

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم والبحث العلمي

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 Electromécanique

MÉMOIRE

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

En : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par : LAYADI Bachir

AMARA Abdelbaki

ZERAIBI Oussama

AMARA Boutheyna

Sujet

Conception et réalisation d'un banc d'essai sur l'association des pompes centrifuges

Soutenu publiquement, le 05/10/2023.

Devant le jury composé de :

Mr. LAYADI Toufik Madani

MCA

Univ-BBA

Président

Mr. MEGHLOUI Issam

MCB

Univ-BBA

Encadrant

Mr. KESSAL Abdelhalim

Professeur

Univ-BBA

Examinateur

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier **Dieu**, le seul Miséricordieux, de nous avoir aidé à Surmonter toutes les difficultés lors de nos études, et qui nous a donné l'énergie et de la volonté et surtout le courage pour terminer ce modeste travail.

Nous tenons à adresser nos plus chaleureux remerciements à monsieur **MEGHLAOUI ISSAM** d'avoir Accepté de diriger ce travail. Surtout pour sa patience et sa confiance, grâce à ses orientations, sa disponibilité à tout moment. Son soutien constant et Ses conseils qu'elle nos prodiguée tout au long de ce travail.

Nous sommes très reconnaissants Envers il pour son aide, aussi pour sa bonne humeur.

Nos vifs remerciements vont aux membres du jury et l'intérêt qu'ils ont porté à notre Recherche, en acceptent d'examiner notre travail et de l'enrichit par leurs propositions.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à nos proches et amis, qui nous ont Toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Dédicace

J'adresse toute ma gratitude à ma famille.

Particulièrement à mes parents, qui m'ont toujours soutenu et ont contribué pour m'assurer une belle vie et un meilleur avenir. Je témoigne également toute ma reconnaissance à ma sœur et mon frère qui m'ont appris à mettre l'honnêteté et le courage au-dessus de toutes les autres vertus. A vous, je dédie ce travail.

Comme je dédie ce travail à l'ensemble de mes amis :

Nadir, Oussama, Salim, Achour, Lamri,

Moncef, Aymen, Merouane, said, bachir, hocine,

lokman, boubou, Samir, abdelmoumene.

Et les personnes que je respecte beaucoup, qui m'ont permis de ne jamais dévier de mon objectif final.

Oussama.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, leur encouragement contenu, leur aide et pour le soutien qu'ils ont offert tout long de mes études.

*Ma femme ainsi à mon adorable fille Fatima zahra
Pour leur grand amour. Toute ma famille, et mes amis.*

Mes frères : amine, Dallel, Hadil, Niamat allah.

Mes binômes Oussama, Bachir, Hadil et toute sa famille.

*Comme je dédie ce travail à l'ensemble de mes amis :
Abdenoure, Hamlaoui, Akrem, Sofiane, Aymen, Hamdi,
Oussama, Mourad, Anewer, Alwani, Zaki, Hamza,
Moka,*

*Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour
que ce projet soit possible.*

Je vous dis merci !

Abdelbaqi.

Dédicace

*Je tiens C'est avec grande plaisir que je dédie ce
modeste travail :*

*A ma très chère mère (Belkhiri Noura) Quoi que je
fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier
comme il se doit. Ton affection me couvre, ta
bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a
toujours été ma source de force pour affronter les
différents obstacles*

*A mon très cher père (Mohamed) Tu as toujours été à
mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce
travail traduit ma gratitude et mon affection*

*À mes chères frères et sœurs : younce hanane, wissam,
meriem, wafia*

*Comme je dédie à ce travail à l'ensemble de mes amis :
Rafik, Imad, Abdalhak, Anouar, Anter, Thamer, Fouad,
Chorfi, Raouf, Zaki, Zinou*

À mes collègues : Oussama, Abdalbaki, bouthayna

Et à la fin je remercie du fond du cœur toute

La famille : Layadi et Belkhiri

Bachir

Dédicace

قال تعالى (وَقُلِ اعْمَلُوا فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ)

Louanges à Allah qui a éclairé mon chemin.

Je dédie ma remise de diplôme à mon cher père :

Mabrouk

*À ma mère bien-aimée, la source de l'amour et de la
vie : Wassila*

*À ceux avec qui le destin m'a uni comme un précieux
cadeau, mes frères qui comprennent la signification de
la fraternité :*

Mon frère, mon modèle : Abdelbaqi

Mon petit frère : Amine

Ma chère sœur : Dalel

Et ma petite sœur : Niama Allah

*À mes chères amies : Amani, Khawla, Mariam et
Bouthaina*

À mes collègues : Bachir, Oussama

Et à la fin je remercie du fond du cœur toute

La famille : Amara et Maadadi

Boutheyna

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapiter 1 Généralités sur les pompes centrifuges	2
1. 1 Introduction	2
1. 2 Pompes centrifuges	2
1. 2. 1 Définition	3
1. 2. 2 Composition est principe de fonctionnement	4
1. 3 Etude des pompes centrifuges	5
1. 3. 1 Trajectoire et triangle des vitesses.....	5
1. 3. 2 Expression du couple	7
1. 3. 3 Expression de la puissance et du travail spécifique	7
1. 3. 4 Expression de la hauteur : hauteur d'Euler	8
1. 4 Régimes de fonctionnement d'une turbomachine.....	9
1. 5 Association des pompes centrifuges	10
1. 5. 1 Montage en série	10
1. 5. 2 Montage en parallèle	12
1. 6 Conditions de couplage série ou/et parallèle de deux pompes centrifuges	14
1. 7 Enseignement à distance	14
1. 8 Conclusion	15
Chapiter 2 Conception du banc d'essai	16
2. 1 Introduction	16
2. 2 Définition de SolidWorks.....	16
2. 3 Conception de la partie mécanique du banc d'essai.....	16
2. 3. 1 Châssis.....	16
2. 3. 2 Réservoir d'eau	17
2. 3. 3 Pieds	19
2. 3. 4 Poignées	19
2. 3. 5 Support de fixation du circuit hydraulique.....	20
2. 4 Conception de la partie électrique	21
2. 4. 1 Pompe centrifuge.....	21
2. 4. 2 Débitmètre	23
2. 4. 3 Électrovanne à 3 voies.....	23
2. 4. 4 Électrovanne à 2 voies.....	24
2. 4. 5 Électrovanne TOR.....	26
2. 4. 6 Capteur de pression	26
2. 4. 7 Variateur de vitesse	27

2. 4. 8	Capteur de tension.....	28
2. 4. 9	Capteur de courant.....	28
2. 4. 10	Catre Arduino UNO.....	29
2. 4. 11	Platine d'expérimentation.....	29
2. 4. 12	Relais électrique.....	29
2. 4. 13	Module wifi	30
2. 4. 14	Module Bluetooth	30
2. 4. 15	Indicateur lumineux.....	31
2. 4. 16	Répartiteur électrique.....	31
2. 4. 17	Adaptateur d'alimentation	32
2. 5	Conception de la partie hydraulique	32
2. 5. 1	Rotamètre	32
2. 5. 2	Manomètre	33
2. 5. 3	Conduites.....	33
2. 5. 4	Liquide utilisé.....	34
2. 6	Autres accessoires	34
2. 6. 1	Coudes.....	34
2. 6. 2	Mamelons	35
2. 6. 3	Té femelle en laiton.....	35
2. 6. 4	Coudes en pex	35
2. 6. 5	Raccord (femelle-male) MC à visser.....	35
2. 6. 6	Raccord mixte (male-femelle).....	36
2. 6. 7	Robinet d'eau	36
2. 7	Conception de la partie commande.....	36
2. 7. 1	Interconnexion et câblage.....	36
2. 8	Assemblage du banc d'essai sur SolidWorks	37
2. 8. 1	Assemblage 1	37
2. 8. 2	Assemblage 2	38
2. 8. 3	Assemblage 3	38
2. 8. 4	Assemblage 4	39
2. 9	Conclusion	39
Chapiter 3	Réalisation et test pratique du banc d'essai.....	40
3. 1	Introduction	40
3. 2	Etapes de réalisation pratique du banc d'essai.....	40
1. 2. 3	Etape 1 : réalisation du châssis.....	40
3. 2. 2	Etape 2 : habillage châssis par Alucobond.....	40

3.2.3	Étape 3 : montage des pompes	41
3.2.4	Étape 4 : montage du réservoir	41
3.2.5	Étape 5 : obtention de la version finale du banc d'essai.	42
3.2.6	Étape 6 : réalisation du câblage électrique	43
3.3	Interface.....	43
3.4	Réalisation de l'étalonnage des capteurs	44
3.4.1	Étalonnage des capteurs du pression	44
3.4.2	Étalonnage du capteur de débit	48
3.5	Estimation des grandeurs physiques.....	49
3.6	Caractéristiques pour différents modes de fonctionnements	51
3.6.1	Caractéristique de la pompe en fonctionnement individuel	51
3.6.2	Caractéristique de montage en série des pompes	53
3.6.3	Caractéristique de montage en parallèle des pompes	56
3.7	Courbes caractéristiques pour différents modes de fonctionnements	58
3.8	Conclusion	59
	Conclusion Générale	60

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Tableau des caractéristiques de la pompe	22
Tableau 3.1 Mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du capteur de pression P1	45
Tableau 3.2 Mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du capteur de pression P2.....	46
Tableau 3.3 Mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du capteur de pression P3	47
Tableau 3.4 Mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du capteur de pression P4	48
Tableau 3.5 Mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du capteur débit	49
Tableau 3.6 résultat des mesures de la tension et du courant électrique alimentant la pompe avec calcul de la puissance électrique	50
Tableau 3.7 Récapitulatif des grandeurs mesurées et calculées associées à la pompe	51
Tableau 3.8 Récapitulatif des grandeurs mesurées et calculées associées au montage en série des pompes	54
Tableau 3.9 Récapitulatif des grandeurs mesurées et calculées associées au montage en parallèle des pompes	56

Liste des figures

Figure. 1.1. Classification des machines à fluide.	3
Figure. 1.2. Pompe centrifuge.	3
Figure. 1.3. Composition de la pompe centrifuge.	5
Figure. 1.4. Trajectoire de l'écoulement dans la roue de la pompe.	6
Figure. 1.5. Caractéristiques et point de fonctionnements des pompes centrifuges.	9
Figure. 1.6. Schéma d'un montage série de deux pompes centrifuges.	10
Figure. 1.7. Courbe caractéristique d'un montage série.	11
Figure. 1.8. Schéma d'un montage parallèle de deux pompes centrifuges.	12
Figure. 1.9. Courbe caractéristique du montage parallèle.	13
Figure. 2.1. Conception mécanique du châssis sur SolidWorks.....	17
Figure. 2.2. Mise en plan du châssis sur SolidWorks.....	17
Figure. 2.3. Conception mécanique du réservoir sur SolidWorks.....	18
Figure. 2.4. Vue éclatée du réservoir.....	18
Figure. 2.5. Mise en plan du réservoir sur SolidWorks.....	18
Figure. 2.6. Conception mécanique des pieds sur SolidWorks.	19
Figure. 2.7. Mise en plan du pied sur SolidWorks.	19
Figure. 2.8. Conception mécanique des poignées sur SolidWorks.	20
Figure. 2.9. Mise en plan de la poignée sur SolidWorks.....	20
Figure. 2.10. Conception mécanique du support sur SolidWorks.....	20
Figure. 2.11. Mise en plan du support de fixation sur SolidWorks.....	21
Figure. 2.12. Conception mécanique de la pompe sur SolidWorks.	22
Figure. 2.13. Vue éclatée de la pompe.	22
Figure. 2.14. Conception mécanique du débitmètre sur SolidWorks.....	23
Figure. 2.15. Mise en plan du débitmètre sur SolidWorks.....	23
Figure. 2.16. Conception mécanique de l'électrovanne à 3 voies sur SolidWorks.....	24
Figure. 2.17. Mise en plan de l'électrovanne à 3 voies sur SolidWorks.	24
Figure. 2.18. Conception mécanique de l'électrovanne à 2 voies sur SolidWorks.....	25
Figure. 2.19. Mise en plan d'électrovanne à 2 voies sur SolidWorks.....	25
Figure. 2.20. Conception mécanique de l'électrovanne FCD-180B sur SolidWorks.	26
Figure. 2.21. Mise en plan de l'électrovanne FCD-180B sur SolidWorks.....	26
Figure. 2.22. Conception mécanique du capteur de pression sur SolidWorks.....	27
Figure. 2.23. Mise en plan du capteur de pression sur SolidWorks.	27
Figure. 2.24. Variateur de vitesse (MY-9892).	28
Figure. 2.25. Capteur de tension ZMPT101B.	28
Figure. 2.26. Capteur de courant ACS712 10A.....	29
Figure. 2.27. Carte électronique Arduino UNO.	29
Figure. 2.28. Platine d'expérimentation.	29
Figure. 2.29. Relais électrique FC-82.....	30
Figure. 2.30. Capture wifi ESP8266.	30
Figure. 2.31. Capteur Bluetooth HC-05.	31
Figure. 2.32. Indicateur lumineux 240 [V] bleu.....	31
Figure. 2.33. Répartiteur électrique WKH407.	32
Figure. 2.34. Adaptateur alimentation AC DC.....	32
Figure. 2.35. Conception mécanique du rotamètre LZS-25 sur SolidWorks.....	33
Figure. 2.36. Mise en plan du rotamètre LZS-25 sur SolidWorks.	33
Figure. 2.37. Manomètre.	33

Figure. 2.38. Tuyau pvc transparent.....	34
Figure. 2.39. Antigel de marque NAFTAL.....	34
Figure. 2.40. Conception mécanique des coudes sur SolidWorks.....	35
Figure. 2.41. Conception mécanique des mamelons (male-male) sur SolidWorks.....	35
Figure. 2.42. Conception mécanique des raccords (male- femelle) sur SolidWorks.....	35
Figure. 2.43. Conception mécanique du Té femelle en laiton sur SolidWorks.....	35
Figure. 2.44. Conception mécanique des coudes en pex sur SolidWorks.....	35
Figure. 2.45. Conception mécanique du raccord femelle sur SolidWorks.....	36
Figure. 2.46. Conception mécanique du raccord male sur SolidWorks.....	36
Figure. 2.47. Conception mécanique des raccords mixtes male-femelle sur SolidWorks.....	36
Figure. 2.48. Conception mécanique du robinet d'eau.....	36
Figure. 2.49. Schéma électrique du banc d'essai.....	37
Figure. 2.50. Conception mécanique de l'assemblage et l'habillage du châssis sur SolidWorks	38
Figure. 2.51. Conception mécanique sur SolidWorks de l'assemblage des deux pompes sur le châssis.....	38
Figure. 2.52. Conception mécanique de l'assemblage du réservoir sur SolidWorks.....	38
Figure. 2.53. Conception mécanique finale du banc d'essai sur SolidWorks.....	39
Figure. 3.1. Structure du châssis après soudure et revêtement.....	40
Figure. 3.2. Structure du châssis après habillage.....	41
Figure. 3.3. Banc d'essai après l'installation des deux pompes.....	41
Figure. 3.4. Montage du réservoir sur le banc d'essai.....	42
Figure. 3.5. Photo réelle du banc d'essai réalisée.....	42
Figure 3.6 câblage électrique du banc d'essai.....	43
Figure. 3.7. Interface développée pour le contrôle du banc d'essai.....	44
Figure. 3.8. Courbe d'étalonnage du capteur pression P1.....	45
Figure. 3.9. Courbe d'étalonnage du capteur pression P2.....	46
Figure. 3.10. Courbe d'étalonnage du capteur pression P3.....	47
Figure. 3.11. Courbe d'étalonnage du capteur pression P4.....	48
Figure. 3.12. Courbe d'étalonnage du capteur de débit.....	49
Figure. 3.13. Courbe caractéristique de la puissance électrique absorbée par la pompe en fonction de débit.....	50
Figure. 3.14. Courbe caractéristique de la pression totale de la pompe en fonction du débit.....	52
Figure. 3.15. Courbe caractéristique de la puissance hydraulique en fonction du débit.....	52
Figure. 3.16. Courbe caractéristique de rendement en fonction du débit.....	53
Figure. 3.17. Courbe caractéristique de la pression totale en fonction du débit pour le montage en série.....	55
Figure. 3.18. Courbe caractéristique de la puissance hydraulique en fonction du débit pour le montage en série.....	55
Figure. 3.19. Courbe caractéristique de la pression en fonction du débit pour le montage en parallèle.....	57
Figure. 3.20 Courbe caractéristique de la puissance hydraulique en fonction du débit pour le montage en parallèle.....	57
Figure. 3.21. Courbes caractéristiques pour différents modes de fonctionnements.....	58
Figure 3.22. Courbes caractéristiques de la puissance hydraulique pour différents modes de fonctionnements.....	59

Liste des symboles et abréviations

Liste des symboles

Alphabétique latin

U : vitesse d'entraînement de la roue [**m/s**]

V : vitesse d'écoulement de fluide dans le conduit [**m/s**]

w : vitesse relative de fluide par rapport à la roue [**m/s**]

W : travail spécifique [**J/Kg**]

Q_v : débit volumique [**m³ /s**]

H_{MT} : hauteur manométrique [**m. c. f**]

m : masse volumique du fluide en [**Kg/s**]

H_{th∞} : hauteur totale [**m. c. f**]

H_{dy} : hauteur dynamique [**m. c. f**]

H_{st} : hauteur statique [**m. c. f**]

T : représente le couple exercé sur le fluide [**N. m**]

P : puissance [**watt**]

r : rayon de la roue [**m**]

g : accélération gravitaire [**m/s²**]

ρ_{eau} : densité de l'eau [**kg/m³**]

ρ_{air} : densité de l'air [**kg/m³**]

ρ_{fluide} : densité d'un fluide [**kg/m³**]

Alphabétique grec

ω : vitesse angulaire [**rd/s**]

β : angle de la vitesse relative [°]

α : angle de la vitesse absolue [°]

ρ : densité [**kg/m³**]

Liste des abréviations

[m. c. f] : Mètre Colonne du Fluide

Wi-Fi : Wireless Fidelity (Fidélité Sans Fil)

CV : (chevaux-vapeur)

3D : Trois dimensions

TOR : Tout Ou Rien

Résumé

Ce projet de fin d'études présente un banc d'essai pour pompes centrifuges permettant d'effectuer des travaux pratiques à distance. Le banc d'essai est composé d'un circuit hydraulique fermé avec un réservoir et deux pompes centrifuges. La première pompe est à vitesse de rotation variable, tandis que la deuxième pompe est à vitesse de rotation constante. Les conduites sont transparentes, ce qui permet d'observer l'écoulement.

Le banc d'essai est équipé de capteurs de pression, d'un débitmètre et d'un rotamètre. Les mesures sont acquises par un microcontrôleur Arduino et transmises à un ordinateur ou à un smartphone via l'application développée. L'application permet de contrôler les vannes électroniques et les pompes à distance.

Summary

This thesis project presents a test bench for centrifugal pumps that allows for remote practical work. The test bench consists of a closed hydraulic circuit with a reservoir and two centrifugal pumps. The first pump has a variable rotation speed, while the second pump has a constant rotation speed. The pipes are transparent, which allows for flow observation.

The test bench is equipped with pressure sensors, a flow meter, and a rotameter. Measurements are acquired by an Arduino microcontroller and transmitted to a computer or smartphone via the developed application. The application allows for remote control of electronic valves and pumps.

ملخص

يقدم هذا المشروع النهائي جهازًا تجريبيًا للمضخات الطرد المركزية يسمح بإجراء تجارب عملية عن بُعد. يتكون جهاز الاختبار من دائرة هيدروليكية مغلقة مع خزان ومضختين طرد مركزيين. المضخة الأولى ذات سرعة دوران متغيرة، بينما المضخة الثانية ذات سرعة دوران ثابتة. الأنابيب شفافة مما يسمح بمراقبة التدفق.

تم تجهيز جهاز الاختبار بأجهزة استشعار الضغط ومقياس تدفق ومقياس دوران. يتم الحصول على القياسات بواسطة متحكم دقيق ويتم إرسالها إلى كمبيوتر أو هاتف ذكي عبر التطبيق المطور. يسمح التطبيق بالتحكم في الصمامات الإلكترونية والمضخات عن بُعد.

Introduction générale

Introduction générale

Les pompes centrifuges sont largement utilisées dans l'industrie pour transfère de fluides à haute pression ou à haute vitesse, mais leur performance dépend de nombreux facteurs, la vitesse de rotation, le débit, la pression et la viscosité du fluide.

La conception et la réalisation d'un banc d'essai sur l'association des pompes centrifuges est un projet ambitieux visé à étudier le comportement de ces équipements en situation réelle.

Dans ce contexte, nous allons mettre en place et développer un banc d'essai (de test) équipé de capteur et actionneurs, cela dans le but de comprendre le fonctionnement de l'association des pompes centrifuges. L'interface de commande développée collectera et analysera les données sur un smart phone, ce qui nous permettra de visualiser les caractéristiques clés de la pompe centrifuge : la hauteur, la puissance et l'efficacité en fonction du débit et de la pression. Ainsi, Les étudiants pourront faire des travaux pratiques à distance, ce qui rend notre projet unique et leur permet d'interagir avec la technologie moderne.

Le contrôle des machines de laboratoire à distance joue un rôle essentiel dans l'enseignement à distance des travaux pratiques par des plateformes en ligne, ce qui leur permet d'acquérir des compétences pratiques et de réaliser des expériences même en dehors du laboratoire physique.

Ce projet fin d'études permettra de mieux comprendre le fonctionnement des pompes centrifuges lorsqu'elles sont associées en série ou en parallèle. Les résultats obtenus aideront les étudiants à bien comprendre le principe des systèmes de pompage dans différents secteurs.

Ce mémoire comporte trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on a présenté une généralité sur la pompe centrifuge, la composition et le principe de fonctionnement de cette dernière ont été discutés en détail, l'intérêt de l'enseignement à distance des travaux pratiques pour les étudiants est abordé dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre portera sur la conception mécanique détaillée des différentes parties du banc d'essai sur le logiciel SolidWorks. Ainsi que le câblage de la partie électrique.

Le troisième et dernier chapitre fait l'objet du montage du banc d'essai, la méthode d'étalonnage des différents capteurs, ainsi que l'interface de commande développée sont aussi présentées. Une série de tests d'investigation à distance a été mené afin d'obtenir les différentes valeurs et courbes caractéristiques via l'application smartphone et l'interface développé.

Ce mémoire se termine par conclusion générale et une annexe.

Chapitre 1

Généralités sur les pompes centrifuges

Chapitre 1 Généralités sur les pompes centrifuges**1. 1 Introduction**

Ce chapitre se concentre sur l'étude approfondie des pompes centrifuges et leurs généralités. Nous commencerons par définir précisément ce qu'est une pompe centrifuge, en mettant en évidence son rôle et ses applications. Ensuite, nous examinerons attentivement la composition de cette dernière, en analysant ses différents composants tels que le corps, le rotor, les aubes et le moteur. Nous plongerons également dans le principe de fonctionnement des pompes centrifuges, en expliquant comment elles utilisent la force centrifuge pour transférer les liquides.

L'étude des pompes centrifuges est cruciale pour comprendre leurs performances et leurs utilisation efficace. Nous explorerons les caractéristiques et les paramètres clés des pompes centrifuges, tels que le débit, la pression, le rendement et la puissance requise. Nous aborderons également des aspects spécifiques tels que la viscosité des fluides, les pertes de charge et les phénomènes de cavitation qui peuvent influencer les performances des pompes centrifuges.

Enfin, nous soulignerons l'importance de l'enseignement à distance dans le domaine techniques, en mettant l'accent sur l'enseignement des travaux pratiques (TP). Nous mettrons en évidence l'apprentissage en ligne, qui offre aux étudiants des travaux pratiques en temps réelles. L'enseignement à distance des travaux pratique offre une flexibilité et une accessibilité accrues, permettant aux étudiants de développer des compétences pratiques dans divers domaines, quel que soit leur emplacement géographique.

1. 2 Pompes centrifuges

Les pompes font partie des machines a fluide les pompes constituent une famille très importante des turbomachines. [1]

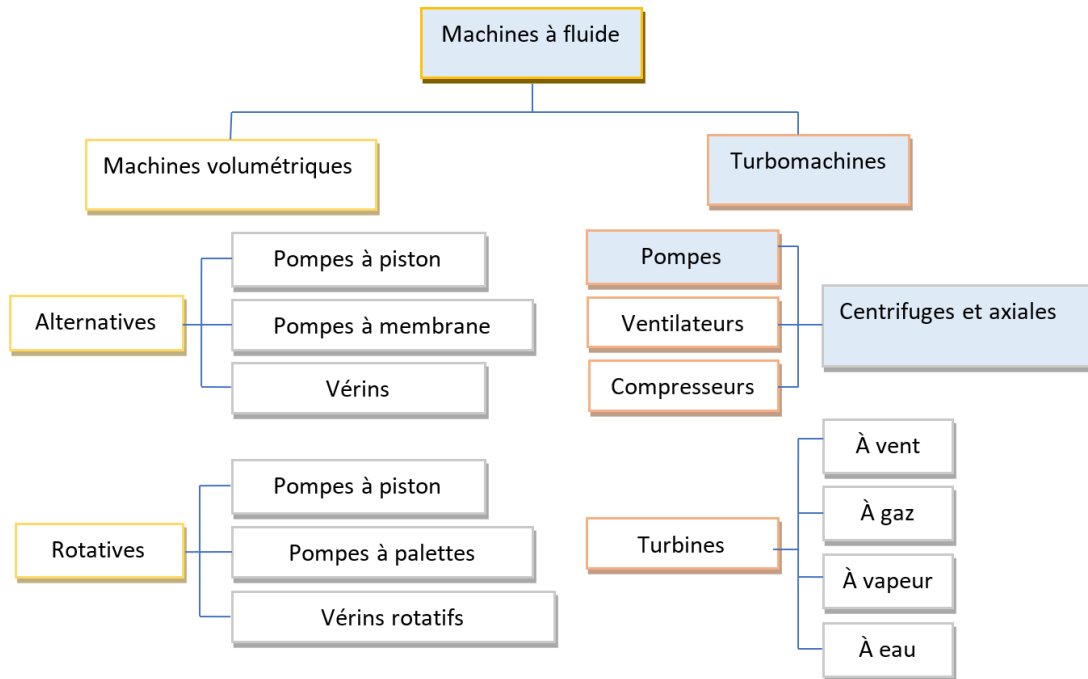


Figure. 1.1. Classification des machines à fluide. [1]

1. 2. 1 Définition

Les pompes centrifuges ont pour fonction de déplacer des liquides en convertissant l'énergie cinétique de rotation en énergie hydrodynamique de flux. Cette rotation est généralement générée par un moteur électrique ou thermique. Le liquide entre dans la roue de la pompe le long ou à proximité de l'axe de rotation, puis il est accéléré par la roue et s'écoule radialement vers l'extérieur à travers un diffuseur ou une chambre de volute (boîtier) avant de sortir. [1]

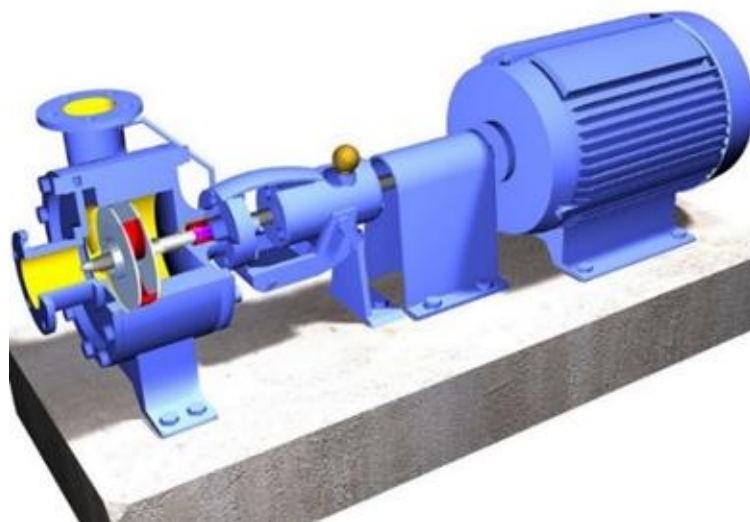


Figure. 1.2. Pompe centrifuge. [1]

1. 2. 2 Composition et principe de fonctionnement

La composition et le principe de fonctionnement d'une pompe peuvent varier en fonction du type spécifique de celle-ci. Cependant, voici une description générale des différentes composantes des pompes centrifuges :

Corps de pompe : le corps de la pompe est la structure principale qui abrite les composants internes de cette dernière. Il est conçu pour contenir et guider le fluide pompé à travers le système. Le corps de la pompe est généralement fabriqué en métal, en plastique ou en une combinaison de ces matériaux.

Diffuseur : le diffuseur est un composant situé à l'intérieur du corps de la pompe. Il est conçu pour convertir la vitesse de l'écoulement du fluide en une pression plus élevée. Le diffuseur est souvent utilisé dans les pompes centrifuges pour augmenter l'efficacité de la pompe en transformant l'énergie cinétique en énergie de pression.

Impulseur : l'impulseur est le composant rotatif de la pompe. Il est généralement composé de pales ou d'aubes et est monté sur un arbre. Lorsque l'impulseur tourne, il transmet de l'énergie au fluide, augmentant ainsi sa vitesse et sa pression. Les pompes centrifuges utilisent des impulseurs pour propulser le fluide hors de la pompe.

Garniture : la garniture fait référence aux éléments d'étanchéité utilisés dans une pompe pour empêcher les fuites de fluide le long de l'arbre. La garniture peut être constituée de joints, de bagues d'étanchéité ou d'autres dispositifs similaires. Son rôle est de maintenir l'étanchéité entre les parties en mouvement et les parties stationnaires de la pompe.

Il convient de noter que ces composants peuvent varier d'une pompe à l'autre, en fonction de la conception et de l'application spécifiques de la pompe. Il existe de nombreux autres éléments et accessoires qui peuvent être présents dans une pompe, tels que les moteurs, les roulements, les systèmes de contrôle, etc. [1]

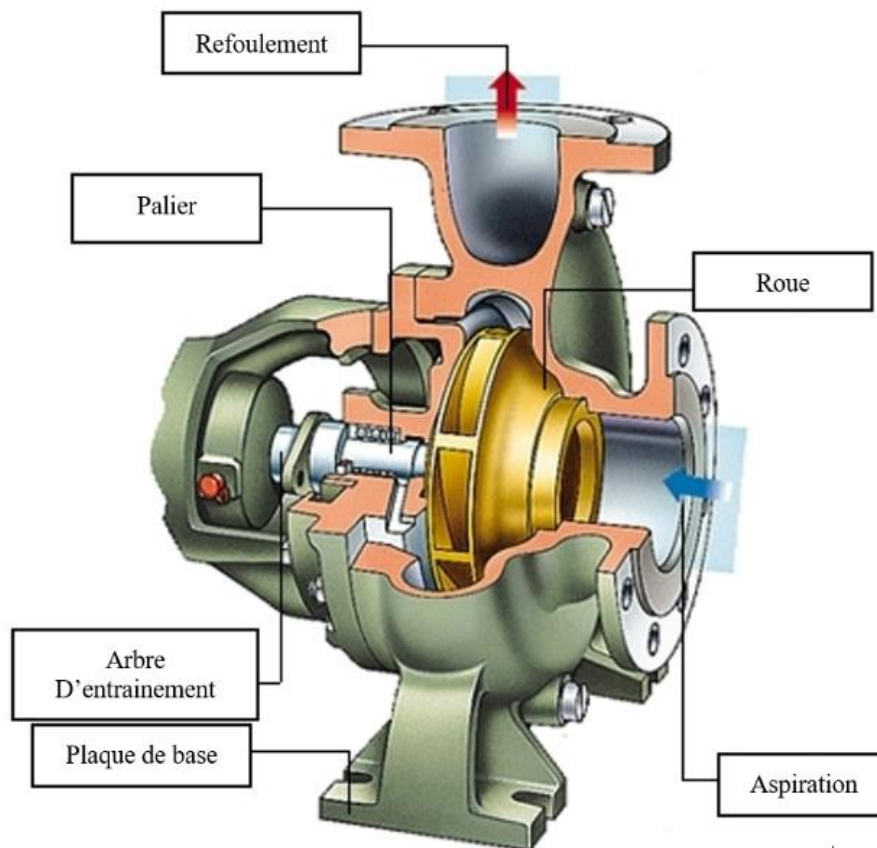


Figure. 1.3. Composition de la pompe centrifuge. [1]

1. 3 Etude des pompes centrifuges

1. 3. 1 Trajectoire et triangle des vitesses [1]

Dans le contexte d'un écoulement stationnaire unidimensionnel dans le rotor d'une turbomachine, les conditions sont uniformes à l'entrée et à la sortie, identifiées respectivement par les indices 1 et 2. Lorsqu'on examine le parcours d'une particule de fluide à travers la roue, on peut observer deux mouvements distincts :

Un mouvement relatif le long de l'aube, caractérisé par une vitesse relative w qui est tangente à l'aube.

Un mouvement d'entraînement provoqué par la rotation de la roue, avec une vitesse d'entraînement U qui est tangente à la roue.

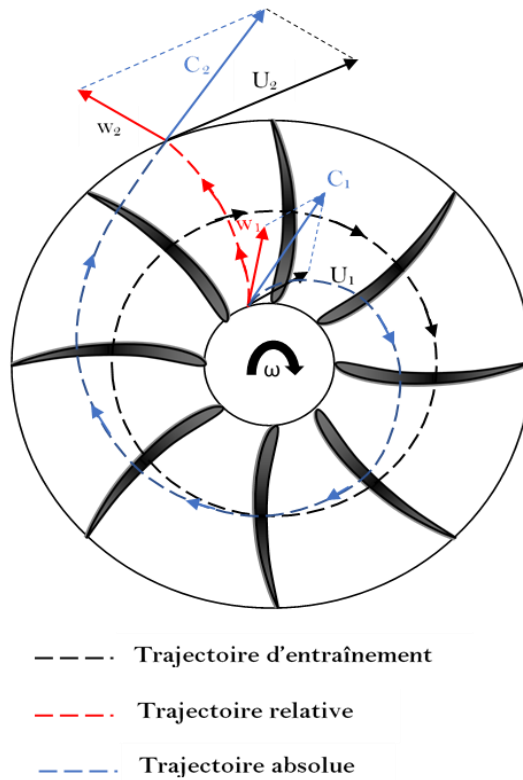
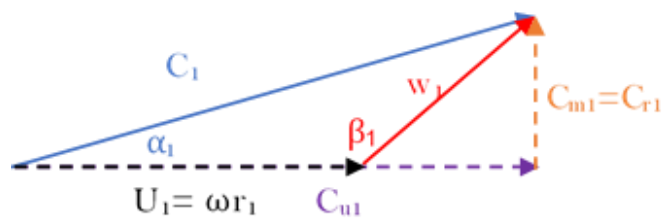


Figure. 1.4. Trajectoire de l'écoulement dans la roue de la pompe. [1]

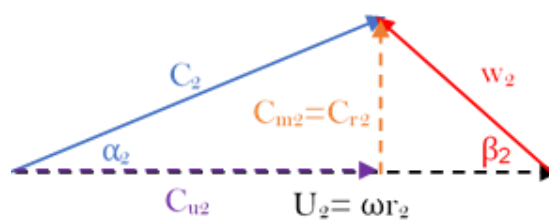
Donc à chaque instant et en chaque point nous avons la relation vectorielle :

$$\vec{C} = \vec{U} + \vec{w} \tag{1}$$

✓ Triangle des vitesses à l'entrée



✓ Triangle des vitesses à la sortie



1.3.2 Expression du couple

Le moment résultant des forces par rapport à l'axe de la turbomachine correspond au couple du moteur. Selon le théorème du moment des quantités de mouvement, on peut écrire :

$$T = T_1 - T_2 \quad (2)$$

$$T = \dot{m}(r_2 C_{u,2} - r_1 C_{u,1}) [\text{N. m}] \quad (3)$$

Dans cette équation, le symbole T représente le couple exercé sur le fluide. [1]

1.3.3 Expression de la puissance et du travail spécifique [1]

La puissance de la pompe ou du ventilateur est influencée par les paramètres cinétiques à l'entrée et à la sortie du rotor.

$$\text{Puissance} = T\omega \quad (4)$$

$$P = \dot{m}(\omega r_2 C_{u,2} - \omega r_1 C_{u,1}) \quad (5)$$

Et comme

$$U_1 = \omega r_1, \quad U_2 = \omega r_2 \quad (6)$$

La puissance transmise au fluide s'exprime par :

$$P = \dot{m}(U_2 C_{u,2} - U_1 C_{u,1}) [\text{watt}] \quad (7)$$

Où :

$$\dot{m} = Q_m = \rho_{\text{fluide}} * Q_v \quad (8)$$

ρ_{fluide} : est la masse volumique du fluide en [Kg/s] à pression et température ambiante 20°C

$$\rho_{\text{eau}} = 1000 [\text{Kg/m}^3] \quad (9)$$

$$\rho_{\text{air}} = 1,23 [\text{Kg/m}^3] \quad (10)$$

De manière similaire, l'expression du travail spécifique par unité de masse de fluide est donnée par :

$$W = \frac{P}{\dot{m}} = (U_2 C_{u,2} - U_1 C_{u,1}) [\text{J/Kg}] \quad (11)$$

1.3.4 Expression de la hauteur : hauteur d'Euler

Il s'agit d'une hauteur qui représente l'énergie mécanique échangée entre la roue et le fluide, exprimée en termes de mètres de colonne de fluide.

$$H_{th\infty} = \frac{1}{g}(U_2 C_{u,2} - U_1 C_{u,1}) [m. c. f] \quad (12)$$

Pour les turbomachines à entrées radiales, où $C_{u,1} = 0$, Par conséquent, l'équation d'Euler se simplifie et devient :

$$H_{th\infty} = \frac{1}{g}(U_2 C_{u,2}) \quad (13)$$

✓ **Autres formes de l'équation d'Euler :**

Le triangle des vitesses nous permet d'obtenir les relations classiques suivantes :

$$w_2^2 = U_2^2 + C_2^2 - 2U_2 C_2 \cos \alpha_2 \quad (14)$$

$$w_1^2 = U_1^2 + C_1^2 - 2U_1 C_1 \cos \alpha_1 \quad (15)$$

En utilisant le triangle des vitesses, on peut facilement obtenir une expression de $UC \cos \alpha$, que l'on peut ensuite insérer dans l'équation d'Euler pour obtenir :

$$H_{th\infty} = \frac{C_2^2 - C_1^2}{2g} + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} [m. c. f] \quad (16)$$

$$W = gH_{th\infty} = \underbrace{\frac{C_2^2 - C_1^2}{2}}_I + \underbrace{\frac{U_2^2 - U_1^2}{2}}_{II} + \underbrace{\frac{w_1^2 - w_2^2}{2}}_{III} [J/Kg] \quad (17)$$

Ces deux équations démontrent que le transfert d'énergie peut être réparti de différentes façons. Le premier terme représente la variation d'énergie cinétique dans l'écoulement, le deuxième terme représente la variation d'énergie due aux forces centrifuges, et le troisième terme représente la variation d'énergie due aux vitesses relatives w_i .

D'autre part :

La hauteur totale = La hauteur statique + La hauteur dynamique

$$H_{th\infty} = \underbrace{\frac{C_2^2 - C_1^2}{2g}}_{H_{dy}} + \underbrace{\frac{U_2^2 - U_1^2}{2g}}_{H_{st}} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} [J/Kg] \quad (18)$$

$$H_{th\infty} = H_{st} + H_{dy} \tag{19}$$

La hauteur statique est le paramètre qui explique l'augmentation de la pression du fluide, conformément à la relation de Bernoulli. Après une brève démonstration, on obtient :

$$H_{st} = \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} \text{ [m. c. f]} \tag{20}$$

Caractéristiques et point de fonctionnement d'une turbomachine [1]

1. 4 Régimes de fonctionnement d'une turbomachine

Le point de fonctionnement d'une turbomachine se situe à l'intersection des deux caractéristiques, à savoir celle de la turbomachine fournie par le fabricant et celle du réseau externe comprenant des éléments tels que les conduites, les coudes et les vannes, déterminés par l'utilisateur.

À partir du graphique, on peut déduire les conclusions suivantes :

- Le point où les caractéristiques se croisent correspond au régime de fonctionnement réel de l'installation, caractérisé par un rendement réel.
- Il existe un point de fonctionnement optimal correspondant au rendement maximum.

Dans la plupart des cas, il est courant d'ajuster le fonctionnement de l'installation afin de se rapprocher du point de fonctionnement optimal. Cela peut être réalisé en modifiant la vitesse de rotation de la turbomachine ou en ajustant l'ouverture d'une vanne sur le réseau de l'installation, par exemple. En général, ces courbes sont établies à partir de données expérimentales, car il est souvent difficile de les tracer uniquement à partir de considérations théoriques. [1]

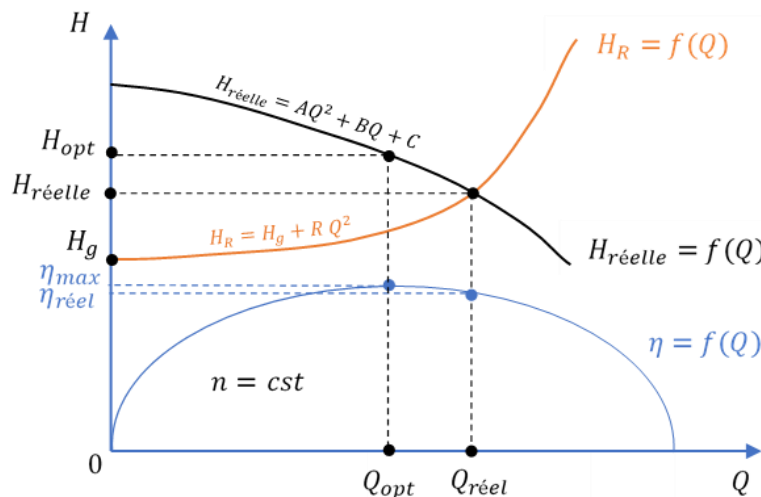


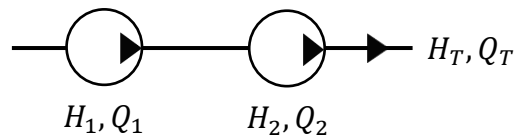
Figure. 1.5. Caractéristiques et point de fonctionnements des pompes centrifuges. [1]

1. 5 Association des pompes centrifuges

Une pompe centrifuge qui comporte deux roues ou plus est connue sous le nom de pompe centrifuge à plusieurs étages (multi-cellulaire). Ces roues peuvent être montées sur un même arbre ou sur des arbres distincts. À chaque étage, le fluide est acheminé vers le centre avant de se diriger vers la sortie à travers le diamètre extérieur. [1]

1. 5. 1 Montage en série

- Pour des pressions plus élevées à la sortie, les roues peuvent être connectées en série :



$$\begin{cases} H_T = H_1 + H_2 \\ Q_T = Q_1 = Q_2 \end{cases} \quad (21)$$

Deux pompes sont installées en série en connectant le refoulement de la première pompe à l'aspiration de la seconde. Le schéma ci-dessous illustre le montage en série de ces deux pompes, où l'aspiration est reliée au réservoir A et le refoulement est relié au réservoir B. [2]

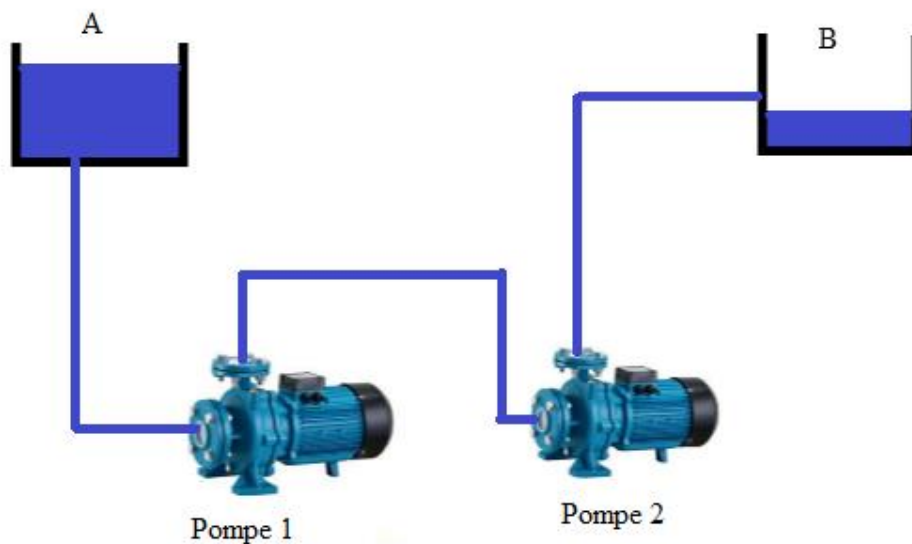


Figure. 1.6. Schéma d'un montage série de deux pompes centrifuges. [2]

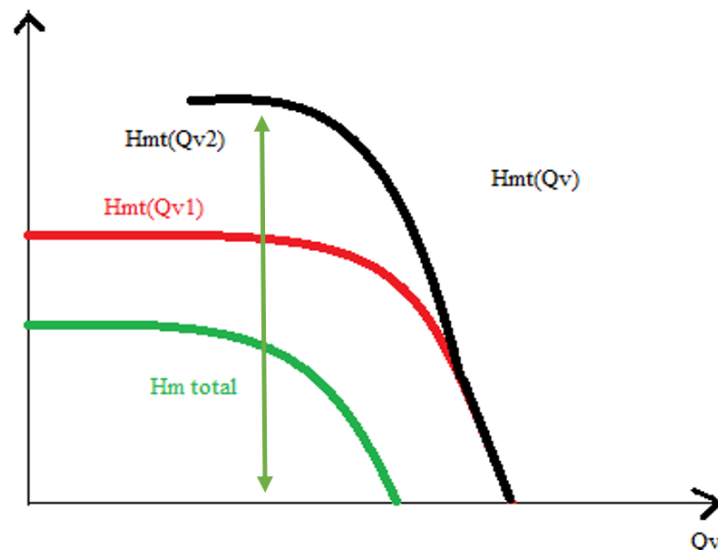


Figure. 1.7. Courbe caractéristique d'un montage série. [2]

✓ **Avantages :**

Le couplage en série de deux pompes permet d'augmenter, voire de doubler, la hauteur manométrique totale. Cela signifie que lorsque deux pompes sont placées en série, elles peuvent soit aspirer l'eau d'un point plus bas, soit la transporter vers un point plus élevé.

Ce type de couplage ne nécessite pas d'augmentation de la section des tuyaux.

Lorsque deux pompes sont connectées en série, à la fois la hauteur manométrique totale et le débit varient. La deuxième pompe, alimentée sous pression, présente un rendement supérieur. Cela peut influencer la vitesse de rotation de la roue et, par conséquent, la vitesse du fluide.

Afin de doubler uniquement la hauteur manométrique totale tout en maintenant constant le débit, il est nécessaire de réguler le débit d'une seule pompe à l'aide d'une vanne. [2]

✓ **Inconvénients :**

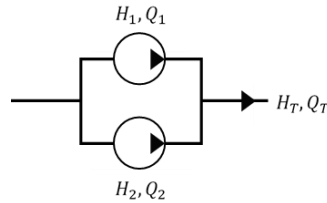
Une mauvaise installation des vannes peut entraîner des dommages prématurés à la pompe.

Dans le cas d'un couplage en série, il peut être nécessaire de prolonger considérablement la tuyauterie. Si la distance entre les pompes n'est pas respectée, cela peut avoir des conséquences néfastes sur le fonctionnement global. En d'autres termes, lorsque deux pompes identiques sont montées en série, il est crucial de s'assurer que la pression résultante est acceptable pour la dernière pompe. Si ce n'est pas le cas, il est possible de réduire la pression à une valeur acceptable en augmentant les pertes de charge. [2]

Il est important de noter qu'un couplage en série entraîne une surconsommation d'énergie en raison de la multiplication des moteurs nécessaires pour entraîner les deux pompes. [2]

1.5.2 Montage en parallèle

- Pour un débit plus élevé, les roues peuvent être connectées en parallèle :



$$\begin{cases} H_T = H_1 = H_2 \\ Q_T = Q_1 + Q_2 \end{cases} \quad (22)$$

Pour réaliser le couplage en parallèle de deux pompes, chaque pompe est alimentée et refoulée individuellement. Les tuyaux d'aspiration et de refoulement des deux pompes sont ensuite connectés à une entrée et une sortie principale, comme illustré dans le schéma ci-dessous.

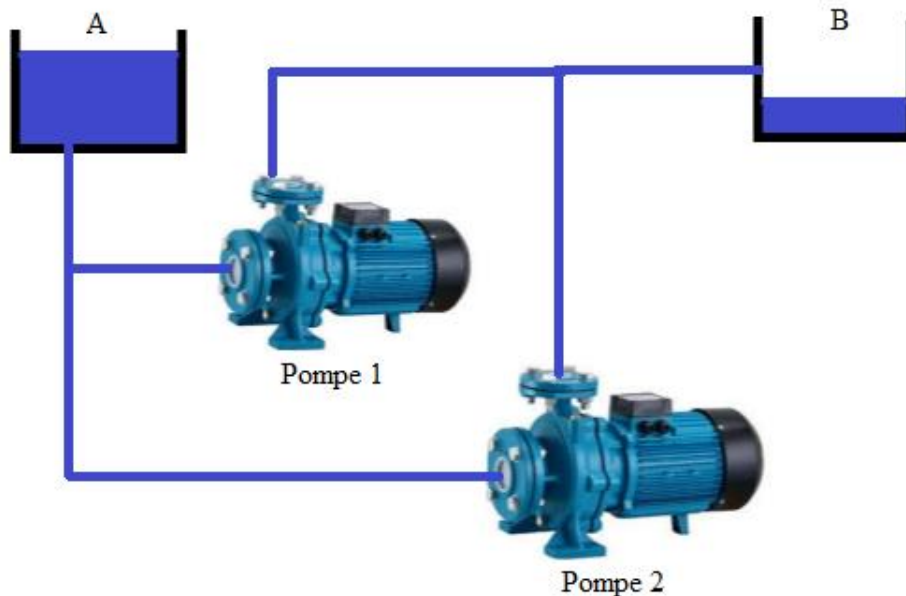


Figure. 1.8. Schéma d'un montage parallèle de deux pompes centrifuges. [2]

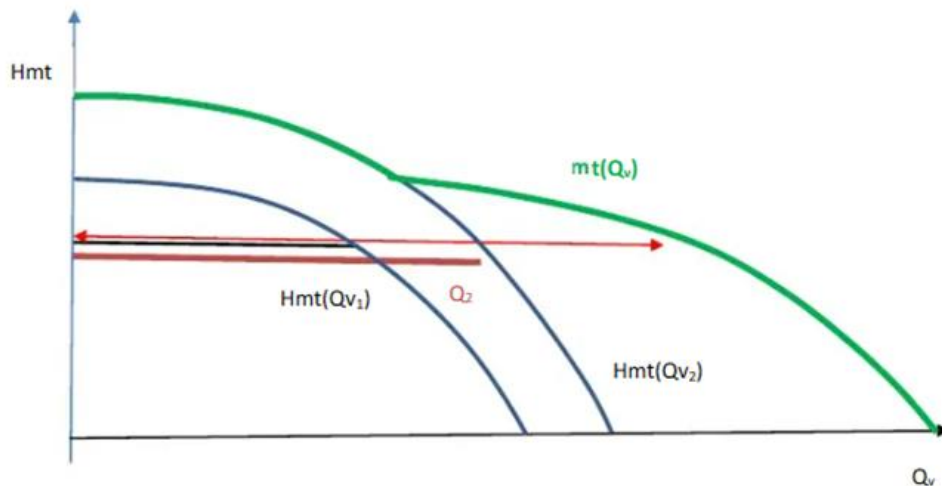


Figure. 1.9. Courbe caractéristique du montage parallèle. [2]

✓ **Avantages :**

Pour augmenter le débit sans le doubler en raison des pertes linéaires et singulières, deux pompes hydrauliques sont placées en parallèle. Cela nécessite une adaptation de la tuyauterie d'aspiration et de refoulement. Ce type de couplage permet de gagner du temps lorsqu'il s'agit de vider ou de remplir un système.

Le montage en parallèle de deux pompes centrifuges est recommandé pour des circuits présentant des faibles pertes de charge. Cela entraîne une augmentation significative du débit avec une pression proche de celle d'une seule pompe. [2]

✓ **Inconvénients :**

Lorsqu'il s'agit d'un couplage parallèle, la hauteur manométrique a tendance à diminuer.

Ce type de couplage nécessite des modifications à la fois au niveau de la tuyauterie d'aspiration et de refoulement. Étant donné que le débit augmente, les deux pompes doivent aspirer et refouler une plus grande quantité d'eau dans le même laps de temps. Il est donc nécessaire d'augmenter la section des tuyaux.

En cas de panne d'une des deux pompes, des dommages peuvent rapidement survenir sur l'autre en raison d'une surpression au refoulement et d'une sous-pression à l'admission.

Un mauvais vannage peut réduire le rendement.

Il faut également tenir compte de la surconsommation d'énergie due à la présence de plusieurs moteurs pour entraîner les deux pompes. [2]

1. 6 Conditions de couplage série ou/et parallèle de deux pompes centrifuges

Le principe reste le même pour chaque type de couplage, que ce soit en parallèle ou en série. La modification significative concerne soit le débit, soit la hauteur manométrique totale. Cependant, il est important de prendre en compte les aspects suivants :

- S'assurer que les deux pompes ont des caractéristiques compatibles et sans risque dans la plage des associations possibles.
- Adapter la tuyauterie d'alimentation et la hauteur d'aspiration afin d'éviter la surcharge sur la pompe de faible hauteur manométrique et le manque de débit sur la pompe de grande puissance.
- Assurer une correspondance des débits entre les deux pompes en série. Cela peut être réalisé en utilisant un système de vannage avec des tuyauteries équipées de débitmètres. Dans ce cas, il est essentiel de placer en dernière position la pompe ayant une plus grande hauteur manométrique. Sinon, une surpression peut endommager la pompe de faible pression.
- Veiller à avoir la même pression pour les deux pompes montées en parallèle. [2]

1. 7 Enseignement à distance

L'enseignement à distance présente plusieurs avantages. Il permet aux étudiants d'accéder à l'éducation et aux ressources pédagogiques sans contraintes géographiques, ce qui signifie qu'ils peuvent suivre des cours de n'importe où, tant qu'ils ont une connexion Internet. Cela offre également une flexibilité en termes d'organisation du temps, ce qui permet aux étudiants de concilier plus facilement leurs études avec d'autres responsabilités ou engagements.

Pour surmonter ces défis, les établissements d'enseignement à distance mettent en place des systèmes de soutien et de suivi des étudiants, fournissent des ressources pédagogiques en ligne et encouragent les interactions virtuelles entre étudiants et enseignants. L'enseignement à distance continue d'évoluer grâce aux avancées technologiques, offrant de nouvelles possibilités pour rendre l'expérience d'apprentissage à distance plus interactive, engageante et efficace.

Le contrôle à distance des machines de laboratoire est un outil puissant pour l'étude à distance des travaux pratiques. Il offre aux étudiants un accès à des équipements spécialisés, une expérience pratique en temps réel, une flexibilité dans la planification des expériences et une sécurité améliorée. Cette approche facilite l'apprentissage pratique et permet aux étudiants d'acquérir les compétences nécessaires dans un environnement d'apprentissage à distance, tout en renforçant leur compréhension des applications pratiques des concepts théoriques.

En ce qui concerne l'enseignement à distance, l'étude des pompes centrifuges peut être réalisée à l'aide de ressources pédagogiques, de simulations numériques et de travaux pratiques à distance. Les avancées technologiques permettent aux étudiants d'apprendre et de comprendre les concepts des pompes centrifuges à distance, en utilisant des plateformes d'apprentissage en ligne et des outils de travaux pratiques à distance.

1. 8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fourni une compréhension approfondie des généralités sur les pompes centrifuges, de leur définition à leur fonctionnement en passant par leur composition. Nous avons exploré leur étude, les régimes de fonctionnement des turbomachines et l'association de ces pompes. De plus, nous avons souligné l'importance de l'enseignement à distance pour les travaux pratiques, offrant aux étudiants la possibilité d'acquérir des compétences pratiques dans ce domaine clé de l'ingénierie.

Chapitre 2

Conception générale du banc d'essai

Chapitre 2 Conception du banc d'essai

2. 1 Introduction

Le deuxième chapitre se concentrera sur une analyse approfondie de la conception mécanique des divers composants du banc d'essai, réalisée à l'aide du logiciel SolidWorks. De plus, nous aborderons la mise en place du câblage dans la section électrique de notre dispositif.

La conception de la partie hydraulique et la partie commande sont aussi abordées en détail dans ce chapitre.

Enfin, on procèdera à l'assemblages toutes les conceptions précédentes et à la connexion des unes aux autres afin d'obtenir la forme finale du banc d'essai.

2. 2 Définition de SolidWorks

Le logiciel SolidWorks est un modelleur volumique appartenant à la société Dassault systèmes, la première version date du 21 mars 1995. Ce logiciel permis de créer des pièces complexes en 3 dimensions. Ces pièces peuvent être ensuite utilisées pour créer des mises en plan en 2D et des assemblages de plusieurs pièces entre elles. SolidWorks est un logiciel à cotation piloté. On peut spécifier des côtes et rapports géométriques entre les éléments. Un changement de cote entraîne un changement de taille de la pièce, tout en préservant l'intention de conception. Un modèle SolidWorks est constitué de pièces, d'assemblages et de mise en plan. Les pièces, les assemblages et les mises en plan affichent le même modèle dans des documents différents. Les changements opérés sur le modèle dans l'un des documents se propagent aux autres documents contenant ce modèle.[17]

2. 3 Conception de la partie mécanique du banc d'essai

2. 3. 1 Châssis

Le châssis est la pièce principale du banc d'essai qui permet de relier toutes les pièces entre elles. Notre châssis comporte des renforts et des fixations prédéfinies pour le réservoir et les deux pompes.

La **figure 2.1** montre la conception mécanique 3D du châssis réalisée sur SolidWorks.

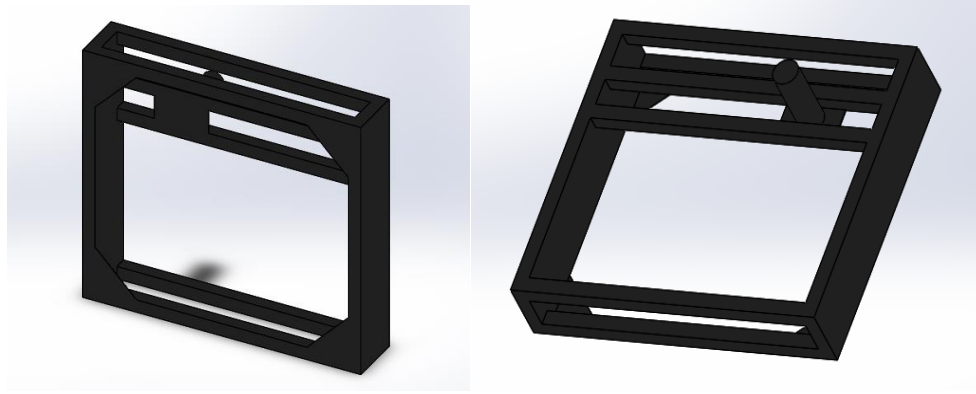


Figure. 2.1. Conception mécanique du châssis sur SolidWorks.

La mise en plan et les dimensions réelles du châssis sont présentées dans la **figure 2.2**.

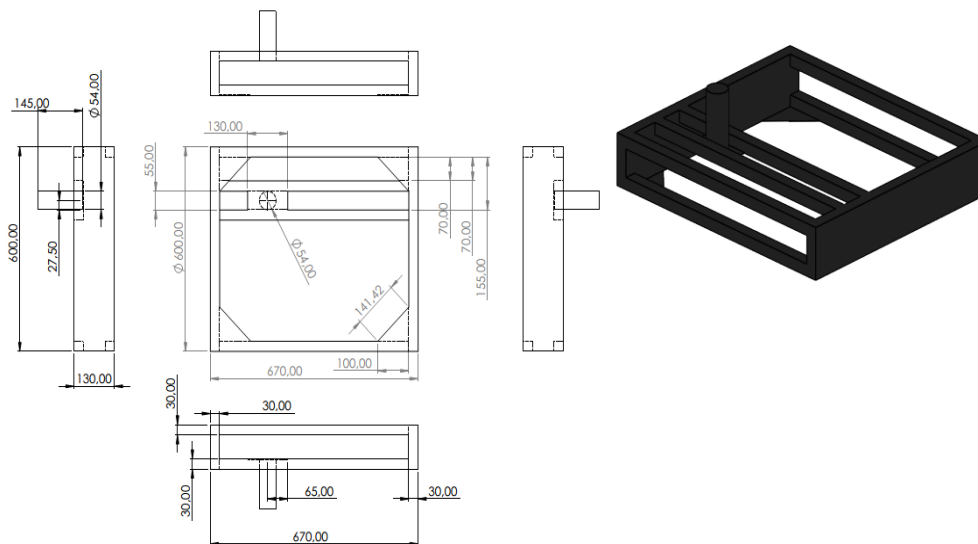


Figure. 2.2. Mise en plan du châssis sur SolidWorks.

2.3.2 Réservoir d'eau

Le réservoir d'eau du banc d'essai est un élément essentiel qui permet de stocker et de distribuer l'eau aux pompes pour le fonctionnement du circuit hydraulique. Il assure une circulation efficace de l'eau, avant de la ramener et de la stocker pour une utilisation ultérieure.

Caractéristiques du réservoir :

- Forme : cylindrique.
- Capacité du réservoir : 12[L].
- Poids net : 1,5 [kg].
- Diamètre intérieur : 200 [mm].

La **figure 2.3** montre la conception mécanique 3D du réservoir réalisée sur SolidWorks, tandis que la **figure 2.4** représente une vue éclatée du réservoir.

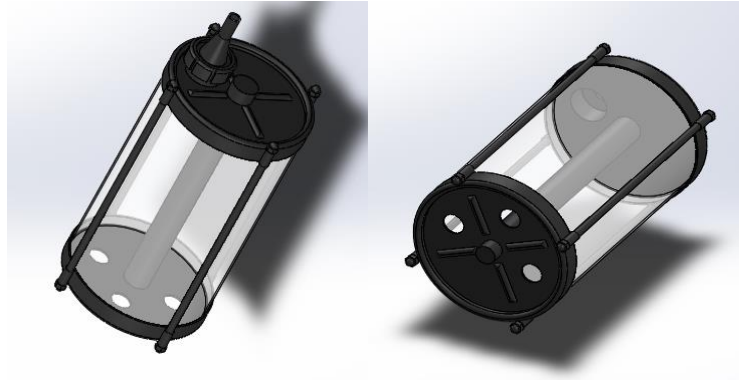


Figure. 2.3. Conception mécanique du réservoir sur SolidWorks.

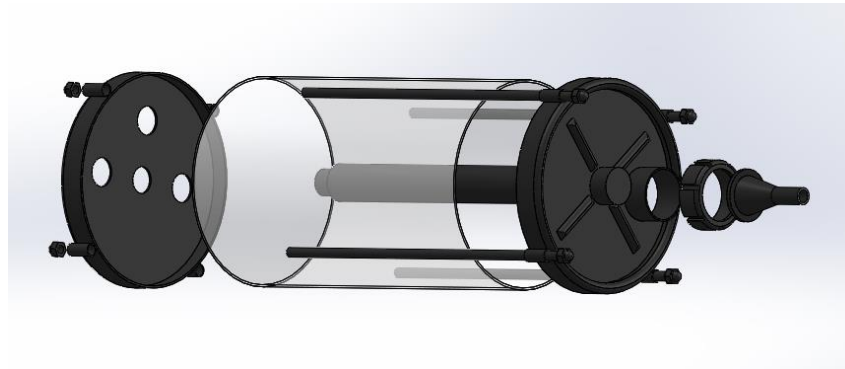


Figure. 2.4. Vue éclatée du réservoir.

La mise en plan et les dimensions réelles du réservoir sont présentées sur la figure 2.5.

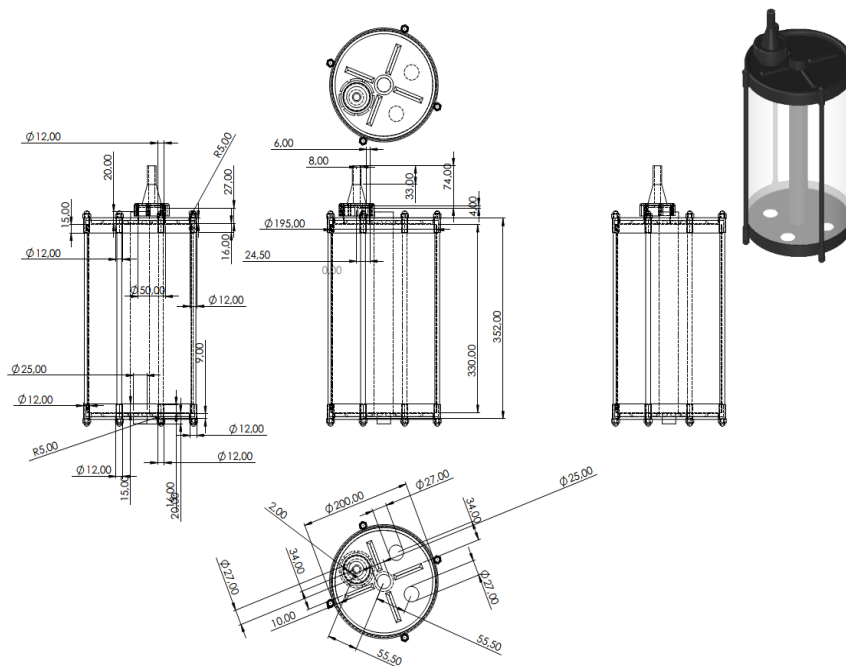


Figure. 2.5. Mise en plan du réservoir sur SolidWorks.

2.3.3 Pieds

Des pieds en plastique de type (caoutchouc) ont été installés sous le châssis pour assurer une stabilité maximale de banc d'essai, aussi pour isoler le bruit et les vibrations.

La **figure 2.6** montre la conception mécanique 3D des pieds réalisée sur SolidWorks.

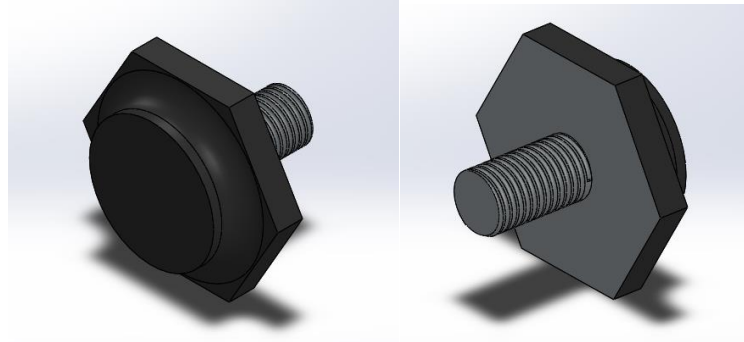


Figure. 2.6. Conception mécanique des pieds sur SolidWorks.

La mise en plan et les dimensions réelles du pied sont présentées sur la **figure 2.7**.

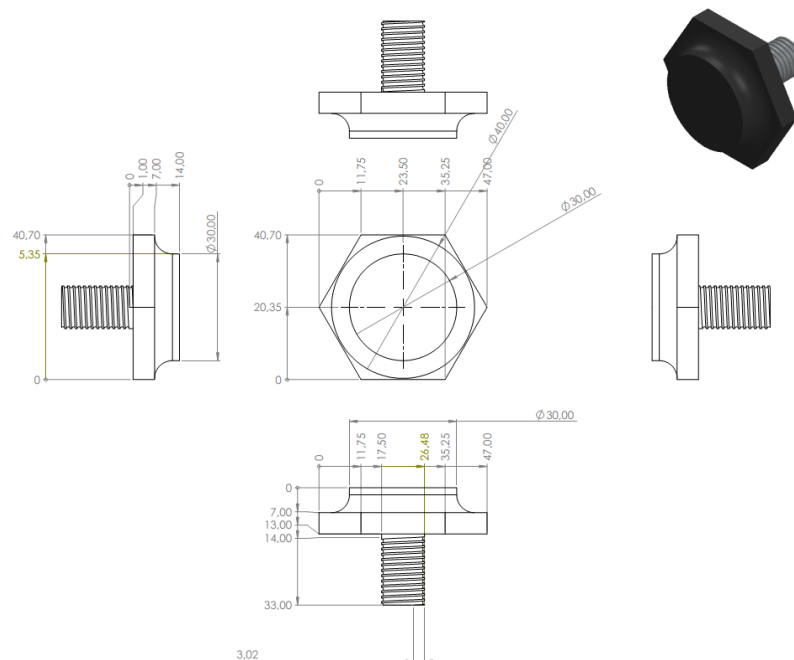


Figure. 2.7. Mise en plan du pied sur SolidWorks.

2.3.4 Poignées

Des poignées solides en acier ont été installés sur les côtés du banc d'essai, Ces poignées permettent de déplacer l'appareil d'un endroit à un autre facilement et surement.

La **figure 2.8** montre la conception mécanique 3D des poignées réalisée sur SolidWorks.

La mise en plan et les dimensions réelles du support de fixation sont présentées sur la **figure 2.11**.

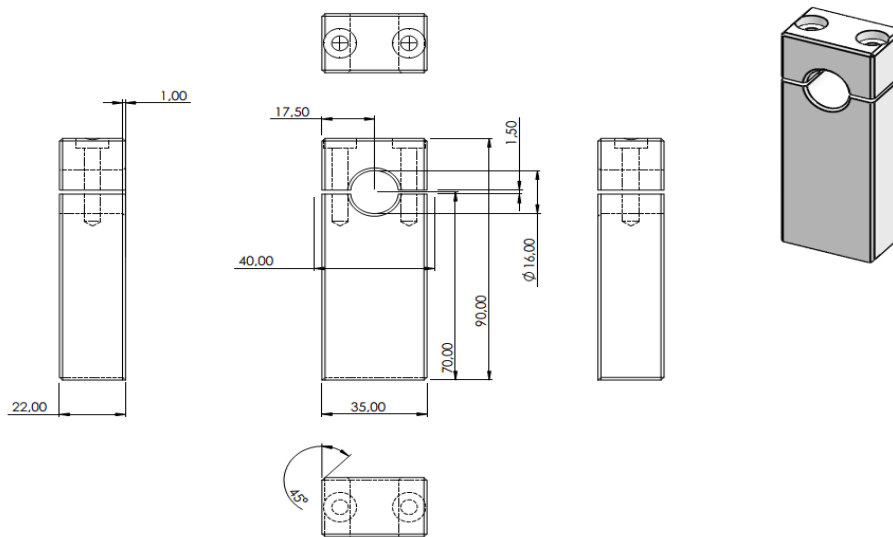


Figure. 2.11. Mise en plan du support de fixation sur SolidWorks.

2. 4 Conception de la partie électrique

2. 4. 1 Pompe centrifuge

La Pompe Centrifuge QB 60 est une pompe centrifuge monophasée couramment utilisée pour pomper de l'eau ou des liquides similaires dans des applications domestiques ou agricoles. Elle est fabriquée en Italie et possède une puissance de 0,5 CV (chevaux-vapeur) avec une capacité de pompage maximale de 40 litres par minute.

Cette pompe est équipée d'un moteur électrique et d'une roue centrifuge en laiton résistant à la corrosion, ce qui en fait une option fiable pour les applications nécessitant un débit constant et une pression modérée. Elle est souvent utilisée dans les systèmes d'irrigation, les fontaines, les systèmes de circulation d'eau domestiques et les systèmes de filtration.

Cependant, il est important de noter que la pompe centrifuge QB 60 n'est pas adaptée aux applications industrielles nécessitant une pression élevée ou un débit important. Il est également important de s'assurer que la pompe est correctement installée et entretenue pour assurer une performance optimale et prolonger la durée de vie de la pompe.

La **figure 2.12** montre la conception mécanique 3D de la pompe réalisée sur SolidWorks.

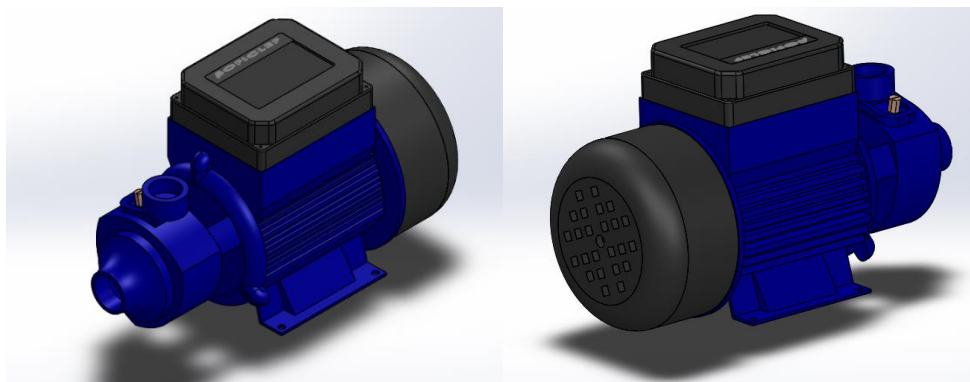


Figure. 2.12. Conception mécanique de la pompe sur SolidWorks.

Le **tableau 2.1** donne les différentes des caractéristiques de la pompe et du moteur d'entraînement, d'après le tableau la vitesse maximale de rotation est de 2850 [tr/min] et la pression maximale de la pompe atteint les 4 bars.

Tableau 2.1 Tableau des caractéristiques de la pompe

Caractéristiques du moteur d'entraînement :		Caractéristiques de la pompe :	
Carter de moteur	Aluminium	Hauteur de refoulement max	40[m]
Arbre	Acier Stainless	Diamètre	5[cm]
Position d'arbre	Horizontale	Débit de refoulement max	40 [L/min]
Refroidissement	Ventilation externe	Hauteur de refoulement min	8[m]
Alimentation	220[V] 1.8 [A]	Le joint mécanique	Carbone/céramique e/acier inoxydable
Puissance absorbée	370[W]		
Fréquence	50 [HZ]	Le rotor	Laiton/P.P. O/acier inoxydable
Vitesse de rotation	0...2850 [tr.min ⁻¹]		

La **figure 2.13** montre vue éclatée de 3D de la pompe réalisée sur SolidWorks.

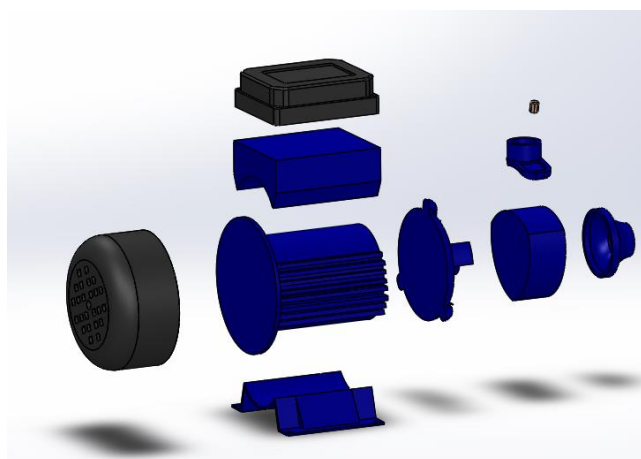


Figure. 2.13. Vue éclatée de la pompe.

2.4.2 Débitmètre

En général un débitmètre permet la mesure du débit circulant dans une conduite, plusieurs modèles de technologies différentes existent sur le marché. Le modèle YF-G1 est un type de débitmètre d'eau basé sur le principe de la turbine. L'écoulement de l'eau dans le débitmètre entraîne la rotation de cette dernière, le nombre de tour de la turbine est proportionnel au débit.

Voici quelques caractéristiques du débitmètre YF-G1 :

- Type de débitmètre : débitmètre à turbine
- Plage de débit : 1 à 3600[L/h].

La **figure 2.14** montre la conception mécanique 3D du débitmètre réalisée sur SolidWorks.

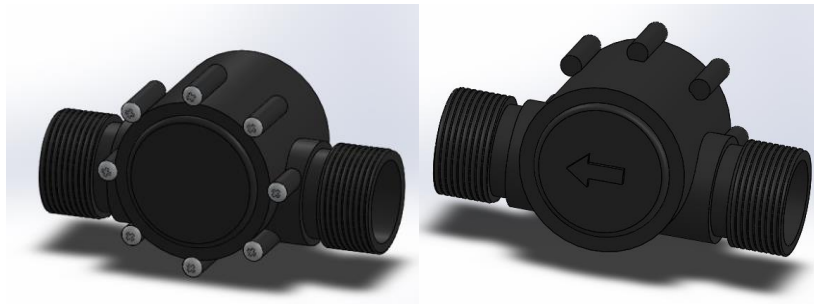


Figure. 2.14. Conception mécanique du débitmètre sur SolidWorks.

La mise en plan et les dimensions réelles du débitmètre sont présentées dans la **figure (2.15)**.

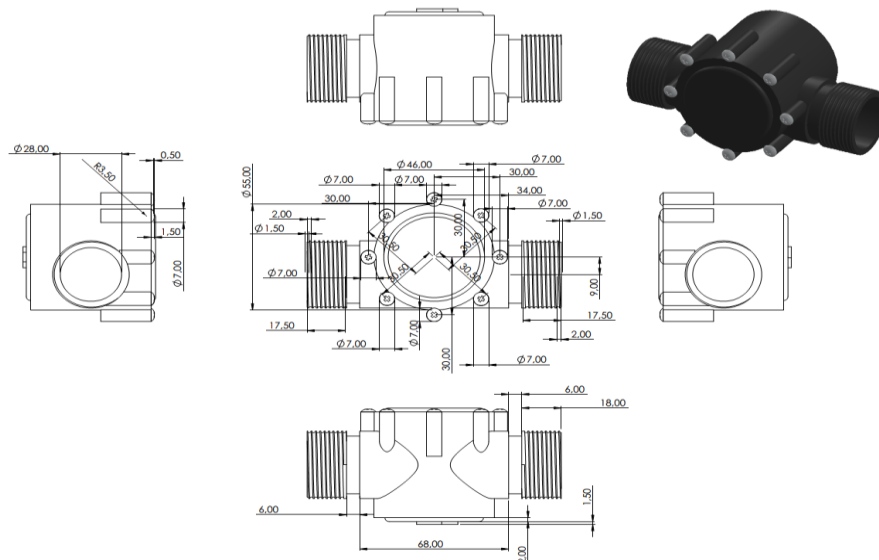


Figure. 2.15. Mise en plan du débitmètre sur SolidWorks.

2.4.3 Électrovanne à 3 voies

Cette électrovanne à bille en laiton comporte un interrupteur manuel et un actionneur électrique, l'actionneur offre la possibilité de contrôler manuellement l'ouverture et la fermeture de la vanne, ainsi que le contrôle à distance à l'aide d'un signal électrique. Elle permet à l'eau de

circuler dans deux directions différentes en fonction de sa position, Cette appareil permet de sélectionner le type de montage des pompes (montage série ou montage parallèle).

Description de l'électrovanne :

- Dimension : Ø 16 [mm]
- Type : trois voies
- Tension : AC 220[V] 50/60[Hz]

La **figure 2.16** montre la conception mécanique 3D de l'électrovanne à 3 voies réalisée sur SolidWorks.

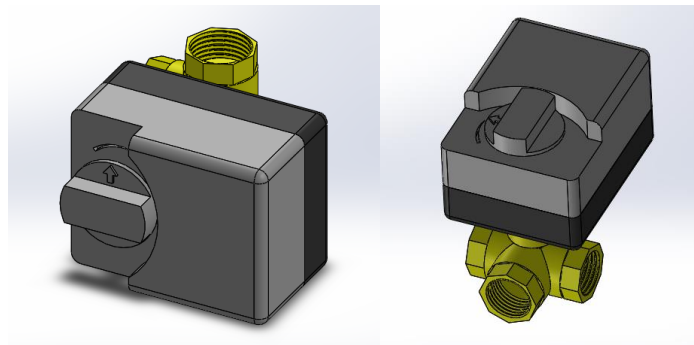


Figure. 2.16. Conception mécanique de l'électrovanne à 3 voies sur SolidWorks.

La mise en plan et les dimensions réelles de l'électrovanne à 3 voies sont présentées dans la **figure 2.17**.

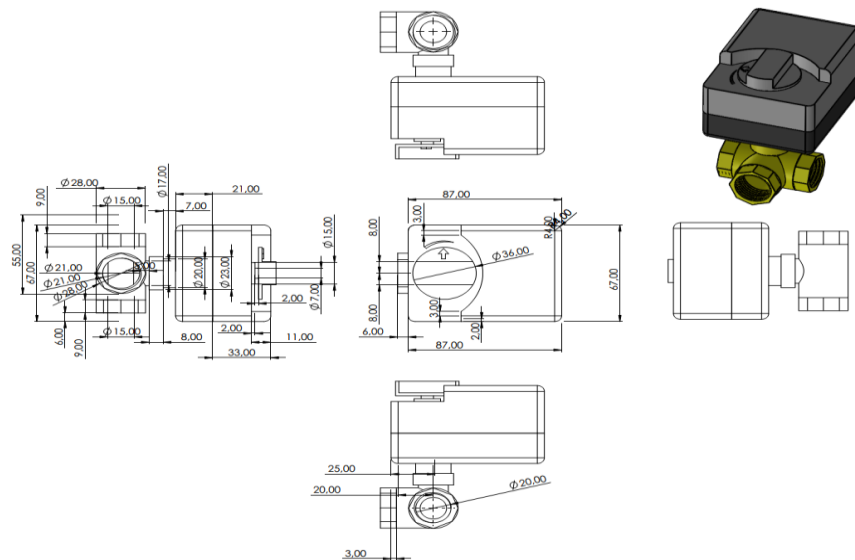


Figure. 2.17. Mise en plan de l'électrovanne à 3 voies sur SolidWorks.

2. 4. 4 Électrovanne à 2 voies

Cette électrovanne à bille en laiton avec un interrupteur manuel et un actionneur électrique, l'actionneur offre la possibilité de contrôler manuellement l'ouverture et la fermeture de la vanne, ainsi que le contrôle à distance à l'aide d'un signal électrique. Elle permet à l'eau de circuler dans

2.4.5 Électrovanne TOR

Cette électrovanne du type tout ou rien (TOR) est fermée par défaut en l'absence du courant électrique. Lorsqu'un courant électrique est appliqué, l'actionneur électromagnétique s'active permettant ainsi le passage du liquide. Cette électrovanne est installée dans le circuit d'aspiration de la deuxième pompe, autorisant à volonté l'ouverture ou la fermeture du passage.

La **figure 2.20** montre la conception mécanique 3D de l'électrovanne FCD-180B réalisée sur SolidWorks.

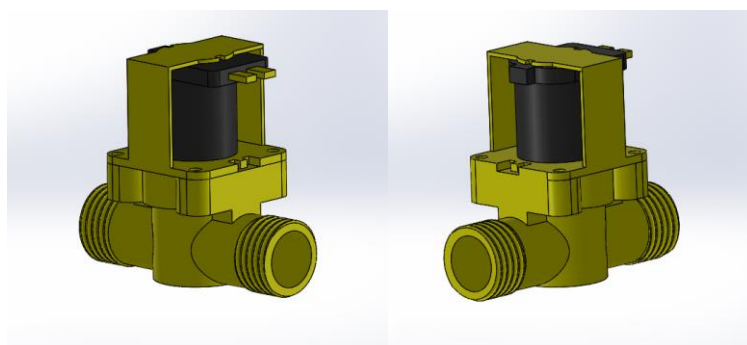


Figure. 2.20. Conception mécanique de l'électrovanne FCD-180B sur SolidWorks.

La mise en plan et les dimensions réelles d'électrovanne FCD-180B sont présentées sur la **figure 2.21**.

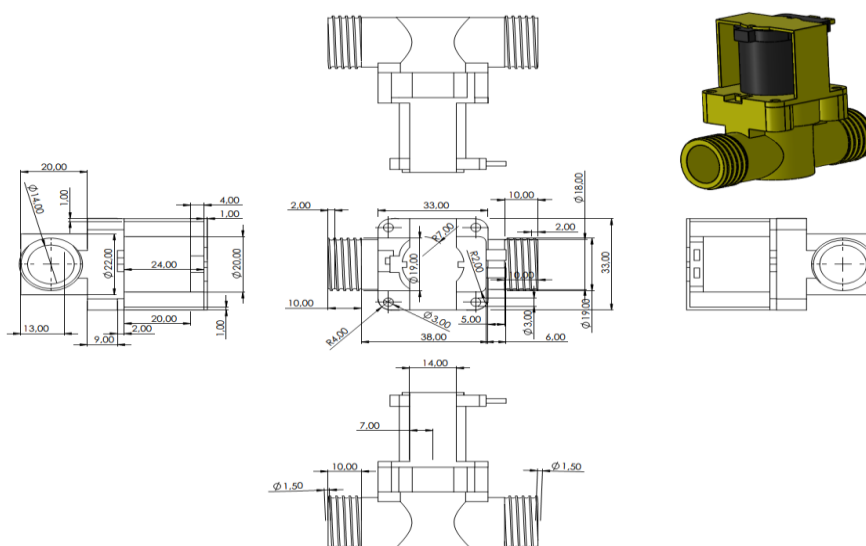


Figure. 2.21. Mise en plan de l'électrovanne FCD-180B sur SolidWorks.

2.4.6 Capteur de pression

C'est un capteur de pression piézoélectrique qui génèrent une charge électrique en réponse à une déformation mécanique. Lorsqu'une pression est appliquée, elle provoque une déformation dans le cristal piézoélectrique, générant une charge électrique. Cette charge est ensuite mesurée pour déterminer la pression, des composants électroniques permettant de transformer ces données

Le variateur de vitesse utilisé dans la réalisation du banc d'essai a les caractéristiques suivantes :

- Tension d'entrée : 220[V]
- Puissance maximale : 2000[w]
- Tension réglable : 50-200 [V]

La **figure 2.24** montre le variateur de vitesse utilisé.



Figure. 2.24. Variateur de vitesse (MY-9892).[11]

2.4.8 Capteur de tension

Le capteur de tension est un dispositif électronique qui permet la mesure de la tension présente dans un circuit électrique. Il convertit la grandeur électrique de la tension en une grandeur physique ou électrique mesurable. Ce capteur est branché aux bornes du circuit d'alimentations du moteur électrique entraînant la pompe.

La **figure 2.25** montre le capteur de tension ZMPT101B utilisé.

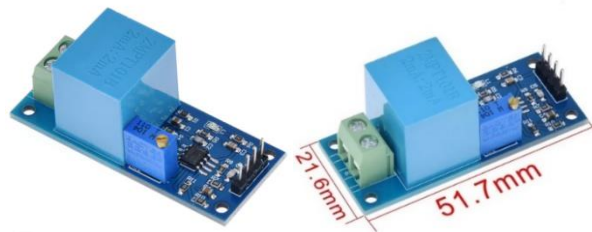


Figure. 2.25. Capteur de tension ZMPT101B. [12]

2.4.9 Capteur de courant

Le capteur de courant est un dispositif utilisé pour mesurer le courant électrique qui circule dans un circuit. Il permet de convertir la grandeur électrique du courant en une grandeur physique ou électrique mesurable. Ce capteur est monté en série sur le circuit électrique alimentant le moteur de la pompe.

La **figure 2.26** montre le capteur de courant ACS712 10A utilisé.

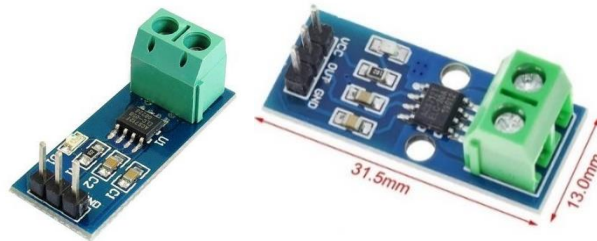


Figure. 2.26. Capteur de courant ACS712 10A.[9]

2.4.10 Carte Arduino UNO

L'Arduino Uno est une carte de développement open-source, qui facilite la création de projets électroniques. Elle intègre un microcontrôleur ATmega328P, capable de recevoir des instructions et de contrôler des composants électroniques. L'insertion de cette carte permet l'acquisition en temps réel des données émises par les capteurs, et permettre le contrôle à distance du banc d'essai.

La **figure 2.27** montre la carte Arduino UNO utilisée.[5]

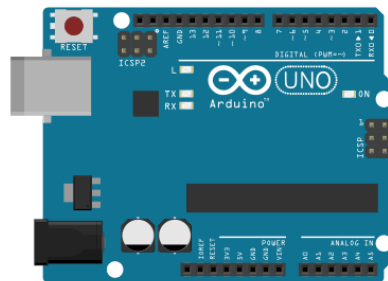


Figure. 2.27. Carte électronique Arduino UNO.

2.4.11 Platine d'expérimentation

Une platine d'expérimentation (appelée breadboard), permet de réaliser des prototypes de montages électroniques sans soudure. Cette platine est utilisée comme une boîte de dérivation pour une meilleure organisation du circuit électrique de commande.

La **figure 2.28** montre la platine d'expérimentation utilisée.

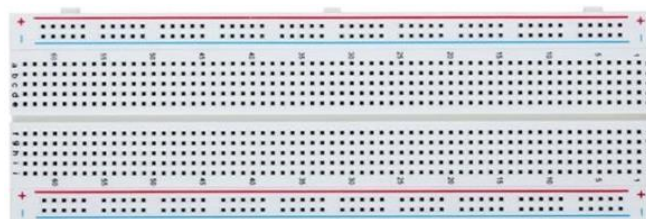


Figure. 2.28. Platine d'expérimentation.[10]

2.4.12 Relais électrique

Le relais électrique est un interrupteur qui se commande avec une tension continue de faible puissance, la partie interruptrice sert à piloter des charges secteur de forte puissance (jusqu'à 10A

couramment), ce relais électrique est utilisé pour activer ou désactiver les pompes, les électrovannes et les lampes lumineuses.[4]

Le relais électrique utilisé a les caractéristiques suivantes :

- Tension d'alimentation : 5[V]
- Courant de travail : 2 [A]

La **figure 2.29** montre le relais électrique utilisé.

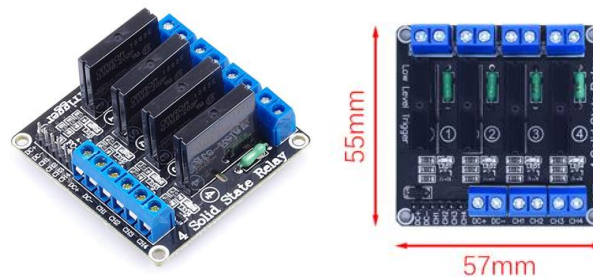


Figure. 2.29. Relais électrique FC-82.[14]

2.4.13 Module wifi

Le capteur wifi ESP8266 est un circuit intégré avec un microcontrôleur permettant la connexion Wi-Fi. Ce module est intégré dans le circuit de commande pour le contrôle à distance du banc d'essai.

La **figure 2.30** montre le capteur wifi utilisé.

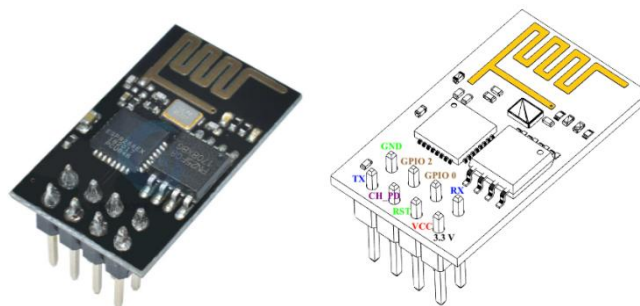


Figure. 2.30. Capture wifi ESP8266. [13]

2.4.14 Module Bluetooth

Le module Bluetooth HC-05 permet de faire de la communication sans fil avec un ordinateur, smartphone ou un autre module Bluetooth. Ce module est intégré dans le circuit de commande pour permettre la communication avec l'application smartphone développée, ce qui assure le contrôle de près du banc d'essai.[16]

La **figure 2.31** montre le capteur Bluetooth utilisé.

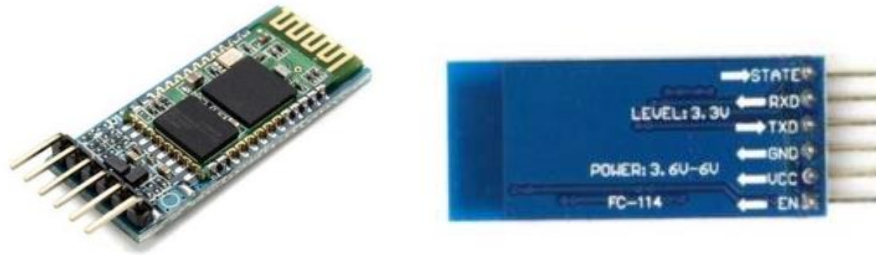


Figure. 2.31. Capteur Bluetooth HC-05. [15]

2.4.15 Indicateur lumineux

L'indicateur lumineux 240[V] bleu est un dispositif électrique, conçu pour émettre une lumière de couleur bleu lorsqu'il est alimenté par une tension de 240 [V]. Ces indicateurs lumineux serviront à :

- Indiquer l'état marche/arrêt des pompes 1 et 2
- Indiquer le type de montage série/parallèle

La **figure 2.32** montre l'indicateur lumineux utilisé.



Figure. 2.32. Indicateur lumineux 240 [V] bleu.

2.4.16 Répartiteur électrique

Le répartiteur électrique est un dispositif utilisé dans un tableau électrique pour répartir l'énergie électrique vers différents circuits ou appareils électriques. Ce répartiteur est utilisé comme une boîte de dérivation pour une meilleure organisation du circuit électrique de puissance.

La **figure 2.33** montre le répartiteur électrique utilisé

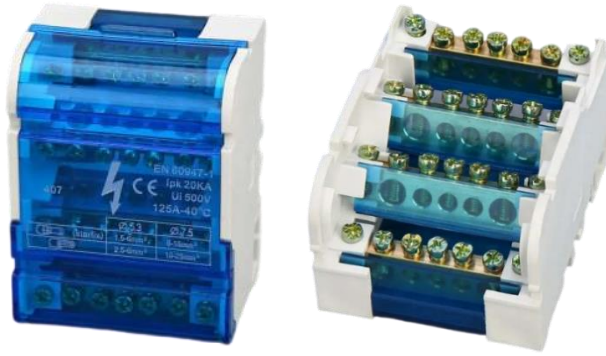


Figure. 2.33. Répartiteur électrique WKH407.[8]

2.4.17 Adaptateur d'alimentation

Un adaptateur d'alimentation est un appareil électronique permettant de convertir la tension et le courant d'entrée, pour les rendre compatible à un appareil spécifique. Cette alimentation électrique est conçue pour alimenter l'Arduino en 9[V] et 2[A].

La **figure 2.34** montre l'adaptateur d'alimentation utilisé.

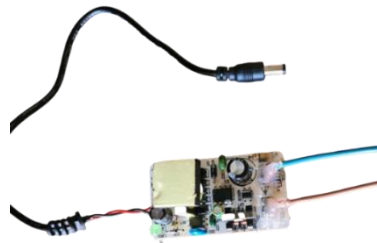


Figure. 2.34. Adaptateur alimentation AC DC.

2.5 Conception de la partie hydraulique

2.5.1 Rotamètre

Le rotamètre est un dispositif de mesure du débit qui se compose d'un tube vertical conique, la mesure se fait en repérant la position d'un flotteur situé à l'intérieur du tube, cet appareil est utilisé au départ pour étalonner le capteur de débit, après il servira comme appareil de mesure de la valeur de débit en [L/h].[6]

Le rotamètre utilisé a les caractéristiques suivantes :

- Matériau : plastique et métal
- Plage de débit de mesure : 0-1600 [L/h]
- Installation : verticalement

La **figure 2.35** montre la conception mécanique 3D du rotamètre réalisée sur SolidWorks.

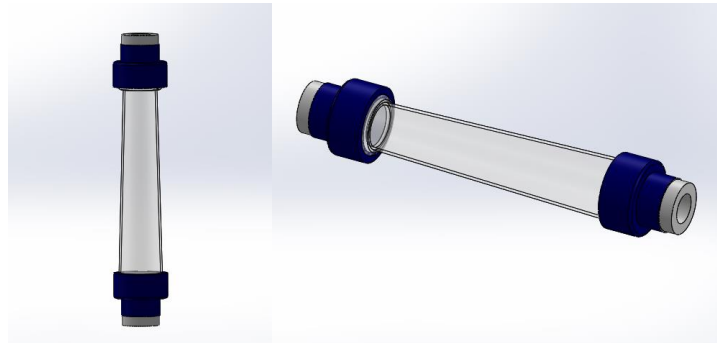


Figure. 2.35. Conception mécanique du rotamètre LZS-25 sur SolidWorks.

La mise en plan et les dimensions réelles du rotamètre sont présentées dans la **figure 2.36**

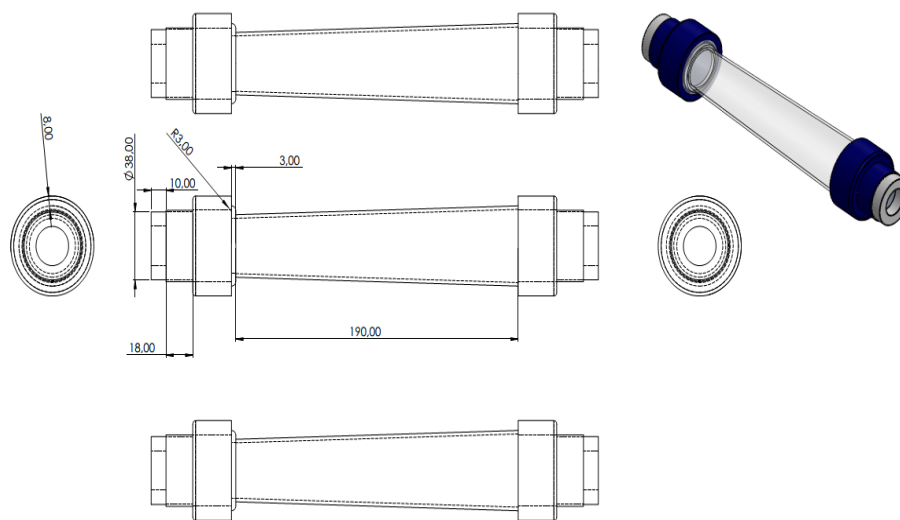


Figure. 2.36. Mise en plan du rotamètre LZS-25 sur SolidWorks.

2.5.2 Manomètre

Un manomètre est un dispositif qui mesure et affiche la pression à l'intérieur d'un circuit hydraulique, cet appareil est utilisé au départ pour étalonner les capteurs de pression, après il servira comme appareil de mesure de la valeur de la pression en [bar].

La **figure 2.37** montre le manomètre utilisé :



Figure. 2.37. Manomètre.[7]

2.5.3 Conduites

La conduite d'eau en plastique transparent est un type de tuyau utilisé pour le transport de l'eau. Il est considéré comme un excellent choix, il permet de visualiser le flux d'eau et présente des caractéristiques de résistance au bruit, à la corrosion et à la flexibilité.

Le tuyau utilisé a les caractéristiques suivantes :

- Matériau : PVC
- Couleur : transparent

La **figure 2.3** montre la conduite utilisée



Figure. 2.38. Tuyau pvc transparent.

2. 5. 4 Liquide utilisé

Le liquide antigel coloré permet à la fois de protéger les pompes et le circuit hydraulique contre la corrosion, et permis la visualisation de l'écoulement dans les différentes parties du circuit hydraulique.

La **figure 2.39** montre liquide antigel utilisé.



Figure. 2.39. Antigél de marque NAFTAL.

2. 6 Autres accessoires

Dans cette partie, nous présenterons les composants qui ont été employés pour établir les connexions entre tous les éléments hydrauliques, tel que les coudes, les raccords, les mamelons et les robinets...etc.

2. 6. 1 Coudes

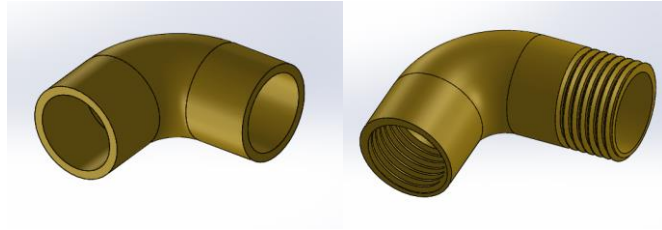


Figure. 2.40. Conception mécanique des coudes sur SolidWorks.

2. 6. 2 Mamelons

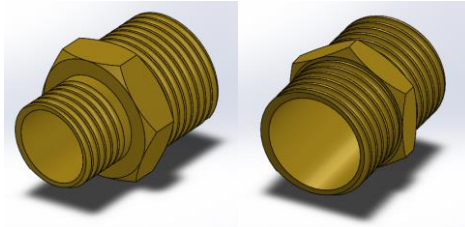


Figure. 2.41. Conception mécanique des mamelons (male-male) sur SolidWorks.

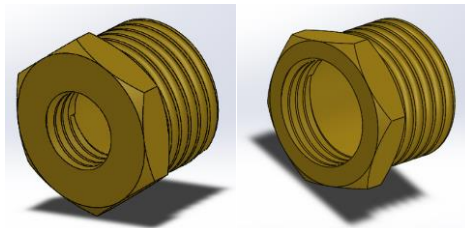


Figure. 2.42. Conception mécanique des raccords (male- femelle) sur SolidWorks.

2. 6. 3 Té femelle en laiton

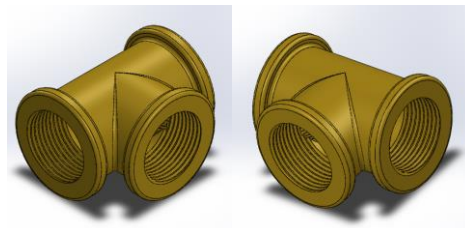


Figure. 2.43. Conception mécanique du Té femelle en laiton sur SolidWorks.

2. 6. 4 Coudes en pex

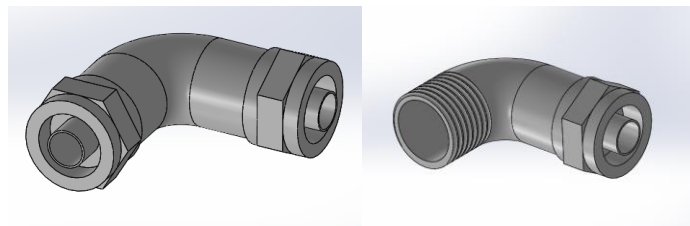


Figure. 2.44. Conception mécanique des coudes en pex sur SolidWorks.

2. 6. 5 Raccord (femelle-male) MC à visser

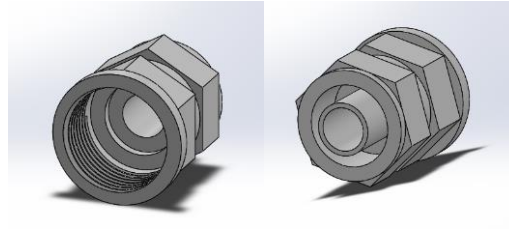


Figure. 2.45. Conception mécanique du raccord femelle sur SolidWorks.

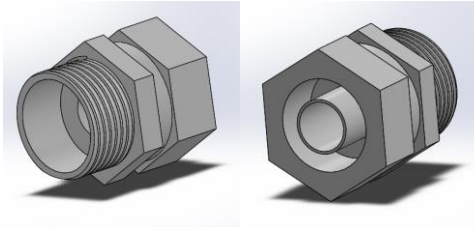


Figure. 2.46. Conception mécanique du raccord male sur SolidWorks.

2. 6. 6 Raccord mixte (male-femelle)

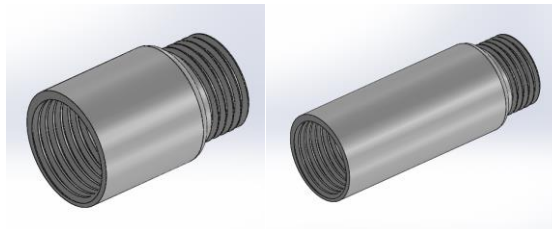


Figure. 2.47. Conception mécanique des raccords mixtes male-femelle sur SolidWorks.

2. 6. 7 Robinet d'eau

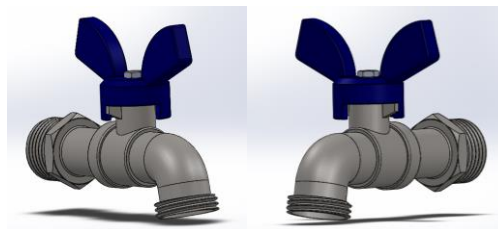


Figure. 2.48. Conception mécanique du robinet d'eau.

2. 7 Conception de la partie commande

2. 7. 1 Interconnexion et câblage

Après avoir obtenu la forme finale du banc d'essai, nous passons à l'étape suivante qui est la réalisation des extensions électriques entre les différentes pièces électriques, (Carte Arduino, capteurs de pression, capteur de tension, capteur de courant, électrovannes, pompes, variateur de vitesse, débitmètre, indicateur lumineux et alimentation).

La **figure 2.49** représente le schéma de câblage électrique de la partie commande et puissance du banc d'essai.

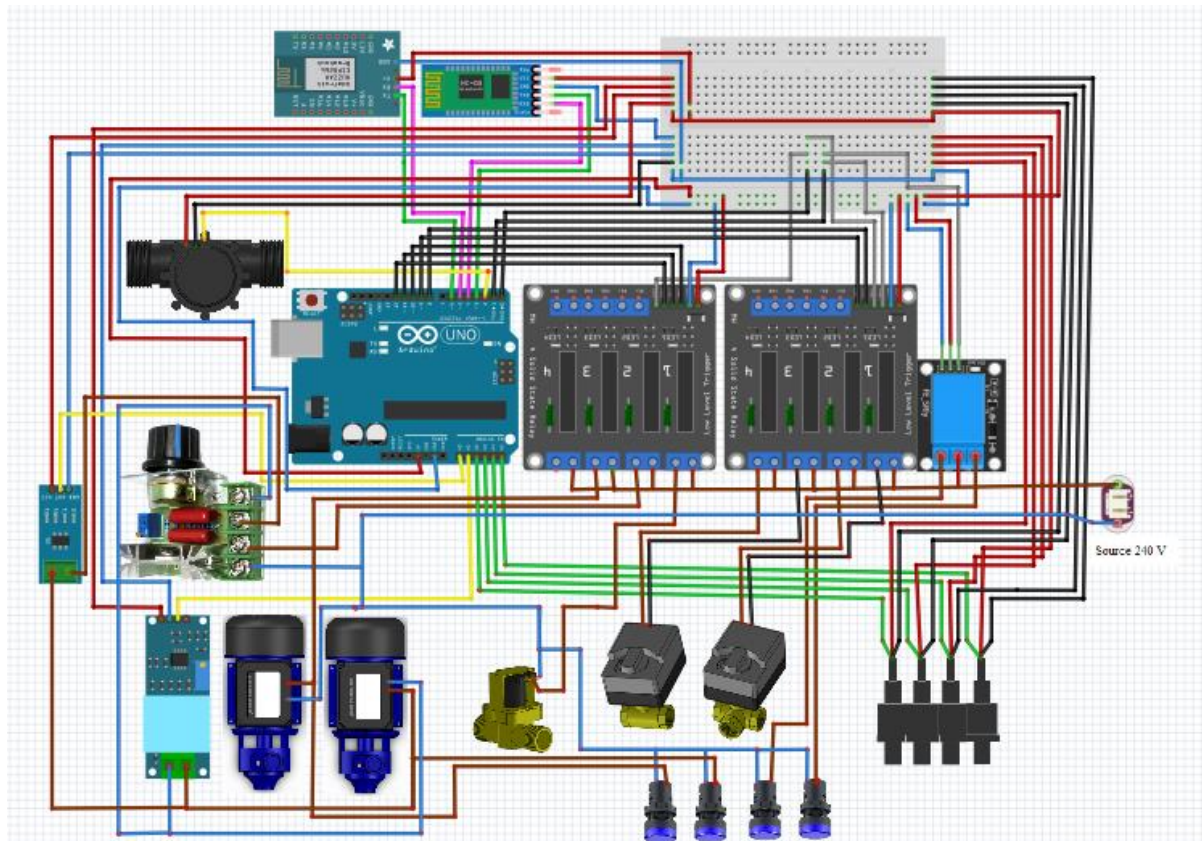


Figure. 2.49. Schéma électrique du banc d'essai.

Les Pins utilisées pour le câblage des différents capteurs et actionneurs avec l'Arduino sont :

- Capteur de courant est connecté au Pin (A0).
- Capteur de tension est connecté au Pin (A1).
- Les capteurs de pression (P1, P2, P3 et P4) sont connectés aux Pins (A2, A3, A4 et A5) respectivement.
- Le débitmètre est connecté au Pin (2).
- Les relais électriques sont connectés aux Pins (3, 4, 5, 6, 7, 8 et 9).

2. 8 Assemblage du banc d'essai sur SolidWorks

Une fois la conception des composants du banc d'essai est terminée, on commencera le processus d'assemblage, dans le but d'obtenir une conception mécanique final et prête pour une exécution réelle, les étapes suivies durant le processus d'assemblage sur SolidWorks sont :

2. 8. 1 Assemblage 1

Dans cette étape on a procédé à l'assemblage et l'habillage du châssis et à la fixation des poignées et des pieds comme présenté sur la **figure 2.50**.

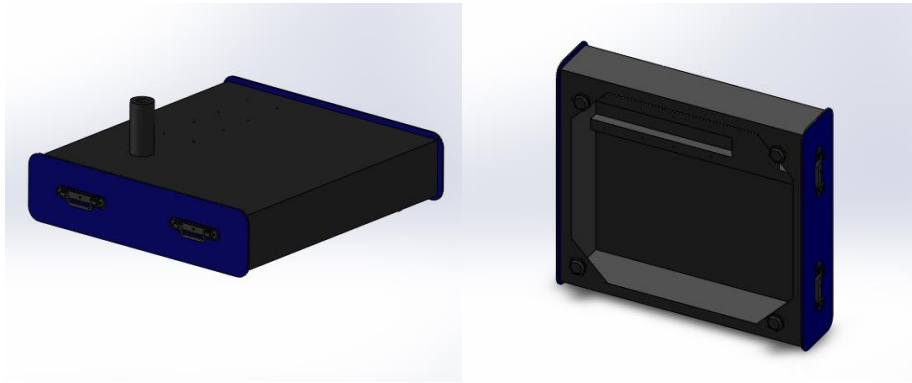


Figure. 2.50. Conception mécanique de l'assemblage et l'habillage du châssis sur SolidWorks.

2. 8. 2 Assemblage 2

Dans cette deuxième étape on a procédé à l'assemblage des deux pompes sur le châssis, des boulons et rondelles en caoutchouc ont été utilisés pour diminuer les bruits et les vibrations, comme présenté sur la figure 2.51.

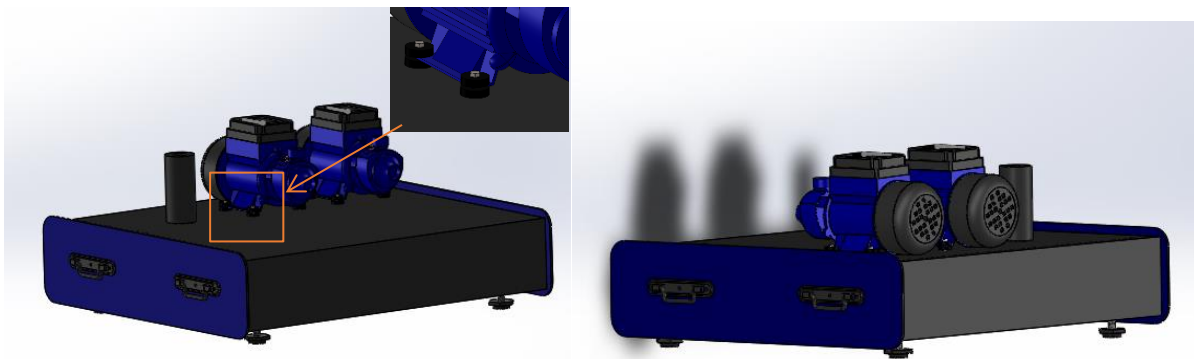


Figure. 2.51. Conception mécanique sur SolidWorks de l'assemblage des deux pompes sur le châssis.

2. 8. 3 Assemblage 3

Dans cette troisième étape on a procédé à l'assemblage du réservoir sur le châssis, comme présenté sur la figure 2.52.

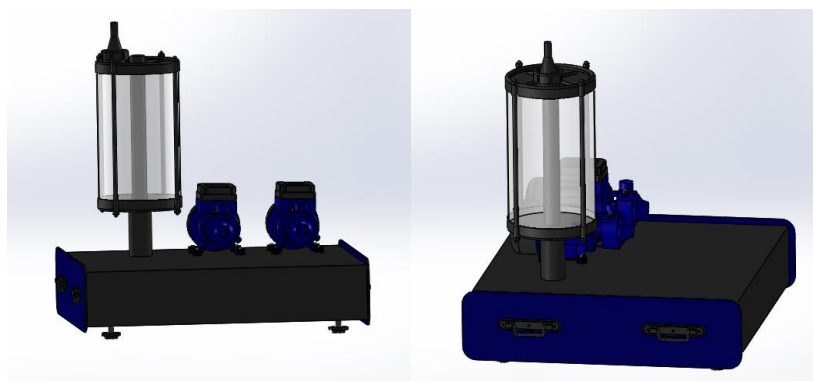


Figure. 2.52. Conception mécanique de l'assemblage du réservoir sur SolidWorks.

2. 8. 4 Assemblage 4

En fin la **figure 2.53** présente l'assemblage final de toutes les parties et composants du banc d'essai, le circuit hydraulique avec ces accessoires, les actionneurs, les appareils de mesures, les indicateurs lumineux...etc. Ainsi que notre logo et logo de l'université.

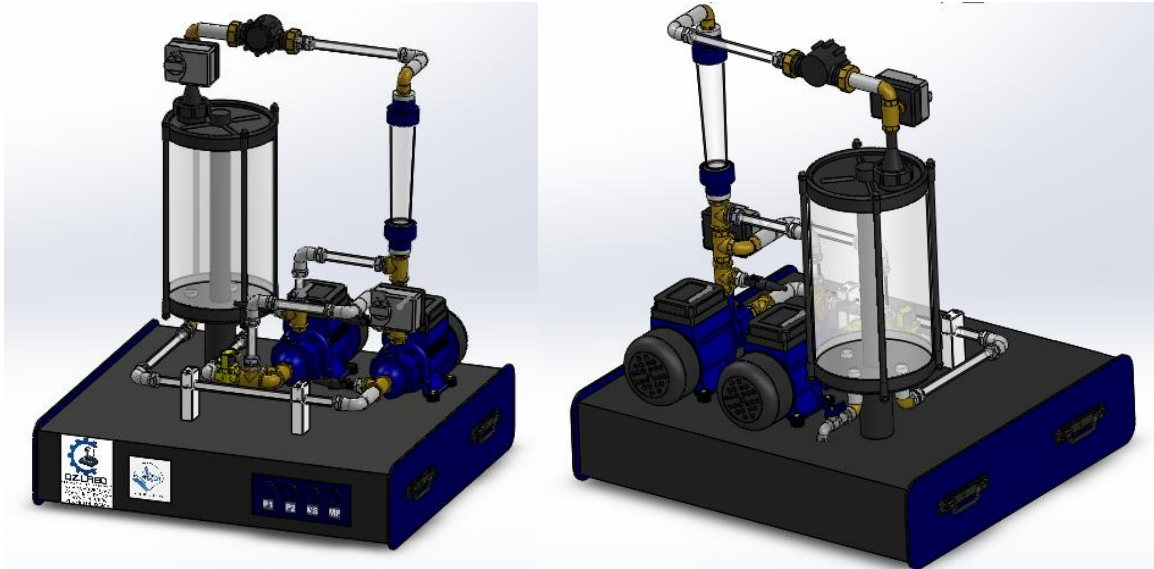


Figure. 2.53. Conception mécanique finale du banc d'essai sur SolidWorks.

2. 9 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les conceptions mécaniques des différentes pièces et parties du banc d'essai sur SolidWorks, nous avons réussi à concevoir, modéliser et assembler facilement les différentes parties. Nous avons effectué des tests et des simulations préliminaires à trois niveaux différents : la conception en 3D, le mise en plane et l'assemblage des pièces.

L'application Fritzing nous a permis de concevoir facilement le circuit électrique de commande et de puissance, (Carte Arduino, capteurs de pression, capteur de tension, capteur de courant, électrovannes, pompes, variateur de vitesse, débitmètre, indicateur lumineux et alimentation). Cela nous a permis d'obtenir un premier aperçu avant de nous rendre sur le terrain et de cerner les problèmes persistants, tout en économisant temps et argent.

Chapitre 3 : Réalisation et test pratique du banc d'essai

Chapitre 3 Réalisation et test pratique du banc d'essai

3. 1 Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter les étapes de réalisation pratique du banc d'essai. Une fois cela terminé, on procède au développement d'une interface homme-machine, permettant le contrôle à distance et l'acquisition des données.

La procédure de l'étalonnage des capteurs de pression et débit sera discutée en détail dans ce chapitre.

Enfin, les courbes caractéristiques des performances des pompes centrifuges seront enregistrées à distance et en temps réel via l'interface, cela pour les deux types de montage série et parallèle.

3. 2 Etapes de réalisation pratique du banc d'essai

3. 2. 1 Etape 1 : réalisation du châssis

- Achat et découpe de parties de châssis.
- Soudure des parties du châssis, dans le respect des dimensions proposées.
- Application d'un revêtement protecteur pour prévenir la corrosion voir **figure 3.1**.



Figure. 3.1. Structure du châssis après soudure et revêtement.

3. 2. 2 Etape 2 : habillage châssis par Alucobond

- Une fois le châssis fabriqué et préparé, la phase d'habillage utilise un panneau en Alucobond noir (mat) au milieu, et bleu sur les deux côtés.
- Pour assurer la stabilité de la machine et minimiser les vibrations, des pieds en caoutchouc ont été mis en place.

- Des poignées ont été ajoutées sur les côtés pour qu'il soit facile de soulever le dispositif d'un endroit à un autre voir **figure 3.2**.

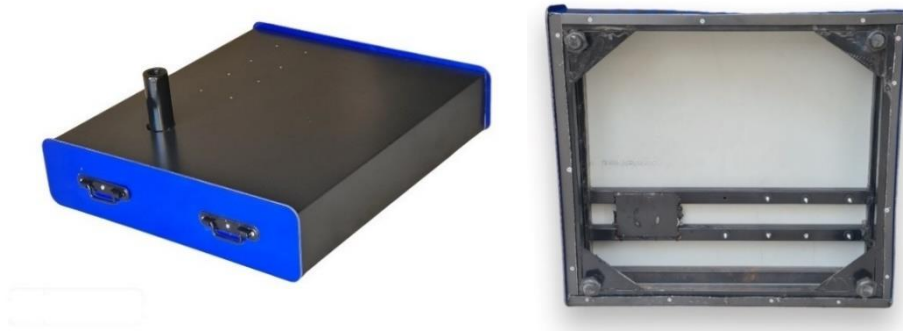


Figure. 3.2. Structure du châssis après habillage.

3. 2. 3 Etape 3 : montage des pompes

- L'installation des deux pompes a été réalisée en conformité avec les spécifications susmentionnées.
- Montage des pompes en utilisant des rondelles en caoutchouc comme isolateur de son et vibration voir **figure 3.3**.



Figure. 3.3. Banc d'essai après l'installation des deux pompes.

3. 2. 4 Etape 4 : montage du réservoir

La **figure 3.4** montre le banc d'essai une fois le réservoir installé à la verticale sur le côté du châssis.



Figure. 3.4. Montage du réservoir sur le banc d'essai.

3. 2. 5 Etape 5 : obtention de la version finale du banc d'essai.

Après :

- L'installez tous les capteurs et les électrovannes.
- La fixation des conduites en utilisant les accessoires de fixation.
- L'Application du téflon liquide pour assurer l'étanchéité du circuit.
- Le remplissage du réservoir avec du liquide antigel.

Le prototype final obtenu et représenté sur la figure 3.5.

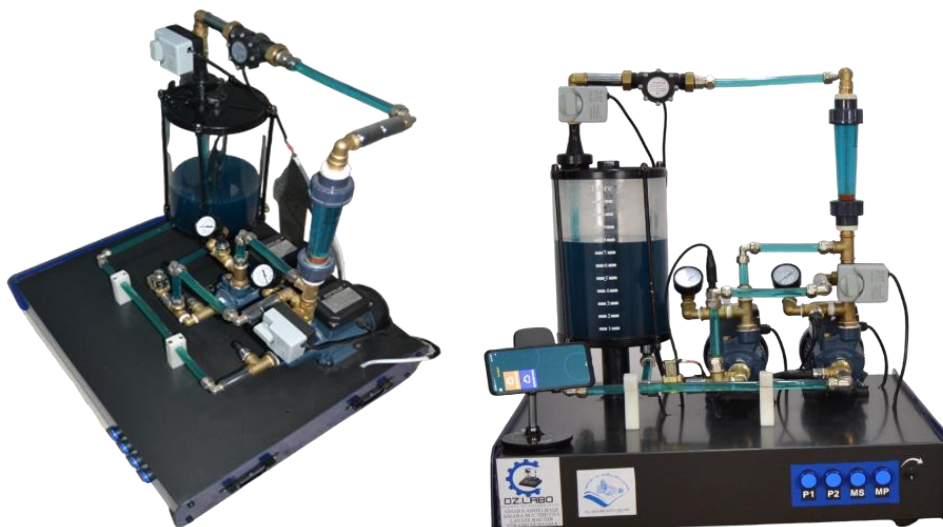


Figure. 3.5. Photo réelle du banc d'essai réalisée.

3.2.6 Etape 6 : réalisation du câblage électrique

Le câblage électrique entre les différentes pièces, (Carte Arduino, capteurs de pression, capteur de tension, capteur de courant, électrovannes, pompes, variateur de vitesse, débitmètre, indicateur lumineux et alimentation), est représenté sur la **figure 3.6**.

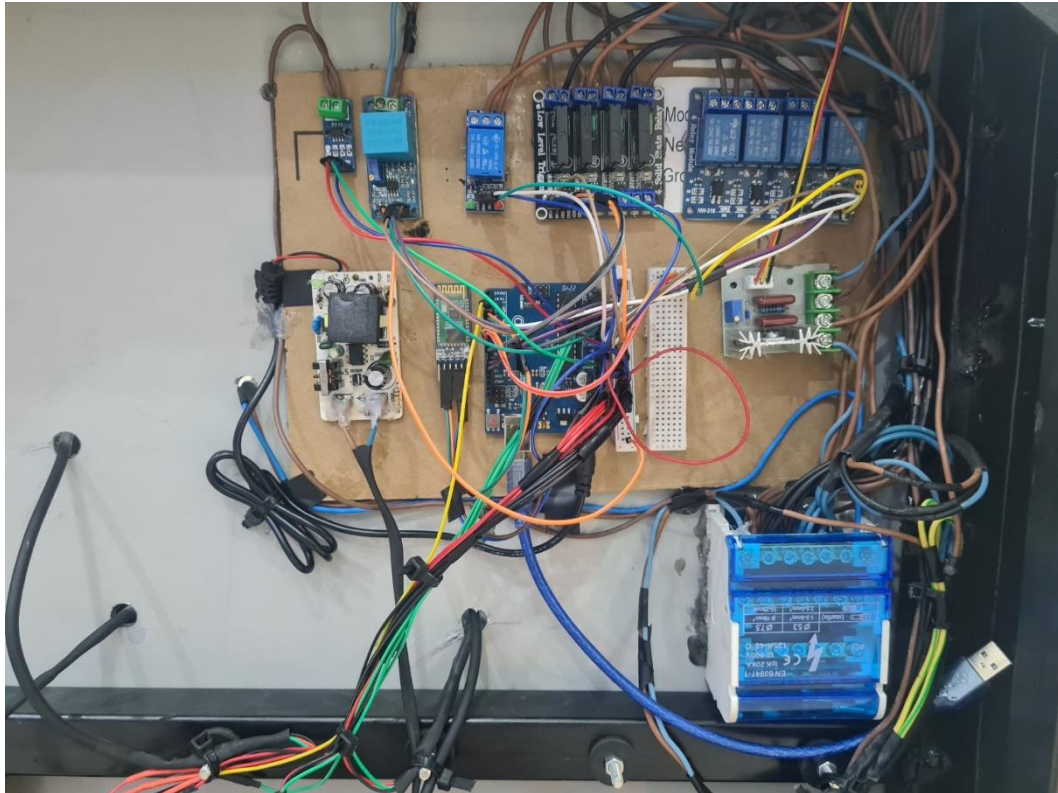


Figure. 3.6. Câblage électrique du banc d'essai.

3.3 Interface

L'interface graphique a été développée en utilisant l'application Remote XY, cette dernière est un moyen facile de créer et d'utiliser une interface utilisateur graphique, ce qui permis le contrôle du banc d'essai via un smartphone ou une tablette.

Méthodes de connexion prises en charge :

- Internet sur un serveur cloud avec capteur Wifi : permet la communication et le contrôle à distance du banc via l'application smartphone développée.
- Bluetooth : permet la communication et le contrôle de près du banc d'essai via l'application smartphone développée.

Une image d'interface graphique développée est présentée dans la figure suivante :



Figure. 3.7. Interface développée pour le contrôle du banc d'essai.

3. 4 Réalisation de l'étalonnage des capteurs

L'étalonnage est une opération qui concerne les appareils de mesure. Deux appareils différents de conception différente, mais aussi deux appareils de la même gamme (même marques, même modèles) ne réagissent pas exactement de la même manière. Il faut donc une procédure permettant d'obtenir le même résultat à partir de la même situation initiale.

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

3. 4. 1 Étalonnage des capteurs du pression

Afin de résoudre le problème des écarts de mesure enregistrés lors des essais entre le capteur de pression P1 et le manomètre, on a procédé à une série de mesures, pour définir les valeurs moyennes de ces capteurs à partir des valeurs max et min dans le programme Arduino et les valeurs du manomètre.

Les résultats des mesures sont présentés sur les tableaux suivants :

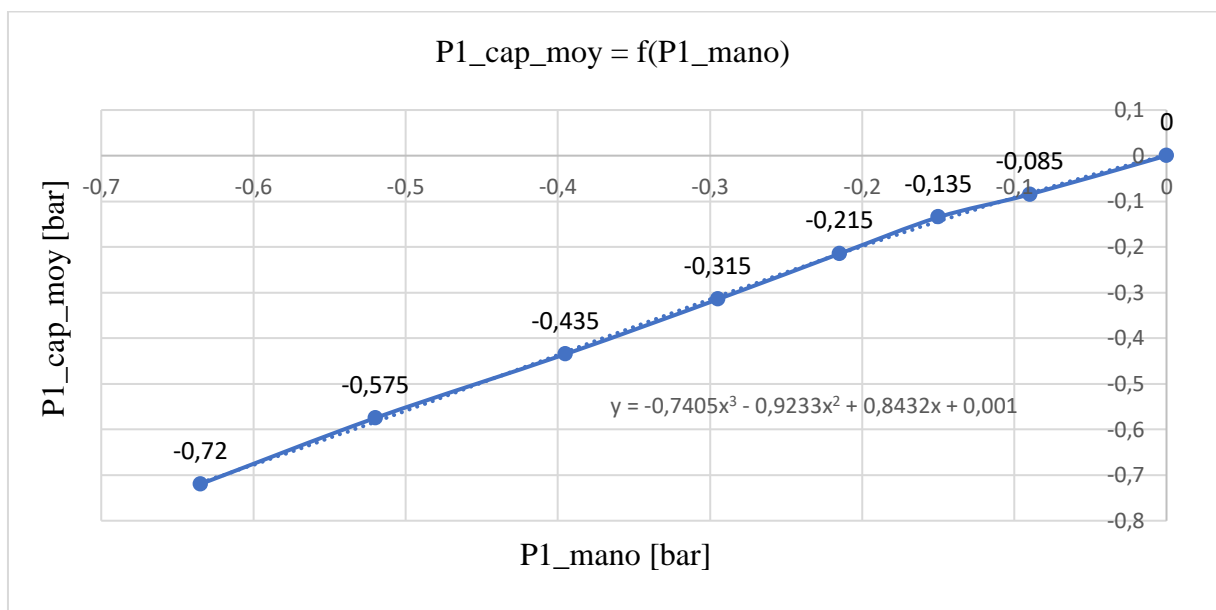
- **Étalonnage du capteur de pression P1**

Les mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du premier capteur de pression sont représentées sur le **tableau 3.1**.

Tableau 3.1 Mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du capteur de pression P1

P1_cap_min[bar]	P1_cap_max[bar]	P1_cap_moy[bar]	P1_mano[bar]
-0,04	0,04	0	0
-0,04	-0,13	-0,085	-0,09
-0,08	-0,19	-0,135	-0,15
-0,17	-0,26	-0,215	-0,215
-0,27	-0,36	-0,315	-0,295
-0,42	-0,45	-0,435	-0,395
-0,57	-0,58	-0,575	-0,52
-0,71	-0,73	-0,72	-0,635

La figure 3.8 représente la pression donnée par le manomètre en fonction de la pression moyenne issue du capteur, d'après la figure, il existe une relation proportionnelle entre les deux mesures.

**Figure. 3.8.** Courbe d'étalonnage du capteur pression P1.

Grâce à l'équation issue de la courbe tracée sur Excel, on a pu établir la relation entre le capteur de pression P1 et le manomètre comme suit :

$$(P1) : y = -0,7405x^3 - 0,9233x^2 + 0,8432x + 0,001 \quad (23)$$

Cette équation est utilisée par la suite dans le programme Arduino pour assurer l'étalonnage de ce capteur.

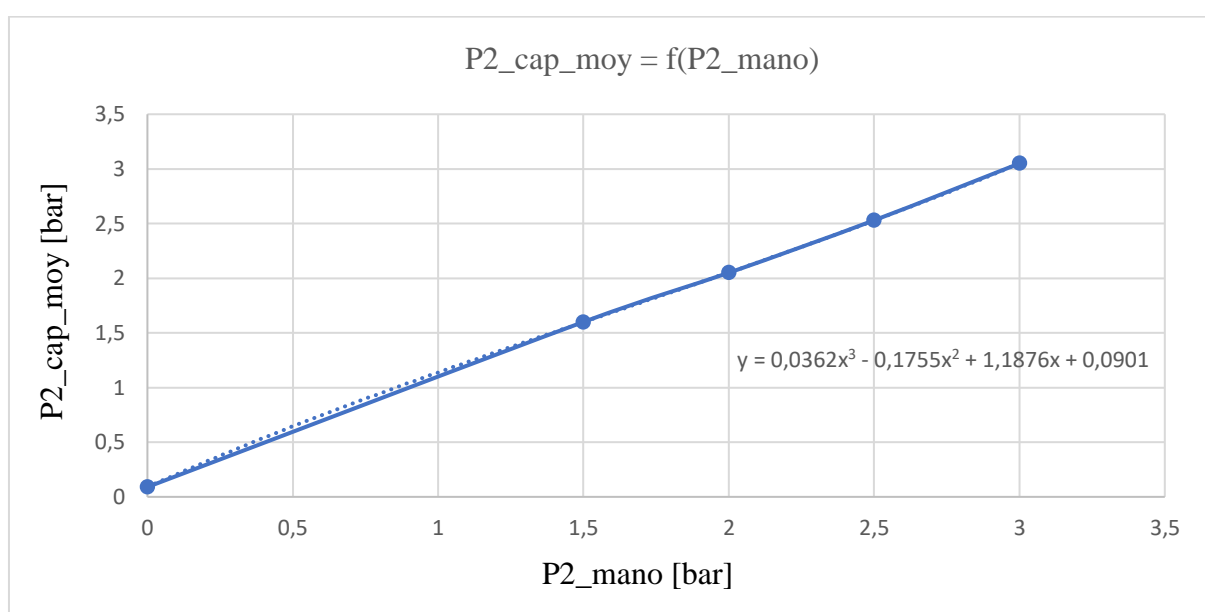
- **Etalonnage du capteur de pression P2**

Les mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du deuxième capteur de pression sont représentées sur le **tableau 3.2**.

Tableau 3.2 Mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du capteur de pression P2

P2_cap_min [bar]	P2_cap_max [bar]	P2_cap_moy [bar]	P2_mano [bar]
0,08	0,1	0,09	0
1,3	1,9	1,6	1,5
2,04	2,06	2,05	2
2,50	2,56	2,53	2,5
3,03	3,07	3,05	3
3,61	3,65	3,64	3,5

La figure 3.9 représente la pression donnée par le manomètre en fonction de la pression moyenne issue du capteur, d'après la figure, il existe une relation proportionnelle entre les deux mesures.

**Figure. 3.9.** Courbe d'étalonnage du capteur pression P2.

Grâce à l'équation issue de la courbe tracée sur Excel, on a pu établir la relation entre le capteur de pression P2 et le manomètre comme suit :

$$(P2) : y = 0,0362x^3 - 0,1755x^2 + 1,1876x + 0,0901 \quad (24)$$

Cette équation est utilisée par la suite dans le programme Arduino pour assurer l'étalonnage de ce capteur.

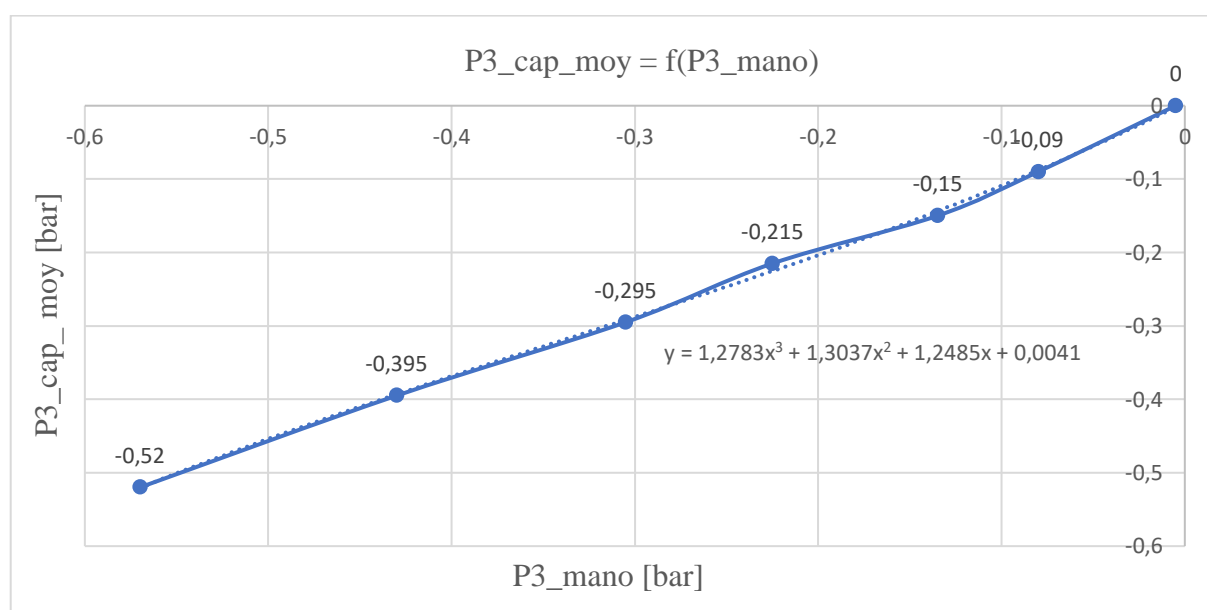
- **Etalonnage du capteur de pression P3**

Les mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du troisième capteur de pression sont représentées sur le **tableau 3.3**.

Tableau 3.3 Mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du capteur de pression P3

P3_cap_min [bar]	P3_cap_max [bar]	P3_cap_moy [bar]	P3_mano [bar]
-0,04	0,03	-0,005	0
-0,05	-0,11	-0,08	-0,09
-0,1	-0,17	-0,135	-0,15
-0,19	-0,26	-0,225	-0,215
-0,26	-0,35	-0,305	-0,295
-0,42	-0,44	-0,43	-0,395
-0,57	-0,58	-0,575	-0,52
-0,70	-0,74	-0,72	-0,635

La **figure .3.10** représente la pression donnée par le manomètre en fonction de la pression moyenne issue du capteur, d'après la figure, il existe une relation proportionnelle entre les deux mesures.

**Figure. 3.10.** Courbe d'étalonnage du capteur pression P3.

Grâce à l'équation issue de la courbe tracée sur Excel, on a pu établir la relation entre le capteur de pression P3 et le manomètre comme suit :

$$(P3) : y = 1,2783x^3 - 1,3037x^2 + 1,2485x + 0,0041 \quad (25)$$

Cette équation est utilisée par la suite dans le programme Arduino pour assurer l'étalonnage de ce capteur.

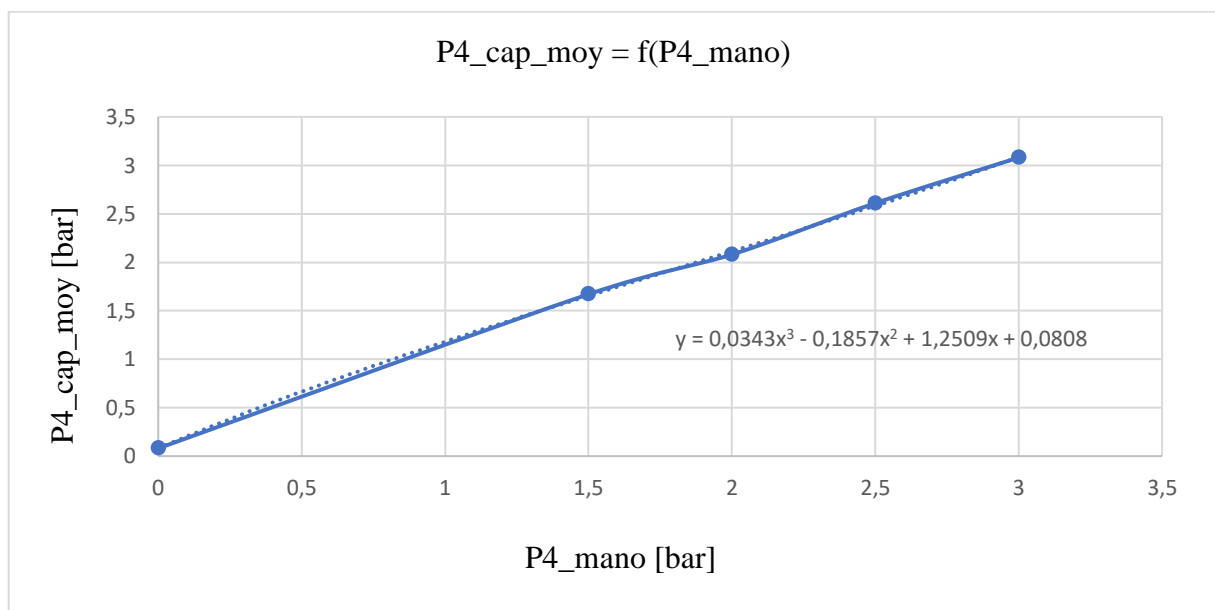
- **Etalonnage du capteur de pression P4**

Les mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du quatrième capteur de pression sont représentées sur le **tableau 3.4**.

Tableau 3.4 Mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du capteur de pression P4

P4_cap_min [bar]	P4_cap_max [bar]	P4_cap_moy [bar]	P4_mano [bar]
0,07	0,11	0,09	0
1,5	1,7	1,6	1,5
2,02	2,08	2,05	2
2,51	2,55	2,53	2,5
3,01	3,09	3,05	3
3,62	3,68	3,65	3,5

La **figure 3.11** représente la pression donnée par le manomètre en fonction de la pression moyenne issue du capteur, d'après la figure, il existe une relation proportionnelle entre les deux mesures.

**Figure 3.11.** Courbe d'étalonnage du capteur pression P4.

Grâce à l'équation issue de la courbe tracée sur Excel, on a pu établir la relation entre le capteur de pression P4 et le manomètre comme suit :

$$(P4) : y = 0,0343x^3 - 0,1857x^2 + 1,2509x + 0,0808 \quad (26)$$

Cette équation est utilisée par la suite dans le programme Arduino pour assurer l'étalonnage de ce capteur.

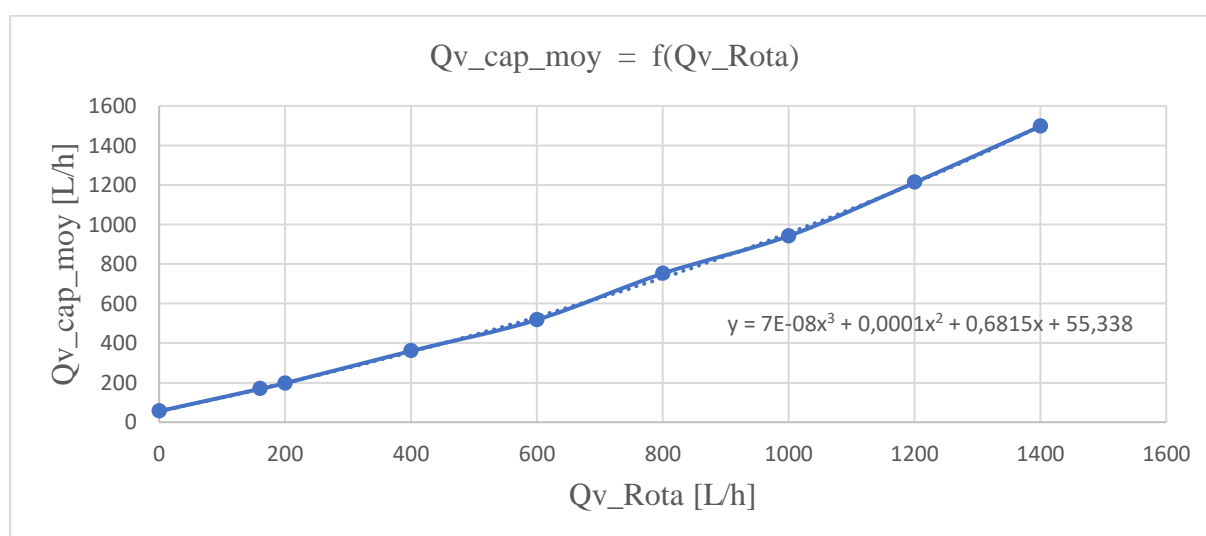
3.4.2 Étalonnage du capteur de débit

Dans cette partie on procédera à l'étalonnage du capteur de débit par rapport au rotamètre, de la même manière précédente, les résultats des essais et calculs sont présentés sur le tableau suivant :

Tableau 3.5 Mesures enregistrées lors de la procédure de l'étalonnage du capteur débit

Qv_cap_min [L/h]	Qv_cap_max [L/h]	Qv_cap_moy [L/h]	Qv_Rota [L/h]
1220	1228	1224	1400
1000	1016	1008	1200
862	866	864	1000
715	725	720	800
500	508	504	600
358	362	360	400
195	199	197	200
167	169	168	160
51	59	55	0

La **figure 3.12** représente débit donnée par le rotamètre en fonction de le débit moyenne issue du capteur, d'après la figure, il existe une relation proportionnelle entre les deux mesures.

**Figure. 3.12.** 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 :

$$(Qv): y = 7 * 10^{-08}x^3 + 0,0001x^2 + 5,4743x + 55,338 \quad (27)$$

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

3. 5 Estimation des grandeurs physiques

Dans le but de réduire le coût et la complexité de notre banc d'essai, nous avons opter pour l'estimation des paramètres de la pompe. Lors des essais pratiques sur le banc d'essai, nous mesurons la vitesse de rotation à l'aide d'un tachymètre, tandis que la tension et le courant absorbés

par la pompe sont mesurés à l'aide d'un multimètre. L'estimation de ces grandeurs nous permet l'acquisition de la valeur du courant et de la tension sans capteurs.

Le **tableau 3.6** résume le résultat des mesures de la tension et du courant électrique alimentant la pompe. La puissance électrique est calculée dans ce tableau pour chaque vitesse de rotation en fonction du débit.

L'équation mathématique de la puissance électrique est donnée comme suite :

$$P_{ele} = U * I \tag{27}$$

Tableau 3.6 résultat des mesures de la tension et du courant électrique alimentant la pompe avec calcul de la puissance électrique

Qv	2860			2400			2000			1600			1000		
	U	I	P _{ele}	U	I	P _{ele}	U	I	P _{ele}	U	I	P _{ele}	U	I	P _{ele}
980	240	0,99	237,6	/		/	/		/	/		/	/		/
900	240	1,02	245,5	160	0,92	147,2	/		/	/		/	/		/
800	240	1,06	253,4	160	0,96	153,6	/		/	/		/	/		/
700	240	1,09	261,4	160	1	160	139	1,1	152,9	/		/	/		/
600	240	1,09	261,4	160	1,04	166,4	139	1,14	159,02	125	1,01	126,5	/		/
500	240	1,09	261,4	160	1,08	172,8	139	1,14	159,02	125	1,01	126,5	/		/
400	240	1,12	269,3	160	1,12	179,2	139	1,19	165,13	125	1,01	126,5	/		/
300	240	1,16	277,2	160	1,16	185,6	139	1,19	165,13	125	1,01	126,5	100	0,95	95
200	240	1,19	285,1	160	1,2	192	139	1,23	171,25	125	1,06	132	100	0,95	95
160	240	1,22	293	160	1,2	192	139	1,23	171,25	125	1,06	132	100	0,95	95
0	240	1,32	316,8	160	1,28	204,8	139	1,23	171,25	125	1,06	132	100	0,95	95

La **figure 3.13** représente la variation de la puissance électrique P_{ele} absorbée en fonction de débit pour une vitesse de rotation de 2860 tr/min.

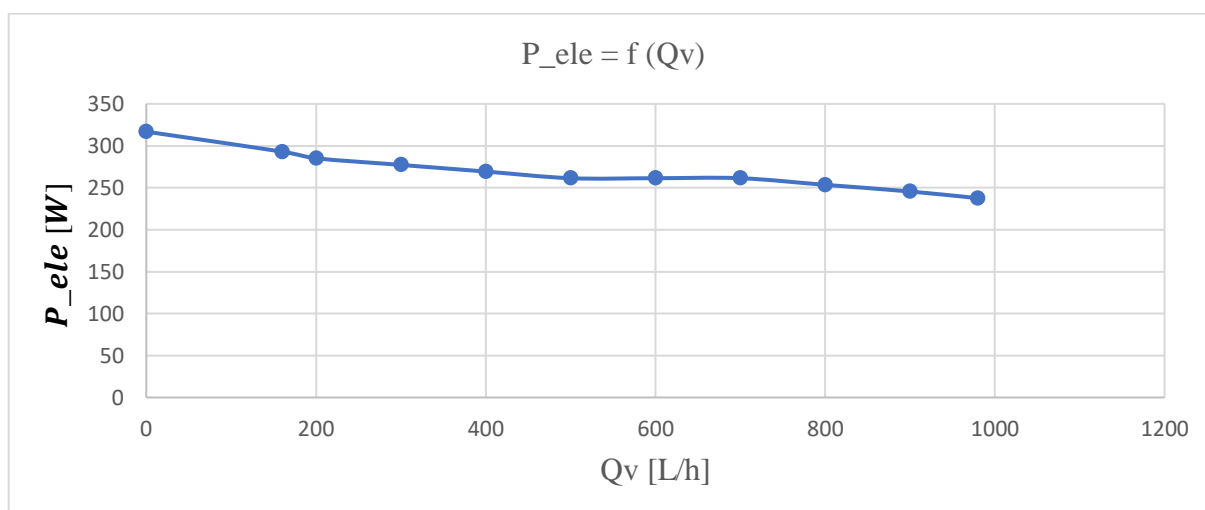


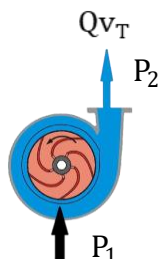
Figure. 3.13. Courbe caractéristique de la puissance électrique absorbée par la pompe en fonction de débit.

3. 6 Caractéristiques pour différents modes de fonctionnements

3. 6. 1 Caractéristique de la pompe en fonctionnement individuel

Dans ce cas nous avons lancé une seule pompe, les résultats obtenus seront comparés aux deux autres types de montage.

Dans cette configuration, la pression totale résulte de la soustraction de la pression de sortie (P_2) de la pression d'entrée (P_1) du circuit :



$$P_T = P_2 - P_1 \quad (28)$$

L'équation mathématique de la puissance hydraulique est donnée comme suite :

$$P_{hyd} [W] = Q_{vT} [m^3/s] * P_T [N /m^2] \quad (29)$$

L'équation mathématique de rendement est donnée comme suite :

$$\eta = P_{hyd} [w] / P_{ele} [w] \quad (30)$$

Le **tableau 3.7** représente un récapitulatif des grandeurs mesurées et calculées associées à la pompe, les mesures des pressions et le calcul du rendement et des puissances sont affichées sur ce tableau.

Tableau 3.7 Récapitulatif des grandeurs mesurées et calculées associées à la pompe

Qv _T [L/h]	P [bar]			P _{hyd} [W]	P _{ele} [W]	η%
	P1	P2	P _T			
0	-0,12	3,8	3,92	0	237,6	0
160	-0,14	3,4	3,54	15,73	245,5	5,369
200	-0,15	3,3	3,45	19,17	253,4	6,724
300	-0,15	3,1	3,25	27,08	261,4	9,769
400	-0,16	2,8	2,96	32,89	261,4	12,21
500	-0,17	2,6	2,77	38,47	261,4	14,72
600	-0,18	2,3	2,48	41,33	269,3	15,81
700	-0,18	2,1	2,28	44,33	277,2	16,96
800	-0,19	1,75	1,94	43,11	285,1	17,01
900	-0,19	1,45	1,64	41	293	16,7
980	-0,25	0,75	1	27,22	316,8	11,46

La **figure 3.14** représente la variation de la pression totale P_T de la pompe en fonction du débit volumique Q_{v_T} :

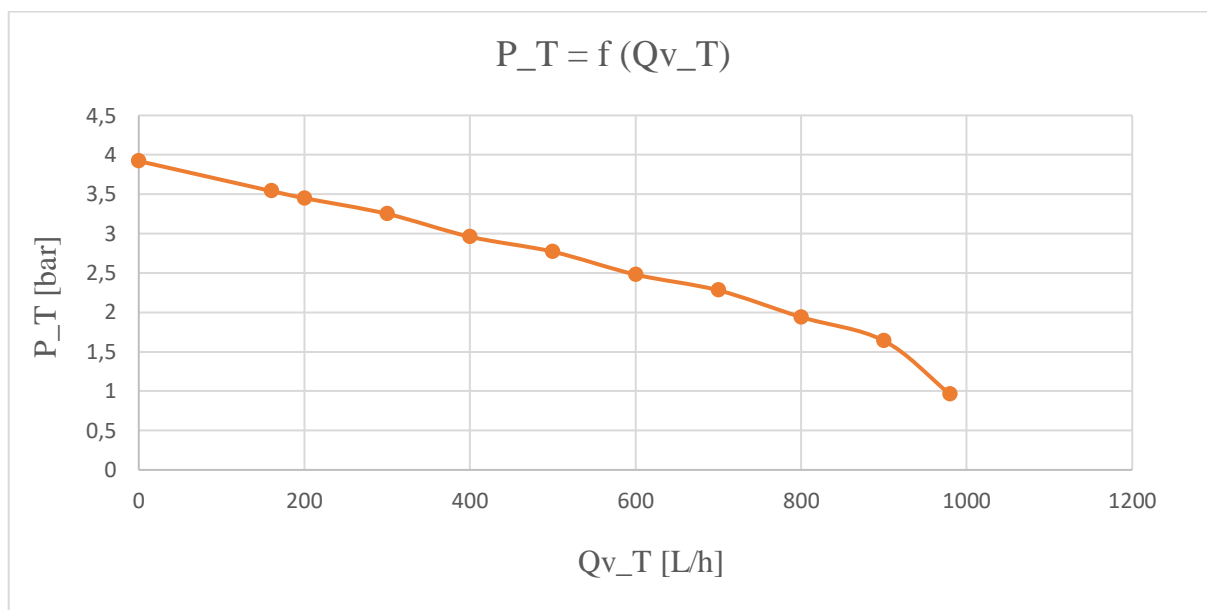


Figure. 3.14. Courbe caractéristique de la pression totale de la pompe en fonction du débit.

D'après le courbe de la **figure 3.14** il existe une relation inversement proportionnelle entre la pression et le débit de la pompe, si le débit augmente la pression de la pompe diminue.

La **figure 3.15** représente la variation de la puissance hydraulique P_{hyd} de la pompe en fonction du débit volumique Q_{v_T} .

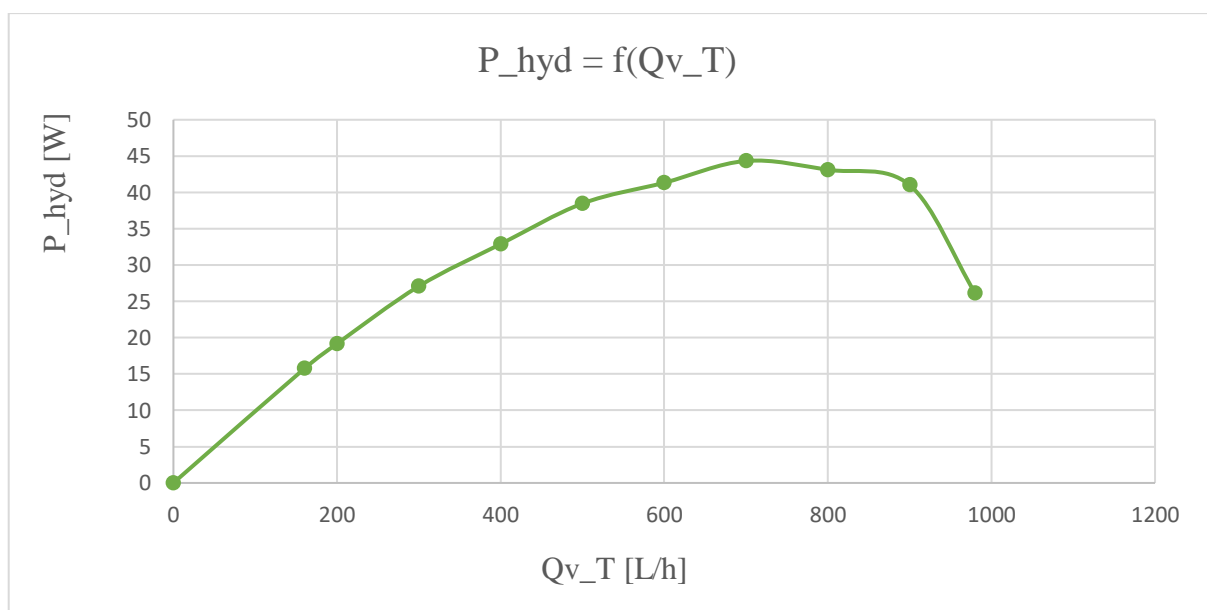


Figure. 3.15. Courbe caractéristique de la puissance hydraulique en fonction du débit.

La **figure 3.15** représente la variation de la puissance hydraulique P_{hyd} de la pompe en fonction du débit volumique Q_{vT} .

On voit clairement que, la puissance augmente proportionnellement en fonction de débit dans la zone de 0 à 700 [L/h], puis elle décroît. La puissance hydraulique maximale fournie par une seule pompe atteinte les 45 [Watt].

La **figure 3.16** représente la variation de la rendement η de la pompe en fonction du débit volumique Q_{vT} .

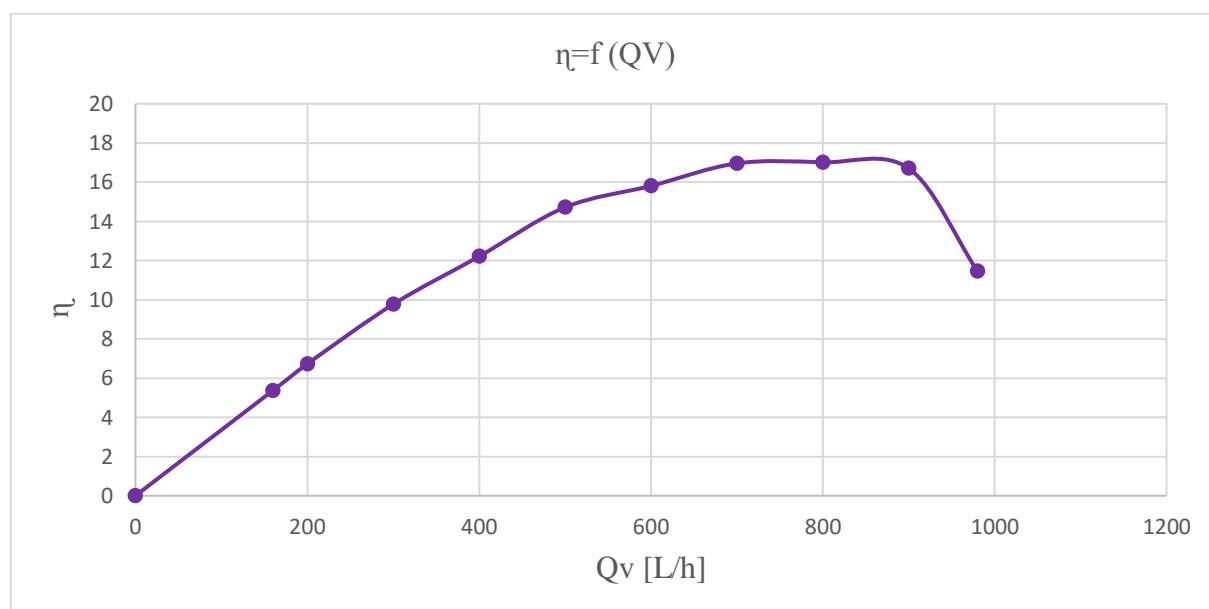


Figure 3.16. Courbe caractéristique de rendement en fonction du débit.

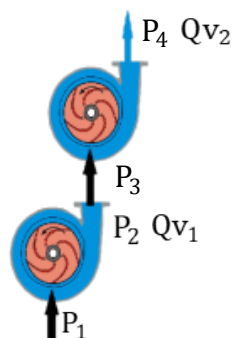
D'après le courbe de la **figure 3.16** on voit clairement que le rendement de la pompe forme une courbe en cloche, il est à noter que la valeur maximale du rendement atteint les 17 %, et correspond à un débit de 700 [L/h]. Cette valeur est relativement faible car elle comprend à la fois le rendement de la pompe et du moteur.

3.6.2 Caractéristique de montage en série des pompes

Dans ce cas nous avons lancé les deux pompes en série, les résultats obtenus seront comparés aux deux autres types de montage.

En montage série, l'expression de la pression totale est donnée par la relation 31, où (P_4) est la pression à la sortie de la pompe 2 et (P_1) est la pression à l'entrée de la pompe 1, tandis que le débit volumique totale reste inchangé pour ce type de montage :

$$Q_{vT}$$



$$P_T = P_4 - P_1 \tag{31}$$

$$Q_{v_T} = Q_{v_1} = Q_{v_2} \tag{32}$$

L'équation mathématique de la puissance hydraulique est donnée comme suite :

$$P_{hyd} [W] = Q_{v_T} [m^3/s] * P_T [N / m^2] \tag{33}$$

Le **tableau 3.8**. Représente un récapitulatif des grandeurs mesurées et calculées associées au montage en série des pompes, les mesures des pressions et le calcul des puissances sont affichées sur ce tableau.

Tableau 3.8 Récapitulatif des grandeurs mesurées et calculées associées au montage en série des pompes

Q _{vT} [L/h]	P [bar]					P _{hyd} [W]
	P1	P2	P3	P4	P _T	
0	-0,52	3,70	3,65	7,80	8,32	00,00
160	-0,57	3,30	3,28	6,80	7,37	32,76
200	-0,59	3,20	3,18	6,50	7,09	39,39
300	-0,6	3,00	2,97	6,00	6,60	55,00
400	-0,65	2,80	2,79	5,50	6,15	68,33
500	-0,69	2,50	2,46	5,00	5,69	79,03
600	-0,73	2,20	2,19	4,40	5,13	85,50
700	-0,74	2,00	2,00	3,90	4,65	90,42
800	-0,75	1,70	1,68	3,25	4,00	88,89
900	-0,78	1,40	1,39	2,50	3,28	82,00
1000	-0,80	0,20	0,19	0,60	1,40	38,89

La **figure (3.17)** représente la variation de la pression totale P_T de la pompe en fonction du débit volumique totale Q_{vT} pour le montage en série des pompes.

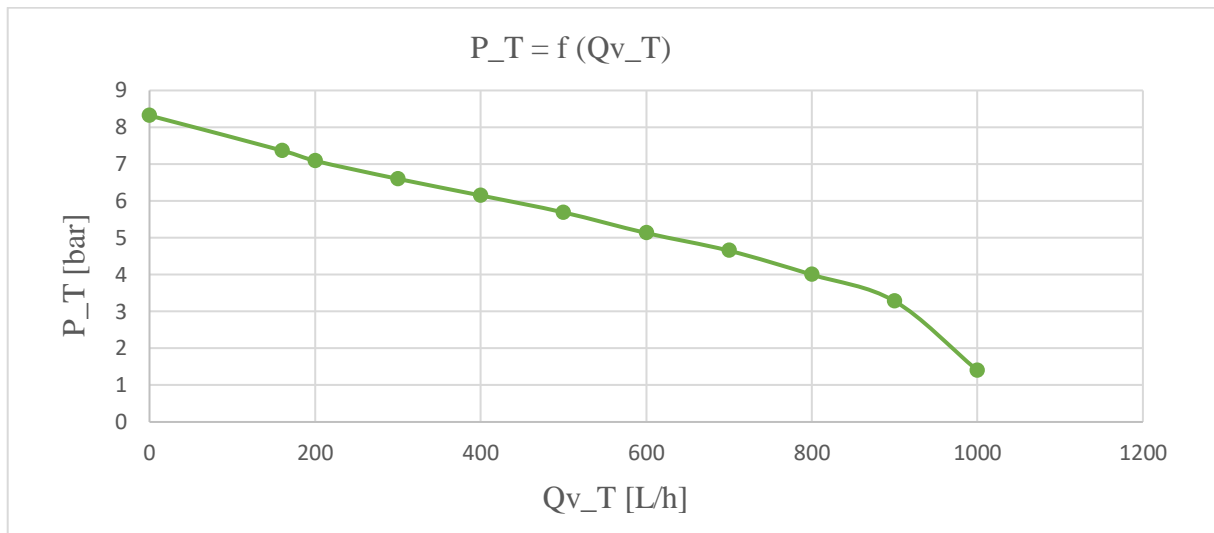


Figure. 3.17. Courbe caractéristique de la pression totale en fonction du débit pour le montage en série.

D'après le courbe de la **figure 3.17** il existe une relation inversement proportionnelle entre la pression totale et le débit des pompes, si le débit augmente la pression totale des pompes diminue.

On remarque une augmentation significative de la pression totale lorsque les deux pompes sont en série, tandis que le débit reste inchangé pour ce type de montage.

La **figure 3.18** représente la variation de la puissance hydraulique P_{hyd} des pompes en fonction du débit volumique Q_{v_T} en montage série.

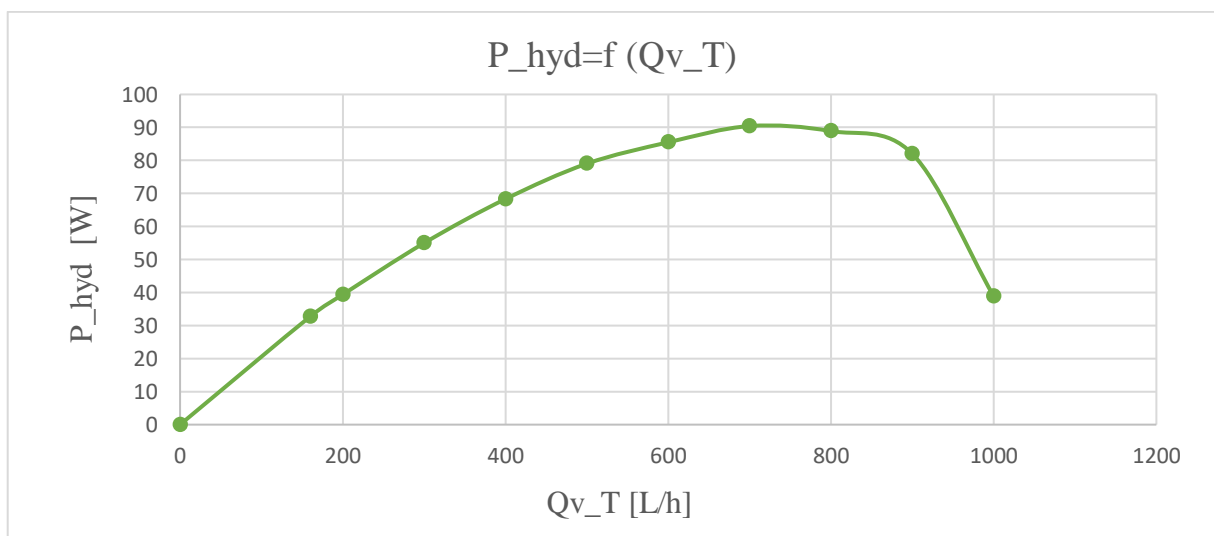


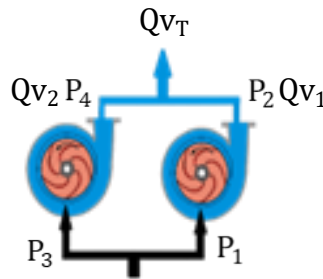
Figure. 3.18. Courbe caractéristique de la puissance hydraulique en fonction du débit pour le montage en série.

On voit clairement que, la puissance augmente proportionnellement en fonction de débit dans la zone de 0 à 700 [L/h], puis elle décroît. La puissance hydraulique maximale totale fournie par les deux pompes atteint les 90 [Watt].

3. 6. 3 Caractéristique de montage en parallèle des pompes

Dans ce cas nous avons lancé les deux pompes en parallèle, les résultats obtenus seront comparés aux deux autres types de montage.

En montage parallèle, l'expression du débit total est donnée par la relation 35, où (Qv_1) est le débit sortant de la pompe 1, et (Qv_2) est le débit sortant de la pompe 2, tandis que la pression totale reste inchangée pour ce type de montage :



$$P_T = P_2 - P_1 = P_4 - P_3 \tag{34}$$

$$Qv_T = Qv_1 + Qv_2 \tag{35}$$

L'équation mathématique de la puissance hydraulique est donnée comme suite :

$$P_{hyd} [W] = Qv_T [m^3/s] * P_T [N/m^2] \tag{36}$$

Le **tableau 3.9** représente un récapitulatif des grandeurs mesurées et calculées associées au montage en parallèle des pompes, les mesures des pressions et le calcul des puissances sont affichées sur ce tableau :

Tableau 3.9 Récapitulatif des grandeurs mesurées et calculées associées au montage en parallèle des pompes

Qv _T [L/h]	P [bar]					P _{hyd} [W]
	P1	P2	P3	P4	P _T	
0	-0,07	3,8	-0,11	3,85	3,87	0
160	-0,09	3,6	-0,13	3,50	3,69	20,5
300	-0,11	3,5	-0,14	3,40	3,61	40,11
500	-0,14	3,25	-0,18	3,10	3,39	56,5
700	-0,15	3,05	-0,20	2,90	3,2	71,11
900	-0,18	2,8	-0,22	2,60	2,98	82,78
1100	-0,22	2,45	-0,25	2,40	2,67	89
1300	-0,25	2,1	-0,31	2,00	2,35	91,39
1500	-0,36	1,75	-0,39	1,70	2,11	87,92

La **figure 3.19** représente la variation de pressions P_T de la pompe en fonction du débit volumique Q_{v_T} dans le montage parallèle.

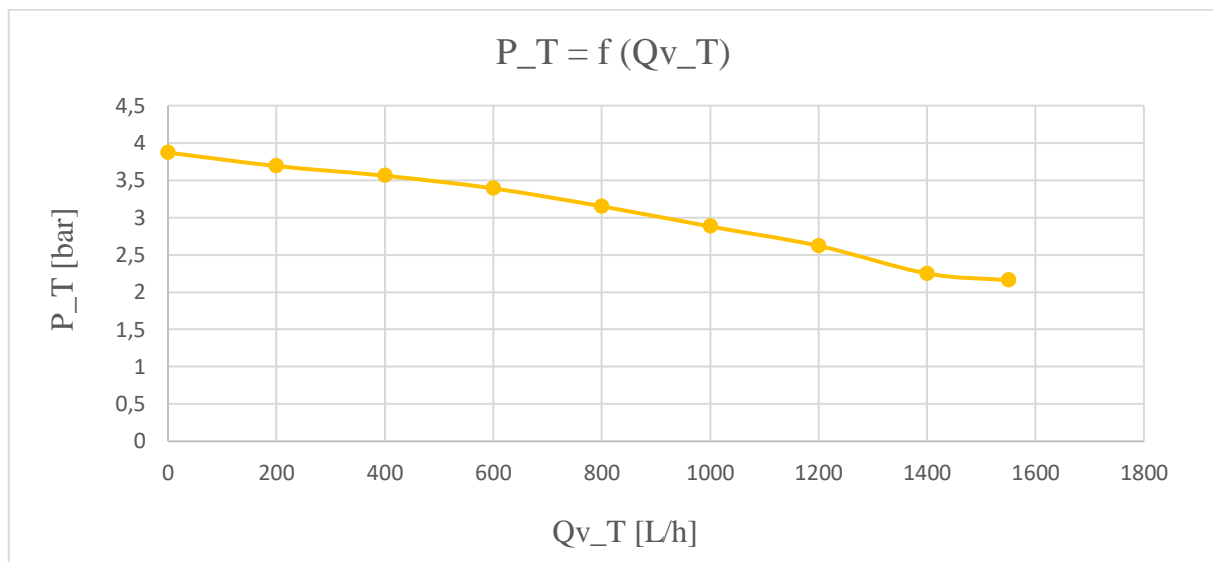


Figure 3.19. Courbe caractéristique de la pression en fonction du débit pour le montage en parallèle.

D'après le courbe de la **figure 3.19** il existe une relation inversement proportionnelle entre la pression totale et le débit des pompes, si le débit augmente la pression totale des pompes diminue.

On remarque une augmentation significative du débit total lorsque les deux pompes sont en parallèle, tandis que la pression totale reste inchangée pour ce type de montage.

La **figure 3.20** représente la variation de la puissance hydraulique P_{hyd} des pompes en fonction du débit volumique Q_{v_T} en montage parallèle.

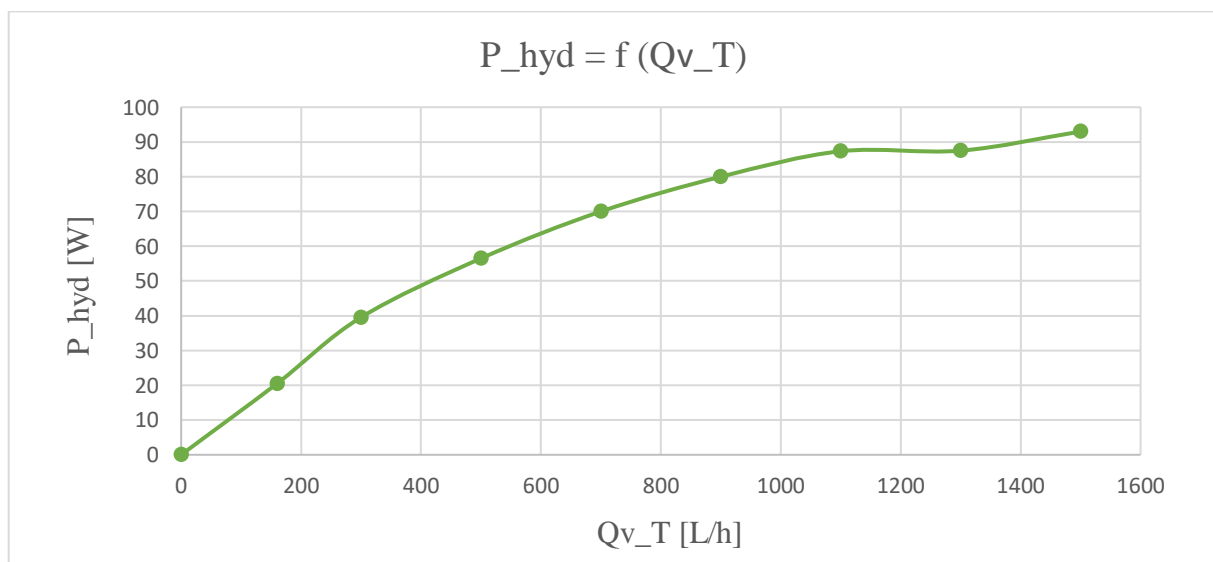


Figure 3.20. Courbe caractéristique de la puissance hydraulique en fonction du débit pour le montage en parallèle.

On voit clairement que, la puissance augmente proportionnellement en fonction de débit. La puissance hydraulique maximale totale fournie par les deux pompes dans ce type de montage dépasse 90 [Watt].

3. 7 Courbes caractéristiques pour différents modes de fonctionnements

La **figure 3.21** représente les différentes mesures de la pression totale P_T de la pompe en fonction du débit volumique Q_{v_T} pour les trois types de montages.

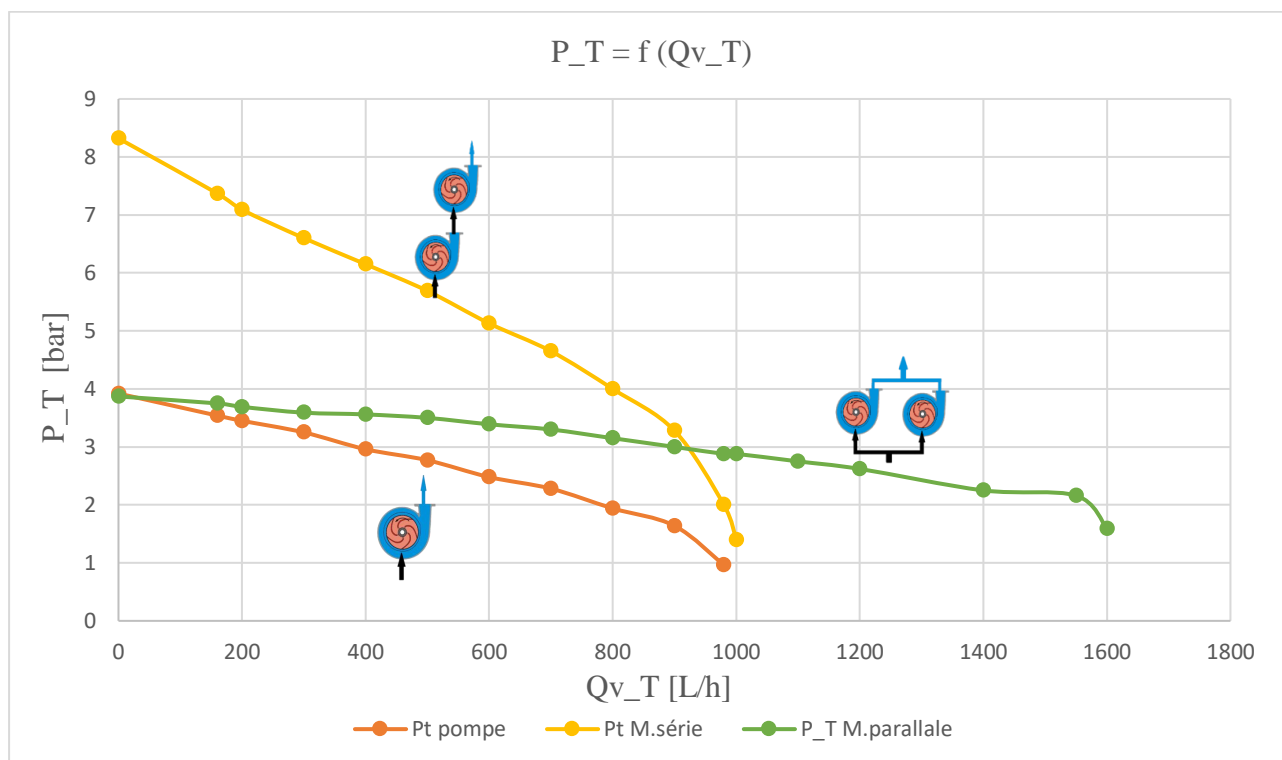


Figure. 3.21. Courbes caractéristiques pour différents modes de fonctionnements.

On remarque une augmentation significative du débit total lorsque les deux pompes sont en parallèle, tandis que la pression totale reste inchangée pour ce type de montage.

On remarque une augmentation significative de la pression totale lorsque les deux pompes sont en série, tandis que le débit reste inchangé pour ce type de montage.

La **figure 3.22** représente la variation des puissances hydrauliques P_{hyd} des pompes en fonction du débit volumique Q_{v_T} , pour les trois types de montages.

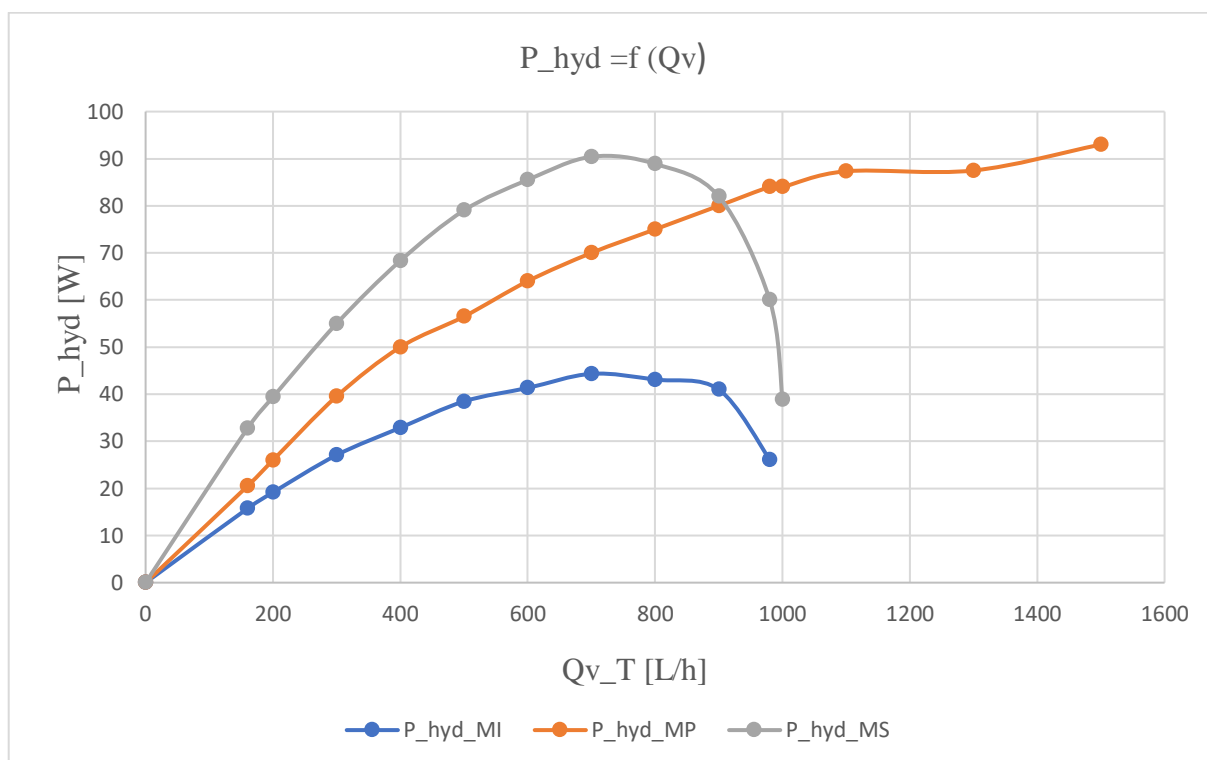


Figure 3.22. Courbes caractéristiques de la puissance hydraulique pour différents modes de fonctionnements.

On remarque une augmentation significative de la puissance hydraulique totale fournie par les deux pompes pour les montages série et parallèle.

3. 8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les étapes essentielles de la réalisation pratique du banc d'essai, commençant par la construction du châssis jusqu'à l'achèvement total de ce dernier, incluant le montage du circuit électrique.

De plus, nous avons développé une application smartphone pour le contrôle de notre banc d'essai, via une connexion Wi-Fi ou Bluetooth. Ainsi, le banc d'essai est commandable et permet d'effectuer des travaux pratiques à distance.

En outre, nous avons procédé à l'étalonnage minutieux des capteurs de pression et du débitmètre, tout en effectuant des estimations précises de diverses grandeurs physiques, notamment la tension et le courant absorbés par la pompe.

Nous avons aussi effectué une série de mesures à distance sur le banc d'essai afin d'extraire les différentes courbes caractéristiques pour les différents types de montage.

En fin, une discussion et une analyse approfondies des différents résultats obtenus clôture ce chapitre.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

En somme. De ce fait, nous avons non seulement offert une compréhension exhaustive des concepts de base liés aux pompes centrifuges, allant de leur définition à leur mécanisme de fonctionnement, mais nous avons aussi plongé dans leur étude, les régimes de fonctionnement des turbomachines et leur association. En outre, nous avons souligné l'importance de l'enseignement à distance pour les travaux pratiques, offrant aux étudiants l'opportunité d'acquérir des compétences pratiques dans ce domaine crucial de l'ingénierie.

Nous avons aussi présenté les différentes conceptions mécaniques des divers composants du banc d'essai sur les pompes centrifuges. Nous avons réussi à concevoir, modéliser et assembler aisément ces différentes parties. Notre processus a inclus des tests et des simulations à trois niveaux distincts : la conception en 3D, le dessin technique et l'assemblage des pièces.

L'utilisation de l'application Fritzing nous a permis de créer aisément une interface pour le câblage de la partie électrique, de sélectionner les composants appropriés et d'établir les connexions électriques entre eux. Cette approche nous a offert une première vision globale avant de nous lancer sur le terrain, nous permettant d'identifier les problèmes éventuels tout en économisant du temps et de l'argent.

Au sein de dernier chapitre, nous avons minutieusement décrit les étapes essentielles de l'assemblage pratique de notre prototype, commençant par la construction du châssis et allant jusqu'à la finalisation totale du banc d'essai, y compris le montage du circuit électrique.

De plus, nous avons développé une application smartphone pour le contrôle de notre banc d'essai, via une connexion Wi-Fi ou Bluetooth. Ainsi, le banc d'essai est commandable et permet d'effectuer des travaux pratiques à distance.

En outre, nous avons procédé à un étalonnage minutieux des capteurs de pression et du débitmètre, tout en effectuant des estimations précises de diverses grandeurs physiques, telles que la tension et le courant.

Une série de tests d'investigation à distance a été menée afin d'obtenir les différentes valeurs et courbes caractéristiques via l'application smartphone et l'interface développée.

Enfin, une analyse approfondie des divers résultats obtenus clôt ce projet de fin d'études

Références bibliographiques

- [1] M. Issam, *Turbomachines Polycopie de Cours pour les 3eme annee licence en electromecanique Univ BBA 2019*, Bordj bou argeridj, 2019.
- [2] Joe, DIMBUTA NSEKA Merveille. KAELA TSHILOMBO Roger. MWAPE TONDO Adrien. NGELEKA TSHIBANGU Maxime. WANDANDA BAUDOUIN, *ETUDE COMPARATIVE D'UN MONTAGE SERIE ET D'UN*, UNIVERSITE DE LUBUMBASHI, 2016/2017.
- [3] BOUCHEDDA Salah, HAMRI Ahmed, «Implantation expérimentale d'un variateur de vitesse,» Université AKLI Mohamed Oulhadj, BOUIRA, 2021/2022.
- [4] ECOLELAMACHE, ecolelamache [En ligne]. [Accès le 22 06 2023] .Available: https://sti2d.ecolelamache.org/le_relais_lectromcanique.html.
- [5] Arduino, «arduino,». [En ligne]. [Accès le 22 06 2023] Available: <https://www.arduino.cc/>.
- [6] AQUAPORTAIL, «aquaportail» definition de rotametre. [En ligne]. [Accès le 25 06 2023] Available: <https://www.aquaportail.com/definition-6672-rotametre.html#:~:text=Un%20rotam%C3%A8tre%20est%20un%20type,de%20gaz%20ou%20de%20liquide..>
- [7] FUTURA, «FUTURA» manomètre de pression, [En ligne]. [Accès le 18 06 2023] Available: <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-manometre-15126/>.
- [8] AMAZON, «AMAZON» boite de distribution, [En ligne]. [Accès le 22 07 2023] Available: <https://www.amazon.com.be/distribution-conception-dalimentation-professionnelle-lindustrie/dp/B09RJMZ2JK>.
- [9] LETMEKNOW. «letmeknow» CAPTEUR DE COURANT ACS712 - 30A, [En ligne]. [Accès le 30 06 2023] Available: <https://letmeknow.fr/fr/autres-capteurs/1565-capteur-de-courant-ac712-30a-0726146001625.html>. [Accès le 05 04 2023].
- [10] V. P. D'EXPERIMENTATION, «DISCOUNTOFFICE.be,» platone d'expérimentation, [En ligne]. [Accès le 15 06 2023] Available: <https://fr.discountoffice.be/p/lleman-platine-d-experimentation-sans-soudure-830-points-d-4/>.
- [11] AMAZON, «amazon,» variateur de vitesse, [En ligne]. [Accès le 17 05 2023] Available: <https://www.amazon.fr/R%C3%A9gulateur-%C3%89lectrique-Stabilisateur-Transformateur-Variateur/dp/B07LF7JVcFD>
- [12] YOUPILAB, «youpilab,» capteur de tension ZMPT101B, [En ligne]. [Accès le 17 05 2023] Available:

- <https://youpilab.com/components/product/zmpt101b>.
- [13] ESP8266, «ESP8266,» CAPTEUR WIFI ESP8266, [En ligne]. [Accès le 03 05 2023] Available:
<https://youpilab.com/components/product/zmpt101b>.
- [14] RELAIS ELECTRIQUE, «alicdn» relais electrique 4 cannaux, [En ligne]. [Accès le 03 05 2023] Available:
https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1TQVvXRWD3KVjSZKPq6yp7FXab/TZT-Technologie-semi-conducteurs-pour-Ardu37-citations-SSR-AVR-DSP-haut-niveau-bas-haute-qualit-1.jpg_220x220.jpg_.webp. [Accès le 06 04 2023].
- [15] CAPTEUR BLUETOOTH, «alicdn» capteur buetooth HC-05, [En ligne]. [Accès le 15 06 2023] Available:
https://ae01.alicdn.com/kf/H5d412934864f41be86d5ed6c5811237f5/Module-de-transmission-de-s-rie-Bluetooth-JDY-30-JDY-31-SPP-C-communication-s-rie.jpg_220x220.jpg_.webp
- [16] ARANACORP, «Capture Bluetooth HC-05,» ARANACORP, 2023. [En ligne]. [Accès le 15 06 2023] Available:
<https://www.aranacorp.com/fr/votre-arduino-communique-avec-le-module-hc-05/>
- [17] SolidWorks, «SolidWorks.com,» solidworks.com, [En ligne]. [Accès le 27 03 2023] Available:
<https://www.solidworks.com/>

Annexe

```
#define REMOTEXY_MODE__SOFTSERIAL
#include <SoftwareSerial.h>
#include <RemoteXY.h>
#define REMOTEXY_SERIAL_RX 3
#define REMOTEXY_SERIAL_TX 4
#define REMOTEXY_SERIAL_SPEED 9600
#pragma pack(push, 1)
uint8_t RemoteXY_CONF[] =
    {255,7,0,24,0,11,2,16,178,0,1,0,1,5,12,12,24,31,0,1,
    0,14,5,12,12,24,31,0,129,0,3,13,8,3,178,79,80,69,78,0,
    129,0,16,13,7,3,178,67,76,79,83,0,129,0,1,1,23,4,8,86,
    97,110,101,32,118,111,108,111,110,101,0,129,0,30,1,16,4,24,109,111,
    110,116,97,103,101,0,129,0,42,17,7,3,8,115,195,169,114,105,101,32,
    0,129,0,28,17,12,3,8,112,97,114,97,108,108,195,168,108,101,32,0,
    71,56,81,40,15,15,0,2,24,135,0,0,0,192,0,0,0,0,0,
    0,63,0,0,128,62,0,0,128,61,24,0,71,56,83,22,15,15,0,2,
    24,135,0,0,0,0,0,160,64,0,0,128,63,0,0,0,63,0,0,
    0,62,24,0,71,56,64,40,15,15,0,2,24,135,0,0,0,192,0,0,
    0,0,0,0,0,63,0,0,128,62,0,0,128,61,24,0,71,56,63,22,
    15,15,0,2,24,135,0,0,0,0,0,160,64,0,0,128,63,0,0,
    0,63,0,0,0,62,24,0,71,56,37,20,23,23,0,2,24,135,0,0,
    0,0,0,0,200,68,0,0,200,67,0,0,72,67,0,0,72,66,24,0,
    10,48,29,5,10,10,24,26,178,79,78,0,31,79,70,70,0,10,48,40,
    5,10,10,24,26,178,79,78,0,31,79,70,70,0,10,48,53,6,10,10,
    24,26,178,79,78,0,31,79,70,70,0,10,48,66,6,11,11,24,26,192,
    79,78,0,31,79,70,70,0,10,48,81,6,12,12,24,26,178,79,78,0,
    31,79,70,70,0,129,0,54,1,9,5,8,69,76,86,0,129,0,67,1,
    9,5,8,80,79,49,0,129,0,82,1,9,5,8,80,79,50,0,129,0,
    21,46,34,9,24,68,90,32,76,65,66,79,0,129,0,33,55,18,6,24,
    68,90,45,48,49,0,129,0,86,34,9,5,8,80,95,50,0,129,0,65,
    34,9,5,8,80,95,52,0,129,0,84,54,9,5,8,80,95,49,0,129,
    0,65,54,9,5,8,80,95,51,0,71,56,14,21,22,22,0,2,24,135,
    0,0,0,0,0,150,67,0,0,72,66,0,0,200,65,0,0,200,64,
    24,0,129,0,43,41,12,5,8,68,195,169,98,105,116,0,129,0,19,40,
    12,5,8,68,195,169,98,105,116,0};
struct {
    uint8_t button_1;
    uint8_t button_2;
    uint8_t pushSwitch_1;
    uint8_t pushSwitch_2;
    uint8_t pushSwitch_3;
    uint8_t pushSwitch_4;
    uint8_t pushSwitch_5;
    float instrument_1;
    float instrument_2;
    float instrument_3;
    float instrument_4;
}
```

Annexe

```
float instrument_5;
float instrument_6;
uint8_t connect_flag;
} RemoteXY;
#pragma pack(pop)
#define PIN_BUTTON_1 9
#define PIN_BUTTON_2 10
#define PIN_PUSHSWITCH_1 7
#define PIN_PUSHSWITCH_2 8
#define PIN_PUSHSWITCH_3 11
#define PIN_PUSHSWITCH_4 12
#define PIN_PUSHSWITCH_5 5
int Qv;
int Qvv;
int T;
int hallsensor = 2;
volatile int NbTopsFan;
void rpm()
{
    NbTopsFan++;
}
#include <RemoteXY.h>
#define REMOTEXY_MODE__HARDSERIAL
#define REMOTEXY_SERIAL Serial
#define REMOTEXY_SERIAL_SPEED 9600
int voltageSensorPin = A0;
int currentSensorPin = A1;
int pressureSensorPin = A2;
int pressureSensorPin2 = A3;
int pressureSensorPin3 = A4;
int pressureSensorPin4 = A5;
int pressureSensorPin5 = 11;
int pressureValue;
int pressureValue2;
int pressureValue3;
int pressureValue4;
int pressureValue5;
int P;
void setup()
{
    RemoteXY_Init ();
    pinMode (PIN_BUTTON_1, OUTPUT);
    pinMode (PIN_BUTTON_2, OUTPUT);
    pinMode (PIN_PUSHSWITCH_1, OUTPUT);
    pinMode (PIN_PUSHSWITCH_2, OUTPUT);
    pinMode (PIN_PUSHSWITCH_3, OUTPUT);
    pinMode (PIN_PUSHSWITCH_4, OUTPUT);
    pinMode (PIN_PUSHSWITCH_5, OUTPUT);
    pinMode(hallsensor, INPUT);
```

```
Serial.begin(9600);
attachInterrupt(0, rpm, RISING);
  Serial.begin(REMOTEXY_SERIAL_SPEED);
  RemoteXY_Init();
}

void loop ()
{
  RemoteXY_Handler ();
  digitalWrite(PIN_BUTTON_1, (RemoteXY.button_1==1)?LOW:HIG);
  digitalWrite(PIN_BUTTON_2, (RemoteXY.button_2==1)?LOW:HIG);
  digitalWrite(PIN_PUSHSWITCH_1, (RemoteXY.pushSwitch_1==1)?LOW:HIG);
  digitalWrite(PIN_PUSHSWITCH_2, (RemoteXY.pushSwitch_2==1)?LOW:HIG);
  digitalWrite(PIN_PUSHSWITCH_3, (RemoteXY.pushSwitch_3==1)?LOW:HIG);
  digitalWrite(PIN_PUSHSWITCH_4, (RemoteXY.pushSwitch_4==1)?LOW:HIG);
  digitalWrite(PIN_PUSHSWITCH_5, (RemoteXY.pushSwitch_5==1)?LOW:HIG);
  float voltage = (analogRead(voltageSensorPin) * (250 / 1023.0)); // read the
  float current = (analogRead(currentSensorPin) - 512.0) / 1023.0 * 30.0; // read
  Serial.print("//          Voltage: ");
  Serial.print(voltage);
  Serial.print("V ");
  Serial.print("Current: ");
  Serial.print(current);
  Serial.println("A");
  NbTopsFan = 0;
  sei();
  delay(500);
  Qv = (NbTopsFan * (60 / 7.5) * 10.49747049 );
  int d1 = analogRead(A2);
  int d2 = analogRead(A3);
  int d3 = analogRead(A4);
  int d4 = analogRead(A5);
  float V1 = ((d1 * 5) / 1024.0);
  float V2 = (d2 * 5) / 1024.0;
  float V3 = ((d3 * 5) / 1024.0);
  float V4 = (d4 * 5) / 1024.0;
  float P1_p = (3.0 * ((float)V1 - 0.47)) * 1000000.0;
  float P2_p = (3.0 * ((float)V2 - 0.47)) * 1000000.0;
  float P3_p = (3.0 * ((float)V3 - 0.47)) * 1000000.0;
  float P4_p = (3.0 * ((float)V4 - 0.47)) * 1000000.0;
  float P1_b = (P1_p / 10e5) - 0.0987890625;
  float P2_b = (P2_p / 10e5) - 0.0987890625;
  float P3_b = (P3_p / 10e5) - 0.0987890625;
  float P4_b = (P4_p / 10e5) - 0.0987890625;
  float P1_d = 0.7405 * pow(P1_b, 3) - 0.9233 * pow(P1_b, 2) + 0.8432 * pow(P1_b,
1) + 0.001;
  float P2_d = (0.0362 * pow(P2_b, 3) - 0.1755 * pow(P2_b, 2) + 1.1876 *
pow(P2_b, 1) + 0.0901) - 0.12;
```

Annexe

```
float P3_d = 0.7405 * pow(P3_b, 3) - 0.9233 * pow(P3_b, 2) + 0.8432 * pow(P3_b,
1) + 0.001;
float P4_d = (0.0343 * pow(P4_b, 3) - 0.1857 * pow(P4_b, 2) + 1.2509 *
pow(P4_b, 1) + 0.0808) - 0.12;
pressureValue = analogRead(pressureSensorPin);
RemoteXY.instrument_1 = (P1_d);
RemoteXY_Handler();
pressureValue2 = analogRead(pressureSensorPin2);
RemoteXY.instrument_2 = (P2_d);
RemoteXY_Handler();
pressureValue3 = analogRead(pressureSensorPin3);
RemoteXY.instrument_3 = (P3_d);
RemoteXY_Handler();
pressureValue4 = analogRead(pressureSensorPin4);
RemoteXY.instrument_4 = (P4_d);
RemoteXY_Handler();
pressureValue5 = analogRead(pressureSensorPin5);
RemoteXY.instrument_5 = (Qv);
RemoteXY_Handler();
}
```