

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعلیم العالی والبحث العلمی

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Electromécanique

## MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : **Electromécanique**

Spécialité : **Electromécanique**

Par : - RIGHI Brahim

- SABI Kamel

### Sujet

**Acquisition et supervision des paramètres de fonctionnement d'une Turbine Pelton**

Soutenu publiquement, le : 01/ 07/2025, devant le jury composé de :

Mme. NACIB Leila	Grade	<b>Univ-BBA</b>	Président
M. ZAOUI Fares	Grade	<b>Univ-BBA</b>	Examineur
M. MEGHLAOUI Issam	Grade	<b>Univ-BBA</b>	Encadrant
M. LAYADI Toufik Madani	Grade	<b>Univ-BBA</b>	Co-Encadrant

Année universitaire : 2025/2026

## ***Remerciement***

*Avant tout nous remercions ALLAH le tout puissant pour le courage, la volonté et la passion qu'il nous a accordé pour réaliser ce travail.*

*Nous tenons à exprimer toute nos gratitude à monsieur MEGHLAOUI ISSAM pour avoir encadré et dirigé ce travail avec une grande rigueur scientifique et pour sa disponibilité, sa patience, sa compétence, ses précieux conseils.*

*Merci à tout les membres de jury, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de présider et d'examiner ce mémoire.*

*Merci à toutes les personnes qui de diverses façons et à différents moments nous apporté leur aide.*

## ***Dédicace***

*Nous dédions affectueusement ce travail à :*

*Nos parents pour leur aide, leurs encouragements  
et leur soutien moral aux moments difficiles.*

*Nos chère grands-mères et grands-pères*

*Nos sœurs et frères*

*Nos tentes et oncles*

*Toute la famille RIGHI et SABI*

*Tous nos amis sans exception*

**Résumer :**

Ce projet de fin d'études vise à fabriquer et développée un banc d'essai pour une turbine Pelton, destiné aux travaux pratiques. L'idée du projet a émergé durant l'année universitaire 2019/2020 et son développement s'est pour suivi en 2021/2022. Toutefois, le projet n'a pas atteint tous les objectifs escomptés, notamment en ce qui concerne l'affichage des données sur l'interface MATLAB et la précision des mesures.

Afin de mener à bien ce projet essentiel, les travaux actuels portent sur une révision complète du câblage électrique, le remplacement de l'écran LCD, l'étalonnage précis des capteurs, ainsi que la conception d'une interface MATLAB performante et efficace. Cette interface permettra un affichage en temps réel des résultats et des calculs avec une précision optimale, garantissant ainsi une exploitation fiable et complète du banc d'essai.

**Mots-clés :** Turbine Pelton, Banc d'essai, Interface MATLAB.

**Abstract :**

This final year project aims to fabricate and develop a test bench for a Pelton turbine, intended for practical work. The project idea emerged during the 2019/2020 academic year, and its development continued into 2021/2022. However, the project did not achieve all its expected objectives, particularly regarding data display on the MATLAB interface and measurement precision.

To successfully complete this essential project, current efforts focus on a complete revision of the electrical wiring, the replacement of the LCD screen, the precise calibration of sensors, and the design of a high-performance and efficient MATLAB interface. This interface will allow for real-time display of results and calculations with optimal precision, thereby ensuring reliable and comprehensive operation of the test bench.

**Keywords :** Pelton Turbine, Test Bench, MATLAB Interface.

## التلخيص:

يهدف مشروع التخرج هذا إلى تصميم وتصنيع منصة اختبار لتوربينة بيلتون، مخصصة للأعمال التطبيقية. بدأت فكرة المشروع خلال العام الجامعي 2019/2020 واستمر تطويره في 2021/2022. ومع ذلك، لم يحقق المشروع جميع أهدافه المرجوة، خاصة فيما يتعلق بعرض البيانات على واجهة ما تلاب ودقة القياسات.

لإتمام هذا المشروع الحيوي، تركز الأعمال الحالية على مراجعة شاملة للأسلاك الكهربائية، واستبدال شاشة العرض LCD، والمعايرة الدقيقة للمستشعرات، بالإضافة إلى تصميم واجهة ما تلاب ناجحة وفعالة. ستسمح هذه الواجهة بعرض النتائج في الوقت الفعلي وإجراء الحسابات اللازمة بدقة مثالية، مما يضمن استغلالاً كاملاً وموثوقاً لمنصة الاختبار.

**الكلمات المفتاحية:** توربين بيلتون، منصة اختبار، واجهة ما تلاب.

# *Sommaire*

<b>Introduction générale :</b> .....	<b>2</b>
<b>Chapitre I : Généralité sur la turbine Pelton</b>	
<b>I.1.Introduction :</b> .....	<b>4</b>
<b>I.2.Description :</b> .....	<b>4</b>
<b>I.3.Caractéristiques principales de la turbine Pelton :</b> .....	<b>5</b>
I.3.1. Roue à augets : .....	6
I.3.2. Injecteur : .....	7
I.3.3. Déflecteur : .....	9
I.3.4. Bâche : .....	9
<b>I.4.Principe de fonctionnement :</b> .....	<b>10</b>
<b>I.5.Paramètres influençant la performance :</b> .....	<b>12</b>
<b>I.6.Performances et rendement :</b> .....	<b>14</b>
I.6.1. Rendement hydraulique : .....	15
<b>I.7. Régulation de la turbine :</b> .....	<b>15</b>
<b>I.8. Adaptabilité et applications de la turbine Pelton :</b> .....	<b>15</b>
<b>I.9. Applications industrielles :</b> .....	<b>15</b>
I.9.1. Centrales hydroélectriques en haute chute : .....	16
I.9.2. Production d'énergie pour l'autoconsommation industrielle : .....	16
I.9.3. Utilisation dans les stations de pompage et d'irrigation : .....	16
I.9.4. Installations industrielles dans des zones isolées : .....	16
<b>I.10. Avantages de la turbine Pelton :</b> .....	<b>16</b>
<b>I.11.Inconvénients de la turbine Pelton :</b> .....	<b>17</b>
<b>I.12.Conclusion</b> .....	<b>18</b>

## **Chapitre II : Démarrage de la turbine Pelton et Acquisition des données**

<b>II.1.Introduction :</b> .....	<b>20</b>
<b>II.2.Mise en marche d'une turbine Pelton :</b> .....	<b>20</b>
<b>II.3.Acquisition des données :</b> .....	<b>22</b>
II.3.1.Procédure de Re-câblage : .....	22
II.3.1.1.Démontage de l'Ancienne Installation : .....	22
II.3.1.2.Installation des Nouveaux Câbles : .....	22
II.3.2.Nouveau Schéma de Branchement : .....	22
II.3.3.Affichage des données sur l'écran LCD : .....	23
<b>II.4.Création interface Matlab :</b> .....	<b>24</b>
<b>II.5.Extraction la relation entre courant et couple dans le frein électromagnétique : .....</b>	<b>29</b>
<b>II.6.Réalisation l'étalonnage des capteurs :</b> .....	<b>30</b>
II.6.1.Etalonnage de capteur de pression : .....	31
II.6.2.Etalonnage de capteur de débit : .....	33
<b>II.7.Conclusion.....</b>	<b>35</b>
 <b>Chapitre III : Acquisition et supervision en temps réel des paramètres de la Turbine Pelton</b>	
<b>III.1.Introduction :</b> .....	<b>37</b>
<b>III.2.Caractéristique de la turbine Pelton :</b> .....	<b>37</b>
III.2.1.Vitesse en fonction de couple sous différents débits : .....	38
III.2.2.Puissance mécanique en fonction de couple sous différents débits : .....	39
III.2.3.Rendement en fonction de couple sous différents débits : .....	42
<b>III.3.Conclusion .....</b>	<b>44</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>46</b>

## *Liste des figures*

<b>Figure. I.1.</b> Vue schématique d'une turbine Pelton à axe horizontal.....	4
<b>Figure. I.2.</b> Turbine Pelton à 6 injecteurs.....	5
<b>Figure. I.3.</b> Roue à augets, d'une turbine Pelton.....	7
<b>Figure. I.4.</b> Injecteur d'une turbine Pelton.....	8
<b>Figure. I.5.</b> Déflecteur, a) Déflecteur passif, b) Déflecteur activé.....	9
<b>Figure. I.6.</b> Fonctionnement d'une turbine Pelton.....	11
<b>Figure. I.7.</b> Schéma de sélection d'une turbine en fonction de la hauteur et du débit de la chute. .....	12
<b>Figure. I.8.</b> Carte de performance des turbines Pelton en fonction de la chute disponible et de la puissance demandée.....	14
<b>Figure. II.1.</b> Banc d'essai d'une turbine Pelton.....	21
<b>Figure. II.2.</b> Schéma électrique du banc d'essai.....	22
<b>Figure. II.3.</b> Écran LCD.....	23
<b>Figure. II.4.</b> Interface Matlab développée pour l'affichage des données du banc d'essai.....	24
<b>Figure. II.5.</b> Schéma du banc d'essai.....	25
<b>Figure. II.6.</b> Paramètres du Port RS-232.....	26
<b>Figure. II.7.</b> Variateur de courant.....	26
<b>Figure. II.8.</b> Données mesurées et calculés.....	27
<b>Figure. II.9.</b> Puissances et le rendement calculés.....	28
<b>Figure. II.10.</b> Courbe caractéristique du couple en fonction du courant.....	29
<b>Figure. II.11.</b> Courbe d'étalonnage du capteur pression P.....	32
<b>Figure. II.12.</b> Courbe d'étalonnage du capteur de débit.....	33
<b>Figure. III.1.</b> Caractéristique mécanique $N = f(Cr)$ d'une turbine Pelton sous variations de débit ( $Q_v$ ). .....	39
<b>Figure. III.2.</b> Courbe caractéristique de la puissance mécanique $P_{méc} = f(Cr)$ d'une turbine Pelton sous différents débits ( $Q_v$ ). .....	41
<b>Figure. III.3.</b> Courbes de rendement $\eta = f(Cr)$ d'une turbine Pelton sous différents débits ( $Q_v$ ). .....	43

## *Liste des tableaux*

<b>Tableaux.II.1.</b> Variation Couple en fonction du courant.....	29
<b>Tableaux.II.2.</b> Mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du capteur de pression. .....	31
<b>Tableaux.II.3.</b> Mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du capteur de débit .....	33
<b>Tableau.III.1.</b> Résultat de mesure de la vitesse.....	38
<b>Tableau.III.2.</b> Résultat de variation de la puissance mécanique.....	40
<b>Tableau.III.3.</b> Résultat de variation du rendement. ....	42

# *Introduction générale*

### Introduction générale

L'un des premiers besoins des pays est évidemment le besoin en énergie, que ce soit pour produire de l'électricité ou simplement pour entraîner une machine agricole. L'un des moyens pour cela est d'utiliser l'énergie hydraulique et les turbines Pelton en particulier.

En effet, ce type de turbine convient très bien pour les grandes hauteurs hydrauliques et les petits débits. Elles ont de plus un bon rendement pour les petites et moyennes puissances (de quelques centaines de watts à quelques dizaines de kilowatts), ce qui est souvent le cas des applications dans les pays en voie de développement.

Ces turbomachines sont relativement faciles à réaliser localement. Dans une telle turbine, le couple est généré par la force exercée par un jet d'eau sur un ensemble d'augets que l'on pourrait comparer à des sortes de cuillères fixées sur un rotor. Ces machines peuvent avoir un ou deux jets par roue dans les cas où l'axe du rotor est horizontal. On peut même aller jusqu'à six jets si l'on est dans le cas d'une turbine à axe vertical.

De manière simple, une turbine Pelton est constituée des éléments suivants : un rotor, un ou plusieurs injecteurs et un bâti. Les plus grandes roues construites peuvent avoir un diamètre de plus de cinq mètres et peser plus de quarante tonnes.

Ce mémoire de fin d'études comporte trois chapitres :

Dans le premier chapitre, portera sur la description et les caractéristiques principales de la turbine Pelton, le principe de fonctionnement ainsi que les paramètres influençant les performances de cette machine sont discutés dans ce chapitre. Ensuite, une analyse du rendement ainsi que l'application industrielle, les avantages et les inconvénients sont présentés en détail dans cette section.

Le deuxième chapitre décrit les travaux réalisés pour mettre en service un banc d'essai dédié à une turbine Pelton, en mettant l'accent sur l'amélioration des systèmes d'acquisition de données et d'affichage que nous avons proposé.

Le troisième et dernier chapitre présente une analyse expérimentale approfondie des performances d'une turbine Pelton sous différentes conditions de fonctionnement, en mettant l'accent sur les relations entre les paramètres mécaniques et hydrauliques.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale et des annexes.

# **C**hapitre I

## **Généralité sur la turbine Pelton**

### I.1. Introduction :

Ce chapitre présente la turbine Pelton, une turbine hydraulique adaptée aux hautes chutes d'eau et largement utilisée pour la production d'électricité.

Nous débuterons par sa description et ses caractéristiques principales, avant d'expliquer son principe de fonctionnement ainsi que les paramètres influençant sa performance. Ensuite, nous analyserons son rendement, ses applications industrielles, ainsi que ses avantages, tels que son efficacité énergétique et sa durabilité.

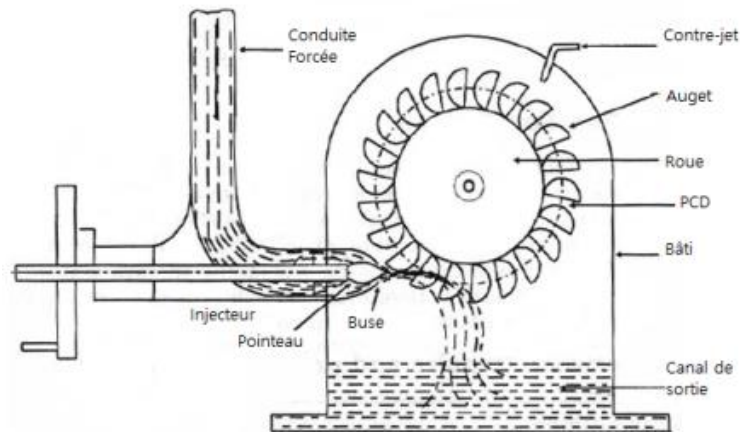
Enfin, nous examinerons ses inconvénients, notamment son coût d'installation élevé et sa dépendance aux hautes chutes d'eau. Ce chapitre mettra ainsi en évidence l'importance de la turbine Pelton dans le secteur hydroélectrique.

### I.2. Description :

Une turbine Pelton est un type de turbine hydraulique utilisée dans les centrales hydroélectriques. Elle a été inventée en 1879 par Lester Allan Pelton, en Californie [01].

La turbine Pelton est une machine à action, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de différence de pression entre l'entrée (la sortie de l'injecteur) et la sortie de la roue. En réalité, la pression à l'intérieur du bâti est la pression atmosphérique [02].

**La figure I.1** Présente une turbine Pelton à axe horizontal, typique des installations industrielles :



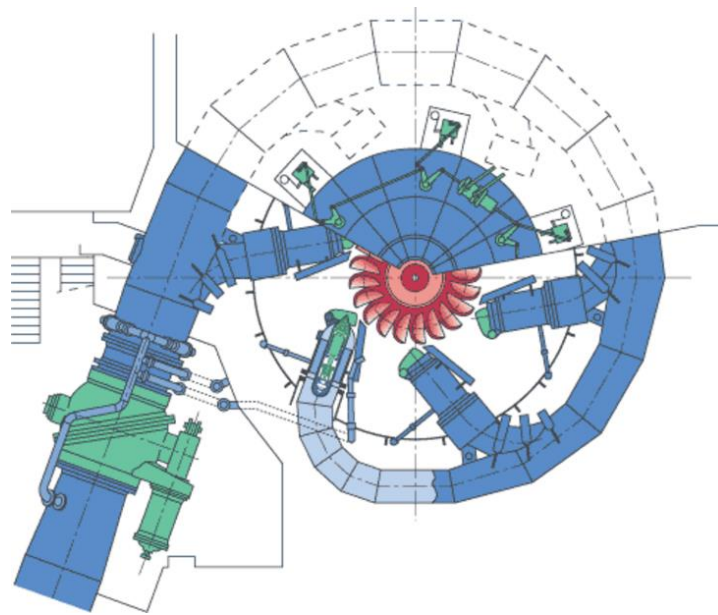
**Figure. I.1.** Vue schématique d'une turbine Pelton à axe horizontal [03].

L'eau arrive sous pression par la conduite forcée, est régulée par l'injecteur, puis accélérée par la buse en un jet violent. Ce jet frappe les augets de la roue Pelton, la faisant tourner. L'énergie mécanique est transmise au générateur, tandis que l'eau est évacuée par le canal de sortie. Le contre-jet et le bâti garantissent sécurité et stabilité.

### I.3. Caractéristiques principales de la turbine Pelton :

Une turbine Pelton comporte une roue mobile, munie d'aubes appelées « augets » sur sa périphérie, et un ou plusieurs injecteurs fixes qui envoient, à très grande vitesse, l'eau sur les augets. Le tout est entouré d'une bêche en tôle d'acier destinée à protéger la roue et à évacuer l'eau [04].

**La figure I.2** Cette image montre une vue en plan d'une turbine Pelton, utilisée dans les centrales hydroélectriques pour exploiter des chutes d'eau à haute pression.



**Figure. I.2.** Turbine Pelton à 6 injecteurs.

Au centre, on voit la roue Pelton (en rouge) munie d'augets, qui reçoit des jets d'eau puissants provenant de plusieurs injecteurs disposés autour d'elle (en bleu). Ces jets sont orientés avec précision pour faire tourner la roue, convertissant l'énergie hydraulique en énergie mécanique. Chaque injecteur est contrôlé par un servomoteur hydraulique (en vert), qui régule le débit d'eau en fonction de la demande. L'eau sous pression provient de la conduite forcée, visible à gauche, qui canalise l'eau depuis le barrage. Ce système permet une production efficace d'électricité, en ajustant le débit d'eau pour optimiser le rendement de la turbine tout en protégeant les composants mécaniques.

### I.3.1. Roue à augets :

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

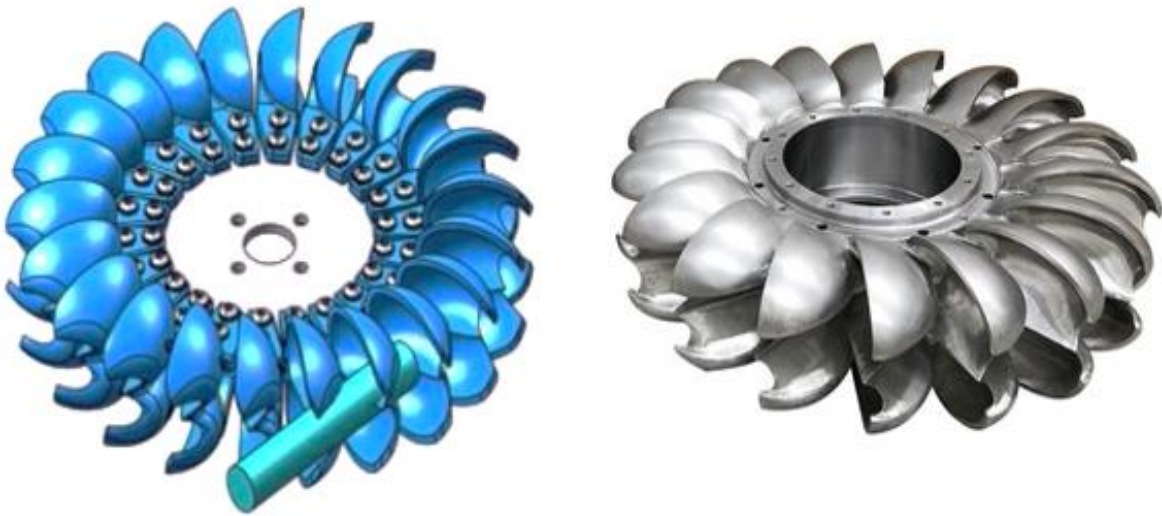
La forme de ces augets est très évoluée et permet au jet d'eau qui les frappe de se séparer en 2 jets déviés sur les côtés de la roue. Le nombre d'augets répond à une formule issue de l'expérience des constructeurs, soit  $Z=15+D/2d$ , avec  $Z$  = nombre d'augets,  $D = \varnothing$  primitif,  $d = \varnothing$  du jet d'eau. Leur nombre varie de 15 à 25 en pratique. Le diamètre du centre des augets est appelé le  $\varnothing$  Pelton, diamètre qui sert à positionner l'axe du jet d'eau, axe qui doit être tangent à ce  $\varnothing$  Pelton.

Construite le plus souvent d'une seule pièce, les roues Pelton sont moulées par coulage, avec des matériaux ferreux fortement alliés en chrome et nickel. Le moulage de ces roues est une opération complexe et délicate, nécessitant des contrôles métallurgiques nombreux et coûteux. Les roues d'un diamètre important ( $> 1500\text{mm}$ ) sont constituées d'une couronne moulée d'augets, couronne fixée entre deux disques servant de moyeu.

La surface intérieure des augets, appelée « intrados », doit avoir un état de surface poli pour optimiser l'écoulement de l'eau. La partie extérieure (extrados) des augets est parfois nervurée pour augmenter la tenue mécanique de l'auget [06].

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

1. Une roue : l'alternateur et la roue sont placés côte à côte.
2. Deux roues : l'alternateur est placé entre les deux roues.



**Figure. I.3.** Roue à augets, d'une turbine Pelton.

Sur cette image, on observe la roue complète d'une turbine Pelton :

- Elle est équipée de plusieurs augets métalliques (souvent en acier inoxydable), disposés de façon symétrique autour du moyeu central.
- Le moyeu rouillé témoigne probablement d'un stockage ou d'un usage prolongé, mais les augets restent en bon état, ce qui est essentiel pour le bon fonctionnement.
- Chaque auget est conçu pour diviser et dévier le jet d'eau à 180°, permettant un transfert maximal de l'énergie cinétique de l'eau vers la roue.

### I.3.2. Injecteur :

L'injecteur a pour rôle d'alimenter la roue en eau et de permettre le réglage du débit. L'eau pénètre dans l'injecteur à faible vitesse et en sort à grande vitesse. Il y a donc dans l'injecteur transformation de l'énergie de pression en énergie cinétique, l'eau agissant essentiellement sur la roue par son énergie cinétique. La vitesse de l'eau à la sortie de l'injecteur ne dépend que de la hauteur de chute, elle est approximativement égale à  $\sqrt{2gh}$ .

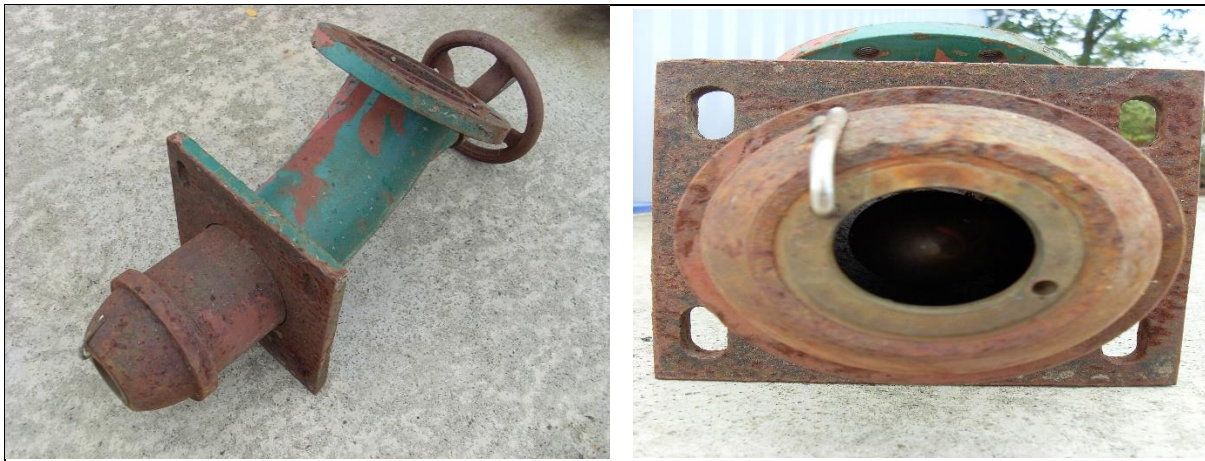
L'injecteur est composé :

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

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

L'aiguille sert d'obturateur et de régleur du débit d'eau en se déplaçant longitudinalement dans le corps de l'injecteur. A l'extrémité de l'aiguille, le pointeau (en forme de radis) est une pièce en acier inoxydable parfaitement usinée et polie, venant en contact avec le bec de buse.

La manœuvre de l'aiguille est assurée par un vérin placé en bout de l'aiguille et fixé sur le corps de l'injecteur. La présence de ce vérin oblige à concevoir une forme coudée pour le corps de l'injecteur. Le guidage de l'aiguille est assuré par un croisillon côté buse (sortie d'eau) et par un presse-étoupe côté vérin. La conception fait que l'aiguille a tendance à se fermer sous la pression d'eau amont pour assurer la sécurité de la fermeture. Le vérin ne sert qu'à la manœuvre d'ouverture et au réglage du jet d'eau [07].



**Figure. I.4.** Injecteur d'une turbine Pelton.

### I.3.3. Déflecteur :

Le déflecteur a pour rôle de dévier le jet d'eau, en cas d'incident grave sur la turbine ou sur l'alternateur, sans arrêter l'écoulement de l'eau et d'éviter ainsi les coups de bélier dans la conduite amont ou l'emballement de la turbine.

Le déflecteur est composé :

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

Après une manœuvre du déflecteur, la roue n'est plus entraînée par le jet, et ce dernier peut être diminué lentement par l'injecteur sans risque. L'efficacité du déflecteur est assurée par sa position tangente au jet d'eau en position normale. Le déflecteur est une pièce le plus souvent forgée, à cause des contraintes importantes qu'il subit [08].



Figure. I.5. Déflecteur, a) Déflecteur passif, b) Déflecteur activé.

### I.3.4. Bâche :

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

Cette bâche est composée :

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

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

D'autre part, des boucliers métalliques appelés « renvois d'eau » sont fixés dans la partie inférieure du bâti. Ces pièces permettent de récolter l'eau projetée et de la guider vers la fosse d'évacuation [09].

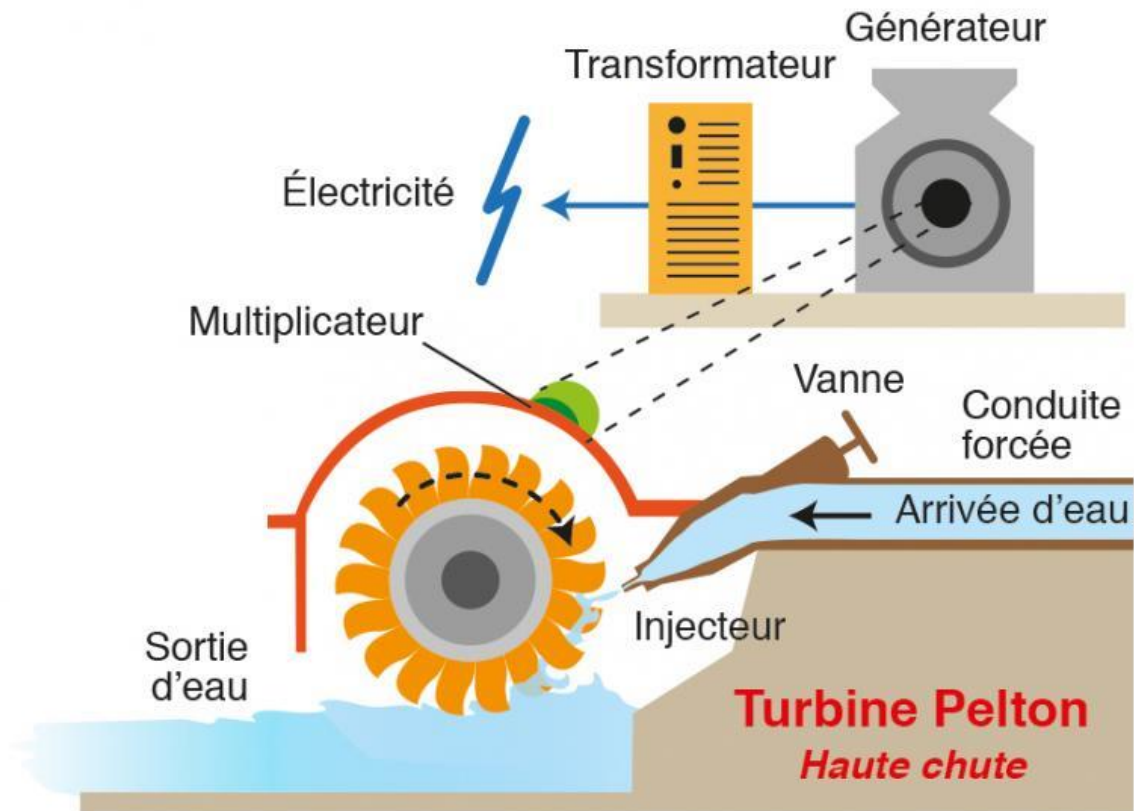
#### **I.4. Principe de fonctionnement :**

L'eau est canalisée par une conduite forcée entre la chambre de mise en charge et l'entrée du distributeur qui conduit l'écoulement vers le ou les injecteurs. L'injecteur est chargé d'accélérer l'écoulement, c'est-à-dire de transformer l'énergie potentielle de pression en énergie cinétique via la loi de conservation de l'énergie. Généralement, l'injecteur est constitué d'une buse, responsable de la convergence du jet, et d'un pointeau, chargé de la régulation du débit.

L'injecteur dirige ainsi un jet cylindrique à haute vitesse vers la roue constituée d'un certain nombre d'augets. L'auget a la lourde responsabilité de récupérer un maximum de l'énergie cinétique du jet et de la transformer en puissance mécanique à l'arbre. Un auget a une forme de double cuillère avec au centre une crête appelée aussi splitter. Le splitter divise le jet en deux parties égales pour qu'il s'écoule dans la section concave de l'auget, là où a lieu la récupération d'énergie. Pour finir, une fois que l'eau est passée dans la roue, il faut la canaliser vers le canal de sortie. C'est l'un des nombreux rôles du bâti.

Cette turbine est particulièrement appréciée pour sa capacité à réguler le débit sur une grande plage tout en conservant un excellent rendement. De plus, cette régulation peut se faire de manière très précise grâce au pointeau. En réglant avec soins la position du pointeau dans la buse (via un vérin hydraulique, un moteur électrique, manuellement, etc.) le diamètre du jet est adapté et par conséquent le débit également (à hauteur de chute supposée constante) [10].

**La figure I.6** Cette image illustre le fonctionnement d'une turbine Pelton, spécialement conçue pour exploiter les sites à haute chute d'eau.



**Figure. I.6.** Fonctionnement d'une turbine Pelton.

L'eau arrive sous haute pression à travers une conduite forcée, puis passe par une vanne qui régule le débit avant d'atteindre l'injecteur. Ce dernier transforme le flux d'eau en un jet concentré qui frappe les augets de la roue Pelton, provoquant sa rotation. Cette énergie mécanique est transmise à un multiplicateur qui augmente la vitesse de rotation avant d'atteindre le générateur, où elle est convertie en électricité. L'électricité produite est ensuite acheminée vers un transformateur pour être adaptée aux réseaux de distribution. L'eau, après avoir transmis son énergie, est évacuée par la sortie d'eau. Ce système est efficace pour produire de l'électricité à partir d'une ressource naturelle renouvelable, en utilisant l'énergie cinétique de l'eau en chute libre.

### I.5. Paramètres influençant la performance :

La performance d'une turbine Pelton dépend de plusieurs facteurs hydrauliques, mécaniques et géométriques. Voici les principaux paramètres à considérer :

- **Hauteur de chute nette (H)** : plus elle est élevée, plus l'énergie disponible est importante.
- **Débit d'eau (Q)** : il définit la quantité d'énergie transmise à la turbine.
- **Diamètre de la roue** : doit être optimisé pour maximiser l'efficacité.
- **Vitesse spécifique (Ns)** : indique si la turbine est adaptée à une chute donnée.
- **Nombre de jets** : en général entre 1 et 6 selon la puissance requise.

La figure I.7 Représente la hauteur de chute nette (H) en mètres avec le débit (Q) en litres par seconde pour plusieurs types de turbines : Pelton (en rouge), Turgo (en vert), Banki-Mitchell (en bleu foncé), Francis (en jaune), et une variante de la turbine Francis en chambre d'eau (en orange).

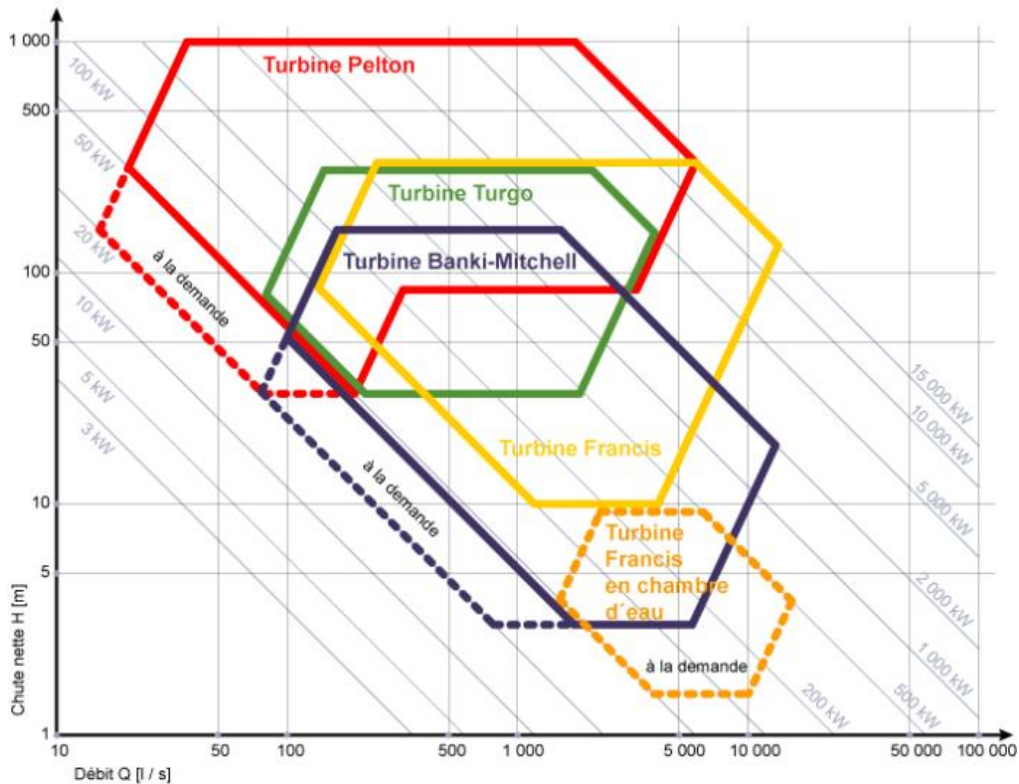


Figure. I.7. Schéma de sélection d'une turbine en fonction de la hauteur et du débit de la chute [11].

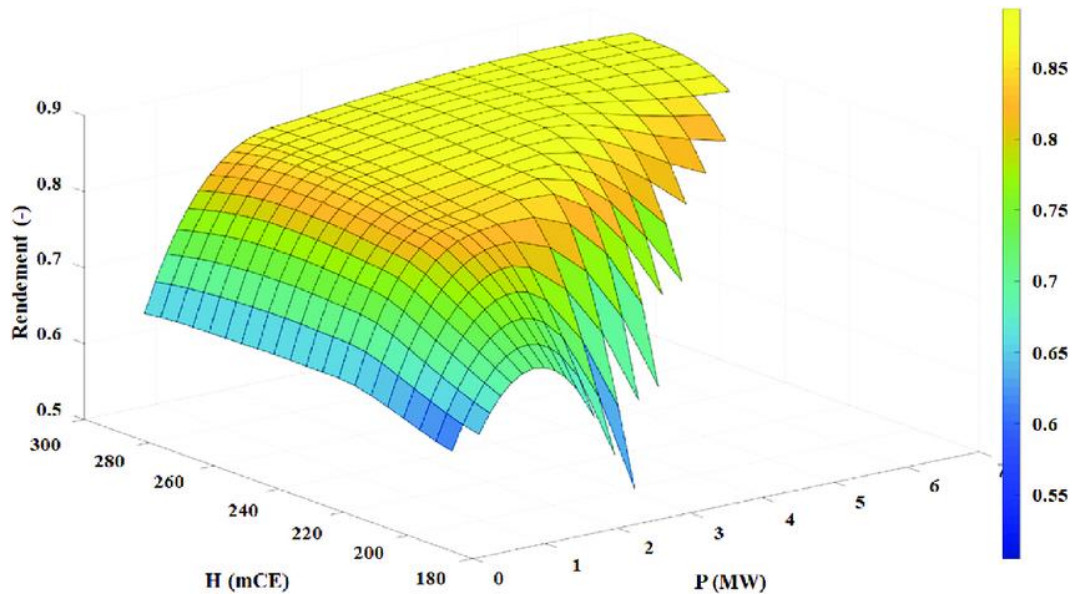
Les zones délimitées par ces polygones représentent les plages de fonctionnement optimales pour chaque type de turbine. On peut observer que :

- La **turbine Pelton** est adaptée aux hautes chutes et aux débits relativement faibles.
- La **turbine Turgo** couvre une plage intermédiaire de chutes et de débits, se chevauchant un peu avec la Pelton et la Francis.
- La **turbine Banki-Mitchell** semble être conçue pour des chutes et des débits plus faibles.
- La **turbine Francis** est efficace pour des chutes moyennes à basses et des débits plus importants.
- La **turbine Francis en chambre d'eau** est présentée pour des débits encore plus élevés et des chutes basses.

Les lignes diagonales en arrière-plan indiquent la puissance approximative en kilowatts (kW) qui peut être générée pour différentes combinaisons de hauteur de chute et de débit. Les zones marquées "à la demande" (en pointillés) suggèrent des applications spécifiques ou des besoins particuliers.

### I.6. Performances et rendement :

La figure I.8 illustre le rendement d'une turbine hydraulique en fonction de deux paramètres : la hauteur de chute (H) exprimée en mètres de colonne d'eau équivalente (M.C.E) et la puissance (P) en mégawatts (M.W).



**Figure. I.8.** Carte de performance des turbines Pelton en fonction de la chute disponible et de la puissance demandée [12].

L'axe vertical représente le rendement (Rendement), allant de 0.5 à 0.9. Les couleurs sur la surface représentent également le niveau de rendement, avec des couleurs plus chaudes (jaune, orange) indiquant un rendement plus élevé et des couleurs plus froides (bleu) indiquant un rendement plus faible.

Ce graphique nous permet de visualiser comment le rendement de la turbine varie en fonction des conditions de fonctionnement (hauteur de chute et puissance produite). On peut observer que :

- Il existe une zone où le rendement est maximal (couleurs jaune et orange), ce qui représente les conditions de fonctionnement optimales pour cette turbine.
- Lorsque la hauteur de chute ou la puissance s'éloignent de ces conditions optimales, le rendement tend à diminuer (couleurs vertes et bleues).
- La forme de la surface nous donne une idée de la sensibilité du rendement aux variations de la hauteur de chute et de la puissance.

### I.6.1. Rendement hydraulique :

Le rendement d'une turbine Pelton est généralement élevé, atteignant 85 à 95 % dans des conditions optimales. Ce rendement dépend :

- De la conception de la roue et des augets.
- De la qualité de l'usinage des buses.
- Des pertes par friction et turbulence.

### I.7. Régulation de la turbine :

Ces trois mécanismes de régulation sont spécifiques et essentiels au fonctionnement stable et efficace des turbines Pelton :

- **Régulation par vanne d'admission** : ajuste le débit d'eau.
- **Défecteur de jet** : permet d'arrêter le jet progressivement sans chocs hydrauliques.
- **Variation du nombre de jets** : permet d'adapter la puissance en fonction de la demande.

### I.8. Adaptabilité et applications de la turbine Pelton :

La turbine Pelton est un type de turbine hydroélectrique idéal pour les hautes chutes (plus de 300 m) et les faibles débits, typiquement rencontrés dans les centrales de montagne. Son fonctionnement repose sur l'énergie cinétique d'un ou plusieurs jets d'eau à haute vitesse qui frappent les augets de la roue. Elle peut générer des puissances allant de quelques kilowatts à plusieurs centaines de mégawatts, tout en maintenant une grande efficacité. C'est une technologie clé pour la production d'énergie renouvelable dans ces environnements spécifiques.

### I.9. Applications industrielles :

Les turbines Pelton sont largement utilisées dans diverses applications industrielles en raison de leur efficacité dans les installations à haute chute et faible débit. Voici quelques-unes de leurs principales applications industrielles :

**I.9.1. Centrales hydroélectriques en haute chute :**

La turbine Pelton est principalement utilisée dans les centrales hydroélectriques exploitant des chutes d'eau supérieures à 300 m, où le débit d'eau est relativement faible mais la pression est élevée. Elle est souvent utilisée dans les régions montagneuses (Alpes, Andes, Himalaya) où l'eau de fonte des glaciers peut être exploitée. Exemple : Les centrales hydroélectriques des Alpes suisses utilisent des turbines Pelton pour transformer l'eau des barrages en électricité.

**I.9.2. Production d'énergie pour l'autoconsommation industrielle :**

Certaines industries nécessitant une consommation d'énergie élevée (usines métallurgiques, papeteries) installent des centrales hydroélectriques privées équipées de turbines Pelton pour réduire leur dépendance au réseau électrique. Exemple : Des usines minières en Amérique du Sud utilisent des turbines Pelton pour exploiter l'énergie des rivières de haute montagne et alimenter leurs équipements.

**I.9.3. Utilisation dans les stations de pompage et d'irrigation :**

Dans certaines régions agricoles, les turbines Pelton sont utilisées pour pomper l'eau à partir de rivières situées en altitude et irriguer des cultures situées en contrebas. Elles sont aussi employées pour alimenter les réseaux d'eau potable en énergie, notamment en exploitant des barrages situés en haute altitude. Exemple : Les systèmes d'irrigation au Maroc utilisent des turbines Pelton pour transférer l'eau depuis des zones montagneuses vers des plaines agricoles.

**I.9.4. Installations industrielles dans des zones isolées :**

Dans les zones éloignées des réseaux électriques, comme certaines îles ou villages de montagne, les turbines Pelton offrent une source d'énergie durable. Elles permettent d'alimenter des usines locales, des hôpitaux et des infrastructures essentielles. Exemple : En Himalaya, certaines communautés utilisent des turbines Pelton pour produire leur propre électricité.

**I.10. Avantages de la turbine Pelton :**

La turbine Pelton est particulièrement adaptée aux hautes chutes (à partir de 200 mètres) et faibles débits. Voici ses principaux avantages :

- a) **Haut rendement énergétique :** La turbine Pelton est très efficace pour convertir l'énergie de l'eau en énergie mécanique, atteignant un rendement supérieur à 90 % dans des conditions optimales.

- b) Adaptée aux hautes chutes :** Elle fonctionne idéalement pour des hauteurs de chute supérieures à 300 m, ce qui la rend parfaite pour les installations en montagne.
- c) Fonctionnement modulable :** La turbine peut fonctionner avec plusieurs injecteurs, ce qui permet d'adapter sa puissance en fonction du débit disponible. Cela la rend très flexible dans les centrales hydroélectriques.
- d) Faible usure et durabilité élevée :** Grâce à sa conception robuste et à l'absence de contact direct entre l'eau et les pièces mobiles, l'usure est réduite, ce qui permet une longue durée de vie (plusieurs décennies) avec un entretien minimal.
- e) Respect de l'environnement :** Elle utilise une énergie renouvelable et ne produit ni gaz à effet de serre ni polluants. Son impact environnemental est faible par rapport aux énergies fossiles.
- f) Possibilité d'installation en zones isolées :** Les turbines Pelton permettent d'électrifier des zones éloignées, notamment en montagne ou dans des régions non raccordées aux réseaux électriques nationaux.

#### **I.11. Inconvénients de la turbine Pelton :**

La turbine Pelton soit très efficace dans certaines conditions, elle présente quelques limitations et inconvénients par rapport à d'autres types de turbines hydrauliques (Francis, Kaplan). Voici les principaux :

- a) Nécessite une hauteur de chute importante :** Elle ne peut pas être utilisée dans les rivières à faible dénivelé ou avec un débit élevé mais une faible chute d'eau.
- b) Coût d'installation élevé :** Les infrastructures nécessaires (barrages, canaux, conduites forcées) demandent des investissements importants, rendant cette technologie coûteuse en phase de construction.
- c) Besoin de maintenance spécialisée :** Même si son entretien est limité, la réparation et le remplacement des pièces (injecteurs, augets) nécessitent une expertise technique et peuvent être coûteux.
- d) Dépendance aux conditions climatiques :** En période de sécheresse, la production d'électricité peut être réduite, car elle dépend du débit des cours d'eau.

## **I.12. Conclusion**

La turbine Pelton, inventée en 1879, demeure une solution incontournable pour exploiter l'énergie hydroélectrique des hautes chutes (dénivelé  $> 300$  m). Ce chapitre a permis d'en analyser le principe de fonctionnement, les composants clés, et les performances, mettant en lumière ses atouts majeurs ainsi que ses limites.

Les connaissances théoriques acquises dans ce chapitre serviront de base pour les travaux pratiques menés dans le deuxième Chapitre, où nous aborderons la mise en œuvre expérimentale, l'étalonnage des capteurs et le développement d'une interface d'affichage. Ces étapes essentielles pour valider les principes théoriques et optimiser les performances de la turbine Pelton dans un banc d'essai.

# **C**hapitre II

## **Démarrage de la turbine Pelton et acquisition des données**

**II.1. Introduction :**

Le projet de conception et de réalisation d'un banc d'essai pour une Turbine Pelton a été initié lors de l'année universitaire 2019/2020, puis a fait l'objet d'un développement continu durant la saison universitaire 2021/2022. Cependant, les efforts déployés n'ont pas pleinement abouti aux résultats escomptés, notamment en ce qui concerne la visualisation des données sur une interface MATLAB et la précision des mesures.

Dans la continuité de ces travaux et afin de finaliser ce projet crucial, ce chapitre se consacrera à une révision approfondie du câblage électrique, d'effectuer le changement de l'afficheur LCD, l'étalonnage précis des capteurs, ainsi qu'à la conception d'une interface MATLAB robuste. Cette dernière aura pour objectif afficher les résultats en temps réel et d'effectuer les calculs nécessaires avec une précision optimale, permettant ainsi une exploitation complète et fiable du banc d'essai.

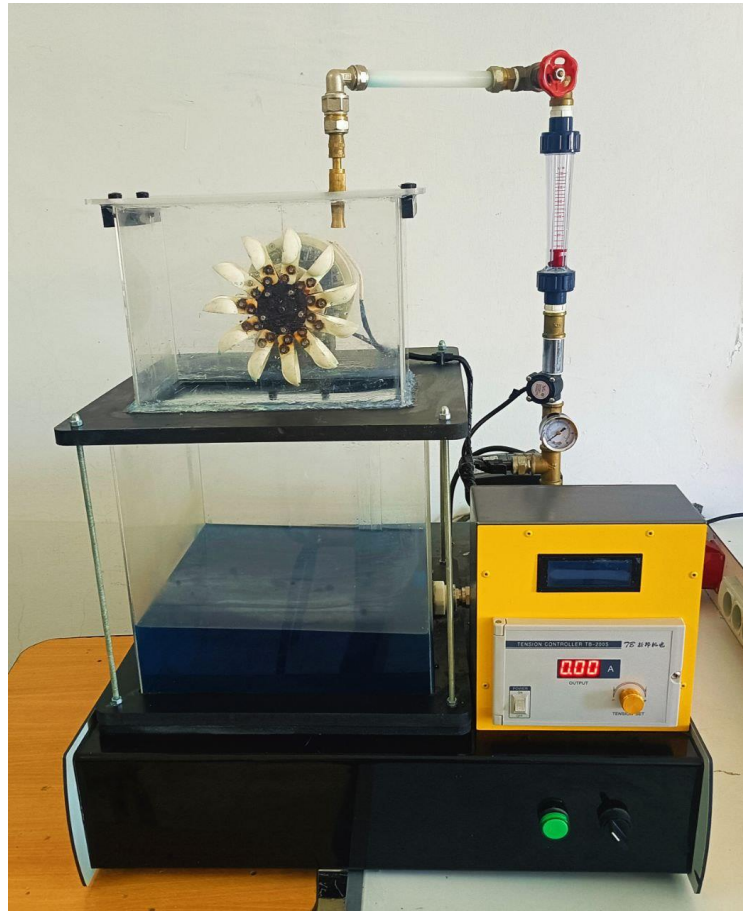
**II.2. Mise en marche d'une turbine Pelton :**

La mise en service de la turbine Pelton a été réalisée selon une procédure rigoureuse comprenant plusieurs étapes.

Tout d'abord, des vérifications électriques approfondies ont été effectuées, incluant des tests d'isolement, de continuité et des inspections visuelles. Un re-câblage complet a ensuite été réalisé avec des câbles haute qualité et un nouveau schéma de branchement optimisé. L'étalonnage précis des capteurs de pression et de débit a permis de corriger les mesures.

Le démarrage du système a été supervisé via l'interface MATLAB et l'afficheur LCD, permettant d'affichage des paramètres en temps réel. Cette approche mène à une amélioration significative de la précision des mesures.

La figure II.1 Présente un banc d'essai d'une turbine Pelton, utilisé dans les laboratoires pour simuler la production d'électricité à petite échelle à partir de l'énergie hydraulique.



**Figure. II.1.** Banc d'essai d'une turbine Pelton.

L'eau est stockée dans un réservoir situé en bas, puis pompée vers le haut à l'aide d'une pompe intégrée dans l'unité noire. L'eau circule à travers une conduite transparente, passe par une vanne de régulation (rouge) et un débitmètre vertical (tube avec un flotteur rouge) plus un capteur de débit qui permet de mesurer le débit en temps réel. La pression est contrôlée par un manomètre situé juste en dessous est suivie en temps réel grâce à un capteur de pression. Ensuite, l'eau est injectée sur la roue Pelton (visible dans la cuve transparente du haut), provoquant sa rotation. Un capteur de vitesse installé sur l'axe de la roue mesure la vitesse de rotation. Ces données (pression, débit, vitesse) sont lues et traitées par une carte Arduino, Intégrer dans l'unité jaune, et peuvent être affichées et transmises à un PC pour analyse via une interface MATLAB. Ce système permet d'étudier et visualiser le comportement dynamique de la turbine et d'évaluer son rendement en temps réel pour mieux comprendre le fonctionnement d'une turbine hydraulique.

### II.3. Acquisition des données :

#### II.3.1. Procédure de Re-câblage :

##### II.3.1.1. Démontage de l'Ancienne Installation :

Pour la mise en marche d'une turbine on a procédé par des étapes suivantes :

1. Repérage des connexions avant démontage.
2. Vérification de l'état des chemins de câbles et des conduits.

##### II.3.1.2. Installation des Nouveaux Câbles :

Pour l'installation des nouveaux câbles, nous avons suivis les étapes suivantes :

- Utilisation des câbles de haute qualité.
- Utilisation des câbles de différentes longueurs selon les besoins pour éviter les raccords.
- Utilisation des câbles de différentes couleurs.

#### II.3.2. Nouveau Schéma de Branchement :

La figure II.2 Présente un schéma de câblage, réalisé dans l'application Fritzing, représente un système basé sur un Arduino UNO connecté à plusieurs capteurs et un afficheur :

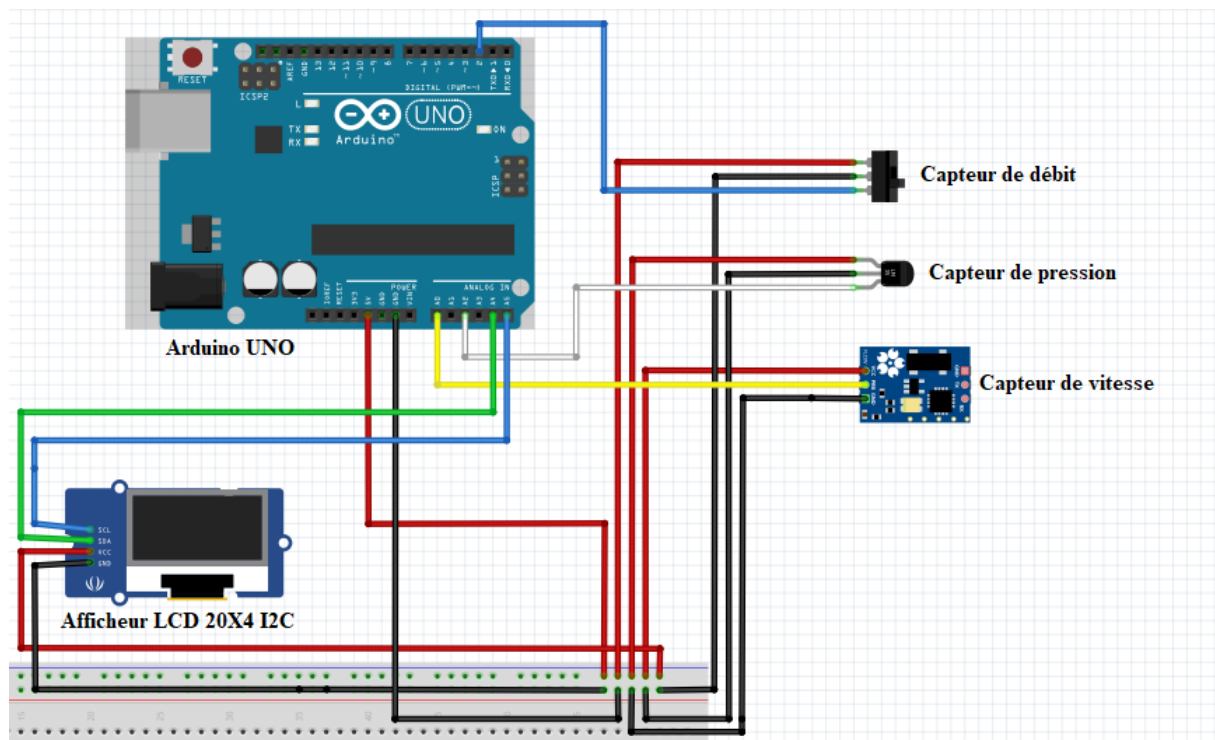


Figure. II.2. Schéma électrique du banc d'essai.

Au cœur du système se trouve l'Arduino UNO, chargé de collecter les données des capteurs et de contrôler l'affichage. L'Afficheur LCD 20x4 I2C est utilisé pour visualiser les informations, nécessitant seulement quatre fils pour la connexion (VCC, GND, SDA, SCL), reliés respectivement aux broches 5V, GND, A4 (SDA) et A5 (SCL) de l'Arduino.

Trois capteurs sont intégrés au système : un Capteur de débit, un Capteur de pression et un Capteur de vitesse. Tous ces capteurs sont alimentés par 5V de l'Arduino et connectés à la masse (GND) de l'Arduino, avec ces connexions facilitées par une platine d'expérimentation (breadboard) qui sert de point de distribution pour l'alimentation et la masse. Le capteur de débit est connecté à la broche numérique 2 de l'Arduino, souvent utilisée pour les interruptions externes afin de compter les impulsions avec précision. Le capteur de pression, qui fournit généralement une sortie analogique, est relié à la broche analogique A0 de l'Arduino. Enfin, le capteur de vitesse, dont la sortie numérique, pour la détection de rotation, est connecté à la broche numérique 3.

En résumé, cette configuration décrit par l'Arduino UNO collecte des données en temps réel sur le débit, la pression et la vitesse à partir des capteurs respectifs. Les valeurs mesurées sont ensuite traitées par l'Arduino, puis affichées de manière claire sur l'écran LCD. La platine d'expérimentation simplifie grandement les connexions d'alimentation et de masse pour les multiples composants.

### II.3.3. Affichage des données sur l'écran LCD :

L'afficheur LCD (Liquide Crystal Display) 20x4 avec interface I2C est un module d'affichage texte compact et polyvalent, idéal pour les systèmes embarqués et les projets de microcontrôleurs. Le terme "20x4" indique qu'il peut afficher 20 caractères par ligne sur 4 lignes, offrant ainsi une capacité d'affichage substantielle pour des messages, des valeurs de capteurs, des menus, ou des statuts de système.



Figure. II.3. Écran LCD.

Dans ce banc d'essai, nous avons intégré un afficheur LCD afin de permettre la surveillance en temps réel de trois paramètres essentiels et interdépendants : la pression, la vitesse et le débit. Ces valeurs sont fondamentales, car elles constituent la base à partir de laquelle il est possible de calculer et de déduire l'ensemble des autres grandeurs et résultats pertinents. L'intégration de cet afficheur LCD offre un avantage significatif, il permet à l'expérimentateur de consulter directement ces valeurs critiques, et ce même en l'absence d'un ordinateur ou de l'interface MATLAB.

#### II.4. Création interface Matlab :

L'interface graphique présentée est développée sous MATLAB et offre une visualisation en temps réel des données et des performances d'une turbine Pelton. Elle se compose de plusieurs sections interactives, permettant à l'utilisateur de suivre et d'analyser les différents paramètres du système hydraulique.

Elle intègre l'acquisition de données via Arduino Uno, l'affichage des mesures brutes (pression, débit, vitesse, courant) et le calcul de grandeurs dérivées importantes telles que le couple, les différentes puissances et le rendement. La présence d'un variateur de courant pour le frein magnétique suggère la possibilité d'étudier le comportement de la turbine sous différentes charges.

L'interface graphique présentée sur la figure II.4 :

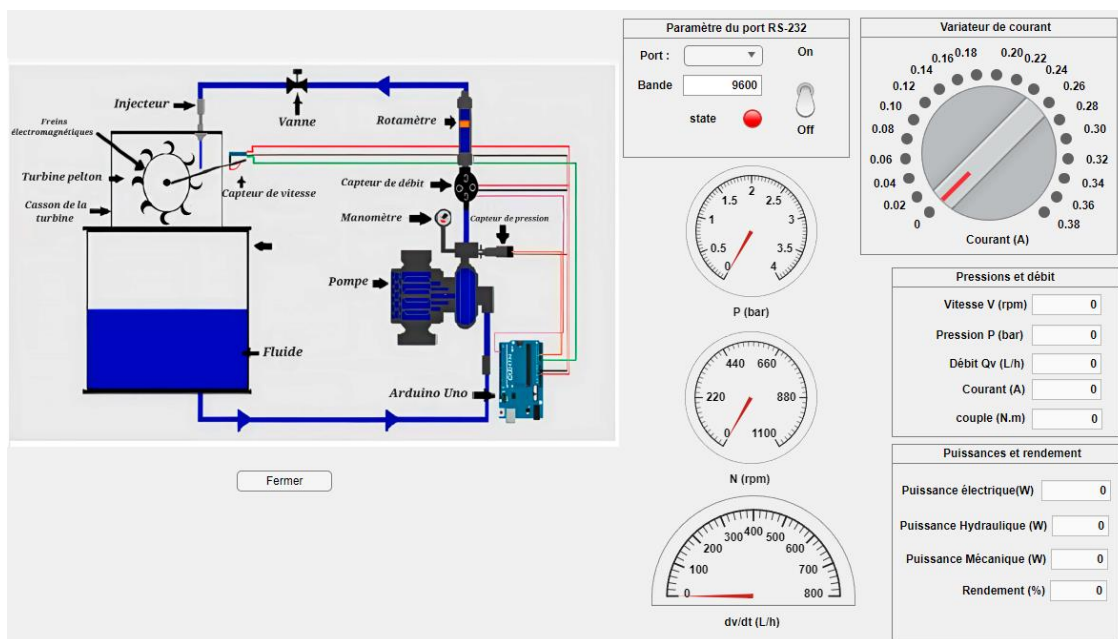


Figure II.4 Interface Matlab développée pour l'affichage des données du banc d'essai.

## Schéma Hydraulique :

La partie supérieure gauche de l'interface affiche un schéma simplifié du système hydraulique associé à la turbine Pelton. On y distingue les éléments suivants :

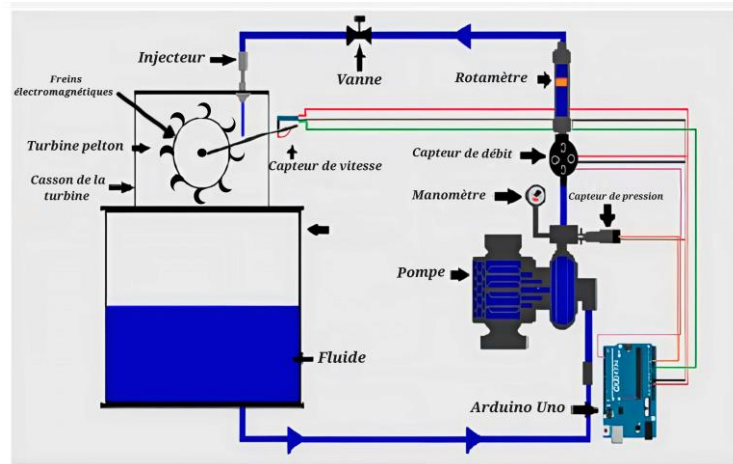
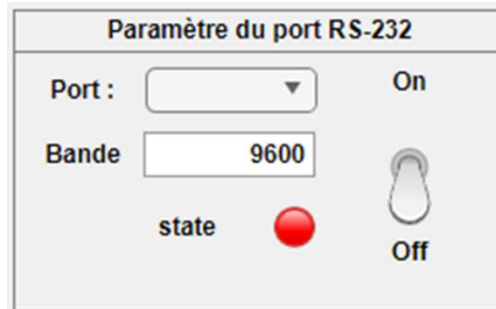


Figure. II.5. Schéma du banc d'essai.

- **Turbine Pelton** : Représentée schématiquement avec son injecteur et son auget. Un capteur de vitesse est positionné pour mesurer la vitesse de rotation de la turbine. Des freins électromagnétiques sont également intégrés, suggérant la possibilité de contrôler la charge appliquée à la turbine.
- **Source de Fluide et Pompe** : Un réservoir contenant le fluide est visible, alimentant une pompe. Cette dernière assure la circulation du fluide à travers le système.
- **Conduites et Vannes** : Les conduites reliant les différents composants sont clairement indiquées, ainsi qu'une vanne permettant de réguler le débit.
- **Instrumentation** : Différents capteurs sont intégrés au système et leurs mesures sont affichées sur l'interface :
  - **Rotamètre et Capteur de Débit** : Pour la mesure du débit du fluide.
  - **Manomètre et Capteur de Pression** : Pour la mesure de la pression du fluide.
  - **Capteur de Vitesse** : Déjà mentionné, pour la vitesse de rotation de la turbine.
- **Arduino Uno** : La présence d'une carte Arduino Uno suggère l'acquisition et le traitement des signaux des capteurs avant leur affichage dans l'interface MATLAB.

**Paramètres du Port RS-232 :**

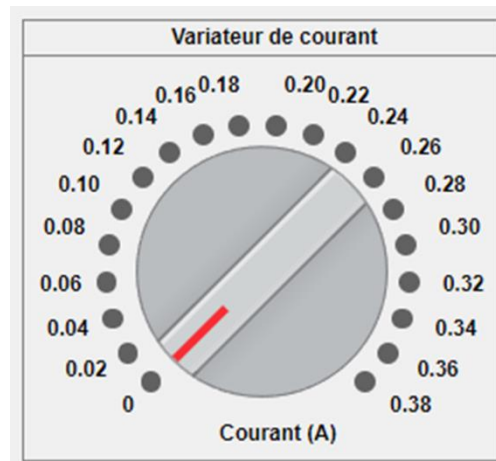
En haut à droite, une section dédiée aux paramètres de communication via le port RS 232- est présente. L'utilisateur peut sélectionner le port de communication et visualiser l'état de la connexion (On/Off). Le débit de transmission (Bande) est également configurable.



**Figure. II.6.** Paramètres du Port RS-232.

**Variateur de Courant :**

Un indicateur circulaire gradué de 0 à 0.38 A, avec un curseur, permet de visualiser et potentiellement de contrôler le courant appliqué aux freins électromagnétiques. La valeur actuelle du courant est affichée numériquement.



**Figure. II.7.** Variateur de courant.

**Affichage des Données en Temps Réel :**

Plusieurs cadrans analogiques et numériques affichent les données mesurées et calculées en temps réel :

Pressions et débit	
Vitesse V (rpm)	0
Pression P (bar)	0
Débit Qv (L/h)	0
Courant (A)	0
couple (N.m)	0

**Figure. II.8.** Données mesurées et calculés.

- **Pression P (bar) :** Un cadran analogique indique la pression du fluide, avec une échelle allant de 0 à 4 bar. Une lecture numérique précise est également fournie.
- **Vitesse N (rpm) :** Un cadran analogique affiche la vitesse de rotation de la turbine en tours par minute (rpm), avec une échelle allant de 0 à 1100 rpm. La valeur numérique correspondante est affichée.
- **Débit Qv (L/H) :** Un cadran analogique indique le débit volumétrique du fluide en litres par heure (L/h), avec une échelle allant de 0 à 800 L/h. La valeur numérique est également présente.
- **Courant (A) :** Affiche numériquement la valeur du courant, correspondant probablement au réglage du variateur de courant.
- **Couple (N.m) :** Affiche numériquement le couple développé par la turbine.

**Puissances et Rendement :**

Une section distincte présente les puissances et le rendement calculés :

Puissances et rendement	
Puissance électrique(W)	<input type="text" value="0"/>
Puissance Hydraulique (W)	<input type="text" value="0"/>
Puissance Mécanique (W)	<input type="text" value="0"/>
Rendement (%)	<input type="text" value="0"/>

**Figure. II.9.** Puissances et rendement calculés.

- **Puissance Électrique (W) :** La puissance électrique consommée par le système ou générée (selon le contexte).
- **Puissance Hydraulique (W) :** La puissance fournie par le fluide à la turbine.
- **Puissance Mécanique (W) :** La puissance mécanique développée par l'arbre de la turbine.
- **Rendement (%) :** Le rendement de la turbine, calculé à partir des puissances hydraulique et mécanique.

### II.5. Extraction la relation entre courant et couple dans le frein électromagnétique :

La relation entre courant et couple est fondamentale pour cette étude. Elle constitue le point de départ essentiel de tous les calculs de couple, de puissance mécanique, de rendement et d'autres paramètres importants, permettant ainsi d'optimiser leurs performances.

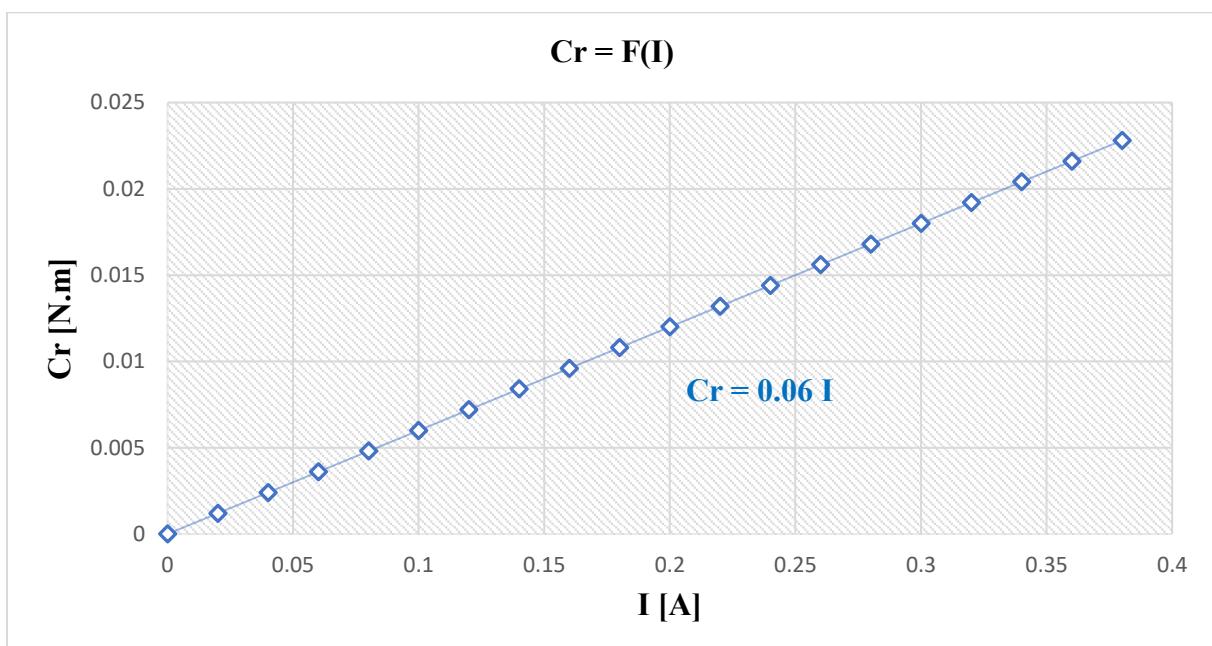
**Le tableau II.1** Présente des données expérimentales montrant la relation entre le courant (I) appliqué à un frein électromagnétique et le couple résistant (Cr).

<b>I (A)</b>	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.12	0.14	0.16	0.18
<b>Cr (N.m)</b>	0	0.0012	0.0024	0.0036	0.0048	0.006	0.0072	0.0084	0.0096	0.0108
<b>I (A)</b>	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38
<b>Cr (N.m)</b>	0.012	0.0132	0.0144	0.0156	0.0168	0.018	0.0192	0.0204	0.0216	0.0228

**Tableaux. II.1.** Variation Couple en fonction du courant.

Après la mesure et l'enregistrement des résultats expérimentaux dans le tableau.II.1.ces données ont été exploitées via Excel pour produire la figure.II.10.

**La figure II.10** Représente la relation entre le courant électrique et le couple mécanique dans la turbine Pelton.



**Figure. II.10.** Courbe caractéristique du couple en fonction du courant.

Cela signifie que lorsque le courant augmente, le couple résistant augmente proportionnellement, traduisant ainsi une relation directe entre le courant et le couple. Le fonctionnement du frein électromagnétique repose sur la génération d'un champ magnétique par le courant électrique. Ce champ agit en opposition au mouvement de rotation, produisant un couple résistant.

Cette relation est modélisée par l'équation  $C_r = 0,06.I$ , qui a été intégrée dans le code MATLAB afin de calculer automatiquement le couple résistant à partir de la variation du courant.

### **II.6. Réalisation l'étalonnage des capteurs :**

L'étalonnage consiste à comparer les sorties d'un capteur avec des valeurs connues (mesurées par un instrument de référence ou un étalon) afin de :

- Détecter les écarts.
- Établir une relation mathématique (équation de correction) entre la mesure brute et la valeur réelle.

Dans notre cas pratique, cet étalonnage concerne un capteur de pression et un capteur du débit.

### II.6.1. Etalonnage de capteur de pression :

Afin de tenir compte des différences de mesure entre le capteur de pression P et le manomètre enregistré lors des tests, une série de mesures a été effectuée pour déterminer la moyenne de ces capteurs à partir des valeurs maximales et minimales du programme Arduino et des valeurs du manomètre.

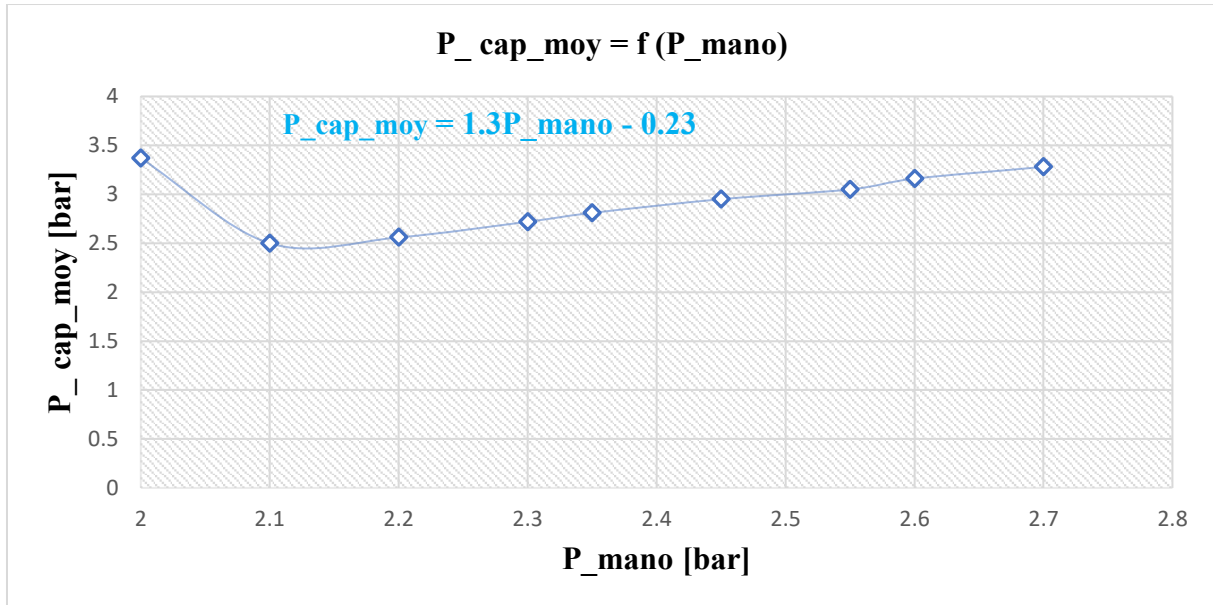
Les résultats de ces mesures sont présentés dans le tableau II.2:

P_cap_min [bar]	P_cap_max [bar]	P_cap_moy [bar]	P_mano [bar]
3.16	3.4	3.28	2.7
3.05	3.27	3.16	2.6
3	3.11	3.055	2.55
2.9	3	2.95	2.45
2.78	2.84	2.81	2.35
2.7	2.75	2.725	2.3
2.53	2.6	2.565	2.2
2.46	2.54	2.5	2.1
2.35	2.4	2.375	2

**Tableaux. II.2.** Mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du capteur de pression.

Après la mesure et l'enregistrement des résultats expérimentaux dans le tableau.II.2.ces données ont été exploitées via Excel pour produire la figure.II.11.

**La figure II.11** Représente la courbe d'étalonnage du capteur de pression, illustrant la relation entre les mesures du pression réel ( $P_{\text{mano}}$ ) et les valeurs lues par le capteur ( $P_{\text{cap\_moy}}$ ) :



**Figure. II.11.** Courbe d'étalonnage du capteur pression P.

Grâce à l'équation issue de la courbe tracée sur Excel, on a pu établir la relation entre le capteur de pression et le manomètre comme suit :

$$(P): P_{\text{cap\_moy}} = 1.3 P_{\text{mano}} - 0.23 \quad (01)$$

Cette équation est insérée dans le programme Arduino pour assure l'étalonnage de ce capteur.

### II.6.2. Etalonnage de capteur de débit :

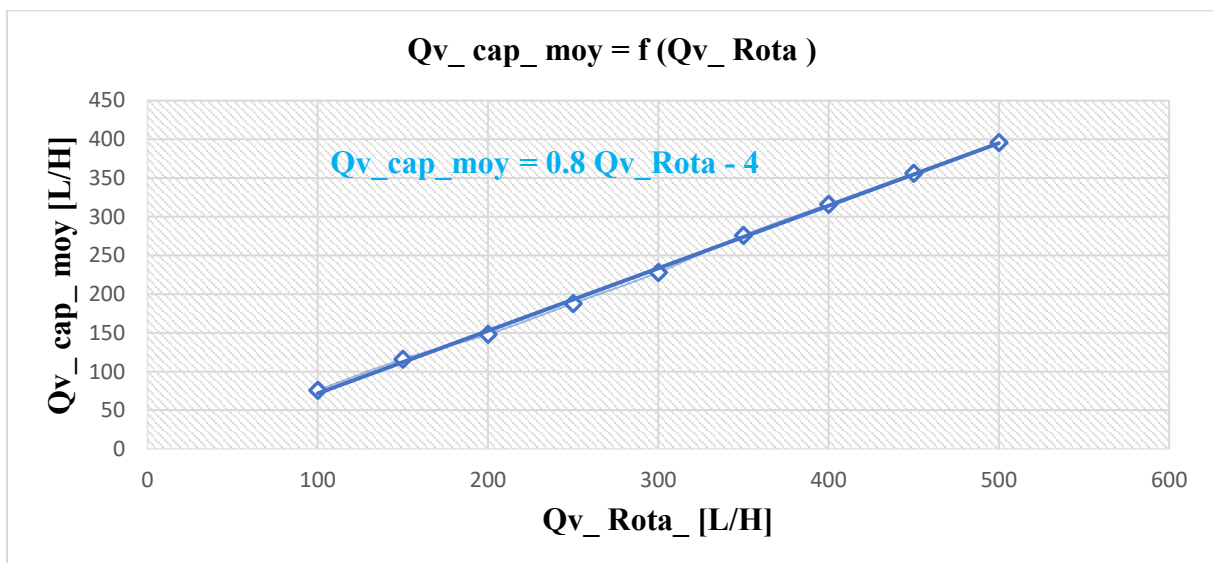
Dans cette partie, nous allons calibrer le capteur de débit  $Q_v$  par rapport au rotamètre de la même manière que précédemment, et les résultats des tests et des calculs sont présentés dans le tableau II.3 :

$Q_v\_cap\_min$ [L/H]	$Q_v\_cap\_max$ [L/H]	$Q_v\_cap\_moy$ [L/H]	$Q_v\_Rota$ [L/H]
72	80	76	100
112	120	116	150
144	152	148	200
184	192	188	250
224	232	228	300
272	280	276	350
312	320	316	400
352	360	356	450
392	400	396	500

**Tableaux. II.3.** Mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du capteur de débit.

Après la mesure et l'enregistrement des résultats expérimentaux dans le tableau II.3 ces données ont été exploitées via Excel pour produire la figure II.12.

**La figure II.12** Représente la courbe d'étalonnage du capteur de débit, illustrant la relation entre les mesures du débit réel ( $Q_v\_Rota$ ) et les valeurs lues par le capteur ( $Q_v\_cap\_moy$ ) :



**Figure. II.12.** Courbe d'étalonnage du capteur de débit.

Grâce à l'équation issue de la courbe tracée sur Excel, on a pu établir la relation entre le capteur de débit et le rotamètre comme suit :

$$(Qv): Q_{v_{\text{cap}_{\text{moy}}}} = 1.3 Q_{v_{\text{Rota}}} - 0.23 \quad (02)$$

Cette équation est insérée dans le programme Arduino pour assure l'étalonnage de ce capteur.

## II.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré sur la mise en service pour assurer le bon fonctionnement du banc d'essai de la turbine Pelton. Les principales réalisations incluent :

- Révision et optimisation du câblage électrique.
- Intégration de l'afficheur LCD.
- Étalonnage précis des capteurs.
- Etablir l'équation entre le courant et le couple.
- Conception d'une interface MATLAB robuste.

Ces améliorations ont permis de surmonter les limitations rencontrées lors des travaux précédents, assurant désormais une acquisition fiable des données et un contrôle précis de la turbine Pelton. Les résultats obtenus constituent une base solide pour les analyses approfondies présentées dans le troisième chapitre, où les performances de la turbine seront évaluées sous différentes conditions de fonctionnement.

# **C**hapitre III

## **Acquisition et supervision en temps réel des paramètres de la turbine Pelton**

**III.1. Introduction :**

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus lors des essais menés sur la turbine Pelton développée. L'objectif principal est de caractériser ses performances mécaniques et énergétiques sous différentes conditions de fonctionnement, notamment en variant le débit volumique ( $Q_v$ ) et la pression ( $P$ ). Les tableaux et courbes générés permettent d'analyser les relations clés entre : La vitesse de rotation, le couple résistant, Le rendement et la puissance mécanique.

Ces données expérimentales fournissent une base solide pour optimiser le dimensionnement et l'exploitation de la turbine Pelton, tout en mettant en lumière les contraintes mécaniques et hydrauliques associées à son utilisation.

**III.2. Caractéristique de la turbine Pelton :**

Nous avons réalisé une série de mesures expérimentales à l'aide d'un banc d'essai développée pour caractériser le comportement mécanique de la turbine Pelton. Ces essais ont permis de tracer les courbes de performance hydraulique de la turbine Pelton.

### III.2.1. Vitesse en fonction de couple sous différents débits :

La mesure de la vitesse est importante pour la turbine Pelton car elle permet de calculer la puissance mécanique produite. Sans cette donnée essentielle, il est impossible d'évaluer la performance de la turbine, d'optimiser son rendement ou de détecter d'éventuels problèmes. En bref, une mesure précise de la vitesse garantit une production d'énergie efficace et une gestion optimale de la turbine.

**Le tableau III.1** illustre clairement l'effet du freinage électromagnétique sur la vitesse de la turbine sous différents débits.

I (A)	Cr (N.m)	Q <sub>v</sub> =500 (L/H)	Q <sub>v</sub> =400 (L/H)	Q <sub>v</sub> =320 (L/H)
		P = 2 (bar)	P = 2.15 (bar)	P = 2.30 (bar)
		N (rpm)	N (rpm)	N (rpm)
0	0	1020	720	300
0.02	0.0012	1020	720	300
0.04	0.0024	1020	720	300
0.06	0.0036	1020	720	240
0.08	0.0048	1020	720	240
0.10	0.0060	960	660	240
0.12	0.0072	960	660	240
0.14	0.0084	960	660	180
0.16	0.0096	960	600	180
0.18	0.0108	900	600	180
0.20	0.0120	900	540	120
0.22	0.0132	840	480	120
0.24	0.0144	720	420	0
0.26	0.0156	660	420	0
0.28	0.0168	600	360	0
0.30	0.0180	540	240	0
0.32	0.0192	480	120	0
0.34	0.0204	360	0	0
0.36	0.0216	180	0	0
0.38	0.0228	0	0	0

**Tableau. III.1.** Résultat de mesure de la vitesse.

Après la mesure et l'enregistrement des résultats expérimentaux dans le tableau.III.1.ces données ont été exploitées via Excel pour produire la figure.III.1.

La figure III.1 Représente trois courbes correspond à un débit différent ( $Q_v$  320, 400, 500 L/H).

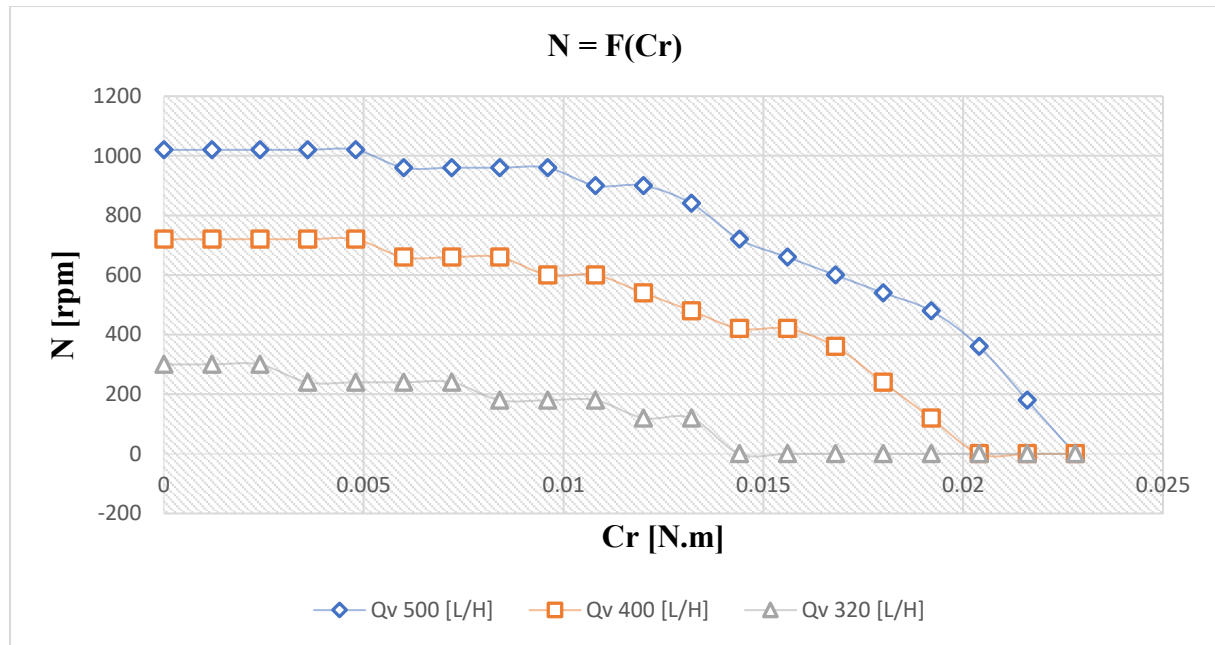


Figure. III.1. Caractéristique mécanique  $N = f(Cr)$  d'une turbine Pelton sous variations de débit ( $Q_v$ ).

Lorsque le couple résistant augmente, la vitesse de rotation diminue progressivement. À haut débit [500 L/H], la turbine atteint une vitesse initiale élevée plus de 1000 [rpm]. À débit moyen [400 L/H], la vitesse initiale est plus basse (environ 750 rpm) et diminue plus rapidement avec le couple. À faible débit [320 L/H], la vitesse démarre autour de 300 [rpm] et chute très rapidement pour un petit couple appliqué.

### III.2.2. Puissance mécanique en fonction de couple sous différents débits :

L'objectif de calcul la puissance mécanique est d'analyser l'influence du couple et des conditions hydrauliques (débit et pression) sur les performances mécaniques de la turbine. Pour cela, des mesures ont été réalisées pour trois configurations d'écoulement différentes, correspondant à trois pressions différentes. Les résultats expérimentaux sont regroupés dans le tableau III.2.

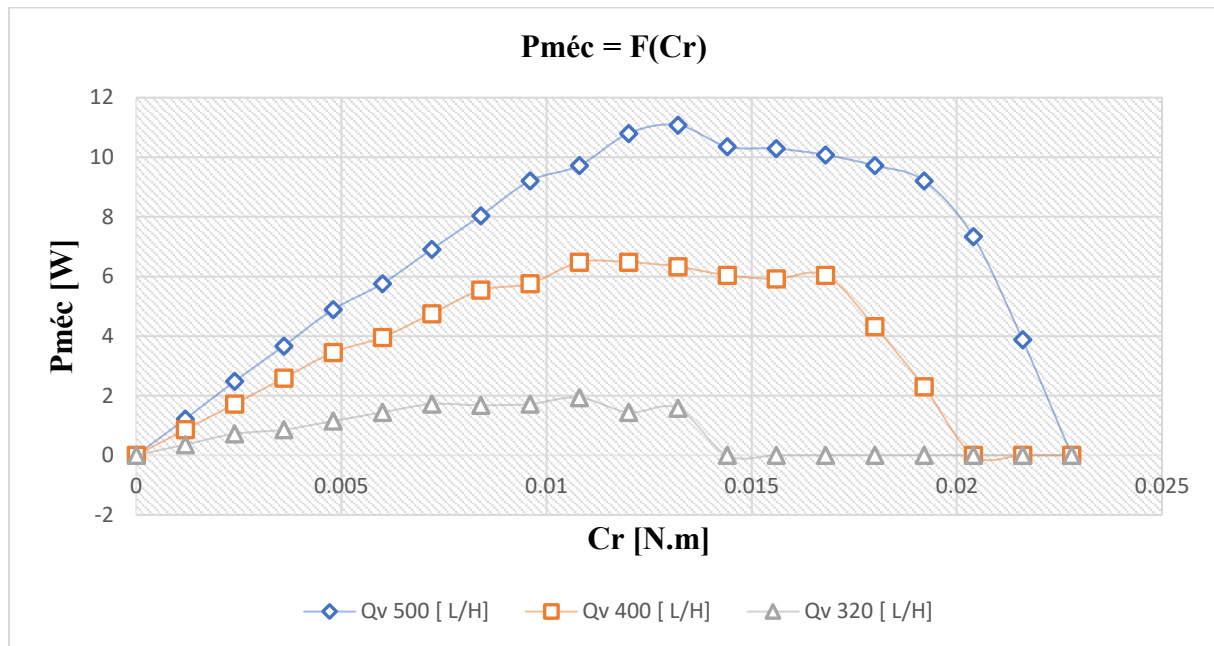
Le **tableau III.2** Présente l'évolution de la puissance mécanique ( $P_{méc}$  en watts) produite par la turbine Pelton en fonction du couple résistant  $Cr$  (N.m) appliqué par le frein électromagnétique, sous différents débits et pressions différents.

I (A)	Cr (N.m)	$Q_v = 500$ (L/H)	$Q_v = 400$ (L/H)	$Q_v = 320$ (L/H)
		P = 2 (bar)	P = 2.15 (bar)	P = 2.30 (bar)
		P mec (W)	P mec (W)	P mec (W)
0	0	0	0	0
0.02	0.0012	1.22	0.86	0.36
0.04	0.0024	2.48	1.72	0.72
0.06	0.0036	3.67	2.59	0.86
0.08	0.0048	4.89	3.45	1.15
0.10	0.0060	5.76	3.96	1.44
0.12	0.0072	6.91	4.75	1.72
0.14	0.0084	8.04	5.54	1.68
0.16	0.0096	9.21	5.76	1.72
0.18	0.0108	9.72	6.48	1.94
0.20	0.0120	10.80	6.48	1.44
0.22	0.0132	11.08	6.33	1.58
0.24	0.0144	10.36	6.04	0
0.26	0.0156	10.29	5.92	0
0.28	0.0168	10.08	6.04	0
0.30	0.0180	9.72	4.32	0
0.32	0.0192	9.21	2.30	0
0.34	0.0204	7.34	0	0
0.36	0.0216	3.88	0	0
0.38	0.0228	0	0	0

**Tableau. III.2.** Résultat de variation de la puissance mécanique.

Après la mesure et l'enregistrement des résultats expérimentaux dans le tableau III.2 ces données ont été exploitées via Excel pour produire la figure III.2.

La **figure III.2** Représente la courbe de puissance mécanique ( $P_{méc}$ ) en fonction du couple résistant ( $Cr$ ) pour la turbine Pelton, testée sous différents débits d'eau ( $Q_v$ ).



**Figure. III.2.** Courbe caractéristique de la puissance mécanique  $P_{méc} = f(Cr)$  d'une turbine Pelton sous différents débits ( $Q_v$ ).

On observe pour chaque débit, une courbe en cloche. Cela signifie que :

La puissance mécanique augmente initialement avec le couple, atteint un maximum, puis diminue lorsque le couple devient trop élevé.

À haut débit [500 L/H], la puissance maximale atteint environ 11 [W], indiquant un fonctionnement optimal à ce débit. À moyen débit [400 L/H], la puissance maximale est plus faible environ [6,5 W]. À faible débit [320 L/H], la puissance reste très faible moins de 2 [W].

### III.2.3. Rendement en fonction de couple sous différents débits :

Le rendement est le rapport entre la puissance mécanique produite et la puissance hydraulique délivrée. Un rendement élevé signifie moins de pertes et une meilleure utilisation des ressources hydrauliques, ce qui est l'objectif de toute conception et de toute exploitation de la turbine.

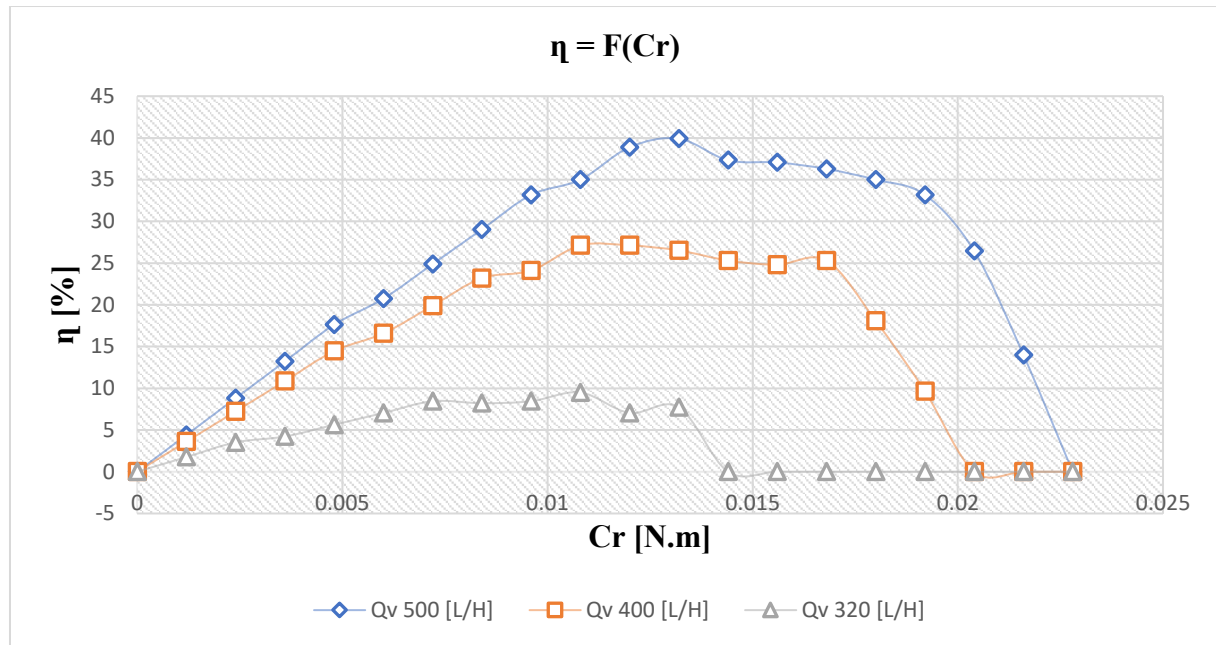
Le **tableau III.3** Présente les résultats de la variation du rendement ( $\eta$ ) en fonction du couple (Cr) pour différents débits et pressions.

I (A)	Cr (N.m)	Q <sub>v</sub> =500 (L/H)	Q <sub>v</sub> =400 (L/H)	Q <sub>v</sub> =320 (L/H)
		P = 2 (bar)	P = 2.15 (bar)	P = 2.30 (bar)
		$\eta$ (%)	$\eta$ (%)	$\eta$ (%)
0	0	0	0	0
0.02	0.0012	4.40	3.61	1.76
0.04	0.0024	8.81	7.23	3.52
0.06	0.0036	13.21	10.85	4.22
0.08	0.0048	17.62	14.46	5.63
0.10	0.0060	20.37	16.57	7.04
0.12	0.0072	24.88	19.89	8.45
0.14	0.0084	29.03	23.20	8.21
0.16	0.0096	33.17	24.11	8.45
0.18	0.0108	34.99	27.12	9.50
0.20	0.0120	38.88	27.12	7.04
0.22	0.0132	39.91	26.52	7.74
0.24	0.0144	37.32	25.31	0
0.26	0.0156	37.06	24.81	0
0.28	0.0168	36.28	25.31	0
0.30	0.0180	34.99	18.08	0
0.32	0.0192	33.17	9.64	0
0.34	0.0204	26.43	0	0
0.36	0.0216	13.99	0	0
0.38	0.0228	0	0	0

**Tableau. III.3.** Résultat de variation du rendement.

Après la mesure et l'enregistrement des résultats expérimentaux dans le tableau III.3 ces données ont été exploitées via Excel pour produire la figure III.3.

**La figure. III.3** Représente trois courbes correspond à un débit différent ( $Q_v$  320, 400, 500 L/H).



**Figure. III.3.** Courbes de rendement  $\eta = f(Cr)$  d'une turbine Pelton sous différents débits ( $Q_v$ ).

Le rendement de la turbine présente une dépendance caractéristique au couple appliqué. Il augmente initialement avec le couple, atteint une valeur maximale, puis diminue fortement lorsque le couple devient excessif.

Le débit joue également un rôle important. Un débit élevé [500 L/H] permet d'atteindre un rendement maximal supérieur à 40%, témoignant d'une bonne conversion de l'énergie hydraulique en énergie mécanique. À [400 L/H], le rendement maximal chute autour de 27%, restant acceptable mais moins performant. À faible débit [320 L/H], le rendement reste très faible inférieur à 10%, indiquant clairement un mauvais fonctionnement dans ces conditions.

### III.3. Conclusion

Dans ce chapitre, les performances de la turbine Pelton dans différentes conditions de fonctionnement sont analysées expérimentalement, en mettant l'accent sur les relations clés entre les paramètres mécaniques et hydrauliques. Les principales conclusions sont :

#### 1. Performances optimales :

- Le rendement maximal (39.91%) est atteint pour un couple intermédiaire (0.01–0.018 N.m) et un débit élevé (500 L/H), confirmant l'efficacité de la turbine dans cette plage de fonctionnement.
- La puissance mécanique suit une courbe caractéristique avec un pic à 10 [W] pour  $Q_v = 500$  [L/H], suivi d'une chute brutale en surcharge  $Cr > 0.022$  [N.m].

#### 2. Influence du débit ( $Q_v$ ) :

- Un débit améliore la puissance mais réduit la stabilité à haute charge.
- Un débit réduit [320 L/H] limite les pertes énergétiques à faible charge mais restreint la plage de fonctionnement utile.

#### 3. Zones de fonctionnement critiques :

- **À privilégier** : Couple de 0.01–0.018 [N.m] pour un rendement et une puissance optimale.
- **À éviter** : Régimes surchargés  $Cr > 0.022$  [N.m], où la vitesse s'effondre et le rendement se dégrade.

Ces résultats guident la sélection des paramètres opérationnels (débit, charge) pour des applications réelles, tout en identifiant des pistes d'amélioration (ex : optimisation des augets, réglage fin des injecteurs). Ils confirment également l'adaptation de la turbine Pelton aux hautes chutes, malgré sa sensibilité aux variations de charge.

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

Cette étude a porté sur l'analyse expérimentale approfondie des performances d'une turbine Pelton, en évaluant l'interaction complexe entre ses paramètres mécaniques et hydrauliques. Les résultats clés et les recommandations sont les suivants :

1. L'amélioration d'un banc d'essai :

Avec l'intégration d'une interface MATLAB pour l'acquisition et l'analyse des données en temps réel, ainsi que l'étalonnage précis des capteurs (pression, débit, vitesse).

2. Optimisation du rendement et de la puissance :

- Le rendement maximal de 39,91% a été spécifiquement atteint lorsque le couple de la turbine se situait dans la plage intermédiaire de 0,01 à 0,018 N.m, combiné à un débit élevé de 500 [L/H]. Cette observation confirme l'efficacité de la turbine dans cette configuration précise.
- La puissance mécanique générée a suivi une courbe caractéristique, atteignant un pic d'environ 10 [W] à un débit de 500 [L/H]. Il est important de noter qu'une augmentation du couple au-delà de 0,022 [N.m] (situation de surcharge) a entraîné une chute abrupte de cette puissance.

3. Impact du débit volumique ( $Q_v$ ) sur les performances :

- L'augmentation du débit a indéniablement amélioré la puissance de sortie, mais elle a également été associée à une réduction de la stabilité de la turbine sous des charges élevées.
- Inversement, la réduction du débit à 320 [L/H] a permis de limiter les pertes énergétiques à faible charge, mais a eu pour conséquence de restreindre la plage de fonctionnement utile de la turbine.

4. Identification des zones de fonctionnement critiques et recommandations :

- Pour garantir un rendement et une puissance optimaux de la turbine Pelton, il est impératif de viser une plage de couple de 0,01 à 0,018 [N.m].

## Conclusion générale

---

- Il est fortement recommandé d'éviter les régimes de surcharge, caractérisés par un couple supérieur à 0,022 [N.m]. Dans ces conditions, une dégradation significative du rendement est observée, accompagnée d'un effondrement de la vitesse de rotation de la turbine.

En fin, les résultats de cette étude expérimentale fournissent des lignes directrices précises pour la sélection et l'ajustement des paramètres opérationnels (débit, charge) de la turbine Pelton pour des applications concrètes. Ils mettent également en évidence des pistes concrètes pour des améliorations futures, telles que l'optimisation de la conception des augets ou le réglage fin des injecteurs. Enfin, cette analyse réaffirme la pertinence et l'adaptabilité de la turbine Pelton pour les applications nécessitant une exploitation de hautes chutes hydrauliques.

# *Bibliographie*

**Bibliographie**

- [01] PELTON, Lester A. *Improvement in water-wheels. United States patent US 233,692. 1879.*
- [02] DAUGHERTY, Robert L., FRANZINI, Joseph B. and FINNEMORE, E. John. *Fluid Mechanics with Engineering Applications. 8th ed. New York : McGraw-Hill, 1989.*
- [03] ONDEL, Olivier. *Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur-machine asynchrone. Thèse de doctorat. Lyon : École doctorale Électronique, Électrotechnique, Automatique, 2006. P 210.*
- [04] [https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Turbine-Pelton-page-2.html#ref\\_3.](https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Turbine-Pelton-page-2.html#ref_3)
- [05] BOUZIDA, A. *Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes. Thèse de Magister. Alger : École Nationale Polytechnique, 2008.*
- [06] [https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Turbine-Pelton-page-2.html#ref\\_3.](https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Turbine-Pelton-page-2.html#ref_3)
- [07] [https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Turbine-Pelton-page-2.html#ref\\_3.](https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Turbine-Pelton-page-2.html#ref_3)
- [08] [https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Turbine-Pelton-page-2.html#ref\\_3.](https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Turbine-Pelton-page-2.html#ref_3)
- [09] [https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Turbine-Pelton-page-2.html#ref\\_3.](https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Turbine-Pelton-page-2.html#ref_3)
- [10] DUFOUR, Pascal. *Énergie hydraulique : conception et optimisation. Paris : Lavoisier, 2010.*
- [11] [https://uved.univ-perp.fr/module2/co/2-turbines.html.](https://uved.univ-perp.fr/module2/co/2-turbines.html)
- [12] [https://www.researchgate.net/figure/Carte-de-performance-des-turbines-Pelton-en-fonction-de-la-chute-disponible-et-de-la\\_fig10\\_360491424.](https://www.researchgate.net/figure/Carte-de-performance-des-turbines-Pelton-en-fonction-de-la-chute-disponible-et-de-la_fig10_360491424)

# *Annexe*

## Annexe

### Code Arduino :

```
#include <Wire.h>

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

// Initialisation de l'écran LCD I2C (adresse 0x27, 20 colonnes, 4 lignes)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

// Variables globales

int Qv;

int Qvv;

int T;

int compt = 0;

float rps = 0;

int sensor = A0; // Ajouté car utilisé dans loop()

int nb_trous = 1; // Ajouté car utilisé dans loop()

bool etat_old = false; // Ajouté car utilisé dans loop()

bool etat_new = false; // Ajouté car utilisé dans loop()

unsigned long start_time; // Ajouté car utilisé dans loop()

unsigned long end_time; // Ajouté car utilisé dans loop()

long temps; // Ajouté car utilisé dans loop()

int hallsensor = 2;

int Relai = 4;

int ledPin = 13;

volatile int NbTopsFan;

void rpm() {

    NbTopsFan++;
```

```
}  
  
void setup() {  
  
    pinMode(hallsensor, INPUT);  
  
    pinMode(Relai, OUTPUT);  
  
    pinMode(ledPin, OUTPUT);  
  
    // Initialisation LCD  
  
    lcd.init();  
  
    lcd.backlight();  
  
    lcd.setCursor(0, 0);  
  
    lcd.print("Systeme Pret");  
  
    delay(2000);  
  
    lcd.clear();  
  
    Serial.begin(9600);  
  
    attachInterrupt(0, rpm, RISING);  
  
}  
  
void loop() {  
  
    // Partie mesure vitesse  
  
    NbTopsFan = 0;  
  
    sei();  
  
    delay(1000);  
  
    Qv = (NbTopsFan * (60 / 7.5));  
  
    Qvv = Qv + (Qv * 0.25);  
  
    // Partie mesure RPM  
  
    compt = 0;  
  
    start_time = millis();
```

```
end_time = start_time + 1000;

temps = millis();

while (millis() < end_time) {

  if (analogRead(sensor) < 50) {

    etat_new = true;

  } else {

    etat_new = false;

  }

  if (etat_old != etat_new) {

    etat_old = etat_new;

    compt++;

  }

}

rps = float(compt) * 60 / (2 * nb_trous); // en tr/min (rpm)

// --- Affichage de la vitesse (V) ---

lcd.setCursor(0, 1);

lcd.print("N=");

lcd.print(rps);

lcd.print(" [rpm]");

// Partie mesure pression

int d1 = analogRead(A1);

int d2 = analogRead(A2);

float V1 = (d1 * 5) / 1024.0;

float V2 = (d2 * 5) / 1024.0;
```

```
float v1_a = float(compt) * 60 / (2 * nb_trous);
float P2_p = (3.0 * ((float)V2 - 0.47)) * 1000000.0;
float v1_b = float(compt) * 60 / (2 * nb_trous);
float P2_b = (P2_p / 10e5) - 0.0987890625;
float v1_c = float(compt) * 60 / (2 * nb_trous);
float P2_c = (0.8006 * P2_b + 0.0028) + 0.031;

// Affichage sur LCD

lcd.setCursor(0, 0);

lcd.print("P =");

lcd.print(P2_c, 2);

lcd.print(" [bar] ");

lcd.setCursor(0, 2); // Changé de ligne 1 à 2 pour éviter le chevauchement

lcd.print("Qv=");

lcd.print(Qvv, 1);

lcd.print(" [L/h] ");

// Envoi série

Serial.print(v1_c, 2);

Serial.print(",");

Serial.print(P2_c, 2);

Serial.print(",");

Serial.print(Qvv, DEC);

Serial.println("");

if (Serial.available() > 0) {

    int c;

    for (int k = 0; k < Serial.available(); k++) {
```

```
c = Serial.read();

}

if(c == 1) {

    digitalWrite(Relai, HIGH);

    digitalWrite(ledPin, HIGH);

} else {

    digitalWrite(Relai, LOW);

    digitalWrite(ledPin, LOW);

}

}

}
```

## Code matlab

```
classdef Interface < matlab.apps.AppBase
```

```
    % Properties that correspond to app components
```

```
    properties (Access = public)
```

```
        UIFigure                matlab.ui.Figure
        Image                    matlab.ui.control.Image
        dvdtLhGauge              matlab.ui.control.SemicircularGauge
        dvdtLhGaugeLabel        matlab.ui.control.Label
        VariateurdecourantPanel  matlab.ui.container.Panel
        CourantALabel            matlab.ui.control.Label
        Knob                      matlab.ui.control.DiscreteKnob
        PuissanceetrendementPanel matlab.ui.container.Panel
        PuissanceelectriqueWEditField matlab.ui.control.NumericEditField
        PuissanceelectriqueWLabel matlab.ui.control.Label
        RendementEditField       matlab.ui.control.NumericEditField
        RendementLabel           matlab.ui.control.Label
        PuissanceMcaniqueWEditField matlab.ui.control.NumericEditField
        PuissanceAbsorbeWLabel    matlab.ui.control.Label
        PuissanceHydrauliqueWEditField matlab.ui.control.NumericEditField
        PuissanceHydrauliqueWEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
        PressionsetdbitPanel      matlab.ui.container.Panel
        coupleNmEditField         matlab.ui.control.NumericEditField
        TensionVLabel            matlab.ui.control.Label
        CourantAEditField         matlab.ui.control.NumericEditField
        CourantAEditFieldLabel    matlab.ui.control.Label
        DbitQvLhEditField        matlab.ui.control.NumericEditField
        DbitQvLhEditFieldLabel    matlab.ui.control.Label
```

```
PressionPbarEditField          matlab.ui.control.NumericEditField
PressionPbarEditFieldLabel     matlab.ui.control.Label
VitesseVrpmEditField          matlab.ui.control.NumericEditField
VitesseVrpmEditFieldLabel     matlab.ui.control.Label
pressionGaugeLabel            matlab.ui.control.Label
PressionGaugeLabel            matlab.ui.control.Label
ParamtreduportRS232Panel      matlab.ui.container.Panel
stateLabel                    matlab.ui.control.Label
ConnecterSwitch               matlab.ui.control.ToggleSwitch
stateLamp                     matlab.ui.control.Lamp
BandeEditField                matlab.ui.control.NumericEditField
BandeEditFieldLabel          matlab.ui.control.Label
PortDropDown                  matlab.ui.control.DropDown
PortDropDownLabel            matlab.ui.control.Label
P2                            matlab.ui.control.Gauge
P1                            matlab.ui.control.Gauge
FermerButton                  matlab.ui.control.Button
UIAxes                        matlab.ui.control.UIAxes
end
```

```
properties (Access = private)
```

```
    s; % serial port
    k;
    t;
    courant=0;
    I=0;
    Cr=0;
    statemotor='0';
    Qv=0;
```

```
end
```

```
methods (Access = private)
```

```
function fonc(app)
    app.k=app.k+1;
    n=app.s.BytesAvailable;

    if(n~=0)
        msg=fscanf(app.s);
        % app.TextArea.Value=msg;
        app.KnobValueChanged();
        C = strsplit(msg, ',');
        V1=str2double(C{1});
        P=str2double(C{2});
        P_elec=P*185;
        app.Qv=str2double(C{3});

        app.P1.Value = V1;
        app.VitesseVrpmEditField.Value=V1;
```

```
    app.P2.Value = P;
    app.PressionPbarEditField.Value=P;
    app.PuissanceElectriqueWEditField.Value=P_elec;

    app.dvdtLhGauge.Value = app.Qv;
    app.DbitQvLhEditField.Value=app.Qv;

    app.CourantAEditField.Value=app.I;
    app.coupleNmEditField.Value=app.Cr;

    P_mec=app.Cr*V1;
    P_hy=P*10^5*app.Qv*((10^-3)/3600);
    app.PuissanceMcaniqueWEditField.Value=P_mec;
    app.PuissanceHydrauliqueWEditField.Value=P_hy;
    if (P_mec==0)
        app.RendementEditField.Value=0;
    else
        app.RendementEditField.Value=100*(P_mec/P_hy);
    end

end
if (all(app.statemotor == '1'))
    fprintf(app.s,1);
else
    fprintf(app.s,0);
end
end
end

% Callbacks that handle component events
methods (Access = private)

% Code that executes after component creation
function startupFcn(app)
    im=imread('image.png');
    axis(app.UIAxes,'off');
    axis(app.UIAxes,'image');
    image(app.UIAxes,im);

    set(app.PortDropDown,'Items',seriallist);
    app.t = timer('BusyMode', 'queue', 'ExecutionMode','fixedRate',
'Period', 1);
    set(app.t, 'TimerFcn', @(~,~) app.fonc);
    app.k=0;
end

% Button pushed function: FermerButton
function FermerButtonPushed(app, event)
    status=get(app.s,'Status');
    stop(app.t);
    if isequal(status,'open')
```

```
        fclose(app.s);
    end
    app.delete;
end

% Value changed function: ConnectorSwitch
function ConnectorSwitchValueChanged(app, event)
    value = app.ConnectorSwitch.Value;
    if isequal(value, 'On')
        port = get(app.PortDropDown, 'value');
        app.s = serial(port);
        set(app.s, 'BaudRate', app.BandeEditField.Value);
        fopen(app.s);
        set(app.stateLamp, 'Color', 'g');
        app.stateLabel.Text=get(app.s, 'Status');
        start(app.t);
    else
        status=get(app.s, 'Status');
        if isequal(status, 'open')
            fclose(app.s);
        end
        status=get(app.s, 'Status');
        if(isequal(status, 'closed'))
            app.stateLabel.Text=get(app.s, 'Status');
            set(app.stateLamp, 'Color', 'r');
            stop(app.t);
        end
    end
end

end

% Value changed function: Knob
function KnobValueChanged(app, event)
    value = char(app.Knob.Value);
    switch value
        case char('0')
            app.courant=0;
            app.Cr=0;
            app.I=0;
        case char('0.02')
            app.courant=0.02;
            app.Cr=(app.courant*0.06);
            app.I=app.courant;
        case char('0.04')
            app.courant=0.04;
            app.Cr=(app.courant*0.06);
            app.I=app.courant;
        case char('0.06')
            app.courant=0.06;
            app.Cr=(app.courant*0.06);
            app.I=app.courant;
        case char('0.08')
```

```
    app.courant=0.08;
    app.Cr=(app.courant*0.06);
    app.I=app.courant;
case char('0.10')
    app.courant=0.10;
    app.Cr=(app.courant*0.06);
    app.I=app.courant;
case char('0.12')
    app.courant=0.12;
    app.Cr=(app.courant*0.06);
    app.I=app.courant;
case char('0.14')
    app.courant=0.14;
    app.Cr=(app.courant*0.06);
    app.I=app.courant;
case char('0.16')
    app.courant=0.16;
    app.Cr=(app.courant*0.06);
    app.I=app.courant;
case char('0.18')
    app.courant=0.18;
    app.Cr=(app.courant*0.06);
    app.I=app.courant;
case char('0.20')
    app.courant=0.20;
    app.Cr=(app.courant*0.06);
    app.I=app.courant;
case char('0.22')
    app.courant=0.22;
    app.Cr=(app.courant*0.06);
    app.I=app.courant;
case char('0.24')
    app.courant=0.24;
    app.Cr=(app.courant*0.06);
    app.I=app.courant;
case char('0.26')
    app.courant=0.26;
    app.Cr=(app.courant*0.06);
    app.I=app.courant;
case char('0.28')
    app.courant=0.28;
    app.Cr=(app.courant*0.06);
    app.I=app.courant;
case char('0.30')
    app.courant=0.30;
    app.Cr=(app.courant*0.06);
    app.I=app.courant;
case char('0.32')
    app.courant=0.32;
    app.Cr=(app.courant*0.06);
    app.I=app.courant;
case char('0.34')
```

```
        app.courant=0.34;
        app.Cr=(app.courant*0.06);
        app.I=app.courant;
    case char('0.36')
        app.courant=0.36;
        app.Cr=(app.courant*0.06);
        app.I=app.courant;
    case char('0.38')
        app.courant=0.38;
        app.Cr=(app.courant*0.06);
        app.I=app.courant;
    otherwise
end
end
```

