People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة محمد بوضياف - المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique
Option : Construction Mécanique

Présenté par :
Taher CHAIBI & Bilal BOUZIDI

Thème

Influence de la variation des angles des aubes de la roue sur le rendement d'une pompe centrifuge

Présenté devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
Mohamed FNIDES	MCA	Encadreur	Enset Skikda
Salah AMRONUNE	Pr.	Co-eEncadreur	Université de M'sila
Moussa ZAOUI	Pr	Président	Université de M'sila
Taher GHODBANE	Dr	Examinateur	Université de M'sila

Année Universitaire : 2025/2026

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير تغيّر زوايا ريش عجلة المضخة الطاردة المركزية على كفاءتها الهيدروليكية. لتحقيق ذلك، يتم تصنيع تسع عينات مختلفة من العجلة باستعمال تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، مع تغيير زاويتي دخول وخروج الريش **β1** و**β2** بعد اختبار العينات ومقارنة أدائها، يتم تحديد التصميم الذي يحقق أفضل مردود. بعد ذلك، تُصنع العجلة المثالية من الألمنيوم باستعمال تقنية القولبة الرملية، بهدف الحصول على نموذج نهائي أكثر متانة وقابلية للاستعمال العملي.

Abstract

This study investigates the influence of variations in the blade angles of a centrifugal pump impeller on its hydraulic efficiency. To achieve this, nine different impeller models are manufactured using 3D printing technology by varying the blade inlet and outlet angles, β1 and β2. After testing and comparing their performances, the configuration providing the highest efficiency is selected. The optimal impeller is then manufactured in aluminum using sand casting in order to obtain a final model with greater strength and suitability for practical applications.

Résumé

Cette étude porte sur l'influence de la variation des angles des aubes de la roue d'une pompe centrifuge sur son rendement hydraulique. Pour cela, neuf modèles de roues sont fabriqués par impression 3D, en faisant varier les angles d'entrée et de sortie des aubesβ1 et β2. Après les essais et la comparaison des performances, la configuration donnant le meilleur rendement est sélectionnée. La roue optimale est ensuite fabriquée en aluminium par moulage au sable afin d'obtenir un modèle final plus résistant et adapté à une utilisation pratique.

Remerciements de Bilal

Je remercie Dieu Tout-Puissant pour ses innombrables bienfaits, ainsi que pour la santé, la patience et la persévérance qu'il m'a accordées afin de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes chers parents, qui ont été mon premier soutien tout au long de mon parcours universitaire. Qu'Allah les protège et leur accorde santé et longue vie.

Je remercie également les enseignants du département de Génie Mécanique de l'Université Mohamed Boudiaf – M'sila, en particulier le Professeur **Salah Amroun** et **M. Mohamed Fnides**, pour leurs précieux conseils, leur encadrement et leur accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

J'exprime ma profonde reconnaissance à :

Dr Messaoud Titoum , KHELLAF Belkhiri , Belkacem AOUIFI, Saada Khalissa, Zouaoui Khalil, Khaldoune Abderaouf et Aimer Nour Eddine,Hadjab Meryem

Enfin, je remercie chaleureusement tout le personnel du laboratoire CRTI pour leur accueil, leur gentillesse et leur assistance durant la réalisation de ce travail..

Remerciements de taher

Je remercie Dieu Tout-Puissant pour ses innombrables bienfaits, ainsi que pour la santé, la patience et la persévérance qu'il m'a accordées afin de mener à bien ce modeste travail.

Je remercie Dieu Tout-Puissant pour ses innombrables bienfaits, ainsi que pour la santé, la patience et la persévérance qu'il m'a accordées afin de mener à bien ce modeste travail.

Je remercie également les enseignants du département de Génie Mécanique de l'Université Mohamed Boudiaf – M'sila, en particulier le Professeur **Salah Amroun** et **M. Mohamed Fnides**, pour leurs précieux conseils, leur encadrement et leur accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

J'exprime ma profonde reconnaissance à :

Dr Messaoud Titoum , Dr KHELLAF Belkhiri, Hassane Mili,

Ali Abdel Salam,DrHadjab Meryem ,Dr Zouaoui Khalil ,

Dr Aimer Nour Eddine

Enfin, je remercie chaleureusement tout le personnel du laboratoire CRTI pour leur accueil, leur gentillesse et leur assistance durant la réalisation de ce travail..

Liste des symboles

Symbole	Désignation	Unité
H	Hauteur manométrique	m
Hth	Hauteur théorique d'Euler	m
Q	Débit volumique	m^3/s
P	Puissance absorbée	W
Ph	Puissance hydraulique	W
η	Rendement hydraulique	%
β_1	Angle d'entrée des aubes	°
β_2	Angle de sortie des aubes	°
U	Vitesse périphérique	m/s
C	Vitesse absolue	m/s
W	Vitesse relative	m/s
Cu	Composante tangentielle de la vitesse absolue	m/s
Cm	Composante méridienne de la vitesse	m/s
ρ	Masse volumique	kg/m^3
g	Accélération de la pesanteur	m/s^2
NPSH	Hauteur nette positive d'aspiration	m
n	Vitesse de rotation	tr/min
D_1	Diamètre d'entrée de la roue	mm
D_2	Diamètre de sortie de la roue	mm
b_1	Largeur de la roue à l'entrée	mm
b_2	Largeur de la roue à la sortie	mm

Liste des figures

N°	Désignation	Page
Figure I.1	Constituants principaux d'une pompe centrifuge	22
Figure I.2	Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge	26
Figure I.3	Gamme d'utilisation des turbopompes et des pompes volumétriques	27
Figure I.4	Courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge	30
Figure I.5	Érosion par cavitation d'une roue de pompe centrifuge	31
Figure I.6	Variation du NPSH requis et du NPSH disponible avec le débit	32
Figure II.1	Schéma d'une pompe centrifuge et éléments associés à la roue	39
Figure II.2	Types de roues utilisées dans les pompes centrifuges	40
Figure II.3	Classification de l'angle de sortie β_2 selon le type d'aubage	42

N°	Désignation	Page
Figure II.4	Triangle des vitesses à l'entrée de la roue	45
Figure II.5	Diagrammes des vitesses à l'entrée d'une roue de pompe idéale	47
Figure II.6	Diagrammes des vitesses à la sortie d'une roue de pompe idéale	48
Figure II.7	Passage de la hauteur d'Euler à la hauteur réelle après déduction des pertes hydrauliques	60
Figure II.8	Courbe caractéristique hauteur-débit d'une pompe centrifuge	60
Figure II.9	Schéma des recirculations à l'entrée de la roue à faible débit	65
Figure II.10	Courbes caractéristiques : hauteur, rendement et puissance absorbée en fonction du débit	68
Figure II.11	Triangle des vitesses et relation entre l'angle d'entrée et l'angle de sortie dans la section AB	72
Figure III.1	Exemple de moule en sable et de sable de fonderie	76
Figure III.2	Grains de silice arrondis et angulaires	79
Figure III.3	Structure d'une montmorillonite	80
Figure III.4	Exemple de réalisation d'un moule en sable avec système de coulée	84
Figure III.5	Exemple de réalisation d'un moule en sable avec système de coulée	86
Figure III.6	Principaux éléments d'un moule de coulée en sable	89
Figure III.7	Exemple de noyau maintenu dans l'empreinte par des supports, avec masselotte et descente	92
Figure III.8	Appareil de mesure de la perméabilité du sable de moulage	94
Figure III.9	Appareil universel utilisé pour l'essai de compression du sable de moulage	95
Figure III.10	Appareil utilisé pour mesurer la résistance au cisaillement du sable de moulage	96
Figure III.11	Défauts dus aux gaz dans une pièce moulée	99
Figure III.12	Défaut de retrait et défaut de remplissage	100
Figure III. 13	Exemples de défauts liés au sable	101
Figure III.14	Exemple de grande pièce industrielle obtenue par moulage au sable	102
Figure IV.1	Imprimante Anycubic	107
Figure IV.2	Filament d'impression en PLA	108
Figure IV.3	moteur d'entraînement	109

N°	Désignation	Page
Figure IV.4	moteur d'entraînementVolute de la pompe centrifuge	109
Figure IV.5	Roue semi-ouverte unidimensionnelle	109
Figure IV.6	Interface du logiciel SolidWorks	110
Figure IV.7	Interface du logiciel CURA	111
Figure IV.8	Paramètre d'impression	112
Figure IV.9	Échantillon de test importé	112
Figure IV.10	Modification des paramètres de l'imprimante	113
Figure IV.11	Appui sur l'option de prévisualisation de la pièce	113
Figure IV.12	Simulation et prévisualisation des couches d'impression	114
Figure IV.13	On clique sur le bouton enregistre	114
Figure IV.14	Tracé industriel par la méthode du double arc	115
Figure IV.15	Tracé du profil moyen de l'aube par la méthode de Pfleiderer	120
Figure IV.16	Réglage des angles d'entrée et de sortie de l'aube dans SolidWorks	120
Figure IV.17	Modèle final de la roue de pompe centrifuge avec six aubes sous SolidWorks	121
Figure IV.18	les éprouvettes après l'impressions	121
Figure IV.19	Échantillons des roues imprimées après enlèvement des supports	122
Figure IV.20	(A) et(B)et (C) Phase de montage avant la mise en marche	122
Figure IV.21	Essai expérimental in situ en cours de fonctionnement	123
Figure IV.22	Résultats de l'essai de débit	124

N°	Désignation	Page
Figure IV.23	Roue à aubes unidimensionnelles en arc de cercle	125
Figure IV.24	(1) et(2)Étape de fabrication du moule en sable	126

Liste des tableaux

N°	Désignation	Page
Tableau I.1	Classification générale des pompes	20
Tableau I.2	Avantages et inconvénients des pompes centrifuges	34
Tableau II.1	Comparaison des différents types d'aubes selon l'angle de sortie β_2	43
Tableau II.2	Signification des symboles utilisés dans le triangle des vitesses	45
Tableau II.3	Synthèse des principaux éléments des triangles des vitesses	48
Tableau II.4	Signification des grandeurs intervenant dans le calcul de l'angle d'entrée β_1	49
Tableau II.5	Influence de l'angle d'entrée β_1 sur les performances hydrauliques de la pompe	50
Tableau II.6	Signification des grandeurs intervenant dans l'étude de l'angle de sortie β_2	52
Tableau II.7	Classification des aubes selon la valeur de l'angle de sortie β_2	53
Tableau II.8	Influence de l'angle de sortie β_2 sur les performances hydrauliques de la pompe	54
Tableau II.9	Symboles utilisés dans l'équation d'Euler	56
Tableau II.10	Symboles utilisés dans l'étude du rendement hydraulique	61
Tableau II.11	Principales pertes hydrauliques dans la roue d'une pompe centrifuge	62
Tableau II.12	Symboles utilisés dans l'étude des pertes hydrauliques	65
Tableau II.13	Principaux facteurs influençant le rendement hydraulique d'une pompe centrifuge	68
Tableau II.14	Synthèse de l'influence des angles des aubes sur les performances hydrauliques de la pompe centrifuge	71
Tableau III.1	Principaux constituants du sable de moulage et leurs rôles	80

N°	Désignation	Page
Tableau III.2	Comparaison entre les principaux types de moulage au sable	84
Tableau III.3	Avantages et limites du moulage au sable	97
Tableau III.4	Extrait présentant des applications typiques des pièces moulées en fonte grise.	102
Tableau IV.1	Données géométriques de conception de la roue étudiée	115
Tableau IV.2	Coordonnées cartésiennes du profil moyen de l'aube ($\beta_1 = 20°$; $\beta_2 = 30°$)	117

Contents

ملخص 2

Abstract 2

Résumé 2

Remerciements 3

Remerciements 4

Introduction générale 16

Chapitre I : 18

Généralités sur les pompes centrifuges 18

I.1 Introduction 19

I.2 Définition des pompes 20

I.3 Classification des pompes 21

I.3.1 Pompes volumétriques 21

I.3.2 Pompes rotodynamiques 21

I.3.3 Pompes centrifuges 22

I.4 Constituants d'une pompe centrifuge 23

I.4.1 La roue 24

I.4.2 Le corps ou la volute 25

I.4.3 Le diffuseur 25

I.4.4 L'arbre de transmission 26

I.4.5 Les paliers et les garnitures 26

I.5 Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge 26

I.6 Domaines d'utilisation des pompes centrifuges 28

I.7 Courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge 29

I.7.1 Courbe hauteur-débit 30

I.7.2 Courbe puissance-débit 30

I.7.3 Courbe rendement-débit 31

I.7.4 Courbe NPSH-débit 31

I.8 Phénomène de cavitation 32

I.8.1 Types de cavitation 33

I.8.2 Notion de NPSH et condition d'absence de cavitation 34

I.8.3 Moyens de prévention de la cavitation 34

I.9 Avantages et inconvénients des pompes centrifuges 35

I.9.1 Avantages des pompes centrifuges 35
I.9.2 Inconvénients des pompes centrifuges 36
I.10 Conclusion 38
Chapitre II : 39
Étude théorique de la roue et des angles des aubes 39
II.1 Introduction 40
II.2 Description de la roue d'une pompe centrifuge 41
II.3 Rôle des aubes dans la transformation de l'énergie 42
II.4 Classification des aubes de la roue selon l'angle de sortie β2 44
II.4.1 Aubes inclinées vers l'arrière 45
II.4.2 Aubes radiales 45
II.4.3 Aubes inclinées vers l'avant 46
Synthèse comparative 46
II.5 Triangles des vitesses 47
II.5.1 Triangle des vitesses à l'entrée de la roue 48
II.5.2 Triangle des vitesses à la sortie de la roue 49
II.5.3 Vitesse absolue 50
II.5.4 Vitesse relative 50
II.5.5 Vitesse périphérique 51
II.6 Angle d'entrée des aubes β_1 51
II.6.1 Définition géométrique et hydraulique 52
II.6.2 Relation avec le triangle des vitesses 52
II.6.3 Influence de β_1 sur le rendement hydraulique 53
II.6.4 Synthèse 53
II.7 Angle de sortie des aubes β_2 54
II.7.1 Définition géométrique et hydraulique 54
II.7.2 Relation avec le triangle des vitesses 55
II.7.3 Influence sur la hauteur théorique 55
II.7.4 Classification selon la valeur de β_2 56
II.7.5 Synthèse 57
II.8 Équation d'Euler appliquée aux pompes centrifuges 57
II.8.1 Forme générale de l'équation d'Euler 58
II.8.2 Cas d'une entrée sans prérotation 58

II.8.3 Influence de l'angle de sortie β_2 58
II.8.4 Hauteur théorique, hauteur réelle et pertes hydrauliques 59
II.8.5 Symboles utilisés 59
Synthèse 60
II.9 Hauteur théorique et hauteur réelle 60
II.9.1 Hauteur théorique 60
II.9.2 Hauteur réelle 61
II.9.3 Courbe hauteur-débit 62
II.9.4 Relation avec le rendement hydraulique 63
II.9.5 Influence des angles des aubes 63
II.9.6 Symboles utilisés 64
II.10 Pertes hydrauliques dans la roue 64
II.10.1 Définition des pertes hydrauliques 65
II.10.2 Principales pertes dans la roue 65
II.10.3 Pertes par incidence à l'entrée 66
II.10.4 Pertes par frottement 66
II.10.5 Pertes par recirculation et décollement 66
II.10.6 Influence des angles β_1 et β_2 67
II.10.7 Relation avec le rendement hydraulique 67
II.10.8 Symboles utilisés 68
II.11.1 Définition du rendement hydraulique 69
II.11.2 Relation avec les pertes hydrauliques 69
II.11.3 Courbes caractéristiques et point de meilleur rendement 70
II.11.4 Distinction entre rendement hydraulique et rendement global 70
II.11.5 Principaux facteurs influençant le rendement hydraulique 71
II.11.6 Lien avec la variation des angles des aubes 71
II.12.1 Relation avec les triangles des vitesses 72
II.12.2 Relation avec l'équation d'Euler 72
II.12.3 Effet combiné de β_1 et β_2 sur le rendement 73
II.12.4 Synthèse de l'influence des angles 74
Chapitre III : 76
Le moulage au sable 76
III.2.1 Définition du moulage au sable 78

III.2.2 Principe général du procédé 78
Les principales étapes du moulage au sable 79
III.2.3 Domaine d'utilisation 79
III.3 Les matériaux utilisés dans le moulage au sable 80
III.3.1 Le sable de base 80
III.3.2 La silice 81
III.3.3 L'argile et la bentonite 81
III.3.4 L'eau d'addition 82
III.3.5 Les adjuvants 83
III.4 Les types de moulage au sable 84
III.4.1 Le moulage au sable vert 84
III.4.2 Le moulage au sable sec 85
III.4.3 Le moulage à prise chimique 85
III.4.4 Le moulage avec noyaux 86
III.5 Les étapes du procédé de moulage au sable 87
III.5.1 Préparation du modèle 88
III.5.2 Préparation du sable de moulage 88
III.5.3 Réalisation de l'empreinte 89
III.5.4 Mise en place du système de coulée 89
III.5.5 Coulée du métal liquide 89
III.5.6 Refroidissement et solidification 90
III.5.7 Démoulage 90
III.5.8 Ébarbage, nettoyage et finition 90
III.6 Les éléments d'un moule en sable 91
III.6.1 Le châssis de moulage 91
III.6.2 La chape et le dessous 92
III.6.3 Le plan de joint 92
III.6.4 Le système de coulée 93
III.6.5 Les masselottes 93
III.6.6 Les noyaux 94
III.7 Les propriétés du sable de moulage 94
III.7.1 La réfractarité 95
III.7.2 La perméabilité 95

III.7.3 La cohésion 96
III.7.4 La plasticité 96
III.7.5 La résistance à la compression 97
III.7.6 La résistance au cisaillement 97
III.8 Avantages et limites du moulage au sable 98
III.8.1 Avantages 98
III.8.2 Inconvénients 99
III.9 Défauts liés au moulage au sable 100
III.9.1 Défauts dus aux gaz 100
III.9.2 Défauts de retrait 101
III.9.3 Défauts de remplissage 102
III.9.4 Défauts liés au sable 102
III.10 Applications industrielles du moulage au sable 103
III.11 Conclusion 105
CHAPITRE IV : 107
Techniques expérimentales 107
IV.1. Les matériaux utilisés 109
L'imprimante Anycubic i3 Mage: 109
Filament d'impression en PLA 109
IV.1.1. Logiciel Ultimaker Cura : 113
IV.2. Conception des aubes par la méthode du double arc. 117
IV.3. La méthode de conception par transformations conformes. 117
3. Principe du tracé de Pfleiderer 118
IV 4. Procédure numérique de calcul 119
IV 5. Exemple de calcul : $\beta 1 = 20°$ et $\beta 2 = 30°$ 119
IV.6. Conception des échantillons à l'aide du logiciel SolidWorks. 120
IV.7. Impression des échantillons. 123
IV .8 RESULTATS ET DISCUSSIONS 125
Conclusion 128
Conclusion générale 129
Références 131

Introduction générale

L'utilisation des pompes centrifuges occupe une place très importante dans les domaines industriels, hydrauliques, énergétiques, agricoles et pétroliers. Grâce à leur simplicité de construction, leur fonctionnement continu, leur facilité d'entretien et leur capacité à assurer des débits importants, elles constituent aujourd'hui l'un des systèmes de pompage les plus utilisés pour le transport des fluides.

Toutefois, les performances d'une pompe centrifuge dépendent fortement de plusieurs paramètres hydrauliques et géométriques, notamment la conception de la roue et la forme des aubes. Parmi ces paramètres, les angles d'entrée β_1 et de sortie β_2 jouent un rôle essentiel dans l'écoulement du fluide, le transfert d'énergie, la hauteur manométrique ainsi que le rendement hydraulique de la pompe.

En effet, une mauvaise adaptation des angles des aubes peut provoquer des pertes hydrauliques importantes, des phénomènes de turbulence, des recirculations, des décollements de l'écoulement et une diminution sensible du rendement global. À l'inverse, une géométrie bien adaptée permet d'améliorer la stabilité de fonctionnement, de limiter les pertes internes et d'optimiser les performances énergétiques de la pompe centrifuge. L'étude de l'influence des angles des aubes représente donc un élément fondamental dans la conception et l'optimisation des roues de pompes centrifuges.

Dans ce contexte, ce travail a pour objectif principal d'étudier l'influence de la variation des angles des aubes de la roue sur le rendement d'une pompe centrifuge. Cette étude vise à mieux comprendre les phénomènes hydrauliques liés à la géométrie de la roue et à analyser le rôle des angles β_1 et β_2 dans le comportement global de la pompe.

Pour atteindre cet objectif, ce mémoire a été structuré en trois chapitres principaux. Le **Chapitre I** présente des généralités sur les pompes centrifuges. Nous y exposons leur définition, leur classification, leurs principaux composants ainsi que leur principe de fonctionnement. Les courbes caractéristiques, les avantages et les inconvénients des pompes centrifuges ont également

été étudiés, en mettant particulièrement l'accent sur le phénomène de cavitation et ses effets sur les performances hydrauliques de la pompe.

Le **Chapitre II** est consacré à l'étude théorique de la roue et des angles des aubes. Dans cette partie, nous avons étudié la géométrie de la roue, le rôle des aubes dans le transfert de l'énergie ainsi que les différents types d'aubes selon l'orientation de l'angle de sortie β_2. Les triangles des vitesses à l'entrée et à la sortie de la roue ont également été analysés afin de mieux comprendre les relations entre les vitesses du fluide, les angles des aubes et la hauteur théorique fournie par la pompe. Enfin, l'équation d'Euler appliquée aux turbomachines a permis de mettre en évidence l'influence directe des angles β_1 et β_2 sur la hauteur manométrique, la puissance absorbée et le rendement hydraulique.

Le **Chapitre III** est consacré au procédé de fabrication de la roue de la pompe. Il présente les principes du moulage au sable, les matériaux utilisés, les principales étapes de fabrication ainsi que les difficultés techniques rencontrées lors de la réalisation du prototype.

Le **Chapitre IV** est consacré à l'étude de l'influence de la variation des angles des aubes sur les performances hydrauliques de la pompe centrifuge. Cette partie a permis d'analyser les effets des variations des angles d'entrée et de sortie sur l'écoulement du fluide, les pertes hydrauliques, la hauteur manométrique et le rendement global de la pompe. Les résultats obtenus ont permis de comparer différentes configurations géométriques et de mettre en évidence l'importance du choix des angles des aubes dans l'amélioration des performances énergétiques et hydrauliques des pompes centrifuges.

Enfin, ce travail se termine par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus, suivie des références bibliographiques utilisées dans l'élaboration de cette étude.

Chapitre I :

Généralités sur les pompes centrifuges

I.1 Introduction

Les pompes occupent une place essentielle dans les installations industrielles, hydrauliques et énergétiques. Elles permettent d'assurer le transport des liquides d'un point à un autre en leur fournissant l'énergie nécessaire pour vaincre les pertes de charge, les différences de niveau ainsi que les résistances rencontrées dans les conduites. Parmi les différents types de pompes, les pompes centrifuges sont les plus utilisées en raison de leur simplicité de construction, de leur fonctionnement continu, de leur fiabilité et de leur capacité à assurer des débits importants.

Une pompe centrifuge est une turbomachine hydraulique qui transforme l'énergie mécanique fournie par un moteur en énergie hydraulique transmise au fluide. Cette transformation s'effectue principalement au niveau de la roue, appelée également impulseur. Le fluide entre généralement par la partie centrale de la roue, puis il est accéléré vers la périphérie sous l'effet de la force centrifuge. Ensuite, il est dirigé vers la volute ou le diffuseur, où une partie de son énergie cinétique est transformée en énergie de pression.

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge dépend de plusieurs paramètres, tels que le débit, la hauteur manométrique, la vitesse de rotation, la puissance absorbée et le rendement. Il dépend également de la géométrie interne de la pompe, notamment de la forme de la roue, du nombre d'aubes ainsi que des angles d'entrée et de sortie des aubes. Ces paramètres géométriques influencent directement l'écoulement du fluide, les pertes hydrauliques, les zones de recirculation et, par conséquent, les performances globales de la pompe.

L'écoulement dans une pompe centrifuge est généralement complexe, turbulent et parfois instationnaire, en particulier lorsque la pompe fonctionne en dehors de son point nominal. Les interactions entre la roue mobile et les organes fixes, tels que le diffuseur ou la volute, peuvent provoquer des fluctuations de vitesse et de pression qui influencent le rendement et la stabilité de fonctionnement de la machine. Des études expérimentales ont montré que le fonctionnement à débit partiel ainsi que les interactions roue-diffuseur jouent un rôle important dans le comportement hydraulique des pompes centrifuges [1], [4].

Dans ce chapitre, nous présentons les notions générales relatives aux pompes centrifuges. Nous commencerons par la définition et la classification des pompes, puis nous décrirons les

principaux composants d'une pompe centrifuge ainsi que son principe de fonctionnement. Ensuite, nous aborderons les courbes caractéristiques, le phénomène de cavitation, ainsi que les principaux avantages et inconvénients de ce type de machine. Ces éléments permettront de mieux comprendre, dans les chapitres suivants, l'influence de la variation des angles des aubes de la roue sur le rendement d'une pompe centrifuge.

I.2 Définition des pompes

Une pompe est une machine hydraulique destinée à transférer un liquide d'un endroit à un autre en lui communiquant une énergie mécanique. Cette énergie permet au fluide d'augmenter sa pression, sa vitesse ou son altitude afin de vaincre les pertes de charge dans les conduites et d'assurer son écoulement dans une installation hydraulique.

D'une manière générale, la pompe reçoit l'énergie mécanique fournie par un moteur électrique, thermique ou autre, puis la transforme en énergie hydraulique transmise au fluide. Cette énergie se traduit principalement par une augmentation de la hauteur manométrique, qui représente l'énergie fournie au liquide par unité de poids.

Les pompes sont utilisées dans de nombreux domaines, notamment l'industrie, l'agriculture, les installations pétrolières, les réseaux d'alimentation en eau, les systèmes de refroidissement, les stations de pompage et les circuits hydrauliques. Leur choix dépend de plusieurs paramètres, tels que la nature du liquide transporté, le débit demandé, la hauteur manométrique, la pression de service, la température du fluide ainsi que les conditions de fonctionnement.

On distingue généralement deux grandes familles de pompes : les pompes volumétriques et les pompes rotodynamiques. Les pompes volumétriques fonctionnent par variation de volume et permettent de déplacer une quantité déterminée de liquide à chaque cycle. Les pompes rotodynamiques, quant à elles, transmettent l'énergie au fluide grâce à la rotation d'un organe mobile, généralement une roue munie d'aubes. Les pompes centrifuges appartiennent à cette deuxième catégorie et sont largement utilisées en raison de leur simplicité, de leur fonctionnement continu et de leur capacité à assurer des débits importants [8], [10].

I.3 Classification des pompes

Les pompes peuvent être classées selon plusieurs critères, notamment leur principe de fonctionnement, la trajectoire du fluide, le nombre d'étages, la disposition de l'arbre et le domaine d'utilisation. D'une manière générale, on distingue deux grandes familles de pompes : les pompes volumétriques et les pompes rotodynamiques [8], [10].

I.3.1 Pompes volumétriques

Les pompes volumétriques fonctionnent par déplacement d'un volume déterminé de liquide. Le fluide est aspiré dans une chambre, puis refoulé sous l'effet de la variation du volume de cette chambre. Ce type de pompe permet généralement d'obtenir des pressions élevées, même pour des débits relativement faibles.

On distingue principalement :

- les pompes volumétriques alternatives, comme les pompes à piston et les pompes à membrane ;
- les pompes volumétriques rotatives, comme les pompes à engrenages, les pompes à palettes et les pompes à vis.

Ces pompes sont souvent utilisées lorsque l'on recherche un débit précis ou une pression importante.

I.3.2 Pompes rotodynamiques

Les pompes rotodynamiques transmettent l'énergie au fluide à l'aide d'un organe tournant, généralement une roue munie d'aubes. Contrairement aux pompes volumétriques, l'énergie est transmise au liquide de manière continue grâce à l'effet dynamique produit par la rotation de la roue.

Selon la direction principale de l'écoulement à travers la roue, on distingue :

- les pompes centrifuges, dans lesquelles le fluide s'écoule principalement dans la direction radiale ;
- les pompes axiales, dans lesquelles le fluide s'écoule suivant l'axe de rotation ;

- les pompes hélico-centrifuges, appelées aussi pompes à écoulement mixte, dans lesquelles le fluide possède à la fois une composante axiale et une composante radiale.

I.3.3 Pompes centrifuges

Les pompes centrifuges appartiennent à la famille des pompes rotodynamiques. Elles sont les plus utilisées dans les installations industrielles et hydrauliques, car elles permettent d'assurer des débits importants avec une construction relativement simple.

Dans une pompe centrifuge, le liquide entre généralement au centre de la roue, puis il est entraîné vers la périphérie sous l'effet de la force centrifuge. Cette transformation permet d'augmenter l'énergie du fluide sous forme de pression et de vitesse.

Les pompes centrifuges peuvent être classées selon plusieurs critères :

a. Selon le nombre d'étages

- les pompes monocellulaires, qui possèdent une seule roue ;
- les pompes multicellulaires, qui comportent plusieurs roues montées en série afin d'obtenir une hauteur manométrique plus élevée.

b. Selon la disposition de l'arbre

- les pompes à axe horizontal ;
- les pompes à axe vertical.

c. Selon le mode d'aspiration

- les pompes à simple aspiration, où le liquide entre d'un seul côté de la roue ;
- les pompes à double aspiration, où le liquide entre des deux côtés de la roue, ce qui permet d'équilibrer partiellement les efforts axiaux.

d. Selon la forme du corps de pompe

- les pompes à volute ;
- les pompes à diffuseur ;
- les pompes à corps segmenté, souvent utilisées dans les pompes multicellulaires.

Tableau I.1 : Classification générale des pompes. [10].

Grande famille	Type de pompe	Exemples
Pompes volumétriques	Pompes alternatives	Pompe à piston, pompe à membrane
Pompes volumétriques	Pompes rotatives	Pompe à engrenages, pompe à palettes, pompe à vis
Pompes rotodynamiques	Pompes centrifuges	Pompes radiales, monocellulaires ou multicellulaires
Pompes rotodynamiques	Pompes axiales	Pompes à hélice
Pompes rotodynamiques	Pompes hélico-centrifuges	Pompes à écoulement mixte

I.4 Constituants d'une pompe centrifuge

Une pompe centrifuge est constituée de plusieurs éléments hydrauliques et mécaniques qui assurent ensemble la transformation de l'énergie mécanique en énergie hydraulique. Les principaux organes d'une pompe centrifuge sont la roue, le corps ou la volute, le diffuseur, l'arbre de transmission, les paliers et les dispositifs d'étanchéité. Chaque élément possède un rôle précis dans le fonctionnement de la pompe et influence directement ses performances, notamment le débit, la hauteur manométrique et le rendement [8], [10].

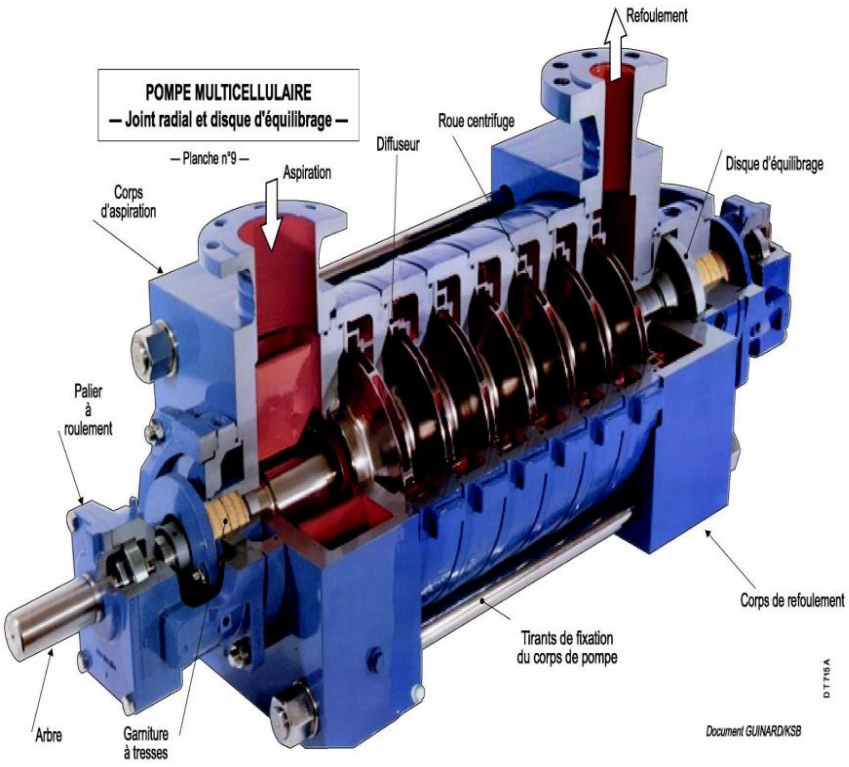


Figure I.1 : Constituants principaux d'une pompe centrifuge,[10].

I.4.1 La roue

La roue, appelée aussi impulseur, est l'élément principal d'une pompe centrifuge. Elle est montée sur l'arbre de transmission et tourne à grande vitesse à l'intérieur du corps de pompe. Elle est généralement composée d'un moyeu, de flasques et d'aubes qui guident le fluide depuis l'entrée vers la sortie de la roue.

Le liquide entre axialement au centre de la roue, puis il est entraîné vers la périphérie sous l'effet de la force centrifuge. Pendant ce passage, la roue communique au fluide une partie de l'énergie mécanique reçue du moteur. Cette énergie se manifeste sous forme d'augmentation de la vitesse et de la pression du liquide.

La géométrie de la roue joue un rôle très important dans les performances de la pompe. Le diamètre de la roue, le nombre d'aubes, la largeur des passages ainsi que les angles d'entrée et de sortie des aubes influencent directement l'écoulement du fluide et le rendement hydraulique. C'est

pourquoi l'étude de la variation des angles des aubes constitue un point essentiel dans l'analyse des performances d'une pompe centrifuge.

I.4.2 Le corps ou la volute

Le corps de pompe, appelé également volute, est la partie fixe qui entoure la roue. Il reçoit le liquide sortant de la roue à grande vitesse et le dirige vers la conduite de refoulement. Sa forme est généralement spirale, ce qui permet de collecter progressivement le fluide tout autour de la roue.

La volute a pour rôle principal de canaliser le liquide vers la sortie de la pompe. Elle permet aussi de réduire la vitesse du fluide en augmentant progressivement la section de passage. Cette diminution de vitesse s'accompagne d'une transformation partielle de l'énergie cinétique en énergie de pression. Ainsi, la volute contribue à l'augmentation de la hauteur manométrique de la pompe.

Une mauvaise conception de la volute peut provoquer des pertes hydrauliques, des turbulences et des déséquilibres de pression autour de la roue. Ces phénomènes peuvent influencer le rendement de la pompe ainsi que sa stabilité de fonctionnement.

I.4.3 Le diffuseur

Le diffuseur est un organe fixe placé à la sortie de la roue, lorsqu'il existe. Il peut être lisse ou muni d'aubes fixes. Son rôle est complémentaire à celui de la volute. Il permet de guider le fluide sortant de la roue et de transformer une partie de sa grande vitesse en pression. Dans une pompe équipée d'un diffuseur, le fluide passe d'abord par les canaux du diffuseur avant d'atteindre la volute ou la sortie de la machine. Cette étape permet de réduire les turbulences et d'améliorer la récupération de pression. Dans certaines pompes, le diffuseur peut être réduit ou même absent ; dans ce cas, le fluide sort directement de la roue vers la volute [8]. Le diffuseur influence fortement l'écoulement à la sortie de la roue. Lorsque le diffuseur est muni d'aubes, l'interaction entre les aubes mobiles de la roue et les aubes fixes du diffuseur peut rendre l'écoulement plus complexe et provoquer des fluctuations de vitesse et de pression. [6].

I.4.4 L'arbre de transmission

L'arbre de transmission est un élément mécanique qui relie la roue au moteur. Il transmet la puissance mécanique fournie par le moteur vers la roue et permet sa rotation. Il doit assurer le bon centrage dynamique de la roue afin d'éviter les vibrations, les frottements excessifs et les déséquilibres pendant le fonctionnement. L'arbre est soumis à plusieurs sollicitations mécaniques, notamment la torsion due au couple transmis, la flexion causée par les efforts hydrauliques et les vibrations générées par la rotation. Pour cette raison, il doit être suffisamment rigide et correctement dimensionné. Dans certaines pompes, l'arbre est protégé par une chemise d'arbre afin de limiter l'usure et d'améliorer l'étanchéité au niveau des zones de contact avec le fluide ou les garnitures.

I.4.5 Les paliers et les garnitures

Les paliers sont des organes mécaniques qui supportent l'arbre et assurent son guidage pendant la rotation. Ils permettent de maintenir l'alignement de l'arbre et de réduire les frottements. Ils jouent donc un rôle important dans la stabilité mécanique de la pompe et dans la limitation des vibrations. Les garnitures assurent l'étanchéité entre l'arbre tournant et le corps fixe de la pompe. Leur rôle est d'empêcher les fuites du liquide vers l'extérieur ou, au minimum, d'en limiter l'importance. On distingue généralement les garnitures à tresse et les garnitures mécaniques. Le choix du système d'étanchéité dépend de la nature du fluide pompé, de la pression, de la température et des conditions de fonctionnement. Un mauvais état des paliers ou des garnitures peut entraîner des fuites, des échauffements, des vibrations et une diminution de la durée de vie de la pompe. Ces éléments doivent donc être contrôlés régulièrement dans le cadre de la maintenance préventive.

I.5 Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge repose sur la transformation de l'énergie mécanique fournie par le moteur en énergie hydraulique transmise au fluide. Cette transformation s'effectue principalement grâce à la rotation de la roue, qui constitue l'organe essentiel de la pompe. Lorsque la pompe est en fonctionnement, le moteur entraîne l'arbre de transmission, qui fait tourner la roue à une vitesse déterminée. Le liquide pénètre dans la pompe par l'orifice

d'aspiration et arrive au centre de la roue, appelé œil de la roue. Sous l'effet de la rotation des aubes, le fluide est entraîné vers la périphérie de la roue. Ce déplacement radial est provoqué par l'action de la force centrifuge.

Au cours de son passage dans la roue, le fluide reçoit de l'énergie. Cette énergie se manifeste par une augmentation de sa vitesse et de sa pression. À la sortie de la roue, le liquide possède donc une énergie cinétique importante. Il est ensuite dirigé vers la volute ou vers le diffuseur, selon la conception de la pompe. Dans cette partie fixe, la section de passage augmente progressivement, ce qui provoque une diminution de la vitesse du fluide et une transformation partielle de l'énergie cinétique en énergie de pression. Ainsi, le principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge peut être résumé en trois étapes principales : l'aspiration du liquide au centre de la roue, l'accélération du fluide par les aubes de la roue, puis la transformation d'une partie de la vitesse en pression dans la volute ou le diffuseur. Ce mécanisme permet d'obtenir un débit continu et une hauteur manométrique suffisante pour transporter le liquide dans l'installation hydraulique.

Le bon fonctionnement d'une pompe centrifuge dépend de plusieurs paramètres, notamment la vitesse de rotation, le débit, la géométrie de la roue, le nombre d'aubes, ainsi que les angles d'entrée et de sortie des aubes. Ces angles influencent directement la direction de l'écoulement dans la roue, les pertes hydrauliques et le rendement global de la pompe. C'est pourquoi leur étude est importante pour améliorer les performances d'une pompe centrifuge [8], [10].

L'écoulement à l'intérieur d'une pompe centrifuge n'est pas toujours parfaitement régulier. Lorsque la pompe fonctionne loin de son point nominal, notamment à débit partiel, des phénomènes de recirculation, de turbulence et d'instationnarité peuvent apparaître. Ces phénomènes modifient la répartition des vitesses et des pressions dans la roue et peuvent entraîner une diminution du rendement [1], [4].

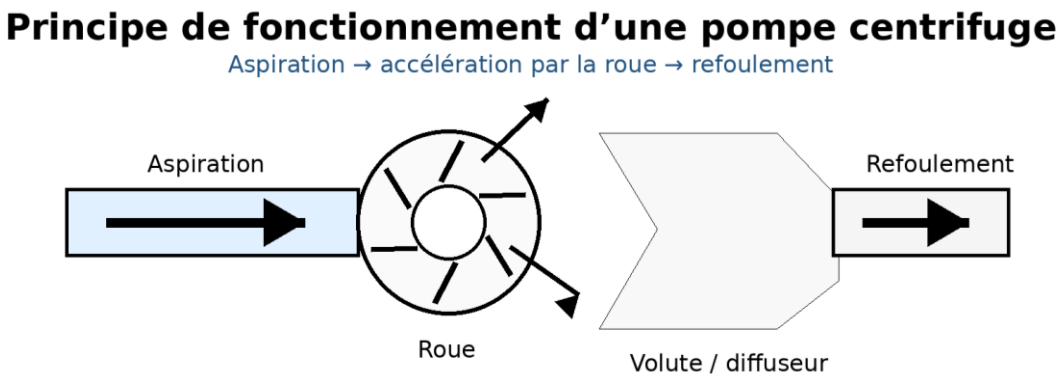


Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge,[10].

I.6 Domaines d'utilisation des pompes centrifuges

Les pompes centrifuges sont largement utilisées dans de nombreux secteurs en raison de leur simplicité de construction, de leur fiabilité, de leur fonctionnement continu et de leur capacité à assurer des débits importants. Elles sont particulièrement adaptées au transport des liquides peu visqueux, tels que l'eau, les hydrocarbures légers, les liquides de refroidissement et certains produits chimiques.

Dans le domaine industriel, les pompes centrifuges sont utilisées pour l'alimentation des circuits hydrauliques, le transfert des fluides, le refroidissement des machines, la circulation de l'eau dans les échangeurs thermiques ainsi que l'évacuation des eaux usées. Elles occupent également une place importante dans les raffineries, les complexes pétroliers et les installations de traitement des fluides, où elles assurent le transfert, la circulation et le pompage des liquides à différentes pressions et débits [10].

Dans le domaine de l'alimentation en eau, ces pompes sont employées dans les stations de pompage, les réseaux de distribution, les installations d'irrigation et les systèmes de surpression. Elles permettent d'acheminer l'eau depuis les réservoirs, les puits ou les stations de traitement vers les zones de consommation. Leur aptitude à fournir un débit continu les rend très adaptées aux réseaux hydrauliques urbains et agricoles.

Les pompes centrifuges sont aussi utilisées dans les systèmes de refroidissement, notamment dans les centrales électriques, les installations industrielles et les circuits fermés de

refroidissement. Dans ces applications, elles assurent la circulation permanente du fluide caloporteur afin de maintenir les équipements à une température de fonctionnement acceptable.

Dans le secteur pétrolier et gazier, les pompes centrifuges servent au transfert des hydrocarbures, à l'alimentation des unités de traitement, au pompage des condensats et à la circulation des liquides dans les différentes unités de production. Elles peuvent aussi être utilisées dans les installations de lutte contre l'incendie, où elles doivent fournir rapidement un débit important sous une pression suffisante.

Enfin, les pompes centrifuges sont employées dans les domaines du bâtiment, de l'agriculture, de l'assainissement, de la chimie et de l'énergie. Le choix d'une pompe centrifuge dépend principalement du débit demandé, de la hauteur manométrique, de la nature du fluide pompé, de la température, de la pression de service et des conditions d'installation [8], [10].

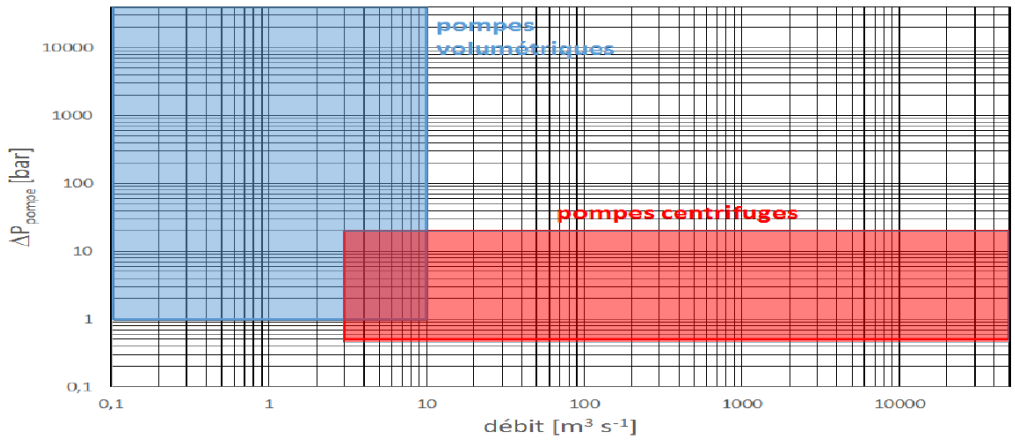


Figure I.3 : Gamme d'utilisation des turbopompes et des pompes volumétriques,[8].

I.7 Courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge

Les courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge représentent l'évolution des principales grandeurs de fonctionnement en fonction du débit. Elles permettent d'analyser le comportement hydraulique de la pompe, de déterminer son point de fonctionnement et d'évaluer ses performances. Les courbes les plus utilisées sont la courbe hauteur-débit, la courbe puissance-débit, la courbe rendement-débit et la courbe NPSH-débit [8], [10].

Ces courbes sont généralement établies à partir d'essais expérimentaux ou fournies par le constructeur. Elles sont indispensables pour choisir une pompe adaptée à une installation donnée et pour vérifier qu'elle fonctionne dans une zone stable et proche du meilleur rendement.

I.7.1 Courbe hauteur-débit

La courbe hauteur-débit, notée H = f(Q), représente la variation de la hauteur manométrique fournie par la pompe en fonction du débit. Dans une pompe centrifuge, la hauteur manométrique diminue généralement lorsque le débit augmente. À faible débit, la pompe fournit une hauteur élevée, tandis qu'à débit important, les pertes hydrauliques croissent et la hauteur décroît progressivement.

Cette courbe est fondamentale pour la détermination du point de fonctionnement, obtenu par l'intersection entre la courbe de la pompe et la courbe du réseau. Elle permet de connaître la hauteur réelle fournie par la pompe pour une valeur donnée du débit.

La hauteur manométrique peut être exprimée par la relation suivante :

$$H = (P_2 - P_1)/(\rho g) + (V_2^2 - V_1^2)/(2g) + (Z_2 - Z_1)$$

où H est la hauteur manométrique, P_1 et P_2 sont les pressions à l'entrée et à la sortie, ρ est la masse volumique du fluide, g l'accélération de la pesanteur, V_1 et V_2 les vitesses à l'entrée et à la sortie, et Z_1 et Z_2 les altitudes correspondantes.

I.7.2 Courbe puissance-débit

La courbe puissance-débit, notée P = f(Q), représente l'évolution de la puissance absorbée par la pompe en fonction du débit. Cette puissance correspond à l'énergie mécanique fournie à l'arbre pour assurer la rotation de la roue et le transfert d'énergie au fluide.

La puissance hydraulique utile est donnée par : $P_h = \rho g Q H$. La puissance absorbée est supérieure à la puissance hydraulique utile, car une partie de l'énergie est perdue sous forme de pertes hydrauliques, mécaniques et volumétriques.

En général, la puissance absorbée augmente avec le débit, bien que l'allure exacte de la courbe dépende du type de roue, de la géométrie de la pompe et des conditions d'utilisation.

I.7.3 Courbe rendement-débit

La courbe rendement-débit, notée $\eta = f(Q)$, traduit la variation du rendement global de la pompe en fonction du débit. Le rendement est défini comme le rapport entre la puissance hydraulique utile et la puissance absorbée : $\eta = P_h / P_a$.

La courbe de rendement possède généralement une forme en cloche : le rendement augmente avec le débit jusqu'à atteindre une valeur maximale, puis il diminue lorsque le débit devient trop élevé. Le point correspondant au rendement maximal est appelé point de meilleur rendement ou BEP (Best Efficiency Point).

Le fonctionnement à proximité du BEP est recommandé, car il permet de réduire les pertes hydrauliques, les vibrations, les efforts radiaux et les risques de cavitation. Dans le cadre de cette étude, cette courbe est particulièrement importante pour comparer l'influence des angles des aubes sur les performances de la pompe.

I.7.4 Courbe NPSH-débit

Le NPSH (Net Positive Suction Head) représente la charge nette positive à l'aspiration nécessaire pour éviter la cavitation. On distingue le NPSH disponible, qui dépend de l'installation, et le NPSH requis, qui dépend de la pompe et qui est généralement fourni par le constructeur.

Pour éviter la cavitation, il faut vérifier la condition suivante : NPSH disponible > NPSH requis. Lorsque cette condition n'est pas respectée, des bulles de vapeur peuvent apparaître à l'aspiration, provoquant du bruit, des vibrations, une baisse du rendement et une détérioration des surfaces internes. La courbe NPSH-débit montre généralement une augmentation du NPSH requis avec le débit. Cette courbe est indispensable pour vérifier que la pompe pourra fonctionner sans cavitation dans les conditions imposées par l'installation.

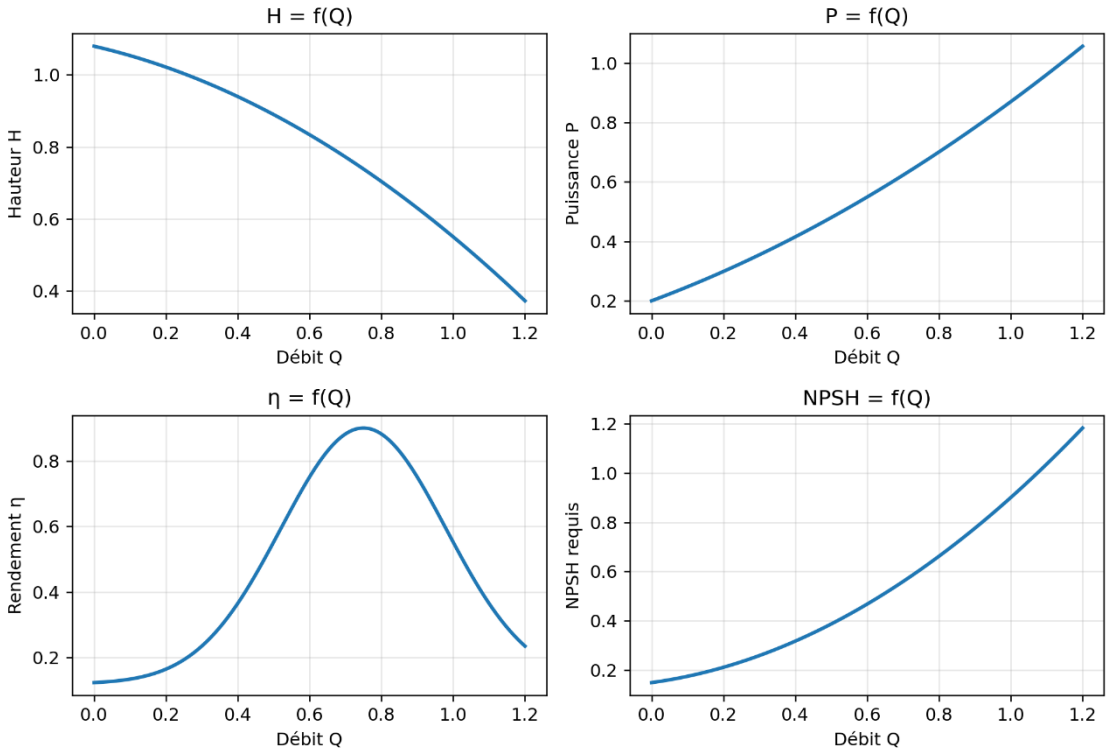


Figure I.4 : Courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge.

Source : schéma illustratif élaboré à partir des tendances générales présentées dans [8] et [10].

I.8 Phénomène de cavitation

La cavitation est l'un des phénomènes les plus redoutés dans le fonctionnement des pompes centrifuges. Elle apparaît lorsque la pression locale du liquide devient inférieure ou égale à sa pression de vapeur saturante. Dans ces conditions, des bulles ou des poches de vapeur se forment dans l'écoulement. Lorsque ces bulles sont ensuite transportées vers des zones de pression plus élevée, elles implosent brutalement et produisent des chocs locaux très intenses.

Dans une pompe centrifuge, la cavitation se manifeste généralement au voisinage de l'aspiration ou à l'entrée de la roue, où la pression est minimale. Elle peut être provoquée par une hauteur d'aspiration excessive, des pertes de charge importantes dans la conduite d'aspiration, une température élevée du liquide, un débit trop important, une vitesse de rotation élevée ou encore une mauvaise conception hydraulique de la roue.

Le phénomène de cavitation n'est pas seulement une perturbation hydraulique ; il constitue également une cause majeure de dégradation des performances et de détérioration des organes internes de la pompe. Pour cette raison, il doit être pris en considération dans toute étude portant sur le rendement et le comportement d'une pompe centrifuge [10].

Les principales conséquences de la cavitation sont :

- une baisse du débit et de la hauteur manométrique ;
- une diminution du rendement global de la pompe ;
- l'apparition de bruit et de vibrations ;
- l'érosion progressive des aubes de la roue et des autres surfaces métalliques ;
- une réduction de la durée de vie des composants hydrauliques et mécaniques.

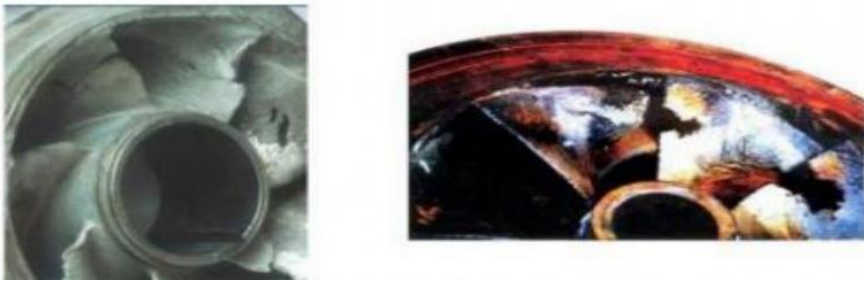


Figure I.5 : Érosion par cavitation d'une roue de pompe centrifuge[10].

I.8.1 Types de cavitation

La cavitation peut se présenter sous plusieurs formes. Parmi les formes les plus connues, on trouve la cavitation à bulles séparées, la cavitation à poches, la cavitation à lames, la cavitation de vortex et la cavitation de mélange. Ces formes diffèrent par leur aspect physique et par la manière dont la vapeur apparaît et se développe dans l'écoulement.La cavitation à bulles séparées se caractérise par la présence de bulles isolées se formant de manière aléatoire. La cavitation à poches correspond à une cavité de vapeur plus importante, attachée à un profil ou à un obstacle. Dans les pompes centrifuges, ces deux types sont particulièrement importants, car ils peuvent apparaître au voisinage des bords d'attaque des aubes ou dans les zones de forte dépression.

I.8.2 Notion de NPSH et condition d'absence de cavitation

Pour analyser le risque de cavitation, on utilise la notion de NPSH (Net Positive Suction Head), traduite en français par hauteur nette positive à l'aspiration. On distingue le NPSH disponible, qui dépend de l'installation, et le NPSH requis, qui dépend de la pompe et qui est généralement fourni par le constructeur.

Afin d'éviter la cavitation, il faut respecter la condition suivante : NPSH disponible > NPSH requis. Dans la pratique, il est recommandé de prévoir une marge de sécurité afin de tenir compte des variations de débit, des pertes de charge et des conditions réelles d'exploitation.

La figure suivante illustre l'évolution du NPSH requis et du NPSH disponible en fonction du débit circulé par la pompe. Lorsque la courbe du NPSH disponible devient inférieure à celle du NPSH requis, la pompe entre dans une zone de cavitation.

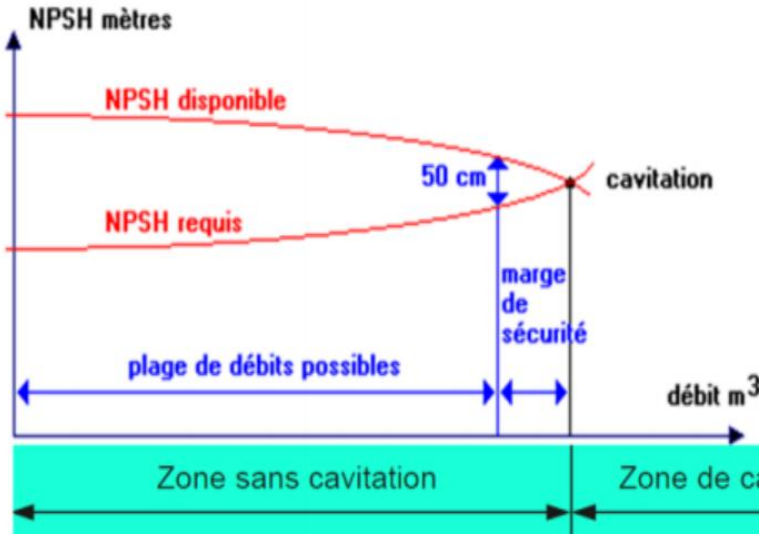


Figure I.6 : Variation du NPSH requis et du NPSH disponible avec le débit [10].

I.8.3 Moyens de prévention de la cavitation

La prévention de la cavitation repose essentiellement sur une bonne conception de l'installation et sur un choix correct de la pompe. Il convient notamment de réduire les pertes de charge à l'aspiration, de limiter la longueur de la conduite d'aspiration, d'éviter les coudes inutiles,

d'augmenter si nécessaire le diamètre de la conduite et de choisir une pompe dont le NPSH requis reste compatible avec le NPSH disponible.

Il est également recommandé d'éviter le fonctionnement prolongé loin du point nominal, car un régime de fonctionnement défavorable favorise l'apparition des zones de basse pression, des recirculations et des instabilités hydrauliques. Dans le cadre de cette étude, la cavitation doit être prise en considération, car la variation des angles des aubes de la roue peut modifier la distribution des pressions à l'entrée de la roue et influencer le risque de cavitation.

I.9 Avantages et inconvénients des pompes centrifuges

Les pompes centrifuges sont largement utilisées dans les installations industrielles, hydrauliques et énergétiques en raison de leur simplicité de construction, de leur fiabilité et de leur aptitude à assurer un fonctionnement continu. Elles permettent de transporter des liquides avec des débits importants et conviennent particulièrement aux fluides peu visqueux, comme l'eau, les hydrocarbures légers et certains liquides industriels.

Cependant, comme tout équipement hydraulique, les pompes centrifuges présentent aussi certaines limites. Ces limites doivent être prises en considération lors du choix de la pompe, de son installation et de son exploitation. Une pompe mal choisie ou utilisée loin de sa zone optimale peut présenter une baisse de rendement, des vibrations, des pertes hydrauliques importantes ou encore un risque de cavitation [8], [10].

I.9.1 Avantages des pompes centrifuges

Les pompes centrifuges présentent plusieurs avantages qui expliquent leur utilisation très répandue dans les installations industrielles. Le premier avantage est leur construction relativement simple. Elles sont généralement composées d'un nombre limité d'organes principaux, tels que la roue, la volute, l'arbre, les paliers et les garnitures. Cette simplicité facilite leur montage, leur exploitation et leur maintenance.

Un autre avantage important est la continuité de l'écoulement. Contrairement aux pompes volumétriques alternatives, qui peuvent produire un débit pulsatoire, les pompes centrifuges assurent un écoulement plus régulier. Cette caractéristique les rend adaptées aux réseaux

d'alimentation en eau, aux circuits de refroidissement, aux installations de traitement des liquides et aux systèmes nécessitant une circulation permanente du fluide.

Les pompes centrifuges sont également capables de fournir des débits importants. Elles sont donc particulièrement adaptées au transport de grandes quantités de liquides, surtout lorsque la hauteur manométrique demandée reste compatible avec leur domaine de fonctionnement. Dans le cas où une hauteur plus élevée est nécessaire, il est possible d'utiliser des pompes multicellulaires, constituées de plusieurs roues montées en série.

Ces pompes peuvent atteindre un bon rendement lorsqu'elles fonctionnent au voisinage de leur point nominal. Dans cette zone, l'écoulement à l'intérieur de la roue est plus régulier, les pertes hydrauliques sont limitées et les vibrations restent faibles. Le fonctionnement près du point de meilleur rendement permet donc de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer la durée de vie de la pompe.

Enfin, les pompes centrifuges offrent une grande diversité de conceptions. Elles peuvent être horizontales ou verticales, monocellulaires ou multicellulaires, à simple ou double aspiration, avec volute ou avec diffuseur. Cette variété de configurations permet de les adapter à de nombreux domaines d'utilisation, tels que l'industrie, l'agriculture, l'alimentation en eau, les raffineries, les centrales énergétiques et les systèmes de refroidissement.

I.9.2 Inconvénients des pompes centrifuges

Malgré leurs nombreux avantages, les pompes centrifuges présentent aussi certains inconvénients. Le premier est leur sensibilité aux conditions d'aspiration. Lorsque la pression à l'entrée de la pompe devient trop faible, le risque de cavitation augmente. Ce phénomène peut provoquer du bruit, des vibrations, une diminution du rendement et une érosion progressive des aubes de la roue. Pour cette raison, il est nécessaire de vérifier que le NPSH disponible de l'installation est supérieur au NPSH requis par la pompe.

Un autre inconvénient est la baisse du rendement lorsque la pompe fonctionne loin de son point nominal. À débit très faible ou très élevé, l'écoulement devient moins stable. Des phénomènes tels que la recirculation, la turbulence, le décollement de l'écoulement ou les

fluctuations de pression peuvent apparaître. Ces phénomènes augmentent les pertes hydrauliques et réduisent les performances globales de la pompe.

Les pompes centrifuges sont aussi moins adaptées au pompage des liquides très visqueux. Lorsque la viscosité du fluide augmente, les pertes par frottement deviennent plus importantes, ce qui entraîne une augmentation de la puissance absorbée et une diminution du rendement. Dans ce cas, d'autres types de pompes, notamment les pompes volumétriques, peuvent être plus appropriés.

De plus, la plupart des pompes centrifuges ne sont pas auto-amorçantes. Avant leur mise en marche, il est souvent nécessaire de remplir la pompe et la conduite d'aspiration avec le liquide à pomper. Un fonctionnement à sec peut provoquer une détérioration rapide des garnitures, des paliers et parfois de la roue elle-même.

Enfin, les performances d'une pompe centrifuge dépendent fortement de sa géométrie interne. La forme de la roue, le nombre d'aubes, la largeur des canaux et les angles d'entrée et de sortie des aubes influencent directement l'écoulement, les pertes hydrauliques et le rendement. Une mauvaise conception de ces paramètres peut provoquer une instabilité de fonctionnement et une baisse importante des performances.

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients des pompes centrifuges.

Source : synthèse réalisée à partir de Kedjouh et Khattab [8] et Serhane et Gabli [10].

Avantages	**Inconvénients**
Construction simple et robuste	Sensibilité aux conditions d'aspiration
Fonctionnement continu et régulier	Risque de cavitation en cas de NPSH insuffisant
Capacité à fournir des débits importants	Rendement faible hors du point nominal
Maintenance relativement facile	Mauvaise adaptation aux liquides très visqueux
Bon rendement près du point nominal	Nécessité d'amorçage dans plusieurs cas
Large domaine d'utilisation	Risque de vibrations en fonctionnement défavorable
Possibilité de configurations variées	Forte dépendance à la géométrie de la roue

I.10 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les notions générales relatives aux pompes centrifuges. Nous avons d'abord défini les pompes comme des machines hydrauliques destinées à transférer un liquide d'un point à un autre en lui fournissant l'énergie nécessaire. Ensuite, nous avons présenté leur classification générale, en distinguant principalement les pompes volumétriques et les pompes rotodynamiques, parmi lesquelles se trouvent les pompes centrifuges.

L'étude des principaux constituants d'une pompe centrifuge a montré que chaque organe joue un rôle important dans le fonctionnement de la machine. La roue assure la transmission de l'énergie au fluide, la volute ou le diffuseur permet de transformer une partie de l'énergie cinétique en énergie de pression, tandis que l'arbre, les paliers et les garnitures assurent la transmission mécanique, le guidage et l'étanchéité de l'ensemble.

Nous avons également expliqué le principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge, basé sur l'aspiration du liquide au centre de la roue, son accélération par les aubes, puis son refoulement vers la sortie. Les courbes caractéristiques, telles que les courbes hauteur-débit, puissance-débit, rendement-débit et NPSH-débit, permettent d'analyser le comportement de la pompe et de déterminer sa zone optimale de fonctionnement.

Enfin, le phénomène de cavitation a été présenté comme l'un des problèmes les plus importants pouvant affecter les pompes centrifuges. Il peut provoquer du bruit, des vibrations, une érosion des aubes et une diminution du rendement. Les avantages et les inconvénients des pompes centrifuges ont également été exposés afin de mieux comprendre leurs domaines d'utilisation et leurs limites.

Ainsi, les performances d'une pompe centrifuge dépendent fortement de sa conception hydraulique, notamment de la géométrie de la roue, du nombre d'aubes et des angles d'entrée et de sortie des aubes. Ces paramètres influencent directement l'écoulement interne, les pertes hydrauliques et le rendement global. Le chapitre suivant sera donc consacré à l'étude théorique de la roue et à l'analyse de l'influence des angles des aubes sur le rendement d'une pompe centrifuge.

Chapitre II :

Étude théorique de la roue et des angles des aubes

II.1 Introduction

La roue constitue l'élément principal d'une pompe centrifuge, car elle assure le transfert de l'énergie mécanique fournie par l'arbre vers le fluide. Sous l'effet de la rotation, le liquide reçoit une énergie cinétique importante, qui sera ensuite partiellement transformée en énergie de pression dans les organes fixes de la pompe, notamment le diffuseur ou la volute. Ainsi, la géométrie de la roue joue un rôle essentiel dans le comportement hydraulique global de la machine.

Parmi les paramètres géométriques les plus influents, les angles des aubes occupent une place importante. L'angle d'entrée β_1 conditionne l'adaptation de l'écoulement à l'entrée de la roue et permet de réduire les pertes par incidence. L'angle de sortie β_2 influence directement la composante tangentielle de la vitesse absolue à la sortie de la roue, et donc la hauteur théorique fournie par la pompe selon l'équation d'Euler. Une mauvaise adaptation de ces angles peut provoquer des pertes hydrauliques, des recirculations, des décollements de l'écoulement et une diminution du rendement.

L'écoulement dans une pompe centrifuge est généralement complexe, tridimensionnel, turbulent et parfois instationnaire, surtout lorsque la pompe fonctionne en dehors de son point nominal. Plusieurs travaux expérimentaux ont montré que les phénomènes de recirculation, de fluctuation de vitesse et d'interaction roue-diffuseur peuvent modifier sensiblement les performances de la pompe [1], [2], [3], [4]. Pour cette raison, l'étude théorique des triangles de vitesses et des angles des aubes représente une étape indispensable avant toute analyse numérique ou expérimentale.

Dans ce chapitre, nous présentons les notions théoriques nécessaires à l'étude de la roue d'une pompe centrifuge. Nous aborderons d'abord la géométrie générale de la roue, puis les triangles de vitesses à l'entrée et à la sortie. Ensuite, nous analyserons le rôle des angles β_1 et β_2 dans la détermination de la hauteur manométrique, des pertes hydrauliques et du rendement de la pompe. Cette étude permettra de mieux comprendre l'influence de la variation des angles des aubes sur les performances hydrauliques de la pompe centrifuge [8], [10].

II.2 Description de la roue d'une pompe centrifuge

La roue, appelée également impulseur, constitue l'organe hydraulique principal d'une pompe centrifuge. Elle est montée sur l'arbre de transmission et tourne à l'intérieur du corps de pompe. Sa fonction essentielle est de recevoir l'énergie mécanique fournie par le moteur et de la transmettre au fluide sous forme d'énergie hydraulique. Cette énergie se manifeste d'abord par une augmentation de la vitesse du liquide dans la roue, puis par une élévation de la pression lors du passage du fluide dans les organes fixes, notamment la volute ou le diffuseur [8], [10].

Le liquide pénètre généralement dans la roue par sa partie centrale, appelée œil de la roue. Sous l'effet de la rotation, il est guidé par les aubes et entraîné vers la périphérie. Ce déplacement radial résulte de l'action combinée de la vitesse de rotation, de la géométrie des aubes et du transfert de quantité de mouvement au fluide. Pendant son parcours dans les canaux inter-aubes, le liquide reçoit de l'énergie ; sa vitesse, sa direction et sa pression sont alors modifiées.

La roue est généralement constituée d'un moyeu, d'un ou de deux flasques et d'un ensemble d'aubes. Le moyeu assure la liaison mécanique avec l'arbre. Les flasques guident le fluide et ferment partiellement ou totalement les passages entre les aubes. Les aubes imposent la direction de l'écoulement depuis l'entrée jusqu'à la sortie de la roue. L'espace compris entre deux aubes successives forme un canal hydraulique où le fluide est accéléré [8].

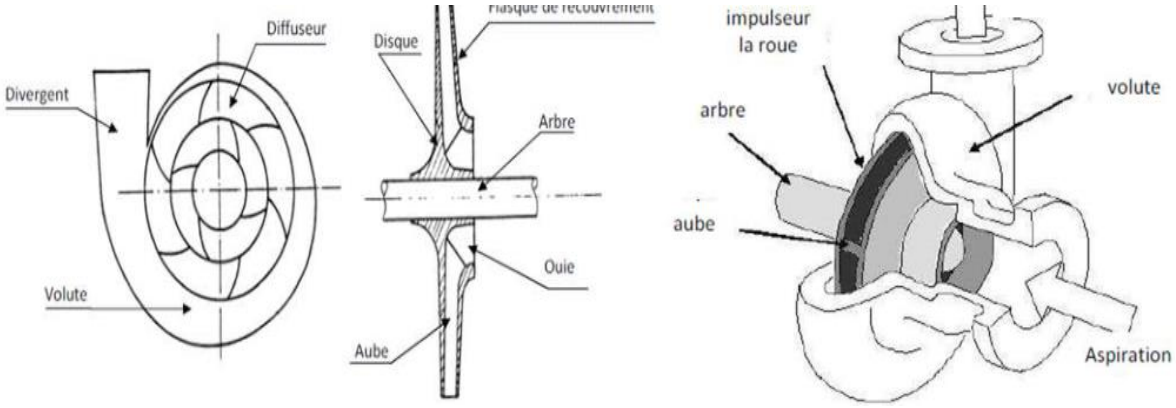


Figure II.1 : Schéma d'une pompe centrifuge et éléments associés à la roue. [8].

La géométrie de la roue influence directement les performances de la pompe. Parmi les paramètres les plus importants, on peut citer le diamètre d'entrée, le diamètre extérieur, la largeur des passages, le nombre d'aubes, l'épaisseur des aubes ainsi que les angles d'entrée et de sortie.

Ces grandeurs interviennent dans la formation des triangles des vitesses et dans le transfert d'énergie entre la roue et le fluide [8], [10].

Selon sa construction, la roue peut être ouverte, semi-ouverte ou fermée. Une roue ouverte ne possède pas de flasques latéraux complets. Elle est de conception simple et peut être utilisée pour certains liquides chargés, mais elle présente généralement des pertes internes plus importantes. Une roue semi-ouverte comporte un seul flasque ; elle offre un compromis entre simplicité de construction, rigidité mécanique et facilité de passage du fluide. Une roue fermée possède deux flasques qui encadrent les aubes ; elle est largement utilisée pour les liquides propres, car elle permet généralement d'obtenir un meilleur rendement hydraulique et de limiter les pertes internes [10].

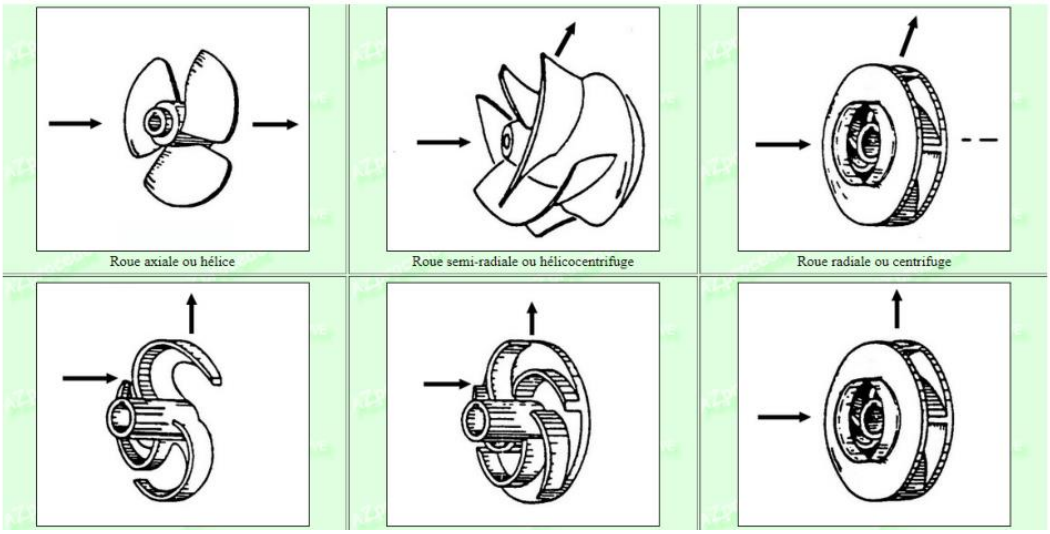


Figure II.2 : Types de roues utilisées dans les pompes centrifuges. [10] .

Le choix du type de roue dépend de la nature du liquide pompé, du débit demandé, de la hauteur manométrique, du rendement recherché et des conditions d'exploitation. Pour les liquides propres, les roues fermées sont souvent préférées en raison de leur rendement plus élevé. Pour les liquides contenant des particules ou présentant un risque d'encrassement, des roues ouvertes ou semi-ouvertes peuvent être utilisées afin de faciliter le passage du fluide et la maintenance.

II.3 Rôle des aubes dans la transformation de l'énergie

Les aubes de la roue jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement d'une pompe centrifuge. Elles assurent le guidage du fluide depuis l'entrée de la roue jusqu'à sa sortie, tout en

participant au transfert de l'énergie mécanique provenant de l'arbre moteur vers le fluide. Lorsque la roue tourne, les aubes entraînent le liquide dans un mouvement de rotation et favorisent son déplacement vers la périphérie sous l'effet combiné de la rotation de la roue, de la géométrie des aubes et des forces centrifuges [8], [10].

La transformation de l'énergie dans une pompe centrifuge se fait principalement en deux étapes. Dans la roue, l'énergie mécanique fournie par le moteur est transmise au fluide sous forme d'énergie cinétique et, dans une moindre mesure, sous forme d'énergie de pression. Ensuite, dans le diffuseur ou la volute, une partie importante de cette énergie cinétique est convertie en énergie de pression. Ainsi, la roue ne se limite pas à accélérer le fluide ; elle participe également à l'augmentation de sa hauteur manométrique.

Le rôle des aubes peut être expliqué à partir des triangles des vitesses. À l'entrée de la roue, les aubes doivent recevoir le fluide avec une direction adaptée afin de réduire les chocs et les pertes par incidence. Cette condition dépend principalement de l'angle d'entrée $\boldsymbol{\beta_1}$. Si cet angle est mal choisi, l'écoulement ne suit pas correctement le profil de l'aube, ce qui peut entraîner des pertes hydrauliques, des turbulences et une diminution du rendement.

À la sortie de la roue, l'angle β2 détermine la direction de la vitesse relative du fluide.

Cet angle influence directement la composante tangentielle de la vitesse absolue à la sortie de la roue. Or, cette composante est liée à la hauteur théorique fournie par la pompe selon l'équation d'Euler :

$$\boldsymbol{H_{th} = (U_2\, C_{u2} - U_1\, C_{u1}) / g}$$

Où U_1 et U_2 représentent les vitesses périphériques à l'entrée et à la sortie de la roue, tandis que C_{u1} et C_{u2} sont les composantes tangentielles de la vitesse absolue. Dans le cas le plus courant, lorsque l'entrée se fait sans prérotation, la composante C_{u1} est faible ou presque nulle, ce qui rend l'influence de C_{u2} encore plus importante.

La forme des aubes agit également sur la stabilité de l'écoulement. Des aubes bien conçues permettent de limiter les zones de recirculation, les décollements de l'écoulement et les pertes internes. À l'inverse, une mauvaise orientation des aubes peut provoquer une mauvaise répartition

des vitesses et des pressions dans la roue, surtout lorsque la pompe fonctionne en dehors de son point nominal [1], [2], [3].

Ainsi, les aubes assurent trois fonctions principales : guider le fluide, transmettre l'énergie mécanique au liquide et orienter l'écoulement à la sortie de la roue. Leur géométrie, et particulièrement les angles β1 et β2, influence directement la hauteur manométrique, la puissance absorbée et le rendement hydraulique de la pompe centrifuge. C'est pourquoi l'étude de la variation des angles des aubes constitue un élément essentiel dans l'analyse des performances d'une pompe centrifuge.

II.4 Classification des aubes de la roue selon l'angle de sortie β2

Dans une pompe centrifuge, les aubes de la roue peuvent être classées selon leur orientation à la sortie de la roue. Cette orientation est généralement définie par l'angle de sortie β2. Selon la valeur de cet angle, on distingue trois principaux types d'aubes : les aubes inclinées vers l'arrière, les aubes radiales et les aubes inclinées vers l'avant.

Le choix du type d'aube influence directement la direction de l'écoulement à la sortie de la roue, la composante tangentielle de la vitesse absolue, la hauteur manométrique, la puissance absorbée et le rendement de la pompe. Les paramètres géométriques de l'impulseur, notamment les angles d'entrée β1 et de sortie β2, doivent donc être déterminés avec précision lors du calcul hydraulique [10].

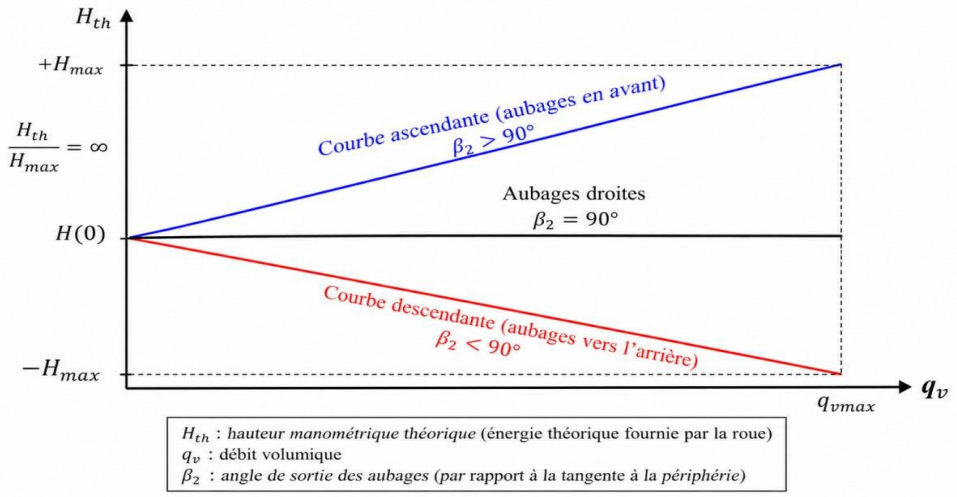


Figure II. 3: Classification de l'angle de sortie β2 sur la hauteur théorique selon le type d'aubage. [8].

II.4.1 Aubes inclinées vers l'arrière

Les aubes inclinées vers l'arrière sont les plus utilisées dans les pompes centrifuges. Dans ce cas, l'angle de sortie β2 est inférieur à 90°, selon la convention de mesure adoptée par rapport à la tangente à la roue. La courbure de l'aube est orientée dans le sens opposé à la rotation de la roue.

Ce type d'aube présente un bon comportement hydraulique. Il permet d'obtenir un écoulement plus stable à la sortie de la roue, de réduire les pertes par turbulence et d'améliorer le rendement global. La courbe hauteur-débit est généralement décroissante, ce qui donne un fonctionnement plus stable lorsque le débit varie.

Pour les aubes inclinées vers l'arrière, la composante tangentielle de la vitesse absolue à la sortie reste plus modérée que dans les deux autres configurations. Cela limite la puissance absorbée et réduit les pertes dans la volute ou dans le diffuseur. Pour cette raison, ce type d'aube est le plus favorable dans les pompes centrifuges industrielles destinées à fonctionner avec un bon rendement.

II.4.2 Aubes radiales

Les aubes radiales sont caractérisées par un angle de sortie β2 égal à 90°. Dans cette configuration, la direction de l'aube à la sortie est pratiquement radiale. Le fluide quitte alors la roue avec une direction fortement liée au mouvement de rotation de celle-ci.

Les aubes radiales donnent une composante tangentielle importante de la vitesse absolue. Selon l'équation d'Euler, cette composante participe directement à l'augmentation de la hauteur théorique de la pompe. Cependant, ce type d'aube peut entraîner des efforts mécaniques plus importants et des pertes hydrauliques supérieures à celles obtenues avec des aubes inclinées vers l'arrière.

Les aubes radiales constituent donc une solution intermédiaire. Elles peuvent être choisies pour des raisons de simplicité de construction ou de résistance mécanique, mais elles sont généralement moins avantageuses du point de vue du rendement hydraulique.

II.4.3 Aubes inclinées vers l'avant

Les aubes inclinées vers l'avant possèdent un angle de sortie β2 supérieur à 90°. Dans ce cas, l'aube est orientée dans le sens de rotation de la roue. Cette configuration augmente la composante tangentielle de la vitesse absolue à la sortie et peut donc augmenter la

Hauteur théorique fournie par la pompe.

Cependant, cette augmentation de la hauteur s'accompagne souvent d'une forte augmentation de la puissance absorbée. Les pertes hydrauliques peuvent aussi devenir importantes, notamment à cause de la turbulence, de la mauvaise adaptation de l'écoulement et des pertes dans la volute ou le diffuseur.

Pour cette raison, les aubes inclinées vers l'avant sont rarement utilisées dans les pompes centrifuges classiques. Leur courbe de puissance peut devenir fortement croissante avec le débit, ce qui rend le fonctionnement moins stable et moins économique.

Tableau II.1 : Comparaison des différents types d'aubes selon l'angle de sortie β_2

Synthèse comparative

Type d'aube	Angle β2	Effet principal	Appréciation
Inclinée vers l'arrière	$\beta2 < 90°$	Hauteur théorique décroissante avec le débit ; puissance modérée	Meilleur rendement et bonne stabilité
Radiale	$\beta2 = 90°$	Hauteur théorique presque indépendante du débit	Solution intermédiaire
Inclinée vers l'avant	$\beta2 > 90°$	Hauteur théorique et puissance absorbée élevées	Rendement moins favorable

En conclusion, l'orientation des aubes influence directement les performances de la pompe centrifuge. Les aubes inclinées vers l'arrière sont généralement préférées car elles offrent un Meilleur

.rendement et une meilleure stabilité. Les aubes radiales restent une solution intermédiaire, tandis que les aubes inclinées vers l'avant sont moins adaptées en raison de leur forte consommation de puissance.

II.5 Triangles des vitesses

Les triangles des vitesses constituent une base essentielle pour l'étude théorique d'une roue de pompe centrifuge. Ils permettent de représenter les relations entre la vitesse absolue du fluide, la vitesse relative dans les passages inter-aubes et la vitesse périphérique imposée par la rotation de la roue. Cette représentation facilite l'analyse de la transformation de l'énergie mécanique en énergie hydraulique, ainsi que l'interprétation de l'influence des angles des aubes sur la hauteur manométrique et le rendement de la pompe [8], [10].

Dans une pompe centrifuge, le mouvement du fluide dans la roue peut être décrit par la relation vectorielle suivante :

$$C = U + W$$

Où C désigne la vitesse absolue du fluide, U la vitesse périphérique de la roue et W la vitesse relative du fluide par rapport aux aubes. Les triangles des vitesses sont généralement établis à l'entrée et à la sortie de la roue, car ces deux sections permettent de définir les angles caractéristiques β1 et β2.

Le triangle des vitesses représente la représentation vectorielle du mouvement cinématique. Le vecteur est une grandeur orientée possédant une intensité et une direction. Cette relation apparaît clairement dans le parallélogramme des vitesses d'une particule fluide. Voir la 5 : Triangle des vitesses.

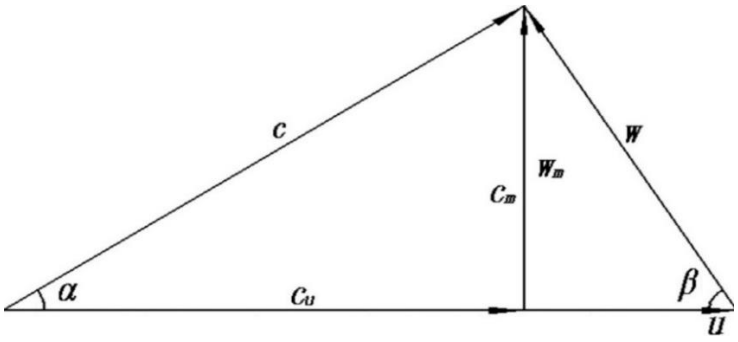


Figure II. 4: Triangle des vitesses absolues et relatives [11].

Tableau II.2 : Signification des symboles utilisés dans le triangle des vitesses

Symbole	Désignation	Rôle dans le triangle
C	Vitesse absolue	Vitesse du fluide dans un repère fixe
W	Vitesse relative	Vitesse du fluide par rapport aux aubes
U	Vitesse périphérique	Vitesse tangentielle liée à la rotation de la roue
Cm	Composante méridienne	Composante de débit dans le plan méridien
Cu	Composante tangentielle	Composante liée au transfert d'énergie

II.5.1 Triangle des vitesses à l'entrée de la roue

À l'entrée de la roue, le fluide pénètre par l'œil de la roue avec une vitesse absolue notée C1. Cette vitesse peut être décomposée en une composante méridienne Cm1 et une composante tangentielle Cu1. Dans les conditions idéales, l'écoulement arrive sans prérotation importante ; la composante tangentielle Cu1 est alors faible ou pratiquement nulle.

Le triangle d'entrée est formé par la vitesse absolue C1, la vitesse périphérique U1 et la vitesse relative W1. L'angle β1 représente l'angle d'entrée de l'aube. Il doit être choisi de façon à assurer une bonne adaptation entre la direction de l'écoulement et le profil de l'aube. Une mauvaise adaptation provoque des pertes par incidence, des chocs à l'entrée et une diminution du rendement hydraulique.

La relation générale du triangle d'entrée peut s'écrire :

$$\tan \beta 1 = Cm1 / (U1 - Cu1)$$

Lorsque l'entrée se fait sans prérotation, on peut considérer :

$$Cu1 \approx 0$$

La relation précédente devient alors :

$$\tan \beta 1 = Cm1 / U1$$

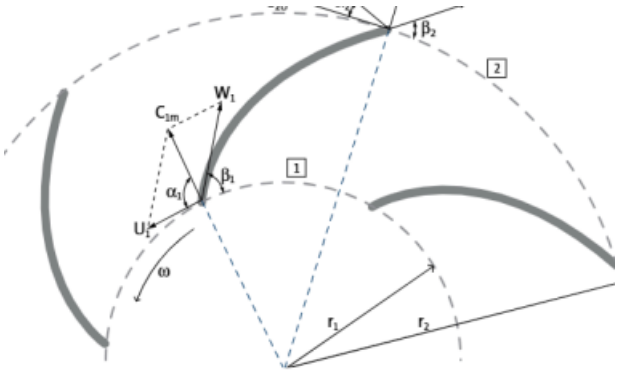


Figure II. 5. Diagrammes des vitesses à l'entrée d'une roue de pompe idéale [12]

II.5.2 Triangle des vitesses à la sortie de la roue

À la sortie de la roue, le fluide quitte les canaux inter-aubes avec une vitesse relative W2. Cette vitesse se combine avec la vitesse périphérique U2 pour donner la vitesse absolue de sortie C2. Le triangle de sortie est particulièrement important, car il permet de déterminer la composante tangentielle Cu2, directement liée au transfert d'énergie entre la roue et le fluide.

La hauteur théorique fournie par la pompe est exprimée par l'équation d'Euler des turbomachines :

$$Hth = (U2 \cdot Cu2 - U1 \cdot Cu1) / g$$

Dans le cas où la prérotation à l'entrée est négligeable, cette relation devient :

$$Hth = (U2 \cdot Cu2) / g$$

L'angle β2 correspond à l'angle de sortie des aubes. Il influence la direction de W2 et la valeur de Cu2. La relation du triangle de sortie peut être écrite sous la forme :

$$\tan \beta 2 = Cm2 / (U2 - Cu2)$$

On obtient alors :

$$Cu2 = U2 - Cm2 / \tan \beta 2$$

Cette relation montre que toute variation de l'angle de sortie β2 modifie la composante tangentielle de la vitesse absolue, et par conséquent la hauteur théorique, la puissance absorbée et le rendement hydraulique de la pompe centrifuge.

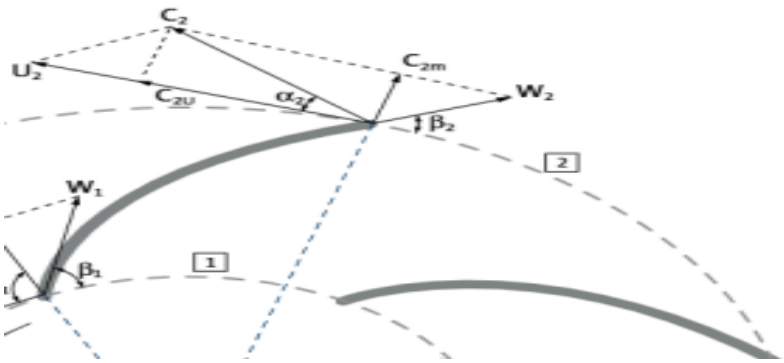


Figure II 6.Diagrammes des vitesses à la sortie d'une roue de pompe idéale [12]

II.5.3 Vitesse absolue

La vitesse absolue, notée C, représente la vitesse réelle du fluide dans un repère fixe lié au corps de la pompe. Elle caractérise le mouvement global du liquide à travers la machine. Dans une roue centrifuge, cette vitesse se décompose en une composante méridienne Cm et une composante tangentielle Cu.

La composante tangentielle Cu joue un rôle essentiel, car elle intervient directement dans l'équation d'Euler. À la sortie de la roue, la valeur de Cu2 conditionne l'énergie transmise au fluide. Une orientation défavorable de cette composante peut augmenter les pertes hydrauliques et réduire le rendement.

II.5.4 Vitesse relative

La vitesse relative, notée W, est la vitesse du fluide observée dans un repère mobile lié à la roue. Elle représente donc le mouvement du liquide par rapport aux aubes. Cette vitesse est fondamentale pour étudier l'écoulement dans les passages inter-aubes et pour définir les angles β1 et β2.

Pour un fonctionnement hydraulique correct, la direction de la vitesse relative doit être proche de la direction du profil de l'aube. Dans le cas contraire, des pertes apparaissent sous forme

de chocs, de turbulences, de recirculation ou de décollement de l'écoulement. Ces phénomènes diminuent généralement le rendement de la pompe.

II.5.5 Vitesse périphérique

La vitesse périphérique, notée U, représente la vitesse tangentielle de la roue au rayon considéré. Elle dépend du diamètre local de la roue et de la vitesse de rotation. À l'entrée et à la sortie de la roue, elle s'exprime respectivement par :

$$U1 = \pi \cdot D1 \cdot N / 60$$

$$U2 = \pi \cdot D2 \cdot N / 60$$

Où D1 est le diamètre d'entrée, D2 le diamètre extérieur de la roue et N la vitesse de rotation en tr/min. Comme D2 est généralement supérieur à D1, la vitesse périphérique U2 est plus élevée que U1. Elle joue donc un rôle majeur dans le transfert d'énergie au fluide.

Tableau II.3 : Synthèse des principaux éléments des triangles des vitesses

Élément étudié	Influence principale
Triangle d'entrée	Adaptation de l'écoulement à l'entrée et réduction des pertes par incidence.
Triangle de sortie	Détermination de Cu2 et de la hauteur théorique fournie par la roue.
Vitesse absolue C	Description du mouvement réel du fluide dans le repère fixe.
Vitesse relative W	Définition de la direction de l'écoulement dans les passages inter-aubes.
Vitesse périphérique U	Grandeur liée à la rotation et au transfert d'énergie mécanique au fluide.

En résumé, les triangles des vitesses permettent de relier la géométrie de la roue, les angles des aubes et les performances hydrauliques de la pompe centrifuge. Ils constituent donc une base théorique indispensable pour analyser l'influence de la variation des angles des aubes sur le rendement.

II.6 Angle d'entrée des aubes β_1

L'angle d'entrée des aubes, noté β_1, est un paramètre géométrique déterminant dans la conception de la roue d'une pompe centrifuge. Il correspond à l'orientation de l'aube au niveau du

bord d'attaque, c'est-à-dire à la zone où le fluide pénètre dans les passages inter-aubes. Cet angle est directement lié au triangle des vitesses à l'entrée de la roue [10].

Le rôle principal de β_1 est d'assurer une bonne adaptation entre la direction de l'écoulement entrant et le profil de l'aube. Lorsque cette adaptation est correcte, le fluide entre dans la roue avec un minimum de choc et de pertes par incidence. À l'inverse, un mauvais choix de l'angle d'entrée peut provoquer des turbulences locales, des décollements de l'écoulement et une diminution du rendement hydraulique de la pompe [8], [10].

II.6.1 Définition géométrique et hydraulique

Dans le triangle des vitesses à l'entrée, l'angle β_1 est défini entre la vitesse relative du fluide W_1 et la direction tangentielle associée au mouvement de rotation de la roue. La vitesse relative W_1 représente la vitesse du fluide observée dans un repère lié à la roue. Elle doit être orientée de manière à suivre correctement le profil de l'aube dès l'entrée. La vitesse absolue du fluide à l'entrée, notée C_1, peut être décomposée en une composante méridienne C_{m1} et une composante tangentielle C_{u1}. La vitesse périphérique U_1 dépend du diamètre d'entrée de la roue et de la vitesse de rotation. Ces grandeurs permettent de construire le triangle d'entrée et de déterminer l'angle β_1.

Tableau II.4 : Signification des grandeurs intervenant dans le calcul de l'angle d'entrée β_1

Symbole	Désignation	Rôle dans le calcul de β_1
β_1	Angle d'entrée des aubes	Définit l'orientation de l'aube à l'entrée de la roue.
C_{m1}	Composante méridienne de la vitesse absolue	Représente la vitesse liée au débit entrant.
C_{u1}	Composante tangentielle de la vitesse absolue	Traduit l'existence éventuelle d'une prérotation à l'entrée.
U_1	Vitesse périphérique à l'entrée	Dépend du diamètre d'entrée et de la vitesse de rotation.
W_1	Vitesse relative à l'entrée	Détermine la direction suivie par le fluide par rapport à l'aube.

II.6.2 Relation avec le triangle des vitesses

La relation générale permettant de relier β_1 aux composantes de vitesse à l'entrée peut s'écrire sous la forme suivante : $\mathbf{\tan \beta_1 = C_{m1} / (U_1 - C_{u1})}$

Dans de nombreux cas d'étude, l'écoulement arrive à l'entrée de la roue sans prérotation importante. La composante tangentielle C_{u1} peut alors être considérée comme négligeable :

$$\mathbf{C_{u1} \approx 0}$$

La relation de l'angle d'entrée se simplifie alors comme suit : $\mathbf{\tan \beta_1 = C_{m1} / U_1}$

Cette expression montre que l'angle β_1 dépend de l'équilibre entre la vitesse méridienne du fluide et la vitesse périphérique de la roue. Lorsque C_{m1} augmente, l'angle β_1 tend à augmenter. À l'inverse, lorsque U_1 augmente, l'angle β_1 tend à diminuer. Le choix de cet angle doit donc être cohérent avec le débit de fonctionnement et la vitesse de rotation de la pompe.

II.6.3 Influence de β_1 sur le rendement hydraulique

L'influence de β_1 apparaît principalement à l'entrée de la roue. Si l'angle de l'aube est bien adapté à la direction de la vitesse relative W_1, le fluide s'engage progressivement dans les canaux inter-aubes, ce qui limite les pertes par incidence. Cette condition améliore la régularité de l'écoulement et favorise un meilleur rendement hydraulique. Lorsque β_1 est trop faible ou trop élevé par rapport à la direction réelle de l'écoulement, le fluide attaque le bord d'entrée de l'aube avec un angle défavorable. Cette mauvaise adaptation peut provoquer des chocs hydrauliques, une augmentation de la turbulence, des zones de recirculation et des pertes d'énergie. Ces phénomènes sont particulièrement sensibles lorsque la pompe fonctionne en dehors de son point nominal.

II.6.4 Synthèse

Tableau II.5 : Influence de l'angle d'entrée β_1 sur les performances hydrauliques de la pompe

Aspect étudié	**Effet de l'angle β_1**
Adaptation à l'entrée	Réduit les chocs entre le fluide et le bord d'attaque des aubes.
Pertes hydrauliques	Un bon choix de β_1 diminue les pertes par incidence.
Stabilité de l'écoulement	Favorise un écoulement plus régulier dans les passages inter-aubes.
Rendement de la pompe	Contribue à l'amélioration du rendement hydraulique global.

En conclusion, l'angle d'entrée β_1 constitue un paramètre essentiel dans l'étude de la roue d'une pompe centrifuge. Il permet d'assurer l'adaptation de l'écoulement à l'entrée, de limiter les pertes hydrauliques et d'améliorer le rendement. Dans la partie pratique de cette étude, β_1 sera considéré comme un paramètre de variation afin d'analyser son influence sur les performances hydrauliques de la pompe centrifuge.

II.7 Angle de sortie des aubes β_2

L'angle de sortie des aubes, noté β_2, est l'un des paramètres géométriques les plus importants dans l'étude d'une roue de pompe centrifuge. Il correspond à l'orientation de l'aube au niveau du bord de fuite, c'est-à-dire à la zone où le fluide quitte les passages inter-aubes. Cet angle est directement associé au triangle des vitesses à la sortie de la roue [10].

Contrairement à l'angle d'entrée β_1, qui agit surtout sur l'adaptation de l'écoulement à l'entrée de la roue, l'angle β_2 influence fortement l'énergie transmise au fluide. En effet, il agit sur la direction de la vitesse relative W_2 et sur la composante tangentielle de la vitesse absolue C_{u2}. Cette composante intervient directement dans la hauteur théorique fournie par la pompe selon l'équation d'Euler [8], [10].

II.7.1 Définition géométrique et hydraulique

Dans le triangle des vitesses à la sortie, β_2 est défini entre la vitesse relative du fluide W_2 et la direction tangentielle liée à la rotation de la roue. La vitesse relative W_2 représente la vitesse du fluide observée dans un repère mobile solidaire de la roue. Son orientation doit être compatible avec le profil de l'aube au bord de fuite afin de limiter les pertes et de guider correctement l'écoulement vers la volute ou le diffuseur.

La vitesse absolue de sortie C_2 résulte de la composition vectorielle de la vitesse relative W_2 et de la vitesse périphérique U_2. Elle peut être décomposée en une composante méridienne C_{m2} et une composante tangentielle C_{u2}. La composante C_{u2} est particulièrement importante, car elle traduit la quantité d'énergie hydraulique transmise au fluide par la roue.

Tableau II.6 : Signification des grandeurs intervenant dans l'étude de l'angle de sortie β_2

Symbole	Désignation	Rôle dans l'étude de β_2
β_2	Angle de sortie des aubes	Définit l'orientation de l'aube au bord de fuite.
C_2	Vitesse absolue à la sortie	Représente la vitesse réelle du fluide quittant la roue.
C_{m2}	Composante méridienne de la vitesse absolue	Traduit l'effet du débit à la sortie de la roue.
C_{u2}	Composante tangentielle de la vitesse absolue	Intervient directement dans l'équation d'Euler.
U_2	Vitesse périphérique à la sortie	Dépend du diamètre extérieur de la roue et de la vitesse de rotation.
W_2	Vitesse relative à la sortie	Détermine la direction de l'écoulement par rapport aux aubes.

II.7.2 Relation avec le triangle des vitesses

À partir du triangle des vitesses à la sortie, l'angle β_2 peut être relié à la vitesse méridienne C_{m2}, à la vitesse périphérique U_2 et à la composante tangentielle C_{u2}. La relation générale s'écrit :

$$\tan \beta_2 = C_{m2} / (U_2 - C_{u2})$$

Cette relation permet d'exprimer la composante tangentielle de la vitesse absolue à la sortie sous la forme suivante :

$$C_{u2} = U_2 - C_{m2} / \tan \beta_2$$

Cette expression montre que la valeur de β_2 influence directement C_{u2}. Lorsque β_2 varie, la direction de la vitesse relative W_2 change, ce qui modifie la composante tangentielle de la vitesse absolue. Cette variation se répercute ensuite sur la hauteur théorique, la puissance absorbée et le rendement hydraulique de la pompe.

II.7.3 Influence sur la hauteur théorique

La hauteur théorique fournie par la roue est donnée par l'équation d'Euler des turbomachines :

$$H_{th} = (U_2 C_{u2} - U_1 C_{u1}) / g$$

Dans le cas le plus courant, l'écoulement entre dans la roue sans prérotation importante. La composante tangentielle à l'entrée C_{u1} peut alors être considérée comme négligeable :

$$C_{u1} \approx 0$$

L'équation d'Euler se simplifie donc comme suit :

$$H_{th} = U_2 C_{u2} / g$$

Cette forme simplifiée met en évidence l'importance de C_{u2}, et donc de β_2. Un angle de sortie bien choisi permet d'obtenir une valeur adaptée de C_{u2}, ce qui favorise une bonne transmission d'énergie entre la roue et le fluide. À l'inverse, un mauvais choix de β_2 peut augmenter les pertes et réduire le rendement global.

II.7.4 Classification selon la valeur de β_2

La valeur de l'angle β_2 permet également de distinguer les principaux types d'aubes utilisés dans les roues de pompes centrifuges. Cette classification est importante, car chaque orientation donne un comportement hydraulique différent.

Tableau II.7 : Classification des aubes selon la valeur de l'angle de sortie β_2

Type d'aubes	Condition sur β_2	Comportement général
Aubes inclinées vers l'arrière	$\beta_2 < 90°$	Fonctionnement stable et rendement généralement favorable.
Aubes radiales	$\beta_2 = 90°$	Solution intermédiaire, avec des efforts et pertes plus importants.
Aubes inclinées vers l'avant	$\beta_2 > 90°$	Hauteur théorique élevée, mais puissance absorbée plus importante.

Dans les pompes centrifuges classiques, les aubes inclinées vers l'arrière sont les plus utilisées, car elles offrent généralement un meilleur compromis entre stabilité de fonctionnement, puissance absorbée et rendement hydraulique.

II.7.5 Synthèse

Tableau II.8 : Influence de l'angle de sortie β_2 sur les performances hydrauliques de la pompe

Aspect étudié	Effet de l'angle β_2
Orientation de l'écoulement	Détermine la direction de la vitesse relative W_2 à la sortie de la roue.
Composante tangentielle C_{u2}	Influence directement la hauteur théorique selon l'équation d'Euler.
Puissance absorbée	Peut augmenter ou diminuer selon la valeur choisie de β_2.
Rendement hydraulique	Un choix adapté de β_2 permet de limiter les pertes et d'améliorer les performances.

En conclusion, l'angle de sortie β_2 constitue un paramètre central dans l'étude des performances d'une pompe centrifuge. Sa variation modifie la composante tangentielle de la vitesse absolue à la sortie, la hauteur théorique, la puissance absorbée et le rendement hydraulique. Dans la partie pratique de cette étude, β_2 sera considéré comme un paramètre de variation afin d'analyser son influence sur le rendement de la pompe centrifuge.

II.8 Équation d'Euler appliquée aux pompes centrifuges

L'équation d'Euler des turbomachines constitue la base théorique qui permet de relier l'énergie transmise au fluide par la roue aux composantes tangentielles de la vitesse absolue. Dans le cas d'une pompe centrifuge, elle permet d'évaluer la hauteur théorique fournie par la roue avant la prise en compte des pertes hydrauliques.

Cette équation est directement liée aux triangles des vitesses établis à l'entrée et à la sortie de la roue. Elle met en évidence le rôle de la vitesse périphérique U et de la composante tangentielle de la vitesse absolue C_u dans le transfert d'énergie entre l'arbre moteur, la roue et le fluide [8], [10].

Principe central

La hauteur d'Euler représente la hauteur théorique maximale associée au transfert d'énergie dans la roue. Elle ne correspond pas encore à la hauteur réelle, car les pertes par frottement, choc, glissement et turbulence ne sont pas encore retranchées.

II.8.1 Forme générale de l'équation d'Euler

La puissance hydraulique transmise au fluide peut être exprimée à partir du débit volumique, de la masse volumique et de la variation du moment cinétique entre l'entrée et la sortie de la roue. En divisant cette puissance par $\rho \cdot g \cdot Q_v$, on obtient la hauteur théorique d'Euler :

$$\mathbf{H_Euler = (U_2 \cdot C_{u2} - U_1 \cdot C_{u1}) / g}$$

Dans cette relation, U_1 et U_2 représentent les vitesses périphériques à l'entrée et à la sortie de la roue, tandis que C_{u1} et C_{u2} représentent les composantes tangentielles de la vitesse absolue. Le terme g désigne l'accélération de la pesanteur.

II.8.2 Cas d'une entrée sans prérotation

Dans la majorité des pompes centrifuges, l'écoulement entre dans la roue presque axialement. La composante tangentielle de la vitesse absolue à l'entrée peut alors être considérée comme négligeable :

$$\mathbf{C_{u1} \approx 0}$$

L'équation d'Euler se simplifie donc sous la forme suivante :

$$\mathbf{H_Euler \approx (U_2 \cdot C_{u2}) / g}$$

Cette forme simplifiée montre que la hauteur théorique dépend principalement de la vitesse périphérique à la sortie de la roue et de la composante tangentielle de la vitesse absolue à la sortie. C'est pour cette raison que les paramètres géométriques qui modifient C_{u2}, en particulier l'angle de sortie β_2, influencent directement les performances de la pompe.

II.8.3 Influence de l'angle de sortie β_2

À partir du triangle des vitesses à la sortie, la composante tangentielle C_{u2} peut être reliée à la vitesse périphérique U_2, à la composante méridienne C_{m2} et à l'angle de sortie des aubes β_2. Selon la convention usuelle utilisée pour les aubes inclinées vers l'arrière, on peut écrire :

$$\mathbf{C_{u2} = U_2 - C_{m2} / \tan(\beta_2)}$$

En remplaçant cette expression dans l'équation d'Euler simplifiée, on obtient :

$$\mathbf{H_Euler = (U_2 / g) \cdot [U_2 - C_{m2} / \tan(\beta_2)]}$$

Cette relation montre que toute variation de β_2 modifie la valeur de C_{u2} et donc la hauteur théorique transmise au fluide. Une augmentation ou une diminution de cet angle change l'orientation de la vitesse relative à la sortie, ce qui agit sur la hauteur manométrique, la puissance absorbée et le rendement hydraulique.

II.8.4 Hauteur théorique, hauteur réelle et pertes hydrauliques

La hauteur obtenue à partir de l'équation d'Euler est une hauteur théorique. Dans le fonctionnement réel d'une pompe centrifuge, cette hauteur est diminuée par les pertes hydrauliques internes. Ces pertes proviennent principalement des frottements le long des parois, des pertes par choc à l'entrée ou à la sortie des aubes, des effets de glissement et des phénomènes de turbulence.

$$H_réelle = H_Euler - \Delta H_pertes$$

Ainsi, le rendement hydraulique dépend de la capacité de la roue à transformer l'énergie mécanique en énergie hydraulique avec un minimum de pertes. Le bon choix des angles des aubes, et particulièrement de β_2, permet d'améliorer cette transformation et de rapprocher la hauteur réelle de la hauteur théorique.

II.8.5 Symboles utilisés

Tableau II.9 : Symboles utilisés dans l'équation d'Euler

Symbole	Désignation	Unité
H_Euler	Hauteur théorique donnée par l'équation d'Euler	m
H_réelle	Hauteur réellement obtenue après pertes	m
U_1, U_2	Vitesses périphériques à l'entrée et à la sortie de la roue	m/s
C_{u1}, C_{u2}	Composantes tangentielles de la vitesse absolue	m/s
C_{m2}	Composante méridienne de la vitesse absolue à la sortie	m/s
β_2	Angle de sortie des aubes de la roue	°
g	Accélération de la pesanteur	m/s^2
ΔH_pertes	Pertes hydrauliques internes	m

Synthèse

L'équation d'Euler montre que les performances d'une pompe centrifuge sont directement liées aux conditions d'écoulement à la sortie de la roue. Elle confirme que l'angle de sortie β_2 est un paramètre déterminant, car il agit sur C_{u2} et donc sur la hauteur théorique. Dans le cadre de cette étude, cette relation servira de base pour interpréter l'influence de la variation des angles des aubes sur le rendement de la pompe.

II.9 Hauteur théorique et hauteur réelle

Dans une pompe centrifuge, la hauteur représente l'énergie hydraulique transmise au fluide par unité de poids. Elle constitue un paramètre essentiel pour l'évaluation des performances de la pompe. On distingue principalement deux grandeurs : la hauteur théorique, issue de l'équation d'Euler, et la hauteur réelle, appelée aussi hauteur manométrique totale, qui tient compte des pertes hydrauliques internes.

La comparaison entre ces deux hauteurs permet de comprendre l'écart entre le comportement idéal de la roue et le fonctionnement réel de la machine. Cette différence est particulièrement importante dans l'étude de l'influence des angles des aubes, car une variation géométrique peut améliorer la hauteur théorique tout en augmentant certaines pertes si l'écoulement devient moins stable [8], [9], [10].

Idée principale

La hauteur théorique correspond à l'énergie idéale transmise au fluide par la roue. La hauteur réelle correspond à l'énergie effectivement disponible après déduction des pertes par choc, frottement, turbulence et glissement.

II.9.1 Hauteur théorique

La hauteur théorique, notée généralement Hth ou HEuler, correspond à l'énergie idéale que la roue peut transmettre au fluide. Elle est déterminée à partir de l'équation d'Euler appliquée aux turbomachines. Dans le cas général, elle s'écrit :

$$H_Euler = (U_2 \cdot C_{u2} - U_1 \cdot C_{u1}) / g$$

Lorsque l'écoulement entre dans la roue sans prérotation importante, la composante tangentielle à l'entrée C_{u1} peut être considérée comme faible ou négligeable. L'expression de la hauteur théorique devient alors :

$$\mathbf{H_Euler \approx (U_2 \cdot C_{u2}) / g}$$

Cette relation montre que la hauteur théorique dépend principalement de la vitesse périphérique à la sortie U_2 et de la composante tangentielle de la vitesse absolue à la sortie C_{u2}. Ainsi, l'angle de sortie des aubes β_2 joue un rôle direct, car il modifie la direction de la vitesse relative à la sortie et influence la valeur de C_{u2} [8], [10].

II.9.2 Hauteur réelle

La hauteur réelle, ou hauteur manométrique totale Hmt, représente la hauteur effectivement fournie par la pompe au fluide. Contrairement à la hauteur théorique, elle tient compte des pertes hydrauliques qui apparaissent dans la roue, le diffuseur et la volute.

Ces pertes proviennent principalement des frottements le long des parois, des chocs liés à une mauvaise adaptation de l'écoulement, des turbulences, du décollement de l'écoulement et des phénomènes de recirculation. La hauteur réelle est donc toujours inférieure à la hauteur théorique.

$$\mathbf{H_réelle = H_Euler - \Delta H_pertes}$$

$$\mathbf{Hmt = H_réelle = H_Euler - (\Delta H_choc + \Delta H_frott)}$$

Cette relation est utilisée dans les références de calcul hydraulique des pompes centrifuges pour passer de la hauteur idéale donnée par Euler à la hauteur réellement exploitable par la pompe [8].

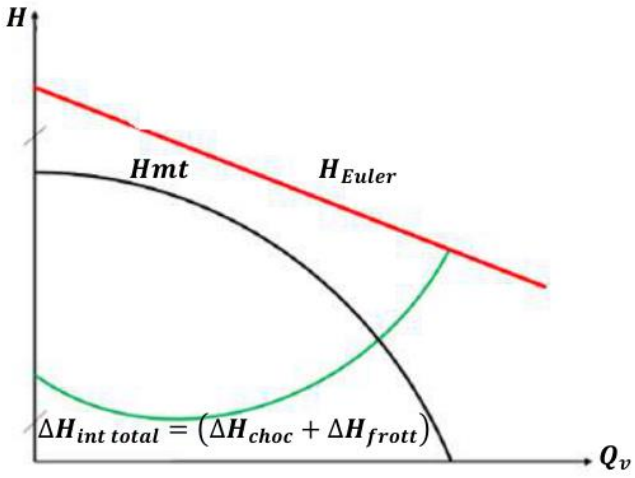


Figure II. 7: Passage de la hauteur d'Euler à la hauteur réelle après déduction des pertes hydrauliques [8].

II.9.3 Courbe hauteur-débit

La courbe hauteur-débit représente l'évolution de la hauteur fournie par la pompe en fonction du débit. En général, la hauteur diminue lorsque le débit augmente, car les pertes hydrauliques deviennent plus importantes et la répartition des vitesses dans la roue change.

Cette caractéristique est essentielle pour déterminer le point de fonctionnement de la pompe. Elle permet aussi de comparer plusieurs configurations géométriques de la roue, notamment lorsque les angles d'entrée β_1 et de sortie β_2 sont modifiés.

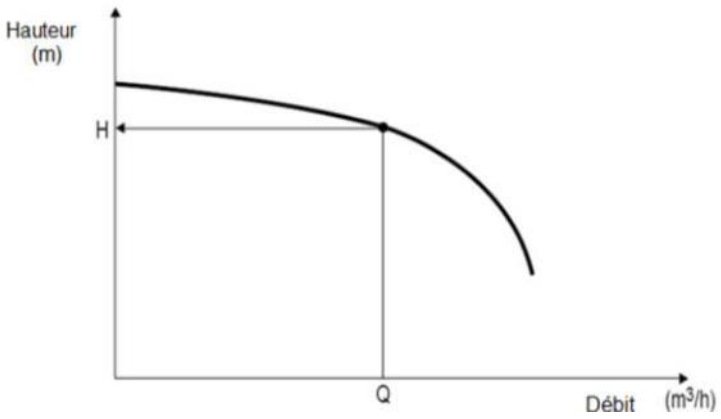


Figure II. 8: Courbe caractéristique hauteur-débit d'une pompe centrifuge [8].

II.9.4 Relation avec le rendement hydraulique

La différence entre la hauteur théorique et la hauteur réelle permet d'évaluer les pertes hydrauliques internes. Cette différence est directement liée au rendement hydraulique de la pompe, qui peut être défini par le rapport entre la hauteur réelle et la hauteur théorique :

$\eta_h = H_{réelle} / H_{Euler}$

Lorsque les pertes sont faibles, la hauteur réelle se rapproche de la hauteur théorique et le rendement hydraulique augmente. À l'inverse, lorsque les pertes augmentent, la hauteur réelle diminue et le rendement baisse. Le rendement hydraulique peut donc être considéré comme un indicateur de la qualité de transformation de l'énergie dans la pompe [9].

II.9.5 Influence des angles des aubes

Dans le cadre de cette étude, la distinction entre hauteur théorique et hauteur réelle est indispensable. Une variation de l'angle d'entrée β_1 peut modifier les pertes par incidence à l'entrée de la roue, tandis qu'une variation de l'angle de sortie β_2 agit directement sur la composante tangentielle C_{u2} et donc sur la hauteur d'Euler.

Cependant, une augmentation de la hauteur théorique ne signifie pas automatiquement une amélioration de la hauteur réelle. Si l'angle choisi provoque des pertes supplémentaires, des turbulences ou un mauvais guidage du fluide, la hauteur réelle et le rendement peuvent diminuer. L'objectif de l'étude est donc de rechercher une configuration d'angles qui améliore la transmission d'énergie tout en limitant les pertes hydrauliques.

II.9.6 Symboles utilisés

Tableau II.10 : Symboles utilisés dans l'étude du rendement hydraulique

Symbole	Désignation	Unité
H_Euler, Hth	Hauteur théorique donnée par l'équation d'Euler	m
H_réelle, Hmt	Hauteur réellement fournie par la pompe	m
ΔH_pertes	Pertes hydrauliques internes totales	m
ΔH_choc	Pertes par choc ou incidence	m
ΔH_frott	Pertes par frottement	m
η_h	Rendement hydraulique	-
U_1, U_2	Vitesses périphériques à l'entrée et à la sortie	m/s
C_{u1}, C_{u2}	Composantes tangentielles de la vitesse absolue	m/s
β_1, β_2	Angles d'entrée et de sortie des aubes	°

II.10 Pertes hydrauliques dans la roue

Les pertes hydrauliques dans la roue représentent la partie de l'énergie transmise au fluide qui n'est pas transformée utilement en hauteur manométrique. Dans une approche idéale, la roue fournit une hauteur théorique déterminée par l'équation d'Euler. En fonctionnement réel, cette hauteur est diminuée par les pertes internes liées aux frottements, aux chocs, aux turbulences, au glissement et aux recirculations [8], [10].

Ces pertes apparaissent principalement dans les passages inter-aubes, où le fluide est guidé entre le bord d'attaque et le bord de fuite. Leur intensité dépend de la géométrie de la roue, de l'état de surface, du débit de fonctionnement, de la vitesse de rotation, ainsi que de l'adaptation entre la direction de l'écoulement et les angles des aubes β_1 et β_2.

Idée principale

Une roue bien conçue ne cherche pas seulement à augmenter la hauteur théorique ; elle doit aussi réduire les pertes hydrauliques afin que la hauteur réelle et le rendement hydraulique restent élevés.

II.10.1 Définition des pertes hydrauliques

Les pertes hydrauliques peuvent être définies comme la différence entre la hauteur théorique fournie par la roue et la hauteur réelle obtenue à la sortie de la pompe. Elles traduisent la dissipation d'une partie de l'énergie du fluide sous forme de pertes de charge internes.

$$\Delta H_hyd = H_th - H_réelle$$

La hauteur réelle s'écrit donc :

$$H_réelle = H_th - \Delta H_hyd$$

Dans les références de calcul des pompes centrifuges, la hauteur réelle est obtenue en retranchant les pertes hydrauliques totales, notamment les pertes par choc et par frottement, de la hauteur théorique donnée par Euler [8].

II.10.2 Principales pertes dans la roue

Dans la roue d'une pompe centrifuge, les pertes ne proviennent pas d'un seul phénomène. Elles résultent de plusieurs mécanismes qui peuvent apparaître simultanément. Les plus importantes sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau II.11 : Principales pertes hydrauliques dans la roue d'une pompe centrifuge

Type de perte	Origine physique	Effet sur la pompe
Pertes par incidence	Mauvaise adaptation entre la vitesse relative d'entrée et l'angle β_1.	Chocs au bord d'attaque, turbulence, baisse du rendement.
Pertes par frottement	Viscosité du fluide et contact avec les parois des passages inter-aubes.	Dissipation d'énergie et diminution de la hauteur réelle.
Pertes par décollement	Séparation de l'écoulement lorsque le guidage par les aubes devient défavorable.	Zones mortes, tourbillons et instabilité de l'écoulement.
Pertes par recirculation	Retour local du fluide, souvent à faible débit ou hors point nominal.	Augmentation des turbulences et dégradation du rendement.
Pertes par glissement	Écart entre la direction réelle du fluide à la sortie et la direction idéale imposée par l'aube.	Réduction de la composante tangentielle C_{u2} et de la hauteur utile.

II.10.3 Pertes par incidence à l'entrée

Les pertes par incidence se produisent lorsque le fluide n'entre pas dans la roue suivant la direction correcte du profil de l'aube. Dans ce cas, la vitesse relative W_1 n'est pas alignée avec le bord d'attaque, ce qui provoque un choc hydraulique local. Ce phénomène est fortement lié au choix de l'angle d'entrée β_1.

Lorsque β_1 est mal adapté au débit de fonctionnement, l'écoulement devient plus turbulent dès l'entrée des passages inter-aubes. Cela augmente les pertes internes et diminue le rendement hydraulique. C'est pourquoi l'angle d'entrée doit être choisi de façon à limiter l'incidence au point de fonctionnement nominal.

II.10.4 Pertes par frottement

Les pertes par frottement sont dues à la viscosité du fluide et au contact de l'écoulement avec les parois de la roue. Elles augmentent avec la vitesse du fluide, la rugosité des surfaces et la longueur du trajet dans les passages inter-aubes.

Ces pertes deviennent plus importantes lorsque l'écoulement est fortement accéléré ou lorsque les canaux de la roue présentent une géométrie favorisant les gradients de vitesse. Dans le calcul de rendement hydraulique, elles représentent une partie importante de la différence entre la hauteur théorique et la hauteur réelle [8], [10].

II.10.5 Pertes par recirculation et décollement

Lorsque la pompe fonctionne loin de son débit nominal, l'écoulement dans la roue peut devenir instable. À faible débit, des zones de recirculation peuvent apparaître à l'entrée ou à la sortie de la roue. Ces zones perturbent le guidage du fluide, augmentent les turbulences et réduisent l'énergie effectivement transmise au liquide [1], [6].

Le décollement de l'écoulement est également une source importante de pertes. Il apparaît lorsque le fluide ne suit plus correctement la paroi de l'aube. Ce phénomène provoque des tourbillons et une mauvaise répartition des vitesses dans le canal inter-aubes.

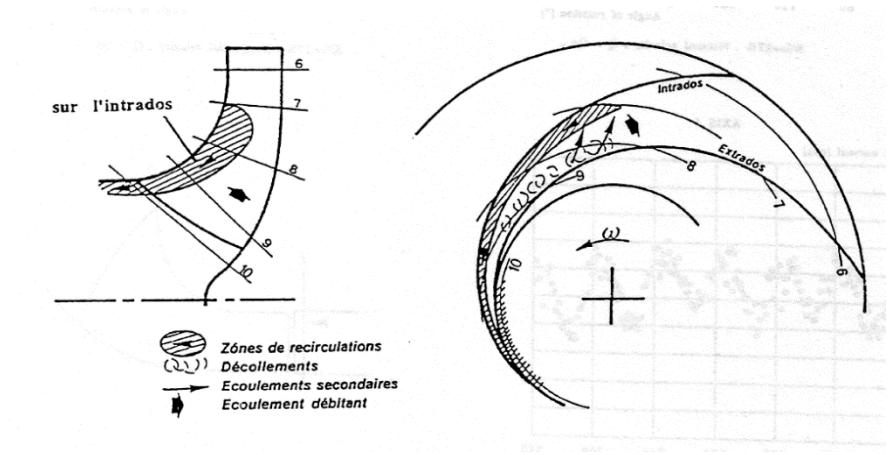


Figure II.9: Schéma des recirculations à l'entrée de la roue à faible débit [1].

II.10.6 Influence des angles β_1 et β_2

Dans le cadre de cette étude, les pertes hydrauliques sont directement liées à la variation des angles des aubes. L'angle d'entrée β_1 agit principalement sur l'adaptation de l'écoulement à l'entrée de la roue. Un mauvais choix de β_1 augmente les pertes par incidence et les chocs au bord d'attaque.

L'angle de sortie β_2 influence la direction de l'écoulement à la sortie de la roue et la composante tangentielle de la vitesse absolue C_{u2}. Un choix défavorable de β_2 peut augmenter les pertes par turbulence, glissement et décollement, même si la hauteur théorique semble élevée. Ainsi, l'amélioration du rendement ne dépend pas seulement de l'augmentation de la hauteur d'Euler, mais aussi de la réduction des pertes hydrauliques internes.

Lien avec le sujet de la mémoire

La variation de β_1 et β_2 doit être étudiée en comparant simultanément la hauteur théorique, la hauteur réelle, la puissance absorbée et le rendement. Une configuration d'angles est favorable seulement si elle améliore le transfert d'énergie tout en limitant les pertes hydrauliques.

II.10.7 Relation avec le rendement hydraulique

Le rendement hydraulique permet de mesurer l'importance des pertes dans la roue. Il peut être exprimé par le rapport entre la hauteur réelle et la hauteur théorique :

$$\eta_h = H_{réelle} / H_{th}$$

Lorsque les pertes hydrauliques diminuent, la hauteur réelle se rapproche de la hauteur théorique et le rendement hydraulique augmente. À l'inverse, une augmentation des pertes provoque une diminution de H_réelle et donc une baisse du rendement. Certaines références de calcul associent directement le rendement hydraulique aux pertes de charge créées dans l'impulseur [10].

II.10.8 Symboles utilisés

Tableau II.12 : Symboles utilisés dans l'étude des pertes hydrauliques

Symbole	Désignation	Unité
H_th	Hauteur théorique donnée par l'équation d'Euler	m
H_réelle	Hauteur réellement fournie par la pompe	m
ΔH_hyd	Pertes hydrauliques totales dans la roue	m
η_h	Rendement hydraulique	-
β_1	Angle d'entrée des aubes	°
β_2	Angle de sortie des aubes	°
W_1	Vitesse relative à l'entrée de la roue	m/s
C_{u2}	Composante tangentielle de la vitesse absolue à la sortie	m/s

II.11 Rendement hydraulique de la pompe

Le rendement hydraulique d'une pompe centrifuge est un indicateur essentiel de la qualité de la transformation de l'énergie à l'intérieur de la roue. Il permet d'évaluer la part de la hauteur théorique réellement convertie en hauteur utile après la prise en compte des pertes hydrauliques internes. Dans une pompe réelle, l'énergie transmise au fluide par les aubes n'est jamais totalement récupérée sous forme de hauteur manométrique, car une partie est dissipée par frottement, incidence, turbulence, décollement et recirculation [8], [10].

Cette notion est particulièrement importante dans cette étude, car la variation des angles des aubes β_1 et β_2 modifie la direction de l'écoulement dans les passages inter-aubes. Un bon choix géométrique permet de limiter les pertes et d'améliorer le rendement hydraulique, tandis qu'une

mauvaise adaptation de l'écoulement peut réduire la hauteur réelle malgré une hauteur théorique élevée.

II.11.1 Définition du rendement hydraulique

Le rendement hydraulique, noté ηh, est défini comme le rapport entre la hauteur réelle fournie par la pompe et la hauteur théorique issue de l'équation d'Euler. Il traduit donc l'efficacité avec laquelle la roue transforme l'énergie théorique en énergie hydraulique utile pour le fluide.

$$\eta h = H\text{réelle} / H\text{th}$$

ηh : rendement hydraulique ; Hréelle : hauteur réelle ; Hth : hauteur théorique

Lorsque les pertes hydrauliques sont faibles, la hauteur réelle se rapproche de la hauteur théorique et le rendement hydraulique augmente. À l'inverse, lorsque les pertes augmentent, la hauteur réelle diminue et le rendement devient plus faible [8], [9].

II.11.2 Relation avec les pertes hydrauliques

La hauteur réelle est obtenue en retranchant les pertes hydrauliques de la hauteur théorique. Ces pertes regroupent principalement les pertes par choc, les pertes par frottement et les pertes associées aux turbulences et aux recirculations dans la roue.

$$H\text{réelle} = H\text{th} - \Delta H\text{hyd}$$

ΔHhyd : pertes hydrauliques totales dans la pompe

$$\eta h = (H\text{th} - \Delta H\text{hyd}) / H\text{th}$$

Forme mettant en évidence l'influence directe des pertes sur le rendement

Cette écriture montre clairement que le rendement hydraulique dépend de la maîtrise des pertes internes. La réduction des pertes dans la roue, dans le diffuseur ou dans la volute permet d'améliorer la hauteur utile et donc le rendement global de la pompe [8].

II.11.3 Courbes caractéristiques et point de meilleur rendement

Le rendement d'une pompe centrifuge varie avec le débit. Il est généralement représenté par une courbe caractéristique fournie par le constructeur. Cette courbe présente une zone optimale appelée point de meilleur rendement, ou BEP (Best Efficiency Point). À ce point, les pertes hydrauliques sont minimales et l'écoulement est mieux adapté à la géométrie de la roue.

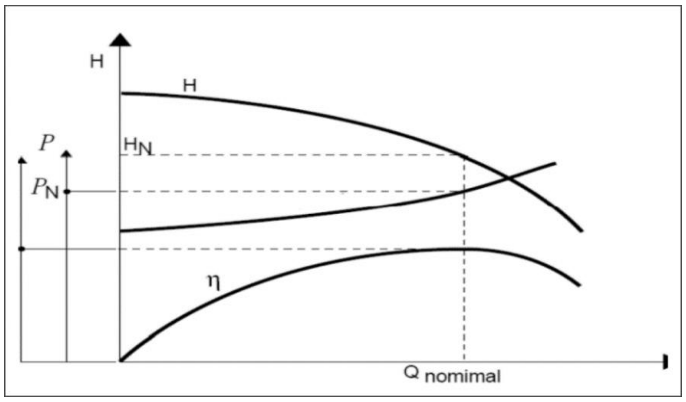


Figure II10: Courbes caractéristiques : hauteur, rendement et puissance absorbée en fonction du débit [8]

La figure montre que la hauteur, la puissance absorbée et le rendement évoluent simultanément avec le débit. Le débit nominal correspond généralement à la zone où le rendement est maximal. Un fonctionnement trop éloigné de cette zone peut entraîner une augmentation des pertes, des vibrations, des recirculations et une baisse du rendement.

II.11.4 Distinction entre rendement hydraulique et rendement global

Il est important de distinguer le rendement hydraulique du rendement global de la pompe. Le rendement hydraulique ne considère que les pertes liées à l'écoulement. Le rendement global tient compte en plus des pertes volumétriques et mécaniques. Dans les références de calcul des pompes centrifuges, le rendement global est généralement exprimé comme le produit des trois rendements principaux [8], [10].

$$\eta_{globale} = \eta_v \times \eta_h \times \eta_m$$

η_v : rendement volumétrique ; η_h : rendement hydraulique ; η_m : rendement mécanique

II.11.5 Principaux facteurs influençant le rendement hydraulique

Tableau II.13 : Principaux facteurs influençant le rendement hydraulique d'une pompe centrifuge

Facteur	Effet hydraulique	Conséquence sur le rendement
Angle d'entrée β_1	Conditionne l'adaptation de l'écoulement au bord d'attaque.	Réduit les pertes par incidence si l'angle est bien choisi.
Angle de sortie β_2	Influence la composante tangentielle Cu_2 et la direction de sortie.	Modifie la hauteur théorique et les pertes de sortie.
Débit de fonctionnement	Détermine le point de fonctionnement par rapport au débit nominal.	Le rendement est maximal près du point de meilleur rendement.
Rugosité et frottements	Augmentent la dissipation d'énergie dans les passages inter-aubes.	Diminuent la hauteur réelle.
Recirculations et décollements	Apparaissent surtout hors point nominal ou avec mauvais guidage.	Provoquent une baisse sensible du rendement.

II.11.6 Lien avec la variation des angles des aubes

Dans le cadre de cette étude, les angles β_1 et β_2 sont considérés comme des paramètres de conception influençant directement le rendement hydraulique. L'angle β_1 agit surtout sur la qualité de l'entrée du fluide dans la roue. Si l'orientation de la vitesse relative n'est pas compatible avec le profil de l'aube, des pertes par incidence apparaissent dès l'entrée des passages inter-aubes.

L'angle β_2 agit principalement sur la sortie de la roue. Il modifie la composante tangentielle de la vitesse absolue Cu_2, donc la hauteur théorique fournie par la roue selon l'équation d'Euler. Cependant, une augmentation de la hauteur théorique n'améliore pas nécessairement le rendement si elle s'accompagne d'une hausse des pertes hydrauliques. L'objectif de l'étude est donc de rechercher une configuration d'angles permettant d'obtenir un bon compromis entre hauteur manométrique, puissance absorbée et rendement hydraulique.

II.12 Relation entre les angles des aubes et le rendement de la pompe

Le rendement d'une pompe centrifuge dépend fortement de la géométrie de sa roue. Parmi les paramètres géométriques les plus influents, les angles des aubes occupent une place essentielle,

car ils déterminent la direction de l'écoulement à l'entrée et à la sortie de la roue. Les angles β_1 et β_2 agissent directement sur les triangles des vitesses, sur la hauteur théorique, sur les pertes hydrauliques et, par conséquent, sur le rendement global de la pompe [5], [10]. L'angle d'entrée β_1 intervient principalement au moment de l'admission du fluide dans les canaux inter-aubes. Lorsque cet angle est correctement adapté à la direction d'arrivée du fluide, l'entrée se fait progressivement, avec moins de chocs et moins de pertes par incidence. En revanche, un mauvais choix de β_1 provoque un désalignement entre la direction de l'écoulement et le profil de l'aube. Ce désalignement peut entraîner des turbulences, des recirculations et une diminution du rendement hydraulique [1], [10]. L'angle de sortie β_2 influence surtout la direction de sortie du fluide et la composante tangentielle de la vitesse absolue, notée C_{u2}. Cette composante est directement liée à l'énergie transmise au fluide. Ainsi, une modification de β_2 entraîne une modification de la hauteur théorique fournie par la roue, mais aussi de la puissance absorbée et des pertes à la sortie de la roue [5], [8].

II.12.1 Relation avec les triangles des vitesses

Les triangles des vitesses permettent de relier la vitesse absolue C, la vitesse relative W et la vitesse périphérique U. À l'entrée et à la sortie de la roue, ces vitesses dépendent directement des angles des aubes. Ainsi, β_1 fixe l'orientation de la vitesse relative à l'entrée, tandis que β_2 fixe l'orientation de la vitesse relative à la sortie. Toute variation de ces angles modifie donc les composantes de la vitesse absolue, en particulier la composante tangentielle C_{u2}, qui intervient dans le transfert d'énergie.

II.12.2 Relation avec l'équation d'Euler

Du point de vue énergétique, la relation entre les angles des aubes et le rendement peut être expliquée par l'équation d'Euler appliquée aux turbomachines. Pour une pompe centrifuge, la hauteur théorique transmise au fluide s'exprime par :

$$\mathbf{H_{th} = (U_2\, C_{u2} - U_1\, C_{u1}) / g}$$

Dans de nombreuses pompes centrifuges, l'écoulement entre dans la roue avec une prérotation faible ; la composante C_{u1} peut alors être considérée comme faible devant C_{u2}. La hauteur théorique dépend principalement du terme U_2C_{u2}. Comme C_{u2} est influencée par l'angle

de sortie β_2, on comprend que cet angle agit directement sur la hauteur manométrique et sur l'énergie transmise au fluide. Cependant, l'augmentation de la hauteur théorique ne signifie pas toujours une amélioration du rendement. Un angle β_2 trop élevé peut augmenter la vitesse de sortie, la puissance absorbée et les pertes dans la volute ou le diffuseur. À l'inverse, un angle β_2 trop faible peut limiter l'énergie transmise au fluide et réduire la hauteur utile. Le meilleur rendement est donc obtenu pour une valeur optimale de β_2, assurant un compromis entre la hauteur fournie, la puissance consommée et les pertes hydrauliques.

II.12.3 Effet combiné de β_1 et β_2 sur le rendement

Les deux angles β_1 et β_2 ne doivent pas être étudiés séparément de manière absolue. Leur effet sur le rendement est combiné. L'angle β_1 conditionne la qualité de l'entrée du fluide dans la roue, tandis que l'angle β_2 conditionne l'énergie transmise à la sortie. Une bonne combinaison des deux permet d'obtenir un écoulement régulier dans les canaux inter-aubes, de réduire les pertes par choc, de limiter les recirculations et d'améliorer le rendement hydraulique. Lorsque les angles des aubes ne sont pas adaptés au débit de fonctionnement, la pompe peut s'éloigner de son point de meilleur rendement. Dans ce cas, l'écoulement devient plus instable, les fluctuations de pression augmentent et les interactions entre la roue et les organes fixes deviennent plus marquées. Ces phénomènes peuvent provoquer une augmentation des pertes internes et une baisse du rendement global [1], [4].

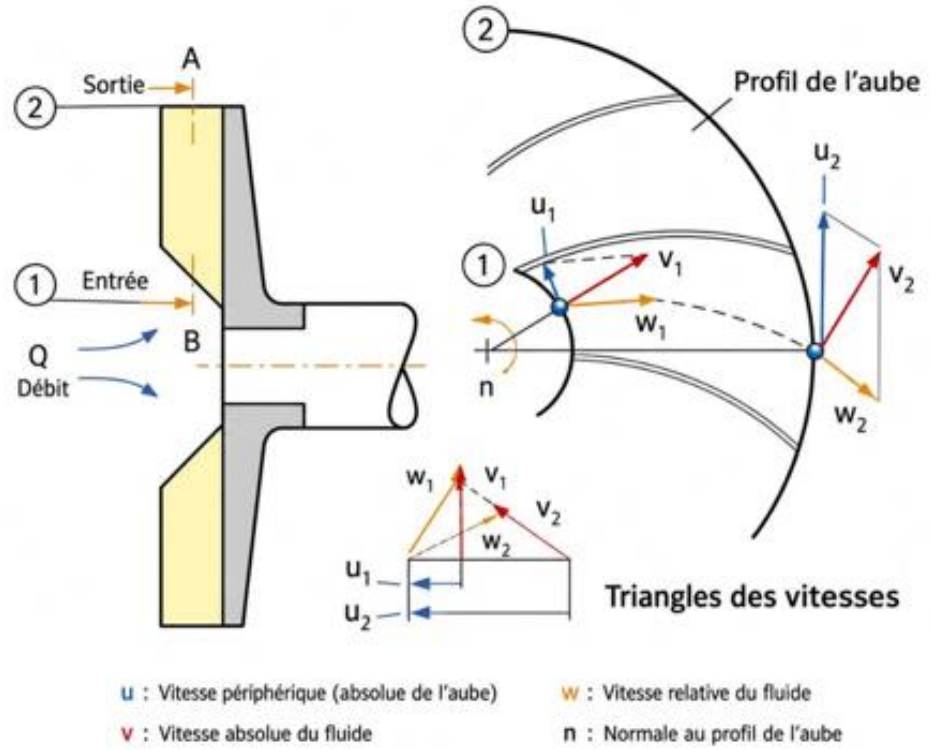


Figure II.11: Triangle des vitesses et relation entre l'angle d'entrée et l'angle de sortie dans la section AB. [10].

II.12.4 Synthèse de l'influence des angles

Tableau II.14 : Synthèse de l'influence des angles des aubes sur les performances hydrauliques de la pompe centrifuge

Paramètre	Rôle hydraulique	Conséquence sur le rendement
Angle d'entrée β_1	Oriente le fluide à l'entrée de la roue.	Réduit les chocs et les pertes par incidence lorsqu'il est bien adapté.
β_1 mal adapté	Crée un désalignement entre le fluide et l'aube.	Augmente les turbulences, les recirculations et les pertes hydrauliques.
Angle de sortie β_2	Détermine la direction de sortie et la composante C_{u2}.	Influence la hauteur théorique, la puissance absorbée et le rendement.
β_2 trop faible	Diminue la composante tangentielle à la sortie.	Réduit la hauteur manométrique et limite l'énergie transmise au fluide.
β_2 trop élevé	Augmente la vitesse de sortie et la puissance absorbée.	Peut accroître les pertes dans la volute ou le diffuseur.

β_1 et β_2 optimisés	Assurent une meilleure adaptation de l'écoulement.	Permettent un meilleur compromis entre hauteur, puissance et rendement.

II.13 Conclusion

Ce chapitre a présenté les bases théoriques nécessaires à l'étude de la roue d'une pompe centrifuge et de l'influence des angles des aubes sur le rendement. La roue a d'abord été décrite comme l'organe principal de transfert d'énergie entre l'arbre moteur et le fluide. Sa géométrie, notamment le diamètre, la largeur des passages, le nombre d'aubes et les angles d'entrée et de sortie, conditionne directement le comportement hydraulique de la pompe.

L'étude du rôle des aubes a montré que celles-ci assurent à la fois le guidage du fluide, le transfert d'énergie et l'orientation de l'écoulement à la sortie de la roue. Les différents types d'aubes ont également été présentés. Les aubes inclinées vers l'arrière apparaissent comme la configuration la plus favorable dans les pompes centrifuges industrielles, car elles permettent généralement d'obtenir un meilleur rendement et une meilleure stabilité de fonctionnement.

Les triangles des vitesses ont ensuite permis de relier les composantes de vitesse aux angles β_1 et β_2. L'angle d'entrée β_1 agit principalement sur l'adaptation du fluide à l'entrée de la roue et sur les pertes par incidence. L'angle de sortie β_2 agit directement sur la composante tangentielle C_{u2}, sur la hauteur théorique donnée par l'équation d'Euler, sur la puissance absorbée et sur le rendement hydraulique.

L'analyse de la hauteur théorique, de la hauteur réelle et des pertes hydrauliques a montré qu'une augmentation de l'énergie théorique transmise au fluide ne garantit pas nécessairement une amélioration du rendement. Le meilleur fonctionnement est obtenu lorsque les angles des aubes permettent un transfert d'énergie suffisant tout en limitant les pertes par choc, frottement, recirculation, décollement et glissement.

Ainsi, ce chapitre constitue la base théorique de la suite du travail. Les relations établies entre β_1, β_2, les triangles des vitesses, l'équation d'Euler et le rendement hydraulique permettront d'interpréter les résultats de la simulation numérique et de déterminer la configuration d'aubes la plus favorable pour améliorer les performances de la pompe centrifuge

Chapitre III :

Le moulage au sable

Introduction

Le moulage au sable est un procédé de fonderie permettant de fabriquer des pièces métalliques par coulée d'un métal ou d'un alliage en fusion dans un moule réalisé en sable. Ce moule contient une cavité appelée empreinte, qui reproduit la forme extérieure de la pièce à obtenir. Après la coulée, le métal se refroidit, se solidifie et prend la forme de cette empreinte, puis le moule est détruit afin d'extraire la pièce moulée. Pour cette raison, le moulage au sable est considéré comme un procédé à moule non permanent, ou moule perdu [13], [14]. Ce procédé est largement utilisé dans l'industrie de la fonderie grâce à sa simplicité, son coût relativement faible et sa capacité à produire des pièces de formes et de dimensions très variées. Il peut être appliqué à plusieurs alliages métalliques, comme la fonte, l'acier, l'aluminium, le bronze et le laiton. Il permet également de fabriquer des pièces simples, complexes ou creuses, notamment grâce à l'utilisation de noyaux [13], [15]. Le moulage au sable peut être réalisé selon plusieurs méthodes, qui se distinguent par la nature du sable utilisé, le type de liant et le mode de durcissement du moule. Parmi les procédés les plus courants, on trouve le moulage au sable vert, le moulage au sable sec, le moulage à prise chimique et le moulage avec noyaux. Le choix du procédé dépend principalement du métal coulé, de la forme de la pièce, de la précision recherchée, du coût de fabrication et de la cadence de production [14], [16], [17]. Dans ce chapitre, nous présenterons le principe du moulage au sable, les matériaux utilisés dans la préparation du moule, les différents types de moulage au sable, ainsi que les principales étapes du procédé. Nous aborderons également les avantages, les limites et les défauts possibles afin de mieux comprendre les paramètres qui influencent la qualité finale des pièces moulées.

III.2 Définition et principe du moulage au sable

Le moulage au sable est un procédé de fonderie permettant d’obtenir des pièces métalliques brutes par coulée d’un métal ou d’un alliage en fusion dans un moule réalisé en sable. Ce moule contient une cavité appelée empreinte, qui reproduit la forme extérieure de la pièce à fabriquer. Après la coulée, le métal se refroidit et se solidifie en prenant la forme de cette empreinte. Le moule en sable est ensuite détruit afin d’extraire la pièce obtenue. Pour cette raison, le moulage au sable est classé parmi les procédés à moule non permanent ou moule perdu [14], [15].

Ce procédé est largement utilisé en fonderie en raison de sa simplicité, de son coût relativement faible et de sa capacité à produire des pièces de dimensions et de formes très variées. Il convient aussi bien aux pièces simples qu'aux pièces complexes, et il peut être appliqué à de nombreux alliages métalliques. Les références spécialisées en fonderie indiquent que les procédés de moulage au sable peuvent être distingués selon le type de sable et de liant utilisé, notamment le sable vert, le sable sec et les procédés à prise chimique [13].

III.2.1 Définition du moulage au sable

Le moulage au sable peut être défini comme une technique de fabrication dans laquelle un modèle est utilisé pour former une empreinte dans un mélange de sable. Cette empreinte reçoit ensuite le métal en fusion. Après refroidissement et solidification, le moule est cassé et la pièce est récupérée. Le sable utilisé est généralement constitué d'un sable de base, souvent siliceux, auquel on ajoute un liant comme l'argile ou la bentonite, de l'eau et parfois des adjuvants destinés à améliorer les propriétés du moule [14], [15] [16]. Le moule en sable est généralement constitué de deux parties principales: la partie inférieure appelée dessous ou drag, et la partie supérieure appelée chape ou cope. Ces deux parties forment ensemble la cavité de moulage. Le moule comprend aussi un système de coulée permettant l'introduction du métal liquide, des canaux d'alimentation, des attaques, des évents pour l'évacuation des gaz, des masselottes pour compenser le retrait de solidification et, si nécessaire, des noyaux destinés à former les cavités internes de la pièce [14] [15].

Figure III.1 : Exemple de moule en sable et de sable de fonderie. [16].

III.2.2 Principe général du procédé

Le principe général du moulage au sable repose sur la reproduction de la forme d'une pièce à partir d'un modèle. Dans un premier temps, le modèle est placé dans un châssis de moulage. Le sable est ensuite versé autour du modèle puis compacté afin de conserver correctement la forme

désirée. Après le compactage, le modèle est retiré, laissant une empreinte dans le sable. Cette empreinte représente la géométrie extérieure de la pièce à obtenir [14], [15], [16].

Ensuite, les deux parties du moule sont assemblées. Si la pièce possède des formes intérieures, des noyaux en sable sont placés dans le moule avant la fermeture. Le métal en fusion est alors versé dans le moule à travers le système de coulée. Il remplit progressivement la cavité, puis se refroidit et se solidifie. Enfin, le moule est détruit par décochage afin de libérer la pièce brute. Cette pièce subit ensuite des opérations de finition telles que l'ébarbage, le nettoyage, le sablage ou le grenaillage [14], [15], [16].

Les principales étapes du moulage au sable

1. Préparation du modèle de la pièce.
2. Préparation et compactage du sable dans le châssis.
3. Réalisation de l'empreinte dans le moule.
4. Mise en place du système de coulée et des noyaux si nécessaire.
5. Fermeture du moule.
6. Coulée du métal liquide.
7. Refroidissement et solidification.
8. Démoulage et extraction de la pièce.
9. Nettoyage, ébarbage et finition de la pièce.

III.2.3 Domaine d'utilisation

Le moulage au sable occupe une place importante dans l'industrie de la fonderie, car il permet de produire des pièces de petites, moyennes ou grandes dimensions avec une grande liberté de forme. Il est particulièrement adapté à la fabrication de pièces mécaniques complexes, telles que les bâtis de machines, les carters, les corps de pompes, les roues, les hélices et certains composants industriels. Malgré ses avantages, ce procédé présente certaines limites, notamment une précision dimensionnelle et un état de surface généralement inférieurs à ceux obtenus par des procédés de moulage plus précis, comme le moulage en coquille ou le moulage sous pression [1],

[2], [3]. Ainsi, le moulage au sable reste un procédé fondamental dans la fabrication des pièces métalliques. Sa réussite dépend principalement de la qualité du sable utilisé, du bon compactage du moule, de la conception correcte du système de coulée, ainsi que du contrôle des conditions de refroidissement et de solidification [13], [14], [15], [16].

III.3 Les matériaux utilisés dans le moulage au sable

La qualité d'un moule en sable dépend directement de la nature et du dosage des matériaux utilisés dans sa préparation. En fonderie, le sable de moulage n'est pas constitué uniquement de grains de sable, mais d'un mélange composé principalement d'un sable de base, d'un liant, d'eau et parfois de produits d'addition appelés adjuvants. Chaque constituant joue un rôle précis dans la tenue du moule, sa perméabilité, sa résistance mécanique et sa capacité à reproduire correctement la forme de la pièce [13]. Dans le cas du moulage au sable vert, le mélange est généralement constitué de sable siliceux, d'argile ou de bentonite, d'eau et d'additifs. La composition doit être soigneusement contrôlée, car une variation excessive de l'un des constituants peut provoquer des défauts de moulage tels que les soufflures, le mauvais remplissage, l'effritement du moule ou une mauvaise qualité de surface [16].

III.3.1 Le sable de base

Le sable de base constitue l'élément principal du moule. Il forme le squelette granulaire qui donne au moule sa forme, son volume et une partie de sa résistance. Il doit présenter une bonne réfractarité afin de résister à la température du métal liquide, une granulométrie adaptée pour assurer la perméabilité aux gaz, ainsi qu'une stabilité suffisante pendant la coulée et la solidification [13]. Les sables utilisés en fonderie peuvent être naturels, semi-synthétiques ou synthétiques. Le sable naturel contient déjà une certaine quantité d'argile, tandis que le sable synthétique est généralement préparé à partir d'un sable siliceux lavé et contrôlé auquel on ajoute des liants comme la bentonite. Les sables synthétiques sont souvent préférés lorsque l'on souhaite mieux contrôler les propriétés du mélange, notamment la perméabilité, la cohésion et la résistance mécanique du moule [17]. Le choix du sable de base dépend de plusieurs critères: le coût, la disponibilité, la forme des grains, la granulométrie, la réfractarité et la compatibilité avec le métal coulé. En pratique, la silice reste le sable le plus utilisé, car elle est abondante, économique et adaptée à de nombreuses applications de moulage [13].

III.3.2 La silice

La silice, de formule chimique SiO_2, est le constituant le plus courant des sables de fonderie. Elle se présente principalement sous forme de quartz. Elle est largement utilisée dans le moulage au sable grâce à sa disponibilité, son faible coût et sa bonne résistance aux températures élevées [13]. Les sables siliceux peuvent atteindre une teneur très élevée en SiO_2, ce qui leur donne une bonne réfractarité pour la majorité des applications de fonderie. Cependant, la silice présente aussi certaines limites. Sous l'effet de la température, le quartz peut subir des transformations cristallines, ce qui peut provoquer des dilatations ou des contraintes dans le moule. Ces phénomènes peuvent influencer la précision dimensionnelle de la pièce et favoriser certains défauts de surface [17]. La forme des grains de silice joue également un rôle important. Les grains arrondis facilitent l'écoulement du sable et améliorent généralement la perméabilité, tandis que les grains anguleux offrent une meilleure accroche entre les particules, mais demandent une quantité plus importante de liant et d'eau. Ainsi, la granulométrie et la morphologie des grains doivent être choisies en fonction du type de pièce, du métal coulé et des propriétés recherchées pour le moule [17].

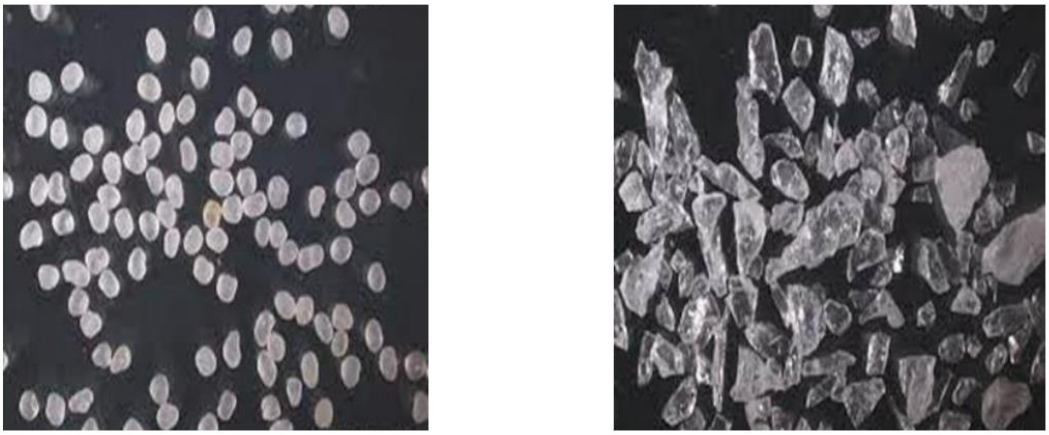


Figure III.2 : Grains de silice arrondis et angulaires. [17].

III.3.3 L'argile et la bentonite

L'argile est utilisée comme liant dans les moules en sable vert. Son rôle est d'assurer la cohésion entre les grains de sable afin que le moule conserve sa forme pendant la manipulation, la fermeture, la coulée et le début de la solidification. Sans liant, les grains de sable ne peuvent pas former une empreinte stable et résistante [16].

La bentonite est l'un des liants argileux les plus utilisés en fonderie. Elle est principalement composée de montmorillonite, une argile capable d'absorber l'eau et de gonfler. Lorsque la bentonite est mélangée avec de l'eau, elle forme une pâte argileuse qui entoure les grains de sable et crée des ponts de liaison entre eux. Cette liaison donne au moule sa cohésion, sa plasticité et sa résistance mécanique [13]. Le taux de bentonite doit être bien contrôlé. Une quantité insuffisante diminue la cohésion et peut provoquer l'effritement du moule. À l'inverse, une quantité excessive peut réduire la perméabilité du sable, ce qui empêche l'évacuation correcte des gaz pendant la coulée. Les travaux expérimentaux sur les sables de moulage à vert montrent que la bentonite et l'humidité ont une influence directe sur la perméabilité, la résistance à la compression et la résistance au cisaillement [16], [18].

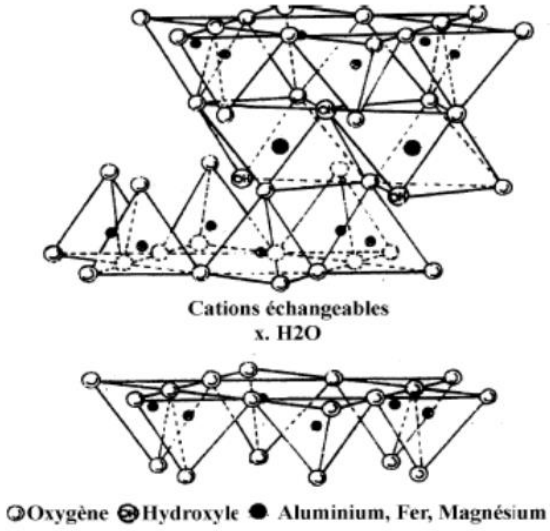


Figure III.3 : Structure d'une montmorillonite. [17].

III.3.4 L'eau d'addition

L'eau d'addition est indispensable dans le moulage au sable vert, car elle active le pouvoir liant de l'argile ou de la bentonite. Elle permet la formation d'un film humide autour des particules d'argile et des grains de sable, ce qui améliore la cohésion du mélange et facilite son compactage dans le châssis de moulage [13].

La teneur en eau doit cependant être optimisée. Une faible quantité d'eau ne permet pas d'activer correctement la bentonite, ce qui réduit la résistance du moule. En revanche, un excès d'eau diminue la perméabilité, augmente la formation de vapeur lors de la coulée et peut provoquer des défauts gazeux dans la pièce moulée [16]. L'humidité influence aussi la plasticité du sable, c'est-à-dire sa capacité à se déformer et à épouser correctement la forme du modèle sans se fissurer. Les études expérimentales montrent que l'humidité agit fortement sur les propriétés mécaniques des sables de moulage à vert, notamment la résistance à la compression et au cisaillement [17].

III.3.5 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits ajoutés au sable de moulage pour améliorer certaines propriétés spécifiques du mélange. Ils ne constituent pas toujours la partie principale du sable, mais ils jouent un rôle important dans la qualité finale du moule et de la pièce obtenue [16]. Parmi les adjuvants les plus utilisés, on trouve le noir minéral, la farine de bois, les liants amylacés, les huiles minérales et certains produits organiques. Le noir minéral peut améliorer l'état de surface des pièces moulées et limiter certains défauts liés à l'interaction entre le métal liquide et le moule. La farine de bois et les matières organiques peuvent améliorer la collapsibilité du moule, c'est-à-dire sa capacité à se désagréger plus facilement après la solidification de la pièce [16].Le choix des adjuvants dépend du type de métal coulé, de la température de coulée, de la forme de la pièce et des propriétés recherchées. Leur dosage doit être maîtrisé, car un excès d'additifs peut modifier la perméabilité, augmenter la quantité de gaz dégagés pendant la coulée ou altérer la résistance du moule [13].

Tableau III.1 : Principaux constituants du sable de moulage et leurs rôles

Constituant	Rôle principal
Sable de base	Former le squelette du moule et assurer la réfractarité
Silice	Constituant principal, économique et résistant à la chaleur
Argile / bentonite	Assurer la cohésion et la résistance du moule
Eau	Activer l'argile ou la bentonite et améliorer la plasticité
Adjuvants	Améliorer l'état de surface, la collapsibilité ou certaines propriétés spécifiques

En résumé, les matériaux utilisés dans le moulage au sable doivent être choisis et dosés avec précision. Le sable de base assure la structure du moule, la silice apporte la réfractarité, la bentonite

donne la cohésion, l'eau active le liant et les adjuvants améliorent certaines propriétés particulières. La maîtrise de ces constituants est donc essentielle pour obtenir un moule stable, perméable, résistant et capable de produire une pièce de bonne qualité [13], [16], [17], [18].

III.4 Les types de moulage au sable

Il existe plusieurs types de moulage au sable, qui se distinguent principalement par la nature du sable utilisé, le type de liant, le mode de durcissement du moule et les exigences de la pièce à produire. Les procédés de moulage au sable peuvent être classés selon le mode de liaison du sable: moules liés par des liants minéraux, moules liés par des résines ou procédés utilisant des noyaux pour obtenir des formes internes complexes [13], [16]. Dans la pratique industrielle, les procédés les plus courants sont le moulage au sable vert, le moulage au sable sec, le moulage à prise chimique et le moulage avec noyaux. Le choix du procédé dépend du métal coulé, de la forme de la pièce, de sa masse, de la précision recherchée, du coût de fabrication et de la cadence de production [16], [18].

III.4.1 Le moulage au sable vert

Le moulage au sable vert est l'un des procédés les plus utilisés en fonderie. Le terme « vert » ne désigne pas la couleur du sable, mais indique que le moule contient encore de l'humidité au moment de la coulée. Le sable vert est généralement composé de sable siliceux, d'argile ou de bentonite, d'eau et parfois d'additifs comme le noir minéral [16]. Dans ce procédé, le sable est préparé puis compacté autour du modèle afin de former l'empreinte de la pièce. Après le retrait du modèle, le moule est fermé et le métal liquide est coulé dans la cavité. Le sable vert est apprécié pour sa simplicité, son faible coût et la possibilité de recycler une grande partie du sable après démoulage [16], [18]. Ce procédé présente toutefois certaines limites. Il exige un bon contrôle de l'humidité, de la teneur en bentonite, de la perméabilité et de la résistance mécanique. Un excès d'eau peut favoriser les défauts dus aux gaz, tandis qu'un manque d'humidité ou de liant peut diminuer la cohésion du moule. Les études expérimentales montrent que la bentonite et l'humidité influencent directement les propriétés du sable de moulage à vert [17], [18].

III.4.2 Le moulage au sable sec

Le moulage au sable sec utilise un moule en sable qui est séché avant la coulée. Contrairement au sable vert, le moule ne contient plus une quantité importante d'humidité au moment du contact avec le métal liquide. Le séchage améliore la résistance du moule et réduit la formation de vapeur pendant la coulée [13]. Ce procédé est particulièrement intéressant pour les pièces de grandes dimensions ou pour les pièces nécessitant une meilleure stabilité du moule. Le moule sec offre généralement une meilleure résistance mécanique et peut limiter certains défauts liés à l'humidité, comme les soufflures et les porosités gazeuses. Il peut également améliorer la qualité de surface de la pièce obtenue. En revanche, le moulage au sable sec demande plus de temps que le moulage au sable vert, car il nécessite une opération supplémentaire de séchage. Il peut donc être plus coûteux et moins adapté aux productions rapides. Son emploi est choisi lorsque la stabilité du moule et la réduction de l'humidité sont prioritaires [13].

III.4.3 Le moulage à prise chimique

Le moulage à prise chimique est un procédé dans lequel le sable est mélangé avec un liant qui durcit par réaction chimique. Contrairement au sable vert, la résistance du moule n'est pas obtenue uniquement par compactage, mais par durcissement du liant. Les liants utilisés peuvent être organiques, comme les résines, ou minéraux, comme le silicate de sodium [13], [16].

Parmi les procédés à prise chimique, on trouve les procédés no-bake, cold-box, hot-box et les systèmes au silicate de sodium/CO_2. Dans le procédé no-bake, le sable durcit à température ambiante après mélange avec une résine et un catalyseur. Dans le procédé cold-box, le durcissement est obtenu par injection d'un gaz réactif. Dans les systèmes au silicate de sodium, le durcissement peut être obtenu par injection de dioxyde de carbone [13], [16].

Ce type de moulage permet d'obtenir des moules plus résistants, plus stables et plus précis que les moules en sable vert. Il est souvent utilisé pour les pièces complexes, les moules de grande taille et les noyaux. Cependant, il est plus coûteux et peut produire des gaz lors de la coulée, surtout lorsque des liants organiques sont employés. Le dosage des liants, le temps de prise et la ventilation du moule doivent donc être soigneusement contrôlés [13], [16].

III.4.4 Le moulage avec noyaux

Le moulage avec noyaux est utilisé lorsque la pièce à fabriquer possède des cavités, des passages internes ou des formes intérieures impossibles à obtenir uniquement avec l'empreinte principale du moule. Le noyau est généralement fabriqué en sable lié, puis placé à l'intérieur du moule avant la fermeture. Après la coulée et la solidification, le noyau est détruit ou retiré afin de libérer les formes internes de la pièce [16], [18]. Les noyaux doivent présenter une bonne résistance mécanique afin de supporter la coulée, une bonne perméabilité pour laisser s'échapper les gaz, une bonne réfractarité pour résister à la température du métal liquide et une bonne collapsibilité pour faciliter leur retrait après solidification. Les procédés à prise chimique sont souvent utilisés pour fabriquer des noyaux, car ils donnent une bonne précision et une résistance suffisante avant la coulée [13], [16]. Ce procédé est important pour la fabrication de pièces mécaniques creuses ou complexes, comme les corps de pompe, les carters, les blocs moteurs, les collecteurs et certaines pièces hydrauliques. Toutefois, il augmente la complexité de fabrication. Un mauvais positionnement du noyau peut entraîner des défauts dimensionnels, tandis qu'un noyau mal ventilé peut provoquer des défauts gazeux [18].

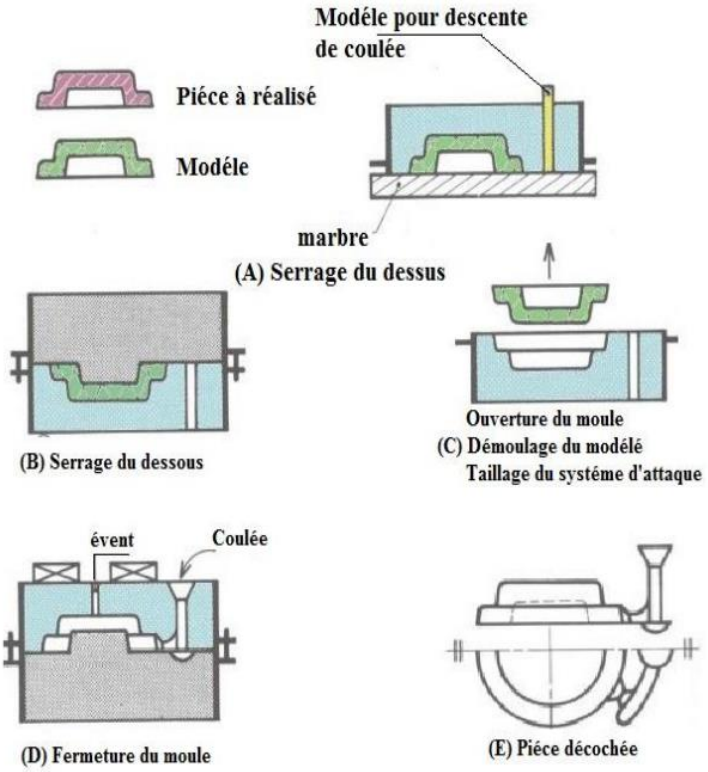


Figure III.4 : Exemple de réalisation d'un moule en sable avec système de coulée. [18].

Tableau III.2 : Comparaison entre les principaux types de moulage au sable

Type de moulage	Principe	Avantages	Limites
Moulage au sable vert	Moule humide à base de sable, bentonite et eau.	Économique, rapide, sable recyclable.	Sensible à l'humidité et aux gaz.
Moulage au sable sec	Moule séché avant la coulée.	Bonne résistance et moins de vapeur.	Préparation plus longue et coût plus élevé.
Moulage à prise chimique	Sable durci par réaction chimique.	Bonne précision et bonne stabilité.	Coût plus élevé et dégagement possible de gaz.
Moulage avec noyaux	Utilisation de noyaux pour créer des formes internes.	Permet des pièces creuses et complexes.	Risque de déplacement ou de mauvais dégazage du noyau.

III.5 Les étapes du procédé de moulage au sable

Le procédé de moulage au sable se réalise selon une succession d'opérations qui permettent de passer du modèle de la pièce à la pièce métallique brute obtenue après solidification. Ces opérations comprennent principalement la préparation du modèle, la préparation du sable, la réalisation de l'empreinte, la mise en place du système de coulée, la coulée du métal liquide, le refroidissement, le démoulage, puis les opérations de nettoyage et de finition [14], [17].

La maîtrise de ces étapes est indispensable pour obtenir une pièce saine et conforme aux exigences dimensionnelles. Une mauvaise préparation du sable, une empreinte détériorée, un système de coulée mal conçu ou un refroidissement non contrôlé peuvent conduire à des défauts tels que les soufflures, les retassures, les inclusions de sable, les fissures ou une mauvaise qualité de surface [13], [16].

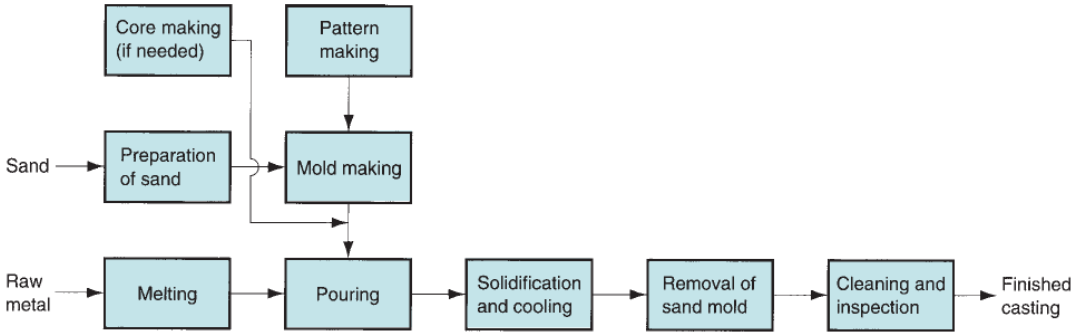


Figure III.5 : Séquence générale de production dans le moulage au sable. [14].

III.5.1 Préparation du modèle

La première étape consiste à préparer le modèle de la pièce à fabriquer. Le modèle représente la forme extérieure de la pièce finale, mais il doit aussi tenir compte de plusieurs paramètres technologiques, notamment le retrait du métal pendant le refroidissement, les surépaisseurs d'usinage et les dépouilles nécessaires pour faciliter son extraction du moule [14], [15].

Le modèle peut être réalisé en bois, en métal, en matière plastique ou en résine, selon la précision demandée, le nombre de pièces à produire et le coût de fabrication. Il doit être propre, rigide et correctement dimensionné, car toute erreur sur le modèle est reproduite dans l'empreinte, puis dans la pièce moulée [15].

III.5.2 Préparation du sable de moulage

La préparation du sable de moulage est une étape essentielle, car les propriétés du moule dépendent directement de la qualité du mélange sableux. Dans le cas du sable à vert, le mélange est généralement constitué de sable siliceux, de bentonite ou d'argile, d'eau et parfois d'adjuvants destinés à améliorer certaines propriétés du moule [16], [18].

Le mélange doit être homogène afin d'assurer une bonne cohésion, une perméabilité suffisante et une bonne aptitude au compactage. L'eau active la bentonite et permet la liaison entre les grains de sable. Une quantité d'eau insuffisante réduit la résistance du moule, tandis qu'un excès d'humidité peut provoquer un dégagement de vapeur et favoriser les défauts dus aux gaz lors de la coulée [16], [18].

III.5.3 Réalisation de l'empreinte

Après la préparation du modèle et du sable, le modèle est placé dans le châssis de moulage. Le sable est ensuite versé autour du modèle, puis compacté manuellement ou mécaniquement. Cette opération permet au sable d'épouser la forme du modèle et de former une empreinte correspondant à la géométrie de la pièce à fabriquer [17]. Une fois le sable compacté, le modèle est retiré avec précaution afin de ne pas abîmer les parois de l'empreinte. La qualité de cette empreinte dépend de la finesse du sable, du serrage, de la plasticité du mélange, de la cohésion du moule et de la conception du modèle [13], [17].

III.5.4 Mise en place du système de coulée

Le système de coulée regroupe les éléments qui permettent au métal liquide d'entrer dans le moule et de remplir correctement l'empreinte. Il comprend généralement le bassin de coulée, la descente, les canaux de distribution et les attaques. Son rôle est d'assurer un remplissage régulier et contrôlé, tout en limitant la turbulence, l'oxydation et l'entraînement de sable [13], [15].

Des masselottes peuvent également être prévues afin de compenser le retrait du métal pendant la solidification. Lorsque la pièce comporte des cavités internes ou des formes creuses, des noyaux sont placés dans le moule avant sa fermeture. Ces noyaux doivent être correctement positionnés pour éviter les défauts dimensionnels [13], [17].

III.5.5 Coulée du métal liquide

La coulée consiste à verser le métal fondu dans le moule à travers le système de coulée. Le métal doit être porté à une température suffisante pour conserver sa fluidité jusqu'au remplissage complet de l'empreinte. Une température trop faible peut entraîner un mauvais remplissage, tandis qu'une température trop élevée peut augmenter les réactions entre le métal et le sable [13], [14].

La coulée doit être régulière afin de limiter les turbulences, les inclusions d'air et l'érosion des parois du moule. La vitesse de coulée, la température du métal et la conception du système d'alimentation influencent directement la qualité de la pièce obtenue [13].

III.5.6 Refroidissement et solidification

Après la coulée, le métal commence à perdre sa chaleur et à se solidifier dans l'empreinte. Cette étape conditionne fortement la structure finale de la pièce et la présence éventuelle de défauts internes. Le temps de refroidissement dépend de la nature du métal, de l'épaisseur de la pièce, de la température de coulée et des propriétés thermiques du moule [13], [14]. Pendant la solidification, le métal subit un retrait volumique. Les masselottes ont donc pour rôle d'alimenter la pièce en métal liquide supplémentaire afin de limiter les retassures. Un refroidissement mal contrôlé peut provoquer des contraintes internes, des fissures ou des défauts de retrait [13], [15].

III.5.7 Démoulage

Le démoulage, appelé aussi décochage, consiste à extraire la pièce solidifiée du moule. Dans le moulage au sable, le moule est généralement détruit après la coulée, car il s'agit d'un moule non permanent. Cette opération peut être réalisée manuellement ou à l'aide de machines vibrantes qui séparent le sable de la pièce [14], [17]. Après le démoulage, la pièce reste souvent attachée aux éléments du système de coulée, notamment les canaux, les attaques et les masselottes. Elle peut aussi conserver du sable adhérent ou des oxydes en surface. Le sable récupéré peut être réutilisé après régénération, selon son état et le type de liant utilisé [16], [17].

III.5.8 Ébarbage, nettoyage et finition

La dernière étape comprend les opérations d'ébarbage, de nettoyage et de finition. L'ébarbage consiste à enlever les excès de métal provenant du système de coulée, des masselottes et des bavures. Cette opération peut être réalisée par sciage, tronçonnage, meulage ou par d'autres moyens mécaniques adaptés à la nature de la pièce [14], [17].

Le nettoyage permet d'éliminer le sable adhérent, les oxydes et les impuretés présents à la surface de la pièce. Il peut être effectué par sablage, grenaillage ou brossage. Selon les exigences fonctionnelles, la pièce peut ensuite subir des opérations complémentaires comme l'usinage, le contrôle dimensionnel, le contrôle visuel ou le traitement thermique [13], [14].

III.6 Les éléments d'un moule en sable

Un moule en sable est constitué de plusieurs éléments qui assurent la formation de l'empreinte, le maintien du sable, l'alimentation en métal liquide et l'évacuation des gaz pendant la coulée. Les éléments principaux sont le châssis de moulage, la chape, le dessous, le plan de joint, le système de coulée, les masselottes et les noyaux. Ces éléments doivent être correctement conçus afin d'obtenir une pièce saine, avec une bonne précision dimensionnelle et un minimum de défauts [13], [14], [17].

Dans un moule fermé, le métal liquide est introduit par le système de coulée, puis il remplit l'empreinte de la pièce. Le moule est généralement divisé en deux demi-moules, appelés chape et dessous, séparés par un plan de joint. Les figures de référence montrent également les éléments de base comme le bassin de coulée, la descente, le canal, la masselotte, le noyau et la cavité [14].

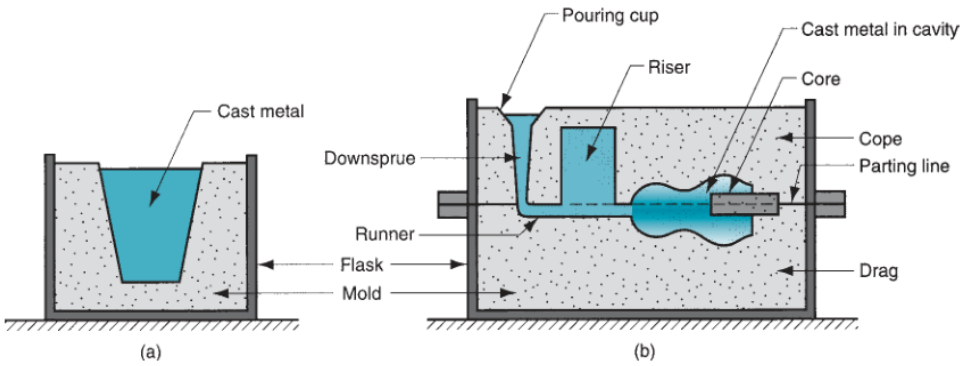


Figure III.6 : Principaux éléments d'un moule de coulée en sable. [14].

III.6.1 Le châssis de moulage

Le châssis de moulage est un cadre rigide, généralement métallique, utilisé pour contenir le sable pendant la préparation du moule. Il permet de maintenir la forme du moule pendant le compactage du sable, la manipulation, la fermeture et la coulée du métal liquide. Dans le moulage au sable, le châssis est souvent divisé en deux parties: un châssis inférieur et un châssis supérieur. Le châssis inférieur reçoit généralement la partie principale de l'empreinte, tandis que le châssis supérieur sert de couvercle et peut aussi contenir une partie de l'empreinte. Le bon assemblage des châssis est important pour éviter les décalages entre les deux parties du moule [17].

Le châssis doit être suffisamment résistant pour supporter la pression exercée par le sable compacté et par le métal liquide pendant la coulée. Il doit aussi permettre un bon positionnement des deux demi-moules afin d'assurer la continuité de l'empreinte et du système de coulée.

III.6.2 La chape et le dessous

La chape, appelée aussi partie supérieure du moule, correspond au demi-moule supérieur. Elle contient généralement une partie de l'empreinte, le bassin de coulée, la descente et parfois les évents ou les masselottes. Elle est placée au-dessus du dessous après la réalisation de l'empreinte et la mise en place des noyaux si nécessaire.

Le dessous, appelé aussi partie inférieure du moule, est le demi-moule inférieur. Il reçoit souvent la partie principale de l'empreinte de la pièce. C'est dans cette partie que le modèle est fréquemment placé au début de l'opération de moulage. Après compactage du sable et retrait du modèle, le dessous conserve la forme négative de la pièce.

La chape et le dessous doivent être parfaitement alignés. Un mauvais alignement peut provoquer un défaut de décalage sur la pièce moulée. Pour cette raison, les châssis sont souvent munis de dispositifs de centrage ou de guidage permettant de placer correctement les deux parties du moule [14], [17].

III.6.3 Le plan de joint

Le plan de joint est la surface de séparation entre les deux parties du moule, c'est-à-dire entre la chape et le dessous. Il permet l'ouverture du moule pour retirer le modèle, mettre en place les noyaux, puis refermer correctement le moule avant la coulée.

Le choix du plan de joint est une étape importante dans la conception du moule. Il doit faciliter l'extraction du modèle sans détériorer l'empreinte. Il doit aussi permettre une bonne alimentation de la pièce en métal liquide et limiter les défauts comme les bavures, les décalages ou les ruptures de sable.

Un mauvais choix du plan de joint peut compliquer le moulage, augmenter les opérations de finition et provoquer des défauts dimensionnels. Il est donc préférable de choisir un plan de joint simple, stable et adapté à la géométrie de la pièce à réaliser.

III.6.4 Le système de coulée

Le système de coulée est l'ensemble des conduits qui permettent d'acheminer le métal liquide depuis l'extérieur du moule jusqu'à l'empreinte. Il comprend généralement le bassin de coulée, la descente, les canaux de distribution et les attaques.

Le bassin de coulée reçoit le métal liquide au moment du versement. La descente conduit ensuite le métal vers les canaux. Les canaux distribuent le métal dans le moule, tandis que les attaques permettent son entrée dans l'empreinte de la pièce. Le rôle du système de coulée est d'assurer un remplissage complet, régulier et contrôlé de la cavité.

Un système de coulée mal conçu peut provoquer des turbulences, des inclusions d'air, des projections de sable, une oxydation du métal ou un mauvais remplissage. Il doit donc être étudié de manière à limiter la vitesse excessive du métal et à favoriser un écoulement stable [14], [15].

III.6.5 Les masselottes

Les masselottes sont des réserves de métal liquide placées dans certaines zones du moule. Leur rôle principal est de compenser le retrait volumique du métal pendant la solidification. Lorsque la pièce se solidifie, elle subit une contraction; la masselotte fournit alors du métal liquide supplémentaire afin d'éviter la formation de cavités de retrait.

Les masselottes sont généralement placées dans les zones massives de la pièce, car ces zones refroidissent plus lentement et sont plus sensibles aux retassures. Une masselotte efficace doit rester liquide plus longtemps que la zone qu'elle alimente. Elle doit donc être correctement dimensionnée et bien positionnée.

Dans un moule en sable, les masselottes constituent donc un élément important pour améliorer la santé interne de la pièce moulée. Elles servent de réserve de métal liquide destinée à alimenter la pièce pendant sa solidification [13], [14].

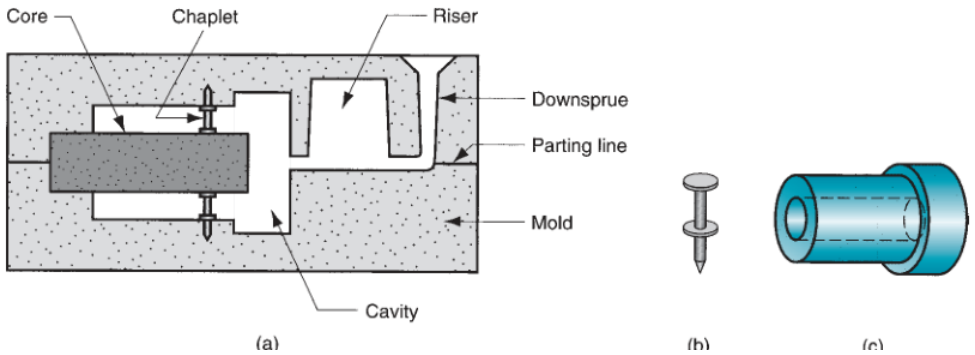


Figure III.7 : Exemple de noyau maintenu dans l'empreinte par des supports, avec masselotte et descente. [14].

III.6.6 Les noyaux

Les noyaux sont des éléments généralement fabriqués en sable lié, placés à l'intérieur du moule pour former des cavités internes, des trous ou des formes creuses dans la pièce. Ils sont indispensables lorsque la géométrie interne de la pièce ne peut pas être obtenue uniquement par l'empreinte extérieure.

Les noyaux doivent posséder une bonne résistance mécanique pour supporter la manipulation et la pression du métal liquide. Ils doivent aussi avoir une bonne perméabilité afin de permettre l'évacuation des gaz, ainsi qu'une bonne réfractarité pour résister à la température élevée du métal. Après la solidification, ils doivent pouvoir être détruits ou retirés facilement [14].

Le moulage avec noyaux permet de fabriquer des pièces complexes comme les corps de pompe, les carters, les blocs moteurs, les collecteurs et les pièces comportant des conduits internes. Cependant, un mauvais positionnement du noyau peut provoquer des défauts dimensionnels, tandis qu'un mauvais dégazage peut entraîner des soufflures ou des inclusions gazeuses [17].

III.7 Les propriétés du sable de moulage

Les propriétés du sable de moulage jouent un rôle essentiel dans la qualité du moule et de la pièce obtenue après coulée. Un bon sable de moulage doit résister à la température élevée du métal liquide, conserver correctement l'empreinte du modèle, permettre l'évacuation des gaz et supporter les efforts mécaniques pendant la coulée et la solidification. Les principales propriétés recherchées

sont la réfractarité, la perméabilité, la cohésion, la plasticité, la résistance à la compression et la résistance au cisaillement [13], [14], [17].

Ces propriétés ne sont pas indépendantes. Par exemple, l'augmentation de l'humidité peut améliorer la plasticité et la cohésion jusqu'à une certaine limite, mais elle peut aussi réduire la perméabilité et favoriser les défauts dus aux gaz. De même, une teneur élevée en bentonite augmente généralement la résistance du moule, mais peut diminuer la circulation des gaz si le mélange est trop serré [16], [18].

III.7.1 La réfractarité

La réfractarité, appelée aussi infusibilité, est la capacité du sable à résister aux températures élevées sans fondre ni se dégrader au contact du métal liquide. Cette propriété est indispensable, car le moule est directement exposé à une forte chaleur pendant la coulée.

Un sable ayant une bonne réfractarité permet d'éviter la fusion superficielle des grains, la déformation du moule et les réactions indésirables entre le métal et le sable. La réfractarité dépend principalement de la nature du sable utilisé, de sa composition chimique et de sa teneur en impuretés. Les sables siliceux sont largement utilisés, mais ils peuvent présenter des phénomènes de dilatation sous l'effet de la température [16], [17].

III.7.2 La perméabilité

La perméabilité est l'aptitude du sable à laisser passer les gaz et les vapeurs formés pendant la coulée. Lorsqu'un métal liquide est versé dans le moule, la chaleur provoque l'évaporation de l'eau et la formation de gaz. Si ces gaz ne peuvent pas s'échapper, ils peuvent créer des défauts dans la pièce, comme les soufflures, les piqûres ou les porosités.

La perméabilité dépend de plusieurs facteurs, notamment la granulométrie du sable, la forme des grains, le taux d'humidité, la teneur en bentonite et le degré de serrage. Les essais expérimentaux montrent que l'humidité et la bentonite influencent fortement la perméabilité du sable de moulage à vert [16], [18].

Figure III.8 : Appareil de mesure de la perméabilité du sable de moulage. [17].

III.7.3 La cohésion

La cohésion est la capacité du sable à conserver sa forme après le compactage et après le retrait du modèle. Elle permet au moule de garder l'empreinte de la pièce sans s'effondrer ni se fissurer.

Cette propriété est obtenue grâce au liant, généralement l'argile ou la bentonite dans le cas du sable à vert. Lorsque la bentonite est activée par l'eau, elle forme une pâte argileuse qui relie les grains de sable entre eux. Une bonne cohésion est donc nécessaire pour résister aux manipulations du moule, à la fermeture des châssis et à la pression du métal liquide pendant la coulée [16], [17].

III.7.4 La plasticité

La plasticité, appelée aussi flowability, représente l'aptitude du sable à se déformer et à épouser correctement la forme du modèle sous l'effet du serrage. Un sable plastique remplit bien les détails du modèle et permet d'obtenir une empreinte précise.

Cette propriété dépend de la teneur en eau, de la nature du liant, du malaxage et de la granulométrie du sable. Une faible plasticité peut provoquer une mauvaise reproduction de la forme de la pièce, tandis qu'une plasticité excessive peut réduire la perméabilité et favoriser les défauts liés aux gaz [16], [18].

III.7.5 La résistance à la compression

La résistance à la compression est la capacité du sable compacté à résister à une charge verticale sans s'écraser ni se déformer. Elle est importante pour que le moule supporte la pression du métal liquide et les efforts appliqués pendant la coulée.

Cette résistance dépend principalement du taux de bentonite, du taux d'humidité, du compactage et du temps de malaxage. Une résistance trop faible peut entraîner l'effondrement de certaines parties du moule, alors qu'une résistance trop élevée peut rendre le démoulage plus difficile. Les études expérimentales sur les sables à vert montrent que l'eau et la bentonite ont une influence directe sur la résistance à la compression [17], [18].

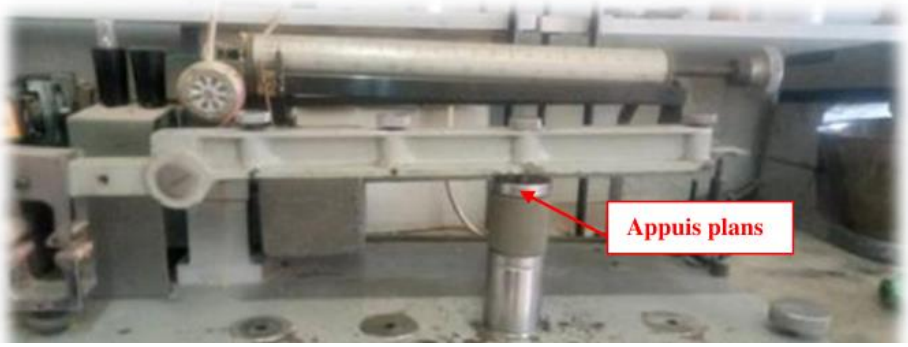


Figure III.9 : Appareil universel utilisé pour l'essai de compression du sable de moulage. [17].

III.7.6 La résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement est la capacité du sable à résister aux efforts parallèles qui tendent à faire glisser une couche de sable par rapport à une autre. Elle est importante pour maintenir la stabilité des parois du moule, surtout pendant la manipulation, la fermeture du moule et la coulée.

Comme la résistance à la compression, la résistance au cisaillement dépend de la qualité du mélange, du taux d'humidité, de la teneur en bentonite et du degré de compactage. Une résistance insuffisante peut provoquer des ruptures locales du moule, des déformations de l'empreinte ou des inclusions de sable dans la pièce moulée [17], [18].

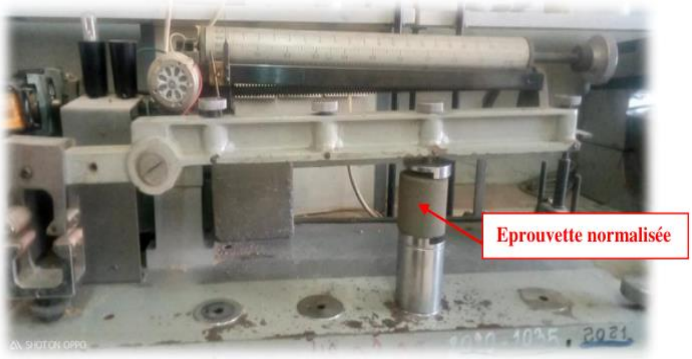


Figure III.10 : Appareil utilisé pour mesurer la résistance au cisaillement du sable de moulage. [17].

III.8 Avantages et limites du moulage au sable

Le moulage au sable présente plusieurs avantages qui expliquent son utilisation importante dans l'industrie de la fonderie. Cependant, comme tout procédé de fabrication, il possède aussi certaines limites liées principalement à la précision dimensionnelle, à l'état de surface, au contrôle du sable et aux opérations de finition [14], [15].

L'intérêt de ce procédé dépend donc de l'équilibre entre le coût de fabrication, la complexité de la pièce, les exigences de qualité et la cadence de production. Il est particulièrement adapté lorsque l'on recherche une solution économique, flexible et utilisable pour une grande variété de métaux et de dimensions [13], [14].

III.8.1 Avantages

Le premier avantage du moulage au sable est sa grande polyvalence. Ce procédé permet de fabriquer une large variété de pièces métalliques, depuis les petites pièces jusqu'aux pièces de grandes dimensions. Il peut être utilisé avec presque tous les métaux coulables, qu'ils soient ferreux ou non ferreux. Kalpakjian et Schmid indiquent que le moulage au sable permet de couler presque tous les métaux, sans limitation importante de taille, de forme ou de masse de la pièce [15]. Un autre avantage important est le faible coût de l'outillage. Contrairement aux procédés qui utilisent des moules métalliques permanents, le moulage au sable utilise des moules non permanents fabriqués à partir de matériaux relativement simples et disponibles. Cela rend ce procédé intéressant pour les prototypes, les petites séries et les pièces de grandes dimensions [14], [15]. Le moulage au sable permet également d'obtenir des formes complexes, y compris des

formes internes lorsqu'on utilise des noyaux. Il est donc adapté à la fabrication de pièces comme les carters, les corps de pompe, les blocs moteurs, les conduits, les bâtis de machines et les pièces mécaniques creuses. Groover souligne que la fonderie permet de produire des géométries complexes, externes et internes, et qu'elle peut être utilisée pour fabriquer des pièces très grandes [14]. Enfin, ce procédé permet souvent la réutilisation du sable après démoulage, surtout dans le cas des sables à vert, après régénération ou correction de la composition. Les documents locaux sur les sables de moulage indiquent qu'une grande partie des sables de fonderie peut être réutilisée sur place après l'opération de démoulage, tandis que les sables non réutilisables doivent être éliminés ou traités [18].

III.8.2 Inconvénients

Malgré ses avantages, le moulage au sable présente certaines limites. La première est la qualité de surface relativement moyenne. En effet, comme l'empreinte est réalisée dans un matériau granulaire, la surface de la pièce obtenue est généralement plus rugueuse que celle obtenue par moulage en coquille, moulage sous pression ou moulage de précision. Kalpakjian et Schmid mentionnent que le moulage au sable nécessite souvent des opérations de finition et donne un état de surface relativement grossier avec des tolérances assez larges [15].

La deuxième limite concerne la précision dimensionnelle. Le moule en sable peut subir de légères déformations pendant le serrage, la manipulation, la coulée ou la solidification. De plus, le retrait du métal et le plan de joint peuvent provoquer des variations dimensionnelles. C'est pourquoi des opérations d'usinage sont souvent nécessaires pour obtenir les dimensions finales de la pièce [14], [15]. Le moulage au sable est aussi sensible aux défauts liés aux gaz. Si la perméabilité du sable est insuffisante, les gaz et vapeurs produits pendant la coulée ne s'évacuent pas correctement, ce qui peut provoquer des soufflures, des piqûres ou des porosités dans la pièce. Les études sur le sable de moulage à vert montrent que l'humidité, la bentonite et la perméabilité influencent fortement la qualité du moule et le risque de défauts gazeux [16].

Enfin, ce procédé demande plusieurs opérations après coulée, comme le décochage, le nettoyage, l'ébarbage, l'enlèvement des masselottes et parfois l'usinage. Ces opérations augmentent le temps de fabrication et peuvent générer des coûts supplémentaires. De plus, le

contrôle du sable, de l'humidité, du compactage et des additifs est indispensable pour éviter les défauts de moulage [16], [18].

Tableau III.3 : Avantages et limites du moulage au sable

Avantages	Limites
Procédé simple et économique.	État de surface relativement rugueux.
Faible coût de l'outillage.	Tolérances dimensionnelles assez larges.
Adapté aux petites et grandes pièces.	Nécessite souvent des opérations de finition.
Compatible avec de nombreux métaux.	Risque de défauts gazeux si la perméabilité est faible.
Permet des formes complexes avec noyaux.	Moule détruit après chaque coulée.
Possibilité de réutiliser une partie du sable.	Nécessite un bon contrôle de l'humidité et du compactage.

III.9 Défauts liés au moulage au sable

Le moulage au sable peut produire plusieurs défauts lorsque les paramètres du procédé ne sont pas bien maîtrisés. Ces défauts peuvent être liés au sable de moulage, à la perméabilité du moule, au retrait du métal, à la température de coulée, au système d'alimentation ou encore à une mauvaise mise en position des différentes parties du moule. Les défauts de fonderie sont fortement influencés par les caractéristiques du sable, notamment la granulométrie, la perméabilité, la résistance, la cohésion, l'humidité et la plasticité [17].

Dans le cas du moulage au sable, les défauts les plus fréquents peuvent être classés en quatre catégories principales: les défauts dus aux gaz, les défauts de retrait, les défauts de remplissage et les défauts directement liés au sable. Le contrôle de ces défauts nécessite une bonne préparation du sable, une conception correcte du système de coulée et une maîtrise des conditions de solidification [13], [16], [17].

III.9.1 Défauts dus aux gaz

Les défauts dus aux gaz apparaissent lorsque les gaz ou les vapeurs formés pendant la coulée ne peuvent pas s'échapper correctement du moule. Lors du contact entre le métal liquide et le sable humide, l'eau présente dans le moule peut se transformer en vapeur. Si la perméabilité du sable est insuffisante, ces gaz restent emprisonnés dans le métal en solidification.

Ces défauts se manifestent généralement sous forme de porosités, de piqûres ou de soufflures. Les soufflures peuvent apparaître à la surface de la pièce sous forme de trous ou de petits cratères. Elles peuvent aussi être internes, ce qui les rend plus difficiles à détecter visuellement. Les sources consultées indiquent que ces défauts sont souvent liés à une faible perméabilité du sable ou à un excès d'humidité dans le moule [16], [17].

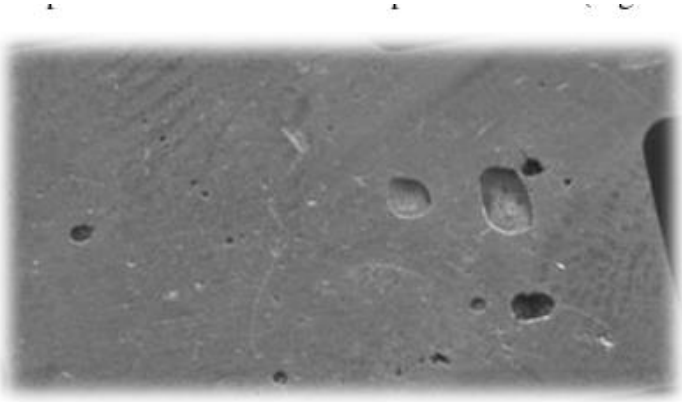


Figure III.11 : Défauts dus aux gaz dans une pièce moulée. . [17].

Pour limiter ces défauts, il est nécessaire de contrôler l'humidité du sable, d'assurer une bonne perméabilité, de prévoir des évents efficaces et d'éviter un compactage excessif du moule.

III.9.2 Défauts de retrait

Les défauts de retrait sont liés à la contraction du métal pendant son refroidissement et sa solidification. Lorsque le métal liquide se transforme en métal solide, son volume diminue. Si cette contraction n'est pas compensée par une alimentation suffisante en métal liquide, des cavités peuvent apparaître dans la pièce.

Ces défauts se présentent sous forme de retassures ou de cavités ouvertes ou fermées, souvent localisées dans les dernières zones solidifiées. Les zones massives de la pièce sont particulièrement sensibles à ce phénomène, car elles refroidissent plus lentement que les zones minces. Pour réduire ce type de défaut, on utilise des masselottes correctement dimensionnées et bien positionnées afin de fournir du métal liquide supplémentaire pendant la solidification [13], [17].

III.9.3 Défauts de remplissage

Les défauts de remplissage apparaissent lorsque le métal liquide ne remplit pas complètement l'empreinte du moule. Dans ce cas, la pièce obtenue présente une zone incomplète ou un manque de matière. Ce défaut peut être provoqué par une température de coulée trop basse, une fluidité insuffisante du métal, une mauvaise conception du système de coulée ou des sections trop minces dans la pièce. Pour éviter ce problème, il faut assurer une température de coulée suffisante, améliorer la fluidité du métal, adapter la vitesse de coulée et concevoir correctement les canaux d'alimentation. Il est aussi important d'éviter les sections trop faibles qui peuvent provoquer une solidification prématurée [17].

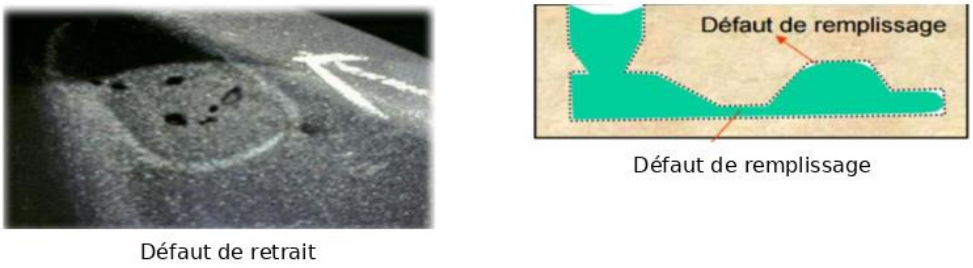


Figure III.12 : Défaut de retrait et défaut de remplissage. [17].

III.9.4 Défauts liés au sable

Les défauts liés au sable proviennent directement des propriétés du sable de moulage ou de sa mauvaise préparation. Ils peuvent être causés par une faible résistance du sable, une granulométrie mal choisie, une perméabilité inadaptée, une mauvaise cohésion ou un serrage insuffisant. Parmi ces défauts, on trouve les trous de sable, qui apparaissent lorsque des particules de sable se détachent du moule et se mélangent au métal liquide. Ces particules peuvent créer des cavités ou des inclusions dans la pièce moulée. On trouve aussi la combustion du sable, provoquée par l'interaction entre les oxydes métalliques et les impuretés du sable de silice, ainsi que la pénétration du métal, qui se manifeste par une surface rugueuse lorsque le métal liquide s'infiltre entre les grains de sable [17].

Figure III.13 : Exemples de défauts liés au sable. [17].

Ces défauts peuvent être limités par un meilleur choix de la granulométrie, une bonne préparation du sable, un dosage correct du liant et de l'eau, ainsi qu'un compactage adapté. Le choix du sable doit permettre de trouver un équilibre entre perméabilité, cohésion et résistance mécanique [16], [17].

III.10 Applications industrielles du moulage au sable

Le moulage au sable est largement utilisé dans l'industrie parce qu'il permet de fabriquer des pièces métalliques de formes simples ou complexes, avec des dimensions très variables. Ce procédé convient aux métaux ferreux, comme la fonte et l'acier, ainsi qu'aux métaux non ferreux, comme l'aluminium, le bronze, le laiton et certains alliages de magnésium. Il est particulièrement adapté aux pièces massives, aux pièces mécaniques creuses et aux composants nécessitant l'utilisation de noyaux [14], [15].Dans le domaine de la construction mécanique, le moulage au sable est utilisé pour produire des bâtis de machines, des carters, des supports, des poulies, des roues, des boîtiers et des pièces de structure. Groover indique que le moulage au sable est un procédé très polyvalent, capable de produire des pièces de dimensions allant de petites pièces jusqu'à de très grandes pièces, avec des quantités de production pouvant varier de l'unité à des séries importantes [14].

Figure III.14 : Exemple de grande pièce industrielle obtenue par moulage au sable, [14].

Dans l'industrie automobile, ce procédé est employé pour fabriquer des blocs moteurs, des culasses, des collecteurs, des volants moteurs, des tambours de frein, des carters de transmission et des boîtiers mécaniques. L'ASM Handbook présente des exemples d'applications des fontes moulées dans les secteurs de l'automobile, des machines, des équipements de pression et des pièces de transmission [13].

Le moulage au sable est aussi très utilisé dans le domaine des pompes et des équipements hydrauliques. Il permet de fabriquer des corps de pompe, des volutes, des roues, des brides, des vannes et des corps de valves. Ces pièces possèdent souvent des formes internes complexes qui nécessitent l'emploi de noyaux. L'ASM Handbook cite notamment les corps de pompe, les roues de pompe, les vannes et les équipements liés au pompage parmi les applications des fontes moulées [13]. Dans le domaine aéronautique, certains alliages légers moulés au sable sont utilisés pour produire des composants lorsque le gain de masse est important. L'ASM Handbook précise que les moulages au sable en alliages de magnésium sont utilisés dans des composants aéronautiques en raison de leur légèreté par rapport à d'autres matériaux [13].

Tableau III.4 : Extrait présentant des applications typiques des pièces moulées en fonte grise. [13].

Specification	Grade or class	Typical applications
ASTM A 48	20, 25	Small or thin-sectioned castings requiring good appearance, good machinability, and close dimensional tolerances
ASTM A 48	30, 35	General machinery, municipal and waterworks, light compressors, automotive applications
ASTM A 48	40, 45	Machine tools, medium-duty gear blanks, heavy compressors, heavy motor blocks
ASTM A 48	50, 55, 60	Dies, crankshafts, high-pressure cylinders, heavy-duty machine tool parts, large gears, press frames
ASTM A 159, SAE J431	G1800	Miscellaneous soft iron castings where strength is the primary consideration; exhaust manifolds
ASTM A 159, SAE J431	G2500	Small cylinder blocks and heads, air-cooled cylinders, pistons, clutch plates, oil pump bodies, transmission cases, gear boxes, light-duty brake drums

Le moulage au sable trouve également des applications dans les secteurs de l'énergie, de l'agriculture, des travaux publics et des équipements industriels. Il permet de produire des pièces comme les roues, les supports, les bâtis, les pièces de machines agricoles, les conduites, les raccords, les pièces de fours et les composants soumis à des efforts mécaniques ou thermiques. Dans les fonderies, le sable est utilisé pour confectionner les moules et les noyaux dans lesquels sont coulés les métaux en fusion [18].

III.11 Conclusion

Le moulage au sable est l'un des procédés de fonderie les plus utilisés dans l'industrie grâce à sa simplicité, son faible coût et sa capacité à produire des pièces métalliques de formes et de dimensions très variées. Ce procédé repose sur la réalisation d'une empreinte dans un moule en sable, dans laquelle le métal liquide est coulé puis solidifié afin d'obtenir la pièce souhaitée [13], [14], [15]. L'étude de ce procédé montre que la qualité de la pièce obtenue dépend fortement de plusieurs facteurs, notamment la nature du sable utilisé, la granulométrie, la teneur en argile ou en

bentonite, l'humidité, la perméabilité, la cohésion et la résistance mécanique du moule. Un bon équilibre entre ces propriétés permet d'assurer une bonne reproduction de l'empreinte, une évacuation correcte des gaz et une meilleure stabilité du moule pendant la coulée [16], [17], [18].

Les différents types de moulage au sable, tels que le moulage au sable vert, le moulage au sable sec, le moulage à prise chimique et le moulage avec noyaux, permettent de répondre à des besoins industriels variés. Le choix du procédé dépend de la forme de la pièce, du matériau coulé, de la précision recherchée, du coût de fabrication et des conditions de production [13], [15], [17].

Cependant, le moulage au sable présente aussi certaines limites, notamment un état de surface relativement rugueux, une précision dimensionnelle parfois limitée et la possibilité d'apparition de défauts tels que les soufflures, les retassures, les défauts de remplissage ou les inclusions de sable. Ces défauts peuvent être réduits par un bon contrôle du sable, du système de coulée, de la température du métal et des conditions de refroidissement [14], [16], [17].

En conclusion, le moulage au sable reste un procédé fondamental dans la fabrication des pièces métalliques. Malgré ses limites, il demeure très utilisé dans les domaines de la construction mécanique, de l'automobile, des pompes, des équipements hydrauliques et des machines industrielles. Sa maîtrise nécessite une bonne connaissance des matériaux de moulage, des étapes du procédé et des paramètres influençant la qualité finale des pièces obtenues [13], [14], [15],

CHAPITRE IV :
Techniques expérimentales

Introduction

Ce chapitre présente les méthodes ainsi que les conditions expérimentales adoptées pour la conception des angles des aubes et le choix des matériaux appropriés à leur fabrication. Dans cette étude, le matériau PLA a été retenu en raison de son adéquation avec les exigences expérimentales et de sa facilité de mise en œuvre dans le procédé de fabrication additive.

Par la suite, les différentes techniques issues de la turbomachinerie utilisées pour la conception des aubes sont abordées. Deux méthodes reconnues ont été étudiées :

- la méthode du double arc, considérée comme l'une des méthodes les plus répandues. Toutefois, elle n'a pas été retenue dans ce travail en raison du manque de précision qu'elle présente par rapport aux exigences de l'étude ;
- la méthode des transformations conformes, qui constitue également l'une des meilleures approches pour la conception des roues à six aubes, configuration correspondant à la géométrie utilisée dans cette étude.

Les différentes étapes de conception et de fabrication sont ensuite présentées :

- la modélisation des échantillons à l'aide du logiciel SolidWorks ;
- la conversion du modèle numérique au format STL, suivie de son transfert vers le logiciel Ultimaker Cura dédié à l'impression 3D ;
- enfin, les échantillons fabriqués ont été intégrés au banc expérimental afin de comparer les performances hydrauliques des roues à l'aide d'une pompe de type Météja 32.

IV.1. Les matériaux utilisés

L'imprimante Anycubic i3 Mage:

L’Anycubic i3 Mega est une imprimante 3D largement utilisée dans le domaine de la fabrication additive. Développée par la société chinoise Anycubic, elle se distingue par sa bonne qualité d’impression, sa simplicité d’utilisation ainsi que son coût accessible. Cette imprimante fonctionne selon la technologie FDM (Fused Deposition Modeling), qui consiste à fabriquer des objets tridimensionnels par dépôt successif de couches de filament thermoplastique fondu. Elle possède également un volume d’impression relativement important et un écran tactile facilitant son utilisation, ce qui la rend adaptée aussi bien aux débutants qu’aux utilisateurs expérimentés.

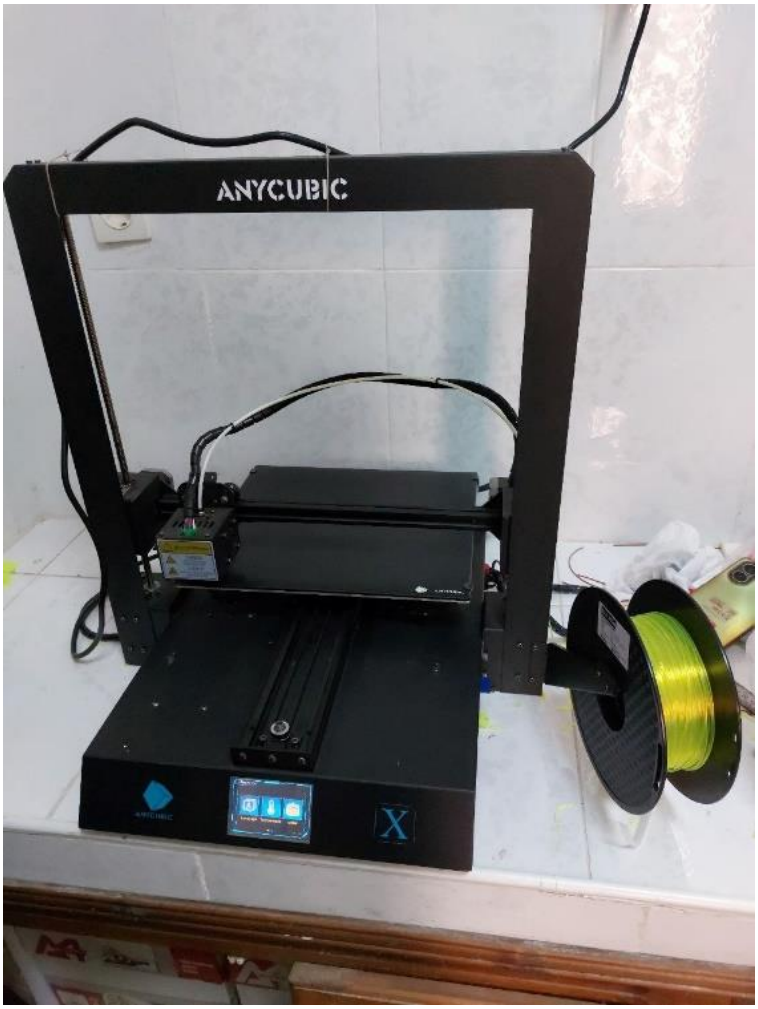


Figure IV.1: Imprimante Anycubic

Filament d’impression en PLA

Par la suite, le choix du matériau d'impression s'est porté sur le PLA. Ce matériau représente une solution particulièrement adaptée à notre étude grâce à ses propriétés mécaniques satisfaisantes, lui permettant de résister à la pression de l'eau à l'intérieur de la pompe. De plus, les filaments PLA se distinguent par une bonne précision d'impression, garantissant une meilleure qualité géométrique des échantillons fabriqués.

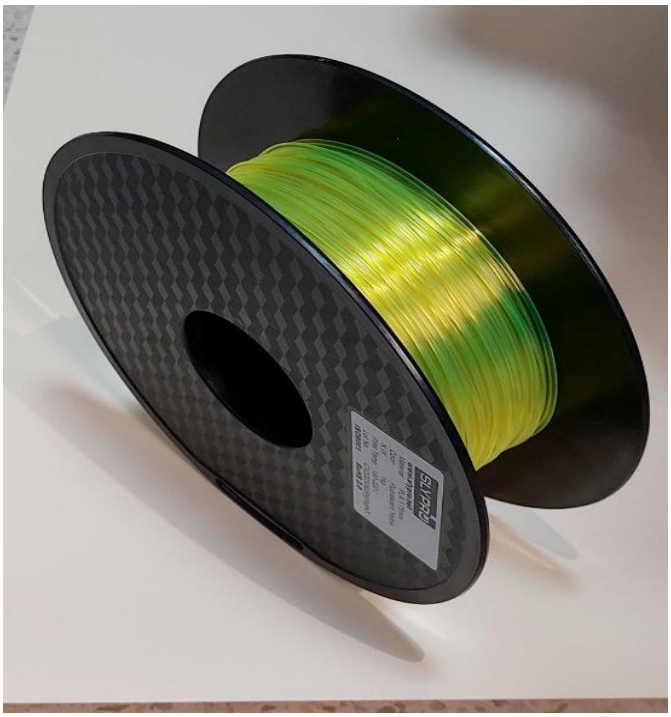


Figure IV.2: Filament d'impression en PLA

Avantages des filaments PLA ;

Le filament PLA Polylactic Acid (PLA) est particulièrement adapté à la fabrication des échantillons expérimentaux en raison de :

- sa facilité d'impression et sa faible déformation,
- sa bonne précision dimensionnelle et la qualité de surface obtenue,
- son faible coût,
- sa rigidité mécanique suffisante pour les essais préliminaires,
- sa bonne aptitude aux opérations de finition (ponçage, peinture, collage),
- son caractère écologique, issu de منابع renouvelables d'origine végétale.[]

pompe centrifuge

Nous avons mis à disposition un moteur ainsi qu'une pompe centrifuge à roue semi-ouverte comportant des aubes unidimensionnelles, considérées comme un choix approprié pour l'expérimentation, comme illustré aux figures (3) et (4) et(5)..

Figure IV.3:moteur d'entraînement

Figure IV.4: Volute de la pompe centrifuge

Figure IV.5: Roue semi-ouverte unidimensionnelle

La conception des modèles a été réalisée à l'aide du logiciel SolidWorks.

Le logiciel SolidWorks est un programme de conception assistée par ordinateur développé par Dassault Systèmes. Il repose sur le principe de la conception paramétrique et permet de créer trois types de fichiers associés : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ainsi, toute modification apportée à l'un de ces trois fichiers est automatiquement répercutée sur les deux autres.

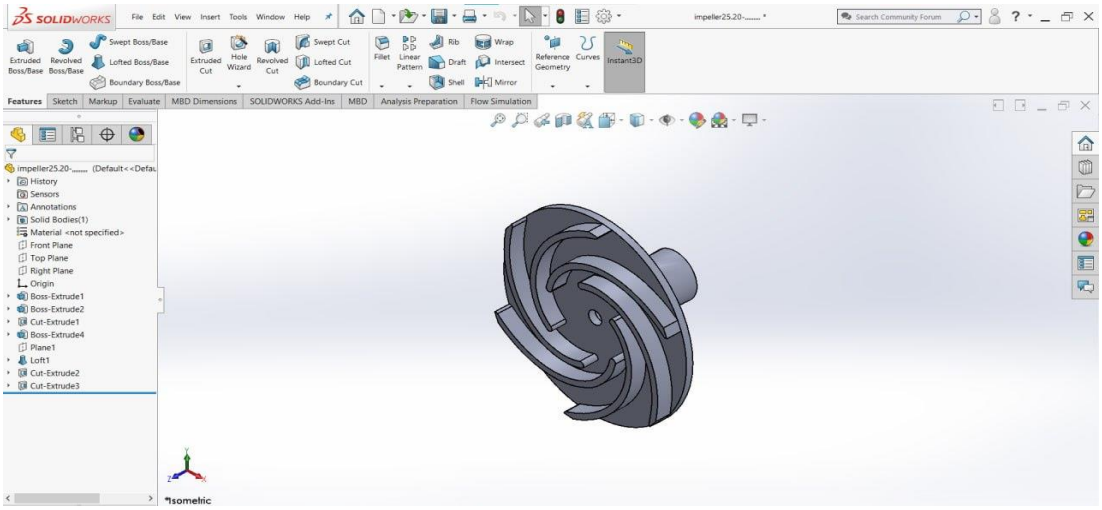


Figure IV.6: Interface du logiciel SolidWorks.

SolidWorks permet de réaliser de la modélisation 2D et 3D, ce logiciel de CAO est réputé pour sa simplicité d'utilisation et se veut intuitif.

Les principales taches de SolidWorks:

- Concevoir des objets en 3D de manière très précise.
- Développer des produits
- Vérifier la conception de votre fichier
- Détenir une bibliothèque de vos fichiers 3D
- Mettre en place des mises en plan 2D
- Créer des images et animations de vos objets 3D
- Estimer le coût de la fabrication de vos objets 3D

IV.1.1. Logiciel Ultimaker Cura :

Le logiciel Ultimaker Cura est un programme open source de préparation et de découpage des modèles tridimensionnels, spécialement conçu pour les imprimantes 3D. Il permet de convertir les modèles 3D en fichiers G-code, contenant les instructions nécessaires à l'imprimante 3D pour fabriquer l'objet couche par couche.

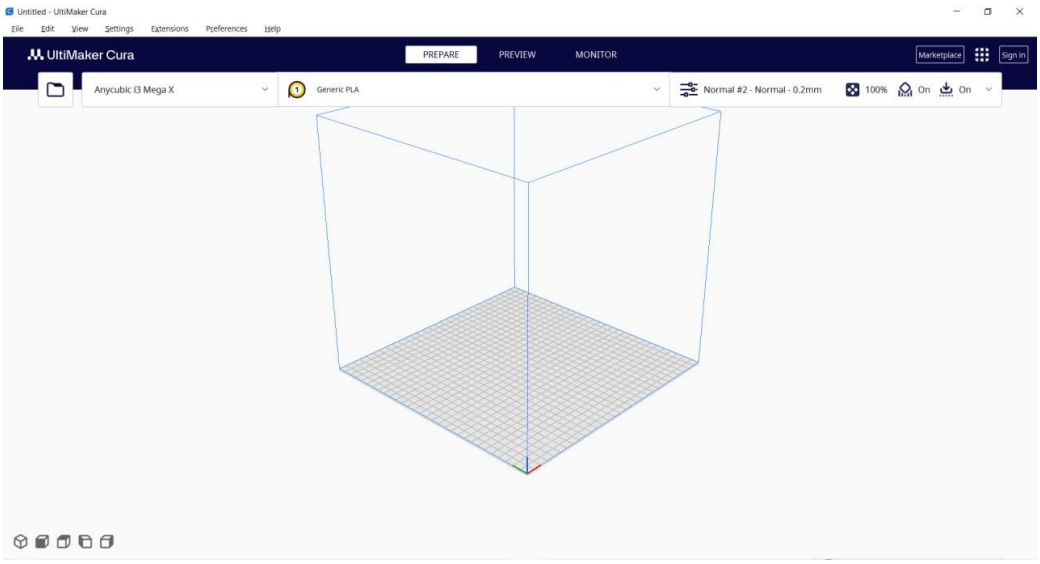


Figure IV.7 : Interface du logiciel CURA

Les principales taches de CURA:

Importation de modèles 3D :

Le logiciel **Cura** permet d'importer des modèles 3D dans différents formats de fichiers, notamment les formats les plus courants tels que **STL, OBJ et AMF**. Cette compatibilité offre une grande flexibilité aux utilisateurs, leur permettant d'utiliser divers logiciels de modélisation 3D, puis d'exporter facilement leurs modèles vers Cura afin de préparer et réaliser l'impression 3D.

Configuration des paramètres d'impression :

Le logiciel Cura permet de régler une grande variété de paramètres d'impression adaptés à nos besoins spécifiques, comme illustré à la figure ().

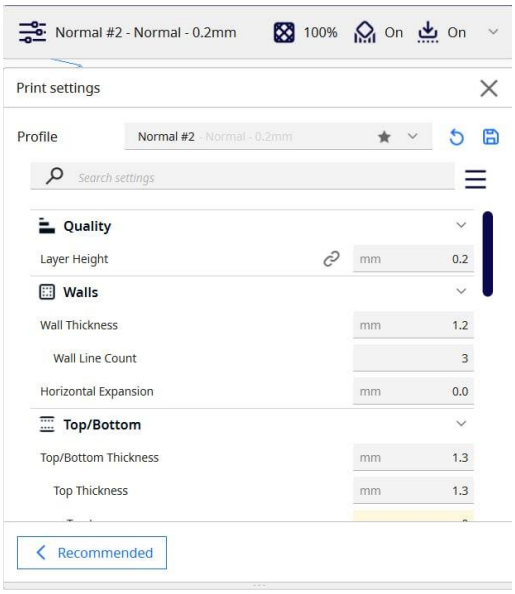


Figure IV.8: Paramètre d'impression

Étapes pour préparer les échantillons pour l'impression:

Ce logiciel se distingue également, lors du processus d'impression, par des réglages simples et faciles à utiliser, qui se résument aux étapes suivantes :

Etape 1:

Après le lancement du logiciel Cura, le fichier STL est importé afin de préparer le processus d'impression.

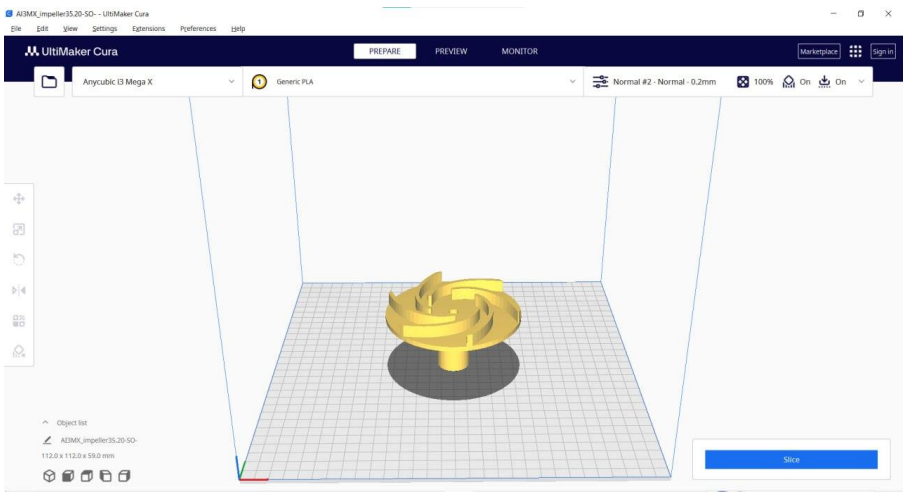


Figure IV.9: Échantillon de test importé

Etape 2:

Comme mentionné précédemment, cette étape consiste à modifier les paramètres de l'imprimante en fonction de nos besoins à l'aide de cette liste d'options.

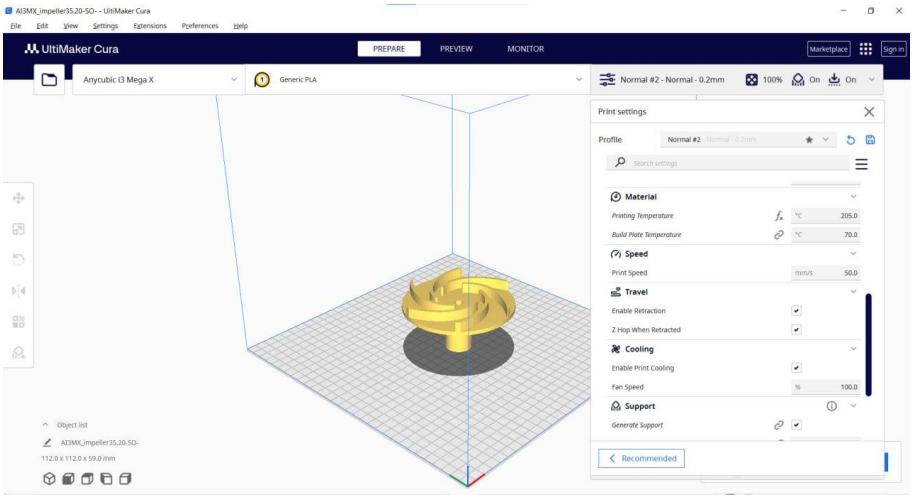
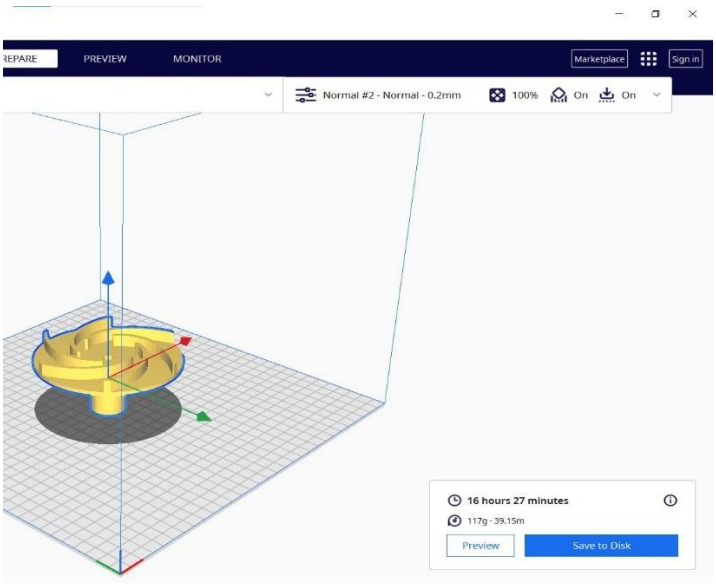


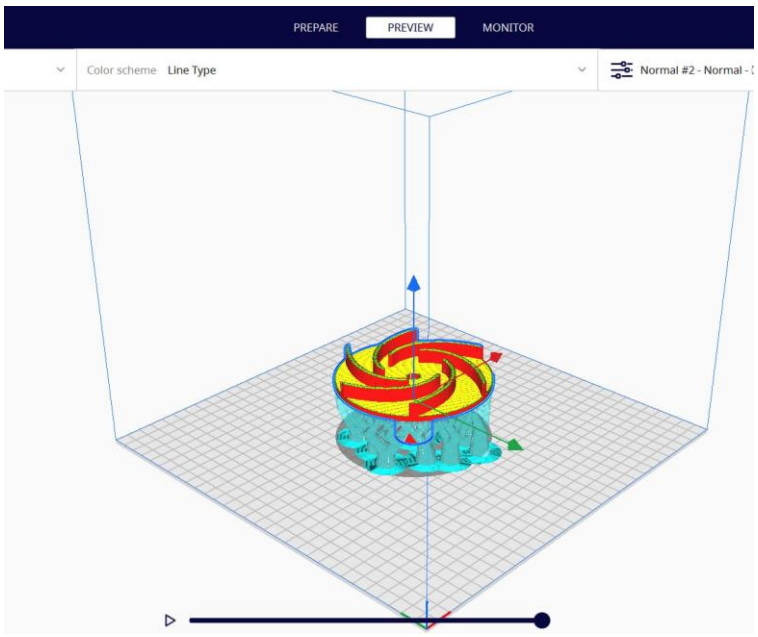
Figure IV.10: Modification des paramètres de l'imprimante

Etape3:

Nous appuyons sur l'option « Slice » afin de vérifier les paramètres d'impression et d'obtenir une simulation complète de la pièce.



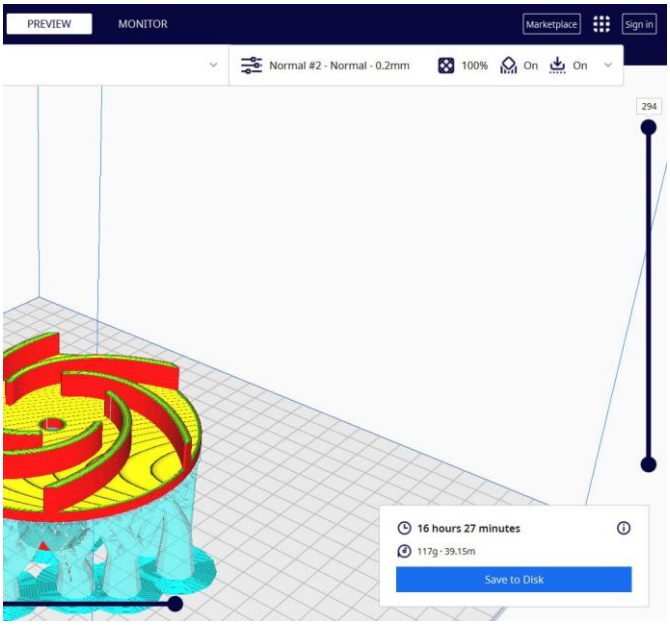
FigureIV.11 : Appui sur l'option de prévisualisation de la pièce



FigureIV.12 : Simulation et prévisualisation des couches d'impression

Etape 4:

Dans la dernière étape, le fichier G-code est enregistré sur la carte mémoire, puis transféré vers l'imprimante.



FigureIV.13 : On clique sur le bouton enregistre.

IV.2. Conception des aubes par la méthode du double arc.

La méthode du double arc est considérée comme l'une des méthodes les plus simples pour la conception des aubes. Elle repose essentiellement sur deux arcs de cercles se rejoignant au point F, comme illustré dans la figure (14).

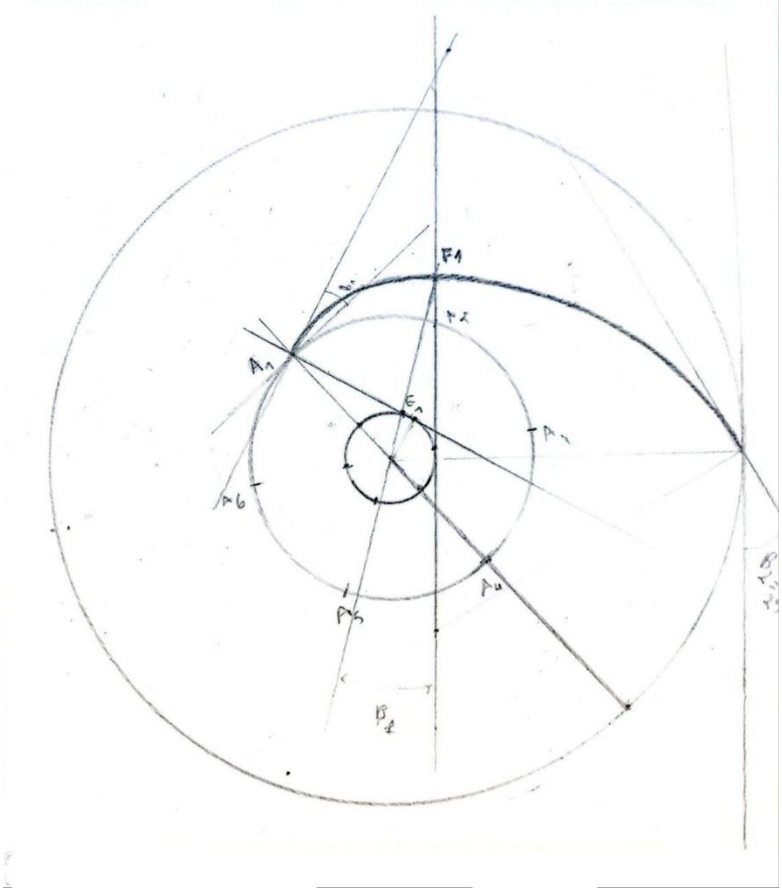


Figure IV .14 : Tracé industriel par la méthode du double arc.

Cependant, cette méthode ne répond pas aux exigences de précision imposées par notre étude c'est pourquoi elle n'a pas été retenue pour la conception des aubes dans ce travail.

IV.3. La méthode de conception par transformations conformes.

La méthode des transformations semblables est une méthode géométrique utilisée pour le tracé des aubes des pompes centrifuges. Elle consiste à générer la forme de l'aube à partir d'une courbe de référence tout en conservant la similitude géométrique entre les différentes sections à l'aide de transformations géométriques telles que la rotation et l'homothétie. Le développement de cette méthode est associé aux travaux de Aurel Stodola dans le domaine de la conception des machines turbomachines.

Données de conception

Les dimensions choisies correspondent à un modèle expérimental destiné à être imprimé en 3D. Elles ne constituent pas, à elles seules, un dimensionnement hydraulique complet. Elles permettent cependant d'étudier l'influence géométrique des angles des aubes.

Tableau IV.1 : Données géométriques de conception de la roue étudiée

Symbole	Désignation	Valeur retenue
D1	Diamètre intérieur de la roue	45 mm
r1	Rayon intérieur	22,5 mm
D2	Diamètre extérieur	112 mm
r2	Rayon extérieur	56 mm
z	Nombre d'aubes	6
β1	Angle d'entrée	variable selon la pièce
β2	Angle de sortie	variable selon la pièce

Dans l'exemple détaillé présenté plus loin, l'angle d'entrée est choisi égal à 20° et l'angle de sortie à 30°. La même procédure reste valable pour toutes les autres combinaisons d'angles étudiées dans le mémoire.

3. Principe du tracé de Pfleiderer

Le tracé ponctuel de Pfleiderer permet de construire progressivement le profil moyen d'une aube en considérant que l'angle β peut varier le long du rayon. Dans les coordonnées polaires, chaque point du profil est défini par un rayon r et un angle θ. La relation différentielle utilisée pour le tracé est :

$$d\theta = - dr / (r \tan \beta)$$

où r représente le rayon du point considéré, θ l'angle polaire et β l'angle de l'aube mesuré par rapport à la tangente au cercle. Cette précision est essentielle : l'angle de l'aube n'est pas mesuré par rapport au rayon, mais par rapport à la direction tangentielle.

Pour un calcul numérique simple, l'intégration est remplacée par une somme de petits incréments. La variation de l'angle polaire entre deux points consécutifs peut alors être approchée par :

$$\Delta\theta = (180 / \pi) \cdot \Delta r / (rm \tan \beta m)$$

Dans cette expression, rm et βm sont respectivement le rayon moyen et l'angle moyen entre deux points successifs. Le facteur 180/π sert à convertir la valeur obtenue en degrés.

IV 4. Procédure numérique de calcul

4.1 Calcul des rayons

La première étape consiste à convertir les diamètres en rayons :

$$r1 = D1 / 2 = 45 / 2 = 22{,}5 \text{ mm}$$

$$r2 = D2 / 2 = 112 / 2 = 56 \text{ mm}$$

Le profil est discrétisé en 17 points, ce qui donne 16 intervalles. Le pas radial est donc :

$$\Delta r = (r2 - r1) / 16 = (56 - 22{,}5) / 16 = 2{,}09375 \text{ mm}$$

4.2 Variation de l'angle β

Lorsque les angles d'entrée et de sortie sont différents, l'angle β est interpolé progressivement entre β1 et β2. Le pas angulaire est :

$$\Delta\beta = (\beta2 - \beta1) / 16$$

Dans l'exemple étudié, β1 = 20° et β2 = 30°. Le pas angulaire vaut donc

$$\Delta\beta = (30 - 20) / 16 = 0{,}625°.$$

L'angle β augmente progressivement de l'entrée vers la sortie.

4.3 Calcul de θ et conversion en X, Y

Après le calcul de chaque incrément Δθ, l'angle polaire cumulé est obtenu par addition progressive :

$$\theta i = \theta i{-}1 + \Delta\theta$$

Les coordonnées cartésiennes utilisées dans SolidWorks sont ensuite obtenues par :

$$X = r \sin \theta$$

$$Y = r \cos \theta$$

Ces relations sont utilisées parce que le premier point du profil est placé sur l'axe vertical positif. Si l'aube doit tourner dans l'autre sens, il suffit d'utiliser les mêmes valeurs de Y et de changer le signe des coordonnées X.

IV 5. Exemple de calcul : β1 = 20° et β2 = 30°

Le tableau suivant donne les coordonnées du profil moyen de l'aube pour une roue de diamètre intérieur 45 mm et de diamètre extérieur 112 mm. Ces points peuvent être introduits directement dans SolidWorks puis reliés par une courbe Spline.

Tableau IV.2 : Coordonnées du profil moyen de l'aube pour $\beta_1 = 20°$ et $\beta_2 = 30°$

Point	X (mm)	Y (mm)
P1	0,000	22,500
P2	5,851	23,888
P3	11,695	23,988
P4	17,296	23,005
P5	22,506	21,136
P6	27,246	18,563
P7	31,479	15,443
P8	35,196	11,908
P9	38,412	8,067
P10	41,149	4,010
P11	43,437	-0,191
P12	45,310	-4,479
P13	46,803	-8,810
P14	47,949	-13,146
P15	48,781	-17,462
P16	49,330	-21,736
P17	49,623	-25,952

IV.6. Conception des échantillons à l'aide du logiciel SolidWorks.

Réglage correct des angles dans SolidWorks

Une erreur fréquente consiste à mesurer l'angle de l'aube par rapport au rayon. Or, dans cette méthode, l'angle β est mesuré par rapport à la tangente du cercle au point considéré. Si l'utilisateur travaille avec l'angle par rapport au rayon, il faut appliquer :

$$\alpha = 90° - \beta$$

Dans l'exemple étudié, β1 = 20° correspond à α1 = 70° par rapport au rayon, tandis que β2 = 30° correspond à α2 = 60°. Dans SolidWorks, il faut donc vérifier soigneusement la direction du vecteur tangent de la Spline au premier et au dernier point.

Modélisation de la roue dans SolidWorks :

- Nous créons une nouvelle pièce et ouvrons une esquisse sur le plan de référence choisi.
- Nous traçons deux cercles concentriques : D1 = 45 mm et D2 = 112 mm.
- Nous insérons les coordonnées calculées du profil moyen de l'aube.
- Nous relions les points par une courbe Spline en respectant l'ordre P1, P2, ..., P17.
- Nous contrôlons la tangence aux extrémités selon les angles β1 et β2.
- Nous utilisons la fonction Offset Entities pour définir l'épaisseur de l'aube (par exemple 2 mm au total).
- Nous fermons le contour de l'aube afin d'obtenir une esquisse fermée.
- Nous créons le volume par Extruded Boss/Base avec une hauteur de 8 mm.
- Nous dupliquons les aubes à l'aide de la fonction Circular Pattern afin d'obtenir six aubes régulièrement réparties.

La répétition circulaire s'effectue sur 360°, et comme le nombre d'aubes est z = 6, l'angle entre deux aubes successives est :

$$360° / 6 = 60°.$$

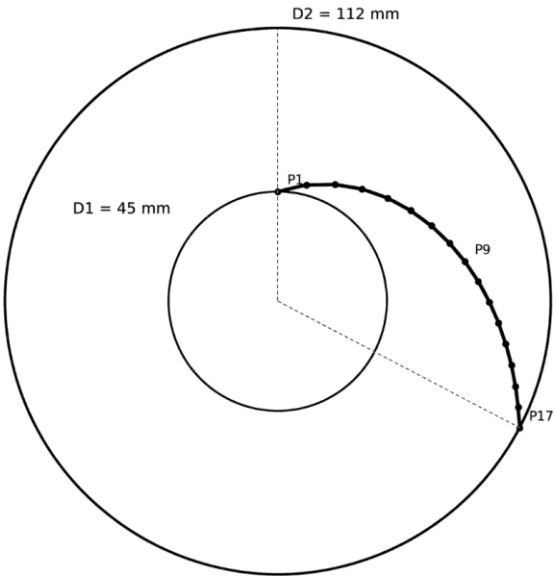


Figure IV.15: Tracé du profil moyen de l'aube par la méthode de Pfleiderer

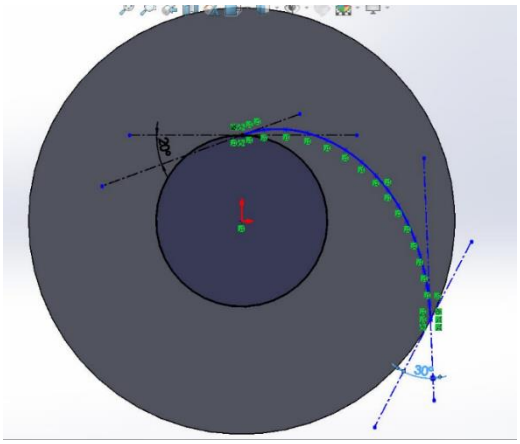


Figure IV.16: Réglage des angles d'entrée et de sortie de l'aube dans SolidWorks

Figure IV.17: Modèle final de la roue de pompe centrifuge avec six aubes sous SolidWorks

IV.7. Impression des échantillons.

Le processus d'impression se déroule en deux étapes principales.

Etape 1:Surveillance de la ligne de production

Nous passons ensuite à l'étape d'impression de la pièce. Les pièces sont imprimées l'une après l'autre afin d'éviter tout problème technique durant le processus.

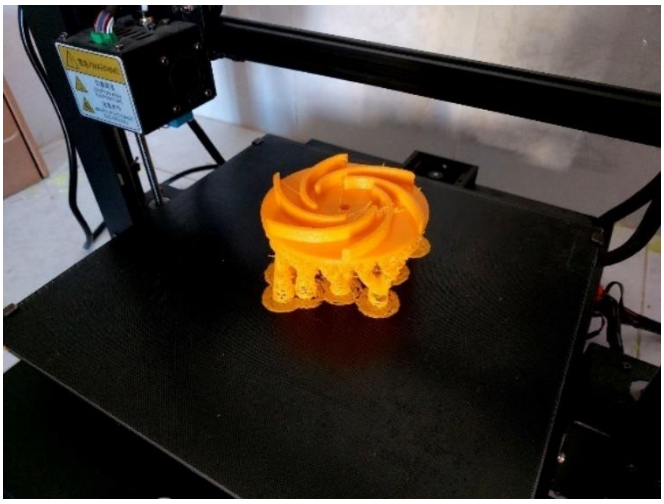


Figure IV.18: les éprouvettes après l'impressions

À la fin du travail, nous avons réussi à fabriquer trois échantillons adaptés à l'expérimentation.

Figure IV.19: Échantillons des roues imprimées après enlèvement des supports

(A)

(b)

(C)

Figure IV.20: (A) et(B)et (C) Phase de montage avant la mise en marche.

Il ne faut pas oublier qu'avant l'essai réel, les échantillons sont testés sur le moteur électrique.

IV .8 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats et discutions:

Après avoir imprimé les trois échantillons, nous avons réalisé une expérimentation pratique des trois roues sur une pompe centrifuge. Nous avons ensuite calculé le débit

(E)

(F)

Figure IV.21: Essai expérimental in situ en cours de fonctionnement

Nous avons procédé à l'installation du système de vidange, puis nous avons changé la roue à chaque opération de mise en marche.

Essai de débit.

Nous avons réalisé un essai de débit d'eau dans le but d'évaluer les performances du système de pompage et de mesurer la quantité d'eau écoulée pendant une durée déterminée. Cet essai repose sur la détermination du débit volumique de l'eau traversant la pompe, ce qui nous a permis d'analyser l'efficacité de fonctionnement ainsi que l'influence des différentes modifications géométriques sur les performances de l'installation.

Au cours de l'expérience, nous avons mesuré le volume d'eau évacué ainsi que le temps nécessaire à l'opération de vidange, puis nous avons calculé le débit à l'aide de la relation suivante :

$Q = V/t$

où :

- (Q) représente le débit volumique ;
- (V) le volume d'eau écoulé ;
- (t) le temps de vidange.

Cet essai nous a permis de comparer les performances des différentes roues étudiées et de déterminer l'influence de la géométrie des aubages sur le débit et le rendement de la pompe centrifuge.

Après avoir testé les trois échantillons, nous avons obtenu les courbes (diagrammes) qui

illustrent le débit de chaque roue pendant le fonctionnement.

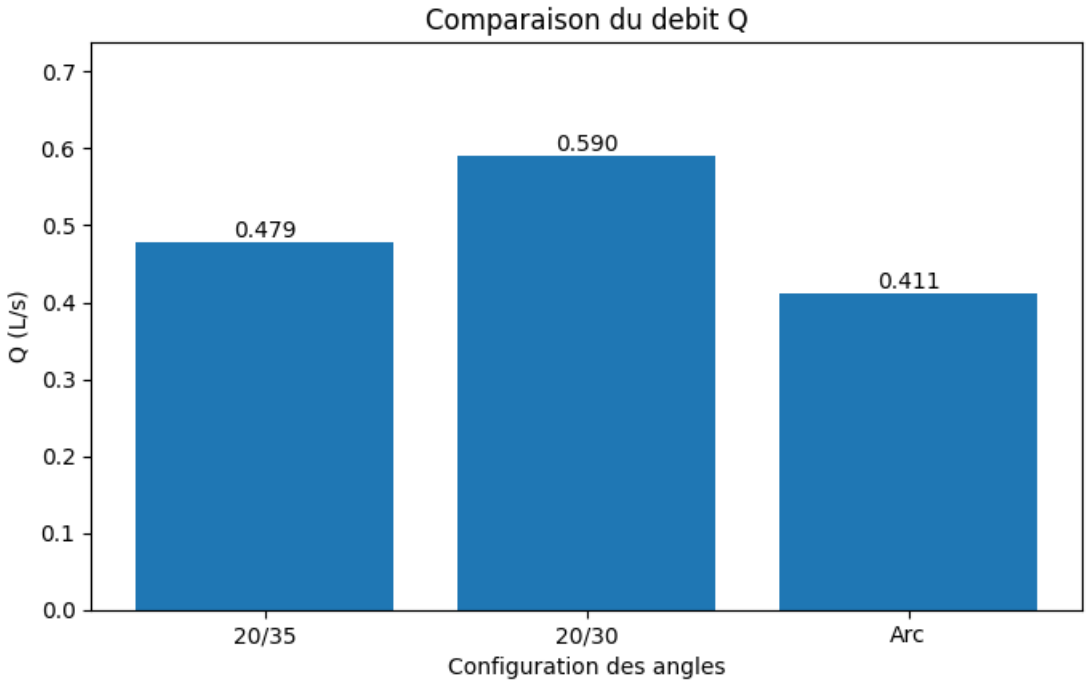


Figure IV.22: Résultats de l'essai de débit.

Remarque 1: :

L'objectif de l'expérience était de tester neuf échantillons, mais nous n'avons pu en réaliser que deux. Cela s'est néanmoins avéré suffisant pour obtenir des résultats permettant d'identifier les différences.

Remarque 2:

Nous disposons d'un échantillon dont la conception n'a pas été étudiée. Il s'agit d'un arc de cercle dépourvu d'angles d'entrée et de sortie. Cet échantillon présente un problème lors du fonctionnement, car il ne permet une évacuation de l'eau qu'à hauteur de 1/5 de sa capacité, ce qui traduit un faible taux de réussite lors de l'essai.

Figure IV.23:Roue à aubes unidimensionnelles en arc de cercle

Remarque 3:

Dans le cadre de cette étude, nous avons entrepris la fabrication d'un modèle de roue en aluminium par le procédé de moulage au sable. Toutefois, cette étape n'a pas pu être menée à son terme en raison de difficultés techniques liées aux caractéristiques du sable de moulage. Malgré une durée de séchage supérieure à 72 heures, le moule n'a pas atteint les propriétés mécaniques requises pour assurer un démoulage correct et poursuivre les étapes de fabrication. Cette contrainte a empêché l'obtention d'une pièce conforme aux exigences de l'expérimentation.

(1)

(2)

Figure IV.24: (1) et(2)Étape de fabrication du moule en sable

Conclusion

En conclusion, notre étude expérimentale portant sur la variation des angles des aubes a permis de mettre en évidence l'influence significative de ces paramètres géométriques sur le rendement de la pompe centrifuge. Les résultats obtenus montrent que l'angle de sortie des aubes β_2 exerce un effet plus déterminant sur le rendement que l'angle d'entrée β_1.

Par ailleurs, la conception scientifique de la roue, basée sur la méthode des transformations conformes, a confirmé l'importance d'un dimensionnement rigoureux des aubes. Cette approche, fondée sur des calculs précis et une démarche méthodologique structurée, permet d'obtenir une géométrie plus adaptée à l'écoulement interne de la pompe.

Elle se distingue ainsi d'une conception réalisée de manière empirique ou sans étude préalable, qui peut entraîner des pertes hydrauliques plus importantes et une diminution du rendement.

Cette étude montre donc que l'optimisation des angles des aubes, en particulier de l'angle de sortie β_2, constitue un facteur essentiel pour améliorer les performances hydrauliques d'une pompe centrifuge.

Conclusion générale

Au terme de ce travail consacré à l'étude de l'influence de la variation des angles des aubes de la roue sur le rendement d'une pompe centrifuge, il ressort que les paramètres géométriques de la roue jouent un rôle fondamental dans les performances hydrauliques de la pompe. Les pompes centrifuges sont aujourd'hui largement utilisées dans les domaines industriels, énergétiques, agricoles et hydrauliques grâce à leur simplicité de fonctionnement, leur robustesse et leur capacité à assurer le transport des fluides avec des débits importants. Cependant, leurs performances dépendent fortement de la qualité de la conception hydraulique de la roue, en particulier des angles des aubes qui gouvernent l'écoulement du fluide à l'intérieur de la machine.

L'étude théorique réalisée dans ce mémoire a permis de mettre en évidence l'importance des angles d'entrée β_1 et de sortie β_2 dans la transformation de l'énergie mécanique en énergie hydraulique. À travers l'analyse des triangles des vitesses et de l'équation d'Euler appliquée aux turbomachines, il a été démontré que ces angles influencent directement la direction des vitesses relatives et absolues du fluide, la composante tangentielle de la vitesse, la hauteur manométrique théorique ainsi que le rendement hydraulique de la pompe. Une mauvaise adaptation des angles des aubes peut provoquer des pertes hydrauliques importantes, des phénomènes de turbulence, de recirculation et de décollement de l'écoulement, entraînant ainsi une diminution des performances globales de la pompe centrifuge.

Les résultats obtenus ont également montré que l'optimisation des angles des aubes permet d'améliorer la stabilité de fonctionnement de la pompe et de réduire les pertes internes. En particulier, les aubes inclinées vers l'arrière offrent généralement un meilleur compromis entre rendement hydraulique, stabilité de fonctionnement et puissance absorbée. À l'inverse, certaines configurations géométriques peuvent entraîner une augmentation des pertes énergétiques et une baisse du rendement lorsque l'écoulement devient instable ou mal adapté à la géométrie de la roue.

Cette étude a donc permis de confirmer que le choix des angles des aubes constitue un élément essentiel dans la conception des roues de pompes centrifuges. Une conception géométrique adaptée contribue directement à améliorer l'écoulement interne, à optimiser le transfert d'énergie entre la roue et le fluide et à augmenter l'efficacité énergétique de la pompe.

Ainsi, la maîtrise des paramètres géométriques de la roue représente un enjeu important dans le développement de pompes centrifuges plus performantes, plus économiques et mieux adaptées aux exigences des applications industrielles modernes.

Enfin, ce travail peut constituer une base pour des études complémentaires portant sur l'analyse numérique ou expérimentale des écoulements internes dans les pompes centrifuges, ainsi que sur l'optimisation avancée des paramètres géométriques de la roue afin d'améliorer davantage les performances hydrauliques et énergétiques des turbomachines hydrauliques.

Références

[1] M. Toussaint et F. Hureau, Étude expérimentale de l'écoulement instationnaire dans une pompe centrifuge fonctionnant à débit partiel, AIRH 6ème Meeting International, Lausanne, Suisse, 1993.

[2] G. Wuibaut, P. Dupont, G. Bois, G. Caignaert et M. Stanislas, Application de la vélocimétrie par images de particules à la mesure simultanée de champs d'écoulements dans la roue et le diffuseur d'une pompe centrifuge, La Houille Blanche, vol. 87, n°2, pp. 75-80, 2001.

[3] K. Eisele, F. Muggli, Z. Zhang et M. V. Casey, Écoulement instationnaire dans un diffuseur aubé d'une pompe centrifuge, La Houille Blanche, vol. 84, n°3-4, pp. 23-30, 1998.

[4] M. Toussaint, F. Hureau et J.-F. Lapray, Influence des diffuseurs aubés sur le fonctionnement des pompes centrifuges, La Houille Blanche, vol. 84, n°3-4, pp. 38-44, 1998.

[5] J. F. Combes, Calcul de l'écoulement tridimensionnel potentiel dans une roue de pompe centrifuge à débit partiel, La Houille Blanche, n°5, pp. 430-435, 1985.

[6] M. El Hajem, R. Morel, F. Spettel et G. Bois, Étude de l'écoulement moyen en sortie de roue d'une pompe centrifuge : Roue SHF, La Houille Blanche, n°7, 1998.

[7] J.-F. Lauro et A. Boyer, Matrice de transfert et sources hydroacoustiques d'une pompe centrifuge à faibles charges, La Houille Blanche, vol. 84, n°3-4, pp. 128-133, 1998.

[8] I. Kedjouh et R. Khattab, Étude, conception et simulation d'une pompe centrifuge, Mémoire de Master Professionnel, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2019.

[9] M.-A. Abdelouahab, Étude des contraintes, vibrations, poussées axiales et radiales induites par des écoulements des liquides complexes dans une pompe centrifuge multi-étage à grande pression et puissance, Mémoire de maîtrise en ingénierie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2018.

[10] I. Serhane et D. Gabli, Calculs hydrauliques et vérification de la pompe centrifuge 502-P-001A, Mémoire de Master Académique, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2020.

[11] S. A. I. Bellary et A. Samad, Surrogate model based shape optimization methodology to enhance performance of a centrifugal pump, (document de travail ou article non référencé – fourni dans les fichiers).

[12] Grundfos Management A/S, *The Centrifugal Pump*, Research and Technology Department, Bjerringbro, Denmark.

[13] ASM International, ASM Handbook, Volume 15: Casting, ASM International, 1988.

[14] Groover, M. P., Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, 4th ed., John Wiley & Sons, 2010.

[15] Kalpakjian, S., and Schmid, S. R., Manufacturing Engineering and Technology, 7th ed., SI Units, Pearson, 2014.

[16] Benseigaa, S., Recherche des facteurs influençants la perméabilité aux gaz des sables de moulage à vert, Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2021.

Références

[17] Maameri, S., and Khenfer, S., Modélisation de la résistance à la compression et au cisaillement des sables de moulage à vert, Projet de fin de cycle Master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2022.

[18] Hassi Benchohra, Z., and Maarouf, Z., Étude de l'influence du taux de bentonite sur les propriétés mécaniques d'un sable de moulage, Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2021

Références