

$$P_{eau} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad [Pa]$$

Pression du barrage sur le sol = P_b

$$P_N = \frac{m \cdot g}{c \cdot b} \quad [Pa]$$

Équation 10: Pression barrage sur le sol

Pour que la condition d'équilibre soit atteinte, il faut que $P_b \geq P_e$

En appliquant cette condition à (8)(10) on obtient la relation suivante pour c :

$$c \geq \frac{2 \cdot m}{\rho \cdot H \cdot b} \quad [m]$$

Vérification unité :

$$\frac{[m^3] \cdot [kg]}{[kg] \cdot [m^2]} = [m] \quad \text{On obtient bien des mètres}$$

On pourrait également s'intéresser à l'étude des pressions hydrauliques sur le barrage-vôûte mais cela sortirait du domaine traité par ce travail, il a donc seulement été démontré à titre d'exemple le dimensionnement d'un seul type de barrage

²² Image Crée par Michaël Rodriguez sur Catia V5

Turbines hydrauliques²³

Caractéristiques

Une turbine est une machine rotative dont la fonction consiste à convertir de l'énergie hydraulique en énergie électrique. Il existe différents types de Turbines hydrauliques que l'on peut séparer en deux catégories :

- Les Turbines à action
- Les Turbines à réaction

Turbines à action

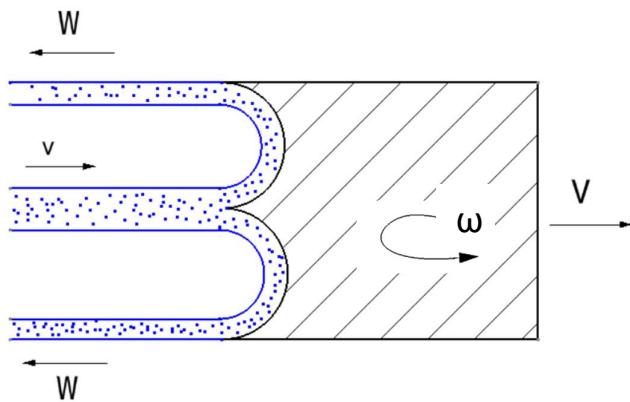
Principe de fonctionnement

La turbine est mise en rotation par un jet d'eau agissant sur des augets ou des aubes profilées disposées à intervalle régulier autour d'une roue.

La force qu'exerce le jet est transformée en couple qui en résulte d'une puissance mécanique à la sortie de l'arbre de la turbine.

À la différence des turbines à réaction, les turbines à action ne sont pas immergées et l'énergie que transmet l'eau sur l'auget est entièrement sous la forme d'énergie cinétique. Les turbines à action sont donc soumises à la pression atmosphérique de chaque côté des augets.

Vitesse d'entrée et de sortie



24

Figure 20: Coupe schématique d'un auget soumis à un jet d'eau

$$W = 2V - v \quad [m/s]$$

Équation 11: vitesse de sortie de l'eau

²³ Document technique pdf, Turbine hydraulique, Office fédéral des questions conjoncturelles, ISBN 3-905232-54-5, chap. 1.8 Résumé des principaux types de turbines et de leur domaine d'application.

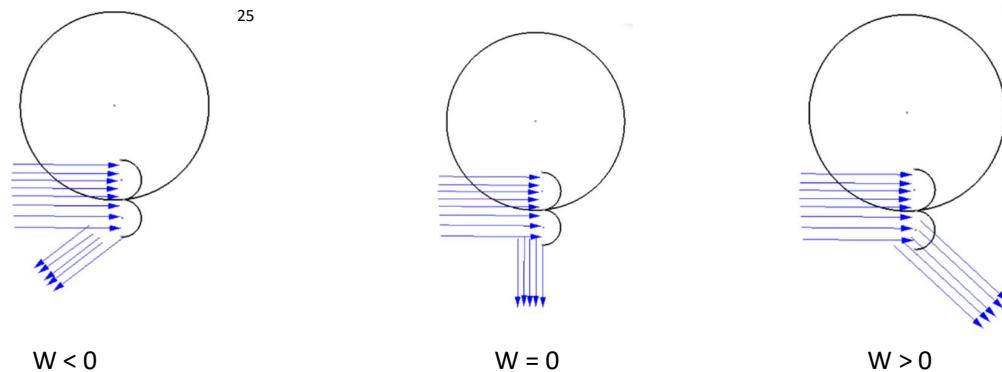
Cours personnel sur les Turbines donné par M. Croci Mirko

Guide de la technique tome 3 l'énergie, presses polytechnique et universitaire Romande

²⁴ Image créée par Michaël Rodriguez sur Catia V5

Le jet entrant et scindé en deux par l'arête médian se trouvant au centre de l'auget, il en résulte une vitesse de jet entrant ainsi qu'une vitesse de sortie du jet.

La condition permettant un rendement cinétique optimal est définie en fonction de la vitesse de sortie du jet. Les trois schémas ci-dessous représentent les différentes conditions d'entrée et de sortie du jet :



La condition permettant le rendement optimal est donc $W = 0$ (condition de vitesse du jet sortant nulle démontrée plus bas)

Moment Turbine

Le jet entrant exerce sur l'auget une force en fonction de sa vitesse d'entrée v ,

La force du jet est donnée par l'expression suivante :

$$F = 2 \cdot \dot{m} \cdot (v - V) \quad [N]$$

Équation 12: Force du jet d'entrée

Avec $V \in [0, v]$

Et \dot{m} = débit massique

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot S \quad [kg/s]$$

Équation 13: débit massique

Avec ρ = masse volumique de l'eau $[kg/m^3]$

Et S = section du jet entrant $[m^2]$

Par la force que le jet entrant exerce sur l'auget, la turbine est mise en rotation et transmet un Moment, il en résulte la relation suivante :

$$M = F \cdot R = 2 \cdot \dot{m} \cdot (v - V) \cdot R \quad [Nm]$$

Équation 14: moment de force d'une turbine à action

²⁵ Images créées par Michaël Rodriguez sur Catia V5

Puissance mécanique

Par les lois de la mécanique nous savons que $V = \omega \cdot R$ [m/s]

Et que $P = M \cdot \omega$ [W]

Dans notre cas, $P = M_{(\omega)} \cdot \omega$ [W]

Donc il en ressort que :

$$P = 2 \cdot \dot{m} \cdot (v - R \cdot \omega) \cdot R \cdot \omega \quad [W]$$

Équation 15: puissance mécanique d'une turbine à action

Le diagramme ci-dessous représente la puissance en fonction de la vitesse de rotation de la turbine :

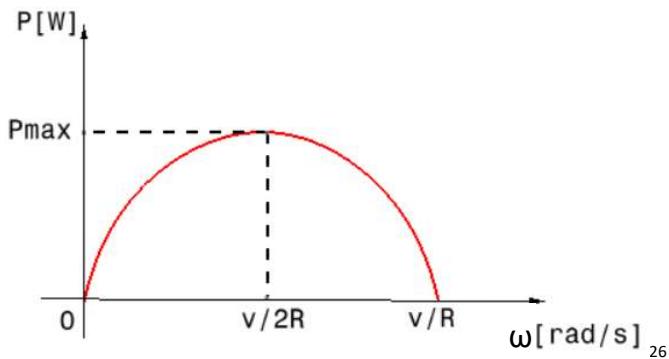


Figure 21: graphique de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine

$$P_{max} = 2 \cdot \dot{m} \cdot \left(v - \frac{v}{2 \cdot R} \cdot R \right) \cdot R \cdot \frac{v}{2 \cdot R} \quad [W]$$

$$P_{max} = \frac{\dot{m} \cdot v^2}{2} \quad [W]$$

Équation 16: Puissance mécanique maximale d'une turbine à action

On peut ainsi vérifier la condition de vitesse nulle du jet sortant :

$$W = 2 \cdot V - v = 2 \cdot \frac{v}{2} - v = 0 \quad [m/s]$$

On peut en déduire que la puissance mécanique produite par le jet entrant est maximum lorsque la vitesse du jet sortant W est nulle.

²⁶ Image créée par Michaël Rodriguez sur Catia V5

Turbine Pelton

Histoire :

L'histoire de la turbine Pelton a commencée en 1878. Durant cette année, l'ingénieur américain Lester Allan Pelton a déposé un brevet sur la forme d'un auget de la turbine ainsi que la manière de les fixer sur la roue principale de la turbine. Depuis ce jour, il y a eu des améliorations afin que la turbine soit plus performante.

Fonctionnement :

La turbine Pelton est une roue à augets disposé à intervalle régulier autour de sa périphérie, la mise en rotation se fait par l'injection de jets d'eau qui exercent une force sur les augets.

Les augets sont en forme de double cuillère et sont dimensionnés pour permettre à l'eau de s'échapper sur les côtés et ainsi obtenir un maximum de rendement. Chaque auget possède une arrête médiane, permettant au jet d'eau de se séparer en deux, provoquant ainsi un changement de direction du jet de presque 180°. Le nombre d'auget est défini en fonction de la vitesse du jet entrant, il faut donc augmenter le nombre d'auget si la vitesse spécifique est faible. En cas de haute vitesse du jet entrant, les dimensions des augets doivent être augmentées.

Une Turbine Pelton peut être mise en mouvement par plusieurs injecteurs (de 1 à 6), le débit de l'injecteur peut être piloté par une électrovanne appelée pointeau mobile et placée à l'intérieur de l'injecteur.



28

Figure 22: Turbine Pelton en position verticale



Figure 23: Turbine Pelton

²⁷ Source image : <https://lc.cx/XRZ9vBY2n>

²⁸ Image créée par Michaël Rodriguez sur SolidWorks 2018



Figure 24: Turbine Pelton en position horizontale

Dimensionnement d'une turbine Pelton :

On peut connaître la rayon Principal de la turbine R ainsi que la section du jet entrant S en utilisant la loi de Bernoulli :

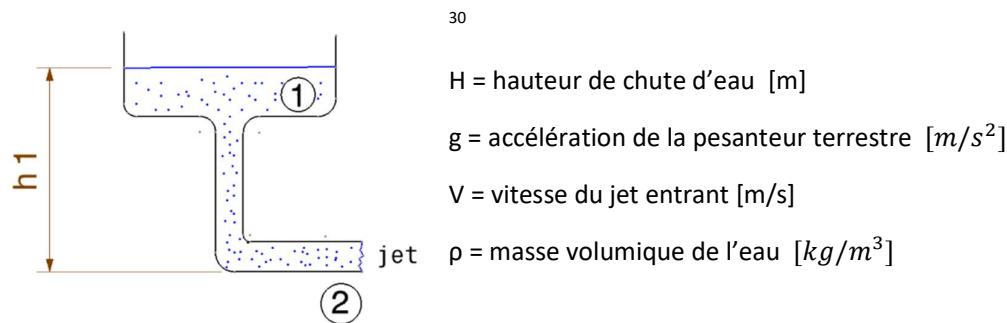


Figure 25: Schéma représentatif de l'équation de Bernoulli

$$g \cdot H_0 + \frac{v_0^2}{2} + \frac{P1}{\rho} = g \cdot H + \frac{v^2}{2} + \frac{P2}{\rho}$$

Équation 17: équation de Bernoulli

Comme $P1 = P2 =$ Pression atmosphérique et que v_0 et $H_0 = 0$

On obtient la relation suivante :

$$g \cdot H = \frac{v^2}{2}$$

Avec $v = 2 \cdot V = 2 \cdot \omega \cdot R$

²⁹ Source image : <https://lc.cx/r3v8Bv4Fc>

³⁰ Image créée par Michaël Rodriguez sur Catia V5

On peut donc définir le rayon principal en fonction de ω et H par la relation suivante :

$$R = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{g \cdot H}{2}} \quad [m]$$

Équation 18: Rayon turbine Pelton

Pour connaitre la section du jet entrant, il faut revenir à l'équation de la puissance mécanique (16)

Avec la condition de puissance max $v = 2V$ et sachant que $\dot{m} = \rho \cdot \omega \cdot R \cdot S \quad [kg/s]$

Le moment devient $M = 4 \cdot R^3 \cdot \omega^2 \cdot \rho \cdot S \quad [Nm]$

$$P = M \cdot \omega = 2 \cdot R \cdot \rho \cdot S \cdot (2 \cdot R^2 \cdot \omega^2) \quad [W]$$

Par l'équation de Bernoulli, la puissance devient $P = 2 \cdot R \cdot \rho \cdot S \cdot (g \cdot H) \quad [W]$

On peut donc définir la section du jet entrant si H et ω sont connus par la relation suivante :

$$S = \frac{P}{2 \cdot g \cdot H \cdot R \cdot \omega \cdot \rho} \quad [m^2]$$

Équation 19: section du jet entrant

Turbine Crossflow

Histoire :

Cette turbine a été pensée pour la toute première fois par l'ingénieur Australien Anthony Mitchell en 1903. Peu avant 1920, le professeur hongrois Donat Banki développa la turbine et l'a rendu populaire. Mais c'est seulement en 1922 que l'allemand Fritz Ossberger a obtenu le brevet de la turbine et a commencé à la commercialiser. Depuis la commercialisation de cette dernière, très peu de choses ont changées de la turbine initiale. Comme cette conception a été traitée par plusieurs personnes, elle porte les différents noms suivants :

- Turbine Banki – Mitchell
- Turbine Ossberger
- Turbine à flux croisé

Fonctionnement :

Ces turbines sont faites pour des chutes allant jusqu'à 200m. Malgré le fait qu'elles aient un rendement inférieur aux autres types de turbine, elles ont l'avantage d'avoir une très grande souplesse d'utilisation comme elles supportent facilement de gros changement de débit. Pour ce qui est du fonctionnement de la turbine, nous pouvons voir le chemin de l'eau sur l'image ci-dessous. Dans un premier temps, l'eau est injectée sur les aubes depuis l'extérieur. Après ce premier impact, le jet d'eau aura déjà appliqué une certaine force sur la turbine et sera dévié vers l'intérieur de celle-ci grâce à la courbe des aubes. Avant de ressortir de la turbine, le fluide viens frapper à nouveau les aubes de la turbine afin de transmettre le plus d'énergie possible.

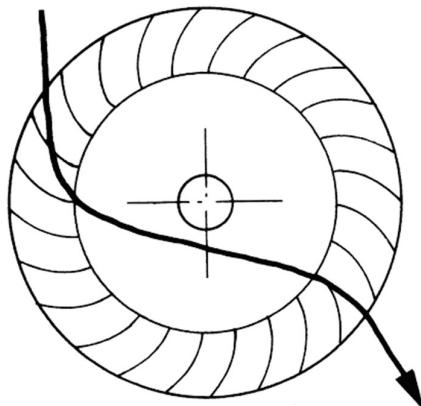


Figure 26 : Chemin du fluide dans la turbine Banki³¹

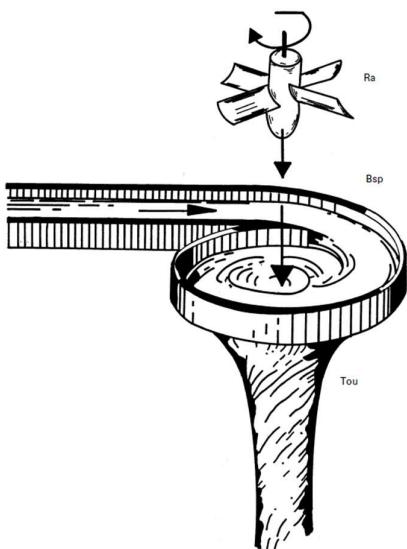
Souvent, ces turbines sont divisées en deux secteurs (une de 1/3 de la longueur et la turbine et le deuxième les 2/3 restant) qui peuvent être activé en même temps ou séparément. Cette opération permet d'optimiser le rendement en fonction du débit d'arrivée. Sur le graphe suivant nous pouvons voir les différentes courbes de rendement en fonctions du débit d'arrivée et des secteurs activés.

³¹ <http://ilawillot.chez.com/principe/principe.htm>

Turbine à réaction

Principe de fonctionnement

A la différence des turbines à action, les turbines à réaction sont immergées et sont soumises à des variations de pression et à l'énergie cinétique produite par l'eau.



³²La bâche principale est en forme de spirale, ce qui permet la formation d'un tourbillon. Le mouvement circulaire du tourbillon est récupéré par les aubages d'une roue en rotation formant ainsi des filets d'eau parallèle à l'axe de rotation.

La force hydrodynamique produite par l'écoulement de l'eau sur les aubes provoque un couple sur l'arbre de la turbine. Comme les ailes d'un avion, il y a une différence de pression entre la face d'entrée du profil de l'aubage et la face de sortie.

Ra : Roue à aubes de la turbine

Bsp : Bâche spirale

Tou : Tourbillon d'eau

Figure 27: Schéma du fonctionnement des turbines à réaction

On peut définir l'énergie que reçoit une turbine à réaction par l'application de la relation d'Euler

$$E = g \cdot H = \omega \cdot R_1 \cdot v_1 - \omega \cdot R_2 \cdot v_2 \quad [J]$$

Équation 20: Relation d'Euler

ω = vitesse angulaire de la turbine [rad/s]

R_1 = rayon extérieur de l'aube [m]

R_2 = rayon intérieur de l'aube [m]

v_1 = vitesse d'entrée de l'eau [m/s]

v_2 = vitesse de sortie de l'eau [m/s]

H = hauteur de chute [m]

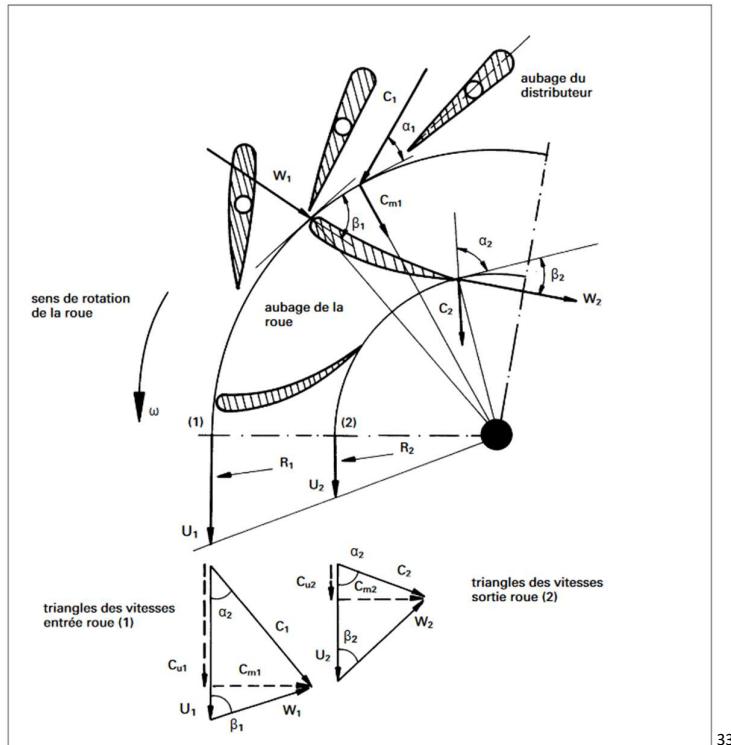
Par cette formule, on peut définir un coefficient qui nous permettra par la suite le dimensionnement de la turbine :

$$E = \frac{2 \cdot g \cdot H}{(R \cdot \omega)^2} \quad [1/rad^{-2}]$$

Équation 21: coefficient d'énergie

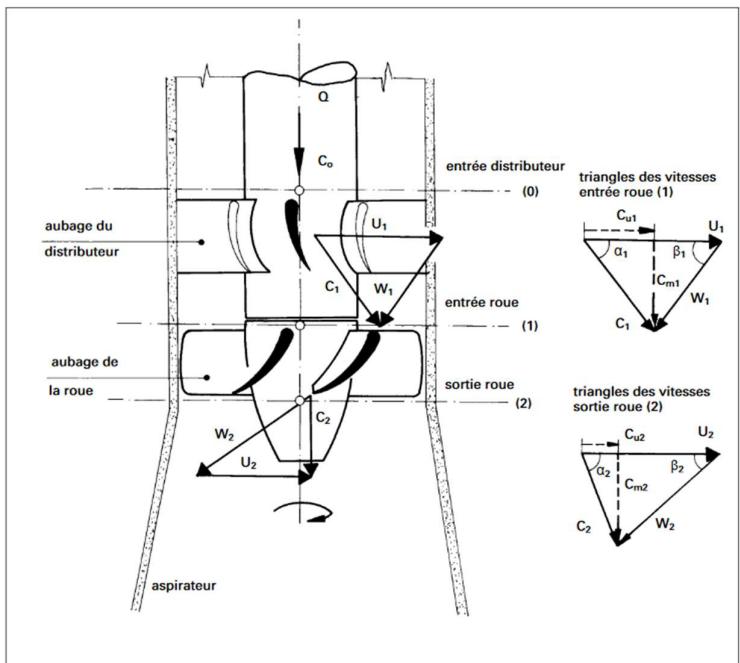
On trouve deux types de turbines à réaction, les turbines radiales dont la turbine mise en rotation par le tourbillon que forme la bâche spirale et les turbines axiales qui ne possèdent pas de bâche spirale mais dont l'aubage distributeur permet la mise en rotation.

³² Source image dans Document technique pdf, Turbine hydraulique, Office fédéral des questions conjoncturelles, ISBN 3-905232-54-5, chap. 1.8 Résumé des principaux types de turbines et de leur domaine d'application. Page 59



33

Figure 28: Schémas dessinés d'une turbine à réaction radiale



34

Figure 29: Schémas dessinés d'une turbine à réaction axiale

³³ Source image dans Document technique pdf, Turbine hydraulique, Office fédéral des questions conjoncturelles, ISBN 3-905232-54-5, chap. 1.8 Résumé des principaux types de turbines et de leur domaine d'application. Page 62

³⁴ Source image dans Document technique pdf, Turbine hydraulique, Office fédéral des questions conjoncturelles, ISBN 3-905232-54-5, chap. 1.8 Résumé des principaux types de turbines et de leur domaine d'application. Page 63

On renomme les variables des deux schémas ci-dessus comme suit :

$$C_m = V_m \text{ [m/s]}$$

$$U = V \quad \text{Vitesse de la turbine [m/s]}$$

$$C = v \quad \text{Vitesse du jet [m/s]}$$

D'après les deux schémas ci-dessus, si on se réfère à la relation de Châle pour les vecteurs compris dans les polygones fermés, on trouve la relation suivante :

$$W = v - V \text{ [m/s]}$$

Équation 22: vitesse relative de l'eau par rapport à l'aube

W = vitesse relative de l'eau par rapport à la turbine

Vitesse méridienne de la turbine v_m

Avec cette vitesse méridienne, on peut définir un autre coefficient que l'on va nommer coefficient de débit :

$$\mu = \frac{v_m}{R \cdot \omega} \text{ [rad}^{-1}\text{]}$$

Équation 23: coefficient de débit

Ces coefficients nous seront utiles par la suite pour le dimensionnement des turbines à réaction.

Turbine Francis

Histoire :

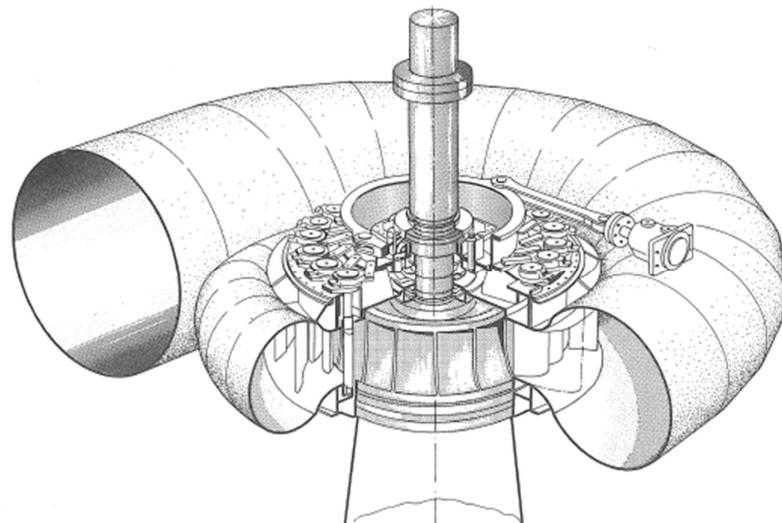
Le français Jean-Victor Poncelet a inventé la première version de cette turbine à la fin des années 1820. Ce n'est que 6 années plus tard que l'inventeur français Benoît Fourneyron a amélioré le système afin d'augmenter le rendement de cette dernière à 80%. Pour atteindre ce rendement, il a fait une modification sur la circulation de l'eau en la redirigeant radialement à travers la roue. Mais le premier brevet de ce système fut déposé en 1838 par le nord-américain Samuel B. Howd. Pour finir, James B. Francis popularisa cette turbine et lui donna son nom.

Fonctionnement :

Cette turbine est la plus rependue et la plus puissante, la Turbine Francis du central d'Itaipu au Brésil peut atteindre jusqu'à 800 MW de puissance. La turbine Francis fonctionne comme une turbine à réaction dont la roue principale récupère l'énergie créée par un tourbillon d'eau se formant par l'injection d'un jet d'eau sur la bâche spirale, l'avant distributeur et le distributeur.

L'eau est ensuite évacuée par un tuyau de forme coudé appelé diffuseur. La roue est bien sûr entièrement immergée.

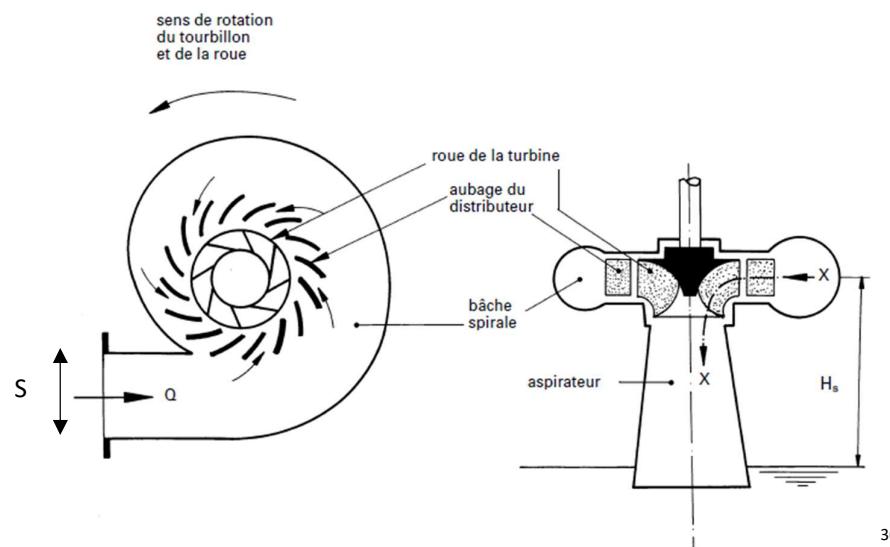
Voici une illustration détaillée d'une turbine Francis :



35

Figure 30: Turbine Francis

Débit volumique



36

Figure 31: représentation schématique du fonctionnement d'une turbine Francis

Le débit volumique \dot{Q} dépend de la vitesse dite vitesse méridienne absolue v_m et de la surface S perpendiculaire à v_m .

$$Q = v_m \cdot S \quad [m^3/s]$$

Équation 24: débit volumique

³⁵ Source image :Guide de la technique tome 3 l'énergie, presses polytechnique et universitaire Romande page 35

³⁶ Source image dans Document technique pdf, Turbine hydraulique, Office fédéral des questions conjoncturelles, ISBN 3-905232-54-5, chap. 1.8 Résumé des principaux types de turbines et de leur domaine d'application. Page 61

Dimensionnement turbine Francis

37

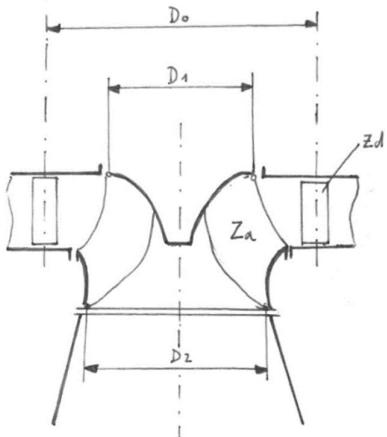


Figure 32: dessin de la cotation fonctionnelle d'une turbine Francis

D_0 = diamètre distributeur [m]

Z_a = nombre d'aubes de la roue

Z_d = nombre d'aubes du distributeur

Q = débit avec rendement maximum [m^3/s]

H = Hauteur de chute [m]

A l'aide des coefficients définis plus haut, les dimensions de la Turbine Francis peuvent être déterminées par les relations suivantes :

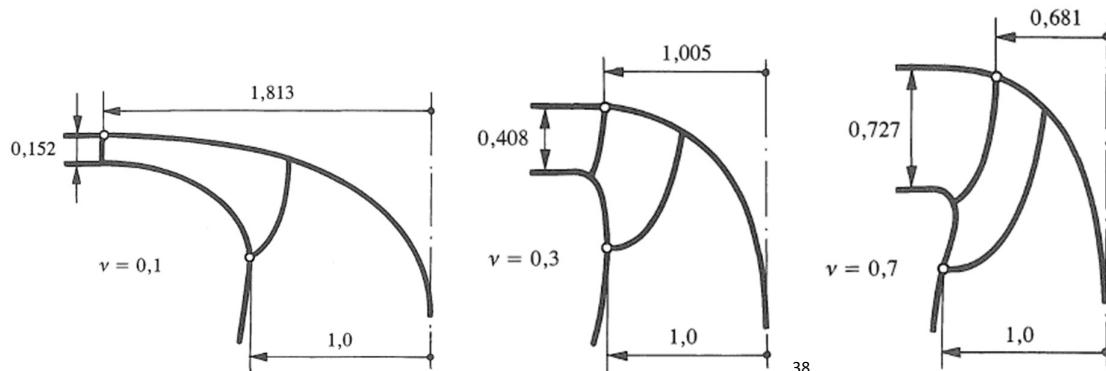
$$D_1 = 2 \cdot R_1 = 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot g \cdot H}{E_{(R1)} \cdot \omega^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [m]$$

Équation 25: Diamètre d'entrée turbine Francis

$$D_2 = 2 \cdot R_2 = 2 \cdot \left(\frac{Q}{\mu_{(R2)} \cdot \omega \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [m]$$

Équation 26: Diamètre de sortie turbine Francis

Voici quelques variantes de dimensions de turbine définies en fonction de la vitesse spécifique v



³⁷ Dessin réalisé par Michaël Rodriguez

³⁸ Sources Images :Guide de la technique tome 3 l'énergie, presses polytechnique et universitaire Romande page 36

Turbine Kaplan

Histoire :

Les premiers brevets de cette turbine sont faits par l'ingénieur autrichien Victor Kaplan en 1912-1913. Ce dernier donna son nom à la turbine. Après la première conception, quelques années de développement ont suivi durant lesquelles plusieurs petites machines ont été construites. Il a fallu attendre l'année 1925 pour voir la première grande réalisation de cette turbine en Suède.

Fonctionnement :

Les Turbines Kaplan sont les plus récentes des turbines modernes, elles sont adaptées pour les installations en basse chute du fait de leurs grande vitesse spécifique. Elles possèdent les mêmes éléments que la turbine Francis avec un avant distributeur, un distributeur et une bâche spirale. Cependant la roue est différente, semblable à une hélice de bateau, elle possède un nombre d'aube qui varie en fonction de la hauteur de chute. Au minimum 3 aubes pour les basses chutes et 8 pour les hautes chutes. Une particularité des turbines Kaplan est qu'elles possèdent des aubes mobiles, ce qui permet d'adapter le débit fournit par le distributeur en modifiant l'angle d'inclinaison des aubes.

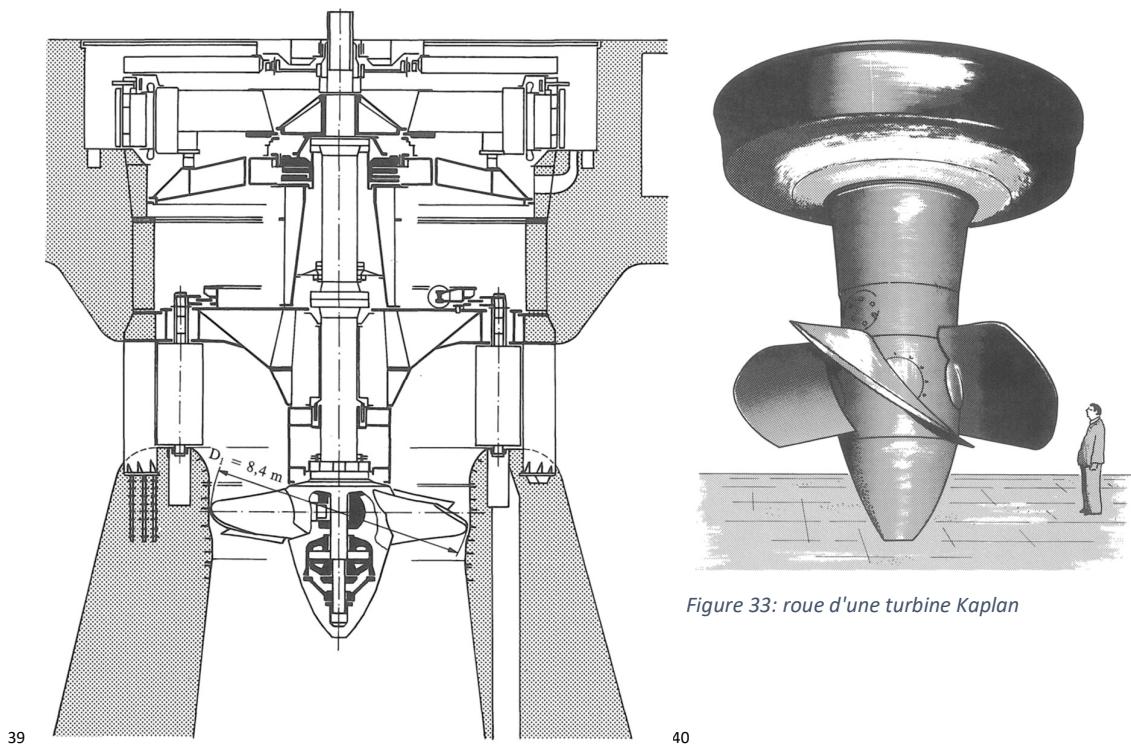
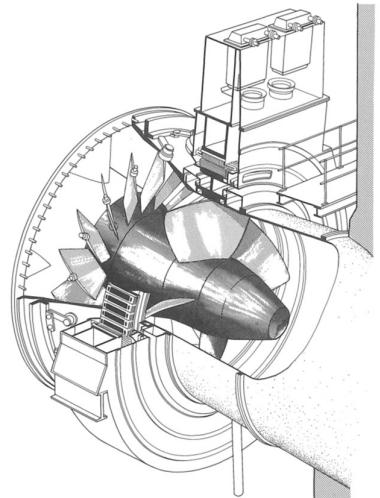


Figure 34: Coupe d'une turbine Kaplan de la centrale de Jupiá au Brésil, puissance 103 MW

³⁹ Sources Images : Guide de la technique tome 3 l'énergie, presses polytechnique et universitaire Romande page 36

⁴⁰ Sources Images : Guide de la technique tome 3 l'énergie, presses polytechnique et universitaire Romande page 37

Il existe une variante de turbine Kaplan appelée Turbine à hélice dont les aubes ne sont dans ce cas-là pas mobiles, ce qui implique une conception plus économique. Cependant, cela limite la plage de puissance et ces turbines ne sont donc pas adaptées à tous les types d'installation de puissance hydraulique.



41

Figure 35: Turbine hélice Straflo

Turbine Bulbe

À partir de la turbine Kaplan, il a été créé le groupe bulbe. Ce groupe est constitué d'une turbine axiale. La particularité de ce groupe est que l'alternateur se trouve directement dans la turbine. De ce fait, il n'y a pas besoin de carter autour de la turbine pour guider l'eau comme il n'y a pas d'axe d'entraînement partant vers l'extérieur. Alors comme nous pouvons le voir sur l'image ci-dessous, l'eau s'écoulera simplement à travers le système dans la conduite. Ce groupe est très bien adapté à des chutes d'une vingtaine de mètres seulement.

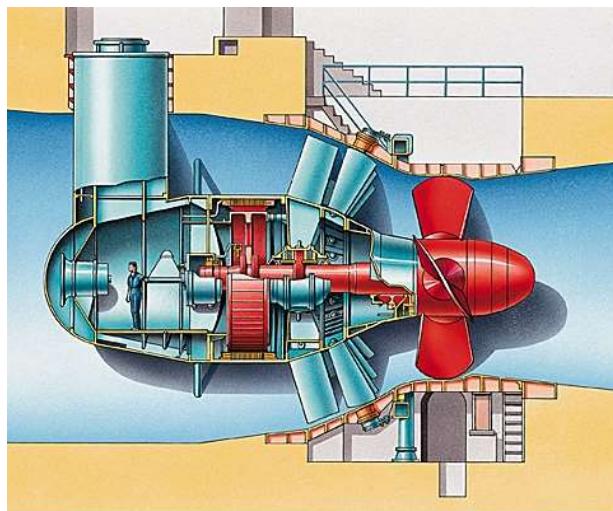


Figure 36 : Représentation du groupe bulbe⁴²

⁴¹ Sources Images : Guide de la technique tome 3 l'énergie, presses polytechnique et universitaire Romande page 38

⁴² <http://tpe-barrages-jz.e-monsite.com/pages/ii-les-differents-types-de-turbines/2-la-turbine-bulbe.html>

Pompes hydrauliques⁴³

Principe de fonctionnement

Une pompe hydraulique, à l'inverse de la turbine, sert à transformer de l'énergie mécanique en énergie hydraulique. Elles transfèrent à un liquide, l'énergie qu'elles reçoivent d'un moteur d'entrainement.

Nous avons vu précédemment qu'avec un écoulement qui s'effectue sous l'effet naturel de la gravité, l'énergie cinétique accumulée (Bernoulli) est transformée en énergie mécanique par le biais d'une turbine. Si en revanche, on souhaite provoquer un écoulement opposé à la gravité, l'utilisation d'une pompe sera nécessaire pour fournir mécaniquement cette énergie. On appelle cet écoulement hauteur d'élévation. Les turbomachines conçues pour alterner entre un mode pompe et un mode turbine sont appelées pompes-turbines ou pompes inversées car on alterne leur mode de fonctionnement par inversion de leur sens de rotation.

Les installations hydrauliques se subdivise en deux domaines :

- Les installations de puissance, comme les installations hydroélectrique (centrale à accumulation)
- Les installations de commande ou oléo hydraulique

Les pompes sont des machines très utilisées dans les deux domaines, mais comme le sujet traite des centrales hydrauliques, nous nous intéresserons essentiellement à la production d'énergie et donc à l'installation de puissances

Utilisation des pompe-turbine

Dans le cas d'une centrale à accumulation (barrage poids ou barrage-voûte par exemple) on ne prélève sur le volume disponible que la quantité d'eau nécessaire la production d'énergie à la demande du consommateur. Pour le barrage aux files de l'eau (barrage digue par exemple) le débit d'eau s'écoule indéfiniment et indépendamment de la demande d'énergie, il a donc été nécessaire de mettre en œuvre un système d'accumulation par pompage. Ce système dépend de l'utilisation de pompe-turbine.

Durant les pics de consommation, où la demande d'énergie des consommateurs est la plus haute, la machine fonctionne en mode turbine et la machine électrique en génératrice.

Durant les heures généralement nocturne, la quantité d'énergie produite par les centrales au fil de l'eau, dépasse la quantité demandée par les consommateurs. La machine fonctionne alors en mode pompe et la machine électrique en moteur.

⁴³ Document technique pdf, Turbine hydraulique, Office fédéral des questions conjoncturelles, ISBN 3-905232-54-5, chap. 1.8 Résumé des principaux types de turbines et de leur domaine d'application.

Turbopompe

Qu'elles soient essentielles ou accessoires, aujourd'hui l'utilisation de pompes est extrêmement rependue dans n'importe quel type d'installation hydraulique tant le besoin de traiter, conditionner ou acheminer des liquides est important. Il existe donc autant de formes et d'installations que de type de pompes.

On utilise généralement des turbopompes dans les installations de puissance fournissant plusieurs centaines de mégawatt [MW].

Cette machine se présente dans un ordre inverse à celui d'une turbine puisque le sens d'écoulement est inversé. Pourtant elle se compose des mêmes éléments, bien qu'elle ne possède en général pas d'organe de réglage de débit et que la forme du profil hydraulique dépend grandement de la vitesse spécifique.

Les pompes à faible vitesse spécifique sont fortement radiales (haute pression et faible débit)

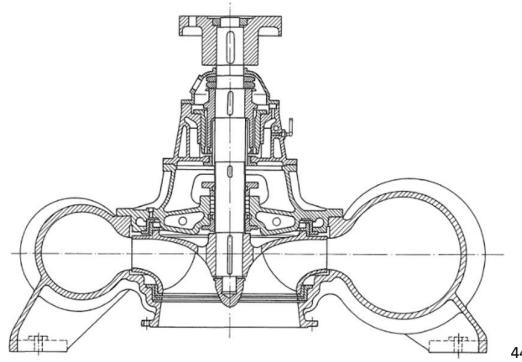


Figure 37: coupe d'une turbopompe

Les pompes à haute vitesse spécifique ont un écoulement purement axial

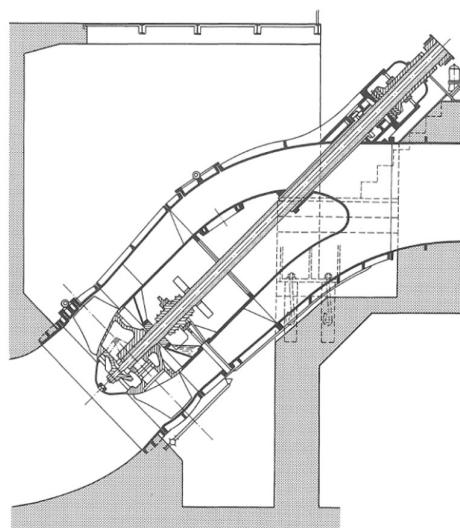
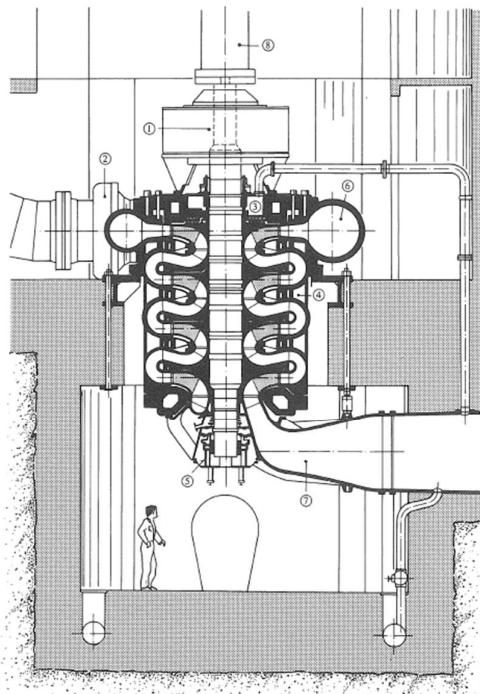


Figure 38: coupe d'une turbopompe axiale

⁴⁴ Sources des deux Images : :Guide de la technique tome 3 l'énergie, presses polytechnique et universitaire Romande page 39

Les pompes multi-étages ou multicellulaires, sont utilisées pour garder le débit constant par multiplication de la pression, il s'agit simplement de plusieurs roues dans le même bâti.



1. Pivot combiné avec le palier guide
2. Joint de compensation
3. Joint d'étanchéité à labyrinthe
4. Corps de pompe
5. Palier guide inférieur
6. Bâche spirale
7. Coude d'aspiration
8. Arbre tubulaire intermédiaire

45

Figure 39: Coupe d'une pompe multicellulaire, centrale de Roncovalgrande

Rendement des différents types de turbines⁴⁶

Vitesse spécifique

Les différents types de turbines sont souvent classés d'après un paramètre appelé vitesse spécifique.

Cette vitesse est donnée généralement en tr/min et désigne la vitesse de rotation d'une turbine travaillant avec un débit de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ et soumise à une hauteur de chute de 1 m

$$n_s = n \times \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} \quad [\text{tr}/\text{min}]$$

Équation 27: vitesse de rotation d'une turbine

⁴⁵ Source image : Guide de la technique tome 3 l'énergie, presses polytechnique et universitaire Romande page 40

⁴⁶ Document technique pdf, Turbine hydraulique, Office fédéral des questions conjoncturelles, ISBN 3-905232-54-5, chap. 1.8 Résumé des principaux types de turbines et de leur domaine d'application.

La classification des turbines se fait notamment par un paramètre que les spécialistes nomment vitesse spécifique ν sans dimensions et qui se calcule à partir des grandeurs suivantes :

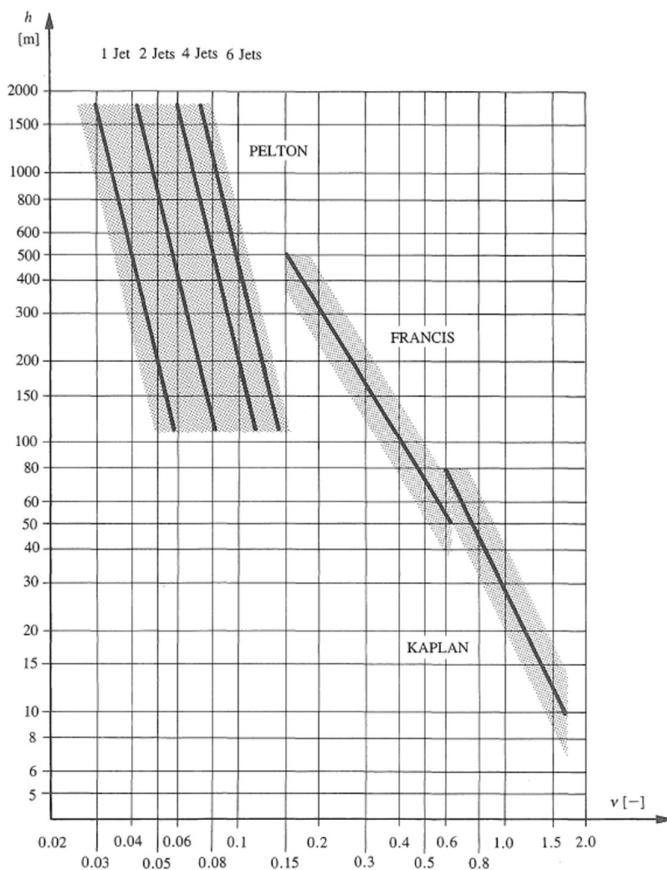
- L'énergie E [J/kg] qui se calcule à partir de la chute d'eau
- Le débit volumique Q [m^3/s] à exploiter par la machine
- La vitesse de rotation ω [rad/s] de la machine

On trouve donc la relation suivante :

$$\nu = \omega \cdot \frac{\left(\frac{Q}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}{(2 \cdot g \cdot H)^{\frac{3}{4}}} [-]$$

Équation 28: vitesse spécifique

Le graphique ci-dessous nous montre une classification des différentes turbines d'après la hauteur de chute en fonction de la vitesse spécifique :



47

L'application des Turbines Pelton est comprise entre $\nu = 0.03$ et $\nu = 0.14$ pour une hauteur de chute maximale de 1800 m.

Les Turbines Francis ont une vitesse spécifique comprise entre $\nu = 0.6$ et $\nu = 1.7$ pour une hauteur de chute maximale de près de 700m.

Les turbines Kaplan comme expliqué plus haut, sont des machines à haute vitesse spécifique, de la gamme de $\nu = 0.6$ à $\nu = 1.7$ pour une hauteur de chute maximale de 70m.

Figure 40: graphique de la hauteur de chute en fonction de la vitesse spécifique

⁴⁷ Source image : Document technique pdf, Turbine hydraulique, Office fédéral des questions conjoncturelles, ISBN 3-905232-54-5, chap. 1.8 Résumé des principaux types de turbines et de leur domaine d'application.

Classification des turbines d'après leur utilisation

On peut classer les différents types de turbine d'après leurs utilisations dans certaines conditions :

	Débit volumique Q [m ³ /s]	Hauteur de chute H [m]	Vitesse spécifique v [-]
Pelton	Faible	Grand	0.03 - 0.14
Crossflow	Faible à moyen	Moyen à faible	0.06 - 0.45
Kaplan	Grand	Petit	0.6 – 1.7
Francis	Moyen	Moyen	0.6 – 1.7
Pompe-turbine	Faible à moyen	Grand à moyen	0.032 – 0.634

Tableau 1: classification des types de turbines

Rendement

Les turbines hydrauliques modernes peuvent atteindre un rendement de plus de 96%, cependant il varie en fonction du type de turbine utilisée :

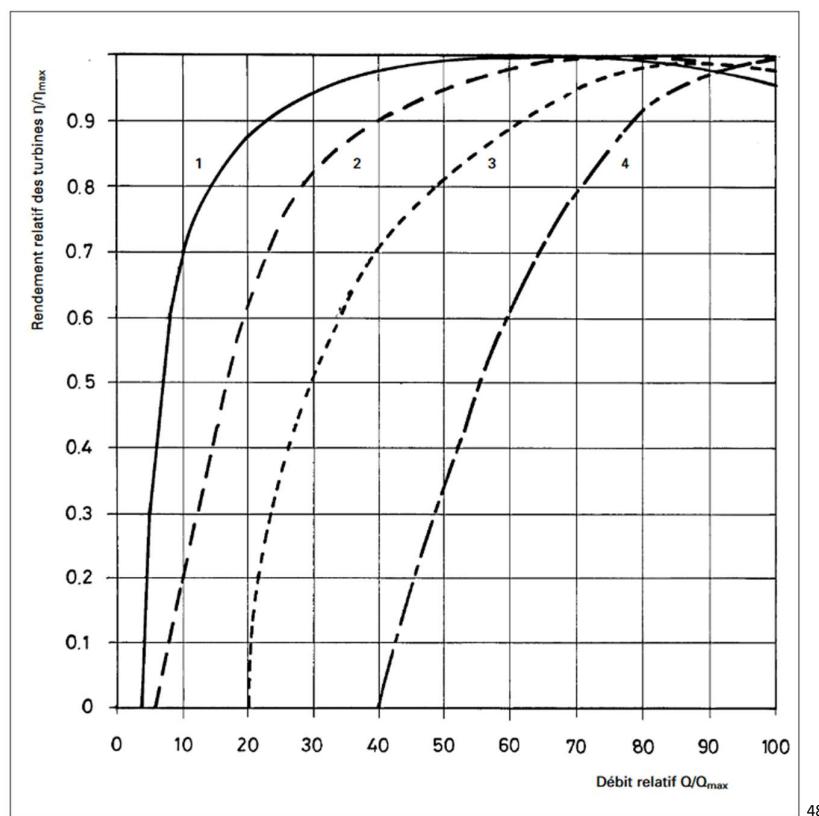


Figure 41: Graphique représentatif du rendement relatif en fonction du débit volumique relatif

⁴⁸ Source image : Document technique pdf, Turbine hydraulique, Office fédéral des questions conjoncturelles, ISBN 3-905232-54-5, chap. 1.8 Résumé des principaux types de turbines et de leur domaine d'application page 93

On trouve différentes valeurs pour désigner les rendements maximums atteints par les différentes turbines et pompes-turbines. Ces valeurs sont bien sûr approximatives mais donnent une idée quant à l'efficacité de ces machines.

⁴⁹Selon le graphique ci-dessus :

Courbe 1 :	Turbine Pelton	$\eta \cong 90\%$
Courbe 2 :	Turbine Kaplan	$\eta \cong 90 \text{ à } 95\%$
Courbe 3 :	Turbine Francis	$\eta \cong 80 \text{ à } 95\%$
Courbe 4 :	Pompe-turbine	$\eta \cong 75 \text{ à } 90\%$

Aménagement d'une centrale hydraulique et d'un barrage⁵⁰

L'aménagement d'une centrale hydraulique nécessite d'importants travaux de génie civil. La hauteur de chute, le débit à exploiter ainsi que l'utilisation d'un ou de plusieurs réservoirs sont des paramètres essentiels dont dépend l'aménagement de barrage, galerie, etc.).



51

Figure 42: schéma d'un aménagement à Moyenne chute à accumulation

Les éléments principaux d'un aménagement de centrale hydraulique sont les suivants :

- Un barrage, réalisant une retenue ou un réservoir en amont
- Des ouvrages d'induction, pour conduire l'eau jusqu'aux Turbines par le biais de canaux, galeries, conduites forcées.
- Une centrale hydro-électrique, comprenant les éléments servant à la transformation de l'énergie hydraulique reçue d'abord en énergie mécanique (turbine) puis en énergie électrique (alternateur). La centrale comprend bien sûr d'autres éléments accessoires comme des vannes, régulateur ou transformateur.

⁴⁹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Turbine_hydraulique

⁵⁰ Guide de la technique tome 3 l'énergie, presses polytechnique et universitaire Romande

⁵¹ Source image : <https://lc.cx/vcsv7aDHn>

Aménagement à haute ou moyenne chute

La fig.42 représente un aménagement à moyenne chute à accumulation caractérisé par la présence d'un bassin de retenue servant de réservoir pour stocker l'énergie hydraulique. On trouve ce type d'aménagement en montagne où la hauteur de chute est importante.

La configuration du sol est importante pour définir si la construction d'un barrage est possible, c'est en région montagneuse où la configuration du sol permet la création d'un bassin de retenue.

Aménagement au fil de l'eau (base chute)

Cependant, dans les cours d'eau de plaine, la configuration du sol ne permet pas la construction d'un barrage de grande hauteur, ce qui aurait pour conséquence de noyer de grandes surfaces de terrain, on est donc en présence d'un autre type d'aménagement dit au fil de l'eau. On utilise généralement des barrages digue pour ce type d'aménagement. Il n'est pas possible de stocker de l'énergie par manque de volume d'eau, toutes les eaux doivent donc être utilisées au moment où elles se présentent.

Lorsque ce type d'installation perturbe le passage de convois marchands ou autre, une dérivation peut être créée pour permettre aux voies navales d'être empruntées tout en exerçant le travail de la centrale.

Exemple d'aménagement au fil de l'eau :

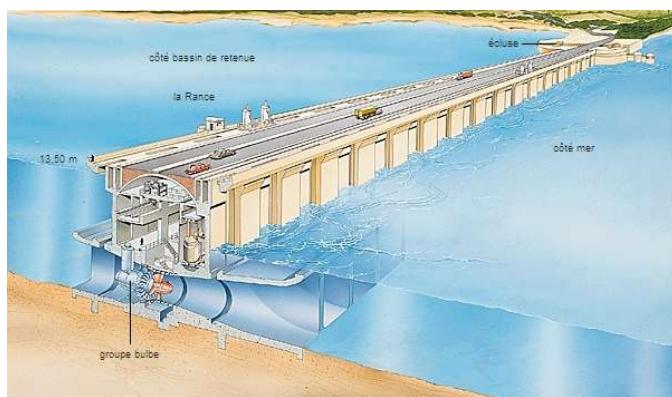


Figure 43 : dessin schématique de la centrale marémotrice de la Rance en France

⁵²La centrale marémotrice de la Rance en France, est un exemple particulier de centrale à base chute.

Une digue qui sépare la baie de la mer, est placée à un endroit dont l'amplitude de la marée est grande. La digue contient à l'intérieur de sa structure des turbines bulbes, qui exploitent dans un sens ou dans l'autre les différences de niveau entre la baie et la mer.

⁵² Source image : <https://lc.cx/r0v7-JZie>

Analyse des avantages des centrales hydrauliques

La part de production d'électricité provenant de centrale hydraulique était de 60.5% en 2017⁵³ en Suisse. Pour effectuer une comparaison avec d'autres types de production d'électricité, nous avons pris la deuxième plus grande source, c'est-à-dire le nucléaire (15.1%), ainsi que deux types de productions renouvelables assez communes, l'éolien et le solaire.

Comparaison des productions

Afin de se faire une idée de l'efficacité d'un type de production d'électricité, on cherche à déterminer le temps d'activité à puissance maximal sur une période d'un an. Pour effectuer la comparaison, nous avons pris les chiffres par domaine, c'est-à-dire les productions et puissances installées de la globalité des installations par domaine (hydraulique, nucléaire, éolien et solaire).

Type de production	Période des chiffres	Puissance installée	Production durant la période (une année)	Temps à pleine puissance [h]
Hydraulique ⁵⁴	2016	13'760.17 MW	36'174.58 GWh	2629.01h (109.5 jours)
Nucléaire ⁵⁵	2018	3'238 MW	24'492.18 GWh	7563.98h (315.2 jours)
Eolien ⁵⁶	2019	75 MW	146 GWh	1946.67h (81.1 jours)
Solaire ⁵⁷	2018	2'171 MW	1'944 GWh	895.44h (37.3 jours)

Figure 44: Tableau comparatif entre différents types de production

$$t = \frac{E}{P}$$

Équation 29: Production - Equation de l'énergie

t : temps de fonctionnement à pleine puissance [h]

E : Energie produite sur une période d'un an [Wh]

P : Puissance installée [W]

Le tableau ci-dessus nous donne pas mal d'informations intéressantes. On constate premièrement que d'un point de vue « temps de production », le nucléaire est loin devant. Ceci s'explique par le fait que l'eau faisant fonctionner les centrales hydrauliques n'est pas illimitée, il faut donc réguler le niveau de l'eau dans le barrage afin de ne pas se retrouver dans une situation où celui-ci se retrouve totalement vide, c'est pourquoi les centrales hydrauliques ne peuvent pas fonctionner constamment à pleine puissance. On observe malgré tout que la production sur une année est plus importante, c'est dû au fait qu'il y a beaucoup plus de puissance installée dans les centrales hydrauliques que dans les centrales nucléaires. Ceci s'explique par la topographie des Alpes suisses qui est propice à ce genre d'installation.

⁵³ <https://www.admin.ch/gov/fr/accueil/documentation/communiques.msg-id-74577.html#:~:text=L%C3%A9lectricit%C3%A9%20produuite%20en%20Suisse,%C3%A9lectricit%C3%A9%20d'origine%20indig%C3%A8ne.>

⁵⁴ https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydro%C3%A9lectricit%C3%A9_en_Suisse#cite_note-a-12-11

⁵⁵ https://fr.wikipedia.org/wiki/Industrie_nucl%C3%A9aire_en_Suisse

https://www.swissnuclear.ch/upload/cms/news/20190204_Communiq_Betrieb_KKW_2018_F.pdf

⁵⁶ <https://www.suisse-eole.ch/fr/energie-eolienne/statistiques/>

⁵⁷ https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_en_Suisse#%C3%89nergie_solaire

Si nous regardons au niveau du temps de production des sources éoliennes et solaires, nous constatons que le temps est inférieur à celui des centrales hydrauliques. Le principal problème de ces sources d'énergies, c'est l'impossibilité de pouvoir garantir une production à long terme, on ne peut pas contrôler le vent et le soleil selon nos besoins contrairement à la production hydraulique car avec une bonne gestion des niveaux dans les barrages, il est possible de produire de l'énergie rapidement lorsqu'on en a besoin. De plus, la production d'électricité à l'aide de panneau photovoltaïque est en « contradiction » avec la demande, celle-ci est plus élevée en hiver qu'en été, mais l'ensoleillement lui, est plus élevé en été qu'en hiver.

Globalement, on constate que les centrales hydrauliques sont capables de produire bien plus que d'autres sources d'énergie renouvelable. En se basant sur la puissance installée, les centrales nucléaires semblent bien plus efficaces car tant qu'elles ont leur combustible⁵⁸ elles peuvent fonctionner à tout moment, autant que nécessaire. Cependant c'est précisément le combustible qui est problématique car hautement radioactif. Une fois qu'il est épuisé, on ne peut pas le jeter ou le recycler, c'est pour cette raison que la confédération Suisse tend à vouloir arrêter la production d'électricité via les centrales nucléaires. Contrairement aux centrales nucléaires, les centrales hydrauliques n'utilisent que le cycle de l'eau pour fonctionner et contrairement aux autres sources d'énergie renouvelable tel que le solaire ou l'éolien, l'hydraulique ne dépend pas d'événement trop aléatoire.

⁵⁸ Abus de langage pour désigner la source d'énergie des centrales nucléaires

Développement logiciel

Situation

Lors de la première semaine, nous avons directement émis l'idée de réaliser le code en Python. En effet, Quentin a réalisé un projet personnel avec une interface graphique en Python récemment. Ceci permettra de réaliser une interface graphique permettant une modification des paramètres aisée plutôt que de n'avoir un "simple" générateur de graphiques.

Architecture logicielle

L'interface utilisateur est réalisée de la manière suivante :

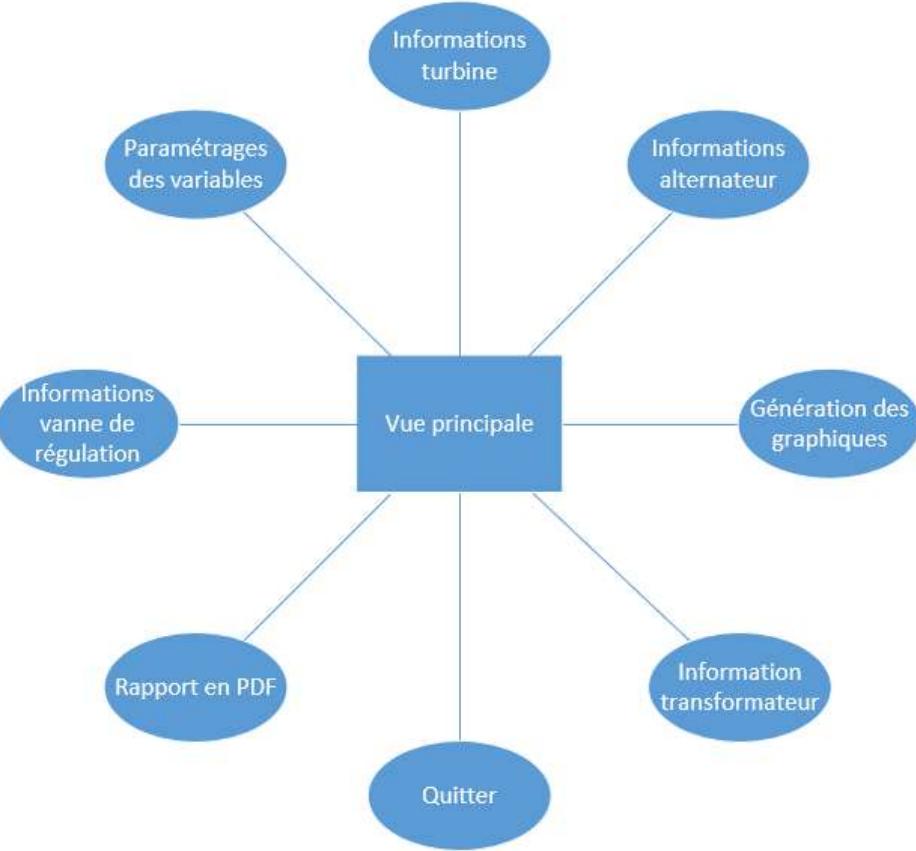


Figure 45: Structure du code

L'ensemble est concentré sur la vue principale et différents boutons permettent d'accéder au contenu supplémentaire.

Connaissances supplémentaires

Lors de la réalisation de ce projet, nous avons sollicité l'aide de M. Croci. En effet, nous avions besoins d'informations physiques et techniques supplémentaires concernant le fonctionnement des centrales hydroélectriques. Ceci nous a permis d'obtenir les équations qui représentent le modèle numérique d'une centrale hydroélectrique.

Objectifs

Le logiciel sera capable d'afficher un graphique représentant diverses grandeurs physiques :

- Le diamètre d'ouverture de la vanne [m]
- La puissance demandée [MW]
- La vitesse de rotation de la turbine (tr/min)
- La puissance émise [MW]

Il est nécessaire de pouvoir paramétriser les grandeurs physiques tel que :

- La hauteur du barrage [m]
- La puissance demandée [MW]
- Les coefficients de régulation proportionnels et déivateurs
- La durée de la simulation [s]
- Le temps de montée de la puissance demandée [s]

De ce fait, il sera possible de visualiser la variation des réponses en fonction des paramètres d'entrée.

Nous avons déterminé qu'il serait intéressant d'orienter le logiciel vers une fin didactique. Nous avons pour cela ajouté de la documentation permettant d'expliquer le fonctionnement et des explications concernant les formules qui composent notre programme. Le rapport détaillé avec les formules sera également accessible pour d'avantage d'informations.

Le but final est de réaliser un exécutable de l'application afin de la rendre portable et utilisable pour d'autres utilisateurs.

Structure du code

Par convention de codage, le code est principalement réalisé en anglais. L'attribution des noms de variables suit la méthodologie *snake case*. Le logiciel étant réalisé pour un utilisateur francophone, l'affichage est donc en français.

Modification des objectifs

Une base de données était prévue et aurait contenu les différentes caractéristiques des barrages existants. De ce fait, il aurait été possible de générer les graphiques des centrales hydroélectriques rapidement. Cependant, son implémentation est complexe et nous avons conclu qu'elle n'était pas suffisamment utile pour ce projet. Il est également chronophage de rechercher des informations techniques sur des installations existantes, ces dernières étant principalement non-publiques.

Utilisation de Matlab

Nous avons décidé, en parallèle, de réaliser une simulation sur Matlab. Ceci nous a permis d'approfondir nos connaissances avec cet outil et nous aurait servi d'alternative. Matlab est également utile pour tester brièvement des fonctions avant de les implémenter dans le code Python.

Description de fonctionnement

Le but principal de ce projet de physique n'étant pas centré sur le code, ce dernier ne sera pas expliqué en détail. Il est toutefois possible de le lire dans le répertoire Github suivant :

<https://github.com/kent-1475/hydroelectric-power-plant-simulation>

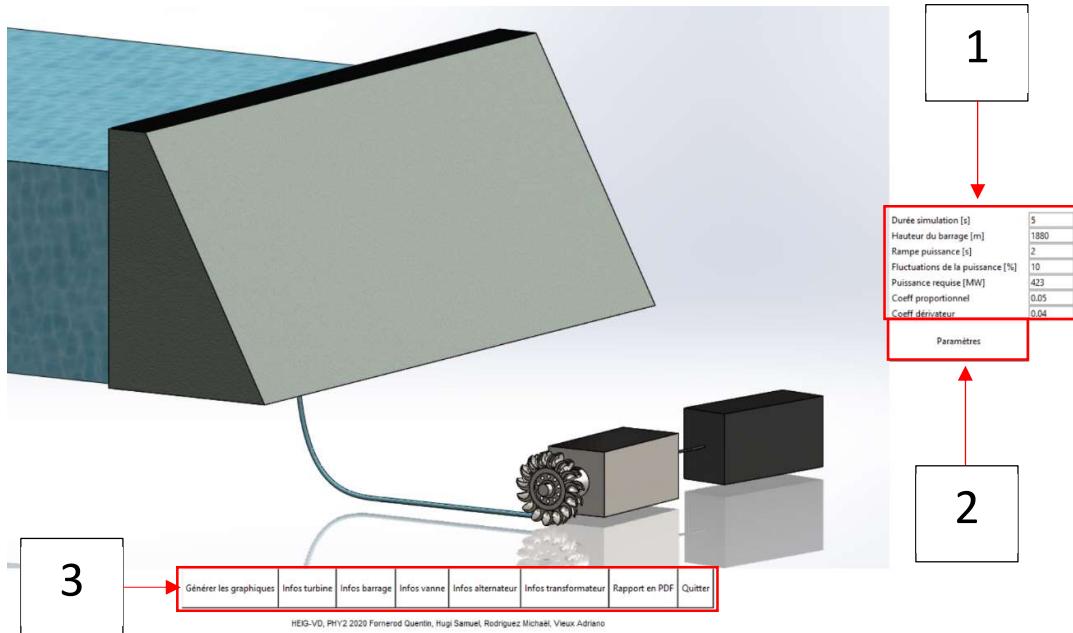


Figure 46: Vue principale

Note : L'image peut différer de l'image du logiciel

Détail partie 1 :

Durée simulation [s]	5
Hauteur du barrage [m]	1880
Rampe puissance [s]	2
Fluctuations de la puissance [%]	10
Puissance requise [MW]	423
Coeff proportionnel	0.05
Coeff dérivateur	0.04

Paramètres

Figure 47: Affichage des valeurs

Affichage des paramètres, les paramètres affichés au démarrage sont les valeurs par défaut et correspondent (en partie) à la centrale hydroélectrique de Bieudron.

Détail partie 2 :

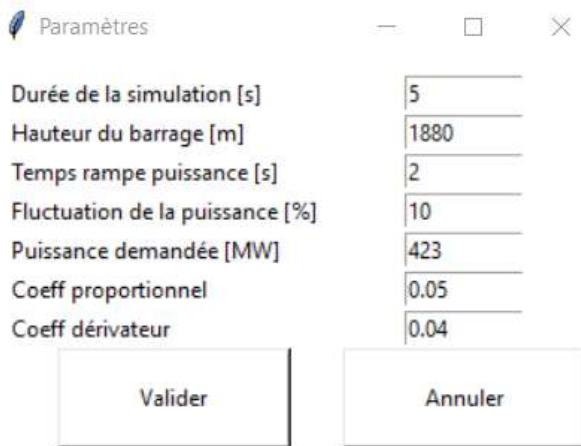


Figure 48: Paramétrage des champs

Fenêtre apparaissant lors de l'appui sur le bouton "Paramètres", il est possible de modifier les valeurs puis de l'enregistrer en appuyant sur "Valider" ou alors d'annuler l'opération. Si vous souhaitez obtenir les valeurs par défaut, il suffit de relancer le programme. Le code est destiné à des utilisateurs avertis et qui ont des connaissances suffisantes pour interpréter le fonctionnement et l'utilisation. Toutefois, la saisie des paramètres est sécurisée et empêche, par exemple, des valeurs négatives pour les temps.

Détail partie 3 :



Figure 49: Boutons de navigation

Ce sont les boutons qui permettent d'accéder aux différentes fonctions du logiciel. La génération des graphiques est calculée en fonction des paramètres affichés au point 1. Les boutons suivants affichent un minimum d'informations concernant les principaux éléments d'un central hydroélectrique, le reste étant présent dans le rapport (accessible avec le bouton "Rapport en PDF").

Formules mathématiques

Rampe de puissance

La rampe de puissance est décomposée en trois parties, c'est une fonction définie par morceaux :

- La première partie est une fonction quadratique
- La seconde également
- La troisième est un signal sinusoïdal amorti

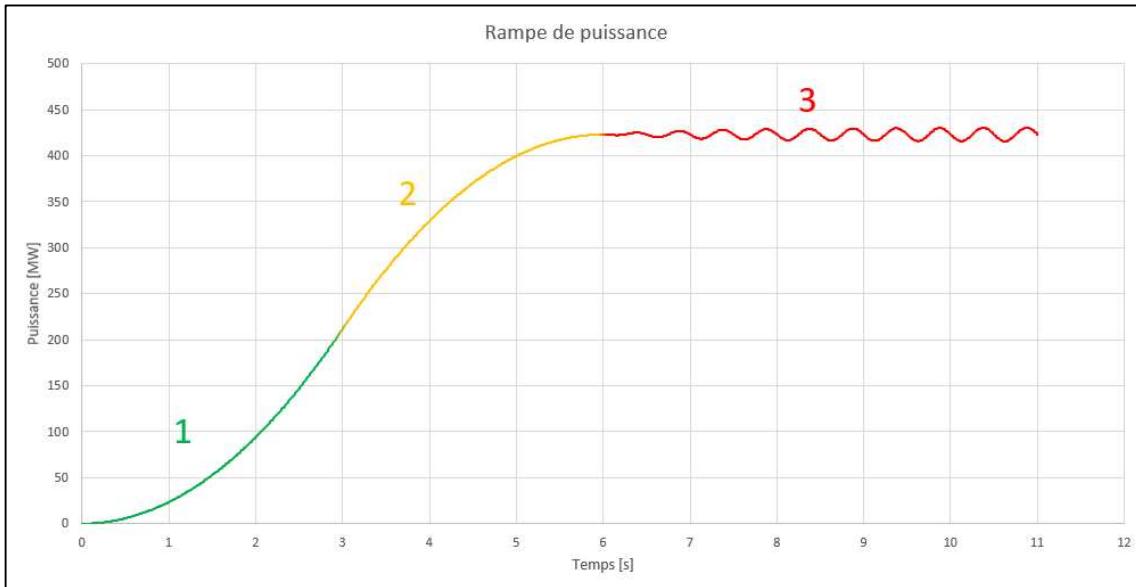


Figure 50: Rampe de puissance

Fonctions

- 1 : $P \cdot 2 \cdot t \frac{1}{L^2}$

Équation 30: Partie 1 rampe de puissance

- 2 : $P \cdot (1 - 2 \cdot (\frac{t-L}{L})^2)$

Équation 31: Partie 2 rampe de puissance

- 3 : $P + P \cdot \frac{\alpha}{100} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \tan^{-1}(t - L) \cdot \sin(-4 \cdot \pi \cdot t)$

Équation 32: Partie 3 rampe de puissance

Avec :

P : Puissance [W]

t : Temps [s]

L : Durée de la rampe de puissance [s]

α : Fluctuations

La première et seconde partie sont des fonctions quadratiques qui ont pour but de faire une jonction assouplie sans saut. La troisième est un sinus simulant des perturbations de la puissance du réseau. La fonction *arctan* quant à elle permet de d'augmenter l'amplitude du sinus jusqu'à sa valeur de consigne (fluctuation).

Il aurait également été possible de réaliser une interpolation cubique afin d'approcher ce signal mais l'implémentation logicielle était complexe. Une tentative d'approximation par une B-Spline fut également testée mais sans succès.

Analyse des résultats

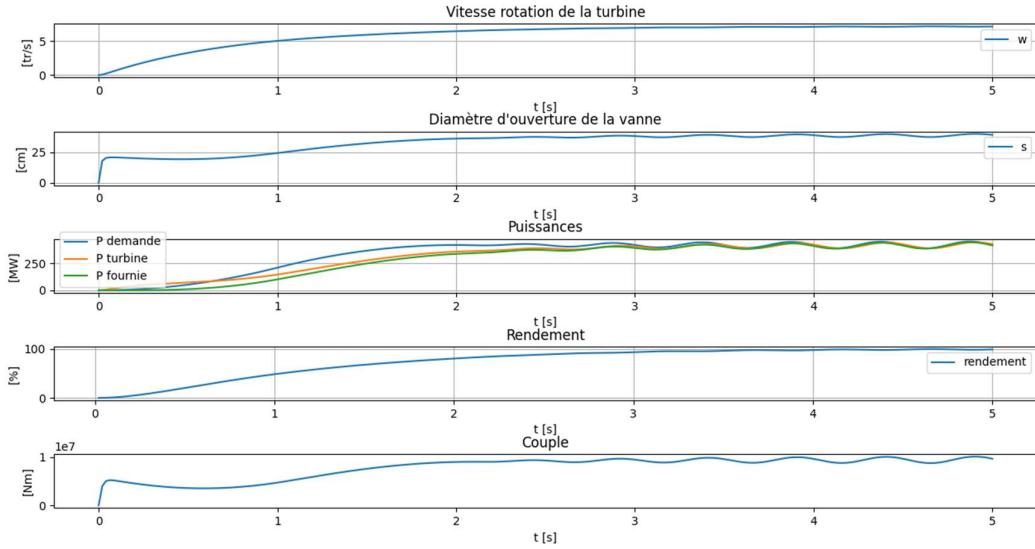


Figure 51: Résultats de la simulation

Le premier graphique correspond à la vitesse de rotation de la turbine, nous remarquons que cette dernière augmente en fonction du temps jusqu'à se stabiliser à sa valeur "de croisière".

Le second représente l'ouverture de la vanne de régulation qui augmente très rapidement pour ensuite suivre la tendance des fluctuations.

Le troisième contient les différentes puissances en [MW] telle que :

- P_{demande} : C'est la puissance demandée par le réseau, c'est donc la consigne à atteindre par le système
- P_{turbine} : Ceci correspond à la puissance reçue par la turbine (grâce au jet)
- P_{fournie} : Elle exprime la puissance injectée dans le réseau

Le rendement n'est autre que le rapport entre l'énergie mécanique et l'énergie électrique. Nous constatons que la puissance fournie est **toujours** plus faible que la puissance demandée, ce qui est évident. Cette valeur tend vers 1 mais est dans la réalité plus faible, car de nombreuses pertes sont négligées dans cette simulation. Le modèle actuel est calculé avec différentes approximations. Certains paramètres ne sont pas pris en compte, pour en citer quelques-uns :

- Les pertes de charge
- La variation de température
- Les frottements
- Le rendement mécanique/électrique
- Les pertes fer/cuivre

Il y a encore d'autres facteurs omis qui influenceront le résultat. Ces éléments sont intégrables par la suite si nécessaire mais ne sont pas fondamentaux pour ce projet.

Le couple suit une tendance similaire à l'ouverture de la vanne ce qui est cohérent car il découle du flux d'eau entrant dans la conduite.

Ces graphiques sont "zoomables" dans le logiciel pour une interprétation plus précise.

Suite du projet

Comme tout logiciel informatique, l'état lors du rendu n'est que rarement la version finale. Il est en effet probable que le code soit amélioré par la suite. Pour rappel, le code source ainsi que tous les fichiers sont disponibles sur Github.

Il sera donc libre à quiconque de participer à la suite du développement ou alors de simplement utiliser le logiciel à sa guise.

License

Le software disponible est régi par la licence [MIT](#). Ceci signifie qu'il est possible pour quiconque de modifier, réutiliser, revendre le code etc.

Installation

Il est nécessaire de télécharger l'intégralité du dossier se nommant "test_centrale" présent sur Github et de ne pas déplacer les fichiers qu'il contient, c'est-à-dire : le fichier exécutable, la bibliothèque d'image (Icons) ainsi que le rapport en PDF.

Une fois le téléchargement effectué, il suffit de lancer l'exécutable "simulation_centrale_hydraulique.exe", il faut patienter une dizaine de secondes.

Afin de vérifier la portabilité du code, nous avons testé le logiciel sur trois différents PC (Windows) et il fonctionne parfaitement.

Conclusion

Fornerod Quentin

Ce projet de semestre fut très enrichissant pour moi. En effet, j'ai eu l'occasion de reprendre la main sur Matlab, logiciel que je n'avais pas utilisé pendant plus d'une année et qui me sera indispensable pour le semestre suivant, ceci m'a donc été bénéfique. J'ai eu l'occasion de réaliser une interface graphique pour un projet personnel pendant les vacances estivale 2020 et ceci m'a donc motivé à améliorer mes compétences et d'enrichir mon savoir dans ce langage. J'ai découvert de nouvelles bibliothèques telle que les outils Matlab, découvert de nouvelles fonctions mathématiques (interpolation, B-Spline etc), la création d'un exécutable etc.

Ce projet paraissait à première vue tel un mur incommensurablement grand à franchir, puis, avec du temps et du soutien, nous avons accompli un logiciel fonctionnel et portable. Le soutien de M. Croci était fondamental pour le fonctionnement du programme, nous n'aurions pas pu intégrer ces fonctions mathématiques sans le cours qui nous a été destiné. Nous avons effectué de longues recherches pour obtenir les équations qui rédigent le système tel que le moment de force appliqué à la turbine mais bien souvent sans succès. Appliquer le modèle physique fondamental et simplifié était donc nécessaire. La coordination du chef de groupe était également importante et nous a permis de réaliser tous les travaux dans les temps impartis. La cohésion de groupe nous a concédé une flexibilité permettant un échange des tâches et une entre-aide entre chacun de nous.

J'espère que la partie didactique du code pourra profiter à autrui. Je serais ravi de compléter le code en y intégrant les pertes de charge dans les tuyaux, les frottements, les rendements etc en cas de besoin.

Forel (FR)

Le 15.01.2021

Quentin Fornerod

Hugi Samuel

Pour conclure, j'ai trouvé ce travail très intéressant. J'ai eu l'occasion de mettre en pratique l'utilisation de MatLab, appris durant la HES d'été. Malheureusement, je n'ai pas réussi à obtenir les résultats des graphiques escomptés. Malgré la situation sanitaire, qui nous a obligé à travailler chacun chez soi, nous avons réussi à nous entraider lorsque nous rencontrions des problèmes durant nos tâches. J'ai apprécié le fait d'avoir eu un cours personnalisé par rapport à notre projet. Ce cours m'a permis d'obtenir une meilleure compréhension de l'aspect physique de ces centrales hydrauliques.

Je remercie tout particulièrement, M. Francis Vieux, qui m'a apporté beaucoup d'informations sur le chapitre de la régulation de production.

St-Martin (FR)

Le 15.01.2021

Samuel Hugi

Rodriguez Michaël

Ce travail aura été pour moi une réelle source de nouvelles connaissances tant le sujet m'intéressait déjà beaucoup au départ. Grâce à ce travail j'ai eu la possibilité de mettre en pratique l'utilisation de logiciels de CAO comme SolidWorks et Catia V5 que je n'avais pas utilisé depuis longtemps. J'ai pu en apprendre beaucoup sur le fonctionnement des turbines hydrauliques, des pompes ainsi que des barrages, il est fort dommage que la visite du barrage de la grande Dixence n'a pas pu être réalisée bien que cela m'ait donné envie de le visiter par la suite.

Yverdon-les-Bains (VD)

Le 15.01.2021

Rodriguez Michaël

Vieux Adriano

Dans l'ensemble le travail s'est bien passé, la situation spéciale du covid19, n'a quasiment pas eu d'impact sur notre travail puisque les objectifs de celui-ci ont été pensés en conséquence, sur certains points, cela s'est révélé être un avantage puisque les rassemblements entre les membres du groupe ainsi que les entrevues avec M. Mirko Croci étaient facilités, même en dehors des heures officielles des cours/labos de physiques.

D'un point de vue personnel, j'ai trouvé ce projet très intéressant, au-delà du travail qui m'a été personnellement attribué, nous avons pu nous entraider et conseiller entre collègue, cela m'a permis d'élargir mes connaissances.

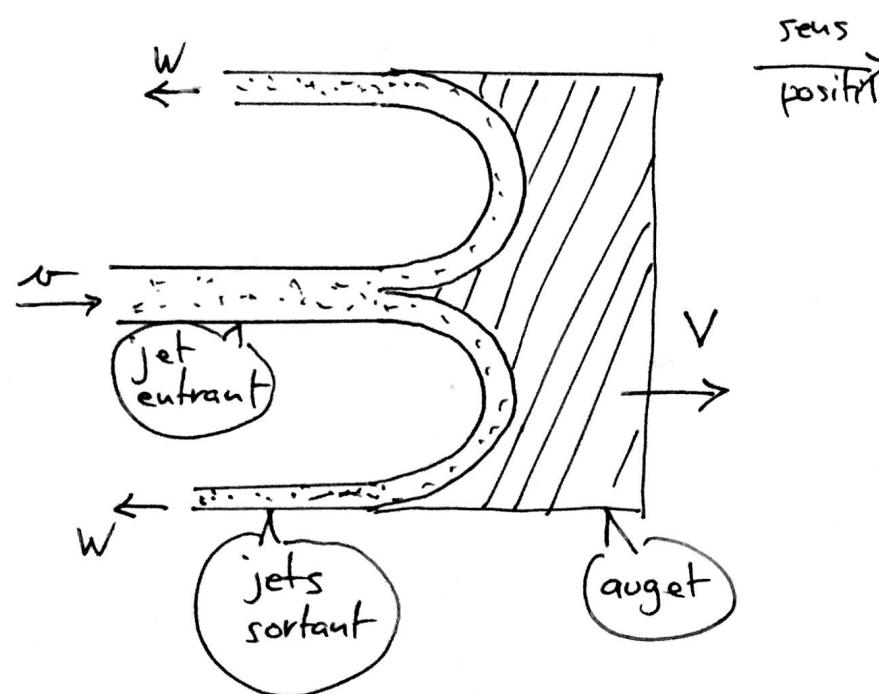
Au final la plus grande déception aura été de ne pas avoir pu effectuer la visite d'une installation, nous nous réjouissions de voir le sujet de notre projet en grandeur nature.

Renens (VD)

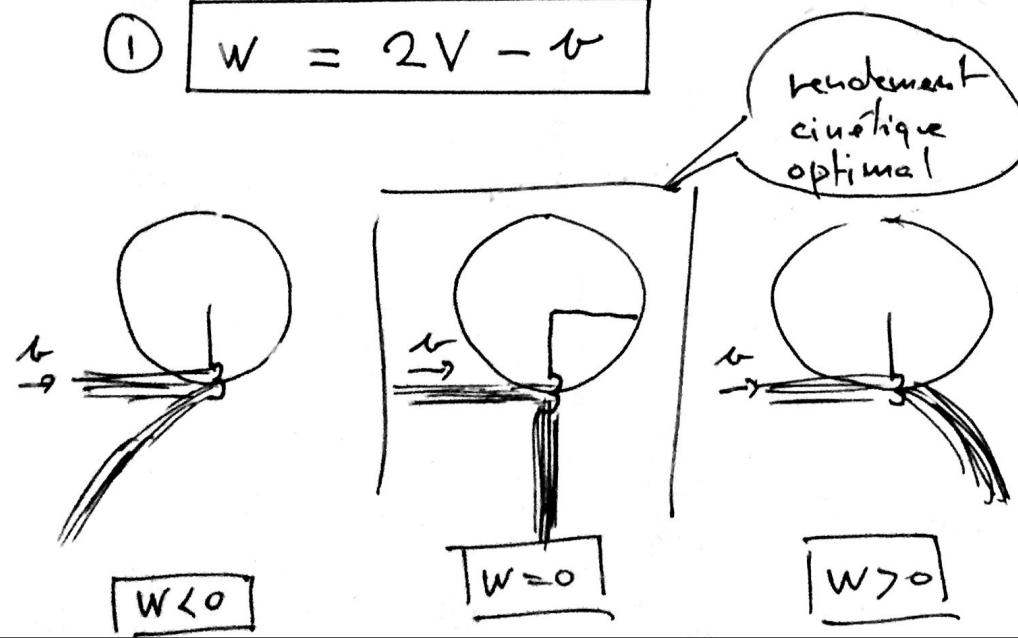
Le 15.01.2021

Adriano Vieux

Dimensionnement et modélisation d'une turbine hydraulique



$$\textcircled{1} \quad W = 2V - v$$



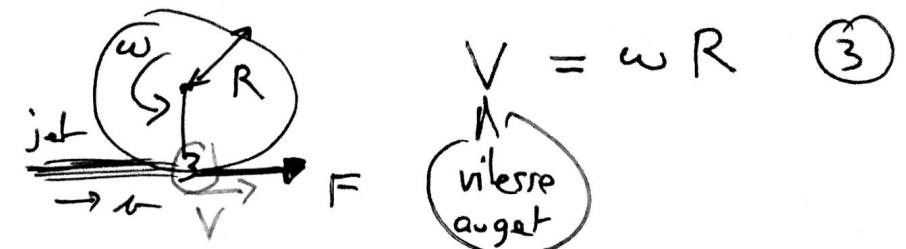
- La force F que le jet entrant exerce sur l'ouget est donnée par l'expression suivante:

$$\boxed{F = 2 \rho g S (v - V)} \quad \textcircled{2}$$

debit massique jet entrant

$$V \in [0, v]$$

- Moment de force sur la turbine

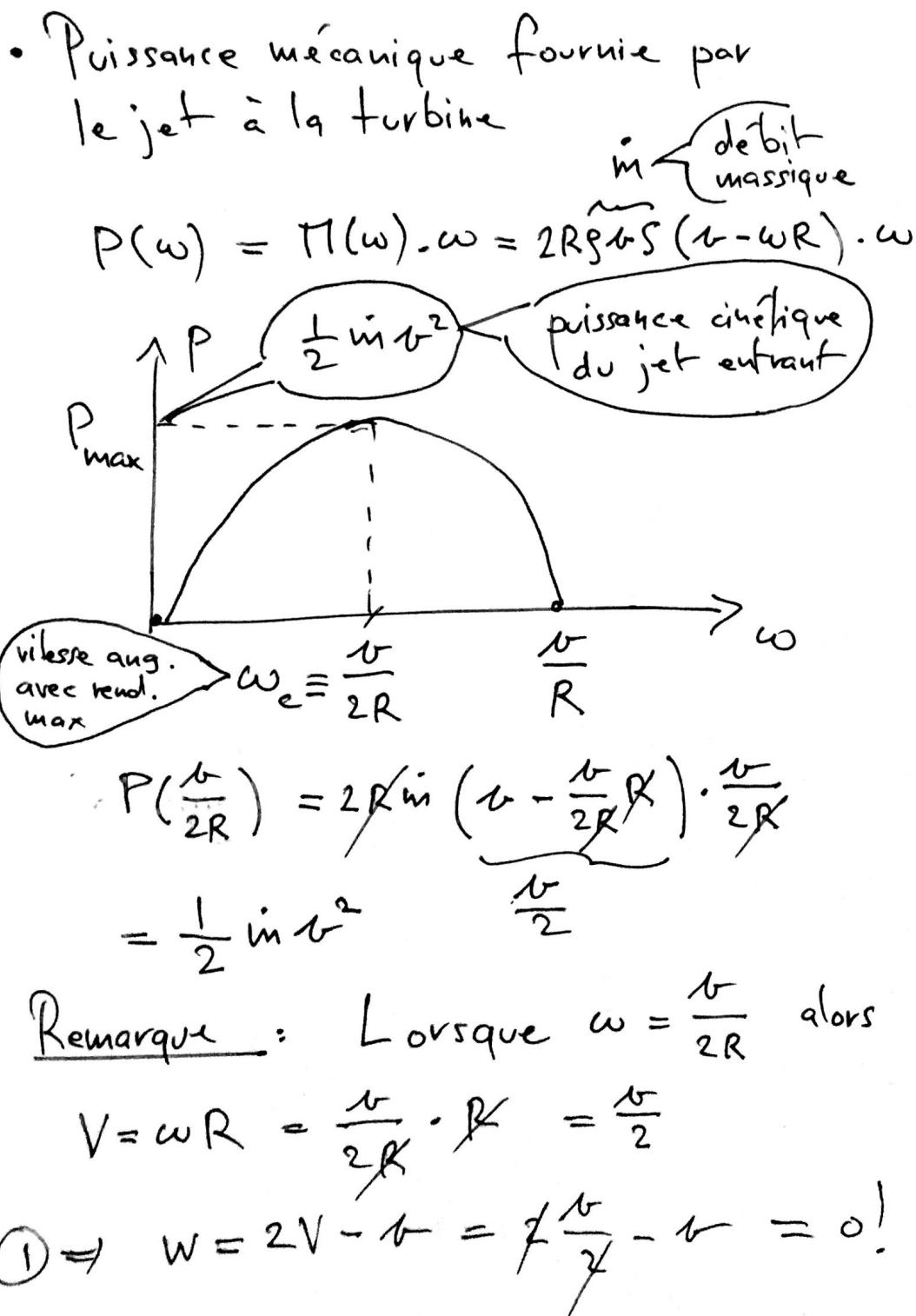


$$V = \omega R \quad \textcircled{3}$$

$$\boxed{M = F \cdot R}$$

moment de force

$$\boxed{M = 2 R \rho g S (v - \omega R)} \quad \textcircled{4}$$



Donc, la puissance transférée à la turbine (provenant du jet entrant) est maximale lorsque la vitesse du jet sortant est nulle !

Dimensionnement d'une turbine

Problème: Etant donné la puissance à fournir, la fréquence du réseau (et type alternateur) et la hauteur de chute d'eau, déterminer le rayon de la turbine et la section du jet entrant.

Regardons ce que devient le moment lorsque $w = 2V$ (rendement cinétique maximal):

$$\begin{aligned} M &= 2Rg\omega S \left(v - \omega_c R\right) \\ &= 2Rg(2R\omega_c) \underbrace{\left(2R\omega_c - \omega_c R\right)}_{R\omega_c} \cdot S \\ &= 4R^3 g S \omega_c^2 \\ \Rightarrow M &= 4R^3 g S \omega_c^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Bernoulli:

$$gh_1 + \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho g}$$

=

$$gh_2 + \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho g}$$

avec

$$h_1 = h; p_1 = p_{atm}; v_1 = 0$$

$$h_2 = 0; p_2 = p_{atm}; v_2 = v$$

Il vient (Bernoulli)

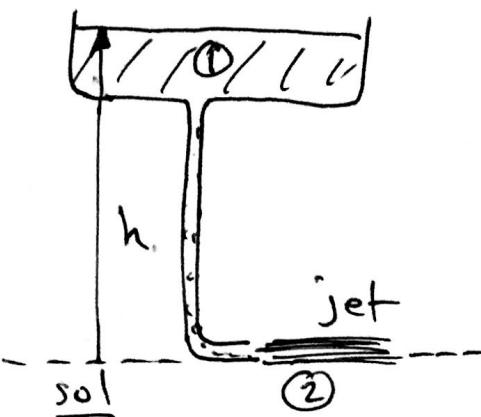
$$\boxed{gh = \frac{v^2}{2}} \quad \text{(5bis)}$$

En introduisant la condition $v = 2V = 2\omega_c R$
(rend. max) il vient:

$$gh = 2R^2\omega_c^2 \Rightarrow \boxed{R = \frac{1}{\omega_c} \sqrt{\frac{gh}{2}}} \quad \text{(6)}$$

On rappelle que (voir (5)):

$$M = 4R^3 g S \omega_c^2 = 2Rg(2R^2\omega_c^2) S$$



et donc:

$$H = 2Rg(gh)S$$

La puissance varie, quant à elle,

$$P = H\omega = 2gghS\overbrace{R\omega_c}^{\sqrt{\frac{gh}{2}}}$$

$$\Rightarrow \boxed{S = \frac{P}{2ggh \cdot \sqrt{\frac{gh}{2}}} = \frac{P}{\sqrt{2}g(gh)^{3/2}}} \quad \text{(7)}$$

Donc si h , ω_c et P sont connus,
 R et S aussi ! (le problème
du dimensionnement "basique" est donc
résolu).

Nous allons maintenant bâtir le
SEDO permettant de modéliser
le fonctionnement de la turbine
hydraulique (+ frein qui simule
la demande en puissance du réseau
électrique)

Nous savons que (mécanique PHY)

$$\text{II} M_{\text{tot}} = J \cdot \ddot{\omega} \quad \text{II} \circledast \quad (8)$$

Moment de force total N.m

Moment d'inertie kg.m²

accélération angulaire (dérivée de ω par rapport au temps)

$\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = \frac{1}{\text{s}^2}$

$$M_{\text{tot}} = M_{\text{jet}} + M_{\text{frein}}$$

M_{jet} est celui de l'eq ④

$$M_{\text{frein}} = -\lambda \omega$$

La première EDO du SEDO est simplement (voir ⑧)

$$⑨ \quad \ddot{\omega} = \frac{1}{J} (2Rg v - s(v - \omega R) - \lambda \omega)$$

La deuxième EDO est

$$⑩ \quad \dot{s} = p (\omega_c - \omega)$$

constante régulation proportionnelle

- $d\omega$ à remplacer par ⑨!
constante régulation différentielle

⑨ et ⑩ constituent un SEDO pour les fonctions inconnues $\omega(t)$ et $s(t)$.

Paramètres du systèmes:

$$J = 10^5 \text{ kgm}^2 ; \quad g = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$h = 1880 \text{ m} ; \quad g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} ;$$

$$\omega_c = 2\pi 50 / 7 \quad (7 \text{ paire de pôle (alteru.)})$$

$$v = \dots \quad (\text{voir } 5\text{bis}) \quad p = 3 \cdot 10^2 [\text{?}]$$

$$R = \dots \quad (\text{voir } 6) \quad d = 1 \cdot 10^{-2} [\text{?}]$$

$$\lambda = \frac{P_{\text{demandée}}}{\omega_c^2} ; \quad P_{\text{demandée}} = 423 \cdot 10^6 \text{ W}$$

Journal de travail

		date:	18.09.2020	23.09.2020	30.09.2020	07.10.2020	14.10.2020
TOUS			Création du groupe, choix du sujet	Répartition des tâches et validation du cahier des charges avec MCC			
Fornerod Quentin	travail effectué		Création d'un projet python pour réaliser une interface graphique	Recherche de documentation au sujet des centrales hydroélectriques sur internet	Analyse des différents types de turbines et de leurs utilisations respectives	Recherche d'interface graphique sur Matlab, pas de résultat concluant	
Hugi Samuel	travail effectué			- Vidéo " C'est pas Sorcier " sur les barrages. - Vidéo de EDF sur les barrages	Recherche de documents sur l'histoire et l'évolution	Lecture du document fourni par Mr. Croci	
Rodriguez Michael	travail effectué		Création d'un fichier d'étude sur l'hydrostatique des barrages	création d'un assambolge 3D schématisant le fonctionnement d'un barrage-poid	Recherche d'information sur les caractéristique de différents type de barrage	Recherche d'information sur les caractéristique de différents type de barrage	
Vieux Adriano	travail effectué		Création d'un groupe Whatsapp et d'une équipe teams	Création d'un journal de travail pour l'équipe	Visionnage de c'est pas sorcier sur le thème des barrages	Recherche de documentation sur les centrales hydroélectriques	

	21.10.2020	28.10.2020	04.11.2020	11.11.2020	18.11.2020	25.11.2020	02.12.2020
VACANCES	Entrevue sur Teams avec MCC pour une réponse aux questions				Cours personnalisé sur les centrales hydroélectriques par M.Croci		
Début du codage de l'interface graphique	Création des fenêtres de paramétrage des différentes variables	Test de la création de graphiques	Recherche d'équations pour les turbines	Implémentation d'une base de donnée afin d'obtenir les données des barrages existant	Etudes du SEDO, construction des différents paramètres	Implémentation du SEDO dans le système	
	Mise en page histoire et évolution des barrages, recherche sur histoire turbines	Fin recherche sur l'histoire des différentes turbines	Recherche d'équations sur les barrages (pas concluant)		Tester la création d'un fichier Matlab suite au cours	début sur les recherches sur la régulation de production	
Vacances	Recherche d'information sur les différents type de turbine et pompe hydrolique	Création d'un fichier regroupant les information concernant les barrages	Travail sur la simulation 3D	Cours personnalisé sur les centrales hydroélectriques par M.Croci	Recherche d'information sur les turbines	Création d'un fichier regroupant les information concernant les turbines et pompe hydrolique	
	Lecture du document fourni par MCC		Email de visite à la grande Dixence (refus covid)		Recherche d'information sur le système électrique des centrales	Rédaction de la partie système électrique	

	09.12.2020	16.12.2020	23.12.2020	30.12.2020	06.01.2021	13.01.2021
Suppression de la base de données	Séance avec M. Croci pour montrer l'avancement	VACANCES				Finalisation du rapport
Continuer les recherches sur la régulation de production	Création de la rampe de puissance, simulation sur Matlab	Tentative d'approximation de la fonction de puissance avec interpolation	Tentative d'approximation de la fonction de puissance avec une B-Spline	Ajout des unités manquantes, intégration du rapport dans le logiciel	Ajout du graphique du couple et du rendement, corrections de l'affichage, création de l'exécutable	
Recherche d'information sur les turbines à action	Rédaction pour la partie régulation de production	Regarder avec Quentin le code Python de la simulation	Commencer à faire les images pour le soft	Finis les images pour le soft et début mise en commun		Finalisation de tous les documents
Rédaction de la partie système électrique	Recherche d'information sur les turbines à réaction	Regroupement de toutes les informations obtenues	Redaction des chapitre sur les types de turbines et pompes et leurs rendement	Rédaction des chapitres sur les barrages et aménagement d'une centrale hydrolique	Redaction des chapitres sur les barrage et aménagement d'une centrale hydrolique	Finalisation du rapport et de la maquette 3D
	Recherche d'information et rédaction de l'analyse des avantages de l'hydraulique		Création du rapport commun	Rédaction de l'analyse des avantages de l'hydraulique		Finalisation de tous les documents