



UNIVERSITÉ DE KINSHASA



FACULTE DE PETROLE ET GAZ

B.P. 127-KINSHASA



Etude du fonctionnement d'un groupe motopompe dans une station de pompage



Altesse BENGÉ KADE

Travail de fin de cycle en vue de l'obtention du titre de Gradué
en pétrole et gaz

Directeur : Dr. Prof. Richard BOPILI



Année académique 2014-2015

Table des illustrations

Figure 1: écoulement laminaire dans un tube cylindrique (V = vitesse du fluide stratifié).....	5
Figure 2: écoulement turbulent dans un tube cylindrique (V = vitesse du fluide stratifié).....	6
Figure 3: diagramme de Nikuradse.....	8
Figure 4: Diagramme de Moody.....	9
Figure 5: Abaques Hazen William.....	11
Figure 6: Conduites à section rectangulaire.....	12
Figure 7: Conduites à section circulaire.....	13
Figure 8: Groupe motopompe décrit.....	14
Figure : 9 Pompe volumétrique.....	17
Figure 10:Exemple de fonctionnement d'une pompe alternative à double effet.....	18
Figure 11:Image de vue interne d'une pompe centrifuge.....	19
Figure 12: Schéma en coupe d'une pompe centrifuge monocellulaire en porte à faux.....	20
Figure 13: Vue externe pompe monocellulaire.....	20
Figure 14: Pompe procédé, une seule roue en porte à faux.....	21
Figure 15: Vue extérieure d'une pompe pattes à l'axe.....	21
Figure 16: Vue extérieure d'une pompe.....	22
Figure 17: Vue en coupe d'une pompe verticale.....	22
Figure 18: Pompe Graphite.....	23
Figure 19: Pompe plastique.....	23
Figure 20: Vues écorchée et extérieure d'une pompe de puit.....	24
Figure 21: Vue extérieure d'une pompe à canal latéral.....	25
Figure 22: Différence de pression en hauteur de liquide.....	26
Figure 23:La charge entre deux points reste constante.	27
Figure 24:Transfert avec une pompe.....	28
Figure 25: Courbe d'un réseau.....	29
Figure 26: Courbe caractéristique d'une pompe (allure tombante).....	30
Figure 27: Point de fonctionnement d'une pompe.....	31
Figure 28: Roue attaquée par la cavitation.....	32
Figure 29: Schéma simplifié du circuit.....	33
Figure 30: (N.P.S.H) dispo et (N.P.S.H) req.....	35
Figure 31: Moteur électrique.....	38
Figure 32: De manière mécanique, le moteur électrique.....	38
Figure 33:Machine asynchrones décomposé.....	41
Figure 34: Croquis explicatif de la règle des trois doigts de la main droite.....	42
Figure 35: Couple en fonction du rapport : n/n_0	44
Figure 36: graphique représentant les allures du courant et du couple lorsque notre machine se comporte comme moteur ou générateur.....	45
Figure 37: Caractéristiques d'un moteur asynchrone classique (Source : http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11529529).....	45
Figure 38: Pilotage en fréquence et en tension (Source : http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11529529).....	47
Figure 39: Illustration 1.....	48
Figure 40: illustration 2.....	50
Figure 41: Illustration 3.....	51

Avant-propos

La production des produits pétroliers ne peut en aucun jour se passer du transport ainsi que de l'entreposage.

Pour notre travail de fin de cycle de graduat, s'appuyant sur notre cours d'hydraulique, d'électrotechnique et bien plus de la physique comme outil indispensable pour l'étude des phénomènes, des systèmes et des principes et lois les gouvernant, il nous a semblé enrichissant d'étudier le comportement du système Moteur électrique, pompe centrifuge et tuyauterie.

La quantification de l'énergie mécanique nécessaire à investir via un moteur dans une pompe centrifuge pour avoir de l'énergie hydraulique nécessaire à la pompe afin de déplacer les liquides d'un lieu à un autre, est le grand intérêt que nous accordons à ce travail.

Introduction

Le gisement de pétrole brut et de gaz naturel a donné place à l'inspiration des moyens de transport de ces produits vers les marchés, inspiration aboutie et se matérialisant par la mise en place des réseaux pipelinier au cours des années.

Et les distances étaient un bénéfice aux côtés d'un notre gain très important celui de l'implantation de ces pipelines là où les locomotives ne pouvaient accéder.

C'est l'avènement du transport par canalisation et conduisant à la définition d'un pipeline comme mode de transport des matières fluides réalisé au moyen des conduites constituant en général un réseau.

Toutefois il est aberrant de croire que ce transport sera assuré par l'effet de la gravité si l'on veut vaincre tous les reliefs mais aussi les pertes des charges dues au frottement du produit avec les parois internes de la canalisation ou encore à des singularité.

Sur ce, une puissance mécanique convertie par un dispositif en puissance hydraulique est nécessaire. Et, un autre dispositif en amont devra recevoir de l'énergie électrique qu'il convertira en mécanique. Voilà la nécessité de deux dispositifs dont la pompe et le moteur électrique ou thermique.

C'est ainsi que le dimensionnement d'un système moteur, pompe centrifuge et tuyauterie de canalisation sera la clé du présent travail.

Ce dernier sera subdivisé en trois chapitres mis à part l'introduction et la conclusion, lesquels porteront respectivement sur les généralités sur l'hydraulique, l'ensemble moteur électrique (thermique) et pompe autrement appelé groupe électropompe (motopompe) enfin l'étude du fonctionnement du groupe motopompe.

1. Généralités sur l'hydraulique

1.1. Historique

Le mot *hydraulique* vient du mot grec *hydraulikos* qui vient d'*orgue à eau* qui dérive à son tour d'eau et de tuyaux.

Dans le monde méditerranéen, les premiers grands maîtres de cette science furent Héron d'Alexandrie et Ctésibios. Ce dernier perfectionna la Clepsydre, une horloge à eau fonctionnant sur le principe d'un écoulement régulier au fil du temps. Aussi il inventa un monte-charge et une orgue hydraulique ; l'hydraule.

De manière générale le fluide utilisé dans les systèmes hydrauliques est incompressible. Une pression est appliquée au fluide par l'intermédiaire d'un piston dans un cylindre provoquant une pression équivalente sur un autre piston qui délivre l'énergie. Si la surface du second piston est supérieure à celle du premier, alors la force exercée par le second piston est supérieure à celle appliquée au premier piston. C'est le principe de la presse hydraulique, qui a été découvert en 1650 par Blaise Pascal et mis en application en 1785 par Joseph Bramah. Un des fondateurs de l'hydraulique moderne a été Benedetto Castelli, élève de Galileo Galilei. Ainsi l'hydraulique est la science, la technique des liquides en mouvement.¹

1.2. Définitions

- L'hydraulique est en fait une branche de la physique qui étudie les fluides sous pression.
- Un fluide est un milieu matériel continu, déformable et qui peut s'écouler. L'état fluide englobe donc deux des trois états de la matière : l'état liquide et l'état gazeux. Habituellement étudiés, les liquides et les gaz sont isotropes, c'est-à-dire que leurs propriétés sont identiques dans toutes les directions de l'espace. La différence majeure entre les deux fluides réside au niveau de l'incompressibilité que les liquides présentent et que les gaz n'en possèdent.

Ainsi, l'hydraulique se consacre aux liquides alors que l'aéraulique s'occupe des gaz.

¹ WikiTaxi 1.3.0 | wikipedia-fr.taxi | hydraulique

1.3. Régimes d'écoulement en charge des fluides dans les tubes.

Les expériences réalisées par Reynolds en 1883 lors de l'écoulement d'un liquide dans une conduite cylindrique rectiligne dans laquelle arrive également un filet de liquide coloré, ont montré l'existence de deux régimes d'écoulement : régime laminaire et régime turbulent.²

1.3.1 Description des types d'écoulement

1.3.1.1 L'écoulement laminaire

Dans ce type d'écoulement, le fluide se comporte comme s'il se déplaçait en un ensemble concentrique de cylindres minces, imbriqués les uns dans les autres. En raison de la viscosité du fluide, le cylindre près de la paroi est stationnaire, tandis que celui qui se trouve au centre du tuyau se déplace avec la plus grande vitesse. Il n'y a pas de mélange entre les couches de fluide, et la vitesse (V) ne pulse pas³. (figure1) (Source : Mécanique des fluides Notions scientifiques de base)

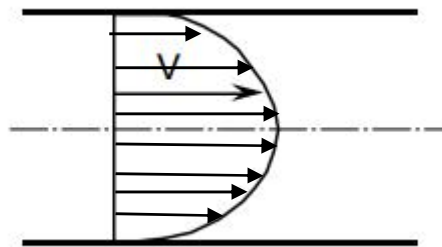


Figure 1: écoulement laminaire dans un tube cylindrique (V = vitesse du fluide stratifié)

1.3.1.2 L'écoulement turbulent

Il est caractérisé par un mélange aléatoire des couches de fluide. À cause de ce mélange, la distribution des vitesses est beaucoup plus uniforme le long de la section transversale du conduit. Le mélange a un effet positif sur le transfert de chaleur. Par contre, le mélange se traduit par la pulsation de la vitesse et de la pression. Ces pulsations peuvent être transférées à l'ensemble de la tuyauterie et à l'équipement, et provoquer des vibrations⁴. (Source : Mécanique des fluides Notions scientifiques de base)

² R.B Hamouda (2008) Tunis, Notions de mécanique des fluides : cours et exercices

³ Mécanique des fluides Notions scientifiques de base

⁴ Idem

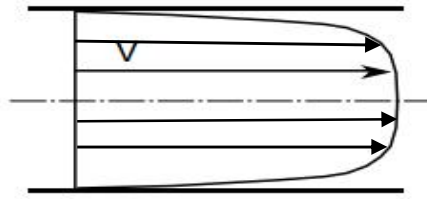


Figure 2: écoulement turbulent dans un tube cylindrique (V = vitesse du fluide stratifié)

Notons qu'en approfondissant les études sur les écoulements turbulents les conclusions ont été concluantes. Il existe encore une subdivision entre les écoulements turbulents lisses et les écoulements turbulents rugueux. La limite entre ces différents types d'écoulements est évidemment difficile à appréhender.

En utilisant divers fluides à viscosités différentes et en faisant varier le débit et le diamètre de la canalisation, Reynolds a montré que le paramètre qui permettait de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent est un nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds donné par l'expression suivante:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (1.1)$$

- V : Vitesse moyenne d'écoulement à travers la section considérée en (m/s)
- d : Diamètre de la conduite ou largeur de la veine fluide en (m).
- ν : Viscosité cinématique du fluide (m^2/s)

A titre indicatif:

Si $2000 < Re$ l'écoulement est laminaire

Si $2000 > Re$ l'écoulement est turbulent :

- Lisse, si $2000 < Re < 100000$
- Rugueux, si $Re > 100000$

1.4. Pertes de charges dans les conduites pleines

Les pertes de charges correspondent à l'énergie dissipée par le frottement du liquide. Cette énergie doit être compensée afin de permettre au liquide de se déplacer. Physiquement, elles correspondent à une perte de pression dans une canalisation. On les exprime donc sous la forme d'une variation de pression (ΔP) ; bien qu'elles soient en fait représentative d'une dissipation d'énergie et qu'elles apparaissent dans l'équation de Bernoulli comme une hauteur de colonne d'eau. Il existe deux types de pertes de charge :

- Les pertes de charge dites régulières qui interviennent dans toutes les canalisations à cause de la présence de paroi.
- Les pertes de charge singulière qui interviennent lors d'un changement de géométrie de la canalisation.

1.4.1. Les pertes de charge régulières

Comme nous l'avons vu, les pertes de charge régulières existent dans toutes les canalisations, elles sont la conséquence de la perturbation du fluide par la paroi. Ainsi la perturbation peut se caractériser par le nombre de Reynolds Re . Donc plus Re est élevé plus le fluide est perturbé et plus les pertes de charge sont importantes.

Les pertes de charge vont donc suivre différent modèle suivant le régime du fluide et la rugosité de la canalisation. Ces deux notions sont introduites dans le calcul des pertes de charges par le coefficient λ . On a alors :

$$\Delta P = \lambda \times \frac{l}{D} \times \frac{V}{2} \times \rho \quad (1.2)$$

Avec l : Longueur du tube en (m),

ρ : Masse volumique du fluide en (kg/m^3)

λ : Facteur de perte de charge répartie (sans dimension)

V : Vitesse du fluide en (m/s)

D : Diamètre de la conduite (m)

Remarque : Si la section de la canalisation n'est pas circulaire, on calcul un diamètre hydraulique équivalent.

Détermination de λ en fonction du régime et de la rugosité.

A - Pour **$Re < 2100$** (régime laminaire)

Les pertes de charges sont dans ce cas assez simples à calculer car elles ne dépendent pas de la rugosité de la canalisation.

Formule de Hagen Poiseuille :

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (1.3)$$

Elle est utilisée dans la zone 1 (figure3)

B - Pour $2000 < Re < 10^5$ sans rugosité

On utilise dans ce cas la relation de Blasius, utilisable dans la zone 3 (figure3):

$$\lambda = \frac{0.316}{Re^{1/4}} = (100Re)^{-1/4} \quad (1.4)$$

Le tableau de Nikuradse, dans lequel se trouvent ces différentes zones :

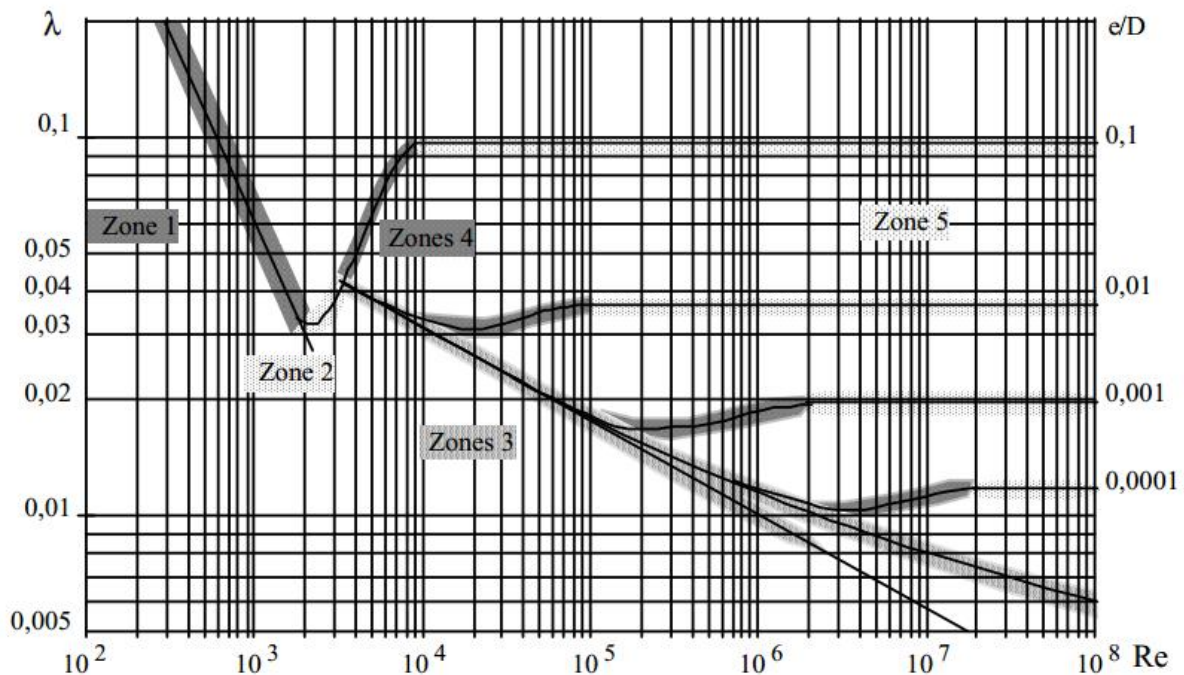


Figure 3: diagramme de Nikuradse

L'ensemble des résultats peut être reporté sur un graphique appelé diagramme de Moody (figure 4) qui n'est que la représentation de la formule empirique de Colebrook

La formule de Colebrook

Pour **Re > 5000**

Il est possible d'utiliser la formule de Colebrook un peu plus complexe, qui prend en compte la rugosité de la canalisation. Elle est utilisée dans les zones 3, 4 et 5 du diagramme de Nikuradse (figure3).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3.7D} \right) \quad \text{Avec } \varepsilon : \text{la rugosité} \quad (1.5)$$

Remarque :

- Si le tube est lisse : $\frac{1}{\lambda^2} = 2 \log (Re \sqrt{\lambda}) - 0.8 \quad (1.6)$

- Si Re est très élevé le terme $\frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}}$ devient négligeable donc

$$\frac{1}{\lambda^2} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.7D} \right] \quad (1.7)$$

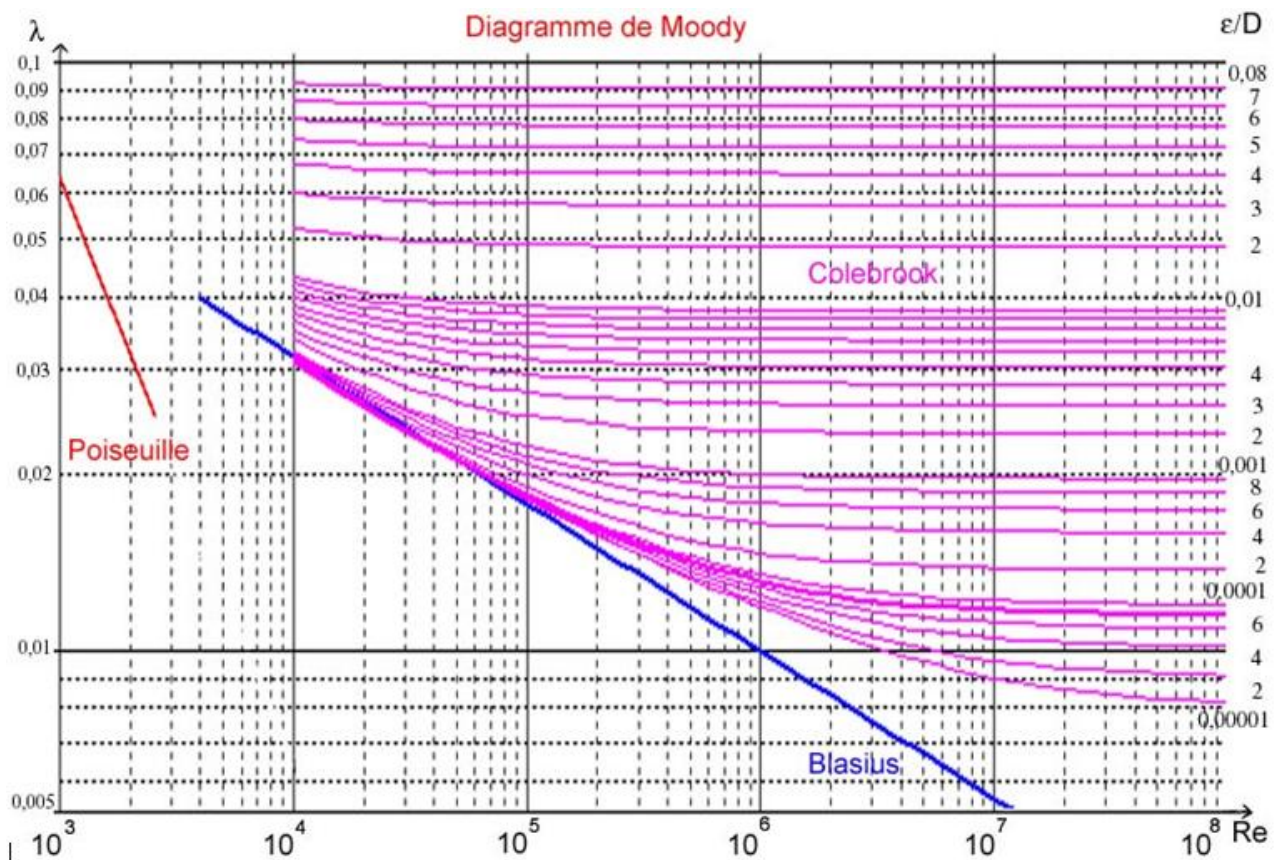


Figure 4: Diagramme de Moody

Les formules empiriques

Il existe une panoplie de formules empiriques. Elles présentent toutes l'inconvénient de n'être valables que dans le domaine où elles ont été établies. Parmi celles-ci les plus fréquemment utilisées sont :

Formule de Chézy

Cette formule est tirée de celle de Blasius. Avec C le coefficient de Chézy, V la vitesse et R_h le rayon hydraulique. Cette dernière s'écrit comme suit :

$$V = C \sqrt{R_h \cdot J} \quad (1.8)$$

C coefficient de Chézy dépend de la nature de la paroi (100 pour la fonte lisse, 40 pour les conduites rugueuses).

Formule de Manning-Strickler

$$V = K R_h^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (1.9)$$

Avec V la vitesse, $K = \frac{1}{n}$; K coefficient de Strickler et n coefficient de Manning. Cette formule est principalement utilisée pour les gros diamètres (assainissement). Le coefficient K dépend de la nature des parois et l'on retiendra comme ordre de grandeur de K :

K = 20 à 40, tunnel rocheux en mauvais état

K = 80 à 100, béton lisse, fonte revêtue.⁵

Il est à noter qu'entre la formule de Chézy et celle de Manning, existe une relation : $C = K \cdot R_h^{1/6}$. C dépend donc de R_h et c'est cela qui gêne lorsqu'on veut appliquer Chézy aux écoulements à surface libre où R_h dépend de Q, le débit.

Formule de Hazen William

Cette formule en usage encore dans les pays anglo-saxons s'appuie sur des travaux anciens (1905 à 1933). Elle présente l'avantage de permettre l'évaluation de J de façon directe :

$$J = 6.84 \left(\frac{V}{C_{HW}} \right)^{1.85} D^{-1.17} \quad (1.10)$$

(V est la vitesse en m/s, D le diamètre en m, et C_{HW} le coefficient de Hazen William). Il est possible de retrouver les pertes de charge de la formule de Colebrook en faisant varier C_{HW} en fonction du diamètre autour des valeurs allant de 95 à 137.

⁵ ELEMENTS D'HYDRAULIQUE GENERALE Par J.P. LABORDE

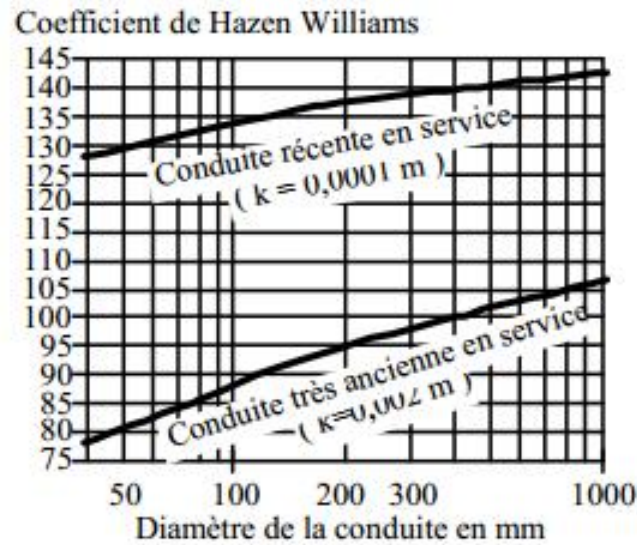


Figure 5: Abaques Hazen William

1.4.2. Les pertes de charge singulières dans les conduites

Contrairement aux pertes de charges linéaires qui sont proportionnelles à la longueur de la conduite, les pertes de charges singulières sont provoquées par des singularités de dimensions restreintes tels que changement de section, coude...

En écoulement turbulent, toutes ces pertes de charges se mettent sous la forme :

$$J = k \frac{v^2}{2g} \quad (1.11)$$

Où k est un coefficient sans dimension, caractérisant la singularité. Ces pertes de charge singulière présentent également la particularité d'être parfois non additives.

Chaque dérivation, coudes, clapets, bouches, volets d'air entraînent aussi des pertes de pression.

Elles peuvent être directement chiffrées (cas des bouches) en Pa, calculées à l'aide des relations, ou bien en utilisant des valeurs tabulées⁶ :

⁶ Sciences et technologies de l'industrie et du développement durable. Module EE.5.1

ETUDE DU FONCTIONNEMENT D'UN GROUPE MOTOPOMPE DANS UNE STATION DE POMPAGE

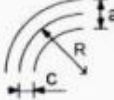
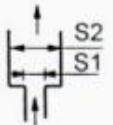
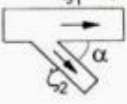
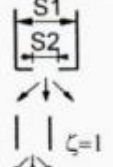
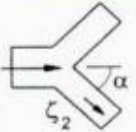
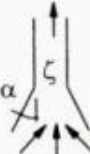
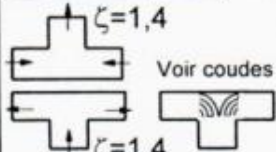
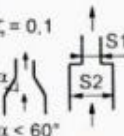
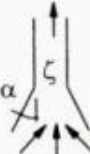
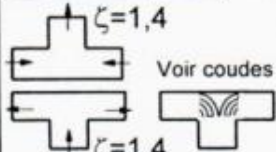
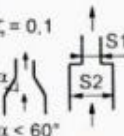
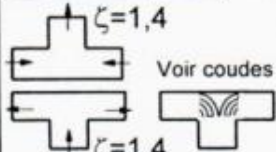
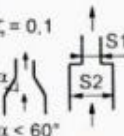
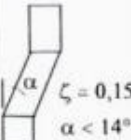
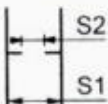
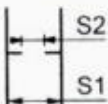
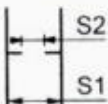
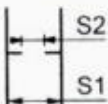
Conduits à section rectangulaire (b = largeur ; a = hauteur)													
	b/a	0,25	0,5	1,0	4,0		C/a	0,25	0,5		S2/S1	ζ	
	R/a						R/a						
	0	1,3	1,5	1,5	1,4		0,5	0,4	0,5		0,1	1,0	
	0,5	1,3	1,1	1,0	1,0		0,75	0,25	0,3		0,2	0,7	
	0,75	0,6	0,5	0,4	0,4		1,0	0,2	0,2		0,4	0,4	
1,0	0,4	0,3	0,25	0,2	2,0	0,1	0,1	0,6	0,2				
1,5	0,2	0,15	0,1	0,1				0,8	0,1				
	α	ζ_2		α	ζ		R/D	ζ_2		S1	S2	ζ	
	15°	0,1		15°	0,1		0,5	1,0		0,0	2,5		
	30°	0,3		30°	0,3		0,75	0,5		0,2	2,5		
	45°	0,5		45°	0,7		1,0	0,25		0,4	2,3		
	60°	0,7		60°	1,0		1,5	0,15		0,6	2,0		
	90°	1,3		90°	1,4		2,0	0,1		0,8	1,6		
 <td>15°</td> <td>0,1</td> <td rowspan="6"><td>15°</td><td>0,5</td><th rowspan="6"></th><th>$\zeta=1,4$</th><th>ζ_2</th><th rowspan="6"></th><th>$\zeta=0,1$</th><th>S1</th><th>S2</th><th>ζ</th></td>	15°	0,1	 <td>15°</td> <td>0,5</td> <th rowspan="6"></th> <th>$\zeta=1,4$</th> <th>ζ_2</th> <th rowspan="6"></th> <th>$\zeta=0,1$</th> <th>S1</th> <th>S2</th> <th>ζ</th>	15°	0,5		$\zeta=1,4$	ζ_2		$\zeta=0,1$	S1	S2	ζ
	30°	0,3		30°	0,3		Voir coudes			0,2	0,45		
	45°	0,7		45°	0,3					0,4	0,3		
	60°	1,0		60°	0,5					0,6	0,2		
	90°	1,4		90°	0,7					0,8	0,1		
	 <td>α</td> <td>ζ</td> <td rowspan="9"><td>α</td><td>ζ<th rowspan="9"></th><th>R/a</th><th>ζ</th><th rowspan="9"></th><th>diaphragme</th><th>S2</th><th>S1</th><th>ζ</th></td></td>	α		ζ	 <td>α</td> <td>ζ<th rowspan="9"></th><th>R/a</th><th>ζ</th><th rowspan="9"></th><th>diaphragme</th><th>S2</th><th>S1</th><th>ζ</th></td>		α	ζ <th rowspan="9"></th> <th>R/a</th> <th>ζ</th> <th rowspan="9"></th> <th>diaphragme</th> <th>S2</th> <th>S1</th> <th>ζ</th>			R/a	ζ	
5°		0,15	5°	0,15		0,2	1,0	1	0				
10°		0,25	10°	0,25		0,4	0,8	0,9	0,1				
15°		0,4	15°	0,4		0,6	0,9	0,8					
30°		0,8	30°	0,8		0,8	1,1	0,7	1				
45°		0,9	45°	0,9		1,0	1,2	0,6	2				
60°		1,0	60°	1,0				0,5	3				
								0,5	5				
								0,4	8				

Figure 6: Conduites à section rectangulaire

ETUDE DU FONCTIONNEMENT D'UN GROUPE MOTOPOMPE DANS UNE STATION DE POMPAGE

Conduits à section circulaire (diamètre = D)											
	R/D	ζ		R/D	ζ		R/D	ζ		α	ζ
	0,5	0,9		0,5	1,3		0,5	1,1		15°	0,1
	0,75	0,45		0,75	0,8		0,75	0,6		30°	0,2
	1,0	0,35		1,0	0,5		1,0	0,4		45°	0,5
	1,5	0,25		1,5	0,3		1,5	0,25		60°	0,7
	2,0	0,2		2,0	0,25		2,0	0,2		90°	1,3
	α	ζ_2		R/D	ζ_2		R/D	ζ_2		α	ζ_2
	15°	0,1		0,5	1,3		0,5	1,2		15°	0,1
	30°	0,3		0,75	0,9		0,75	0,6		30°	0,3
	45°	0,5		1,0	0,8		1,0	0,4		45°	0,7
	60°	0,7		1,5	0,6		1,5	0,25		60°	1,0
	90°	1,3		2,0	0,5		2,0	0,2		90°	1,4
	$\zeta=1,4$	$\zeta=0,9$		α	ζ		R/D	ζ		d/D	ζ
	$\zeta=1,4$	$\zeta=0,5$		0°	0,9		0,2	0,2		0,1	2,5
				15°	0,5		0,5	0,1		0,2	2,5
				30°	0,3		0,8	0,05		0,4	2,5
				45°	0,3					0,6	2,3
				60°	0,4					0,8	1,9
				90°	0,5					0,9	1,5
	d/D	ζ		α	ζ		d/D	ζ		d/D	ζ
	0,1	1,0		5°	0,15		0,1	0,6		1	0
	0,2	0,9		10°	0,25		0,2	0,5		0,9	0,1
	0,4	0,7		15°	0,4		0,4	0,4		0,8	1
	0,6	0,4		30°	0,8		0,6	0,3		0,7	2
	0,8	0,2		45°	0,9		0,8	0,2		0,6	5
				90°	1,0					0,6	8

Figure 7: Conduites à section circulaire

2. Le Groupe Motopompe

2.1. Définition

Un groupe motopompe est un ensemble composé d'un moteur électrique ou thermique entraînant une pompe hydraulique. Cet ensemble peut être fixe ou mobile (sur remorque ou sur camion).

Un modèle particulier de groupe motopompe est la motopompe utilisée par les sapeurs-pompiers. Il s'agit d'une pompe centrifuge entraînée par un moteur thermique ; l'ensemble se doit d'être particulièrement léger (~200 kg) et transportable.

2.2. Description

Dans sa définition le groupe motopompe dégage ses deux principales parties, celle qui est thermique ou électrique, le moteur ; et celle hydraulique, la pompe. (Source: Exploration et Production Les Équipements Les Pompes (Support de Formation: EXP-PR-EQ070-FR) Total)

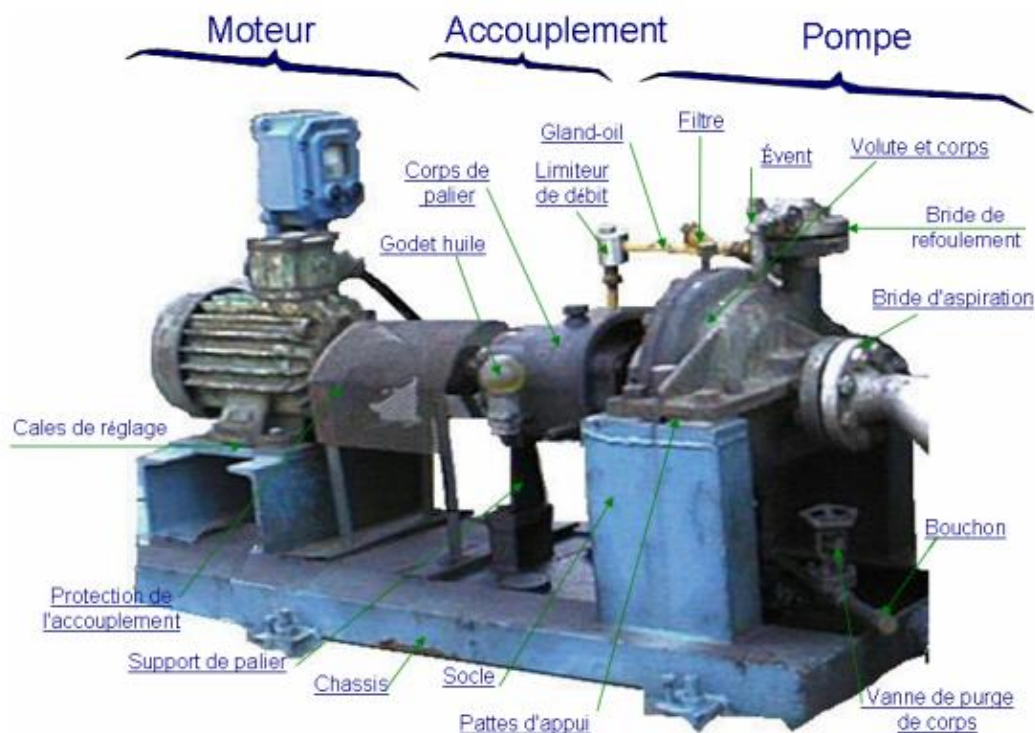


Figure 8: Groupe motopompe décrit

Les deux parties sont reliées par un arbre de transmission nommé accouplement sur la figure ci-dessus.

2.2.1. La partie hydraulique : La pompe

2.2.1.1. Historique

Le principe de la pompe est apparu dès que l'homme a su construire un habitat artificiel pour se protéger des éléments naturels. Le besoin en eau nécessaire à sa survie l'obligea à trouver un système de transport de cette eau, du puits ou de la rivière à son habitat. Il utilisa d'abord simplement l'énergie développée par ses muscles pour transporter l'eau à l'aide de récipients naturels ou artificiels. Plus la contenance et la distance étaient grandes, plus l'énergie dépensée n'était importante. Jusqu'au début de l'ère industrielle (fin du XVIII^e siècle), les pompes ne servirent que pour le transfert de l'eau. L'ancienne pompe à godets fut inventée en Chine au 1^{er} siècle ap. J.-C.

Les principes des pompes à piston, des pompes centrifuges et des pompes à vide sont découverts à cette époque. De manière générale, durant la grande époque de la culture gréco-romaine, de nombreux principes de physique et d'hydraulique sont découverts, mais pas forcément développés. Ctésibios se heurte notamment à la difficulté de concevoir des cylindres et pistons suffisamment réguliers pour jouer l'un dans l'autre sans accrocs. Toutefois les réalisations mettant en œuvre ces principes ne servent cependant souvent qu'à la démonstration des calculs mathématiques (jeux d'intellectuels) ou aux divertissements (fontaines, jeux d'eau, tours de magie etc.).

Les Grecs et les Romains furent les premiers à utiliser des systèmes rotatifs pour véhiculer l'eau. On doit aussi à cette époque l'invention des écluses (afin d'éviter les vitesses d'écoulement trop rapide) et les dispositifs anti-béliers sur les conduites fermées, afin d'éviter l'éclatement des conduites.⁷ Les ancêtres de la pompe d'aujourd'hui sont les machines élévatrices, le chadouf, la vis d'Archimède, la chaîne à godets, la roue persane, la pompe à bras de Ctésibios. Il a fallu attendre la fin du XVIII^e siècle pour que les premières pompes soient réellement construites et utilisées de façon industrielle. Pendant ce siècle Les moulins à eau et à vent furent les premiers dispositifs à fournir une énergie « non musculaire » relativement abondante. Les pompes mues par une machine à vapeur couramment appelées « pompe à feu » étaient les dernières durant ce siècle.

C'est au cours du XIX^e siècle qu'une seconde évolution dans la technique des pompes fit son apparition, cette fois grâce à l'énergie électrique.

⁷ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pompe#Histoire>

Celle-ci permet le développement des pompes à principe rotatif, turbines et pompes centrifuges. En fait, depuis près d'un siècle, aucun grand principe de pompe n'a été découvert. Seuls les matériaux utilisés et la précision d'usinage permirent aux pompes d'évoluer vers de meilleurs rendements, de plus grands débits et de plus hautes pressions. Le seul fait d'utiliser un liquide pour la fabrication d'un produit implique nécessairement l'utilisation de pompes.

2.2.1.2. Définition

Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide. C'est donc un appareil destiné à déplacer les fluides (liquides et gaz).

2.2.1.3. Utilisation

Les pompes, qu'elles soient centrifuges ou volumétriques sont utilisées pour véhiculer des liquides de toutes sortes : eau, hydrocarbures, liquides plus ou moins visqueux, produits chimiques ou toxiques tel que le benzène. Cependant, elles peuvent véhiculer du gaz dans le cas des pompes à vide tel que les pompes rotatives à anneaux liquide.

Aussi, c'est souvent la composition de l'effluent qui déterminera le type de pompe à utiliser.

L'exemple ci-dessous nous le confirme bien.

Si l'on observe le comportement d'une pompe fonctionnant dans des conditions identiques, c'est-à-dire même débit aspiré, même pression d'aspiration et même vitesse de rotation. Mais, avec des liquides de densités différentes ; butane (0.5), soude (1.2), eau (1).

Le tableau suivant indique les pressions lues aux manomètres de la pompe pour chaque liquide (source: Exploration et Production Les Équipements Les Pompes (Support de Formation: EXP-PR-EQ070-FR) Total)

Produit pompé (densité)	Pression aspiration (bar relatif)	Pression refoulement (bar relatif)	ΔP (bar)
Butane = 0,5	10,3	14	3,7
Soude = 1,2	10,8	19,6	8,8
Eau = 1	10,7	18,2	7,5

Tableau 1: Différente pression liée au type du liquide

2.2.1.4. Typologie

2.2.1.4.1. Les catégories principales

Les pompes sont des appareils permettant un transfert d'énergie entre le fluide et un dispositif mécanique convenable. Suivant les conditions d'utilisation, ces machines communiquent au fluide soit principalement de l'énergie potentielle par accroissement de la pression en aval, soit principalement de l'énergie cinétique par la mise en mouvement du fluide.

L'énergie requise pour faire fonctionner ces machines dépend donc des nombreux facteurs rencontrés dans l'étude des écoulements :

- Les propriétés du fluide : masse volumique, viscosité, compressibilité.
- Les caractéristiques de l'installation : longueur, diamètre, rugosité, singularités ...
- Les caractéristiques de l'écoulement : vitesse, débit, hauteur d'élévation, pression ...

Devant la grande diversité de situations possibles, on trouve un grand nombre de machines que l'on peut classer en deux grands groupes :

Les pompes volumétriques

Les pompes centrifuges

Celles qui nous intéressent dans notre travail sont les pompes centrifuges.

I. Pompe volumétrique

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté. Leur fonctionnement repose sur le principe suivant:

Exécution d'un mouvement cyclique, pendant lequel un volume déterminé de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé à la fin.

Ce mouvement permet le déplacement du liquide entre l'orifice d'aspiration et l'orifice de refoulement.

On distingue généralement:

Les pompes volumétriques rotatives

Les pompes volumétriques alternatives



Figure : 9 Pompe volumétrique

Pompe rotative

Ces pompes sont constituées par une pièce mobile animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, qui tourne dans le corps de pompe et crée le mouvement du liquide pompé par déplacement d'un volume depuis l'aspiration jusqu'au refoulement.

Pompe alternative

Les volumes engendrés à l'aspiration et au refoulement, résultent du déplacement alternatif sur son axe, d'un piston ou d'un plongeur, à l'intérieur d'un cylindre.

Un temps est consacré au remplissage du cylindre (aspiration) et un temps est consacré à la vidange du cylindre (refoulement). Le débit du liquide engendré par la pompe sera donc discontinu.

Lorsque le piston se déplace pour créer les conditions d'aspiration, il faut que le remplissage s'effectue avec du liquide provenant de la tuyauterie d'aspiration. Il est nécessaire de fermer l'ouverture de refoulement et d'ouvrir l'arrivée d'aspiration⁸.

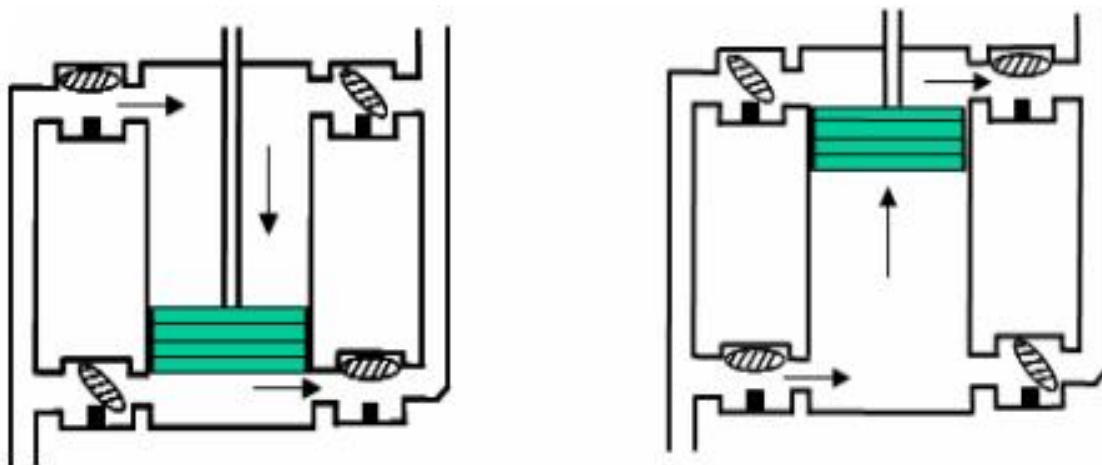


Figure 10: Exemple de fonctionnement d'une pompe alternative à double effet

Au contraire, lors du refoulement, il faut ouvrir vers le refoulement et fermer vers l'aspiration.

Ceci est réalisé par un jeu de clapets.

Une pompe volumétrique alternative comportera toujours des clapets d'aspiration et d'autres au refoulement.

⁸ Exploration et Production Les Équipements Les Pompes (Support de Formation: EXP-PR-EQ070-FR) Total

Les 2 principales catégories de pompes alternatives sont :

Simplex : 1 cylindre – simple effet

Duplex : 2 cylindres – double effet.

II. Les pompes centrifuges

Définition

Une pompe centrifuge est une machine rotative qui pompe un liquide en le forçant au travers d'une roue à aube ou d'une hélice appelée impulseur (souvent nommée improprement turbine). C'est le type de pompe industrielle le plus commun. Par l'effet de la rotation de l'impulseur, le fluide pompé est aspiré axialement dans la pompe, puis accéléré radialement, et enfin refoulé tangentiellement⁹.

Description

Les pompes centrifuges sont composées d'une roue à aubes qui tourne autour de son axe, d'un stator constitué au centre d'un distributeur qui dirige le fluide de manière adéquate à l'entrée de la roue, et d'un collecteur en forme de spirale disposé en sortie de la roue appelé volute.

Le fluide arrivant par l'ouïe est dirigé vers la roue en rotation qui sous l'effet de la force centrifuge lui communique de l'énergie cinétique. Cette énergie cinétique est transformée en énergie de pression dans la volute.



Un diffuseur à la périphérie de la roue permet d'optimiser le flux sortant et ainsi de limiter les pertes d'énergie.

Deux coupes de cette pompe sont proposées ci-dessous. La première est plutôt une image de vue interne (Figure 10) tandis que la deuxième est de type monocellulaire en porte à faux (Figure 11).

Figure 11: Image de vue interne d'une pompe centrifuge

⁹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Pompe_centrifuge

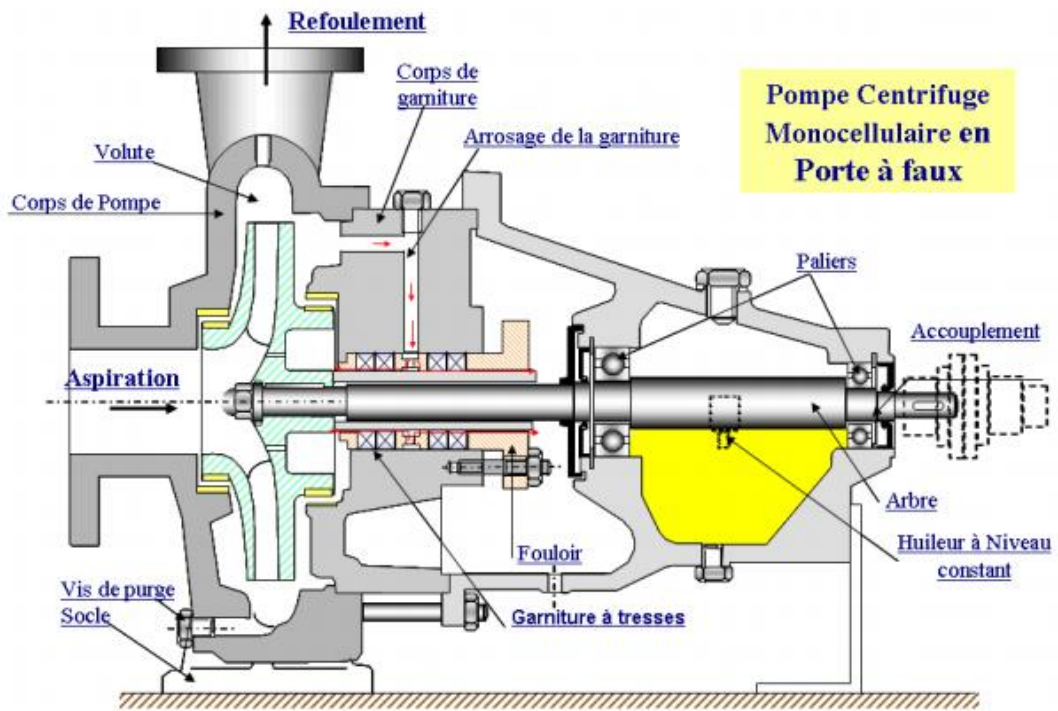


Figure 12: Schéma en coupe d'une pompe centrifuge monocellulaire en porte à faux

Types de pompes centrifuges

Pompe "Process" type AA (Aspiration Axiale)

On désigne ainsi les pompes n'ayant qu'une seule roue en porte à faux et dont l'axe de la tubulure d'aspiration est confondue avec l'axe de rotation de la machine.

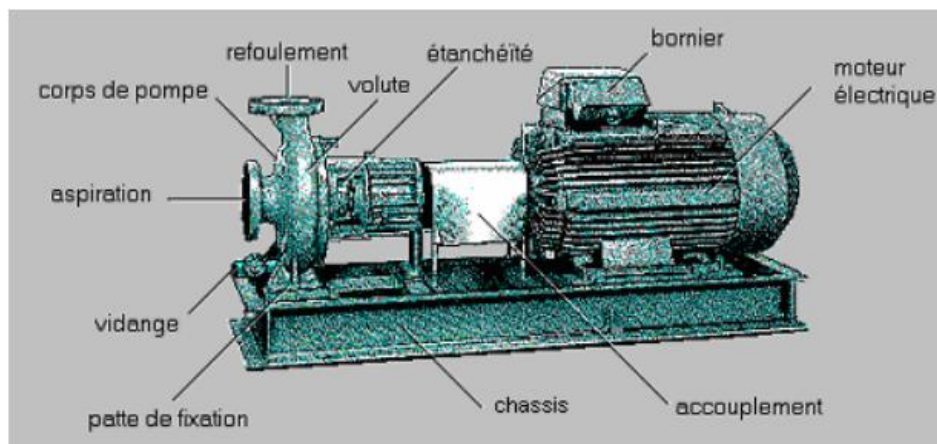


Figure 13: Vue externe pompe monocellulaire

La tubulure de refoulement est verticale.

Les pompes de procédé A-A. sont bien adaptées aux débits modérés et aux hauteurs d'élévation moyennes ou faibles.

ETUDE DU FONCTIONNEMENT D'UN GROUPE MOTOPOMPE DANS UNE STATION DE POMPAGE

Comme leur technologie est simple, leur prix est modéré, et leur entretien normalement faible.

Pompe "Process" type TT (Tubulaires au-dessus)

Ces pompes ont leurs tubulures d'aspiration et de refoulement, disposées verticalement, les brides étant dans le même plan horizontal. Il en existe à une et deux roues.



Figure 14: Pompe procédé, une seule roue en porte à faux

Pompes pattes à l'axe

Ces pompes de construction très robuste mais aussi très soignée, sont prévues pour des conditions de fonctionnement difficiles en continu, et peuvent travailler sans avarie à 25 bars et 450°C.

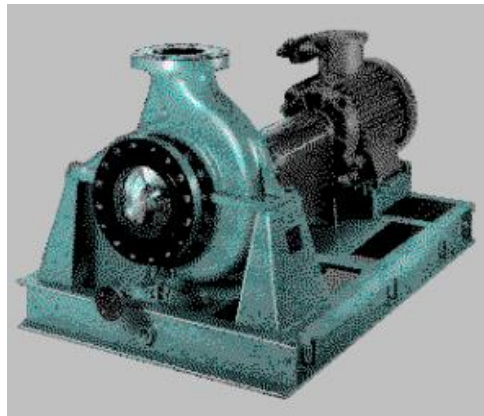


figure 15: Vue extérieure d'une pompe pattes à l'axe

Pompe monobloc

Les pompes « monobloc », dont font partie les pompes « in-line » et les pompes « immergées », sont des pompes dont le moteur est

ETUDE DU FONCTIONNEMENT D'UN GROUPE MOTOPOMPE DANS UNE STATION DE POMPAGE

positionné directement sur le carter de la pompe. L'alignement du moteur dépend uniquement de la précision des usinages.

L'ensemble est relié au sol uniquement par les pattes du corps de pompe. Le socle, n'ayant plus de rôle de guidage, est très simplifié ; il est même parfois remplacé pour les petites tailles de pompes en montage « in-line », par les tuyauteries elles-mêmes, qui jouent alors un rôle de support.

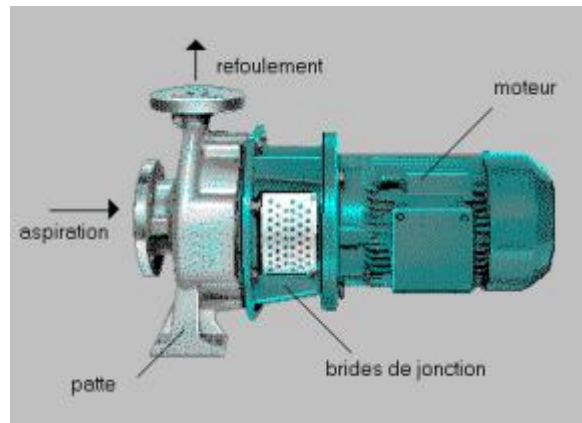


Figure 16: Vue extérieure d'une pompe

Pompe verticale

Ce type de pompe est utilisé pour vider des fosses ou des réservoirs enterrés, quand une pompe submersible n'est pas acceptable.

Un problème provient de la grande longueur de l'axe qu'il faut guider de proche en proche, pour éviter qu'il ne se mette à fouetter. Le poids de l'ensemble en rotation est supporté par des roulements à billes, ou à rouleaux, situés sous le moteur électrique¹⁰.

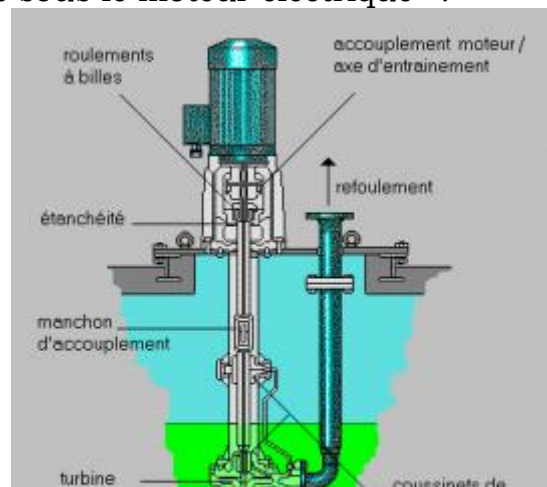


Figure 17: Vue en coupe d'une pompe verticale

¹⁰ Exploration et Production Les Équipements Les Pompes (Support de Formation: EXP-PR-EQ070-FR) Total

Pompe centrifuge non-métallique

A base de Graphite

Le corps de pompe est en graphite imprégné, afin qu'il ne soit pas poreux. La turbine est en polyfluore de vinylidène, en polypropylène. La rigidité du corps de pompe est assurée par un blindage métallique (Le carbone résiste à 170°C)

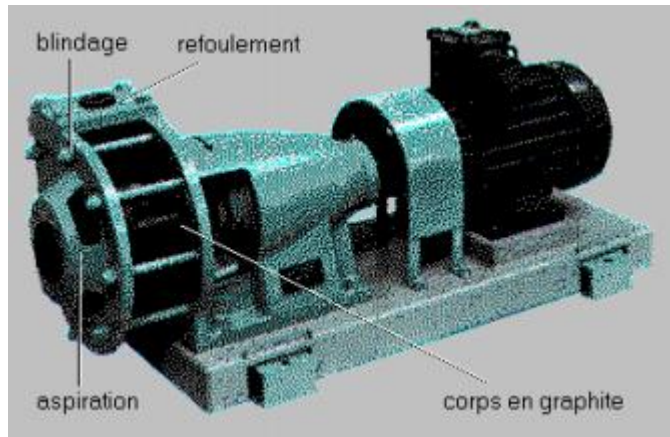


Figure 18: Pompe Graphite

A base de plastique

Une attention particulière doit être apportée au refroidissement du dispositif d'étanchéité car les plastiques ne dissipent

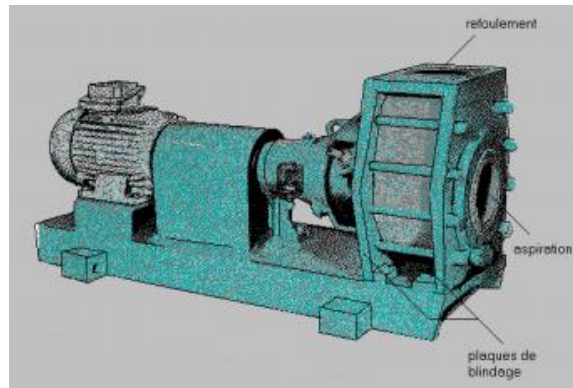


Figure 19: Pompe plastique

pratiquement pas la chaleur.

Pompe de puits

Les pompes de puits, ou pompes de forages sont généralement utilisées pour prélever de l'eau de mer, de nappe ou de rivière.

ETUDE DU FONCTIONNEMENT D'UN GROUPE MOTOPOMPE DANS UNE STATION DE POMPAGE

On les utilise aussi pour le pompage d'hydrocarbures. La profondeur maximum est limitée à 120 mètres, principalement pour des raisons de longueur de l'arbre d'entraînement.

Au-delà, on utilise des « électropompes immergées », ou pompes submersibles, capable de refouler à 120 mètres. Ci-après la figure montrant une pompe de puit.

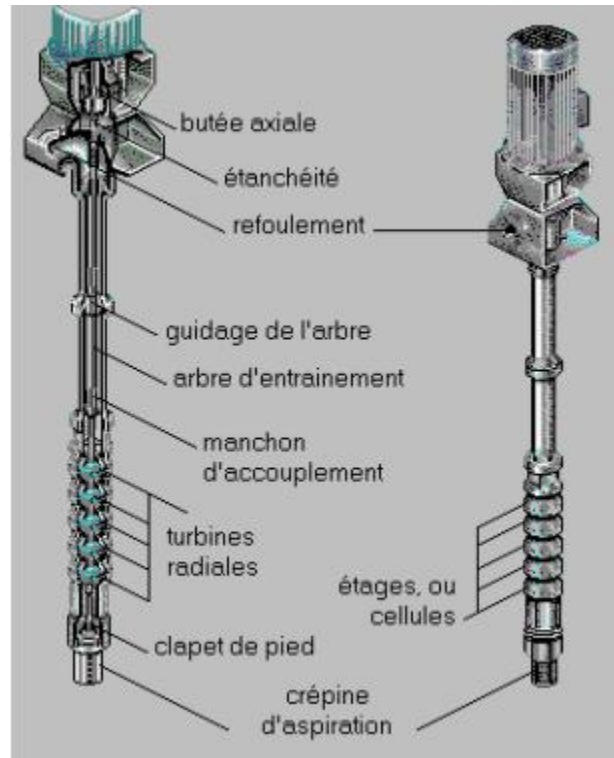


Figure 20: Vues écorchée et extérieure d'une pompe de puit

Pompe à « canal latéral »

Les pompes à canal latéral sont souvent appelées « auto-amorçantes ». En fait, c'est un type de pompe centrifuge qui ne se désamorce pas si elle aspire un mélange de gaz et de liquide.

Les pompes à canal latéral sont capables de fournir des hauteurs manométriques totales très élevées, mais les débits sont modestes.



Figure 21: Vue extérieure d'une pompe à canal latéral

Elles sont très sensibles à l'usure, de sorte qu'on limite en général la vitesse de rotation à 1450 t/mn, et que les liquides chargés ou abrasifs sont proscrits. Elles résistent très mal à la cavitation et ont un NPSH requis assez élevé. Elles sont presque toujours placées horizontalement, et doivent être démarrées vannes de refoulement et d'aspiration entièrement ouvertes.

Principe de fonctionnement

Quelques concepts

Différence de pression en hauteur de liquide

$$(P_1 - P_2) / \rho \cdot g = h \quad (\text{hauteur en m}) \quad (2.1)$$

P_1, P_2 = Pressions relatives en Pascal

ρ = masse volumique (en kg/m^3).

g = attraction de la pesanteur = 9.81 (en m/s^2 ou N/kg).

h = hauteur du point considéré par rapport à un axe de référence (en m)

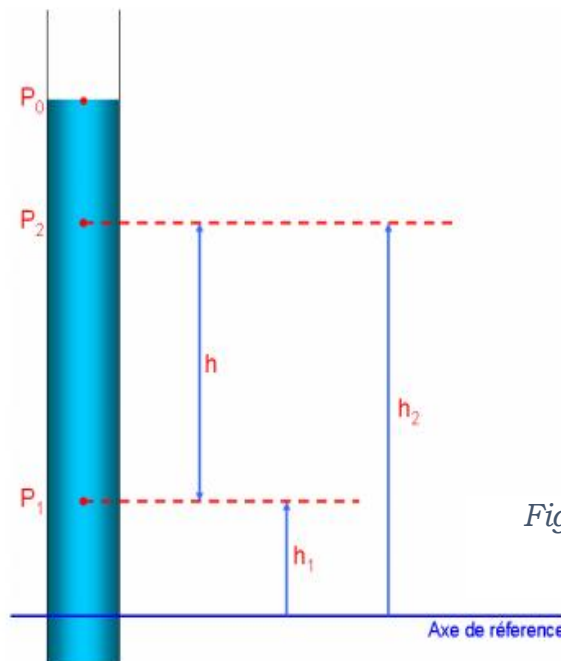


Figure 22: Différence de pression en hauteur de liquide

La règle de conservation de l'énergie qui découle de la loi de Bernoulli :

$P + \rho g h = \text{constante}$. Ainsi, on obtient la valeur de h en faisant :

$$\begin{aligned} \bullet \quad P_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 &= \rho \cdot g \cdot h_2 + P_2 \Rightarrow P_2 - P_1 = \rho \cdot g (h_2 - h_1) = \rho \cdot g \cdot h \\ &\Rightarrow h = (P_1 - P_2) / \rho \cdot g \end{aligned} \quad (2.2)$$

✓ La charge d'un liquide

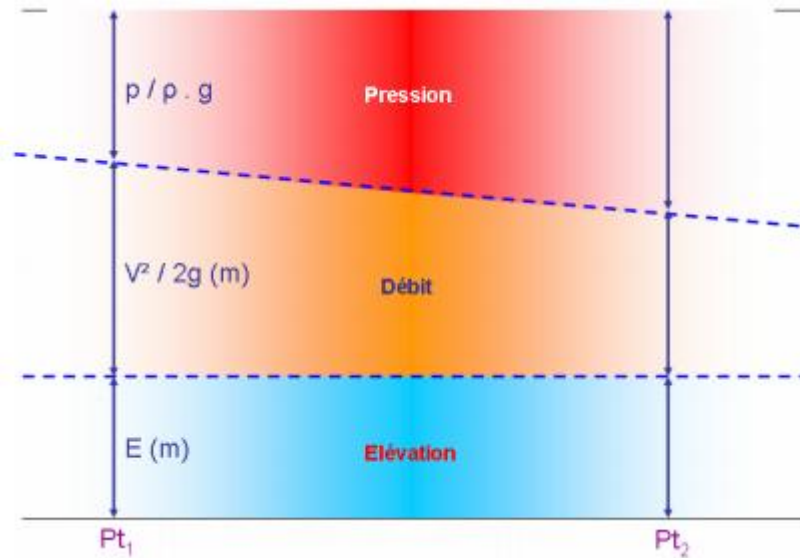


Figure 23: La charge entre deux points reste constante.

La charge hydraulique ht_1 d'un liquide, en un point donné d'un réseau correspond à l'énergie que le liquide dispose en ce point ; cette énergie se présente sous trois formes :

- L'énergie de pression
- L'énergie cinétique (correspond au débit)
- L'énergie potentielle de pesanteur.

Ce liquide pourra augmenter sa charge, si on lui fournit de l'énergie par une pompe ou perdre une partie de son énergie lorsqu'il s'écoule avec frottement (voir perte de charge)

La charge s'exprime en mCL (m de colonne de liquide), c'est simplement égal à l'énergie divisée par le terme $\rho \cdot g$ (ρ = masse volumique et g = accélération de la pesanteur).

L'utilisation d'une pompe : L'augmentation de la charge.

Nous avons vu qu'en un point pt_1 un liquide avait une énergie faite de trois constituants, si on veut à un autre point pt_2 du réseau avoir par exemple une pression supérieure tout en gardant les deux autres énergies constantes (par exemple débit constant sur une ligne horizontale), il faudra entre ces deux points apporter de l'énergie... C'est ce qui sera fait par une pompe¹¹.

¹¹ Exploration et Production Les Équipements Les Pompes (Support de Formation: EXP-PR-EQ070-FR) Total

Cette énergie nécessaire à apporter au fluide pour amener sa charge de la valeur ht_1 à la valeur ht_2 est H (exprimée aussi en mCL) on peut donc écrire :

$$ht_1 + H = ht_2 \quad (2.3)$$

Les frottements lors de l'écoulement : pertes de charges d'un liquide

La perte de charge d'un fluide qui s'écoule dans une conduite entre 2 points pt_1 et pt_2 , représente l'énergie perdue à cause des frottements (sur les parois et entre les particules du produit).

Cette énergie perdue, s'exprime (comme les autres énergies) en mCL et est généralement représentée par la lettre J .

Comme entre 2 points l'énergie totale doit se conserver, si entre les points 1 et 2 il y a une perte de charge par frottement de J exprimée en mCL on peut écrire :

$$ht_1 - J = ht_2 \quad (2.4)$$

✓ L'utilisation d'une pompe dans un réseau avec perte de charge

On a vu que la charge d'un liquide en un point correspondait à son énergie en ce point, et qu'entre 2 points p_1 et p_2 on pouvait avoir des pertes de charges par frottement et une augmentation de la charge par une pompe, donc pour un réseau ayant des pertes de charges et une pompe on peut écrire :

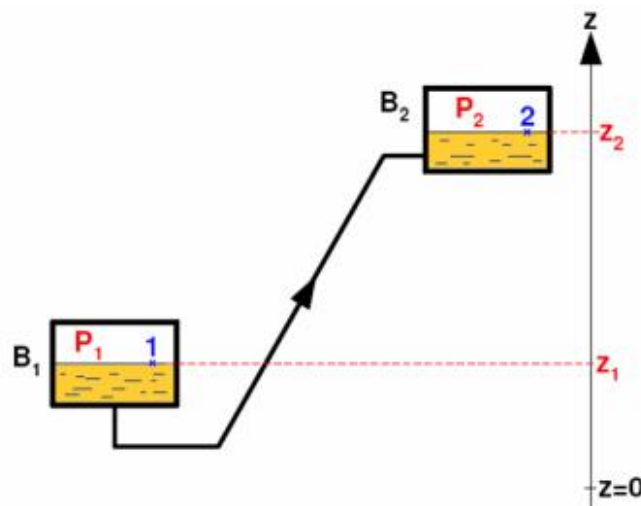


Figure 24: Transfert avec une pompe

$$Ht_1 + H - J = ht_2 \quad (2.5)$$

H étant la charge (l'énergie) à fournir au liquide pour l'amener du point pt_1 (avec condition de départ) au pt_2 (pour avoir les conditions requises au point

de distribution) lorsque entre ces 2 points il y a une perte de charge égale à J . H est donc l'énergie à apporter pour vaincre la différence de niveau, de pression entre les ballons, et les pertes de charge.

La charge à fournir $H = (h_{t2} - h_{t1}) + J = h_G + J$ (2.6)

$H = h_G + J$: c'est l'énergie exprimée en mCL à apporter au liquide pour aller du pt_1 au pt_2

Le terme h_G est appelé hauteur géométrique du réseau, c'est rappelons-le, la différence de charge entre 2 points, donc pas obligatoirement la différence de cotes :

Si $P_1 = P_2$ on a $h_G = Z_2 - Z_1$ (2.7)

Si P_1 différent de P_2 on a : $h_G = (Z_2 - Z_1) + (P_2 - P_1) / \rho \cdot g$ (2.8)

On voit donc qu'effectivement l'énergie à fournir va servir d'une part à augmenter la charge de h_{t1} à h_{t2} et aussi à compenser les pertes de charges $J = f(Q_v^2)$ où Q_v est le débit volumique. De manière simple, étant donné que la courbe du réseau est de la forme : $y = ax^2 + b$ (2.9)

Au fur et à mesure que le débit augmente, la hauteur croît.

Les pertes de charge étant directement proportionnelles au débit, celles-ci croissent quand le débit croît.

La courbe du réseau aura donc l'allure qui suit :

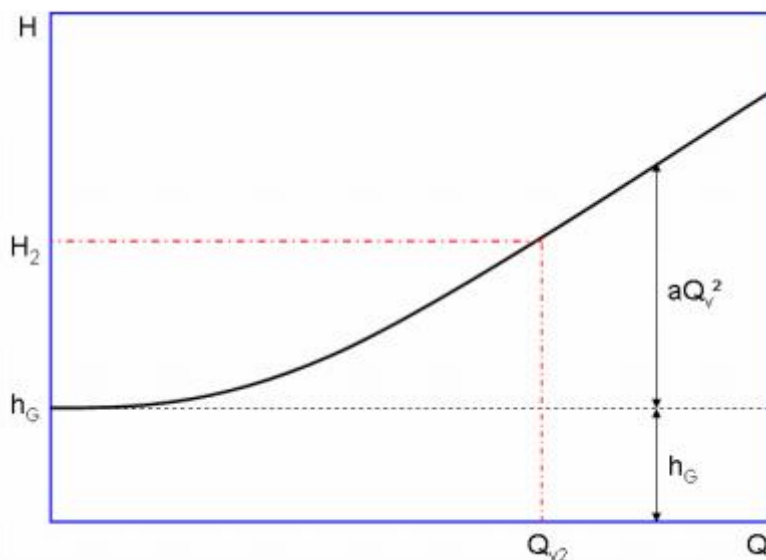


Figure 25: Courbe d'un réseau

La courbe du réseau est donc l'expression en mCl de l'énergie qui devra être fournie au système pour amener le liquide donné, de son point de départ (P_1 , Z_1) au point de destination (P_2 , Z_2) en fonction du débit Q_v .

✓ Caractéristique de la pompe

D'un point de vue hydraulique, les trois principaux paramètres qui caractérisent une pompe centrifuge sont :

Le débit volumique : Q_v en m^3/s

La hauteur manométrique : $H = p/\rho g$ avec H en m

Et son rendement : η en pourcentage avec $\eta = \frac{\text{puissance fournie au liquide}}{\text{puissance fournie par le moteur}}$

La courbe caractéristique de la pompe étant modélisée par l'équation :

$$y = ax^2 + bx + c \quad (2.11)$$

La hauteur manométrique, représentée par y , et le rendement sont tracés en fonction du débit représenté par x . Cette équation nous donne donc trois types d'allures ; L'allure présentant un pic, l'allure plate et celle tombante. L'allure présentant un pic admet une valeur maximum dans le premier quadrant, celle plate présente un coefficient du terme en x^2 très négligeable. L'allure tombante a pour maximum la hauteur manométrique à débit nul ou un maximum dans le second quadrant. La figure à la page précédente illustre une allure tombante. (Figure 25)

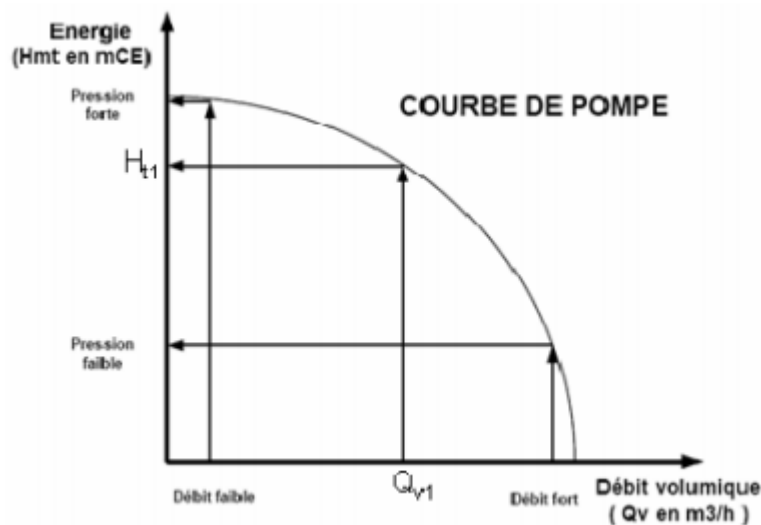


Figure 26: Courbe caractéristique d'une pompe (allure tombante)

Si on considère que P_a est la pression lue (en bar absolu) à l'aspiration de la pompe et P_r celle au refoulement, la HMT (hauteur manométrique totale) exprimée en mCL de la pompe est de manière simplifiée définie par :

$$HMT = (P_r - P_a) / \rho \cdot g \quad (2.12)$$

❖ Le point de fonctionnement

Le point de fonctionnement étant le point de débit, hauteur et rendement optimal d'une pompe. Aussi, nous avons vu que la courbe du réseau définissait le besoin, ayant un liquide (défini par sa masse volumique), soumis à une pression P_1 à un niveau Z_1 que nous voulons transférer à un niveau Z_2 sur lequel s'applique une pression P_2 , ce réseau a des pertes de charges représentée par $J = f(Q_v^2)$.

Si nous voulons que le débit soit Q_v^* , l'énergie que la pompe devra apporter, exprimée en mCL est le point H^* correspondant.

Nous avons vu qu'une pompe fournissait de l'énergie, HMT qui était exprimée en mCL en fonction du débit Q_v suivant la courbe du fabricant, il suffit donc de trouver la pompe qui pour le débit recherché Q_v^* fournisse l'énergie HMT* égale à l'énergie H^* nécessaire. L'astérisque symbolise les valeurs optimales.

Le point de fonctionnement est donc bien l'intersection de ces 2 courbes¹².

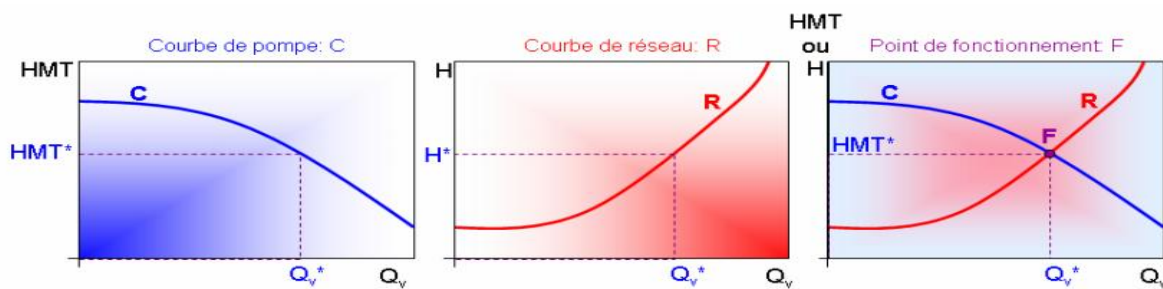


Figure 27: Point de fonctionnement d'une pompe

❖ Problème relatif à l'utilisation des pompes centrifuges.

Le moyen le plus simple et le plus répandu pour transporter des liquides (Brut, Huile, Eau) est la pompe centrifuge, qui est aussi le moyen le plus économique. Il est cependant des effets qui la détruisent très rapidement dont les effets de coups de bélier, vortex et cavitation. Nous parlerons dans ce travail que de la cavitation et de comment lutter contre.

La cavitation

✓ Définition et origine

On appelle cavitation d'une pompe centrifuge la vaporisation, à l'entrée de la roue, d'une partie du liquide pompé. C'est en effet en ce point que la pression est en général la plus basse (mais pas toujours).

¹² Exploration et Production Les Équipements Les Pompes (Support de Formation: EXP-PR-EQ070-FR) Total

On considère en général que cette vaporisation est liée au fait que la pression statique tombe en dessous de la pression de vapeur saturante du fluide pompé. En réalité, il s'agit parfois de la création de bulles de gaz dissous dans le liquide (cas de l'eau notamment), on parle alors de cavitation apparente.



Figure 28: Roue attaquée par la cavitation

Les effets de la cavitation peuvent être très néfastes pour la pompe:

La création de bulle de vapeur à l'aspiration s'accompagnant de leur condensation brutale dans ou en sortie de roue, lorsque la pression remonte, implosion des bulles de vapeur au niveau de la roue, vibrations anormales, bruit anormal, destruction des garnitures d'étanchéité suite aux vibrations, arrachement de matière dans les zones d'implosion, chute du débit pompé lorsque apparaît le phénomène de cavitation.

La cavitation peut être prévue par le calcul du NPSH (*Net Positive Suction Head*) disponible à l'aspiration de la pompe, et sa comparaison avec le NPSH (*Net Positive Suction Head*) requis par la pompe. La cavitation apparaît pour $NPSH_{dispo} = NPSH_{requis}^{13}$. Ces deux termes seront expliqués au point suivant.

✓ **Remède**

La cavitation modifie la courbe caractéristique de la pompe, qui devient très tombante dans la zone de débit, où cette pompe cavite.

Une fermeture suffisante de la vanne de refoulement permet d'arrêter la cavitation sans réduction notable du débit par rapport à la situation de cavitation. C'est le premier remède à appliquer¹⁴.

¹³ http://www.azprocede.fr/Cours_GC/pompe_introduction.html

¹⁴ Exploration et Production Les Équipements Les Pompes (Support de Formation: EXP-PR-EQ070-FR) Total

En fait l'installation a été généralement bien conçue et l'apparition de la cavitation peut provenir des modifications apportées dans l'exploitation ou le matériel.

En se basant sur le schéma ci-dessous nous déduirons les formules de NPSH.

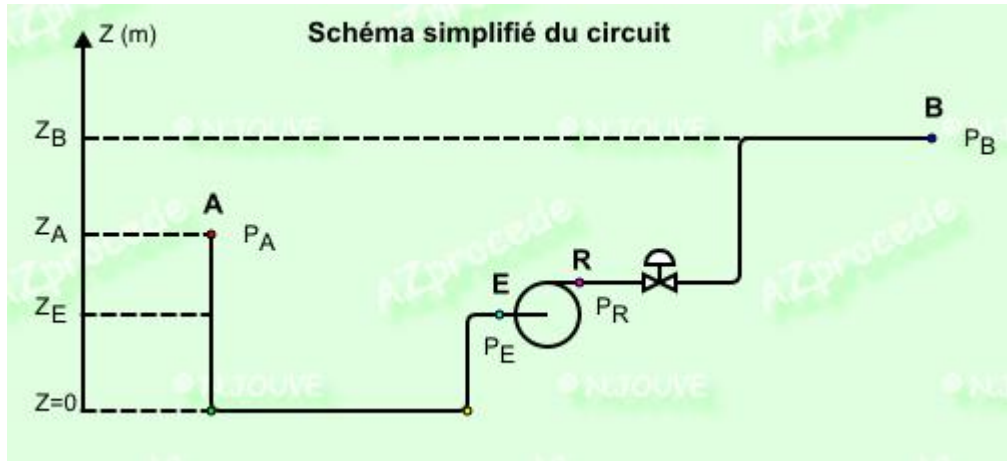


Figure 29: Schéma simplifié du circuit

✓ **NPSH disponible (pour " Net Positive Suction Head" en anglais)**

Le NPSH disponible pour un circuit et un débit donné correspond, en mCL, à la marge de pression au-dessus de la pression de vapeur saturante du fluide.

Sa formule est donnée par:

$$\text{NPSH}_{\text{dispo}} = P_E / \rho g + v_E^2 / 2g - P^{\circ}_{\text{vap}} / \rho g \quad (2.13)$$

Soit encore

$$\text{NPSH}_{\text{dispo}} = (P_E - P^{\circ}_{\text{vap}} + 1/2 \rho v_E^2) / \rho g \quad (2.14)$$

Lorsque P_E n'est pas mesuré, on peut le calculer en écrivant l'équation de Bernoulli appliquée entre A et E:

$$P_A / \rho g + Z_A + v_A^2 / 2g = P_E / \rho g + Z_E + v_E^2 / 2g + J_{f,A \rightarrow E}$$

Soit

$$P_E / \rho g = P_A / \rho g + Z_A - Z_E + v_A^2 / 2g - v_E^2 / 2g - J_{f,A \rightarrow E}$$

Soit enfin:

$$\text{NPSH}_{\text{dispo}} = (P_A + 1/2 \rho v_A^2 - P^{\circ}_{\text{vap}}) / \rho g + (Z_A - Z_E) - J_{f,A \rightarrow E}$$

Le NPSH disponible représente, en mCL, la pression totale (statique et dynamique) en A, augmentée ou diminuée de la variation

d'élévation entre A et E, diminuée de la perte de charge entre A et E et de la pression de vapeur saturante.

Remarque: dans de nombreux cas, on ne tient pas compte de la vitesse en A (bac à niveau constant par exemple)¹⁵

Le NPSH requis est le NPSH disponible minimal que doit avoir la pompe sous peine de cavitation. En effet, la pression statique en E baisse entre l'entrée de la pompe (bride d'aspiration) et l'entrée de la roue, notamment à cause de l'accélération du fluide pompé (une partie de la pression statique en E est ainsi transformée en vitesse).

Le NPSH requis est une donnée constructrice. Il est généralement donné sous forme de courbe en fonction du débit, sur le même graphe que la courbe de HMT. Ses valeurs sont de quelques mètres de colonne de liquide (par ex 4 mCL). Certaines pompe ont un très faible NPSH requis, ce afin de pouvoir limiter le risque de cavitation dans certains montages en aspiration (pompage de puits notamment)

Prenons à titre exemplatif, ce cas d'un pompage d'eau dans un puit

En pratique, une pompe au niveau du sol ne peut pas pomper de l'eau à plus de 7m de profondeur dans un puit sous peine de cavitation. En effet:

La valeur de $P_A / \rho g$ vaut $101325 / (1000 \times 9.81) = 10.33$ mCL

La pression de vapeur saturante vaut $P_{\text{vap}}^\circ / \rho g = 2500 / (1000 \times 9.81) = 0.25$ mCL en négligeant $J_{f,A \rightarrow E}$, on obtient pour le NPSH disponible $10.33 - 0.25 + (-7 - 0) = 3.08$ mCL. Ce qui est l'ordre de grandeur du NPSH requis pour la pompe

¹⁵ http://www.azprocede.fr/Cours_GC/pompe_introduction.html

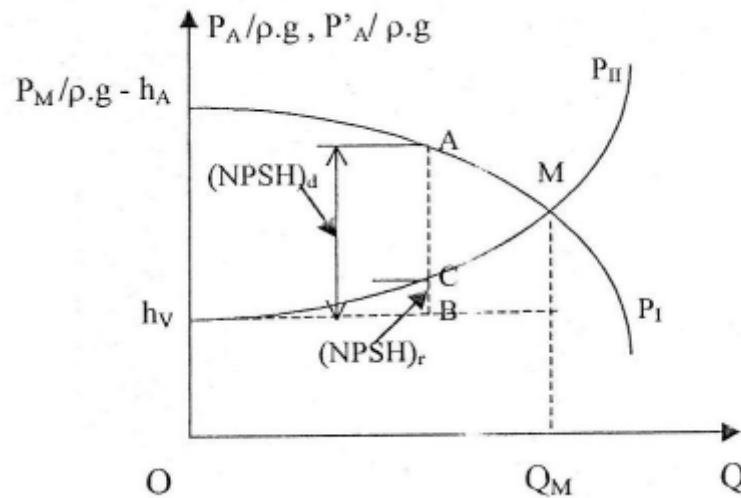


Figure 30: (N.P.S.H) dispo et (N.P.S.H) req

En définitive, pour éviter le phénomène de cavitation, il faut que le NPSH disponible soit toujours supérieur au NPSH requis.

$$(N.P.S.H) > (N. P. S. H)^{16}$$

Remarque

Il existe au moins trois types d'applications pour lesquelles la pompe centrifuge n'est plus efficace :

Le pompage de produits visqueux

Les problèmes de dosages précis instantanés

Le pompage des liquides réputés « susceptibles », c'est-à-dire fragiles, qui s'accommodent mal des remous internes qui existent dans une pompe centrifuge (lait, vin, bière, liquides volatils, etc.).

¹⁶ Mr. DALI Rachid-Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme
De master en Hydraulique- Etude d'un écoulement dans une conduite d'aspiration d'une pompe centrifuge.

2.2.2. La partie thermique ou électrique : Le Moteur

2.2.2.1. Généralité

Le Moteur est un appareil servant à transformer une énergie quelconque en énergie mécanique¹⁷.

Il en existe de plusieurs types tels que les moteurs à combustion, moteur chimique sans combustion, moteurs à champ et ceux qui nous intéressent, les moteurs ou machines électriques.

2.2.2.2. Moteur électrique

2.2.2.2.1. Historique

En 1821, après la découverte du phénomène du lien entre électricité et magnétisme, l'électromagnétisme, par le chimiste danois Ørsted, le physicien anglais Michael Faraday construit deux appareils pour produire ce qu'il appela une « rotation électromagnétique » : le mouvement circulaire continu d'une force magnétique autour d'un fil, en fait la démonstration du premier moteur électrique.

En 1822, Peter Barlow construit ce qui peut être considéré comme le premier moteur électrique de l'histoire : la « roue de Barlow » qui est un simple disque métallique découpé en étoile et dont les extrémités plongent dans un godet contenant du mercure qui assure le passage du courant. Elle ne produit cependant qu'une force juste capable de la faire tourner, ne lui permettant pas d'application pratique.

Le premier commutateur utilisable expérimentalement a été inventé en 1832 par William Sturgeon. Le premier moteur à courant continu fabriqué avec l'intention d'être commercialisé a été inventé par Thomas Davenport en 1834 puis breveté en 1837. Ces moteurs n'ont pas connu de développement industriel à cause du coût des batteries à l'époque.

On doit la vérification pratique de la réversibilité des machines électriques au physicien italien Antonio Pacinotti en 1864.

En 1869, l'inventeur belge Zénobe Gramme rend possible la réalisation des génératrices à courant continu en imaginant le collecteur. Il améliore les premières versions archaïques d'alternateurs (1867) et devient célèbre en retrouvant le principe de l'induit en anneau de Pacinotti.

¹⁷ Larousse le petit Robert 2010

En 1871, il présentera à l'Académie des sciences de Paris la première génératrice industrielle de courant continu, que l'on appela machine de Gramme.

En 1873, Hippolyte Fontaine, partenaire de Zénobe Gramme réalise la première application industrielle de la transmission électrique des forces. Tout en démontrant à l'occasion de l'exposition de Vienne, la réversibilité de la machine de Gramme, il présente une expérience associant dynamo et moteur à courant continu, séparés par 2 km de fils électriques. Avant cette expérience décisive, l'énergie mécanique des cours d'eau devait être utilisée sur place, car intraversable sur de longues distances.

Le premier brevet n° 391968 du moteur électrique actuel, à courant alternatif, est déposé par le physicien d'origine serbe Nikola Tesla en 1887¹⁸.

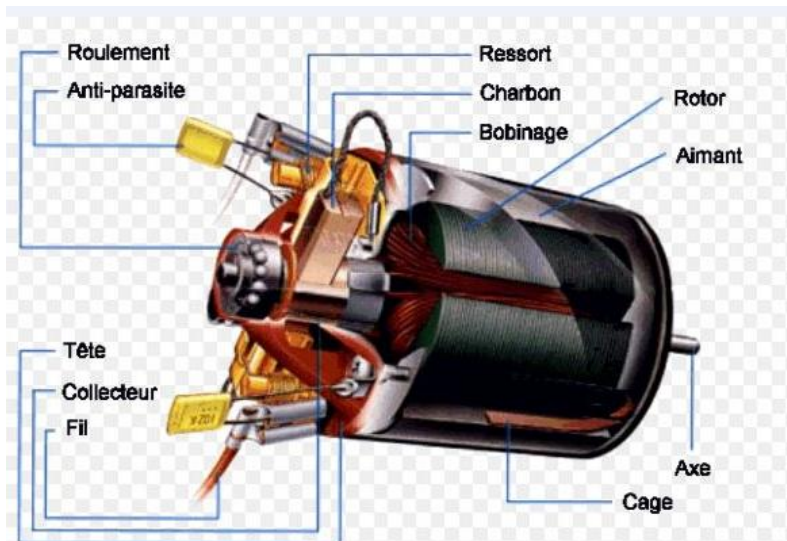
La paternité de la machine asynchrone est controversée entre trois inventeurs : en 1887, le physicien Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets. Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888. En 1889, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891.

¹⁸ https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_%C3%A9lectrique#Machine

2.2.2.2.2. Définition

Une machine électrique est un dispositif électromécanique basé sur l'électromagnétisme permettant la conversion d'énergie électrique par exemple en travail ou énergie mécanique. Ce processus est réversible et peut servir à produire de l'électricité :

Les machines électriques produisant de l'énergie électrique à partir d'une énergie mécanique sont communément appelées des génératrices, dynamos ou alternateurs suivant la technologie utilisée.



Les machines électriques produisant une énergie mécanique à partir d'une énergie électrique sont communément appelées des moteurs.

Figure 31: Moteur électrique

2.2.2.2.3. Description

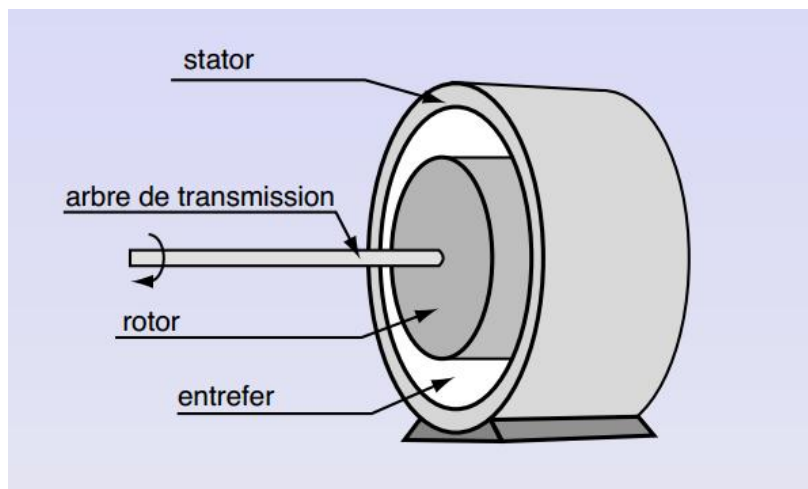


Figure 32: De manière mécanique, le moteur électrique

D'un point de vue mécanique, une machine électrique comporte un stator: la partie fixe et statique et le rotor l'élément rotatif.

Le rotor est lié à l'arbre de transmission. Le stator et le rotor sont séparés par l'entrefer¹⁹.

¹⁹ Les machines électriques

D'un point de vue électrique elle comporte deux circuits :

L'inducteur : il crée le champ magnétique, permet le transfert d'énergie rotor $\Leftrightarrow$ stator. Son courant est noté i

L'induit : c'est le siège de l'induction électromagnétique. Les phénomènes physiques trouvent leur place ici et il y a création des nouvelles grandeurs (couple ou f.é.m. + courant). Son courant est noté I

2.2.2.2.4. Types de machines électriques

Les machines électriques sont réparties en trois grands groupes, le groupe des machines à courant continu, le groupe des moteurs sans balais et les moteurs à courant alternatif.

Une machine à courant continu est constituée d'un stator et d'un rotor. Le stator crée une magnétisation longitudinale fixe à l'aide d'enroulements (inducteur) ou d'aimants permanents. Le rotor est constitué d'un ensemble de bobines reliées à un collecteur_rotatif. Le collecteur rotatif permet de maintenir fixe la direction transversale de magnétisation du rotor lorsque celui-ci tourne. Grâce à ce dispositif, les magnétisations, rotorique et statorique, sont toujours décalées de façon optimale (en quadrature). Ce décalage provoque un couple selon la loi du flux maximum (un pôle nord attire un pôle sud), provoquant ainsi la rotation du rotor.

L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation : les variateurs de vitesse.

Voire leur raccordement direct à la source d'énergie : batteries d'accumulateurs, piles, etc.

Un moteur sans balais, ou moteur « brushless », est un moteur synchrone, dont le rotor est constitué d'un ou de plusieurs aimants permanents et pourvu d'origine d'un capteur de position rotorique (capteur à effet Hall, synchro-révolvrer, codeur incrémental par exemple). Vu de l'extérieur, il fonctionne en courant_continu. Son appellation *Brushless* vient du fait que ce type de moteur ne contient aucun balai. Par contre un système électronique de commande doit assurer la commutation du courant dans les enroulements statoriques. Ce dispositif peut être soit intégré au moteur, pour les petites puissances, soit extérieur. Le rôle de l'ensemble capteur-électronique de commande est d'assurer l'auto-pilotage du moteur c'est-à-dire le maintien de l'orthogonalité du flux magnétique rotorique par rapport au flux statorique, rôle autrefois dévolu à l'ensemble balais-collecteur sur une machine à courant continu.

Les moteurs à courant alternatif sont généralement alimentés par une source de courants polyphasés. Le système le plus fréquemment utilisé est alors le triphasé (phases décalées de 120°) utilisé par les distributeurs d'électricité.

Ces moteurs alternatifs se déclinent en trois types :

Les moteurs universels ;

Les moteurs asynchrones ;

Les moteurs synchrones.

Ces deux dernières machines ne diffèrent que par leur rotor.

Les moteurs alternatifs seront notre priorité et plus précisément les machines asynchrones.

2.2.2.3. Les machines asynchrones

2.2.2.3.1. Définition

La machine asynchrone, connue également sous le terme anglo-saxon de machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Les machines possédant un rotor « en cage d'écureuil » sont aussi connues sous le nom de machines à cage ou machines à cage d'écureuil. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de rotation du rotor de ces machines n'est pas exactement déterminée par la fréquence des courants qui traversent leur stator.

2.2.2.3.2. Description

Une machine asynchrone comprend généralement :

- un stator triphasé comportant p paires de pôles par phase, identique à celui d'une machine synchrone ;
- un rotor constitué de conducteurs mis en circuit fermé. On rencontre deux types de rotor :

Un rotor bobiné : l'enroulement, semblable à celui du stator, comporte

p paires de pôles par phase ; les trois paires sont reliées à trois bagues qui permettent d'insérer un rhéostat dans le circuit rotorique. Ce moteur est aussi nommé moteur à bagues.

Un rotor à cage : le rotor est constitué de barreaux de cuivre ou d'aluminium reliés aux deux extrémités par deux couronnes conductrices.

Ce modèle (en forme de cage d'écureuil) peu coûteux et très robuste est le plus répandu.

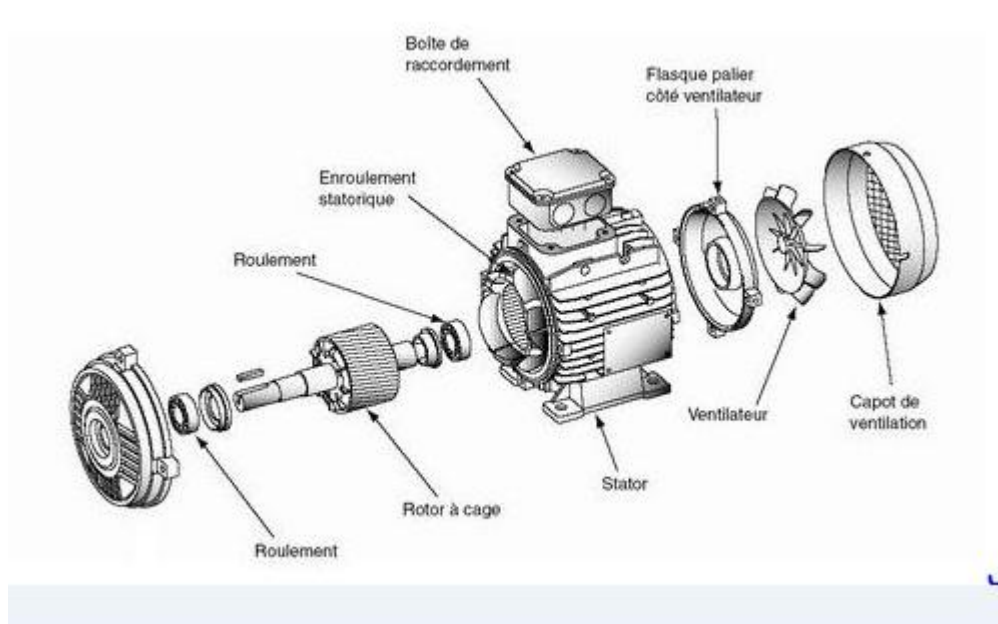


Figure 33: Machine asynchrone décomposée

Afin d'éviter l'affaiblissement du champ magnétique statorique dû à une trop grande réluctance, le rotor est rempli de disques de tôles d'acier de faible épaisseur (2 à 3 dixième de millimètre) et isolés électriquement par traitement chimique de la surface (phosphatation). Pour mémoire, le fer est le matériau le moins réluctant.

Les enroulements du stator sont connectés aux phases d'alimentation par les branchements effectués sur la plaque à bornes²⁰.

Notons aussi que tout moteur est toujours muni d'une plaque signalétique.

Celle-ci comporte :

- La référence constructeur précisant : la taille de la carcasse, le nombre de pôles.
- La puissance utile nominale.
- La tension entre phase du réseau d'alimentation pour un couplage étoile.
- La tension entre phase du réseau d'alimentation pour un couplage triangle.
- Le type du moteur et sa fréquence d'utilisation.
- La conformité à la norme internationale
- La fréquence de rotation nominale.
- Le courant de ligne nominal pour un couplage étoile.
- Le courant de ligne nominal pour un couplage triangle.
- Le facteur de puissance au régime nominal

²⁰ Claude CHEVASSU et Grégory VALENTIN (MACHINES ASYNCHRONES Cours et Problèmes)

2.2.2.3.3. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose :

- D'une part sur la création d'un courant électrique induit dans un conducteur placé dans un champ magnétique tournant. Le conducteur en question est un des barreaux de la cage d'écureuil ci-dessous constituant le rotor du moteur. L'induction du courant ne peut se faire que si le conducteur est en court-circuit (c'est le cas puisque les deux bagues latérales relient tous les barreaux).
- D'autre part, sur la création d'une force motrice sur le conducteur considéré (parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tournant ou variable) dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite

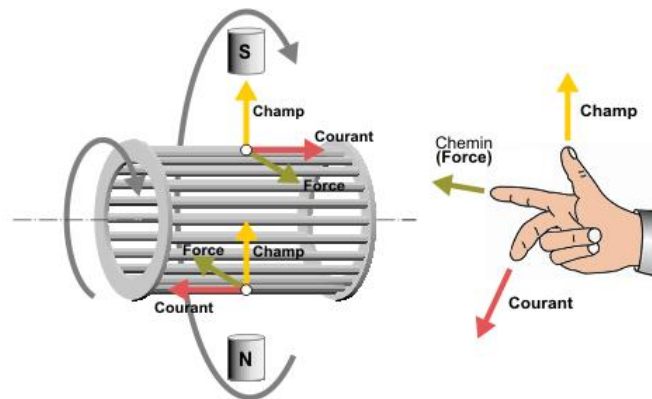


Figure 34: Croquis explicatif de la règle des trois doigts de la main droite

Comme montré sur le schéma ci-dessus, le champ tournant, à un instant donné, est orienté vers le haut. En considérant deux conducteurs diamétralement opposés, on constate que les courants induits dans ces deux conducteurs sont en sens inverse et, associés au champ magnétique, créent des forces motrices en sens inverse. Le rotor étant libre de tourner sur l'axe X-Y, les deux forces s'associent pour imprimer aux deux conducteurs un couple permettant la rotation de la cage d'écureuil : le moteur électrique est inventé.

Pour entretenir la rotation du moteur, il est nécessaire de faire varier soit le courant dans les conducteurs de la cage, soit le champ magnétique. Dans un moteur asynchrone, c'est le champ magnétique qui varie sous forme de champ tournant créé dans le stator.

Au démarrage le champ tournant balaye les conducteurs de son flux à la vitesse angulaire de synchronisme. Le rotor mis en rotation tend à rattraper le champ tournant.

Pour qu'il y ait un couple entretenu au niveau des conducteurs, la variation de flux doit être présente en permanence; ce qui signifie que si les conducteurs tournent à la vitesse de synchronisme comme le champ tournant, la variation de flux sur les conducteurs devient nulle et le couple moteur disparaît.

Un rotor de moteur asynchrone ne tourne donc jamais à la vitesse de synchronisme (50 Hz). Pour un moteur à une paire de pôles (à 50 Hz, la vitesse de rotation du champ tournant est de 3 000 [tr/min]) la vitesse de rotation du rotor peut être de 2 950 [tr/min] par exemple; intervient ici la notion de glissement²¹.

✓ **Glissement, couple, caractéristiques et pilotage de la vitesse de rotation**

a) Glissement

Comme on l'a vu au niveau du principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone, la vitesse de rotation de l'arbre du moteur est différente de la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant).

Le glissement représente la différence de vitesse de rotation entre l'arbre du moteur et le champ tournant du stator; il s'exprime par la relation suivante :

$$s = n_0 - n_n \quad (2.15)$$

Avec,

- n_0 = vitesse du champ tournant.
- n_n = vitesse de rotation de l'arbre.

Le glissement est généralement exprimé en pourcentage de la vitesse de synchronisme n_0 .

$$s = (n_0 - n_n) / n_0 [\%] \quad (2.16)$$

La vitesse de synchronisme, quant à elle, est fonction de la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$n_0 = (f \times 60) / p \quad (2.17)$$

Avec,

- n_0 = vitesse du champ tournant.
- f = la fréquence du réseau (en général 50 Hz).
- p = le nombre de paires de pôles.

²¹ <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11529>

b) Le couple

Le couple C d'un moteur asynchrone est fonction de la puissance P et de la vitesse de rotation n du moteur. Il s'exprime par la relation suivante :

$$C = (P \times 9\,550) / n \quad (2.18)$$

Avec,

- P = Puissance du moteur [W].
- n = la vitesse de rotation du moteur [tr/min].

Une des courbes la plus caractéristique des moteurs asynchrones est celle du couple en fonction du glissement :

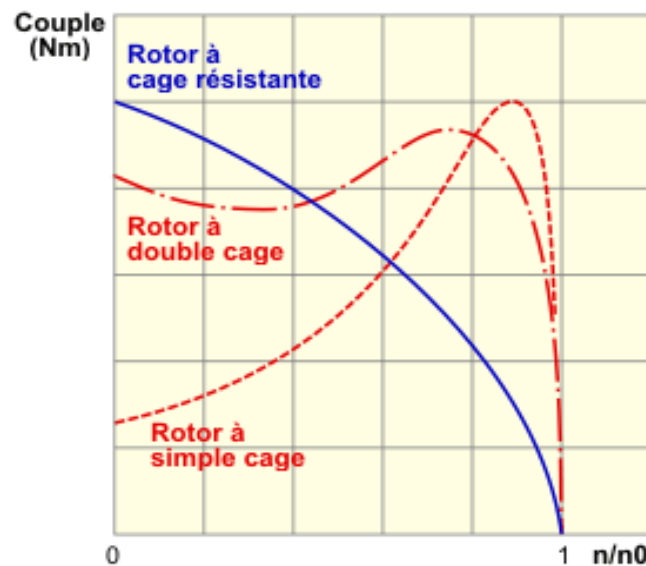


Figure 35: Couple en fonction du rapport : $\frac{n}{n_0}$

Sur le graphe ci-avant on voit tout de suite qu'il faut choisir le type de moteur en fonction de l'application : pour les motorisations des ascenseurs, on préférera les moteurs à double cage présentant un profil de courbe plus plat en fonction du glissement afin de bénéficier d'un couple relativement constant quelle que soit la charge.

Une des caractéristiques importante du moteur asynchrone, est qu'il peut, dans certaines conditions, se transformer en générateur asynchrone. Lorsqu'une cabine d'ascenseur redescend en charge maximum, le moteur renvoie de l'énergie au réseau.

Les courbes suivantes montrent ce phénomène²² :

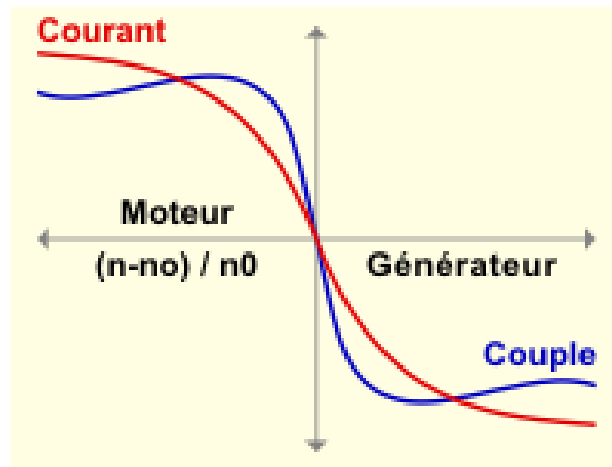


Figure 36: graphique représentant les allures du courant et du couple lorsque notre machine se comporte comme moteur ou générateur.

c) Caractéristique

Un moteur asynchrone classique a les caractéristiques suivantes :

- Le courant de démarrage est de l'ordre de 6 à 7 fois le courant nominal. Il est impératif de prévoir des systèmes de limitation de courant au démarrage (étoile/triangle, variateur de fréquence, ...).
- Le couple de démarrage est important (de l'ordre de 2,5 fois le couple nominal).
- Le couple est maximum pour un glissement de l'ordre de 30 %.

Le graphique ci-dessous nous les montre.

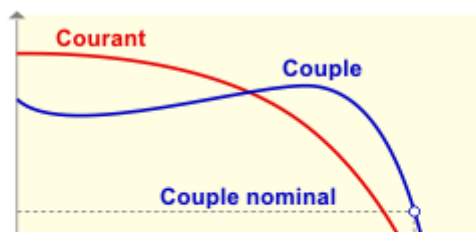


Figure 37: Caractéristiques d'un moteur asynchrone classique (Source : <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11529529>)

²² <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11529>

d) Pilotage de la vitesse de rotation

Le pilotage de la vitesse de rotation du moteur asynchrone est essentiel pour beaucoup d'applications.

La relation suivante permet de cerner les paramètres qui peuvent influencer la vitesse de rotation.

On a :

$$n = ((1 - s) \times f) / p \quad (2.19)$$

Avec,

- f = fréquence du réseau [Hz].
- p = le nombre de pair de pôle.

On peut donc piloter la vitesse de rotation en intervenant sur :

- le nombre de pair de pôle (moteur à deux vitesses par exemple),
- le glissement du moteur (moteur à bague),
- la fréquence du réseau.

- Pilotage en modifiant le nombre de pôles

Des anciennes installations d'ascenseur fonctionnent encore avec des moteurs à deux vitesses. La plupart du temps se sont des moteurs dont le rotor est composé de deux nombres différents de paires de pôles. Les enroulements sont disposés dans les encoches du stator d'une manière particulière qui en fait tout sa complexité. Les différents couplages par paire de pôles permettent d'obtenir différentes vitesses.

Un moteur bipolaire a une vitesse de rotation de 3 000 [tr/min], tandis qu'un quadripolaire tourne à 1 500 [tr/min] ou à 3 000 [tr/min].

Donc pour autant que l'on puisse réaliser des couplages différents sur des moteurs à deux nombres différents de paires de pôles, on obtient des vitesses différentes.

- Régulation de fréquence

A l'heure actuelle, le pilotage de la vitesse des moteurs asynchrones se fait électroniquement grâce à des variateurs de vitesse. Pour cette raison, on ne parlera ici que du contrôle de la fréquence qui de loin la plus courante.

Sans perte de puissance, on peut piloter la vitesse de rotation du moteur en faisant varier la fréquence car la vitesse de rotation du champ tournant au niveau du stator change. Pour conserver le couple moteur (intéressant pour les ascenseurs), il faut que la tension du moteur se modifie avec la

fréquence dans un rapport constant. En effet, le couple est lié à la fréquence, la tension et le courant par la formule suivante.

On a :

$$C \sim (U/f) \times I \quad (2.20)$$

Avec,

- C = couple moteur [Nm].
- U = tension du réseau [V].
- I = courant absorbé par le moteur.

Si le rapport entre la tension et la fréquence reste constant, le couple le reste aussi.

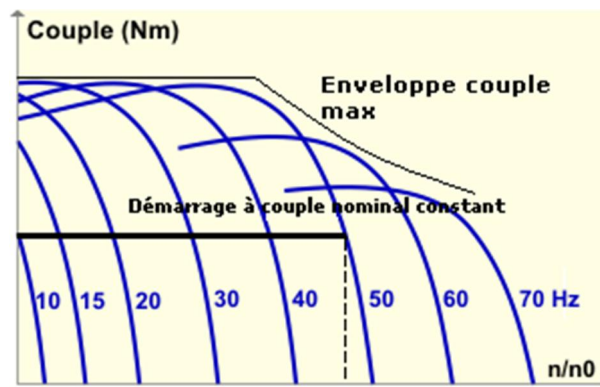


Figure 38: Pilotage en fréquence et en tension (Source : <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11529529>)

Le pilotage du moteur par un variateur de fréquence et de tension montre des intérêts certains; à savoir principalement :

- la limitation du courant de démarrage (de l'ordre de 1,5 fois le courant nominal);
- un couple relativement constant quelle que soit la vitesse du moteur²³.

Remarque

Les procédés de variation de vitesse pour les moteurs asynchrones sont générateurs de courants harmoniques²⁴.

²³ <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?>

²⁴ https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_asynchrone

ETUDE DU FONCTIONNEMENT D'UN GROUPE MOTOPOMPE DANS UNE STATION DE POMPAGE

Un moteur électrique entraîne une pompe centrifuge pour pomper de l'eau liquide avec un débit de 50 l/s. Les caractéristiques du moteur sont : $\eta = 90\%$

La pompe a 100kpa à l'aspiration et 300kpa au refoulement. La tuyauterie a un même diamètre à l'aspiration qu'au refoulement.

Evaluons le rendement mécanique de la pompe :

Sachant que le travail de la pompe est donné par :

$$W_{pompe} = V_{liq} \cdot (p_2 - p_1) \text{ kJ} \quad (3.1)$$

Avec W_{pompe} : Travail ou énergie de la pompe, et V_{liq} est le volume du liquide.

La puissance de la pompe est donnée par :

$$\dot{W}_{pompe} = \dot{V}_{liq} (p_2 - p_1) \text{ KJ/s} \quad (3.2)$$

Avec $\dot{W}_{pompe}$ la puissance et $\dot{V}_{liq}$ le débit.

Ainsi :

$$\begin{aligned} \dot{W}_{pompe} &= 50 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 10^{-3} \cdot (300 - 100) \cdot 10^3 \text{ N/m}^2 \\ &= 50.200 \text{ J/s} \\ &= 10 \text{ kJ/s} \\ &= 10 \text{ kW (puissance exigée par la pompe)} \end{aligned}$$

Le moteur de 15kW fournira à 90% = $(15 \cdot 0,9 \text{ kW})$

$$= 13,5 \text{ kW}$$

Le rendement mécanique de la pompe sera : $10 \text{ kW} / 13,5 \text{ kW} = 0.7407$

$$= 74\%$$

3.2. 2ème illustration :

Pompage en négligeant les pertes de charge (singulières et linéaires) dans le réseau ainsi que la variation de l'énergie cinétique.

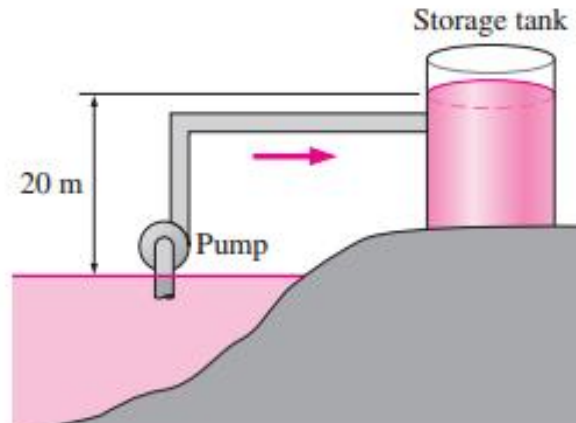


Figure 40: illustration 2

Une pompe centrifuge comprime de l'eau liquide à travers un pipeline vers un réservoir surélevé et de hauteur statique 20m. Le débit de pompage est de 70L/s et la consommation de la pompe est de 20.4 kW électrique.

- Déterminer le rendement du groupe motopompe.
- Déterminer la variation de la pression aspiration-refoulement.

Sachant que la puissance utile s'exprime par la relation : $P_{méc} \times \eta_{méc}$ (3.3)

La puissance hydraulique : $P_u = P_{hyd} = \rho g H_m Q_v$ (3.4)

La puissance mécanique est donnée par : $P_{méc} = P_{éle} \times \eta_{éle}$ (3.5)

La $P_{méc} = P_{éle}$ Le rendement global sera donc donné par $\eta = P_u / P_{éle}$ (3.6)

La puissance utile a pour valeur :

$$70 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \times 1000 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 10 \text{ m}/\text{s}^2 \times 20 \text{ m} = 14 \text{ kW}$$

Le rendement globale est de : $14 \text{ kW} / 20.4 \text{ kW} = 68,6\%$

Sachant que la puissance utile est liée à la pression par la relation :

$$\dot{W}_{pompe} = \dot{V}_{liq} (p_2 - p_1) \text{ kJ/s, nous aurons : } 14 \text{ kW} = 70 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \times \Delta p$$

La formule à utiliser est donc : $\Delta P = \frac{\dot{W}_{pompe}}{\dot{V}_{liq}}$ (3.7)

La différence de pression aspiration-refoulement est donc :

$$\frac{14 \text{ kPa}}{70 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}} = 200 \text{ kPa}.$$

3.3. 3ème illustration

Pompage en considérant les pertes de charge (singulières et linéaires) dans le réseau.

On considère le circuit de transport d'eau d'un barrage à un réservoir de stockage (voir figure ci-dessous).

- La pompe doit assurer un débit $Q_v \geq 22.5 \text{ l/s}$.
- On dispose de deux diamètres de conduite $d_1 = 120\text{mm}$ et $d_2 = 130\text{mm}$.

On supposera :

- Les diamètres à l'aspiration et au refoulement identiques.
- Les coefficients de perte de charge indépendants des diamètres des conduites.

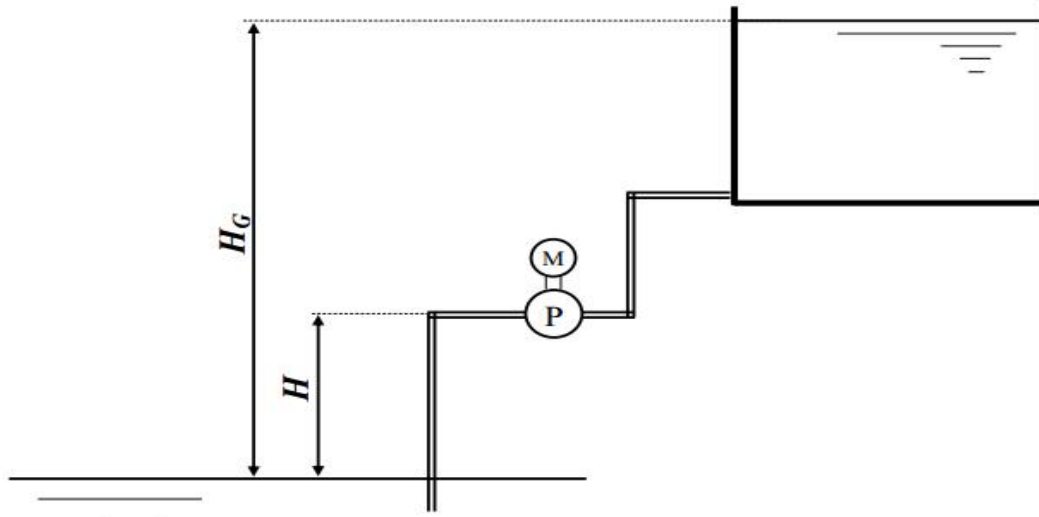


Figure 41: Illustration 3

On donne :

- La longueur des conduites : à l'aspiration $l_a = 40\text{m}$, au refoulement $l_r = 190\text{m}$.
- Le coefficient de perte de charge linéaire $\lambda = 0.025$.
- Les coefficients de perte de charge singulière sont donnés par :

A l'aspiration : $K_a = 3.6$ Au refoulement : $K_r = 5$

- La pression de vapeur à la température considérée $p_v = 0.025\text{bar}$

$\text{NPSH requis} = 2 \text{ mCE}$ (Mètre colonne d'eau).

- $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$; $g = 10 \text{ m/s}^2$; $H = 6.75\text{m}$ et $H_G = 24 \text{ m}$.

ETUDE DU FONCTIONNEMENT D'UN GROUPE MOTOPOMPE DANS UNE STATION DE POMPAGE

1. Montrer que la hauteur manométrique totale du circuit peut s'écrire sous la forme :

$$H_{mt} = H_G + \Delta H \text{ avec } \Delta H = A \cdot Q^2 : (\text{perte de charge}).$$

2. Calculer les paramètres de perte de charge A_1 et A_2 respectivement pour d_1 et d_2 .

3. Les caractéristiques de la pompe sont données dans le tableau ci-dessous.

a. Le choix de cette pompe est-il correct ? (Justifiez).

b. Déterminer les points de fonctionnement des deux conduites.

4. Quel diamètre faut-il choisir ? (Justifiez).

5. Déterminer la puissance électrique consommée par cette pompe sachant que le rendement du moteur électrique est $\eta_m = 0,9$.

Q (l/s)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
H_m (mCE)	40	41.5	43	42.7	40.8	37	31.3	24.3	16
$P_{méc}$ (kW)	5	6.6	8.5	10.2	12	13.8	15.6	17.4	19.4

Pour mieux faire, basons-nous sur l'équation de Bernoulli,

Nous aurons :

- Démonstration

$$\frac{1}{2}\rho(V_2^2 - V_1^2) + \rho g(Z_2 - Z_1) + p_2 - p_1 = \frac{P_h}{q_v} = \Delta p_{T12}$$

$$\text{Avec : } V_2 = V_1, Z_2 - Z_1 = H_G, p_2 = p_1 = p_a$$

$$\rightarrow P_g H_g = \frac{P_h}{q_v} - \Delta p_{T12}$$

$$\text{Or } \frac{P_h}{q_v} = \rho g H_m$$

$$\rightarrow \rho g H_m = \rho g H_g + \Delta p_{T12}$$

$$\text{où : } \Delta p_{T12} = \Delta p_{L12} + \Delta p_{s12}$$

$$= \left(K_a + K_r + \lambda \frac{(L_a + L_r)}{d} \right) \frac{V^2 \rho}{2}$$

$$\text{Avec : } V = \frac{4QV}{\pi d^2}$$

$$\Delta p_{T12} = \left(K_a + K_r + \lambda \frac{(L_a + L_r)}{d} \right) \frac{16Q^2 \rho}{2\pi d^4}$$

$$H_m = H_g + \frac{\Delta p_{T12}}{\rho g}$$

$$H_m = H_g + \Delta H_{12} = H_g + \left(K_a + K_r + \lambda \frac{(L_a + L_r)}{d} \right) \frac{8Q^2}{\pi^2 d^4 g}$$

D'où : $H_m = H_g + AQ^2$ avec $(\Delta H_{12} = AQ^2)$

A a donc pour valeur : $\left(K_a + K_r + \lambda \frac{(L_a + L_r)}{d}\right) \frac{8}{\pi^2 d^4 g}$

H_m et H_g en m, Q en m^3/s

- Analyse numérique : $A_1 \approx 0.022 \rightarrow H_{m1} = 24 + 0.022Q^2$
 $A_2 \approx 0.015 \rightarrow H_{m2} = 24 + 0.015Q^2$
- Pour répondre à la 3^{ème} question il faut tenir compte de la courbe $H_m = f(Q)$ et

$\eta_p = f(Q)$ de la pompe.

On a : $\eta_p = \frac{P_h}{P_m} = \frac{\rho g H_m Q}{P_m}$

Nous obtenons :

η_p (%)	0	31,6	50,6	62,8	68	67	60,2	48,9	33
--------------	---	------	------	------	----	----	------	------	----

Q souhaité ≥ 22.5 l/s

Q souhaité se trouvera au voisinage du rendement maxi et à droite de celui-ci. Le choix de la pompe est donc correct.

$H_g = 24m$

$H_m = 40m > H_g$: Bon choix.

Nous avons donc : ($Q = 22.5$ l/s) $H_{m1} = 39m > H_g$ choix encore correct.

Le point de fonctionnement

Pour le diamètre premier :

$$H_{m1} = 24 + 0.022Q^2$$

$Q_1^* \approx 25$ l/s

$H_{m1}^* = 25m$

$\eta_{p1}^* = 67\%$

$P_{méc} = 13.8kW$

Pour le diamètre deuxième :

$$H_{m2} = 24 + 0.015Q^2$$

$Q_2^* \approx 27.5$ l/s

$H_{m1}^* \approx 33m$

$$\eta_{p2}^* = 64\%$$

$$P_{méc} = 14.17kW$$

- Les deux diamètres respectant la condition de débit, tenons compte de la cavitation pour les départager.

On procèdera donc de la manière qui suit :

$$p_{abs_{entrée-pompe}} = p_{atm} - \rho g h_a - \frac{1}{2} \rho V^2 (1 + k_a + \lambda_a \frac{L_a}{d_a})$$

Pour diamètre 1 : $V = \frac{4QV}{\pi d_1^2} = 2.2 \text{ m/s}$

$$p_{abs1} = 1443Pa = 0.01443bar \leq \text{pression de vapeur}$$

Vérifions avec le calcul de NPSH_{dispo}

$$NPSH_{dispo} = \pm H + \frac{p_r + p_{atm}}{\rho g} - \frac{p_v}{\rho g} - \Delta H_{asp}$$

$$\text{On aura : } NPSH_{dispo} = -6.75 + \frac{10^5}{10^4} - \frac{2400}{10^4} - 3.105 = -0.0957 \cdot 10^4 \text{ mCE} < 0.2 \text{ mCE}$$

Pour diamètre 2 : ici utilisons la formule de NPSH_{dispo}

$$\text{On aura : } NPSH_{dispo} = -6.75 + \frac{10^5}{10^4} - \frac{2400}{10^4} - 2.438 = 0.571 \text{ mCE} > 0.2 \text{ mCE}$$

Le meilleur diamètre est le diamètre d_2 .

- **La puissance électrique est donnée par : $P_e = \frac{P_{méc}}{\eta_{méc}} = 15.74kW$**

Conclusion Générale

L'étude du système de pompage passe réellement par un ensemble d'entités très bien agencées et présentant individuellement beaucoup de renseignement.

La pompe à elle seule n'est qu'une machine opératrice, c'est-à-dire non motrice ; elle exige absolument un dispositif d'entraînement générateur d'énergie mécanique ; et cette énergie qui est une forme secondaire dans le moteur d'entraînement ; ce dernier exige de l'électricité produite par un autre moteur dit thermique mais principalement une énergie tirée au secteur et fournie par une société productrice d'électricité.

Notre étude s'est appuyée dans ces illustrations sur des moteurs électriques ne se souciant pas de qui nous fournit cette électricité.

La pompe entraînée elle, offre les caractéristiques intrinsèques qui sont fournies par le constructeur des pompes.

Mais lorsqu'elle doit débiter dans une canalisation, tout ingénieur se doit de se pencher sur les résistances qu'offrent les réseaux dans la circulation du fluide.

C'est ainsi que trois illustrations ont cristallisé notre travail, à savoir :

1. Evaluation du rendement de la pompe
2. Etude d'un cas sans tenir compte des pertes de charges
3. Etude d'un cas très proche de la réalité, celle d'une pompe extrinsèque, c.à.d. installée dans un réseau avec prise en compte des contraintes.

Ainsi nous disons que l'hydraulique, les turbomachines, les machines électriques ainsi que la mécanique des fluides sont des sérieux prérequis pour l'étude d'un réseau de pompage.

Bibliographie

Les ouvrages

- 1 *Total - Exploration et Production Les Équipements Les Pompes (Support de Formation: EXP-PR-EQ070-FR)*
- 2 *Mr. Dali Rachid - Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master en Hydraulique- Etude d'un écoulement dans une conduite d'aspiration d'une pompe centrifuge.*
- 3 *Larousse le petit Robert 2010 Les machines électriques*
- 4 *Christophe Palermo - Électricité 2 — Électrotechnique IUT de Montpellier Département-Mesures Physiques*
- 5 *Claude Chevassu et Grégory Valentin - (Machines Asynchrones Cours Et Problèmes)*
- 6 *R.B Hamouda (2008) Tunis, Notions de mécanique des fluides : cours et exercices*
- 7 *Module EE.5.1 - Sciences et technologies de l'industrie et du développement durable*
- 8 *Mécanique des fluides Notions scientifiques de base*
- 9 *J.P. Laborde Eléments D'hydraulique Générale*

Les sites

- 1 https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_%C3%A9lectrique#Machine
- 2 <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11529>
- 3 https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_asynchrone
- 4 http://www.azprocede.fr/Cours_GC/pompe_introduction.html
- 5 [WikiTaxi 1.3.0 | wikipedia-fr.taxi | hydraulique](#)

Table des matières

Table des illustrations	1
Avant-propos	2
Introduction	3
1. Généralités sur l'hydraulique.....	4
1.1. Historique.....	4
1.2. Définitions.....	4
1.3. Régimes d'écoulement en charge des fluides dans les tubes.....	5
1.3.1 Description des types d'écoulement	5
1.4. Pertes de charges dans les conduites pleines.....	7
1.4.1. Les pertes de charge régulières	7
1.4.2. Les pertes de charge singulières dans les conduites	11
2. Le Groupe Motopompe	14
2.1. Définition	14
2.2. Description	14
2.2.1. La partie hydraulique : La pompe	15
2.2.1.1. Historique.....	15
2.2.1.2. Définition.....	16
2.2.1.3. Utilisation	16
2.2.1.4. Typologie.....	17
2.2.2. La partie thermique ou électrique : Le Moteur	36
2.2.2.1. Généralité.....	36
2.2.2.2. Moteur électrique.....	36
2.2.2.3. Les machines asynchrones.....	40
✓ Glissement, couple, caractéristiques et pilotage de la vitesse de rotation.....	43
a) Glissement	43
b) Le couple	44
c) Caractéristique	45
d) Pilotage de la vitesse de rotation.....	46
- Pilotage en modifiant le nombre de pôles.....	46
- Régulation de fréquence.....	46
3. Etude du fonctionnement d'un groupe motopompe	48
(Moteur électrique et pompe centrifuge)	48
3.1. 1ère illustration.....	48

ETUDE DU FONCTIONNEMENT D'UN GROUPE MOTOPOMPE DANS UNE STATION DE POMPAGE

3.2. 2ème illustration	50
3.3. 3ème illustration	51
Conclusion Générale	55
Bibliographie	56