



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Technique de production industrielle

Présenté par :

HADJAB Aymen

HADJAB Younes

Thème

REVETEMENT DES AILETTES D'UNE POMPE CENTRIFUGE ENDOMMAGEE SOUS L'EFFET DE LA CAVITE

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
BEN ARIOUA Younes	Pr	Président
ZERGANE Said	MCA	Encadreur
HAMRIT Fareh	MCB	Examineur

Année Universitaire : 2019 / 2020

N° d'ordre : GM/...../2020

Remerciement

Tout d'abord, nous voudrions remercier Dieu Tout-Puissant, qui nous a donné la force, l'intelligence et la patience pour faire ce travail humble.

Nous remercions Dr. Z.F.R.G.A.N.F Saïd. En tant que directeur de thèse, il nous a soutenus et guidés dans notre travail et nous a aidé à trouver des solutions pour aller de l'avant.

Nous remercions Tous les enseignants du Département de génie mécanique

Nous exprimons notre gratitude particulière à nos chers parents pour leurs soutiens et leurs Assurances sans fin tout au long de nos études.

*Nous remercions, nos frères, nos sœurs et toute la famille
H.A.D.J.A.B.*

Enfin, nous remercions nos chers camarades pour leur aide tout au long de notre formation.

M.F.R.E.

H.A.D.J.A.B A. Y

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail en signe de
reconnaissance*

Et de respect :

*À mes très chers parents que Dieu les
protège*

À tous mes frères et mes sœurs

À toute la famille H A D J A B

À toute ma grande famille

À tous Mes amis sans exception

H A D J A B A. Y

Nomenclature

F [N]	Force
M [kg]	Masse
v [m/s]	Vitesse
T [s]	Temps
M [N/m]	Moment
S [m^2]	Surface
R [m]	Rayon
Q [m^3/s]	Débit
P_v [Pa]	Pression de vapeur
p_1 [Pa]	Pression d'aspiration
p_1 [Pa]	Pression de refoulement
C [m/s]	Vitesse absolue
U [m/s]	Vitesse relative
W [m/s]	Vitesse relative
E [J/m^3]	Energie totale de la pompe par unité de volume
b_1 [m]	Largeur de l'ailette à la point $M1$
h [M]	Hauteur manométrique
ρ [kgm^3]	Masse volumique
g [ms^2]	Accélération due à la pesanteur

Sigles

NPSH	Charge nette absolue à l'aspiration (Net Positive Suction Head)
NPSH req	NPSH requise
NPSH dis	NPSH disponible
HMT	Hauteur manométrique totale d'une pompe

Liste des figures

Fig. I.1 Pompe centrifuge	2
Fig. I.2 Roue à simple aspiration	3
Fig. I.3 Roue à double aspiration	4
Fig. I.4 Pompe centrifuge multi-étage	4
Fig. I.5 Principaux éléments d'une pompe centrifuge	5
Fig. I.6 Triangle de vitesses dans une roue	6
Fig. I.6. Rôle de diffuseur	7
Fig. I.7 Rôle de la volute	8
Fig. II.1 Evolution de l'état de l'eau en fonction de la température et de la pression.	13
Fig. II.2 Evolution de l'état de l'eau en fonction de la température et de la pression.	14
Fig. II.3 Cavitation à bulles sur un profil d'aile	15
Fig. II.4 Cavitation à poches sur un engin sous-marin	15
Fig. II.5 Cavitation à lames sur une pale d'hélice	16
Fig. II.6 Cavitation d'extrémité de pale d'hélice	16
Fig. II.7 Tourbillons cavitants en aval d'un obstacle	17
Fig. II.8 Cavitation de mélange en aval d'une vanne papillon	17
Fig. II.9 Cavitation d'une aube de diffuseur d'une pompe	20
Fig. II.10 Influence du diamètre de la roue sur le $NPSH_r$	21
Fig. II.11 Variation du NPSH requis et NPSH disponible avec le débit circulé par la pompe	22
Fig. III.1 Inducteur	25
Fig. III.2 Choix de diamètre d'une roue	26
Fig. III.3 Résistance de matériaux contre l'érosion	27
Fig. III.5 Corrosion en présence de revêtements métalliques	28
Fig. III.6 Revêtement chimique	30
Fig. III.7 Revêtement électrolytique	31
Fig. III.8 Revêtement par projection à chaude	32
Fig. IV. 1 Schéma du bain d'un revêtement électrolytique.	36
Fig. IV.2 Organigramme de classification des différentes méthodes de revêtement	37
Fig. IV.3 Schéma de principe de pulvérisation	39
Fig. IV.4 Polisseuse conventionnelle	40

Fig. IV.5 Polissage robotise avec robot industriel	41
Fig. IV.6 Polissage manuel	41
Fig. IV.7 Trajectoires de polissage manuel	42
Fig. IV.8 Modélisation d'un balourd	44
Fig. IV.9 Balancement d'un rotor	45

Résumé

La cavitation est un phénomène très complexe et difficile à définir. En effet, l'écoulement de cavitation se produit généralement dans un champ tournant (roues, inducteurs, ventilateurs, etc.) et la dynamique d'interface implique des interactions complexes entre les phases liquide et vapeur, dans les ailettes d'une pompe centrifuge.

A travers cette recherche, nous visons à étudier la formation de bulles d'air lors du phénomène de cavitation et à la méthode de traitement des ailettes de la pompe par le revêtement métallique.

Mots clés : *Cavitation, Pompe centrifuge, Revêtement, Polissage, Ecoulement.*

الخلاصة

التجويف ظاهرة معقدة للغاية يصعب تحديدها. في الواقع ، يحدث تدفق التجويف عمومًا في مجال دوار (عجلات ، محاثات ، مراوح ، الخ) وتتضمن ديناميكيات الواجهة تفاعلات معقدة بين مرحلتي السائل والبخار لمضخة طاردة مركزية. نهدف من خلال هذا البحث إلى دراسة تكوين فقاعات الهواء أثناء ظاهرة التكهف ، وإلى طريقة معالجة شفرات المضخة المعطبة بطريقة التلبس المعدني

الكلمات المفتاحية : التجويف ، مضخة الطرد المركزي ، الطلاء ، التلميع ، التدفق

Abstract

Cavitation is a very complex phenomenon that is difficult to define. This is because cavitation flow generally occurs in a rotating field (impellers, inductors, fans, etc.) and interface dynamics involve complex interactions between the liquid and vapor phases,

Through this research, we aim to study the formation of air bubbles during the phenomenon of cavitation, and to what extent these bubbles can affect pumping machines and how to get rid of this phenomenon.

Keywords : *Cavitation, Centrifugal pump, Coating, Polishing, Flow.*

Table de matières

Remerciements.....	i
Dédicaces.....	ii
Nomenclature.....	iii
Liste de figures.....	iv
Liste des tableaux.....	vi
Résumé.....	vii
Table de matières.....	viii

Chapitre I : généralité sur les pompes centrifuges

I.1- Introduction	1
I.2. Description d'une pompe centrifuge	2
I.2.1. Définition	2
I.2.2. Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge	2
I.2.3. Classification des pompes centrifuges.....	3
I.3. Principaux organes constituants d'une pompe centrifuge	5
I.3.1- Rôle de la roue.....	6
I.3.2. Rôle du diffuseur	7
I.3.2.1. Types de diffuseurs.....	8
I.3.3. Rôle de la volute	8
I.4. Théorie fondamentale de la pompe centrifuge	9
I.4.1. Débit volumique	9
I.4.2. Hauteur manométrique	9
I.4.3- Puissance	10
I.4.4. Types de pertes	10
I.4.4.1. Pertes mécaniques	10
I.4.4.2. Pertes par fuites.....	11

I.4.4.3. Pertes hydrolyques.....	11
I.4.5. Rendement η	11

Chapitre II : Phénomène de cavitation

II.1. Introduction	12
II.2 définition.	12
II.3. Phénomènes physiques.	13
II.4. Causes de cavitation	14
II.5. Les Différents types de cavitation.	14
II.5.1. Cavitation à bulles séparées	14
II.5.2. Cavitation à poches	15
II.5.3. Cavitation à lames	15
II.5.4. Cavitation de vortex	16
II.5.5. Cavitation de mélange	17
II.6. Les effets de la cavitation	17
II.6.1. Bruit.	18
II.6.2. Performances	18
II.6.3. Vibrations	18
II.6.4. Érosion	18
II.7. Effet de la cavitation sur la roue des pompes centrifuges	19
II.7.1. Cavitation à l'entrée de la roue (pompe centrifuge)	19
II.7.2. Cavitation dans les parties situées à l'amont de la roue	19
II.7.3. Cavitation dans les diffuseurs	19
II.8. Utilisation de la cavitation.	20
II.9. Paramètres de la cavitation.	20
II.9.1. Le NPSH	20
II.9.2. NPSH requis.	21
II.9.3. NPSH disponible	22

Chapitre III : Les moyens de protection

III. 1. Introduction	23
----------------------------	----

III. 2. Lutte contre la cavitation	23
III. 2 .1. Réduction du bruit et des vibrations	24
III. 2 .2. Utilisation d'un inducteur	24
III. 2 .3. Amélioration du NPSH des pompes	25
III. 2 .4. Limitation du risque d'érosion	26
III. 3. Protection par revêtements	27
III .3 .1. Protection par revêtements inorganiques non métalliques	27
III. 3 .2. Protection par revêtements organiques	27
III. 3 .3. Protection par revêtements métalliques.	27
III. 3 .3.1. Revêtements anodiques	28
III. 3 .3.2. Revêtements cathodiques.	28
III. 4. Technique de revêtement métallique	29
III. 4.1. Les dépôts chimiques (auto catalytiques)	29
III. 4.2. Les dépôts électrolytiques.	30
III. 4.3. Les dépôts par immersion.	31
III. 4.4. Les dépôts par projection à chaud (shoopage)	31
III. 4.5. La chromatisation	32
III. 4.6. La phosphatation	32
III .5 . Les procédés de revêtements métalliques	32

Chapitre IV : Les traitements par revêtement

IV.1. Introduction	34
IV.2. Les traitements de surfaces par revêtement	34
IV.3. Méthode général de traitement de surfaces par dépôt de revêtement	35
IV.3.1. Revêtement par voie électrolytique	35
IV.3.1.1. Définitions	35
IV. 3.1.1.1. L'électrodéposition	35
IV.3.1.1.2. La métallisation.	35
IV.3.1.1.3. L'électrolyse	35
IV.3.1.1.4. Métallisation par cémentation	35
IV.3.1.2. Procède du dépôt	36

IV.3.2. Dépôt en phase vapeur chimique (CVD)	37
IV.3.3. Techniques de revêtement par PVD	38
IV.3.4. Techniques de revêtement par pulvérisation	38
IV.4. Le polissage	39
IV.4.1. Définitions	39
IV.5. Les méthodes de polissage mécanique	39
IV.5.1. Polissage sur polisseuses conventionnelles	39
IV.5.2 Polissage automatique.....	40
IV.5.3. Polissage manuel	41
IV.6. Comparaison des méthodes de polissage mécanique	42
IV.7. Définition d'équilibrage d'un rotor	43
IV.8. But de l'équilibrage	43
IV.9. Balourd et équilibrage	43
IV.10. Les causes du balourd	44
IV.11. L'équilibrage statique des rotors	44
IV.12. Préparation et réalisation d'un équilibrage	45
Conclusion.....	46
Références.....	47

Chapitre I

Généralités sur les pompes centrifuges

I.1. Introduction

L'idée même de la pompe centrifuge est difficile à dater. On a pu créditer Denis Papin d'en avoir fabriqué une des premières au XVII^e siècle, mais des machines similaires bien plus anciennes ont été décrites. En 1735, M. Le Demour invente une pompe basée sur le même principe pour être utilisée dans les jardins du roi [1].

Cependant ces inventions demeurent sans lendemain, et il faut attendre la seconde moitié du XIX^e siècle où on voit le démarrage de l'utilisation des pompes centrifuges (Angleterre – Allemagne). Plusieurs modèles sont présentés à la grande exposition universelle de Londres en 1851. Cependant l'utilisation des pompes alternatives restera la règle dans l'industrie du XIX^e siècle.

Au Barrage de la Girotte, une pompe d'Auguste Reteau vient compléter celle de Sulzer Frères installée. En 1925, l'installation de pompage-turbinage de Belleville, juste sous le lac, la première en France, permet d'afficher une puissance de 20 MW en période de pointe, en remontant dans le lac, 520 mètres plus haut, 450 litres par seconde. [1]

I.2. Description d'une pompe centrifuge

I.2.1. Définition

Une pompe centrifuge (Fig. I.1) est un système ouvert, en quelque sorte un trou ou encore un conduit, dans lequel est mis en place un champ de forces centrifuge. Elle n'est pas basée sur le transport du fluide dans un godet ou sur la variation dans le temps d'un volume d'emprisonnement, le fluide n'est plus poussé par une paroi matérielle, mais mis en mouvement et équilibré par un champ de forces. Cela est une notion très simple, « que nous allons le voir dans ce qui suit », elle est basée sur d'autres principes. La pompe centrifuge fonctionne et s'utilise selon d'autres lois, qui sont l'objet de l'ensemble des paragraphes qui vont suivre [2].

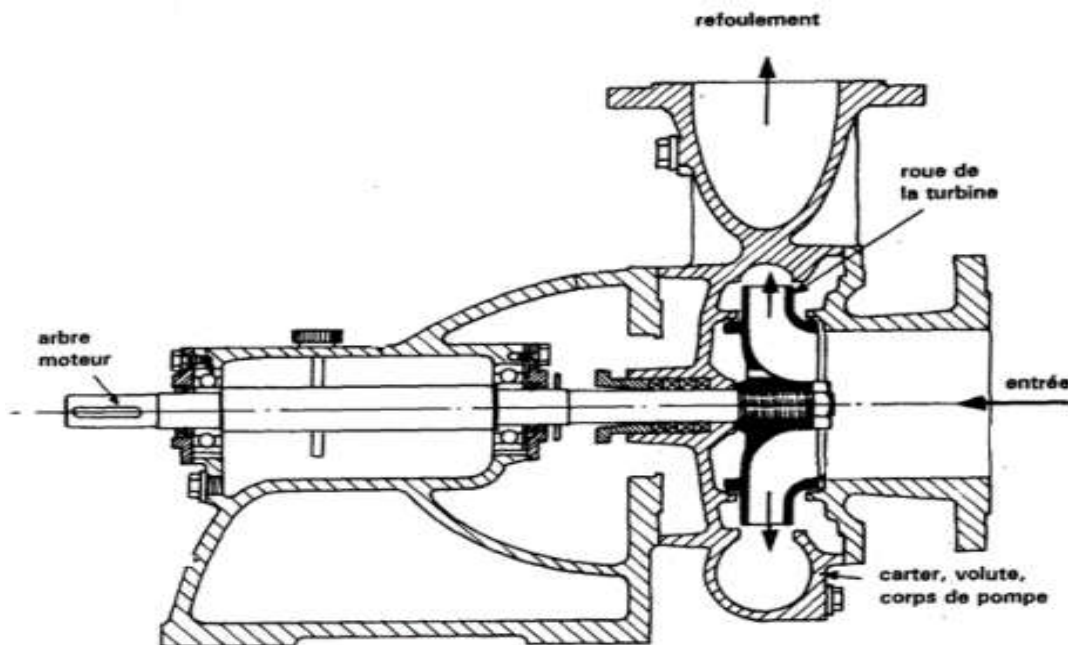


Fig. I.1 Pompe centrifuge

I.2.2. Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge

On peut décomposer le fonctionnement en trois étapes :

- **L'aspiration :**

Le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée distributeur dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée du rotor.

La pompe étant amorcée, c'est-à-dire pleine de liquide, la vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente et par conséquent la pression dans l'ouïe diminue et engendre ainsi une aspiration et maintient l'amorçage.

- **L'accélération**

Le rotor transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique. A la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le ramener dans la section de sortie.

- **Le refoulement :**

Dans l'élargissement en sortie, qui se comporte comme un divergent, le liquide perd de la vitesse au profit de l'accroissement de pression : l'énergie cinétique est convertie en énergie de pression au niveau de diffuseur [3].

I.2.3. Classification des pompes centrifuges

On classe les pompes centrifuges d'après le principe de fonctionnement.

a) Disposition de l'axe

- les pompes à axe horizontale
- les pompes à axe vertical (pompes immergées)

b) la forme de la roue

- simple aspiration (Fig. I.2)

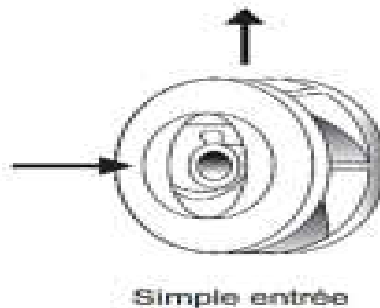


Fig. I.2 Roue à simple aspiration

- double aspiration (Fig. I.3)

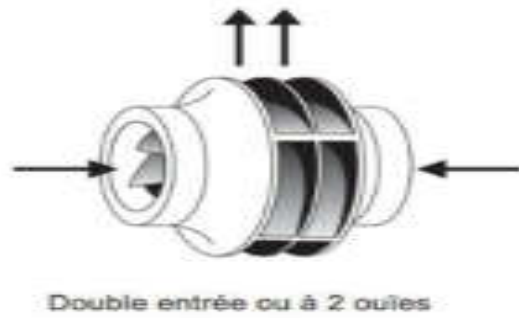


Fig. I.3 Roue à double aspiration

c) nombres des roue

Le nombre des roues correspondant au nombre d'étages

- monocellulaire ou mon-étagée
- multicellulaire ou multi-étages (Fig. I.4)

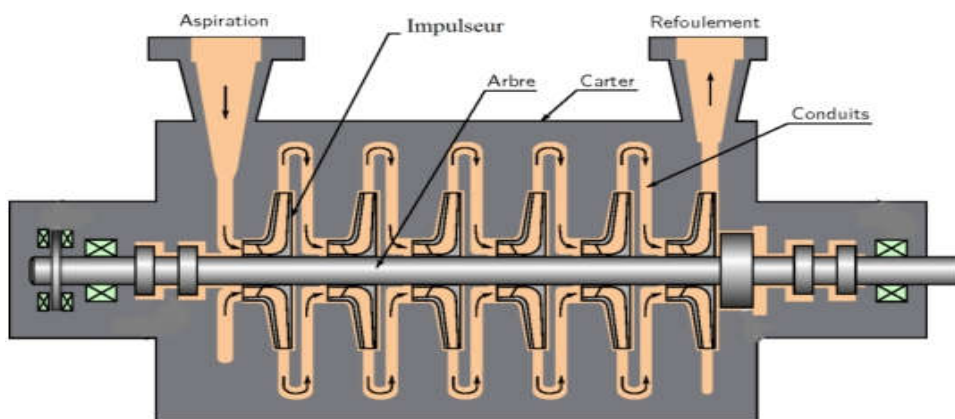


Fig. I.4 Pompe centrifuge multi-étage

d) La pression engendrée

- Faible pression
- Forte pression

e) Moyen d'accouplement

- Par chaine
- Par engrenage
- Par bride
- Par courroie

f) Moyen d'entraînement

- Par moteur électrique
- Par moteur diesel ou essence
- Par turbine à vapeur ou à gaz

g) Type du récupérateur

- Volute
- Diffuseur

h) Usage

- Pompe à usage normale
- Pompe à boue
- Pompe à acide
- Pompe à mazout et essence

I.3. Principaux organes constituants d'une pompe centrifuge

Les principaux éléments constituant la pompe centrifuge sont (Fig. I.5) :

- Le distributeur (tube d'aspiration)
- La roue (R) garnie d'aubes
- Le diffuseur garni ou non d'aubes fixes
- La volute (V) comportant l'ouïe d'aspiration

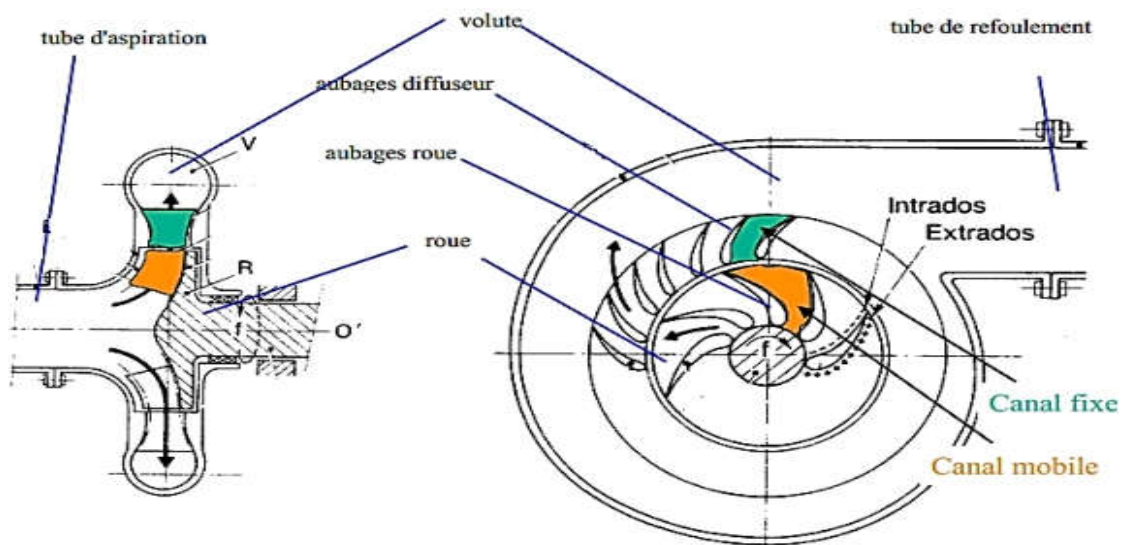


Fig. I.5 Principaux éléments d'une pompe centrifuge

I.3.1. Rôle de la roue :

Considérons 1 m³ de liquide en point M₁ à l'entrée de la roue (Fig. I.6) Il est à la pression P₁.

En outre il est animé de deux vitesses :

- La vitesse d'entraînement :

$$U_1 = W_1 \times R_1 \tag{I.1}$$

- La vitesse relative :

$$W_1 = \frac{\text{Débit}}{\text{section normale à } w_1} = \frac{Q}{2 \times \pi \times b_1 \times \sin \alpha_1} \tag{I.2}$$

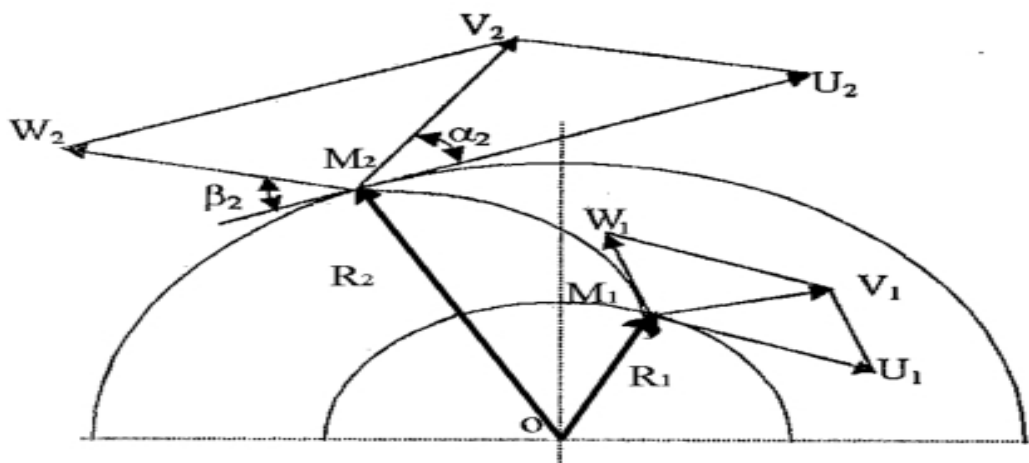


Fig. I.6. Triangle de vitesses dans une roue

La vitesse V₁ est la résultante de U₁ et W₁, le m³ liquide en M₁ dispose donc de deux énergies :

- A - Une énergie de pression P₁.
- B - une énergie cinétique ρV₁².

Considérons le m³ de liquide présent en M₁ à la sortie de la roue (Fig. I.7). Il est à la pression P₂.

En outre, il est animé de deux vitesses :

- La vitesse d'entraînement

$$U_2 = W_2 \times R_2 \tag{I.3}$$

- La vitesse relative :

$$W_2 = \frac{Q}{2 \times \pi \times b_2 \times \sin \alpha_2} \tag{I.4}$$

La vitesse absolue V_2 est la résultante de U_2 et W_2 . Le m³ liquide en M2 dispose donc de deux énergies de pression P_2 et l'énergie cinétique ρV_2^2

L'augmentation d'énergie depuis M₁ jusque M₂ vaut

$$E = (P_2 - P_1) + \frac{\rho}{2} (V_2^2 - V_1^2) \tag{I.5}$$

I.3.2. Rôle du diffuseur

Pour éviter les pertes de charges exagérées dans les tuyauteries, on limite la vitesse de circulation du fluide à une valeur voisine de 2 m/s. Mais comme la vitesse absolue à la sortie de la roue (au point M₂) est de l'ordre de 50 m/s (Fig. I.7), on doit prévoir un diffuseur réduisant progressivement la vitesse pour permettre la récupération de l'énergie cinétique [4].

La chute de vitesse crée une élévation de la pression donnée par la relation de BERNOULLI.

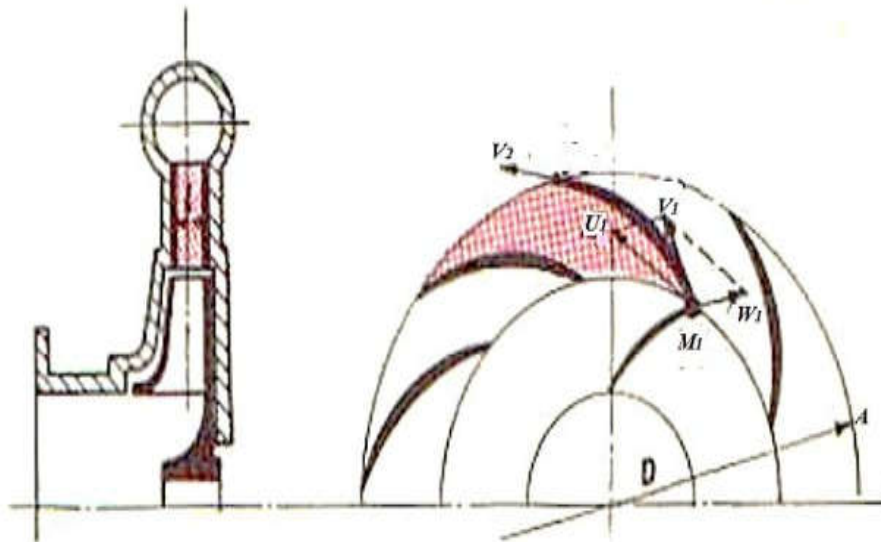


Fig. I.7. Rôle de diffuseur

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} (V_2^2 - V_3^2) \tag{I.6}$$

V_2 : La vitesse absolue à la sortie de la roue au point M₂.

V_3 : La vitesse absolue à la sortie du diffuseur

$$V_3 = \frac{Q}{S \times \cos \alpha_3} \quad (1.7)$$

S étant la section de sortie du diffuseur, c'est à dire la surface latérale du cylindre extérieur du diffuseur ($\pi D_3 b_3$) et α_3 l'angle formé par le rayon. Alors, le rôle du diffuseur est donc d'augmenter la pression statique en faisant tomber la vitesse du fluide. [4]

I.3.2.1. Type de diffuseurs

- a- Diffuseur à ailettes directrices composé de deux flasques munis d'ailettes ce genre de diffuseur se rencontre peu sur les pompes monocellulaires mais bien sur les pompes multicellulaires.
- b- Diffuseur lisse (sans ailettes). Les ailettes ne sont pas toujours nécessaires car une particule liquide quittant la roue avec une vitesse de direction V s'incurve automatiquement suivant une spirale. D'où l'emploi de diffuseurs lisses moins couteux qui se rencontrent sur certaines pompes monocellulaires.[4]

I.3.3. Rôle de la volute

La volute est le collecteur du liquide venant du diffuseur. Puisque la vitesse du fluide reste constante dans la volute (Fig. I.8), la section de celle-ci variera en progression arithmétique.

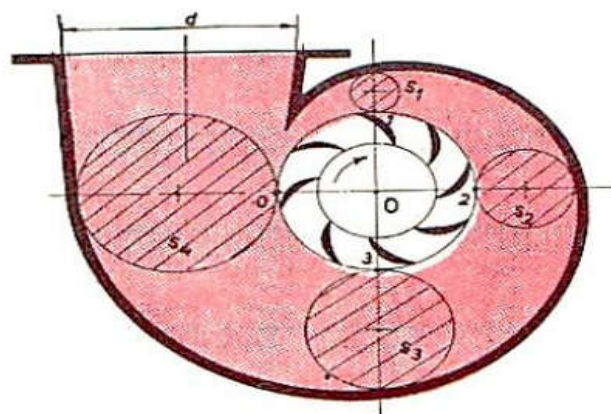


Fig. I.8 Rôle de la volute

La section S_1 recueille les liquides des aubes de 0 à 1.

La section S_2 recueille les liquides des aubes de 0 à 2 d'où

$$S_2 = 2 S_1. \quad (I.8)$$

Ainsi de suite jusque S4 qui recueille la totalité des liquides. Le diamètre d est déterminé en vue d'être raccordé sur une tuyauterie normalisée. [4]

Remarque : Absence de diffuseur.

Certaines pompes (bon marché) n'ont pas de diffuseur mais présentent alors une volute à vitesse variable ou en colimaçon dans laquelle s'opère à la fois le recueillement et la chute de vitesse du liquide.

I.4. Théorie fondamentale de la pompe centrifuge

Les principaux paramètres qui caractérisent une pompe sont :

- La hauteur manométrique
- Le débit volumique Q_v
- Le rendement η

Afin de caractériser une pompe, la hauteur manométrique H et le rendement η sont tracés en fonction du débit.

I.4.1. Débit volumique

Le débit volumique « Q_V » caractérise la quantité de liquide qui passe à travers une section donnée (section de refoulement) « S » par unité de temps « t ». Cette quantité de liquide est aussi caractérisée par la vitesse de passage à travers cette section.

$$Q_V = V.S \quad (I.9)$$

I.4.2- Hauteur manométrique

On appelle hauteur manométrique H d'une pompe, l'énergie fournie par la pompe à l'unité de poids du liquide qui la traverse. Si H_{TA} est la charge totale du liquide à l'aspiration et H_{TR} la charge totale du fluide à l'orifice du refoulement, la Hauteur manométrique de la pompe est :

$$H_m = H_{TR} - H_{TA} \quad (I.10)$$

La hauteur varie avec le débit et est représentée par la courbe caractéristique

$$H = f(Q_V) \quad (I.11)$$

Cette différence de pression entre la pression amont et la pression en aval en fonction du débit constitue la caractéristique de la pompe. La hauteur manométrique est généralement exprimée en hauteur de colonne d'eau (mètre de colonne d'eau: mCE). Pour déterminer la hauteur manométrique il faudra bien faire attention de considérer les pressions totale P_A (avant la pompe) et P_R (après la pompe).

H_m est calculée à partir de la formule suivante :

$$H_m = (P_R - P_A)/\rho g \quad (I.12)$$

Remarque :

Lorsque l'on ferme progressivement la vanne, le débit Q dans le circuit diminue mais la différence de pression H_m augmente, et on remarquera aussi que l'augmentation d'un débit dans une conduite cause ce qu'on appelle des pertes de charges qui sont dues aux frottements, singularités (vannes, clapets...) et dissipations liées à l'écoulement. Donc, plus le débit est important, plus les frottements sont élevés et les pertes de charges aussi.

I.4.3. Puissance \mathcal{P}

La puissance utile est la puissance absorbée : la puissance disponible au niveau de l'arbre d'entraînement de la roue de la pompe est la puissance absorbée P_a de cette pompe. La puissance transmise au fluide est appelée puissance hydraulique utile P_u . Le rapport de la puissance utile P_u et la puissance absorbée P_a est le rendement global de la pompe η_g

I.4.4. Types de pertes

I.4.4.1. Pertes mécaniques

- Perte dans les paliers radiaux.
- Perte dans les paliers axiaux.
- Pertes d'accouplement.
- Pertes dans la garniture mécanique.

Pertes par frottement des surfaces immergées en rotation :

- Pertes par frottement de disque
- Pertes par frottement sur un cylindre

I.4.4.2. Pertes par fuites

- Fuite d'une garniture d'ouïe mono étage.
- Fuite sur barrage arrière d'une roue équilibrée.
- Fuite au piston d'équilibrage.
- Fuite à l'extrémité des aubes.
- Fuite externes.

I.4.4.3. Pertes hydrauliques

Les pertes hydraulique sont constituées par :

- Les pertes dans le conduit d'amenée.
- Les pertes dans les roues.
- Les pertes dans les diffuseurs lisses.
- Les Pertes dans les canaux de retour.
- Les pertes dans la volute.

I.4.5. Rendement η

Le rendement η d'une pompe est le rapport de la puissance totale utile P (puissance hydraulique) communiquée au liquide pompé à la puissance P_a absorbée par la pompe (en bout d'arbre) ou par le groupe (aux bornes du moteur).

Si Q_v est le débit volumique du liquide, ρ sa masse volumique, et H la hauteur manométrique de la pompe, la puissance P et le rendement η sont donnée par :

$$P = Q_v \cdot \rho g H \quad (I.13)$$

et

$$\eta = \rho g H / P_a \quad (I.14)$$

On notera que : Le rendement de la pompe varie et passe par un maximum pour le débit maximal autour duquel la pompe doit être utilisée.

Chapitre II

Phénomène de cavité

II.1. Introduction

La cavitation a lieu dans les écoulements liquides lorsque la pression du milieu descend suffisamment pour engendrer un changement de phase et la formation de bulles de vapeur. Parsons (1906) a été le premier à identifier le phénomène de la cavitation, comme étant la résultante de la vaporisation au sein même de l'écoulement [5].

II.2. Définition de la cavitation

Mécaniquement, on peut définir la cavitation par la rupture du milieu continu de liquide sous l'effet de contraintes excessives. Physiquement, La cavitation est la vaporisation d'un fluide soumis à une pression inférieure à sa pression de vapeur. Ce phénomène se manifeste par la formation au sein de l'écoulement, de bulles, de poches, de tourbillons ou de torches de vapeur. Dans notre étude on s'intéresse à la cavitation par bulles.

En d'autre terme, C'est la formation de bulles de vapeur au sein d'un milieu liquidien initialement homogène lors d'une baisse brutale de la pression, à température constante.

II.3. Phénomènes physiques

Si l'on prend l'exemple de l'eau et que l'on regarde l'évolution de son état en fonction de la température, on remarque les faits suivants. A la pression atmosphérique, l'eau sous forme de glace chauffée atteint son point de fusion à 0°C ; elle devient liquide. Si nous continuons à la chauffer, toujours à la pression atmosphérique, elle passe à l'état de gaz par le phénomène d'ébullition à 100°C [6].

Cette évolution des différents états s'explique par le diagramme présenté dans la (Fig. II.1), qui montre qu'en fonction de la température et de la pression, un corps peut se retrouver sous forme solide, liquide ou gazeuse. Par exemple, l'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux à 100°C , on observe un seuil d'ébullition plus bas, du fait d'une moindre pression atmosphérique (proportionnelle à l'altitude). On remarque donc que la pression ambiante influe sur la température de vaporisation. Si l'on se place à une température donnée (par exemple 37°C), à la pression atmosphérique, l'eau est on l'a vu à l'état liquide. D'après la (Fig. II.1), on observe qu'il existe un moyen de faire passer l'eau de l'état liquide à l'état gazeux à température constante. Il suffit d'abaisser suffisamment la pression (Fig. II.2).

Lorsque cette dépression amenant à la vaporisation du liquide est locale (discontinuité dans le milieu liquide), on parle alors de phénomène de cavitation, qui se manifeste par l'apparition de poches d'air et de bulles. Cette dépression étant focalisée, un rééquilibrage des pressions au sein du fluide se fait très rapidement après formation de la (ou des) bulle (s), entraînant son implosion (Fig. II.1) et (Fig. II.2). Cette implosion brutale est source de bruit.

Ce phénomène violent peut entraîner l'endommagement des surfaces qui ont créé ce phénomène et qui se trouvent à proximité de la bulle de cavitation.

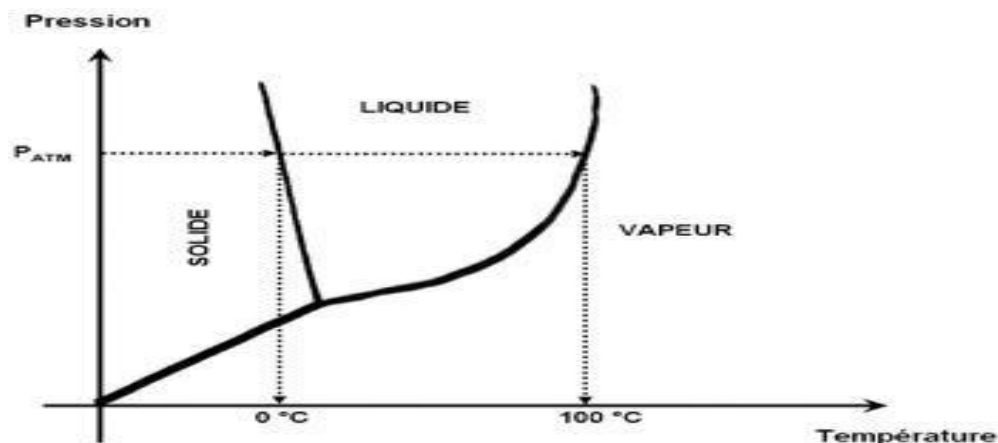


Fig. II.1 Evolution de l'état de l'eau en fonction de la température et de la pression.

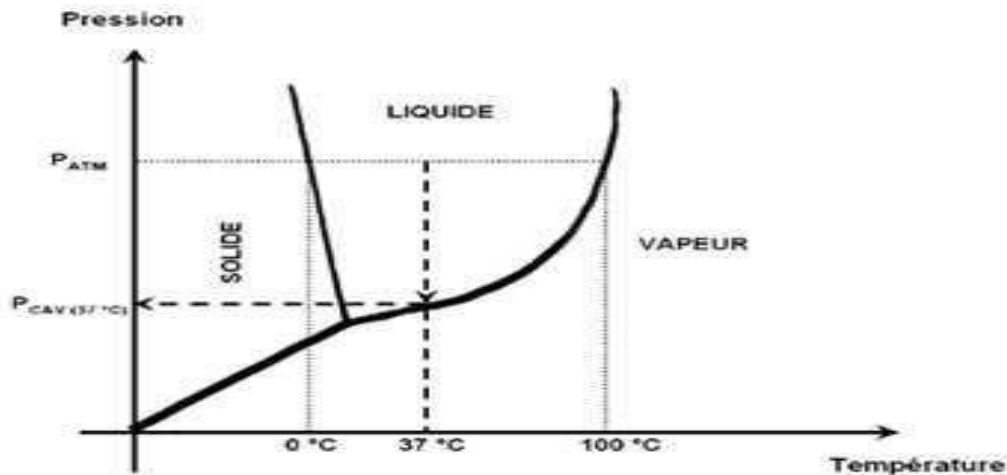


Fig. II.2 Evolution de l'état de l'eau en fonction de la température et de la pression.

II.4. Causes de cavitation

Les principales causes à l'origine de l'apparition de la cavitation sont :

- La dépression due à une survitesse locale de l'écoulement provoquée par des réductions géométriques.
- Les fluctuations turbulentes de la pression, le cisaillement élevé et les vortex provoquées par des instabilités de l'écoulement.
- La rugosité de parois et la présence de germes de cavitation.

II.5. Les Différents types de cavitation

On peut caractériser les différents types de cavitation par l'allure physique du phénomène.

II.5.1. Cavitation à bulles séparées :

Ce type de cavitation se produit plutôt sur des profils à faible incidence ; les structures ont l'allure de bulles de vapeur isolées plus ou moins sphériques qui apparaissent de façon aléatoire au sein du liquide. Afin que ces bulles puissent se créer (Fig. II.3), il est nécessaire qu'il existe, au sein du liquide ou sur la paroi, des germes (précisément des microbulles d'air) à partir desquels les bulles grossissent [7].



Fig. II.3 Cavitation à bulles sur un profil d'aile

II.5.2. Cavitation à poches :

Dans ce type de cavitation, la phase vapeur constitue une cavité unique, attachée au profil sur lequel elle se développe. Elle prend naissance à partir d'un décollement sur le profil ou sur un obstacle. À l'arrière de cette poche, se détachent des structures instationnaires, connectées par l'écoulement et qui collapsent en aval. Ci-après (Fig. II.4), exemple de poches de cavitation [7].



Fig. II.4 Cavitation à poches sur un engin sous-marin

II.5.3. Cavitation à lames

On peut la désigner comme un cas particulier de la cavitation par poches. Elle concerne des structures minces et stables semblables à des lames brillantes qui s'accrochent sur une

arête comme par exemple le bord d'attaque d'un profil (Fig. II.5). Ce type de cavitation se produit généralement lorsque l'incidence d'un profil est trop forte et génère une dépression trop importante [7].



Fig. II.5 Cavitation à lames sur une pale d'hélice

II.5.4. Cavitation de vortex

Un vortex (ou tourbillon) se crée par exemple aux extrémités de pales d'hélices ou de pompes. Ils peuvent aussi se créer en aval d'obstacles situés dans l'écoulement. La cavitation qui se produit alors au cœur de ce tourbillon qui est une zone à forte dépression est appelée cavitation de vortex [7] (Fig. II.6) et (Fig. II.7).



Fig. II.6 Cavitation d'extrémité de pale d'hélice



Fig. II.7 Tourbillons cavitants en aval d'un obstacle

II.5.5. Cavitation de mélange

Cette cavitation apparaît typiquement dans des couches de cisaillement entre un jet noyé et un liquide. C'est le cas des écoulements au travers d'orifices ou de vannes et aussi celui de jets propulsifs. C'est aussi le cas des écoulements en aval d'obstacles [7] ((Fig. II.8).



Fig. II.8 Cavitation de mélange en aval d'une vanne papillon

II.6. Les effets de la cavitation

La cavitation essentiellement a des conséquences négatives et restrictives sur le fonctionnement des installations hydrauliques. La cavitation se manifeste par différents effets

dont les implications sont plus ou moins dommageables selon son intensité ou selon la préoccupation de l'utilisateur.

II.6.1. Bruit

La toute première manifestation de la cavitation est l'apparition d'un bruit, plus ou moins fort selon son développement. Cette conséquence est particulièrement préoccupante pour le domaine de la discrétion sous-marine. Le bruit rayonné est dû aux fluctuations de volume des bulles ou des poches de vapeur. En fonction du développement de la cavitation, il va évoluer de petits crépitements à un bruit qui peut dépasser les limites supportables par l'oreille humaine. Le bruit de cavitation est, de loin, la source la plus importante de bruit liée aux écoulements de liquide. Comme le bruit de cavitation apparaît bien avant que celle-ci soit visible sous forme de bulles ou de poches, l'analyse acoustique est un outil très utile pour la détection de la cavitation.

II.6.2. Performances

La seconde manifestation de la cavitation est la chute des performances des équipements. Le développement de la cavitation dans des machines ou des organes hydrauliques peut être tel que les écoulements sont modifiés par la présence des structures cavitantes en créant une obstruction. On observe ainsi une baisse de la hauteur engendrée et du rendement pour une pompe, une baisse de la poussée pour une hélice, une augmentation de la perte de charge et une limitation du débit pour une vanne.

II.6.3. Vibrations

La troisième conséquence concerne les vibrations qui sont liées aux fluctuations des structures cavitantes en présence de parois solides. Ces fluctuations génèrent des efforts instationnaires qui se traduisent par des vibrations. Par exemple, la cavitation des hélices d'un bateau engendre des excitations de la ligne d'arbre qui peuvent se répercuter comme vibrations sur les structures du bateau.

II.6.4. Érosion

Enfin, la dernière conséquence est le phénomène d'érosion mécanique. Dans la phase d'évolution des structures cavitantes, le phénomène de collapse des volumes de vapeur est souvent très rapide et génère de très grandes vitesses locales de liquide. Si ce collapse se

produit au voisinage d'une paroi, il se forme des jets de liquides dirigés vers la paroi ; ces jets, étant d'une très grande énergie, peuvent engendrer des dommages de type érosion qui, si ce phénomène se multiplie, peuvent aller jusqu'à la destruction physique de la structure.

II.7. Effet de la cavitation sur la roue des pompes centrifuges

II.7.1. Cavitation l'entrée de la roue (pompe centrifuge)

On observe des cavitations de la fuite marginale provenant de la bague d'étanchéité d'aspiration de la pompe. Cette cavitation peut être à l'origine de bruit, mais elle est rarement érosive, car ces cavités implosent dans la zone de basse pression à l'entrée de la pompe. Une autre manifestation de la cavitation s'observe sur le débit dans la zone de l'arrondi du flasque intérieur de la roue, juste avant l'entrée dans le canal inter-aube. Comme précédemment, cette cavitation ne présente pas généralement de conséquence fâcheuse pour la roue [8].

II.7.2. Cavitation dans les parties situées à l'amont de la roue

Dans les zones de fonctionnement à débit réduit [au-dessous de $0,7 (Q_v)_N$], des écoulements de recirculation provenant de la roue remontent à l'amont. Pour des valeurs de NPSH très basses, on peut parfois observer des collapsés de ces cavités qui engendrent toujours bruits et vibration. Dans certains cas, des érosions par cavitation se produisent sur les composants amont de la pompe [8].

II.7.3. Cavitation dans les diffuseurs

Cette cavitation s'observe principalement lorsque la pompe fonctionne au dessus du débit d'adaptation des canaux du diffuseur. La figure II.9 montre le type de cavitation que l'on peut rencontrer dans cette configuration. Comme les pompes à diffuseur sont utilisées dans les canaux des diffuseurs, alors alimentées par un fluide avec une forte incidence et collapse des poches de cavitation, provoquent des érosions souvent très fortes et rapides. Ces cavitation sont encore aggravées dans les cas où le constructeur est amené à utiliser le diffuseur comme un organe de réglage de la courbe hauteur/débit, en désadaptant vers les faibles débits, pour respecter des formes particulières de fonctionnement de la pompe rendent nécessaires [8].



Fig. II.9. Cavitation d'une aube de diffuseur d'une pompe

II.8. Utilisation de la cavitation

La cavitation trouve des applications dans certains procédés industriels qui nécessitent la concentration d'énergie sur de petits domaines afin de produire localement des pics de pression élevés. La cavitation est ainsi utilisée sur plusieurs applications :

- Limitation de débit de liquide
- Générateur de microbulles
- Catalyseur de réaction chimique
- Nettoyage des surfaces par ultrasons ou par jets cavitants
- Dégazage des liquides
- Création de jets d'encre

Notons aussi que la super cavitation est utilisée en marine (hélices marines, pompes de fusée, petites turbines) [9].

II.9. Paramètres de la cavitation

II.9.1. Le NPSH

NPSH est l'abréviation anglo-saxonne de «Net Positive Suction Head», ce qui se traduit en français par : «Charge Totale Nette à l'Aspiration». D'une manière plus concrète, cela représente la pression qui existera à l'aspiration de la pompe, uniquement du fait du réseau et du liquide pompé (quel que soit la pompe utilisée).

Définition du NPSH : C'est la pression totale de liquide pompée et déterminée à la bride d'aspiration de la pompe, à la température de fonctionnement, ce terme peut se calculer Mathématiquement :

$$NPSH = h_a - \frac{P_v}{\rho g} = \frac{P_a}{\rho g} + \frac{V_a^2}{2g} + Z_a - \frac{P_v}{\rho g} \quad (II.1)$$

Avec :

P_v : Pression de vapeur du liquide.

P_a : Pression d'aspiration de la pompe.

h_a : Hauteur
 V_a : vitesse
 Z_a : Altitude

} Côte aspiration

g : accélération due à la pesanteur

ρ : masse volumique,

Dans l'étude des systèmes avec pompe, on définit deux types de NPSH [10].

- ✓ Le $NPSH_a$ (disponible)
- ✓ Le $NPSH_r$ (requis)

II.9.2. NPSH requis

$NPSH_r$ Requis, est la valeur minimale de NPSH à partir de laquelle la pompe fonctionne sans cavitation, cette valeur sera donnée par le constructeur. Expérimentalement, comme le montre la figure II.10, le NPSH requis augmente avec le débit Q_V . Le constructeur des pompes donnent la courbe caractéristique du $NPSH_r[NPSH_r=f(Q)]$ correspondant au diamètre nominal de la roue. Si la roue est rognée le $NPSH_r$ est modifié, sa nouvelle valeur peut être approchée graphiquement, comme l'indique la figure suivante [11].

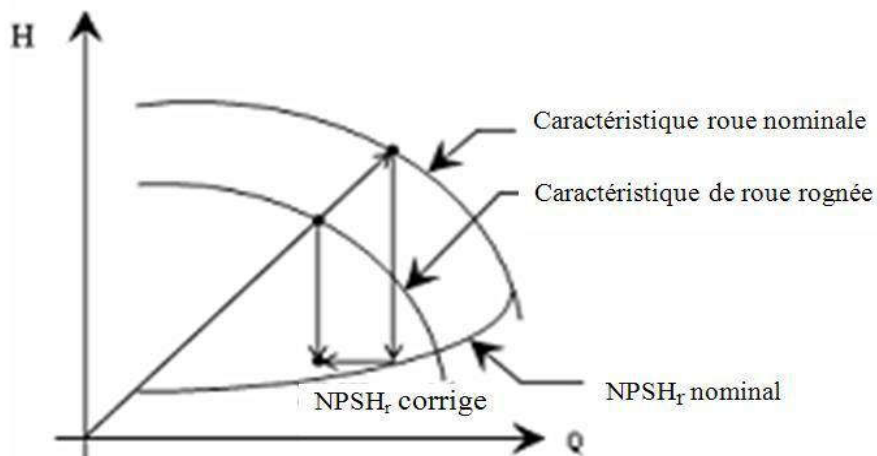


Fig. II.10 Influence du diamètre de la roue sur le $NPSH_r$

Au dessus d'un certain débit, le phénomène de cavitation est presque inévitable.

II.9.3. NPSH disponible

Suivant la configuration de montage et du produit véhiculé, il y a une pression P_a à l'aspiration de la pompe. En conséquence, seule la quantité de pression supérieure à P_v sera utile (si cette pression arrive à la P_v on aura du gaz à l'entrée de la pompe).

NPSH disponible ou d'installation, il s'agit de la pression à l'aspiration régnant effectivement à l'entrée d'une pompe, et que l'utilisateur doit définir pour choisir correctement sa pompe.

Il est donc toujours défini :

$$NPSH_d = \frac{P_a}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g} \quad (Z_a = 0 \text{ c\^ote aspiration}) \quad [12]. \quad (II\ 2)$$

En pratique, pour qu'une pompe puisse fonctionner normalement (sans cavitation), il faut calculer le NPSH disponible qu'il est bien supérieur au NPSH requis (qu'on aura déterminé à l'aide de la courbe fournie par le constructeur).

On a donc:

NPSH disponible > NPSH requis → sans cavitation.

NPSH disponible ≤ NPSH requis → avec cavitation

Une pompe fonctionne dans des conditions d'aspiration d'autant meilleures que la différence $NPSH_d - NPSH_r$ est grande (Fig. II.11). On estime nécessaire de se réserver une marge de sécurité de 0,5 m et donc d'avoir : $NPSH_d > NPSH_r + 0,5$

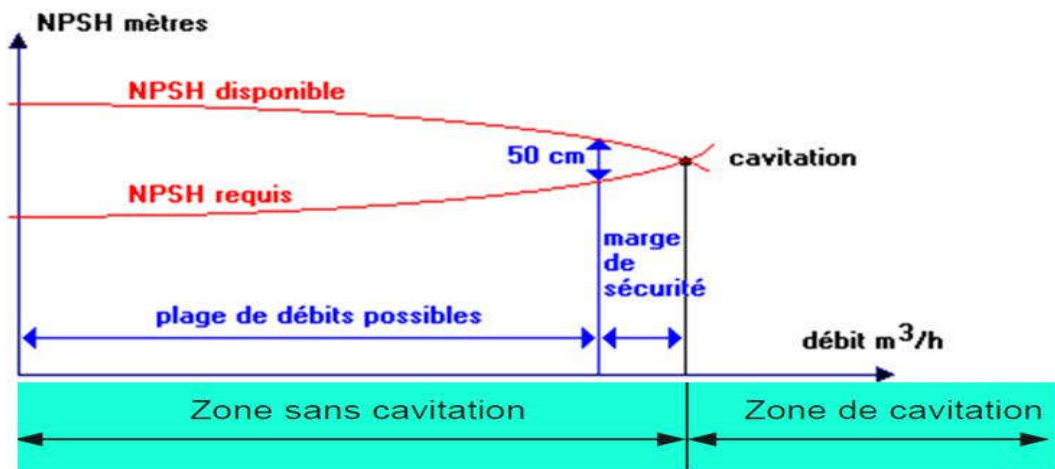


Fig. II.11 Variation du NPSH requis et NPSH disponible avec le débit circulé par la pompe

Chapitre III

Les moyens de protection

III. 1. Introduction :

Plus particulièrement, ce chapitre traite les moyens techniques de protection contre le phénomène de cavitation ainsi que les moyens matériels.

III. 2. Lutte contre la cavitation

La cavitation se distingue par un bruit caractéristique et un rendement irrégulier (pression et débit) qui permettent de l'identifier. Que pouvons-nous faire en pareil cas ?

- Réduire la tension de vapeur en abaissant la température du fluide pompé.
- Augmenter la pression qui règne à la hauteur de la bride d'aspiration :

En rehaussant le niveau du réservoir d'aspiration ou en installant la pompe à un niveau inférieur.

En augmentant la pression qui règne dans le réservoir d'aspiration.

- Réduire la résistance au flux qu'oppose la canalisation d'aspiration en augmentant sa section, en réduisant le débit, en nettoyant le filtre d'aspiration, etc.

Toute soupape d'étranglement affectée à la régulation du débit se monte sur la canalisation de refoulement, jamais sur la canalisation d'aspiration (attention, cette recommandation ne s'applique qu'aux pompes non volumétriques !)

- Adapter le débit de manière à réduire la hauteur $NPSH_{req}$
- Adapter la pompe : choisir une pompe dont la valeur $NPSH_{req}$ est inférieure, opter pour un régime inférieur et partant, pour une pompe de plus grande capacité...

Dans certaines situations, on ne peut exclure tout phénomène de cavitation. En pareil cas, il faut opter pour des matériaux durables tels que la fonte alliée au chrome, au nickel-chrome ou au nickel-chrome-molybdène. Les matières synthétiques sont moins sensibles à la cavitation que les métaux [13].

III.2 .1. Réduction du bruit et des vibrations

Lors de conception de la pompe, il est possible de réduire les effets de la cavitation en agissant sur la conception mécanique pour minimiser les risques de vibration et réduire le bruit généré par la cavitation.

- dimensionnement de l'arbre et des organes mécaniques
- choix des matériaux (épaisseur, nature)
- capotage antibruit
- liaison avec les tuyauteries de raccordement

III.2.2. Utilisation d'un inducteur

Pour augmenter les capacités des pompes centrifuges qui sont limitées à des valeurs de vitesse spécifique d'aspiration pour les roues centrifuges dites aspiratrices, on utilise des pompes avec inducteur.

L'inducteur ou hélice de gavage est une roue de pompe axiale placée devant l'œillard d'une roue de pompe centrifuge ou hélico centrifuge de conception tout à fait classique (Fig. III.1). Les deux rotors sont montés sur le même axe, ils sont entraînés à la même vitesse et fonctionnent en série. L'élévation de pression générée par l'inducteur permet à la roue centrifuge de fonctionner sans cavitation. Parallèlement l'inducteur lui-même est soumis à la

cavitation, mais les faibles gradients de pression qui règnent dans les canaux de l'inducteur limite les risques d'érosion par cavitation, la pression générée par l'inducteur représente environ 10 % de la pression totale faite par l'ensemble inducteur-roie centrifuge [14].

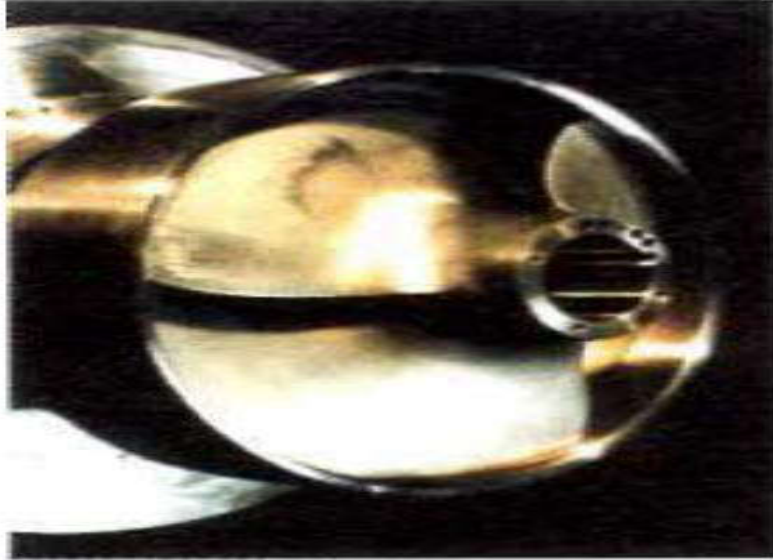


Fig. III.1. Inducteur

III. 2 .3. Amélioration du NPSH des pompes

En jouant sur les principaux paramètres géométriques des aubes à l'entrée de la roue, on peut concevoir des pompes dont les performances en cavitation peuvent varier dans une très large gamme [14].

Les principaux paramètres géométriques à faire varier sont les suivants :

- Diamètre de roue
- Angle d'entrée de l'aube
- Nombre d'aubes
- Epaisseur de l'aube
- Forme de l'aube à l'entrée de la roue

D'où on peut distinguer :

- Diamètre est plus important pour une pompe de roue aspiratrice de capacité d'aspiration élevée et NPSH faible (Fig. III.2)

- Diamètre est moins important pour une pompe de roue non aspiratrice de capacité d'aspiratrice limitée et NPSH élevée

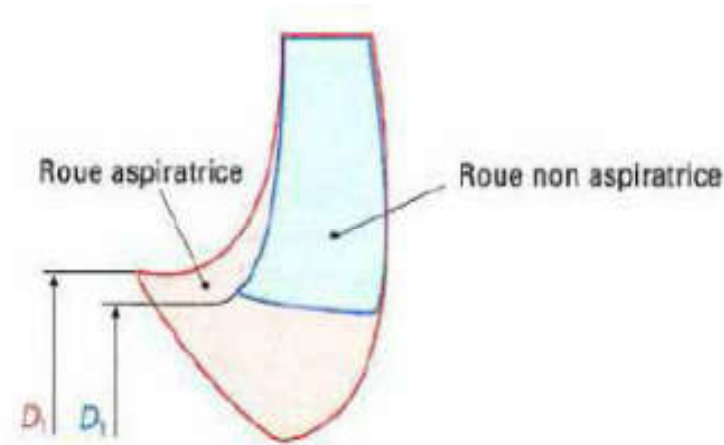


Fig. III.2. Choix de diamètre d'une roue

III.2.4. Limitation du risque d'érosion

C'est principalement par un choix judicieux du matériau constitutif de la roue que l'on peut prétendre réduire les risques d'érosion par cavitation. Les aciers inoxydables présentent une excellente tenue à l'érosion de cavitation. De très nombreux travaux expérimentaux ont permis d'établir un classement relatif des matériaux vis-à-vis de leur résistance à la cavitation, comme le montre le diagramme de (Fig. III.3). La qualité de la réalisation : absence de discontinuités, respect de la géométrie de définition des aubes, rugosité, etc., est aussi à prendre en considération lorsque l'on veut se prémunir contre d'éventuels risques d'érosion [14].

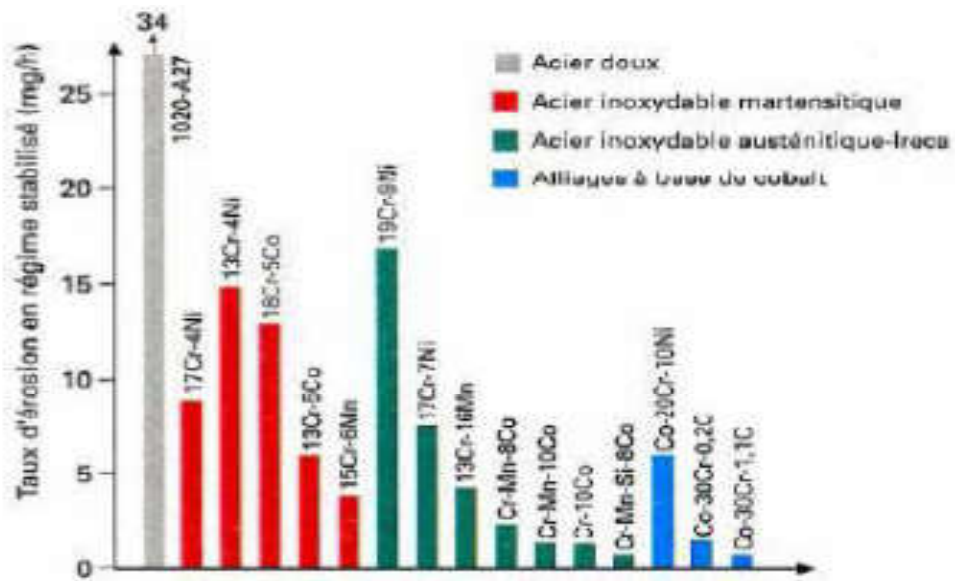


Fig. III.3. Résistance de matériaux contre l'érosion

III. 3. Protection par revêtements

Les revêtements isolent le matériau de l'électrolyte. Ils peuvent être métalliques, non métalliques, ou organiques.

III.3.1. Protection par revêtements inorganiques non métalliques

Parmi les revêtements inorganiques, on distingue deux types :

- Les couches de conversion.
- Les couches étrangères au substrat

III.3.2. Protection par revêtements organiques

Les revêtements forment une barrière plus ou moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu, on peut les classer en trois familles :

- Les revêtements en bitume.
- Les revêtements polymériques.
- Les peintures et vernis.

III.3.3. Protection par revêtements métalliques

Les revêtements métalliques sont couramment employés pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique.

On les applique aussi sur d'autres substrats comme le cuivre et le laiton. Les revêtements métalliques outre leurs effets anticorrosion remplissent souvent une fonction décorative [15].

Selon leur comportement à la corrosion par rapport au substrat, on distingue deux types de revêtements métalliques ; revêtements anodiques et revêtement et revêtements cathodiques.

III.3.3.1. Revêtements anodiques

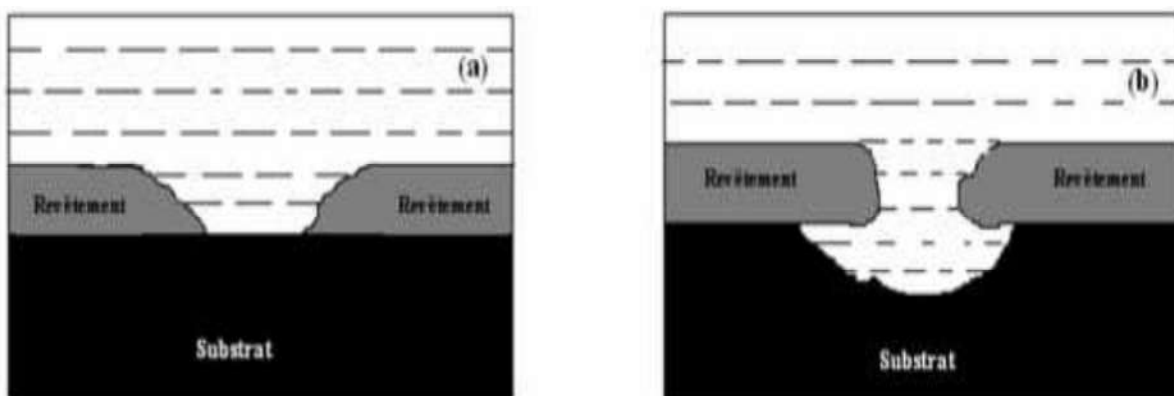
Le principe de la protection est de porter le métal à protéger à un potentiel réel tel que seules réactions de réduction puissent avoir lieu à sa surface, il devient cathode par rapport au revêtement, qui lui devient l'anode.

Les revêtements les plus employés dans ce type de protection sont le zinc ou le cadmium pour protéger l'acier, cette protection est assurée même en cas de discontinuité du revêtement (figure III.5a).

Par contre, la durée de la protection est limitée, elle est approximativement proportionnelle à l'épaisseur [16].

III.3.3.2. Revêtements cathodiques

Le métal de revêtement est plus noble que le métal de base, c'est le cas par exemple du revêtement de nickel ou de cuivre sur l'acier. Si dans ce dépôt il existe une fissure pénétrant jusqu'au fer, l'agent corrosif provoque la formation d'une pile avec attaque de l'anode (le fer) [16], dans ce cas, la continuité du revêtement est donc le facteur primordial (Fig. III.5b)



, (a) : revêtement anodique

(b) : revêtement cathodique

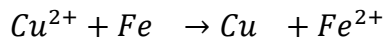
. Fig. III.5 Corrosion en présence de revêtements métalliques

III. 4. Technique de revêtement métallique

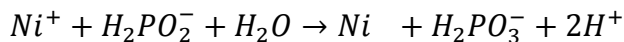
Suivant le type de matériau à protéger et le matériau de revêtement envisagé, différentes techniques de mise en place peuvent être utilisées. Dans ce paragraphe nous décrirons brièvement les méthodes les plus couramment employées [17].

III.4.1. Les dépôts chimiques (auto catalytiques)

La réalisation d'un dépôt chimique consiste à réduire les ions en solution du métal à déposer soit par réaction avec la surface du matériau à recouvrir, soit par réaction avec un autre corps présent dans la solution. Dans le premier cas par exemple on déposera du cuivre sur un substrat d'acier selon la réaction suivant (voire figure III.6).



Le deuxième procédé sert surtout à effectuer un revêtement de nickel à l'aide d'une solution contenant un sel de nickel et de l'hypophosphite de sodium comme agent réducteur selon la réaction suivant :



L'avantage de cette méthode de dépôt est que, contrairement à la méthode électrolytique, elle peut s'appliquer à des matériaux non conducteurs comme les polymères [17].

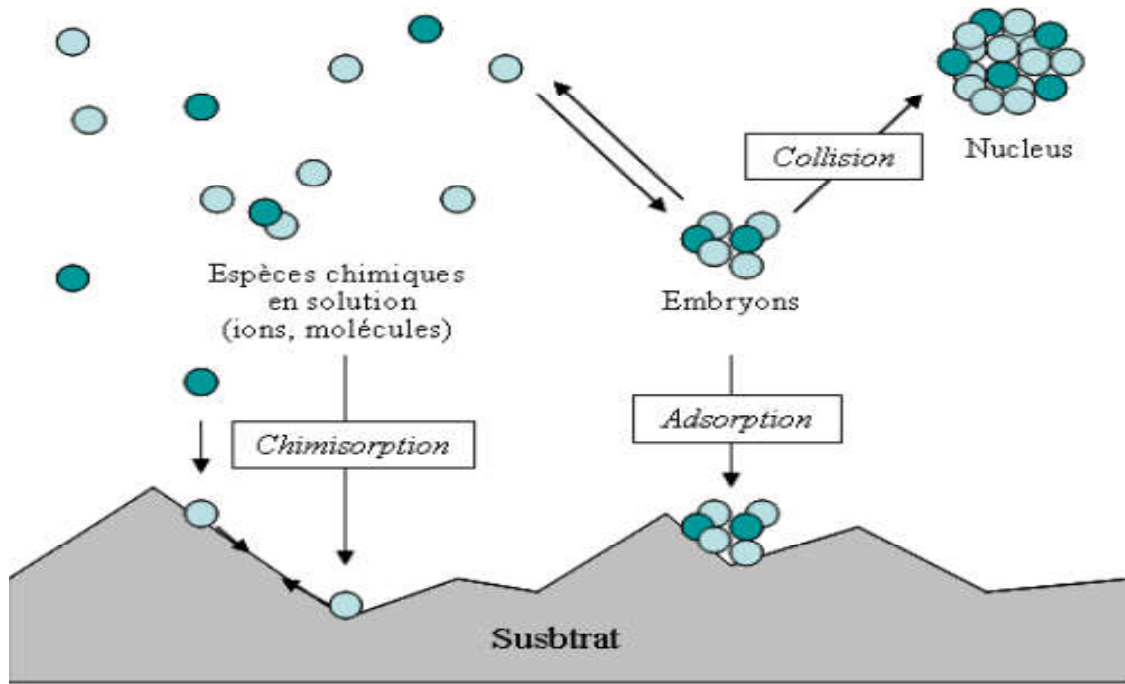


Fig. III.6. Revêtement chimique

III.4.2. Les dépôts électrolytiques

Ce sont des dépôts métalliques réalisés à partir d'une solution contenant les ions du métal à déposer ainsi que des agents complexant, des agents tampons ou des additifs organiques visant à améliorer les qualités (brillance, dureté, adhérence...) du revêtement réalisé. La vitesse de dépôt est directement liée à la densité de courant circulant dans la cellule d'électrolyse dont la pièce à revêtir constitue la cathode, l'anode pouvant être un barreau du métal à déposer (anode soluble), ou un matériau inerte. Dans ce dernier cas, il est nécessaire de régénérer périodiquement la solution [17].

Cette méthode est couramment utilisée, car un grand nombre de matériaux se prêtent bien à l'électrodéposition (Cu, Ni, Cr, Zn, Cd, Sn, Au, Ag, Pd, Pt,...), de plus, elle convient aussi bien au revêtement de petites pièces en vrac, qu'au dépôt en continu et à grande vitesse sur des tôles (Fig. III.7). Par exemple, lors de la galvanisation de l'acier, on atteint des vitesses de dépôt de l'ordre de $1 \frac{\mu m}{s}$. Sur des tôles se déplaçant dans l'électrolyte à une vitesse supérieure à $1 m/s$. Les inconvénients majeurs de cette méthode sont l'importance de l'état de surface des pièces à revêtir et la nécessité d'avoir parfois recours à des sous-couches [17].

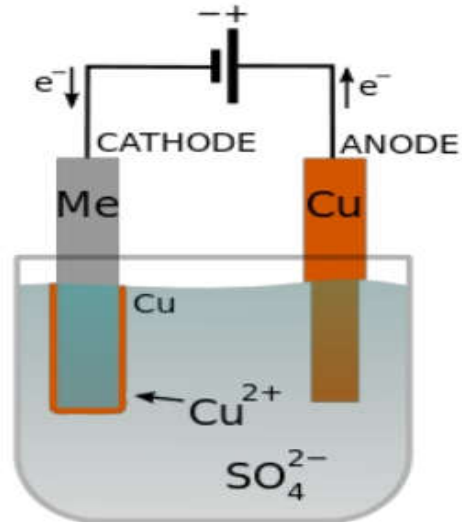


Fig. III.7. Revêtement électrolytique

III. 4.3. Les dépôts par immersion

C'est l'une des méthodes de protection la plus ancienne qui consiste à plonger le métal à recouvrir dans un bain fondu du métal de revêtement. C'est un procédé classique permettant de recouvrir de zinc (galvanisation). D'autres métaux à bas point de fusion peuvent aussi être déposés par ce procédé tel que l'étain, le plomb ou l'aluminium. L'épaisseur du dépôt obtenu est en général en fonction de la durée d'immersion et de la température, ce qui favorise la création d'une zone d'inter diffusion à l'interface revêtement-substrat assurant ainsi une bonne adhérence [17].

III.4.4. Les dépôts par projection à chaud (Shoopage)

La matière, sous forme de poudre, liquide, fil, cordon, est fondu au chalumeau ou à l'arc et projetée sur le substrat au moyen d'un pistolet. Les épaisseurs déposées vont de quelques dizaines de micromètres à quelques millimètres avec une porosité résiduelle de 1 à 10% (voire figure III. 8) [17].

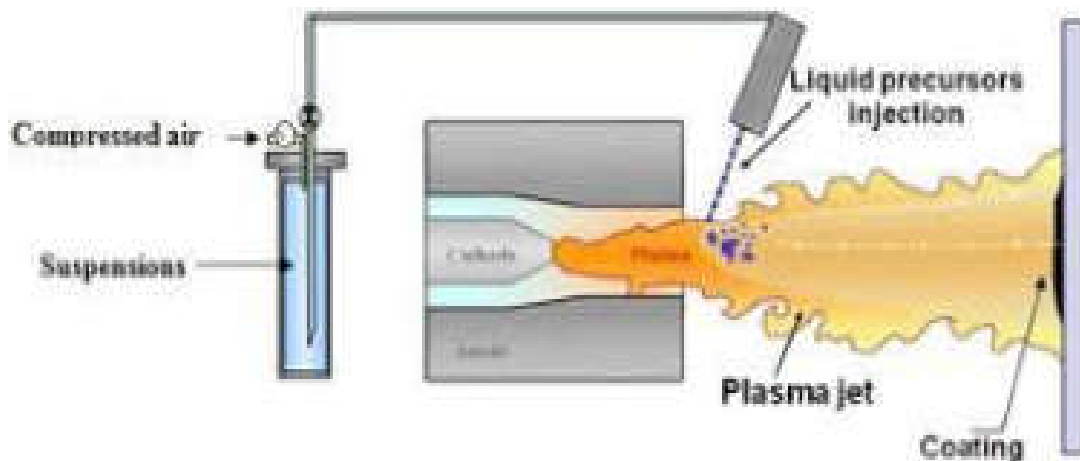


Fig. III.8. Revêtement par projection à chaude

III.4.5. La chromatisation

Elle s'applique principalement au zinc, à l'aluminium et au cadmium. On l'obtient en immergant la pièce pendant quelques secondes dans une solution acidifiée de bichromate de sodium à la température ambiante. Sur le zinc, la couche de chromate ainsi obtenue, d'une légère couleur jaune, protège le matériau contre les attaques superficielles dues à des condensations [17].

III.4.6. La phosphatation

Ce procédé est surtout appliqué aux aciers ordinaires. Par immersion ou brossage avec une solution acide de phosphate de zinc ou de manganèse comportant des accélérateur tel que Cu^{2+} , ClO_3^- , ou NO_3^- , on obtient un réseau poreux de phosphate métalliques en couche mince (1 à 2 μm) servant de base d'accrochage aux peintures. En couche plus épaisses, ce traitement seul permet d'obtenir une bonne protection contre les effets de l'érosion [17].

III.5. Les procédés de revêtements métalliques

Les procédés de métallisation consistent à recouvrir la surface du métal à protéger, d'une couche par fois extrêmement mince d'un métal auto protecteur.

Ce revêtement doit être compact et adhérent, les surfaces à protéger sont spécialement préparées. On les dégraisse à l'aide de solvants divers (soude, trichloréthylène, benzène...), puis on les décape soit chimiquement (H_2SO_4 ou HCl pour l'acier), soit mécaniquement (jet

de sable ou de grenaille de fonte, grattage, brossage) ; enfin on réalise un dégraissage électrolytique dans un bain alcalin.

La nature du métal du revêtement dépend du milieu corrosif, tandis que le mode d'application est choisi en fonction de l'épaisseur à obtenir et du type d'objet à protéger [18].

Chapitre IV

Les traitements par revêtement

IV.1. Introduction

Dans le chapitre 4, les types du revêtement métallique, leurs utilisation et les méthodes utilisées dans ce sujet sont traitées, ainsi que les conséquences imposées par le revêtement métallique sur les pales d'une pompes centrifuge, c'est-a-dire faire en sort que l'état du surface traitée soit très polie pour éviter la formation de tourbillon dans l'écoulement du fluide, également la centrifugation du centre de gravite avec le centre rotation de la pompe.

IV.2. Les traitements de surfaces par revêtement

La notion de traitement de surface par revêtement est une technique de plus en plus utilisée. Elle consiste à augmenter les propriétés à la surface par dépôt d'un film très mince (de quelque A° à quelque microns). Cette couche mince appelée revêtement, peut être utilisée

afin d'augmenter la dureté et d'assurer la protection contre la corrosion ou d'améliorer les propriétés physiques particulières ou, en fin dans un cadre décoratif.

Les qualités recherchées peuvent être très différentes selon l'application considérée et la destination de l'utilisation de la pièce.

Actuellement L'industrie présente de différents procédés et techniques de dépôt de revêtement, parmi les quels ont peut citer :

- Revêtement par voie électrolytique.
- Revêtement par voie chimique.
- Revêtement par évaporation.
- Revêtement par pulvérisation.

IV.3. Méthode générale de traitement de surfaces par dépôt de revêtement

IV.3.1. Revêtement par voie électrolytique

IV.3.1.1. Définitions

IV. 3.1.1.1. L'électrodéposition

C'est l'opération qui consiste à recouvrir d'un revêtement métallique, déposé par l'action d'un courant électrique, une pièce immergée dans une solution électrolytique (Fig. IV.1). L'ensemble des techniques des dépôts électrolytiques est aujourd'hui désigné par le terme général (galvanoplastie).

IV.3.1.1.2. La métallisation

Elle regroupe l'ensemble des opérations permettant de recouvrir la surface d'un objet, même non métallique par un dépôt métallique, par voie thermique, chimique ou l'électrolytique.

IV.3.1.1.3. L'électrolyse

Elle désigne l'opération qui consiste à décomposer une solution par l'action d'un courant électrique.

IV.3.1.1.4. Métallisation par cémentation

C'est la saturation superficielle de l'acier en aluminium, chrome, bore et autres éléments.

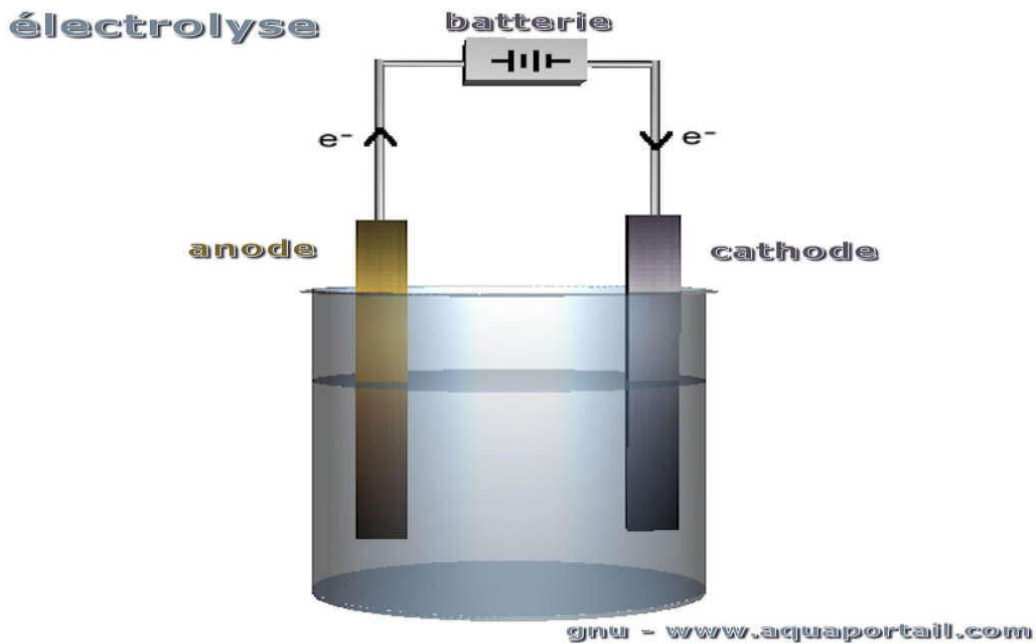


Fig. IV.1 Schéma du bain d'un revêtement électrolytique.

IV.3.1.2. Procède du dépôt

L'électrolyse est utilisée pour déposer une ou plusieurs couches métalliques sur une surface de métal. Le principe de réalisation d'un dépôt électrolytique est comme suit : la pièce à recouvrir est placée dans un bac à électrolyse, pour jouer le rôle d'une cathode sur laquelle viennent se déposer des ions métalliques.

La couche obtenue a bien évidemment des caractéristiques précises qui dépendent des différents paramètres du mécanisme électrolytique. Et cela, aussi bien en ce qui concerne sa structure que ses propriétés :

Nous pourrions considérer deux sortes de procédés qui sont :

- La galvanoplastique : le dépôt métallique est réalisé sur une cathode métallique qui constitue un moule.
- La galvanisation : la pièce métallique est recouverte par un film de nature différente afin de lui conférer certaines caractéristiques.

Il est évident que les caractéristiques ne seront pas les mêmes pour un dépôt destiné à protéger une masse métallique de la corrosion et un dépôt réalisé en vue de la décoration d'une pièce.

La classification des différents procédés de dépôt de revêtement employés est présentée par le schéma suivant (Fig. IV.2) [9] :

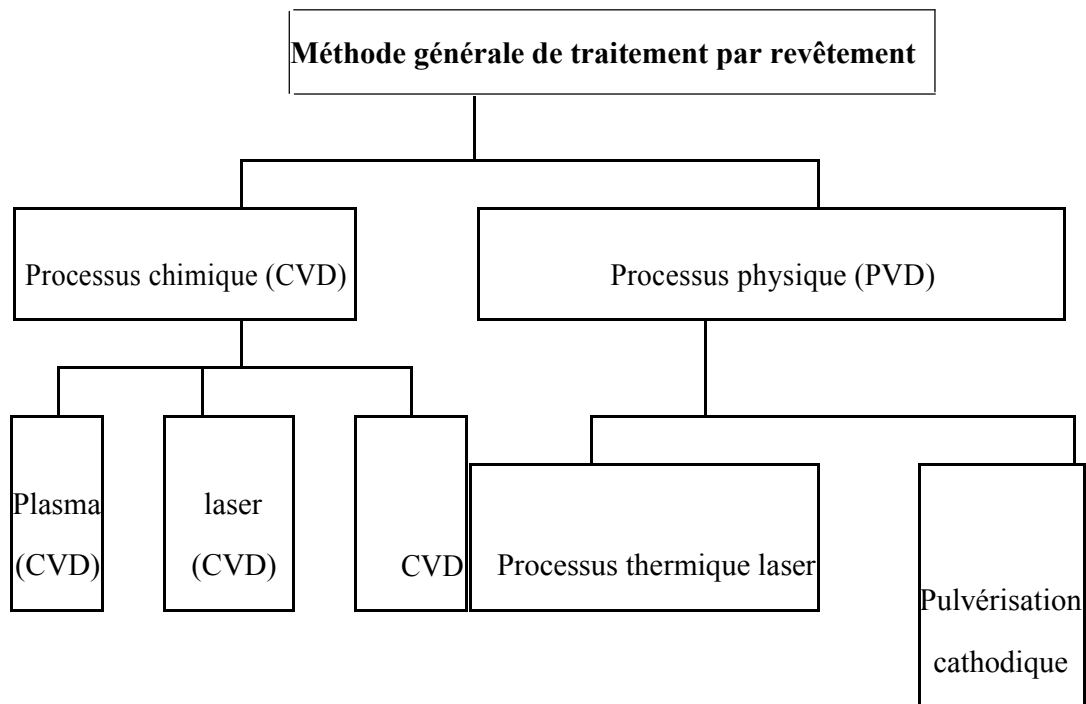


Fig. IV.2 Organigramme de classification des différentes méthodes de revêtement

IV.3.2. Dépôt en phase vapeur chimique (CVD)

Le dépôt en phase vapeur chimique est une méthode dans laquelle le ou les constituants d'une phase gazeuse réagissent pour former un film solide déposé sur un substrat. Les composés volatils du matériau à déposer sont éventuellement dilués dans un gaz porteur et introduit dans une enceinte où sont placés les substrats. Le film est obtenu par réaction chimique entre la phase vapeur et le substrat chauffé. Dans certains cas, une élévation de température est nécessaire pour maintenir la réaction chimique. Le procédé CVD est un domaine interdisciplinaire, il comprend un ensemble de réaction chimiques, un processus thermodynamique et cinétique, un phénomène de transport [10]. La réaction chimique est au centre de ces disciplines : elle détermine la nature, le type et les espèces présents. Pour ce procédé, il existe deux types de réacteurs à savoir :

- 1- le réacteur à paroi chaude
- 2- le réacteur à paroi froide.

Dans le cas du réacteur à paroi chaude, ce dernier est chauffé directement, ce qui permet d'opérer à plus faible pression ; à peu près 75m torr, pour lesquels des dépôts se produisent bien sur les substrats, mais aussi sur les parois (technique LPCVD : low pressure chemical vapor deposition) [11].

IV.3.3. Techniques de revêtement par PVD

Cette technique consiste à chauffer sous vide le matériau que l'on veut déposer. Les atomes du matériau à évaporer reçoivent de l'énergie calorifique, c'est-à-dire que leur énergie vibratoire dépasse l'énergie de liaison et provoque l'évaporation. Le matériau évaporé est alors recueilli par condensation sur le substrat à recouvrir. Les principales techniques se différencient par le mode de chauffage du matériau. Le processus thermique, lors de l'élaboration de la couche de revêtement, se base sur les différents procédés d'évaporation du matériau.

Le dépôt en phase vapeur physique PVD présente beaucoup d'avantages par rapport au dépôt CVD, par exemple les couches sont denses, le processus est facile à contrôler et il n'y a pas de pollution des couches déposées. Dans ce procédé de dépôt, on distingue les processus thermiques et la pulvérisation cathodique. [17]

IV.3.4. Techniques de revêtement par pulvérisation

La pulvérisation est un procédé de dépôt sous vide fonctionnant à froid, en plasma luminescent, dans un gaz maintenu à pression réduite (10^{-3} à 1 torr). Il permet de déposer tous les types de matériaux, simple ou composés, réfractaire ou non, alliés, conducteurs ou diélectriques.

Tous les types de substrats, conducteurs ou diélectriques, qui acceptent une mise sous vide et un faible échauffement (50^0 à 60^0), peuvent être traités par ce procédé. Lors de la pulvérisation, le matériau à déposer appelé (matériau cible) est introduit dans l'enceinte à vide, sous forme d'une plaque de quelques millimètres d'épaisseur, et de dimension au moins égale à celle de la pièce à recouvrir. Cette cible est fixée sur une électrode refroidie (la cathode), qu'on porte à une tension négative de 1 à 6 KV. Une deuxième électrode (l'anode), est disposée parallèlement à la cible à une distance de quelques centimètres. Dans de nombreux cas, l'anode sert de porte substrat, et elle est généralement reliée à la masse, ce qui facilite son utilisation.

Si la pression résiduelle dans l'enceinte est comprise entre 1 Pa et 102 Pa, le champ électrique créé entre les deux électrodes provoque l'ionisation du gaz résiduel. Cette ionisation apparaît sous forme d'un nuage luminescent, localisé entre les deux électrodes, c'est ce phénomène que l'on observe dans les tubes fluorescents (Fig. IV.3). Au même moment, un courant électrique s'établit entre les deux électrodes : le gaz résiduel est devenu conducteur, il contient alors :

- Des électrons, qui sont attirés par l'anode.
- Des ions positifs qui sont attirés par la cible (cathode).

Si on place une pièce devant la cible, on observe que cette pièce se recouvre progressivement d'une couche du même matériau que celui de la plaque constituant la cible. Le dépôt est dû à la condensation d'atomes provenant de la cible, expulsés de celle-ci sous l'effet de l'impact d'ions positifs contenus dans le gaz luminescent, et attirés par la cible du fait de sa polarisation négative [25].

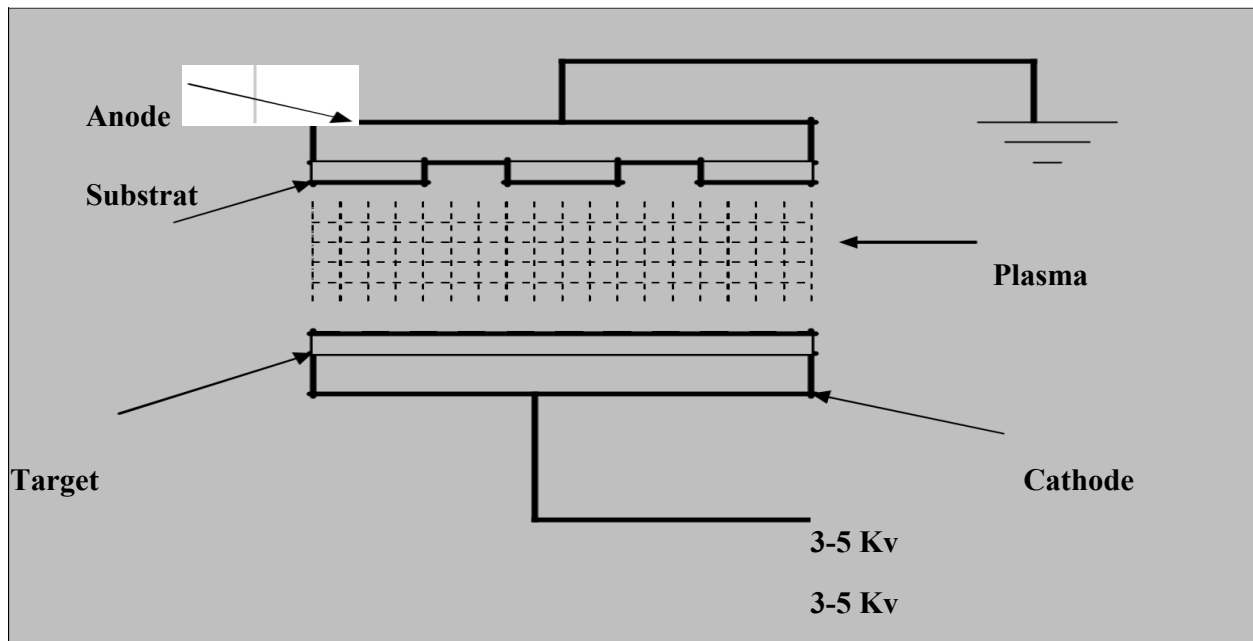


Fig. IV.3. Schéma de principe de pulvérisation

IV.4. Le polissage

IV.4.1. Définition

Le polissage mécanique est un procédé de finition permettant de retirer, par abrasion, les défauts, rayures ou aspérités de la pièce. Poussé à son plus haut niveau de finition, nous obtenons des états de surface de grande qualité, caractérisés par l'indice de rugosité (Ra), l'homogénéité de la brillance et de l'éclat.

IV.5. Les méthodes de polissage mécanique

IV.5.1. Polissage sur polisseuses conventionnelles

Les polisseuses conventionnelles permettent de polir aisément des surfaces planes. Elles sont très utilisées dans le domaine des circuits intégrés pour réaliser des couches minces et

planes de semi-conducteur ou pour réaliser des éprouvettes micrographiques. Ces polisseuses sont constituées d'un plateau circulaire sur lequel est disposé un disque abrasif ou de feutre, un porte-échantillon circulaire excentré par rapport à l'axe du plateau (Fig. IV.4). Les échantillons à polir sont installés sur le porte-échantillon, un système permet de régler l'effort à exercer sur l'échantillon à polir. Les surfaces étant planes, la pression de contact entre la pièce et le disque est presque constante si on néglige les effets de bord. Le débit du fluide et des particules peut être contrôlé ainsi que la position de l'arrivée de fluide.



Fig. IV.4. Polisseuse conventionnelle

IV.5.2. Polissage automatique

Pour réaliser le polissage d'une surface complexe, une solution alternative au polissage manuel est d'utiliser des systèmes multi-axes comme des robots anthropomorphes ou des machines-outils 5 axes. Le grand nombre d'axes de ces derniers permet d'atteindre facilement une position de l'espace avec une orientation imposée. Il est possible d'utiliser un asservissement de la position à partir d'un capteur d'effort pour obtenir un effort de contact le plus constant possible (ou plus rarement d'un capteur d'émission acoustique. Dans les deux cas, les trajectoires utilisées sont issues du savoir-faire des polisseurs, soit des courbes trochoïdales qui imitent les mouvements répétitifs des polisseurs. Les courbes porteuses des trochoïdes sont principalement de type balayage ou fractale (Fig. IV.5).

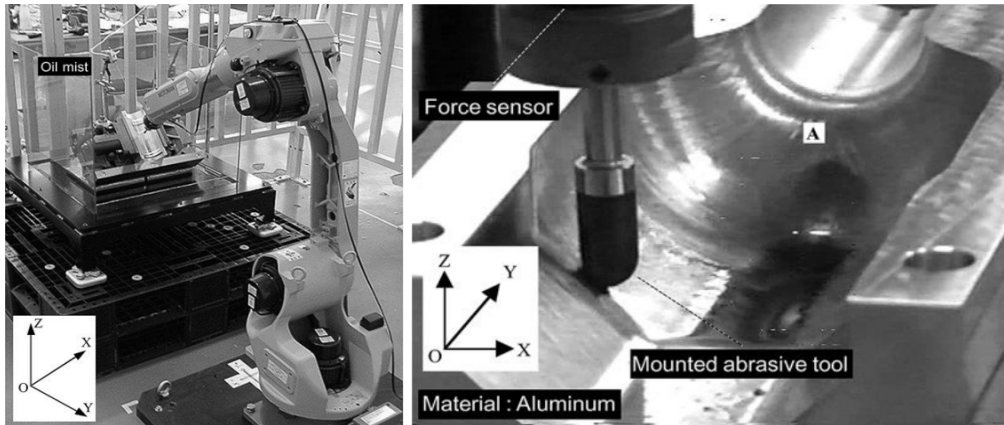


Fig. IV.5 Polissage robotisé avec robot industriel

IV.5.3. Polissage manuel

Le polissage est encore très souvent une opération manuelle dont le savoir-faire est détenu par l'expérience des polisseurs. Malgré une automatisation de la plupart des procédés, cette opération reste encore aujourd'hui manuelle, notamment pour le polissage des surfaces complexes tel que les pompes centrifuges, car il n'existe pas de mise au point aisée du processus. L'opérateur utilise des cales ou des outils rotatifs (Fig. IV.6) sur lesquels il peut fixer différents types d'abrasifs. Les trajectoires de polissage couramment utilisées sont des mouvements de translation selon trois directions ou des trajectoires de type trochoïdale (Fig. IV.7). La surface obtenue dépend donc de l'opérateur et peut varier pour chacune des pièces réalisées. L'avantage du polissage manuel est que le polisseur va pouvoir détecter les différents défauts d'aspect à partir de son observation et ainsi pouvoir les corriger et les supprimer. Par contre, les écarts de forme sont mal maîtrisés car l'œil humain ne permet d'observer des défauts de forme de l'ordre de $10 \mu\text{m}$, et il n'existe pas de moyen de mesure permettant de mesurer ces écarts en temps réel. Pour réduire le défaut de forme des pièces polies et améliorer la recevabilité, il faut automatiser le procédé de polissage.

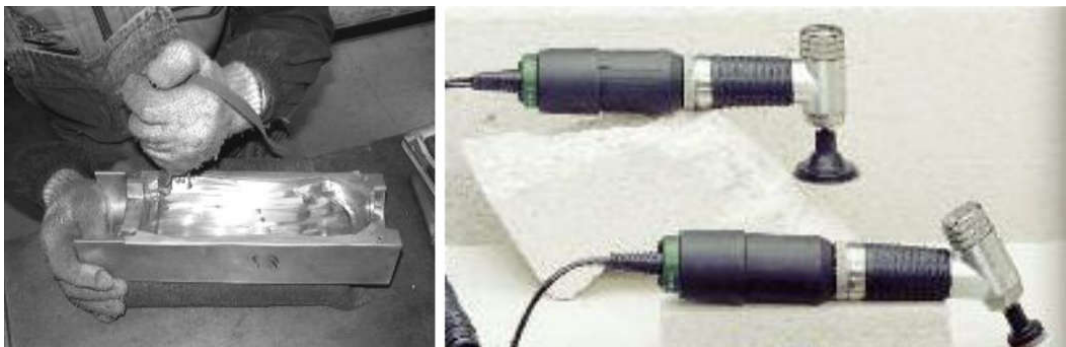


Fig. IV.6. Polissage manuel

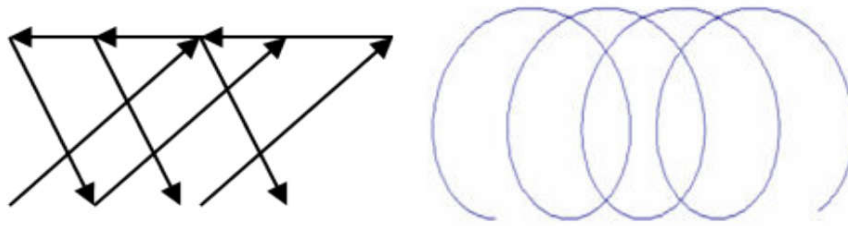


Fig. IV.7. Trajectoires de polissage manuel

IV.6. Comparaison des méthodes de polissage mécanique

Le polissage sur polisseuse conventionnelle est bien maîtrisé, le nombre de paramètres pilotant étant relativement faible. La pression de contact est homogène, les vitesses d'abrasion ne sont pas forcément égales sur toute la surface de l'éprouvette, par contre l'éprouvette est polie de manière multidirectionnelle ce qui évite d'obtenir un motif particulier sur la surface. Ce procédé permet d'obtenir une qualité dimensionnelle et de rugosité très bonne (polie-miroir), mais il permet uniquement de fabriquer des surfaces planes de petites dimensions (→ 100 mm). Il n'est donc pas utilisable pour la fabrication des formes complexes.

Tout comme le polissage manuel, le polissage automatique multi-axes est flexible, mais le temps de mise au point est beaucoup plus important. Par son savoir-faire et son expérience, un polisseur peut directement polir n'importe quelle nouvelle pièce et s'adapter en fonction de l'avancement, tandis que le polissage automatique nécessite de générer une bonne trajectoire, de gérer tous les paramètres comme l'inclinaison, l'écrasement (ou l'effort), les changements d'abrasifs sans même constater l'évolution de la surface. Le polisseur peut facilement détecter un défaut géométrique ou une rayure et corriger les imperfections, ce qui n'est pas possible en polissage automatique. Par contre le polissage manuel n'est pas répétable et la qualité géométrique des pièces ne peut être garantie, tandis que la bonne respectabilité des axes des machines-outils et des robots permet de rendre le procédé plus répétable et d'avoir une meilleure maîtrise de la qualité. L'automatisation du procédé permet de gagner en productivité, c'est-à-dire en temps et potentiellement en coût de fabrication. Même s'il existe de nombreuses normes pour diminuer les risques professionnels et protéger les opérateurs le métier de polisseur comporte une pénibilité relativement importante avec des mouvements répétitifs, des vibrations de l'outil, la présence de poussières (voir Tableau IV.1).

Tableau. IV.1. Comparaison qualitative des procédés de polissage mécanique

Polissage :	Conventionnel	Manuel	automatique (multi-axes)
Fiabilité du procédé	++	-	+
Qualité de la rugosité	++	+	+
Précision de la forme et des dimensions	++	-	+
Faible endommagement de la sous-surface	+	+	+
Compatibilité environnementale	+	+	+
Temps de mise au point	+	++	--
Flexibilité du procédé	--	++	+
Taux d'enlèvement de matière	-	--	--
Faibles contraintes résiduelles	+	+	+

IV.7. Définition d'équilibrage d'un rotor

Un solide est dit équilibré lors de sa rotation autour d'un axe fixe si son centre de masse est sur l'axe de rotation (l'axe de rotation est un axe principal d'inertie pour ce solide). L'équilibrage des machines tournantes est le procédé par lequel on tente d'améliorer la répartition de la masse d'un rotor de façon que le rotor tourne dans ses paliers sans créer de forces centrifuges non compensées. L'équilibrage des rotors contribue à prolonger la vie utile des équipements et doit améliorer le comportement des machines tournantes [24].

IV.8. But de l'équilibrage

Les vibrations produites par un rotor déséquilibré créent une surcharge sur les paliers et sur la structure de la machine en général. L'équilibrage du rotor s'avère nécessaire pour éviter une ou plusieurs des situations suivantes :

- Une diminution de la vie utile de la machine, de la durée de vie des roulements et de l'intégrité de la structure.
- Un accroissement de la fréquence des entretiens requis par la machine.
- Une détérioration de la qualité de vie au travail en ce qui a trait au bruit, à la sécurité et au confort (vibrations transmises au corps par le plancher par exemple).

IV.9. Balourd et équilibrage

Un balourd est par définition, est une répartition irrégulière de la masse d'un rotor lors de sa rotation autour d'un axe. L'équilibrage est le procédé qui vise à compenser cette

mauvaise répartition par ajout ou enlèvement de masses connues en des endroits déterminés du rotor. [25]

La représentation de la figure IV.8 est une simplification. En pratique, plusieurs défauts peuvent apparaître sur le même rotor mais ils ont pour effet de déplacer le centre de gravité G et, dans le cas du disque, il suffit d'ajouter une seule masse pour ramener le centre de gravité en coïncidence avec l'axe de rotation.

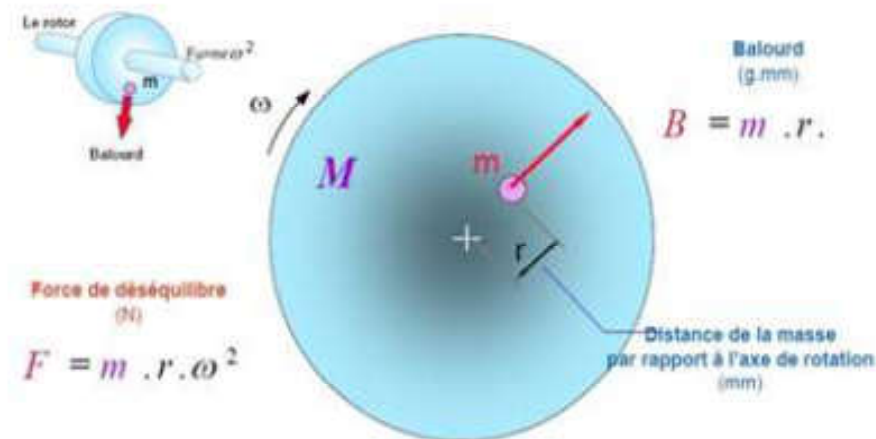


Fig. IV.8 Modélisation d'un balourd.

IV.10. Les causes du balourd

Les causes principales peuvent être classées en quatre groupes d'origine toute pièce :

- Défauts de conception : Tolérance trop large sur la cotation des pièces (excentricité, jeu, etc...), Asymétrie de rotation (vilebrequin, mandrin, etc. ...).
- Défauts de fabrication : Mauvaise homogénéité des matériaux utilisés (soufflure, inclusions, etc...), Tolérances d'usinage (circularité, concentricité,)
- Défauts de montage : Asymétrie du montage des pièces (montage par clavette, goupilles, etc...), Pièces mal fixées ou montées avec jeu.
- Défauts de service : Usure due à un enlèvement de matière (meule), modification de la masse par dépôt (encrassement, corrosion, etc...), influences thermiques [26].

IV.11. L'équilibrage statique des rotors

Pour éliminer le balourd, il faut rétablir une répartition homogène des masses par ajout ou par enlèvement de matière. Il y a un type d'équilibrage de rotor appelé équilibrage statique, On obtient cependant une meilleure précision si le balourd est déterminé pendant la rotation.

Soit sur machine à équilibre, soit en service avec un appareil de mesure portable. Pour la compensation, on fera une correction de masse dans un plan radial du rotor, de préférence dans le plan de centre de masse [27]. Quand le balourd est suffisamment important, on peut corriger le déséquilibre statique sans avoir à faire tourner le rotor. En effet, il suffit de poser le disque sur une paire de couteaux parallèles pour que la "partie lourde" du rotor se trouve dans la même position que dans l'exemple montré à la figure IV.9.

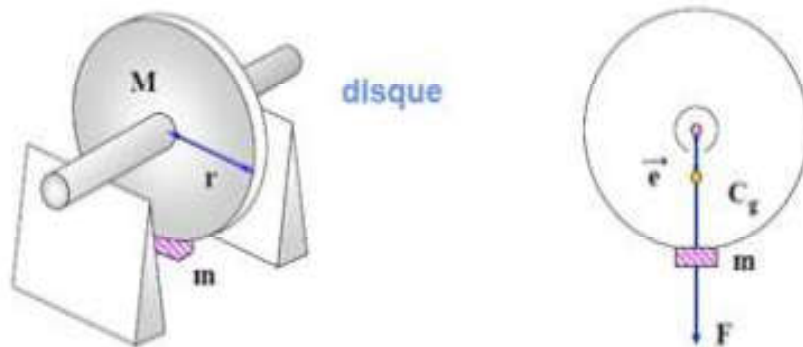


Fig. IV.9 Balancement d'un rotor

IV.12. Préparation et réalisation d'un équilibrage

Pour faciliter la tâche de réalisation d'équilibrage, qui représente parfois une véritable terre inconnue pour certaines sociétés ou certains techniciens, le document de la norme ISO 2953 présente un recueil d'informations permettant de mieux décrire les opérations. Ce document peut être utilisé pour mettre en gamme et préparer les différentes opérations liées à l'équilibrage :

- Le choix de la bonne machine à équilibrer parmi les équipements de l'atelier.
- Une sous-traitance de l'opération d'équilibrage à d'autres sociétés.
- L'achat d'une machine à équilibrer adaptée.

Dans cette optique, on distingue les rotors avec et sans arbre propre, et les machines à équilibrer correspondantes (horizontales ou verticales).

Conclusion générale

Les pompes centrifuges sont des turbo machines qui nécessite beaucoup de maintenance et de réparation, la cavitation et l'une des problèmes qui causent beaucoup de dégâts au niveau des aillaites, tels que ; l'érosion, arrachement métallique.

Pour réparer l'effet de la cavitation, on a présenté l'actuel travail qui consiste à traiter ce phénomène complexe par la méthode de revêtement métallique, ce qui implique beaucoup de techniques en les résumant en trois étapes principales :

- Revêtement métallique
- Le polissage
- Equilibrage des ailettes traitées

Comme suite à cette étude, on propose une investigation sur la cavitation afin trouver des solutions mécanique à ce phénomène.

Références bibliographique

- [1] Pierre-Louis Viollet, *Histoire de l'énergie hydraulique : moulins, pompes, roues et turbines de l'Antiquité au XXème siècle*, page 182, Presse des ponts, 2005.
- [2] JEAN POULAIN, *Pompes rotodynamique*, Technique de l'ingénieur, 1996.
- [3] PASCAL BIGOT , *Les pompes* , cours CIRA, 2000.
- [4] Vincent POMERO, Dominique BONNEAU, *Le phénomène de cavitation*, 2002.
- [5] LIONEL BERGERAT, *Développement d'une méthode numérique compressible pour la Simulation de la cavitation en géométrie complexe*. Thèse doctorat de L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris, 2012.
- [6] M. CALRIER, *Machines hydrauliques*, ENGRFE France, 1968
- [7] René PERRET, *La cavitation : une introduction*,. Encyclopédie de l'énergie, 2016
- [8] Jean François Lapray cours pompes centrifuge, *hélico-centrifuges et axiales : cavitation*, l'école supérieure d'hydraulique université de Grenoble, 2012.
- [9] YVES LECOFFRE, *La cavitation traqueuse de bulles*, durand-28600, Paris ,1994.
- [10] www.wikipedia.com
- [11] Faouzi Ben Salaheddine, Houda Ouahrani, *Mise au point d'un banc d'essai d'une motopompe centrifuge*, Mémoire de Master, Université de Bejaïa, 2018.
- [12] FEDSM, *Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Virtual conference, Online, San Francisco, USA, 2020.
- [13] Wim De Mesmaeker, *Les 10 principaux destructeurs de pompes et leur prévention*, KSB SupremeServ Belgium S.A, 2014.
- [14] Yves LECOFFRE, *La cavitation- Traqueurs de bulles*, Edition Hermes, Parid, 1994
- [15] R. BENSIMON, *les matériaux métalliques, tome III, la corrosion des matériaux métalliques*, pages 49, 50.

[16] Jean Pierre FRANC et al, *La cavitation : Mécanismes physiques et aspects industriels*, PU, Grenoble, 1995.

[17] <http://www.cefracor.org/doc/cour-05.pdf>

[18] W. Huppertz et H. Meissner, *Effect of the temperature and salt content of sea water on the corrosion behavior of Aluminium*. *Werstoffe and Korrosion*, Vol.38, 709-710, 1987.

[19] Moumene SALAH EDDINE, *Etude et maintenance des pompes centrifuges industrielles*, Thèse de Mater, Université de Annaba, 2019.

[20] Yan Mei JIANG, *Pulvérisation cathodique assistée par ordinateur*, Thèse de Doctorat, Paris-Sud, 1992.

[21] Abdelwahab GHEZAL, Djamel Eddine KASSOUS, *Elaboration d'une poudre à base l'alliage de zinc comme renfort d'une peinture organique*, Mémoire de master, Université de Blida, 2017.

[22] André Babusch et al, *Le manual des pompes ; Principes fondamentaux de la technologie des pompes*, WILO, Durtmond, 2005.

[23] P. GUITON, *Cavitation dans les pompes*, La houille blanche, N° 6, Paris, 1962.

[24] Hatto Schneide, *Technique d'équilibrage*, Traduction de les 6 éditions allemandes, Springer-Verlag France, p 124- 07-32-305 et198, Paris 2006.

[25] M. Jean-Pierre SAGUIN, *Equilibrage & Diagnostic*, Manuel SCHENCK, page 7. Darmstadt Allemand,. 1991.

[26] Nassim Gougam, *Equilibrage dans les Conditions de Service*, Brüel & Kjæ, p 04, France, 2002.

[27] Bruel Kjaer Vibro, *Equilibrage dans les conditions de service, Document Manuel Machine Equilibrage*, p 06, France, 2002.