

Master Energétique et Environnement : Travaux Pratiques

Page 1 |

TP Mini Centrale Hydroélectrique

UPMC

Université Pierre et Marie Curie

Master Science de l'Ingénieur



Table des matières

A.	Introduction.....	3
1.	Les composants	4
a)	Roue Pelton	4
b)	Caisson de la turbine	4
c)	Générateur G 503/B	5
d)	Groupe d'alimentation	5
B.	Etude expérimentale	5
1.	Préparation.....	5
2.	Mise en marche.....	6
3.	Modification de la configuration des injecteurs	7
4.	Système de supervision et d'acquisition de données	8
C.	Exercices	9
1.	Calcul de l'énergie hydraulique spécifique de l'eau en amont des injecteurs	9
2.	Evaluation de la puissance électrique générée et calcul du rendement total du groupe distributeur – turbine –générateur	10
3.	Etude des courbes caractéristiques H-Q.	10
4.	Etude des courbes caractéristiques W-Q	11
5.	Calcul de la vitesse de rotation et périphérique de la turbine.....	11
6.	Vitesse de l'eau a la sortie des injecteurs.....	11
7.	Calcul du couple moteur sur l'arbre	12
8.	calcul de la constante caractéristique de la turbine Pelton fournie avec l'équipement.....	12
9.	Calcul du rendement du régulateur en fonction de la charge électrique appliquée	12
10.	Calcul de vérification de l'absence de cavitation à l'entrée d'aspiration de la pompe	13

Cette séance de travaux pratiques doit permettre d'appréhender la mise en pratique d'une centrale hydroélectrique. L'objectif de la séance est double : comprendre le comportement d'une pompe qui joue le rôle de réservoir d'eau en altitude, et caractériser l'efficacité des appareils de transformation de l'énergie hydraulique en énergie électrique.

A. Introduction

L'hydroélectricité est une des énergies renouvelables les plus importantes actuellement. En collectant de l'eau dans un barrage, il est possible d'extraire l'énergie potentielle stockée pour produire de l'électricité en phase avec la demande. Il est aussi possible par un aménagement de bassins de remplir les réservoirs en altitude lorsqu'il y a un surplus de production électrique.

Cet équipement a été conçu et construit spécialement pour un usage didactique. Il a pour but de familiariser les étudiants avec les paramètres caractérisant le fonctionnement de centrales hydrauliques. Ce système est composé d'une turbine hydraulique de type Pelton qui est appliquée dans le domaine de la production d'énergie électrique réalisée par de petites installations desservies par des cours d'eau. L'énergie produite peut être utilisée pour alimenter des charges, comme les appareils électroménagers, des lampes ou pour chauffer de l'eau ou de l'air, comme indiqué de façons schématisées sur la Figure 1.

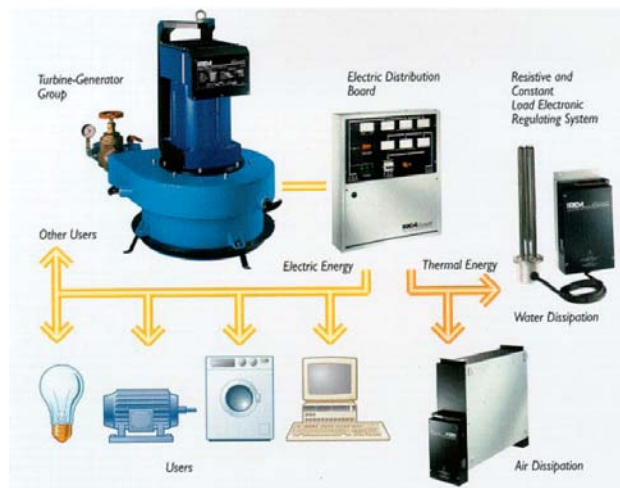


Figure 1 : Utilisation de l'énergie produite par la turbine Pelton

De façon évidente, l'exploitation d'un réservoir en altitude ou bien d'un cours d'eau est impossible. Pour simuler cette fonction, une pompe multi-étages à axe horizontal est utilisée (Figure 2).



Figure 2 : Photo de la minicentrale hydroélectrique

1. Les composants

Page 4 |

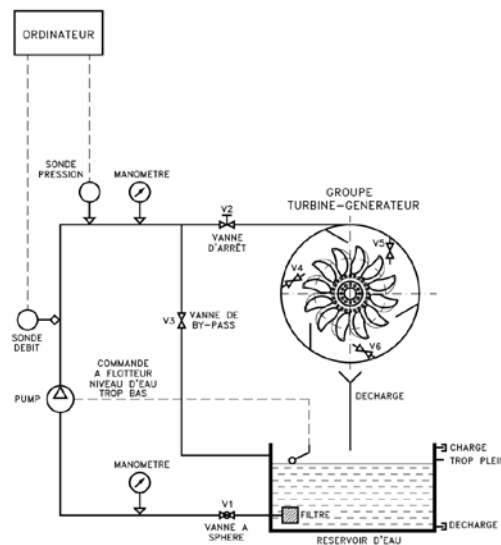


Figure 3 : Principe et éléments des circuits

a) Roue Pelton

La roue Pelton est réalisée complètement en acier INOX AISI 316 L. Les aubes sont obtenues par micro-fusion. Ce système permet d'obtenir une haute précision et un bon degré de finition. Les aubes sont fixées au disque-moyeu par soudage TIG sans ajout de matériau. Le disque moyeu est lui aussi en acier inoxydable et est directement rivé à l'arbre du générateur.

Diamètre primitif de la roue : 75 mm. Largeur de l'aube : 24 mm.

b) Caisson de la turbine

Le distributeur vers la turbine est à chambre continue, en acier soudé ; il est constitué par deux cylindres formant aussi le conduit d'adduction aux injecteurs. Le cylindre interne a aussi la fonction de recueillir et d'amener l'eau vers la bouche de décharge (vertical). Les injecteurs, au nombre maximal de 6 (3 desquels réglables, en option), sont moulés en matière plastique. L'équipement utilise 4 injecteurs de 3,8 mm de diamètre. La Figure 3 montre le détail d'un injecteur réglable.

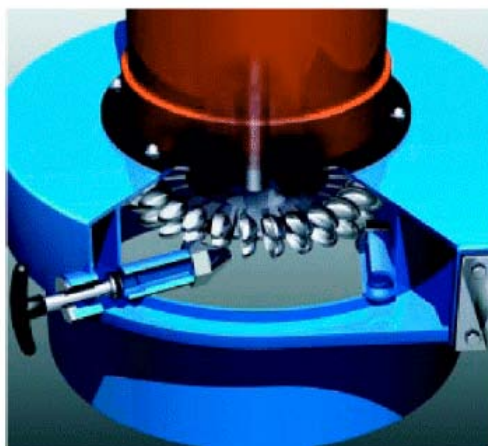


Figure 4 : Détail de l'injecteur réglable

c) Générateur G 503/B

On emploie un générateur synchrone triphasé à aimants permanents sans balais. Les roulements à billes sont du type "étanche" et ne nécessitent donc aucune lubrification. Le générateur est séparé de la turbine par un écran spécial empêchant tout contact avec l'eau.

Les données de la plaque de fabrication sont les suivantes :

- Tension : 20 V triphasée
- Puissance : 500 W
- N° de pôles : 8
- Vitesse : 2500/ 3000 tours/mn.

Selon les hauteurs d'eau et les débits présents, le générateur pourra fonctionner à des valeurs de fréquence et de tensions différentes des valeurs nominales, aussi il convient de ne pas relier directement les utilisateurs au générateur. Le rendement du générateur est d'environ 0,85.

d) Groupe d'alimentation

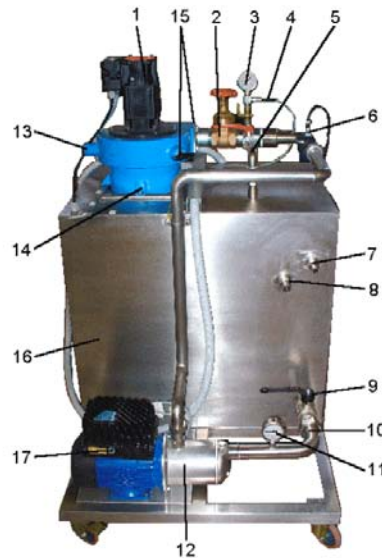
Il sert à relier la conduite forcée (dans le banc elle est remplacée par un simple tuyau) au caisson de la turbine ; il est constitué par un tube d'introduction sur lequel a été montée la vanne de commande de l'installation, un raccord pour le manomètre, un manomètre et une prise d'eau sous pression latérale (by-pass). (Diamètre d'entrée : 2" mâle, Vanne générale 2" PN25 ; by-pass avec vanne à sphère et robinet).

B. Etude expérimentale

1. Préparation

Se référer à la Figure 5 : procéder comme indiqué ci-après.

- Ouvrir la vanne à sphère sur la ligne d'alimentation de la pompe(9).
- Ouvrir complètement la vanne d'arrêt sur la ligne d'alimentation de la turbine (2 – manette complètement tournée dans le sens contraire à celui des aiguilles d'une montre).
- Relier le trop-plein du réservoir d'eau (8) au réseau de décharge
- Après avoir vérifié que le bouchon de décharge (10) n'a pas été enlevé, relier le manchon de charge (7) au réseau d'alimentation d'eau et remplir le réservoir jusqu'à ce que l'eau arrive au trop-plein.



- | | |
|--|---|
| 1 – Groupe turbine-générateur | 10 – Décharge |
| 2 – Vanne d'arrêt | 11 – Manomètre de basse pression |
| 3 – Manomètre de haute pression | 12 – Pompe |
| 4 – Capteur de haute pression | 13 – Vanne d'arrêt de l'injecteur |
| 5 – Vanne à sphère de by-pass | 14 – Vis de fixation turbine-réservoir |
| 6 – Capteur de débit | 15 – Vis de fixation générateur-distributeur |
| 7 – Charge de l'installation | 16 – Réservoir |
| 8 – Trop-plein | 17 – Potentiomètre de commande du nombre de tours de la pompe |
| 9 – Vanne à sphère de l'alimentation de la pompe | |

Figure 5 : Installation et description des éléments

2. Mise en marche

En partant d'une valeur nulle de fréquence, augmenter progressivement la fréquence appliquée à l'onduleur contrôlant le nombre de tours de la pompe. Le régulateur externe dissipe la puissance excédante à travers la résistance de décharge. Pour exploiter la puissance générée, on devra donc :

- allumer l'onduleur ;
- allumer une lampe ou plus

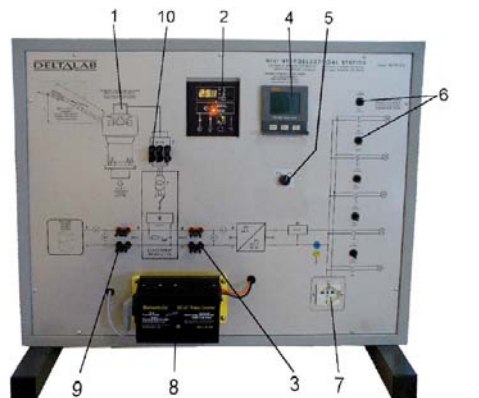
Quand la tension d'alimentation de l'onduleur est inférieure à un seuil, l'onduleur se met en attente (stand-by). Cette condition est maintenue jusqu'à ce que la tension retourne à des niveaux acceptables. Si la tension descend en dessous du niveau minimal (21,0 Vcc), l'onduleur s'éteint pour éviter que la batterie d'alimentation ne se décharge complètement. Dans ce cas, pour rétablir le système, l'opérateur devra nécessairement intervenir et devra éteindre et rallumer manuellement l'onduleur. Si une condition de surcharge ou bien de court-circuit survient pendant le fonctionnement, l'onduleur s'éteindra pour se protéger.

Note : Chaque fois que le dispositif s'éteint automatiquement, pour réactiver l'onduleur, on doit d'abord l'éteindre, puis vérifier si les charges reliées sont bien désactivées et ensuite rallumer l'onduleur.

N.B. Pour des raisons de sécurité, à l'intérieur du réservoir de charge se trouve un capteur de niveau qui interrompt l'alimentation électrique de la pompe si le niveau de l'eau est trop bas. Dans ce cas, pour rétablir les conditions opérationnelles correctes, on devra charger complètement le réservoir comme vu plus haut.

N.B. L'utilisation du banc d'essai ne devra être permit aux étudiants que sous la directe surveillance de la part d'un personnel technique habilité ayant bien pris connaissance de toutes les informations inhérentes au bon fonctionnement de chaque composant du banc, aux opérations

servant à utiliser le banc en toute sécurité et, ceci n'étant pas moins important, aux éventuelles procédures d'urgence.



- | | |
|--|--|
| 1 – Synoptique | 6 – Interrupteurs des charges électriques |
| 2 – Tableau du régulateur R500 | 7 – Prise de courant de la charge auxiliaire |
| 3 – Pontet de l'inverseur | 8 – Inverseur |
| 4 – Instrument 396 | 9 – Pontet de la batterie |
| 5 – Commutateur de sélection de lecture des paramètres électriques | 10 – Pontet du générateur |

Figure 6 : Description de l'unité de contrôle

- Alimenter électriquement le banc en mettant sur ON l'interrupteur magnétothermique différentiel et l'interrupteur général.

3. Modification de la configuration des injecteurs

Le distributeur de la turbine possède normalement 4 injecteurs de 3,8 mm de diamètre mais on remarquera que deux injecteurs, celui du bas à droite et celui du bas à gauche sont en réalité des bouchons. Grâce aux vannes d'arrêt des injecteurs (Figure 7) permettant de couper l'alimentation, il est possible de modifier la configuration de l'installation et d'en vérifier l'incidence sur le fonctionnement global.

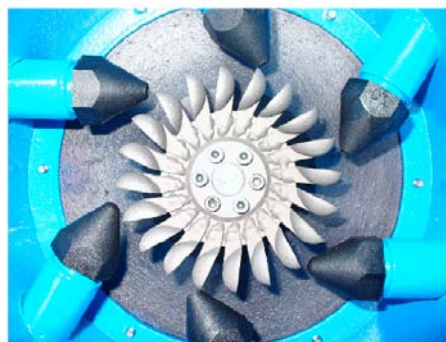


Figure 7 : Vanne d'arrêt des injecteurs : à gauche, fermée, à droite : ouverte

4. Système de supervision et d'acquisition de données

La mini-centrale hydroélectrique mod. WPP/EV est munie d'un système d'acquisition de données et de supervision qui permet de contrôler les paramètres de fonctionnement de l'ensemble de l'expérience. Les données acquises, comme, par exemple, la pression et le débit d'entrée du distributeur de la turbine, peuvent être affichées et traitées par le logiciel. Il sera possible d'obtenir des grandeurs dérivées de ces données, comme la puissance entrant dans le distributeur, le rendement de conversion de l'énergie du groupe turbine - générateur, etc., et on pourra suivre les évolutions de ces grandeurs dans le temps.

On peut ouvrir le système d'acquisition en cliquant sur WPP1210db dans le Bureau du PC sur le compte Invité.

Dans la page-écran de Supervision, qui montre la disposition des composants, on a employé des blocs en visual basic Math Function (qui développent des opérations mathématiques) et des blocs DisplayFunction du type Digital Meter (afficheurs de tension, courant, ...).

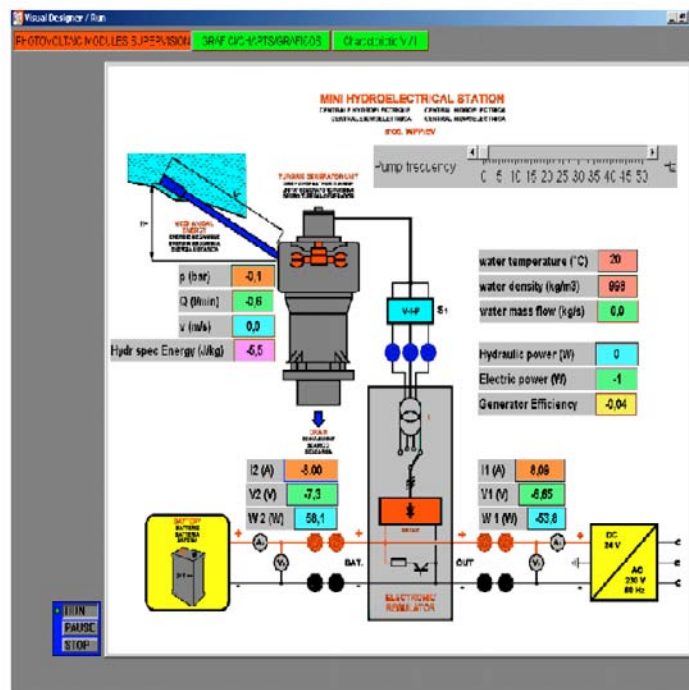


Figure 8 : Système d'acquisition des données

Il est possible aussi de représenter les courbes dans le temps des puissances électriques W_1 (en amont de l'onduleur), W_2 (batterie), W_{elec} (produite par le générateur) et de la puissance hydraulique W_{hyd} (à l'entrée de la turbine).

C. Exercices

1. Calcul de l'énergie hydraulique spécifique de l'eau en amont des injecteurs

Par référence à la Figure 9, l'énergie spécifique de l'eau h en référence à la hauteur de la section 0 est exprimée en général par la somme des termes cinétique, piézométrique et géodésique, selon la formule :

$$gh = \frac{v_0^2}{2} + \frac{p_0}{\rho} + gz_0$$

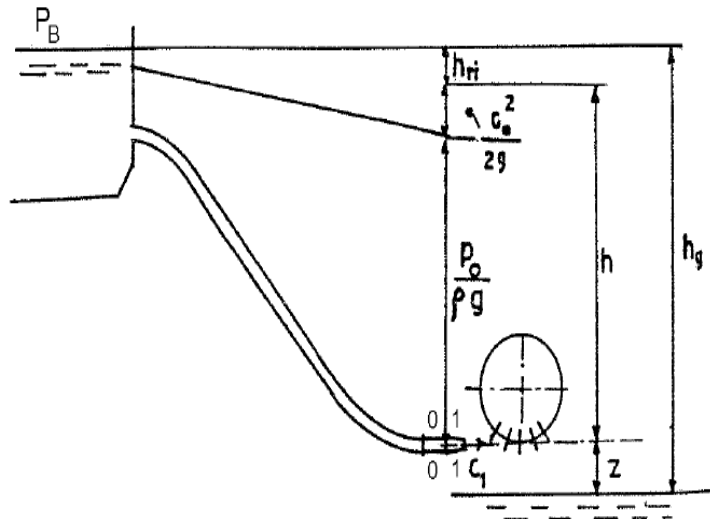


Figure 9 : Schéma des charges liquides

où :

v_0 = vitesse moyenne du fluide dans la section 0 - 0 (m/s) ;

g = accélération de gravité, constante et égale à 9,81 m/s² ;

p_0 = pression du fluide dans la section 0 - 0 (Pa) ;

ρ = densité du fluide ($\rho = 1000$ kg/m³) ;

z_0 = cote de l'axe du conduit par rapport à un plan de référence (m).

En considérant comme valeur de référence des ordonnées l'axe du tuyau d'adduction ($z_0 = 0$), on a :

$$H = \frac{v_0^2}{2g} + \frac{p_0}{\rho g}$$

A son tour, la vitesse du fluide peut être exprimée comme suit :

$$v_0 = \frac{Q}{A}$$

Q = débit dans le tuyau d'adduction (m³/s) ;

A_0 = surface la section 0 - 0 (m²), égale à :

$$A_0 = \frac{\pi \phi_0^2}{4}$$

ϕ_0 étant le diamètre interne (m), constant et égal à 54 mm.

On trouvera la valeur de Q grâce au capteur de débit, celle de P_0 grâce au capteur de pression ou au manomètre situé à l'entrée de la turbine. Avec ces données, on pourra calculer l'énergie spécifique de l'eau en amont des injecteurs.

Configuration du système :

- Vannes V1, V2, V4, V5, V6 Ouvertes
- Vanne V3 Fermée
- Injecteurs 2 ϕ 3,8 mm, 2 bouchons (par défaut il y a un injecteur qui est toujours ouvert)
- Pontets du générateur Présents
- Pontets de la batterie Absents
- Pontets de la charge Absents
- Commutateur de l'instrument 396 Position S1 (tri-phaisque)
- Vitesse de la pompe Maximale (petit roué blanc dans la pompe)

Lorsque l'on connaît le contenu énergétique spécifique de l'eau en amont de la turbine, pour calculer la puissance entrant dans le distributeur W_{hyd} il suffit de le multiplier par le débit massique qui s'écoule. On obtient alors :

$$\dot{m} = \rho Q$$
$$W_{hyd} = \dot{m}gh$$

Questions:

Calculer la contribution de l'énergie de pression et cinématique (en mètres de liquide ou J/Kg)

Calculer de la puissance hydraulique entrant dans le distributeur

2. Evaluation de la puissance électrique générée et calcul du rendement total du groupe distributeur – turbine –générateur

La puissance électrique générée W_{elec} est lu directement sur le logiciel. En divisant cette valeur par la puissance hydraulique disponible sur le distributeur, on trouve le rendement total du groupe distributeur –turbine – générateur :

$$\eta_{tot} = \frac{W_{el}}{W_{hyd}}$$

On remarquera que le rendement total peut être exprimé sous forme de produit entre le rendement distributeur-injecteur, le rendement hydraulique et le rendement électrique :

$$\eta_{tot} = \eta_u \eta_{hyd} \eta_{el}$$

3. Etude des courbes caractéristiques H-Q.

En tournant la vanne V_2 , il est possible de tester l'efficacité du système pour différentes hauteurs de chute d'eau. Il faut ajuster V_2 pour changer le niveau de pression à l'entrée de la turbine. Monter progressivement la pression et répéter le calculs des exercices 1,2 tous les 0.5 bars jusqu'à obtenir un niveau de pression à l'entrée égal à 5.5 atm.

Répéter les essais avec 1,2 et 3 injecteurs ouverts.

Représenter la courbe H-Q avec l'information obtenu dans la même figure.

En tournant le petit bouton blanc dans la pompe, obtenir la même figure pour une puissance inférieure.

4. Etude des courbes caractéristiques W-Q

Avec les informations obtenues dans l'exercice précédent, représenter les courbes W-Q avec un, deux et trois injecteurs ouverts (pompe à la puissance maximale)

Quel est le nombre d'injecteur qui rend le processus le plus efficace ?

Pour quel flux obtient-on une puissance maximale ?

5. Calcul de la vitesse de rotation et périphérique de la turbine

Ajuster les paramètres pour travailler dans le régime nominal (puissance maximale) trouvé dans l'exercice 4.

La fréquence f du courant électrique généré se lit directement sur l'instrument 396, en sélectionnant la page appropriée. Vu que le générateur est synchrone, cette fréquence coïncide avec la fréquence de rotation de la turbine.

Le nombre de tours par minute se calcule à l'aide de l'expression suivante :

$$n = \frac{60f}{p}$$

p étant le nombre de paires polaires du générateur, égal à 4.

La vitesse angulaire ω de la turbine est égale à :

$$\omega = \frac{2\pi}{60}n$$

à laquelle correspond une vitesse périphérique, au niveau de la circonférence primitive de la roue Pelton, égale à :

$$u = \omega \frac{D}{2}$$

6. Vitesse de l'eau à la sortie des injecteurs

Se référer toujours à la figure 9. Un bilan énergétique entre les sections 0-0 et 1-1, en l'absence de pertes, permet de trouver la vitesse idéale v_{1i} d'écoulement au niveau des injecteurs. En se rappelant que dans la section 1-1, la pression correspond à la pression atmosphérique, on aura :

$$H = \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_0^2}{2g} + \frac{p_0}{\rho g}$$

d'où on tirera :

$$v_1^2 = 2gH$$

En réalité, à cause des pertes, la vitesse effective est inférieure et égale à :

$$v_{1r} = \varphi v_1 = \varphi \sqrt{2gH}$$

où φ est le coefficient d'écoulement. Il s'agit d'un terme adimensionnel et est généralement compris entre 0,96 et 0,98 dans le cas de turbines de grand diamètre. On calcule la vitesse v_1 à l'aide de l'équation :

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} z v_1$$

où :

d = diamètre des injecteurs, égal à 3,8 mm ;

z = nombre des injecteurs (égal à 4).

Avec ces relations, calculer φ .

On remarquera qu'en calculant la puissance hydraulique de la veine fluide en s'intéressant aux aubes de la turbine à une vitesse v_1 , on obtient :

$$E = \dot{m} \frac{v_1^2}{2}$$

Cette valeur peut être inférieure à la puissance électrique de sortie de la machine. Ceci peut être justifié par le fait qu'en réalité la valeur de la vitesse de l'eau sortant de l'injecteur est supérieure à v_1 à cause de la contraction de la veine fluide.

7. Calcul du couple moteur sur l'arbre

On calcule le couple moteur à l'aide de la formule :

$$C = \frac{P}{\omega}$$

où P est la puissance sur l'axe de la turbine, que l'on peut évaluer comme suit :

$$P = \frac{W_{el}}{\eta_{el}}$$

Dans notre cas, on suppose un rendement électrique de 90%,

8. calcul de la constante caractéristique de la turbine Pelton fournie avec l'équipement

La constante caractéristique ns d'une turbine peut s'exprimer généralement comme suit :

$$ns = nP^{1/2}H^{-5/4}$$

où :

n = vitesse de rotation de la turbine (tours/mn) ;

P = puissance sur l'axe de la turbine (kW) ;

H = hauteur d'eau (m).

Pour les turbines Pelton, on a en général : $15 \leq ns \leq 60$.

9. Calcul du rendement du régulateur en fonction de la charge électrique appliquée

Comme on l'a vu, le régulateur, de type électronique, sert à maintenir la charge constante : la turbine et le générateur travaillent toujours à pleine charge, parce que l'énergie non utilisée se dissipe dans une résistance de décharge. Si l'on veut faire un bilan énergétique global du régulateur, il suffit de calculer le rapport entre la puissance P_1 de sortie du régulateur vers l'onduleur (que l'on peut calculer sous forme de produit entre la tension V_1 et le courant A_1 . Ces valeurs étant mesurées par les instruments fournis avec l'équipement) et la puissance d'entrée P_{S1} :

$$\eta_{reg} = \frac{P_1}{P_{S1}}$$

Compléter le tableau suivant en fonction de la charge électrique appliquée (c'est-à-dire des lampes allumées) :

N lampes allumées	V1(V)	A1 (A)	P1=V1*A1	Ps1	Rendement du régulateur
1					
2					
3					

4					
5					

Tableau 1 : xxxx

On remarquera que le rendement croît au fur et à mesure que le nombre de lampes allumées augmente, car la puissance dissipée dans la résistance de décharge se réduit. On remarquera en outre que, même si la résistance dissipée dans la résistance de décharge est nulle, le rendement du régulateur n'attend pas de toute façon à l'unité, à cause de la présence du redresseur qui provoque des pertes d'énergie.

10. Calcul de vérification de l'absence de cavitation à l'entrée d'aspiration de la pompe

Afin qu'il n'y ait pas de cavitation au niveau de l'entrée d'aspiration de la pompe de l'installation, on doit vérifier que la NPSH (de l'anglais Net Positive Suction Head) requise par la machine (NPSHR) est inférieure à la NPSH disponible (NPSHD) au niveau de l'entrée d'aspiration. La NPSHR requise par la machine est un paramètre, dépendant du débit élaboré, fourni par le fabricant (voir la Fig. 1.8). Si l'on considère un débit de 45 l/mn, on obtient NPSHR = 2 m c.a.

On calcule la NPSHD disponible au niveau de l'entrée d'aspiration à l'aide de la formule suivante :

$$NPSH_D = \frac{p_B - p_v}{\rho g} - z_a - h_r$$

où :

p_B = pression barométrique sur la surface libre du réservoir;

p_v = tension de vapeur à la température du fluide (Tableau A) ;

z_a = différence de niveau entre la cote du point le plus haut de l'entrée d'aspiration de la pompe et le niveau du réservoir (positif, si la pompe est plus haute) ;

h_r = pertes de charge dans le conduit d'aspiration.

Par référence au schéma hydraulique du banc, les pertes de charge en aspiration sont :

- pertes concentrées à l'entrée h_{ri} , que l'on peut évaluer en utilisant la formule :

$$h_{ri} = 0.5 \frac{v^2}{2g}$$

Où v est la vitesse moyenne du fluide dans la section d'entrée ;

- pertes concentrées sur la courbe à 90° h_{rg} (reportées dans le Tableau B, en fonction de la vitesse du fluide) ;

- pertes distribuées le long du tuyau d'aspiration h_{rd} (reportées dans le Tableau C, en fonction du diamètre du tuyau ϕ et de la vitesse du fluide).

En considérant que le tuyau de 1"½ (diamètre interne de 30 mm environ) a une longueur de 0,5 m, avec un débit de 45 l/mn (0,00075 m³/s) et en supposant que la pression barométrique est égale à 101,325 Pa, calculer la valeur de NPSHD.

t °C	p_v kg/cm ²	γ kg/dm ³	t °C	p_v kg/cm ²	γ kg/dm ³	t °C	p_v kg/cm ²	γ kg/dm ³	t °C	p_v kg/cm ²	γ kg/dm ³
0	0,0062	0,9998	41	0,793	0,9917	82	0,5234	0,9705	170	8,076	0,8973
1	0,0067	0,9999	42	0,836	0,9913	83	0,5447	0,9698	175	9,101	0,8920
2	0,0072	0,9999	43	0,0881	0,9909	84	0,5667	0,9693	180	10,225	0,8869
3	0,0077	1,0000	44	0,0928	0,9905	85	0,5897	0,9687	185	11,456	0,8814
4	0,0083	1,0000	45	0,0977	0,9900	86	0,6129	0,9680	190	12,800	0,8760
5	0,0089	1,0000	46	0,1028	0,9898	87	0,6372	0,9673	195	14,265	0,8703
6	0,0095	0,9999	47	0,1082	0,9883	88	0,6623	0,9667	200	15,857	0,8646
7	0,0102	0,9999	48	0,1138	0,9889	89	0,6882	0,9659	205	17,858	0,8587
8	0,0109	0,9998	49	0,1197	0,9885	90	0,7149	0,9653	210	19,456	0,8528
9	0,0117	0,9997	50	0,1258	0,9880	91	0,7425	0,9646	215	21,477	0,8465
10	0,0125	0,9996	51	0,1322	0,9876	92	0,7710	0,9640	220	23,659	0,8403
11	0,0134	0,9995	52	0,1388	0,9871	93	0,8004	0,9632	225	26,007	0,8339
12	0,0143	0,9994	53	0,1457	0,9866	94	0,8307	0,9625	230	28,531	0,8272
13	0,0153	0,9993	54	0,1530	0,9861	95	0,8619	0,9619	235	31,239	0,8206
14	0,0163	0,9992	55	0,1605	0,9857	96	0,8942	0,9611	240	34,140	0,8136
15	0,0174	0,9990	56	0,1683	0,9852	97	0,9271	0,9604	245	37,244	0,8064
16	0,0185	0,9989	57	0,1765	0,9847	98	0,9616	0,9596	250	40,560	0,7992
17	0,0197	0,9987	58	0,1850	0,9842	99	0,9969	0,9590	255	44,100	0,7918
18	0,0210	0,9985	59	0,1939	0,9836	100	1,0032	0,9583	260	47,870	0,7840
19	0,0224	0,9984	60	0,2031	0,9831	102	1,1092	0,9568	265	51,880	0,7759
20	0,0238	0,9982	61	0,2127	0,9826	104	1,1898	0,9554	270	56,140	0,7678
21	0,0253	0,9979	62	0,2227	0,9821	106	1,2751	0,9540	275	60,660	0,7593
22	0,0269	0,9977	63	0,2330	0,9816	108	1,6354	0,9525	280	65,460	0,7506
23	0,0286	0,9974	64	0,2438	0,9810	110	1,4609	0,9510	285	70,540	0,7416
24	0,0304	0,9972	65	0,2550	0,9804	112	1,5618	0,9495	290	75,920	0,7323
25	0,0323	0,9970	66	0,2666	0,9800	114	1,6684	0,9479	286	81,600	0,7227
26	0,0343	0,9966	67	0,2787	0,9794	116	1,7809	0,9464	300	87,610	0,7214
27	0,0363	0,9964	68	0,2912	0,9788	118	1,8995	0,9448	305	93,950	0,7017
28	0,0385	0,9961	69	0,3042	0,9782	120	2,0245	0,9431	310	100,640	0,6906
29	0,0408	0,9957	70	0,3177	0,9777	122	2,1561	0,9414	315	107,690	0,6793
30	0,0432	0,9955	71	0,3317	0,9771	124	2,2947	0,9398	320	115,130	0,6671
31	0,0458	0,9952	72	0,3463	0,9765	126	2,4404	0,9381	325	122,950	0,6540
32	0,0485	0,9949	73	0,3613	0,9759	128	2,5935	0,9365	330	131,180	0,6402
33	0,0513	0,9946	74	0,3869	0,9754	130	2,7544	0,9348	335	139,850	0,6257
34	0,0542	0,9942	75	0,3931	0,9748	135	3,1920	0,9305	340	148,960	0,6093
35	0,0573	0,9939	76	0,4098	0,9742	140	3,6850	0,9260	345	157,540	0,5910
36	0,0606	0,9934	77	0,4274	0,9737	145	4,2370	0,9216	350	168,630	0,5724
37	0,0640	0,9932	78	0,4451	0,9730	150	4,8540	0,9169	355	179,240	0,5512
38	0,0675	0,9928	79	0,4637	0,9724	155	5,5400	0,9121	360	190,420	0,5243
39	0,0713	0,9925	80	0,4829	0,9718	160	6,3020	0,9073	365	202,210	0,4926
40	0,0752	0,9921	81	0,5028	0,9712	165	7,1460	0,9023	370	214,680	0,4484

Tableau 2 : Tension de vapeur et densité de l'eau en fonction de la température

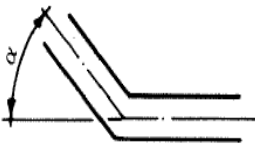
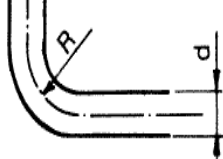
Vitesse de l'eau, m/s	COUDES A ANGLE VIF					COUDES NORMAUX					Vannes d'arrêt normales	Vanne de fond	Vanne de rétention	Pertes d'énergie à la sortie des tuyaux de décharge $V^2 \cdot 2g$
														
	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 40^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 80^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\frac{d}{R} = 0,4$	$\frac{d}{R} = 0,6$	$\frac{d}{R} = 0,8$	$\frac{d}{R} = 1$	$\frac{d}{R} = 1,5$				
0,10	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,07	0,08	0,01	0,0155	0,027	0,03	30	30	0,05
0,15	0,06	0,07	0,1	0,14	0,17	0,016	0,019	0,024	0,033	0,06	0,033	31	31	0,12
0,2	0,11	0,13	0,18	0,26	0,31	0,028	0,033	0,04	0,059	0,11	0,058	31	31	0,21
0,25	0,17	0,21	0,28	0,4	0,48	0,044	0,052	0,063	0,091	0,17	0,09	31	31	0,32
0,3	0,25	0,3	0,41	0,6	0,7	0,063	0,074	0,09	0,13	0,25	0,13	31	31	0,46
0,35	0,33	0,4	0,54	0,8	0,93	0,085	0,10	0,12	0,18	0,33	0,18	31	31	0,62
0,4	0,43	0,52	0,71	1,0	1,2	0,11	0,13	0,16	0,23	0,43	0,23	32	31	0,82
0,5	0,67	0,81	1,1	1,6	1,9	0,18	0,21	0,26	0,37	0,67	0,37	33	32	1,27
0,6	0,97	1,2	1,6	2,3	2,8	0,25	0,29	0,36	0,52	0,97	0,52	34	32	1,84
0,7	1,35	1,65	2,2	3,2	3,9	0,34	0,40	0,48	0,70	1,35	0,7	35	32	2,5
0,8	1,7	2,1	2,8	4,0	4,8	0,45	0,53	0,64	0,93	1,7	0,95	36	33	3,3
0,9	2,2	2,7	6	5,2	6,2	0,57	0,67	0,82	1,18	2,2	1,2	37	34	4,2
1,0	2,7	3,3	4,5	6,4	7,6	0,7	0,82	1,0	1,45	2,7	1,45	38	35	5,1
1,5	6,0	7,3	10,0	14,0	17,0	1,6	1,9	2,3	3,3	6,0	3,3	47	40	11,5
2,0	11,0	14,0	18,0	26,0	31,0	2,8	3,3	4,0	5,8	11,0	5,8	61	48	20,4
2,5	17,0	21,0	28,0	40,0	48,0	4,4	5,2	6,3	9,1	17,0	9,1	78	58	32,0
3,0	25,0	30,0	41,0	60,0	70,0	6,3	7,4	9,0	13,0	25,0	13,0	100	71	46,0
3,5	33,0	40,0	55,0	78,0	93,0	8,5	10,0	12,0	18,0	33,0	18,0	123	85	62,0
4,0	43,0	52,0	70,0	100,0	120,0	11,0	13,0	16,0	23,0	42,0	23,0	150	100	82,0
4,5	55,0	67,0	90,0	130,0	160,0	14,0	21,0	26,0	37,0	55,0	37,0	190	120	103,0
5,0	67,0	82,0	110,0	160,0	190,0	18,0	29,0	36,0	52,0	67,0	52,0	220	140	127,0

Tableau B - Pertes de charge, en cm c.a., dans les coudes, robinets, vannes

v	Q h	DIAMETRE DES TUYAUX, en mm																	
		20	25	30	40	50	65	80	100	125	150	175	200	250	300	350	400	450	500
0,5	Q	9,4	14,7	21,2	37,7	59,0	115	151	235	369	530	723	940	1480	2120	2880	3770	4780	5890
	h	2,4	1,9	1,5	1,0	0,8	0,56	0,46	0,36	0,28	0,23	0,19	0,16	0,13	0,105	0,089	0,076	0,067	0,06
0,6	Q	11,3	17,7	25,4	45,3	70,7	138	181	282	442	636	887	1130	1770	2540	3460	4520	5730	7060
	h	3,3	2,6	2,1	1,5	1,12	0,78	0,65	0,5	0,39	0,32	0,27	0,23	0,18	0,15	0,12	0,11	0,096	0,086
0,7	Q	13,2	20,6	29,7	52,9	82,5	161	211	329	516	742	1010	1315	2070	2960	4040	5270	6690	8250
	h	4,4	3,4	2,7	1,9	1,5	1,0	0,86	0,67	0,52	0,43	0,36	0,31	0,24	0,2	0,17	0,15	0,13	0,12
0,8	Q	15,05	23,6	33,9	60,4	94,5	184	241	377	590	848	1155	1505	2360	3390	4620	6030	7650	9420
	h	5,6	4,3	3,4	2,5	1,9	1,3	1,1	0,86	0,67	0,55	0,46	0,4	0,31	0,26	0,22	0,19	0,17	0,15
0,9	Q	16,95	26,5	38,2	68,0	106,0	207	272	423	664	955	1300	1695	2660	3810	5200	6780	8600	10600
	h	6,9	5,3	4,3	3,0	2,4	1,7	1,4	1,1	0,84	0,69	0,58	0,5	0,39	0,32	0,27	0,24	0,21	0,19
1,0	Q	18,8	29,5	42,4	75,5	117,7	230	302	471	737	1060	1445	1880	2950	4230	5770	7530	9550	11770
	h	8,3	6,4	5,1	3,7	2,9	2,1	1,7	1,3	1,0	0,84	0,71	0,61	0,48	0,4	0,34	0,29	0,26	0,23
1,1	Q	20,7	32,4	46,6	83,0	129,5	252	332	518	81	1165	1585	2070	3250	4650	6350	8290	10500	12950
	h	9,9	7,6	6,2	4,4	3,4	2,4	2,0	1,6	1,2	1,0	0,85	0,74	0,58	0,48	0,4	0,35	0,31	0,28
1,2	Q	22,6	35,4	50,9	90,6	141,0	276	362	565	885	1272	1730	2260	3550	5080	6930	9040	11450	14140
	h	11,7	9,0	7,2	5,2	4,0	2,9	2,4	1,9	1,5	1,2	1,0	0,87	0,69	0,56	0,48	0,42	0,37	0,32
1,3	Q	24,5	38,3	55,0	98,0	153,0	299	392	612	960	1378	1875	2450	3840	5500	7500	9800	12400	15320
	h	13,5	10,4	8,4	6,0	4,7	3,3	2,8	2,2	1,71	1,4	1,15	1,0	0,8	0,66	0,56	0,49	0,43	0,38
1,4	Q	26,35	41,3	59,3	105,5	165,0	302	422	660	1032	1473	2020	2635	4140	5920	8090	10530	13370	16500
	h	15,4	11,9	9,6	6,9	5,4	3,8	3,2	2,5	2,0	1,6	1,3	1,17	0,92	0,76	0,64	0,56	0,5	0,44
1,5	Q	28,25	44,2	63,6	113,0	176,5	345	452	707	1106	1590	2165	2825	4430	6350	8660	11300	14320	17680
	h	17,4	13,5	10,9	7,8	6,1	4,4	3,6	2,8	2,25	1,82	1,5	1,34	1,05	0,87	0,74	0,64	0,57	0,51
1,6	Q	30,1	47,1	67,8	121,0	188,5	368	483	753	1180	1695	2310	3010	4730	6770	9240	12055	15012	18850
	h	19,6	15,3	12,4	8,9	6,9	4,9	4,1	3,2	2,55	2,05	1,7	1,53	1,18	0,99	0,84	0,72	0,64	0,58
1,7	Q	32,0	50,1	72,0	128,0	200,0	392	513	800	1253	1802	2455	3200	5020	7190	9820	12800	16230	20030
	h	21,9	17,2	13,9	10,0	7,8	5,4	4,6	3,6	2,85	2,3	1,95	1,7	1,33	1,11	0,94	0,81	0,73	0,65
1,8	Q	33,9	53,0	76,3	136,0	212,0	415	543	848	1327	1905	2600	3390	5320	7610	10380	13550	17200	21200
	h	24,2	19,1	15,4	11,1	8,7	6,0	5,1	4,0	3,15	2,6	2,2	1,9	1,48	1,24	1,05	0,91	0,81	0,73
1,9	Q	35,8	56,0	80,5	143,5	224,0	438	573	895	1400	2015	2740	3580	5610	8040	10960	14300	18150	22400
	h	26,8	21,0	17,0	12,3	9,6	6,8	5,6	4,4	3,45	2,85	2,45	2,1	1,64	1,38	1,17	1,01	0,9	0,81
2,0	Q	37,7	59,0	84,8	151,0	235,5	461	603	943	1475	2120	2885	3765	5910	8460	11540	15060	19100	23570
	h	29,6	23,0	18,6	13,4	10,5	7,5	6,2	4,9	3,8	3,17	2,7	2,33	1	1,52	1,3	1,12	0,99	0,89
2,1	Q	39,5	62,0	89,0	158,5	247,5	484	633	990	1548	225	3030	3955	6200	8890	12100	15810	20050	24750
	h	32,2	25,1	20,4	14,8	11,5	8,2	6,8	5,4	4,2	3,5	2,95	2,55	2,0	1,68	1,43	1,22	1,08	0,98
2,2	Q	41,5	64,9	93,2	176,0	259,0	507	663	1036	1620	2330	3175	4145	6500	9300	12700	16570	21000	25930
	h	35,0	27,3	22,3	16,2	12,5	9,1	7,4	5,9	4,6	3,85	3,25	2,8	2,2	1,85	1,56	1,34	1,18	1,08
2,3	Q	43,3	67,9	97,5	173,5	271,0	530	694	1082	1695	2440	3320	4330	6800	9730	13270	17310	21950	27100
	h	38,0	29,7	24,2	17,7	13,6	9,8	8,1	6,4	5,0	4,15	3,5	3,05	2,4	2,03	1,7	1,46	1,28	1,18
2,4	Q	45,2	70,8	101,5	181,0	282,5	553	724	1130	1770	2545	3460	4520	7090	10140	13850	18090	22900	28300
	h	42,1	32,1	26,2	19,1	14,7	10,6	8,8	6,9	5,45	4,55	3,8	3,3	2,62	2,21	1,85	1,58	1,38	1,28
2,5	Q	47,1	73,7	105,8	189,0	294,5	576	755	1178	1843	2650	3610	4710	7390	10570	14420	18820	23880	29450
	h	45,0	34,7	28,3	20,5	16,0	11,4	9,6	7,5	5,9	4,9	4,1	3,58	2,84	2,4	2,0	1,7	1,5	1,4
2,6	Q	49,0	76,6	110,0	196,0	306,0	599	785	1225	1915	2755	3755	4900	7680	11000	15000	19590	24820	30630
	h	48,3	37,3	30,4	22,2	17,2	12,3	10,4	8,1	6,35	5,25	4,4	3,85	3,07	2,59	2,17	1,84	1,62	1,51
2,7	Q	50,9	79,6	114,3	204,0	318,0	622	815	1271	1990	2860	3900	5090	7980	11140	15590	20340	25800	31820
	h	51,7	40,0	32,5	23,8	18,5	13,2	11,2	8,7	6,85	5,65	4,75	4,15	3,3	2,78	2,34	1,98	1,74	1,62
2,8	Q	52,7	82,6	118,5	211,5	330,0	645	845	1320	2060	2970	4040	5280	8270	11830	16160	21090	26730	33000
	h	55,2	42,5	34,8	25,5	19,9	14,0	12,0	9,3	7,35	6,05	5,10	4,45	3,56	2,98	2,51	2,13	1,88	1,74
2,9	Q	54,6	85,5	123,0	219,0	342,0	668	875	1365	2140	3075	4190	5460	8560	12250	16730	21480	27700	34200
	h	58,7	45,1	37,1	27,1	21,3	15,2	12,8	10,0	7,85	6,45	5,5	4,75	3,82	3,18	2,7	2,3	2,03	1,87
3,0	Q	56,5	88,5	127,0	226,5	354,0	691	905	1414	2210	3180	4330	5650	8850	12690	17310	22600	28650	35350
	h	62,9	47,9	39,6	28,8	22,6	16,3	13,6	10,7	8,4	6,9	5,9	5,1	4,1	3,4	2,9	2,5	2,2	2,0

Tableau C - Pertes de charge, en cm c.a., pour chaque mètre de tuyau droit