

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -

X•⊙V•EX •KIIÉ C:~:IA :II~•X - X:⊙E⊙:t -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Département de de Génie électrique

## Polycopié de cours

En : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Niveau : 2<sup>ème</sup> année *master*



---

# Commande des systèmes électriques

---

Par SMAIL Houria

Maître de conférences « B »

Année :2023/2024

<b>AVANT-PROPOS.....</b>	<b>5</b>
<b>Chapitre I : Critères de choix d'un moteur électrique dans un environnement industriel</b>	
I.1. Définition de l'industrie.....	6
I.2. Critères de choix d'un moteur.....	7
I.2.1. Critères liés à l'énergie électrique.....	9
I.2.1.1. Tension d'alimentation.....	9
I.2.1.2. Déséquilibre des tensions de phases.....	10
I.2.1.3. Facteur de puissance.....	11
I.2.1.4. Papillotement de la tension.....	13
I.2.1.5. Classification des moteurs.....	14
I.2.2. Critères liés à l'énergie mécanique.....	16
I.2.2.1. Charges entraînées .....	16
I.2.2.2. Vitesse.....	20
I.2.2.3. Démarrage et arrêt.....	23
I.2.3 Critères liés à la transformation d'énergie - Efficacité énergétique et rentabilité.....	24
I.2.3.1. Rendement d'un moteur.....	24
I.2.3.2. Coûts de l'énergie.....	24
I.2.4. Critères liés à la technologie de conception.....	25
I.2.5. Critères liés à l'environnement.....	25
I.2.5.1. Conditions normales de service.....	25
I.2.5.2. Conditions de service exceptionnelles.....	26
I.3. Exercice.....	26
<b>Chapitre II : Commande électrique et automatisation des pompes, des ventilateurs et des compresseurs</b>	
II.1. Introduction.....	28
II.2. Les pompes .....	28
II.2.1. Définition d'une pompe centrifuge.....	28
II.2.2. Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge.....	28
II.2.3. Puissance en bout d'arbre.....	30
II.2.3.1. Principe de Bernoulli.....	30
II.2.3.2. Calcul de la hauteur manométrique.....	32
II.2.3.3. Écoulement dans la conduite : pertes de charge.....	34
II.2.3.4. Introduction des paramètres de la pompe.....	36
II.2.3.5. Détermination des puissances électriques.....	40
II.2.3.6. Exercice.....	42
II.2.5. Automatisation d'une pompe centrifuge.....	44
II.2.5.1. Surpresseur.....	46
II.2.5.2. Vannes motorisées.....	46
II.2.5.3. Les servovalves.....	47
II.2.5.4. Les électrovannes.....	47
II.2.5.5. Capteurs.....	47

II.2.5.6. Clapet anti-retour.....	49
II.2.5.7. Exercice.....	50
II.3. Les ventilateurs.....	51
II.3.1. Principe de fonctionnement.....	52
II.3.2. Différents types de ventilateurs.....	53
II.3.3. Caractéristique couple – vitesse d’un ventilateur centrifuge.....	54
II.3.4. Démarrage des mécanismes à couple de ventilateurs.....	55
II.4. Les compresseurs.....	57
II.4.1. Compresseurs dynamiques.....	57
II.4.2. Compresseurs volumétriques.....	58

### **Chapitre III : Alimentation et automatisation des ascenseurs**

III.1. Définition.....	59
III.2. Classification des ascenseurs.....	59
III.3. Les catégories d’ascenseurs.....	59
III.3.1. Les ascenseurs hydrauliques.....	60
III.3.2. Les ascenseurs à traction à câble.....	61
III.4. Système de motorisation.....	62
III.4.1. Moteur – treuil ou moteur à traction.....	62
III.4.1.1. Moteur – treuil à vis sans fin à une ou deux vitesses.....	62
III.4.1.2. Moteur – treuil planétaire.....	63
III.4.2. Moteur sans réducteur.....	64
III.5. Exigences dans les systèmes de commande des ascenseurs.....	64
III.5.1. Précision d’arrêt.....	65
III.5.2. Vitesse d’approche.....	65
III.5.3. La sécurité.....	66
III.6. Automatisation des ascenseurs.....	66
III.6.1. Variables d’entrée.....	67
III.6.1.1. Contact de sécurité.....	67
III.6.1.2. Capteurs.....	67
III.6.1.3 Bouton de commande (exemple ascenseur à 04 étages).....	67
III.6.2. Variables de sortie.....	68
III.7. Exercice.....	68

### **Chapitre IV : Automatisation des ponts roulants**

IV.1. Définition.....	70
IV.2. Principe.....	70
IV.3. Classification des ponts roulants.....	71
IV.4. Charge des moteurs des mécanismes des ponts roulants.....	73
IV.4.1. Mécanisme de levage.....	73
IV.4.1.1. Moteur de levage principal.....	74
IV.4.1.2. Réducteur.....	74
IV.4.1.3. Tambour.....	75
IV.4.1.4. Fin de course de travail.....	75
IV.4.1.5. Moufle.....	75
IV.4.2. Mécanisme de direction/translation.....	76

---

IV.5. Systèmes de levage électromagnétique.....	77
IV.5.1. Les aimants permanents.....	77
IV.5.2. Les électro-aimants.....	78
IV.5.3. Les aimants hydrauliques.....	78
IV.6. Les systèmes de commande électrique des ponts roulants.....	79
IV.6.1. Commande en cabine.....	79
IV.6.2. Commande au sol.....	80
IV.7. Phénomène de balancement.....	80
IV.7.1. Equilibrage de la charge.....	80
IV.7.2. Utilisation des dispositifs anti-balancement.....	81
IV.8. Automatisation des ponts roulants.....	81
IV.9. Equipements des grands ponts roulants.....	83
IV.10. Commande à distance des ponts roulants.....	84
IV.11. Alimentation des ponts roulants.....	84
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>86</b>
<b>ANNEXE.....</b>	<b>87</b>

## AVANT PROPOS

Ce document, intitulé « Commande des systèmes électriques », est un support de cours destiné aux étudiants de master II, filière électrotechnique, des deux spécialités : électrotechnique industrielle et commande électrique. Son objectif est de mettre à leur disposition un document de travail, leur permettant d'apprendre en premier lieu à choisir les éléments de la commande dans un système industriel et d'aborder, par la suite, la commande et l'automatisation des systèmes électriques tels que les pompes, les ponts roulants, les ascenseurs,...etc.

Les entreprises ont développé l'automatisation de leurs systèmes de production pour accroître de manière continue leur productivité. Qui dit production abondante dit forcément moyens de production performante ou encore système automatisé réussi. Aussi, est-il essentiel, d'acquérir les savoir-faire indispensables pour répondre aux besoins de ces industriels.

Ce document est subdivisé en quatre chapitres. Le contenu de ces chapitres est élaboré conformément au programme officiel mentionné dans le canevas fixé par le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique. La mise en ligne de ce cours sur la plateforme e-learning de l'université est présentée en Annexe.

Toutes propositions d'amélioration et de correction seront les bienvenues.

# Chapitre I

---

## **Critères de choix d'un moteur électrique dans un environnement industriel**

## **I.1. Définition de l'industrie**

L'industrie est un terme polysémique recouvrant originellement la plus part des travaux humains. Il s'agit à présent de la production de biens grâce à la transformation des matières premières ou des matières ayant déjà subi une ou plusieurs transformations et de l'exploitation des sources d'énergie.

Les avancées technologiques changent aussi la manière dont les humains produisent les choses. La première révolution industrielle (industrie 1.0) a commencé au XVIIIe siècle à travers l'utilisation de la vapeur à but industriel. Les développements tels que le navire à vapeur ou la locomotive à vapeur (environ 100 ans plus tard) ont apporté des changements importants puisque les humains et les biens pouvaient désormais voyager sur de grandes distances en quelques heures seulement.

La deuxième révolution industrielle (industrie 2.0) a commencé au XIXe siècle à travers la découverte de l'électricité et la production sur ligne d'assemblage. Henry Ford (1863-1947) a eu l'idée de la production en masse grâce à un abattoir. Le même principe a été reporté dans l'industrie automobile. Les véhicules étaient transportés sur un convoyeur et étaient produits étape par étape. Alors qu'avant, une station assemblait une voiture de début jusqu'à la fin. La production devenant plus rapide et à moindre coût.

La troisième révolution industrielle (industrie 3.0) a commencé en 1970 à travers une automatisation partielle utilisant les contrôles à mémoire programmables et les ordinateurs. Depuis l'introduction de ces technologies, nous sommes maintenant capables d'automatiser un process de production au complet, sans assistance humaine. L'exemple le plus connu réside dans les robots qui accomplissent des séquences programmées sans aucune intervention humaine.

Actuellement, nous sommes en pleine quatrième révolution (industrie 4.0) qui se caractérise par l'application des technologies de l'information et de la communication à l'industrie. Cela permet la communication avec d'autres installations et l'échange d'informations entre eux. La mise en réseau de tous les systèmes mène à des systèmes de production cyber-physique (des algorithmes informatiques qui permettent de contrôler un parc de machines) et donc aux usines

intelligentes. Les systèmes de production, les composants et les opérateurs communiquent via un réseau, la production devenant quasi autonome.

Alors que nous sommes encore immergés dans la quatrième révolution industrielle, le futur de l'industrie se dessine lentement mais sûrement. L'industrie 5.0 est sur le point d'inaugurer une nouvelle ère qui apporte une nouvelle façon de concevoir le rapport entre les machines intelligentes et les humains.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les critères à prendre en compte pour le meilleur choix des moteurs électriques dans un environnement industriel.

## I.2. Critères de choix d'un moteur

Le moteur transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique (figure I.1). Pour ce faire, la machine aura comme entrée une source d'énergie électrique et comme sortie une énergie mécanique. Les informations relatives aux caractéristiques du moteur sont indiquées sur sa plaque signalétique. La figure I.2 montre un exemple de plaque signalétique d'un moteur asynchrone.

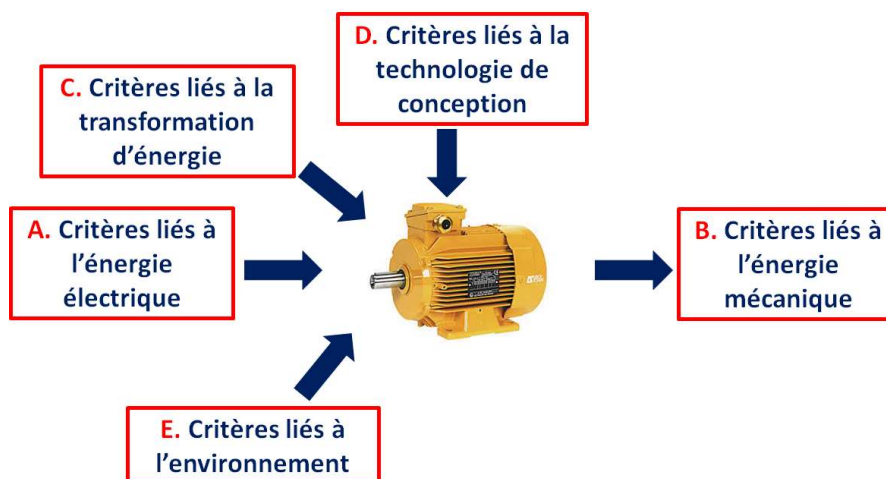


Figure I.1 : Critères de choix d'un moteur

- a) Les premiers critères à prendre en compte pour le choix d'un moteur sont donc en lien avec la source d'énergie électrique reçue. Cette source



d'énergie est soit alternative soit continu. On choisira soit un moteur à courant continu dans le cas d'une source continu, soit un moteur à courant alternatif dans le cas où la source d'énergie est en alternative.

- b) Les deuxièmes critères sont en lien avec l'énergie mécanique fournie par le moteur. Selon l'énergie mécanique exigée par la charge à entraîner, on aura à choisir (charge constante, charge variable selon la vitesse ou bien selon la puissance).
- c) La transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique est établie selon un bilan énergétique du moteur représenté par l'arbre des puissances mises en jeu lors du fonctionnement du moteur. Cet arbre nous renseigne sur la consommation du moteur, les pertes fer, les pertes mécanique, pertes joules, et la rentabilité de la transformation. Des critères en lien à la transformation sont donc à prendre en compte pour le choix du moteur (est ce que le moteur consomme beaucoup d'énergie ? est ce que les pertes sont considérables ? ....)
- d) Critère lié à la constitution technologique : plusieurs types du moteur (gros moteur, petits moteur, moteur à axe vertical, moteur à axe horizontal, enveloppé, résiste à l'eau, résiste à la poussière...)
- e) Critère lié à l'environnement : les sites industriels sont des milieux corrosifs (plein de poussière, nuisance, température, l'altitude...), des critères en lien avec l'environnement s'imposent donc pour le choix d'un moteur adéquat.

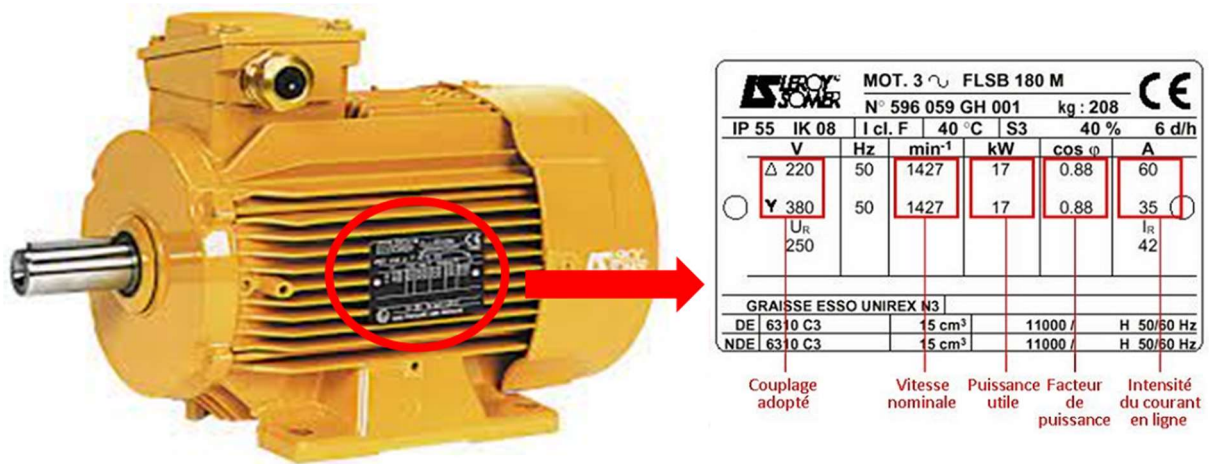


Figure I.2 : Plaque signalétique d'un moteur asynchrone

### I.2.1. Critères liés à l'énergie électrique

- Tension d'alimentation.
- Déséquilibre des tensions de phases.
- Facteur de puissance.
- Papillotement de la tension.
- Classification des moteurs.

#### I.2.1.1. Tension d'alimentation

Le tableau I.1 présente une comparaison des tensions nominales du réseau par rapport à celles données sur une plaque signalétique d'un moteur.

Tableau I.1 : Tension nominale (en Volt) du réseau par rapport à la tension de la plaque signalétique

Réseau d'alimentation	Plaque signalétique
120 V – 1 phase	115 V
240 V – 1 phase ou 3 phases	230 V
480/277 V – 3 phases	460 V
2400 V – 3 phases	2300 V

Une variation de  $\pm 10\%$  sur la tension du réseau pourra engendrer, dans le cas d'un moteur à induction, les effets présentés dans le tableau I.2.

**Tableau I.2 : Effet d'une variation de  $\pm 10\%$  dans la tension du réseau**

Caractéristiques	Tension	
	110%	90%
Rendement	+1%	-2%
Facteur de puissance	-3%	+1%
Température (°C)	-4%	+7%
Intensité du courant	-7%	+11%
Courant de démarrage	+10%	-10%
Glissement	-17%	+23%
Couple de démarrage	+21%	-19%

### I.2.1.2. Déséquilibre des tensions de phases

Le déséquilibre des tensions de phases se calcule comme suit :

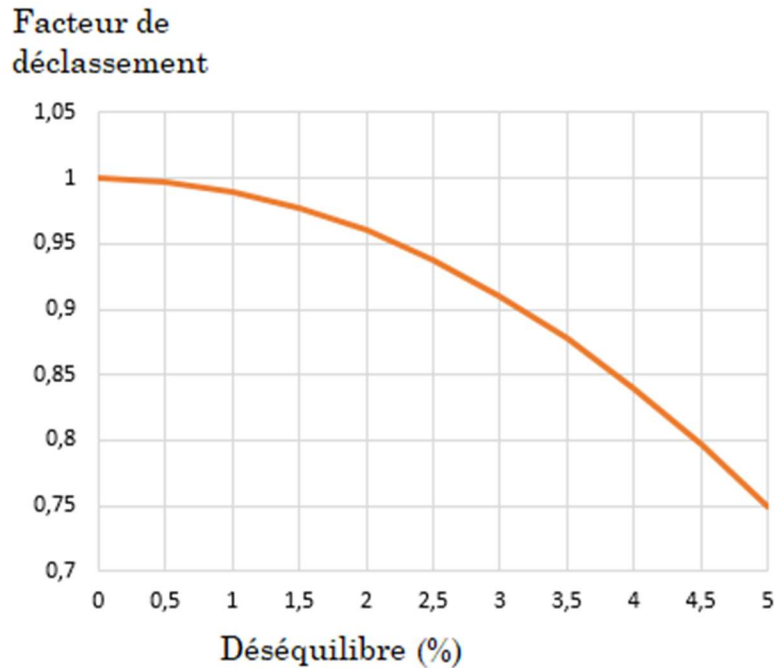
$$\text{déséquilibre de } V = \frac{\text{écart maximal par rapport à la moyenne}}{\text{tension moyenne } V} \times 100 \quad (\text{I.1})$$

#### Exemple :

Soit un réseau d'alimentation dont les tensions entre lignes sont : 589, 600, et 611 V, la moyenne des trois tensions est de 600V. L'écart par rapport à la moyenne est de 11V, le déséquilibre de tension sera de  $(11/600)*100=1,83\%$ .

Le déséquilibre des tensions ne doit pas dépasser 1% pour que le moteur fonctionne adéquatement.

Si le déséquilibre des tensions est supérieur à 1% le moteur doit être déclassé en réduisant sa puissance nominale selon le graphique suivant :



**Figure I.3 :** Déclassement du moteur suite au déséquilibre de phases

**Nb :** si le déséquilibre est supérieur à 5%, le moteur ne devra pas fonctionner.

### I.2.1.3. Facteur de puissance

La puissance apparente en kVA est calculée comme suit :

$$Puissance\ apparente = \sqrt{Puissance\ active^2 + Puissance\ réactive^2} \quad (I.2)$$

La puissance réactive (kVar) est absorbée par le moteur à courant alternatif pour la création du champ électromagnétique tandis que la puissance active (kW) est absorbée par le moteur pour produire la puissance mécanique utile.

Le client industriel, facturé en kVA, paye donc une puissance réactive qui ne produit aucun travail utile.

Le facteur de puissance est calculé comme suit :

$$\cos(\varphi) = \frac{Puissance\ active\ (kW)}{Puissance\ apparente\ (kVA)} \quad (I.3)$$

Le facteur de puissance s'exprime en pourcentage.

Sachant que la composante réactive est une valeur constante qui ne dépend pas de la charge, le facteur de puissance dans le cas d'un moteur à faible charge est,

donc, plus faible par rapport au facteur de puissance dans le cas d'un moteur à forte charge (pleine charge).

De ce fait, une installation ayant un facteur de puissance plus faible nécessite une amélioration du facteur de puissance selon la figure I.4.

Dans cette figure, la puissance apparente est représentée par le vecteur de l'hypoténuse, la puissance active est représentée par le vecteur horizontal et la puissance réactive est représentée par le vecteur vertical. Selon le cas, la composante réactive peut être soit inductive (vecteur vertical vers le haut) soit capacitive (vecteur vertical vers le bas).

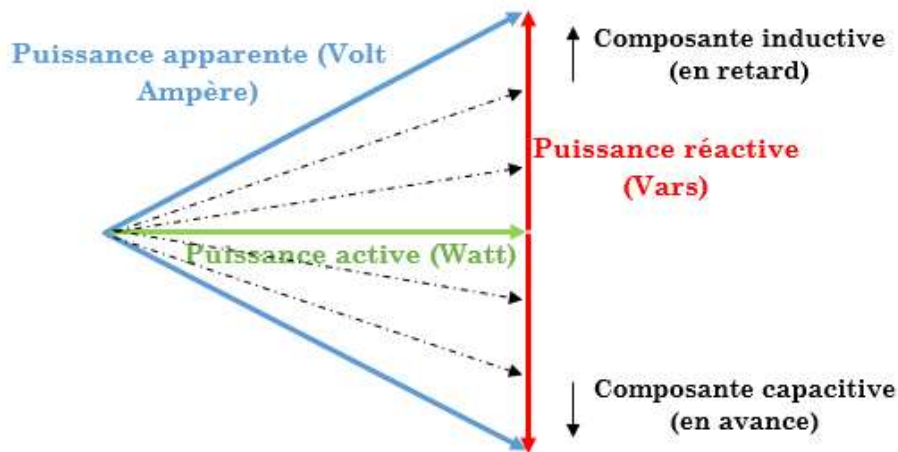


Figure I.4 : Triangle du facteur de puissance

Les deux vecteurs verticaux représentant les deux composantes (inductive et capacitive) s'annulent si les deux réactances (inductive et capacitive) sont égales. Dans ce cas, seule la composante active existe et le facteur de puissance correspond à l'unité.

Si la composante capacitive est inférieure à la composante inductive, le facteur de puissance est en arrière.

Par contre, si la composante capacitive est supérieure à la composante inductance, des problèmes de surtension seront engendrés et le facteur de puissance est en avance.

Pour avoir un facteur de puissance proche de l'unité, les clients industriels procèdent à l'installation des condensateurs en fonction des besoins.

#### I.2.1.4. Papillotement de la tension

Lors du démarrage des moteurs électriques, des chutes de tensions dans le réseau peuvent être engendrées et ce à cause du courant de démarrage élevé. Cette chute de tension se traduit par un papillotement observé sur le circuit d'éclairage. Selon l'amplitude de la chute de tensions engendrée, ce phénomène de papillotement est classé en des zones suivant la figure I.5.

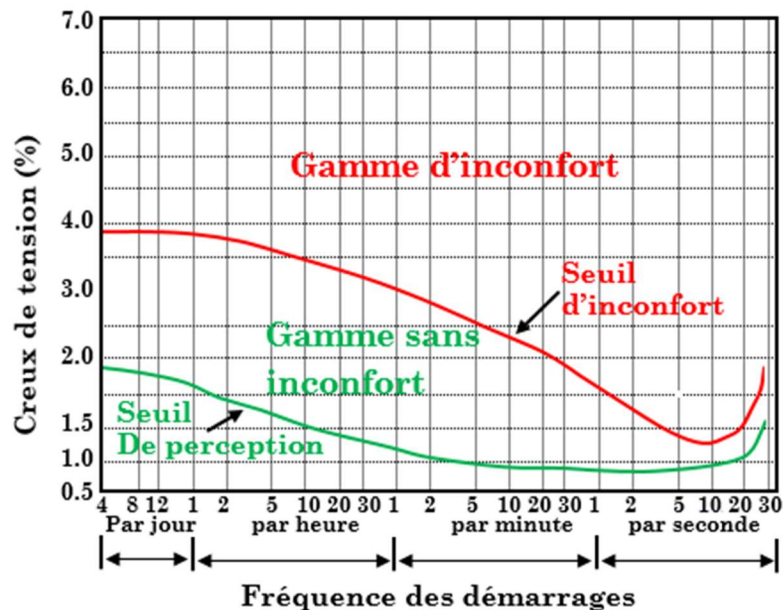


Figure I.5 : Seuils du papillotement

Lorsque la fréquence d'apparition du papillotement dépasse certaines limites, ceci est nuisible pour certains appareils électroniques comme les ordinateurs, les API,...etc.

**Exemple** : Soit une ligne d'impédance  $Zl = 0.07\Omega$  qui alimente un circuit d'éclairage de 120V et un moteur de 6 HP. Le courant de démarrage du moteur est  $I_d = 83A$ .

Calculer la chute de tension ( $\Delta V$ ) au démarrage du moteur.

$$\Delta V = Z_l \times I_d = 0.07 \times 83 = 5.81V \approx 6V \quad (I.4)$$

Pour un circuit d'éclairage de 120 V, une chute de tension de 6V représente un creux de 5% soit donc un papillotement classé dans la zone d'inconfort. Si la fréquence de démarrage du moteur est d'une fois par heure, ce point correspond au point A sur la courbe.

Pour remédier à ce problème, il est nécessaire d'alimenter le circuit d'éclairage par une ligne distincte. Une autre solution plus économique consiste à utiliser un démarreur à tension réduite.

Dans l'exemple précédent, si le courant de démarrage du moteur est réduit à 70% de sa valeur avec une fréquence de démarrage d'une fois par heure, le creux de tension sera de 3.5% et le papillotement sera classé en zone sans inconfort (le point B sur la courbe).

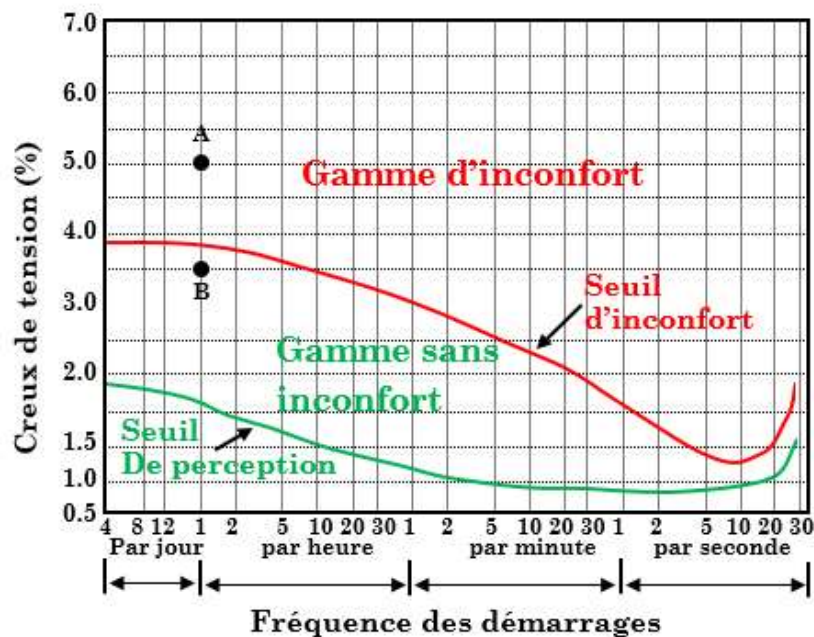


Figure I.6 : Exemple de papillotement de la tension

### I.2.1.5. Classification des moteurs

Les moteurs électriques peuvent généralement être divisés en plusieurs types : moteurs à courant alternatif (CA), moteurs à courant continu (CC) et moteurs universels. Un moteur à courant continu ne fonctionnera pas lorsqu'il est alimenté

en courant alternatif, et un moteur à courant alternatif ne fonctionnera pas avec un courant continu alors qu'un moteur universel fonctionnera avec un courant alternatif ou continu.

### **a) Moteurs à courant continu**

Les moteurs à courant continu sont également divisés en types. Ceux-ci incluent des moteurs à broches, des moteurs "brochless", et des moteurs pas à pas. Parmi ces types, les moteurs à broches sont de loin les plus courants. Ils sont faciles à construire et très rentables. Leur inconvénient majeur est qu'ils utilisent des balais en carbone, ou « charbons », pour transférer le courant électrique à la partie tournante, et ces balais s'usent avec le temps et finissent par entraîner la défaillance du moteur électrique ce qui réduit la durée de vie du moteur. Le moteur sans balai à courant continu élimine les balais, mais il est plus coûteux et nécessite beaucoup plus d'électronique de commande pour fonctionner.

Les moteurs à courant continu sont utilisés pour la régulation de la vitesse. La vitesse du moteur à courant continu est contrôlée en faisant varier le courant de l'induit.

### **b) Moteurs universels**

Les moteurs universels ont tendance à avoir de nombreuses caractéristiques communes avec les moteurs à courant continu, en particulier les moteurs à balais. Aussi appelés moteurs à enroulement en série, ils se trouvent le plus souvent dans les appareils électroménagers qui fonctionnent très rapidement pendant une courte période de temps. Les robots culinaires, les mélangeurs et les aspirateurs fonctionnent tous avec des moteurs universels.

### **c) Moteurs à courant alternatif**

Les moteurs à courant alternatif sont très robustes et ont une longue durée de vie. Ils sont classés en moteurs monophasés et triphasés. L'alimentation électrique à courant alternatif monophasé est ce qui est généralement fourni dans les maisons. L'alimentation électrique triphasée n'est généralement disponible que dans les sites industriels.



La vitesse du moteur à courant alternatif est contrôlée en faisant varier la fréquence, ce qui est généralement effectué avec un variateur de fréquence réglable.

Parmi les moteurs à courant alternatif il y a deux types :

- Moteurs asynchrone
- Moteur synchrone

Les moteurs asynchrones (appelés moteurs à induction) sont les plus utilisés en raison de leur coût relativement peu élevé. On distingue :

- Moteur à cage d'écureuil
- Moteur à rotor bobiné

Les moteurs à induction à rotor bobiné sont très pratiques dans certaines applications du fait que l'on peut modifier les circuits de leur rotor de façon à obtenir les caractéristiques de démarrage et de fonctionnement voulues. Leurs balais nécessitent toutefois un entretien de service.

Les machines synchrones sont généralement utilisées comme générateur ou compensateur. Ayant un coût très élevé, les moteurs synchrones sont utilisés uniquement dans les cas suivant :

- Lorsqu'une vitesse précise et constante est nécessaire.
- Pour corriger le facteur de puissance

## **I.2.2. Critères liés à l'énergie mécanique**

- Charge entraînée
- Vitesse
- Démarrage et arrêt

### **I.2.2.1. Charges entraînées**

**Couple résistant** : Le couple résistant d'une machine définit l'effort que la charge mécanique oppose au maintien de sa mise en mouvement. Il s'exprime en Newton mètre (N.m)

**Inertie :** L'inertie est une résistance des objets pesants (lourd) au mouvement qui leur est imposé. Elle est d'autant plus importante que la masse de la charge est grande et s'oppose à la mise en mouvement. Elle est caractérisée par le moment d'inertie  $J$ , qui s'exprime en  $\text{kg.m}^2$ .

L'inertie définit donc le couple nécessaire pour mettre en mouvement une masse  $m$ .

**Couple de démarrage :** Pour que le moteur entraîne une machine, il lui faut un couple de démarrage. Celui-ci doit d'une part décoller la masse (de moment d'inertie  $J$ ) de la machine et d'autre part vaincre le couple résistant relatif à la machine.

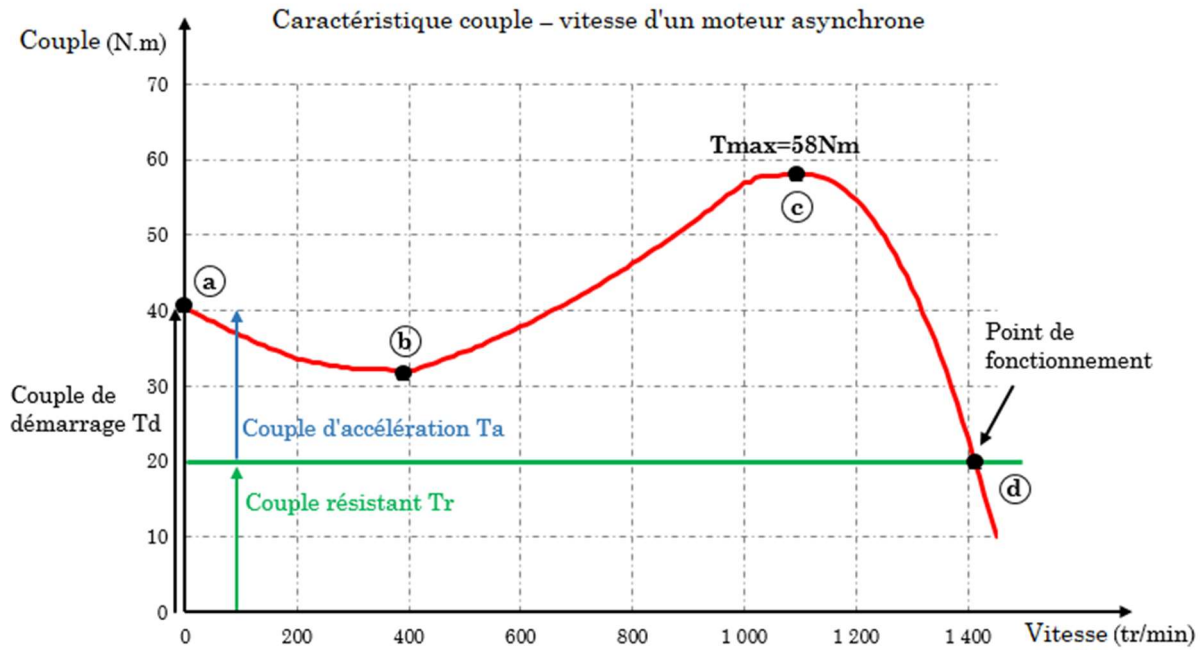
On désigne par  $T_a$  le couple d'accélération (qui n'existe que pendant la mise en vitesse de la masse d'inertie  $J$ ) et  $T_r$  le couple résistant de la machine (qui se maintient durant tout le fonctionnement du moteur).

Ainsi le Couple de démarrage  $T_d$  peut se calculer :

$$T_d = T_r + T_a \quad (\text{I.5})$$

Pour faciliter le processus de choix d'un moteur, il convient de connaître la caractéristique du couple produit en fonction de la vitesse. Au moment du démarrage, le couple moteur est en moyenne de 1,5 à 2 fois le couple nominal (courbe en trait rouge sur la figure I.7).

- a) Couple de démarrage : c'est le couple développé par le moteur à vitesse nulle.
- b) Couple minimal pendant la phase de démarrage : c'est le couple le plus bas développé durant la phase de démarrage qui se situe entre la vitesse nulle et la vitesse de fonctionnement.
- c) Couple de décrochage : c'est le couple le plus élevé que le moteur développe avant qu'il cale.
- d) Couple moteur : c'est le couple correspondant au point de fonctionnement en plein charge (charge de couple résistant  $T_r$  sur la figure). En ce point, le produit du couple par la vitesse est égal à la puissance donnée sur la plaque signalétique.



**Figure I.7 :** Exploitation de la courbe du couple en fonction de la vitesse

La condition d'entraînement résulte de l'application de la loi fondamentale de la dynamique qui s'écrit :

$$T_m = J \frac{d\Omega}{dt} + T_r \tag{I.6}$$

- $T_m$  : Couple moteur en (N.m)
- $T_r$  : Couple résistant en (N.m)
- $J$  : moment d'inertie en (kg.m<sup>2</sup>)
- $\Omega$  : la vitesse de rotation du moteur en (rd/s)

$J \frac{d\Omega}{dt}$  : Représente le couple d'inertie produit par l'accélération/décélération lorsque la vitesse change en fonction du temps ( $\Delta\Omega/\Delta t$ ). Au démarrage, ce couple est un couple d'accélération et la relation (I.6) devient :

$$T_d - T_r = J \frac{d\Omega}{dt} \tag{I.7}$$

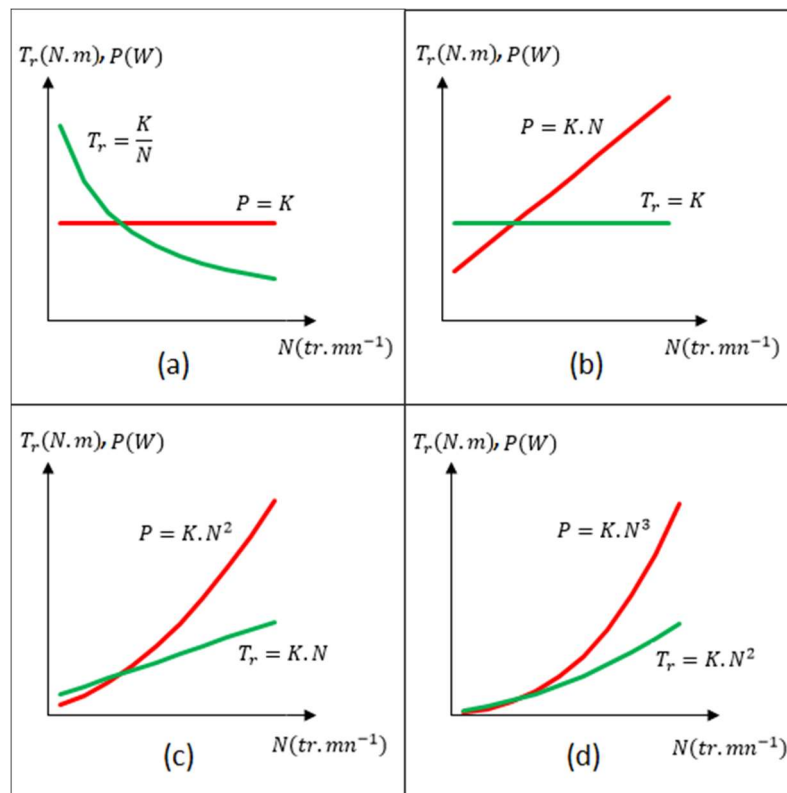
Où  $T_d$  est le couple de démarrage.

Pour qu'un moteur puisse entraîner une charge, il doit développer un couple suffisant pour accélérer la charge depuis son arrêt jusqu'à sa vitesse de

fonctionnement, tout en fournissant une puissance répondant à toutes les demandes éventuelles.

Pour définir correctement les spécifications d'un moteur, on devra tenir compte des caractéristiques ci-après de la charge (figure I.8).

- Charge à puissance constante : courbe (a).
- Charge à couple constant : courbe (b).
- Charge à couple proportionnel à la vitesse : courbe (c).
- Charge à couple proportionnel au carré de la vitesse : courbe (d).

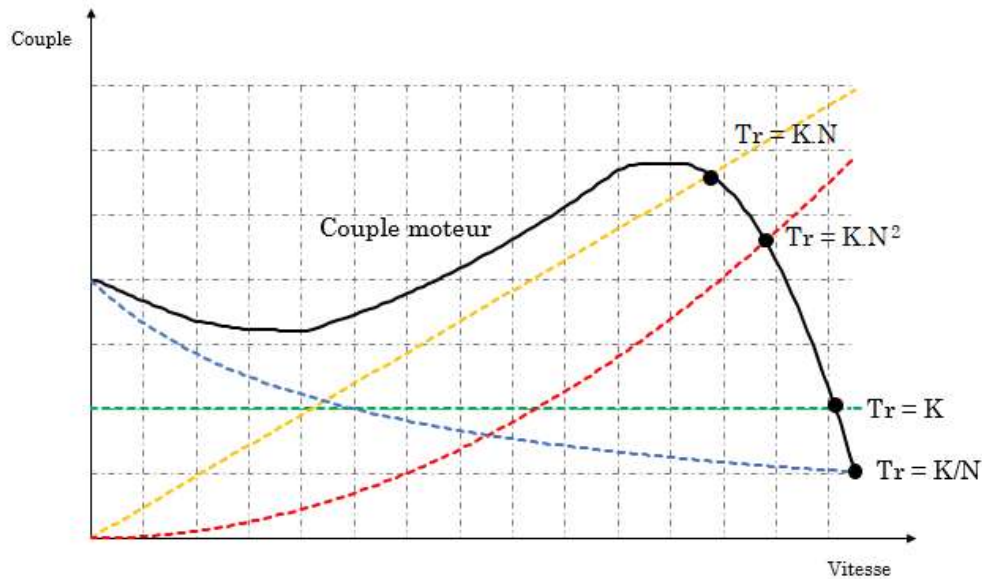


**Figure I.8 :** Différentes caractéristiques de charges entraînées : (a) Charge à puissance constante ; (b) Charge à couple constant ; (c) Charge à couple proportionnel à la vitesse ; (d) Charge à couple proportionnel au carré de la vitesse ;

Les différents types de charges les plus courantes sont donnés dans le tableau I.3. Le point de fonctionnement correspondant à chacun de ces types de charge entraînée par un moteur asynchrone est montré sur la figure I.9.

**Tableau I.3 : Différents types de charges**

Type de charge	Type de machine
Puissance constante	Enrouleuses – dérouleuses
Couple constant	Broyeurs, Convoyeur, Machines de levage, Pompe volumétrique
Couple proportionnel à la vitesse	Mélangeurs,
Couple proportionnel au carré de la vitesse	Centrifugeuses, Pompes centrifuges, Ventilateurs



**Figure I.9 :** Points de fonctionnement des différents types de charges entraînées par un moteur asynchrone

### I.2.2.2. Vitesse

La pulsation du rotor d'un moteur asynchrone est donnée par :

$$\Omega = \Omega_s(1 - g) = \frac{\omega}{p}(1 - g) = \frac{2\pi f}{p}(1 - g) \quad (I.8)$$

Avec :

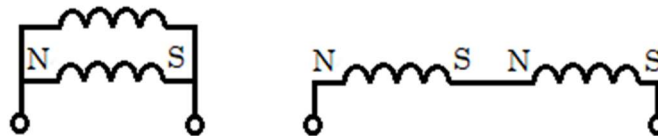
- $g$  : glissement
- $p$  : nombre de paires de pôles
- $\Omega$  : pulsation du rotor en (rd/s)
- $\Omega_s$  : pulsation du synchronisme en (rd/s)
- $f$  : fréquence de la tension (Hz)
- $\omega$  : pulsation de la tension (rd/s)

Le réglage de la vitesse de rotation du moteur peut donc être obtenu par :

- Action sur le nombre de paires de pôles
- Action sur la fréquence de la tension d'alimentation statorique
- Action sur le glissement

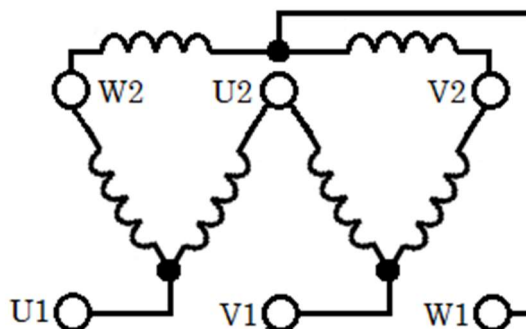
**a) Action sur le nombre de paires de pôles**

Ce procédé permet d'obtenir un actionneur à plusieurs vitesses (moteur de type Dahlander). Ce type de moteur possède deux bobinages distincts par phase, qui peuvent être couplés en série (4 pôles) ou en parallèle (2 pôles).



**Figure I.10 :** Couplage d'enroulements (moteur de type Dahlander)

En associant les deux bobinages en parallèle, leurs actions vont se superposer et ils se comporteront comme un seul enroulement (une paire de pôles). Le moteur tournera à sa vitesse maximale (bornes W2, U2, V2 de la figure I.11). En associant deux bobinages en série, on double le nombre de paires de pôles (deux paires de pôles). La vitesse du moteur est divisée par 2 (bornes U1, V1, W1 de la figure I.11).



**Figure I.11 :** Couplages des enroulements

Moteur à deux enroulement séparés (Figure I.12) : ce moteur correspond à l'assemblage de deux moteurs aux vitesses différentes dans la même carcasse.

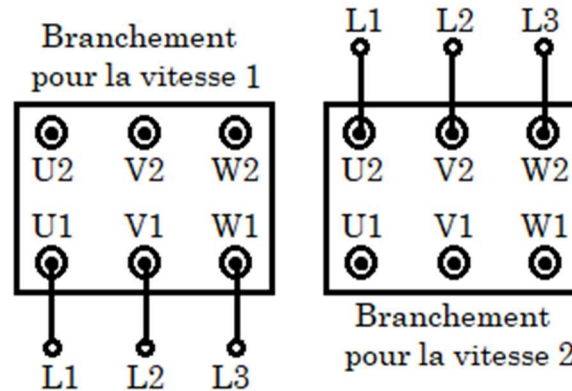


Figure I.12 : Moteur à deux enroulements séparés

L'encombrement est plus important mais le rapport des vitesses peut être quelconque.

### b) Action sur la fréquence

Le convertisseur statique de type « onduleur » permet un fonctionnement du moteur avec un couple maximal, par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension statorique, avec conservation du rapport  $U/f$ , ce qui est intéressant dans le cas de charges à couple constant (ascenseurs).

En effet, le couple  $C$  est lié à la fréquence  $f$ , la tension  $U$  et le courant  $I$  par la formule :

$$C = (U/f) * I \quad (\text{I.9})$$

Si le rapport  $U/f$  est maintenu constant, le couple le sera aussi.

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

- La limitation du courant de démarrage.
- Un couple relativement constant quelle que soit la vitesse du moteur.

Le freinage par récupération a lieu lorsque la fréquence de rotation du moteur devient supérieure à la fréquence de synchronisme.

### **c) Action sur le glissement**

Le gradateur permet de modifier la valeur efficace de la tension statorique. Il est surtout utilisé sur des machines dont le couple résistant est de type parabolique (ventilateur).

$$g = f(\cos(\alpha)) \quad (\text{I.10})$$

Avec :

$\alpha$  : angle de retard à l'amorçage.

#### **I.2.2.3. Démarrage et arrêt**

- Dans le cas des démarrages fréquents, la température des enroulements ainsi que celle du circuit magnétique est trop élevée. Il faut, donc, s'assurer que cette température ne dépasse pas celle indiquée sur la plaque signalétique du moteur.
- Dans le cas où la charge entraînée est d'inertie élevée, le couple de démarrage doit être approprié.
- Pour éviter le déclenchement des protections de surcharges, le moteur à choisir doit pouvoir atteindre sa pleine vitesse assez rapidement.
- Dans le cas où la charge entraînée demande un certain temps avant d'atteindre la pleine vitesse (exemple : convoyeur à bande), il faut choisir un entraînement à vitesse variable.
- Démarrage direct : Ce type de démarrage est réservé aux moteurs de faible puissance devant celle du réseau, ne nécessitant pas une mise en vitesse progressive.
- Démarrage étoile – triangle : Ce type de démarrage est réservé aux machines démarrant à vide ou dont le couple résistant est faible.
- Démarrage statorique : Ce type de démarrage a des caractéristiques comparables au démarrage étoile – triangle.



- Démarrage rotorique : le couple de démarrage est limité sans que le couple soit réduit. Ce type de démarrage nécessite un moteur à bagues (rotor bobiné).

### **I.2.3. Critères liés à la transformation d'énergie - Efficacité énergétique et rentabilité**

#### **I.2.3.1. Rendement d'un moteur**

Le rendement d'un moteur est calculé par la relation donnée dans l'équation (I.11). Il est, généralement, exprimé en pourcentage.

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Puissance fournie}}{\text{Puissance absorbée}} \cdot 100 \quad (\text{I.11})$$

$$\text{Puissance fournie} = \text{Puissance absorbée} - \text{pertes} \quad (\text{I.12})$$

Grâce aux nouvelles technologies avec des matériaux améliorés, le rendement d'un moteur électrique peut être amélioré davantage. Ce type de moteur est appelé moteur éconergétique car il absorbe une énergie électrique moins que celle absorbée par un moteur standard pour la même puissance mécanique fournit.

#### **I.2.3.2. Coûts de l'énergie**

Le cycle de vie d'un moteur électrique est d'environ 15 à 25 ans ou plus. Durant tout son cycle de vie, le moteur consomme annuellement presque dix fois son coût d'achat. Le coût du cycle de vie d'un moteur est donné par la relation (I.13).

$$Ccv = C + E_T + M \quad (\text{I.13})$$

Où :

- Ccv : Coût du cycle de vie
- $E_T$  : Coût total de l'énergie
- C : coût d'investissement initial plus coûts d'installation
- M : Coût total d'entretien

### **Exemple**

Un moteur de 9 HP fonctionne pendant 50 % du temps avec une puissance de 7 HP. Son rendement est de 90 %. Son prix d'achat 100875 DZD et son installation coûte 14795 DZD. La durée de vie du moteur est 10 ans. L'entretien annuel du moteur coûte 4169.5 DZD.

Sachant que le prix de l'électricité est égale à 8.07 DZD/kWh, le coût du cycle de vie est déterminé comme suit :

$$C = 100875 + 14795 = 115670 \text{ DZD}$$

$$E_T = 8760 \times 0.5 \times \frac{7 \times 0.7355}{0.9} \times 8.07 \times 10 = 2022073 \text{ DZD}$$

$$M = 4169.5 \times 10 = 41695 \text{ DZD}$$

$$C_{cv} = 115670 + 2022073 + 41695 = 2179438 \text{ DZD}$$

Si nous considérons un moteur éconergétique coûtant 26900 DZD de plus pour son achat avec un rendement égale à 95 %, le coût du cycle de vie serait de 2099814 DZD, soit alors une économie de 79624 DZD.

#### **I.2.4. Critères liés à la technologie de conception**

Dans certains cas particuliers où un moteur "standard" ne peut convenir, il est utile de commander un moteur spécial. Les fabricants, qui offrent généralement des modèles standards moins coûteux avec un délai de livraison plus court, sont tenus de fournir les informations liées aux prix et le délai de livraison.

#### **I.2.5. Critères liés à l'environnement**

- Conditions normales de service
- Conditions de service exceptionnelles

##### **I.2.5.1. Conditions normales de service**

La norme CEI 34-1 définit les conditions normales comme suit :

1. Exposition à une gamme de températures ambiante comprises entre + 5 et 40 °C.
2. Exposition à une altitude ne dépassant pas 3300 pieds (1000 mètres).
3. Installation dans des lieux ou dans des enveloppes complémentaires n'entravant pas notablement la ventilation de la machine.
4. Pression atmosphérique : 1050 mBar.

#### **I.2.5.2. Conditions de service exceptionnelles**

Les normes NEMA (National Electrical Manufacturers Association) établissent les conditions de service anormales types suivantes :

1. Exposition à des combustibles, explosifs, abrasifs, poussières conductrices
2. Fonctionnement avec :
  - a. Un déséquilibre supérieur à 1 %.
  - b. Une vitesse supérieure à la vitesse indiquée sur la plaque signalétique.
  - c. Une charge de torsion dynamique.
  - d. Une surcharge répétitive.

#### **I.3. Exercice**

Nous cherchons à déterminer un moteur capable d'entraîner une charge dont le couple résistant est évalué à environ 9 N.m à une vitesse de rotation d'environ 1430 tr/mn. Le réseau d'alimentation est de 400V.

1. Choisir le moteur à partir du tableau I.4 fourni
2. Calculer le glissement et l'intensité de démarrage du moteur choisi

Tableau I.4 : Liste des moteurs

Moteurs	Pn (kW)	Nn (tr/min)	cos Φ	Rendement η (%)	Id/In
LS 90S	1.1	1415	0.81	76	5
LS 90L	1.5	1420	0.81	78	5.9
LS 90L	1.8	1410	0.83	79	5.7
LS 100L	2.2	1430	0.81	78	5.3
LS 100L	3	1420	0.78	79	5.1

## Solution

### 1. Choix du moteur

La vitesse angulaire du moteur est :

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \cdot 1430}{60} = 149.6 \text{rd/s}$$

La puissance mécanique nécessaire est :

$$P = T \cdot \Omega = 9 \cdot 149.6 = 1346.4 \text{ W}$$

Le choix se portera alors sur le moteur de type LS 90L de puissance nominale 1.5 kW.

### 2. Le glissement et l'intensité de démarrage

Le glissement du moteur choisi est :

$$g = \frac{n - n'}{n} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 5.3\%$$

L'intensité de démarrage est :

$$\frac{Id}{In} = 5.9 \rightarrow Id = 5.9 \cdot 3.43 = 20.24 \text{ A}$$

Avec

$$In = \frac{Pa}{U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi} = \frac{1923}{400 \cdot \sqrt{3} \cdot 0.81} = 3.43 \text{ A}$$

Et

$$Pa = \frac{Pu}{\eta} = \frac{1500}{0.78} = 1923 \text{ W}$$

# **Chapitre II**

---

## **Commande électrique et automatisation des pompes, des ventilateurs et des compresseurs**

## **II.1. Introduction**

Un des composants essentiels des systèmes électriques utilisés dans les industries s'avère être les pompes, les compresseurs et les ventilateurs.

Par définition, une pompe est une machine permettant d'augmenter la pression et/ou le débit d'un liquide. Lorsque le fluide transporté est un gaz, il est plus correct de parler de ventilateurs, de compresseurs ou de soufflantes.

## **II.2. Les pompes**

Il existe deux grandes familles de systèmes de pompage qui diffèrent selon l'utilisation que l'on souhaite en faire, ce qui sera déterminé par les procédés fluides. Si l'on souhaite augmenter la pression d'un fluide, il faudra se tourner vers les pompes volumétriques dont l'écoulement résulte de la variation d'une capacité occupée par le liquide. Si l'on veut en augmenter le débit, on utilisera les pompes centrifuges. Là, le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge.

Le choix du moteur est lié à la puissance consommée par la pompe à son point de fonctionnement nominal (fixée par le constructeur).

Dans ce qui suit, nous allons considérer le type de pompes centrifuges car c'est le type de pompe industrielle le plus commun.

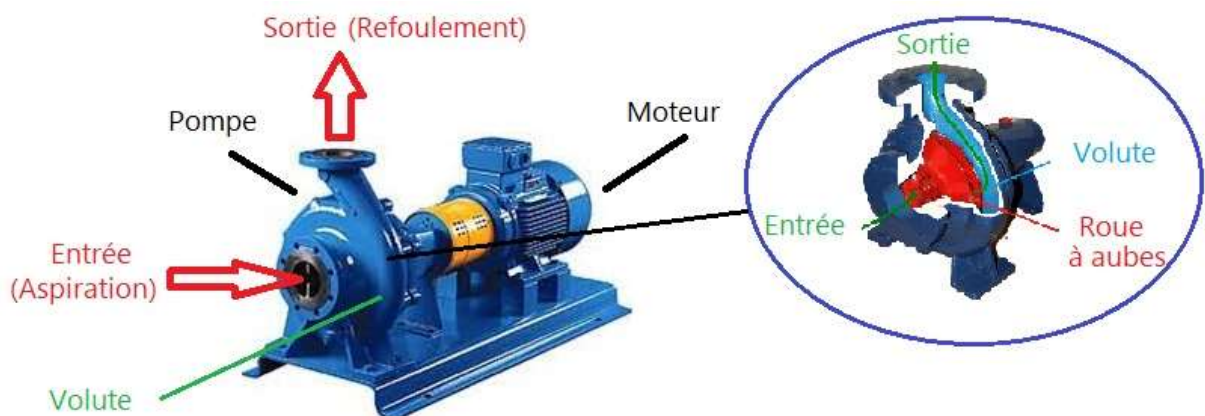
### **II.2.1. Définition d'une pompe centrifuge**

Une pompe centrifuge est une machine tournante qui grâce à une roue à aubes augmente l'énergie cinétique d'un liquide et provoque, à l'aide de la force centrifuge, son déplacement dans un réseau hydraulique défini par une Hauteur Manométrique Totale (HMT) relativement fixe.

### **II.2.2. Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge**

Le processus de fonctionnement se déroule en deux étapes : l'aspiration et l'accélération. La pompe est immergée dans l'eau. Lorsque le rotor tourne, le fluide pompé est d'abord aspiré axialement dans la pompe, puis accéléré radialement.

Le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée « distributeur ». Son rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à l'entrée du rotor. Le rotor va transformer cette énergie mécanique appliquée à l'arbre en énergie cinétique. À 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. Lorsque l'eau sort de la turbine, elle crée une zone de basse pression qui attire plus d'eau par l'entrée de l'aspiration. Une plus grande quantité d'eau s'ensuit et un débit se développe.



**Figure II.1 :** Pompe centrifuge horizontale

Grace à la forme spirale de la volute et de son diamètre qui augmente au fur et à mesure qu'on se dirige vers la sortie, la section offerte au liquide étant de plus en plus grande. En se dilatant, la vitesse de l'eau diminue ce qui entraîne une augmentation de la pression. Ce canal en expansion permet donc à plus d'eau à ce joindre et à se convertir en pression (son **énergie cinétique** se transforme en **énergie de pression**). La sortie du refoulement a donc une pression plus élevée que l'entrée de l'aspiration ce qui permet de forcer le fluide à travers des tuyaux ou dans un réservoir de stockage.

### II.2.3. Puissance en bout d'arbre

Une pompe centrifuge va demander, pour un débit et une pression, une puissance hydraulique nécessaire à l'arbre de la pompe tandis que la puissance électrique sera celle soutirée par le moteur au réseau électrique pour entraîner cette pompe au point de fonctionnement.

Pour calculer la puissance mécanique absorbée par la pompe, il faut ajouter à la puissance hydraulique les pertes dues au rendement. Le rendement dépend de la technologie de la pompe utilisée et de la pression d'utilisation ainsi que des caractéristiques du fluide (viscosité, température, etc...).

Tout repose sur le calcul de la puissance hydraulique qui est fonction de la pression et de la hauteur. La détermination de ces deux grandeurs est liée à l'équation de Bernoulli.

#### II.2.3.1. Principe de Bernoulli

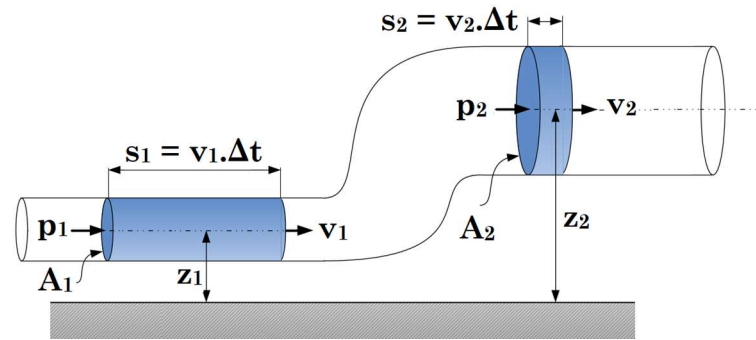
Le calcul des pompes repose principalement sur l'équation de Bernoulli. Dans un fluide s'écoulant horizontalement, la pression du fluide au point où sa vitesse est élevée, est plus faible que la pression du fluide au point où sa vitesse est plus faible.

L'équation de Bernoulli relie les pressions, les vitesses et les altitudes de deux points d'une ligne de courant d'un fluide de masse volumique  $\rho$  en écoulement laminaire permanent. Par application de la conservation d'énergie, l'équation de Bernoulli s'écrit généralement de la manière suivante :

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g z_2 = Cte \quad (\text{II.1})$$

Les variables  $p_1$ ,  $v_1$  et  $z_1$  représentent respectivement la pression, la vitesse et l'altitude du fluide au point  $A_1$ , tandis que les variables  $p_2$ ,  $v_2$  et  $z_2$  représentent respectivement la pression, la vitesse et l'altitude du fluide au point  $A_2$ . Cette équation est vérifiée pour n'importe quel couple de points choisi arbitrairement sur la même ligne de courant (figure II.2).





**Figure II.2 : Principe de Bernoulli**

$g$  : l'accélération de la pesanteur en (m/s<sup>2</sup>).

➤ **Cas d'un écoulement entre les points (A1) et (A2) sans échange de travail :**

Lorsque, dans un écoulement d'un fluide parfait, il n'y a aucune machine (ni pompe ni turbine) entre les points (A1) et (A2) d'une même ligne de courant, la relation de Bernoulli peut s'écrire sous cette forme :

$$(p_2 - p_1) + \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) + \rho g(z_2 - z_1) = 0 \quad (\text{II.2})$$

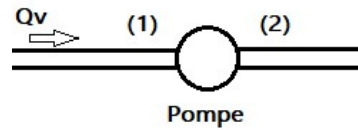
En divisant tous les termes de la relation (II.2) par le produit  $\rho g$ , on écrit tous les termes dans la dimension d'une hauteur (pressions exprimées en mètres de colonne de fluide).

$$\frac{(p_2 - p_1)}{\rho g} + \frac{1}{2g}(v_2^2 - v_1^2) + (z_2 - z_1) = 0 \quad (\text{II.3})$$

➤ **Cas d'un écoulement entre les points (A1) et (A2) avec échange d'énergie :**

Si les forces de frottement interviennent ou lorsque le fluide traverse une machine hydraulique (ex : pompe), il échange de l'énergie avec cette machine. La puissance  $P$  échangée entre les points (A1) et (A2) est donnée par :

$$\frac{(p_2 - p_1)}{\rho g} + \frac{1}{2g}(v_2^2 - v_1^2) + (z_2 - z_1) = \frac{P}{\rho g Q_v} = H_T \quad (\text{II.4})$$



**Figure II.3** : Puissance échangée

- $H_T$  : Hauteur totale
- $Q_v$  : est le débit volume en ( $m^3/s$ )

Pour une pompe on appelle hauteur manométrique la grandeur :

$$H_T = \frac{P}{\rho g Q_v} \quad (\text{II.5})$$

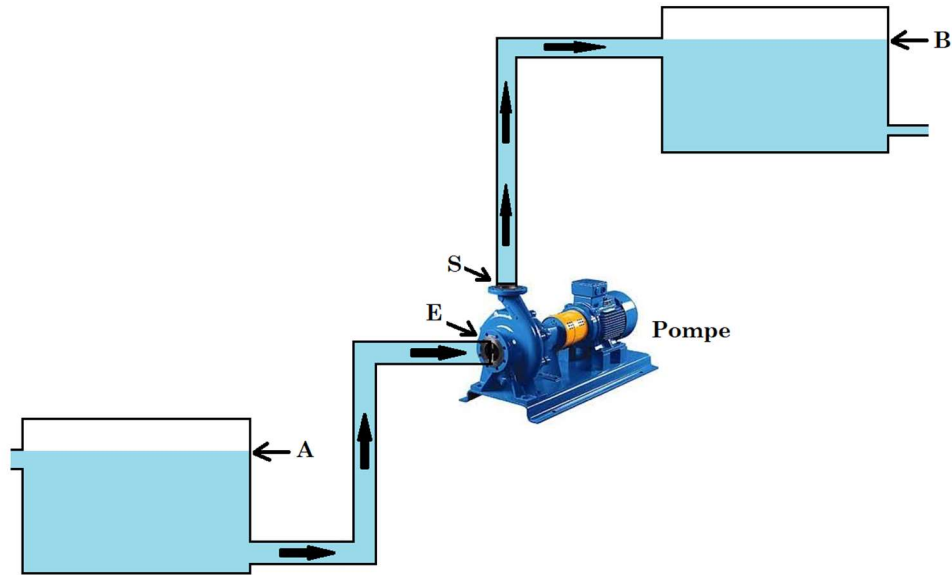
$g$  en ( $m/s^2$ ),  $Q_v$  en ( $m^3/s$ ),  $P$  en ( $W$ ),  $\rho$  en ( $kg/m^3$ ),  $H$  en ( $m$ ) et la pression en ( $Pa$ ).

### II.2.3.2. Calcul de la hauteur manométrique

Par analogie électrique-hydraulique, le débit correspond au courant et la pression (ou hauteur) correspond au potentiel. Par conséquent, le débit sort de la pression la plus élevée jusqu'à la pression la plus faible. Ce qui implique, au niveau d'une pompe (générateur ou batterie dans le cas électrique), la pression de refoulement est supérieure à toute les pressions à n'importe quel point et la pression d'aspiration est la plus faible.

Le débit  $Q$  fourni par une pompe centrifuge est le volume refoulé pendant l'unité de temps. Il s'exprime en ( $m^3/s$ ) ou plus pratiquement en ( $m^3/h$ ).

Considérons l'exemple de la figure II.4. L'important est de déterminer la hauteur totale ou manométrique  $H_T$  qui correspond à la différence de hauteur entre le point de refoulement (S) et le point d'aspiration (E) de la pompe.



**Figure II.4 : Exemple**

- Entre A et E :

$$H_A = H_E + \sum \Delta h_{AE} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$\sum \Delta h_{AE}$  : Somme des pertes de charge entre les points A et E. Elles représentent les pertes de charges dans la conduite d'aspiration. Dans ce tronçon, il y a deux types de pertes de charges : régulières (au niveau des parois des tuyaux) et singulière (au niveau des coudes).

- Entre S et B :

$$H_S = H_B + \sum \Delta h_{SB} \quad (\text{II.7})$$

En additionnant les équations (II.6) et (II.7), on obtient :

$$H_A + H_S = H_E + H_B + \sum \Delta h_{AE} + \sum \Delta h_{SB} \quad (\text{II.8})$$

$$(H_S - H_E) = (H_B - H_A) + \sum \Delta h_{AE} + \sum \Delta h_{SB} \quad (\text{II.9})$$

$H_t = (H_S - H_E)$  : Hauteur totale manométrique. A partir de cette hauteur, on calcule la puissance de la pompe.

$$H_{Hydr} = (H_B - H_A) : \text{Hauteur hydraulique.}$$

$\sum \Delta h_{AE} + \sum \Delta h_{SB}$  : Pertes de charge dans la conduite d'aspiration et de refoulement.

Pour déterminer la pression aux différents points, il suffit de remplacer dans (II.9) la hauteur par l'expression tirée de l'équation de Bernoulli. D'où on obtient l'équation suivante :

$$\frac{(p_S - p_E)}{\rho g} + \frac{1}{2g}(v_S^2 - v_E^2) + (z_S - z_E) = \frac{(p_B - p_A)}{\rho g} + \frac{1}{2g}(v_B^2 - v_A^2) + (z_B - z_A) + \sum \Delta h_{AE} + \sum \Delta h_{SB} \quad (\text{II.10})$$

L'équation (II.10) peut être simplifiée en considérant les hypothèses suivantes :

- Au niveau de la pompe, l'altitude du point d'aspiration est égale à l'altitude du point de refoulement ( $z_E \approx z_S$ ).
- Au niveau de la pompe, la vitesse d'aspiration est égale à la vitesse de refoulement ( $v_E \approx v_S$ ).
- Au niveau d'un réservoir, la vitesse du fluide est supposée nulle (variation du niveau du fluide très lente) ( $v_A \approx v_B \approx 0$ ).
- Au niveau d'un réservoir, la pression au niveau de la surface (sans piston) est égale à la pression atmosphérique ( $p_A \approx p_B \approx P_{at}$ ).

Par conséquent, l'équation (II.10) devient comme suit :

$$\frac{(p_S - p_E)}{\rho g} = (z_B - z_A) + \sum \Delta h_{AE} + \sum \Delta h_{SB} \quad (\text{II.11})$$

Comme vous le constatez, l'expression (II.9) ne diffère pas de l'expression (II.11). L'expression (II.9) est fonction de la hauteur (niveau de référence de notre installation) et l'autre de l'altitude (en fonction du niveau de la mer). Or, dans la pratique, on calcule tous nos grandeurs en fonction d'un niveau de référence de l'installation. Par conséquent, c'est l'expression (II.9) qui est la plus utilisée.

### **II.2.3.3. Écoulement dans la conduite : pertes de charge**

Les pertes de charge sont des chutes de pression dues à la résistance que rencontrent les fluides en écoulement : les actions de cisaillement occasionnent en effet des pertes énergétiques. Elles dépendent de la vitesse d'écoulement  $V$  (ou débit  $Q = V \times S$  ou  $S$  est la section de la conduite) du fluide dans la conduite.

Comme illustré dans la figure II.5, les pertes de charge peuvent être :

• **Linéiques ou régulières** : elles correspondent alors à l'écoulement le long des conduites. Elles sont données par la formule suivante :

$$\Delta H_L = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (\text{II.12})$$

v est la vitesse du fluide (m/s) donnée par :

$$v = \frac{4Q_v}{\pi D^2} \quad (\text{II.13})$$

Ce qui donne :

$$\Delta H_L = \lambda \frac{L}{D} \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \quad (\text{II.14})$$

- $\lambda$  : Coefficient de pertes de charges linéiques.
- D : diamètre de la conduite (m).
- L : longueur de la conduite (m).
- g : accélération de la pesanteur (m/s<sup>2</sup>).
- Q<sub>v</sub> : le débit en (m<sup>3</sup>/s).

On remarque que les pertes de charges linéiques sont proportionnelles à la hauteur des canalisations, ces pertes diminuent quand on augmente le diamètre de la canalisation.

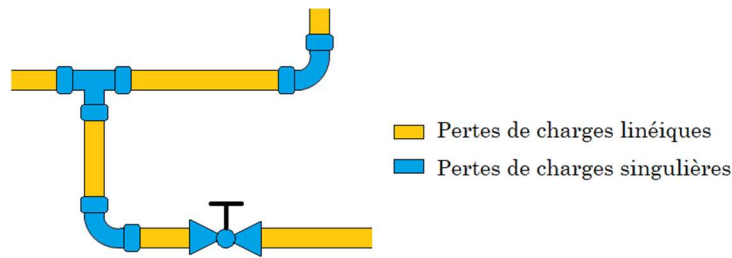
• **Singulières** : elles se manifestent sur les pièces spéciales qui modifient la direction ou la section de passage du fluide (raccord, T, vannes, soupapes, etc...). Elles sont données par la formule :

$$\Delta H_S = \varepsilon \frac{v^2}{2g} \quad (\text{II.15})$$

$\varepsilon$  : Coefficient de pertes de charges locales qui dépend de la forme de la singularité.

En remplaçant la vitesse par l'équation (II.13), on aura :

$$\Delta H_S = \varepsilon \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \quad (\text{II.16})$$



**Figure II.5 : Pertes de charges**

La hauteur dynamique est la somme des pertes de charges linéiques et singulières. Elle est donnée par :

$$H_d = \Delta H_L + \Delta H_S \quad (\text{II.17})$$

$$H_d = \left( \lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) = K_{fr} Q^2 \quad (\text{II.18})$$

$K_{fr}$  : constante de canalisation.

#### II.2.3.4. Introduction des paramètres de la pompe

##### • Caractéristique $H=f(Q)$ de la pompe :

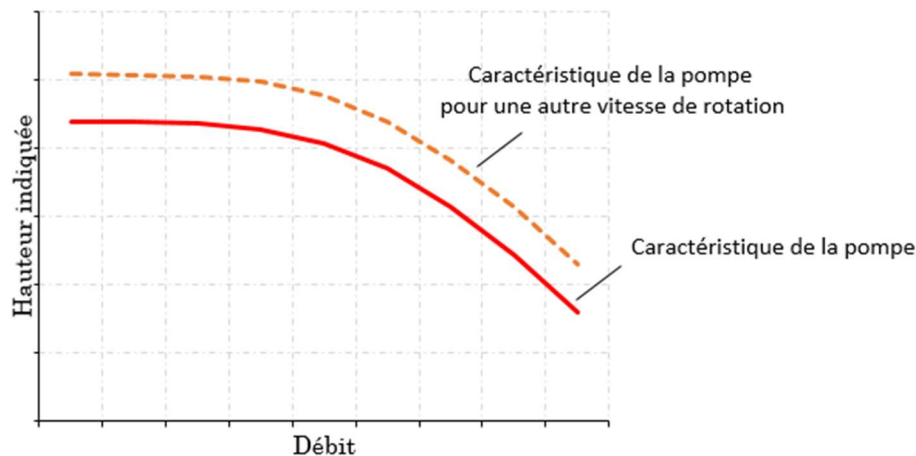
La hauteur (ou pression) entre l'entrée (E) et la sortie (S) de la pompe est appelée hauteur manométrique  $H_t$  (pression manométrique) qui dépend essentiellement des pertes de charge au niveau de la turbine. Par conséquent, en connaissant ces pertes, on a :

$$H_i = H_t + \sum \Delta h_{ES} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

- $H_i$  : Hauteur indiquée.
- $\sum \Delta h_{ES}$  : Pertes dues principalement au frottement, l'état de la turbine, choc, aux fuites etc...

Dans la pratique, chaque pompe a sa propre caractéristique donnée par le constructeur comme illustré dans la figure II.6. La hauteur indiquée  $H_i$  est fonction du débit de refoulement. Ainsi, une pompe donnée mise en place sur une conduite ne peut fournir qu'un et un seul débit.



**Figure II.6 : Caractéristique  $H=f(Qv)$**

Dans la pratique, on choisit la pompe (et sa vitesse de rotation) en fonction de la gamme du débit souhaité. Pour régler le débit, on fait varier les pertes de charge sur le circuit de refoulement à l'aide d'une vanne. Si une variation importante du débit s'avérait nécessaire (suite à une modification importante de l'installation ou de ses conditions de fonctionnement par exemple) on pourra également être amené à changer la vitesse de rotation de la pompe ; il pourra même être nécessaire de changer de pompe.

• **Caractéristique couple – vitesse de la pompe centrifuge**

La pompe centrifuge est caractérisée par un couple résistant proportionnel au carré de la vitesse de rotation de la pompe. Il est donné par la relation :

$$C_r = K_p N^2 \tag{II.20}$$

Avec :

$$K_p = \frac{P_m}{N^3} \tag{II.21}$$

$P_m$  : la puissance mécanique du moteur d'entraînement en (W).

Si la vitesse de rotation d'une pompe centrifuge passe de  $N_1$  à  $N_2$  (tr/min), le débit  $Q$ , la hauteur manométrique  $H$  et la puissance absorbée  $P$  varient dans les rapports suivants :

$$Q_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot Q_1 \quad (\text{II.22})$$

$$P_2 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \cdot P_1 \quad (\text{II.23})$$

$$H_2 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \cdot H_1 \quad (\text{II.24})$$

### • Cavitation

La cavitation est la formation et l'implosion rapides de bulles d'air dans l'eau lorsque celle-ci circule à travers la pompe. La cavitation est un phénomène causé par l'eau bouillante. L'eau peut bouillir car la pression diminue localement. Cependant, ce n'est pas l'ébullition qui endommage la pompe, c'est quand l'eau passe de l'état vapeur à celui liquide que les dégâts surviennent.

Les particules d'air présentes dans l'eau se dilatent lorsqu'elles atteignent le point d'ébullition. Ces particules vont s'effondrer sur elles-mêmes très rapidement, ce qui enlève de petites parties de métal de la surface. Si cela continuera à se produire, le corps de la turbine sera endommagé. Pour cela, la cavitation doit être surveillée lorsqu'on travaille avec des pompes.

Dans une pompe, la pression absolue à l'ouïe d'aspiration doit être maintenue largement au-dessus de la pression de vapeur du liquide pour éviter les problèmes de cavitation.

Deux différentes valeurs de pression d'aspiration sont définies :

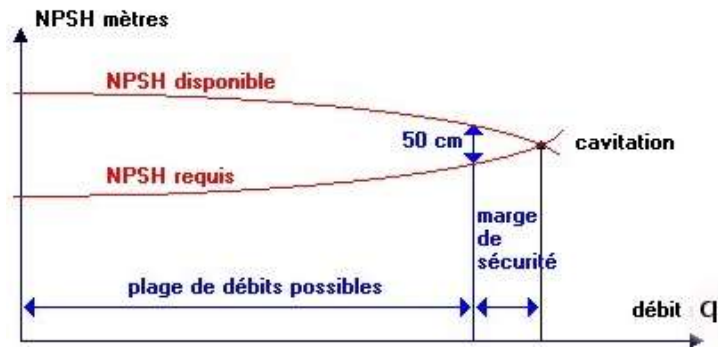
- NPSHR (Net Positif Section Pressure Head Required) c'est le NPSH Requis : celui-ci est obtenue par le fabricant après avoir testé les performances de la pompe et rapporté sur un graphe. Chaque constructeur possède pour chaque type de pompe et pour une vitesse de rotation déterminée, une courbe donnant la valeur de NPSHR en fonction du débit de la pompe.

- NPSHA (Net Positif Section Pressure Head Available) c'est le NPSH disponible et qui correspond à la pression absolue mesurée sur l'axe de la bride d'aspiration de la pompe. Elle dépend de l'installation de la pompe.



Pour éviter le phénomène de cavitation, **il faut que : la pression disponible à l'entrée de la pompe (NPSHA) soit supérieure à la pression requise (NPSHR).**

La figure II.7 montre que les conditions d'aspiration sont d'autant meilleures que la différence entre les deux est grande.



**Figure II.7 : Point de cavitation**

### Calcul de NPSHA

Le NPSHA est calculé par la formule suivante :

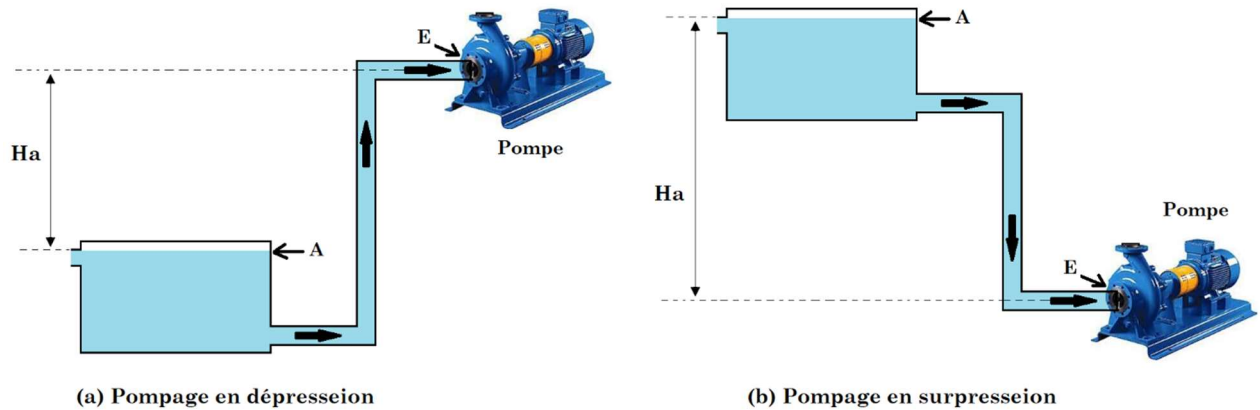
$$NPSHA = 10 \mp H_a - \frac{P_v}{\rho g} - \Delta H_a \quad (II.25)$$

Avec :

$H_a$  est la hauteur d'aspiration en (m). Dans le cas d'une pompe, cette hauteur est négative si la pompe est en aspiration (pompage en dépression figure II.8-a) et elle est positive dans le cas d'un fonctionnement en charge (pompage en surpression figure II.8-b).

$P_v$  : la pression de vapeur saturante en (Pa)

$\Delta H_a$  : Les pertes de charge totale (linéique et singulière) dans le circuit d'aspiration.



**Figure II.8 : Types de pompage**

Pour l'exemple de l'installation donnée en figure 4, le calcul du NPSHA se fera en appliquant la formule de Bernoulli entre le niveau de l'eau à pomper ( $z_A$ ,  $p_A$ ) et l'entrée de la pompe ( $z_E$ ,  $p_E$ ).

$(z_E - z_A)$  représente la hauteur géométrique d'aspiration. Pour les pompes centrifuges, cette hauteur doit être inférieure à 7m.

### II.2.3.5. Détermination des puissances électriques

La puissance la plus importante est la puissance hydraulique ( $P_{hyd}$ ) qui correspond à la puissance nécessaire pour déplacer une quantité de fluide d'un point à un autre (ou d'une hauteur à une autre).

Connaissant la puissance totale ( $P_t$ ) qui dépend de la hauteur totale ou hauteur manométrique du réseau (calculé de la même manière que la puissance hydraulique), la puissance utile ( $P_u$ ) du moteur d'entraînement est déduite de la caractéristique de la pompe ou précisément (le plus utilisé en pratique) le rendement de la pompe ( $\eta_p$ ) en fonction du débit. Ce rendement est très faible et ne dépasse pas 0.5.

La puissance ( $P_a$ ) fournie par le réseau électrique (puissance absorbée par le moteur) est calculée en fonction du rendement ( $\eta_m$ ) du moteur. En pratique le rendement du moteur est de l'ordre de 0.85.

• **Calcul de la puissance hydraulique**

La puissance hydraulique  $P_{hyd}$  est la puissance correspondante au travail fourni pour déplacer un volume d'eau à une hauteur  $H_{hyd}$ . Elle est donnée par :

$$P_{hyd} = \rho g Q H_{hyd} \quad (II.26)$$

• **Calcul de la puissance totale ou manométrique**

Le calcul de la puissance totale  $P_t$  est similaire au calcul de la puissance hydraulique. Il suffit de remplacer la hauteur hydraulique par la hauteur totale  $H_t$ . Elle est donnée par :

$$P_t = \rho g Q H_t \quad (II.27)$$

• **Calcul de la puissance utile du moteur électrique d'entraînement**

La puissance utile dépend de l'installation hydraulique de la pompe. Connaissant le rendement ( $\eta_p$ ) de la pompe, la puissance utile  $P_u$  est calculée comme suit :

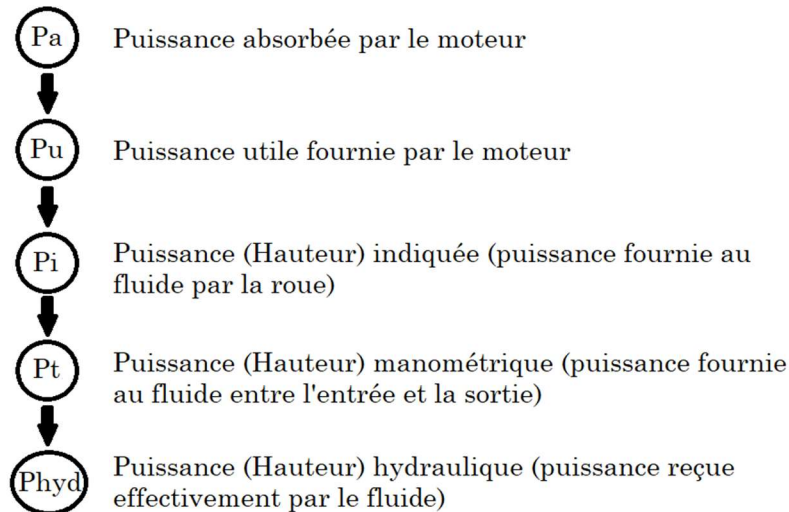
$$P_u = \frac{P_{hyd}}{\eta_p} \quad (II.28)$$

• **Calcul de la puissance absorbée par le moteur électrique d'entraînement**

La puissance absorbée par le moteur dépend essentiellement de la caractéristique du moteur. Connaissant le rendement ( $\eta_m$ ) du moteur, la puissance absorbée  $P_a$  est calculée comme suit :

$$P_a = \frac{P_u}{\eta_m} \quad (II.29)$$

La figure II.9 illustre les différentes puissances engendrées au niveau d'une conduite.



**Figure II.9 : Arbre des puissances**

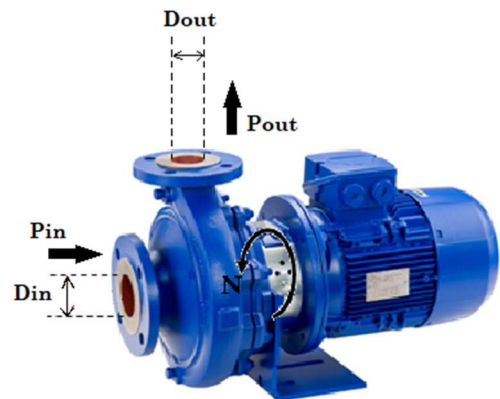
### II.2.3.6. Exercice

Une pompe centrifuge refoule un débit de 6.5 L/s, les diamètres des conduites de refoulement et d'aspiration sont égaux. La lecture de la pression exercée en refoulement est de: 3,5 Kg/cm<sup>2</sup> et sur le manomètre situé à l'aspiration est de 0,3995 Kg/cm<sup>2</sup> en colonne de mercure.

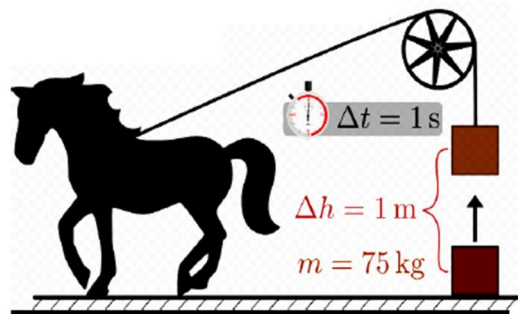
Cette pompe est entraînée par un moteur électrique, son couple est de : 4.65 m.kg qui tourne à une vitesse de rotation de 800 tr/min.

**Déterminer :**

1. La puissance utile en CV,
2. La puissance consommée et le rendement de la pompe.
3. Le débit, la puissance pour le moteur, et la hauteur manométrique acquise par la pompe si le nombre de tours/min est doublé, en conservant le même rendement.



$1 \text{ HP (Horse Power)} = 1 \text{ CV (Cheval Vapeur)}$ $= 75 \text{ kg.m/s}$ $= 735.5 \text{ W}$
---



**Avec :**

$\rho$  : masse volumique du liquide (eau) = 1000 Kg/m<sup>3</sup>

$g$  : Accélération de la pesanteur = 9.81 m.s<sup>-2</sup>

**Solution**

Prenons en charge la conversion des unités actuelles vers les unités du Système International.

$$Q = 6,5 \text{ L/s} = 6,5/1000 = 0,0065 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P_{\text{out}} [\text{en Kg/m}^2] = 3,5 \text{ Kg/cm}^2 = 35000 \text{ Kg/m}^2$$

$$P_{\text{out}} [\text{en Pa}] = 35000 \text{ Kg/m} \times 2.9,81 \text{ m/s}^2 = 343350 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{in}} [\text{en Pa}] = 0,3995 \text{ Kg/cm}^2 = 3995 \times 9,81 = 39190,95 \text{ Pa}$$

Car la pression en Pascal veut dire : 1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup>

En plus, 1 N = 1 Kg.m/s<sup>2</sup> (3ème loi de Newton)

Alors, 1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup> = 1 Kg.m/(m<sup>2</sup>.s<sup>2</sup>) = 1 (Kg/m<sup>2</sup>). (m/s<sup>2</sup>) dont : (m/s<sup>2</sup>) représente l'accélération de la pesanteur.

$$T_u [\text{en N.m}] = 4,65 \text{ m.Kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 45,62 \text{ N.m}$$

$$N = 800 \text{ tr/min} \Rightarrow \Omega = 2.\pi.800/60 = 83,79 \text{ rad/s}$$

1. La puissance utile à calculer est la puissance hydraulique acquise par le liquide à la sortie de la pompe.

**Attention !** La puissance utile du système hydraulique globale n'est pas la puissance mécanique utile fournie par le moteur. Les noms sont les mêmes mais l'utile du système global  $\neq$  l'utile du moteur.

$$\begin{aligned} P_{\text{Hyd}} [\text{en W}] &= \rho.g.H.Q = \rho.g.(P_{\text{out}}-P_{\text{in}})/(\rho.g).Q \\ &= \Delta P.Q = (343350-39190,95) \times 0,0065 = 1977,04 \text{ W} \end{aligned}$$

$$P_{\text{Hyd}} [\text{en CV}] = P_{\text{Hyd}} [\text{en W}]/736 = 2,69 \text{ CV}$$

2. La puissance consommée par la pompe est la puissance mécanique du moteur :

$$P_u = T_u.\Omega = 45,62 \times 83,79 = 3822,5 \text{ W} = 5,19 \text{ CV}$$

- Rendement de la pompe :

$$\eta = P_{Hyd}/P_u = 2,69/5,19 = 0.5183 = 51,83 \%$$

3. Si on considère  $X_1$  : Grandeur avant changement de vitesse et  $X_2$  : Même grandeur après changement de vitesse ( $N_1 = N$  devient  $N_2 = 2.N$  avec :  $\eta_1 = \eta_2$ ), on cherche :  $Q_2$ ,  $P_{u2}$  et  $H_2$ .

Par la loi de similitude :  $Q_1/Q_2 = N_1/N_2$  et  $H_1/H_2 = (N_1/N_2)^2$  et  $P_{u1}/P_{u2} = (N_1/N_2)^3$ .

On aura donc :

$$Q_2 = Q_1 \times N_2/N_1 = 0,0065 \times 2 \times N/N = 0,013 \text{ m}^3/\text{s} = 13 \text{ L/s}$$

$$\begin{aligned} H_2 &= H_1 \times (N_2)^2 / (N_1)^2 = ((P_{out} - P_{in}) / (\rho \cdot g)) \times 4 \times N^2 / N^2 \\ &= ((343350 - 39190,95) / (1000 \times 9,81)) \times 4 = 124,02 \text{ m} \end{aligned}$$

$$P_{u2} = P_{u1} \times (N_2)^3 / (N_1)^3 = 3822,5 \times 8 \times N^3 / N^3 = 30580 \text{ W} = 41,55 \text{ CV}$$

#### **II.2.4. Automatisation des pompes**

Dans une installation hydraulique quelconque, on trouve les éléments tels que les pompes, surpresseurs, vannes, capteurs de niveaux, capteurs de pression, capteurs de débit, clapets anti-retour...etc. La vue globale d'une plateforme de supervision d'une installation hydraulique est donnée dans la figure II.10. Il s'agit d'une station de pompage et de distribution d'eau dans un site industriel.

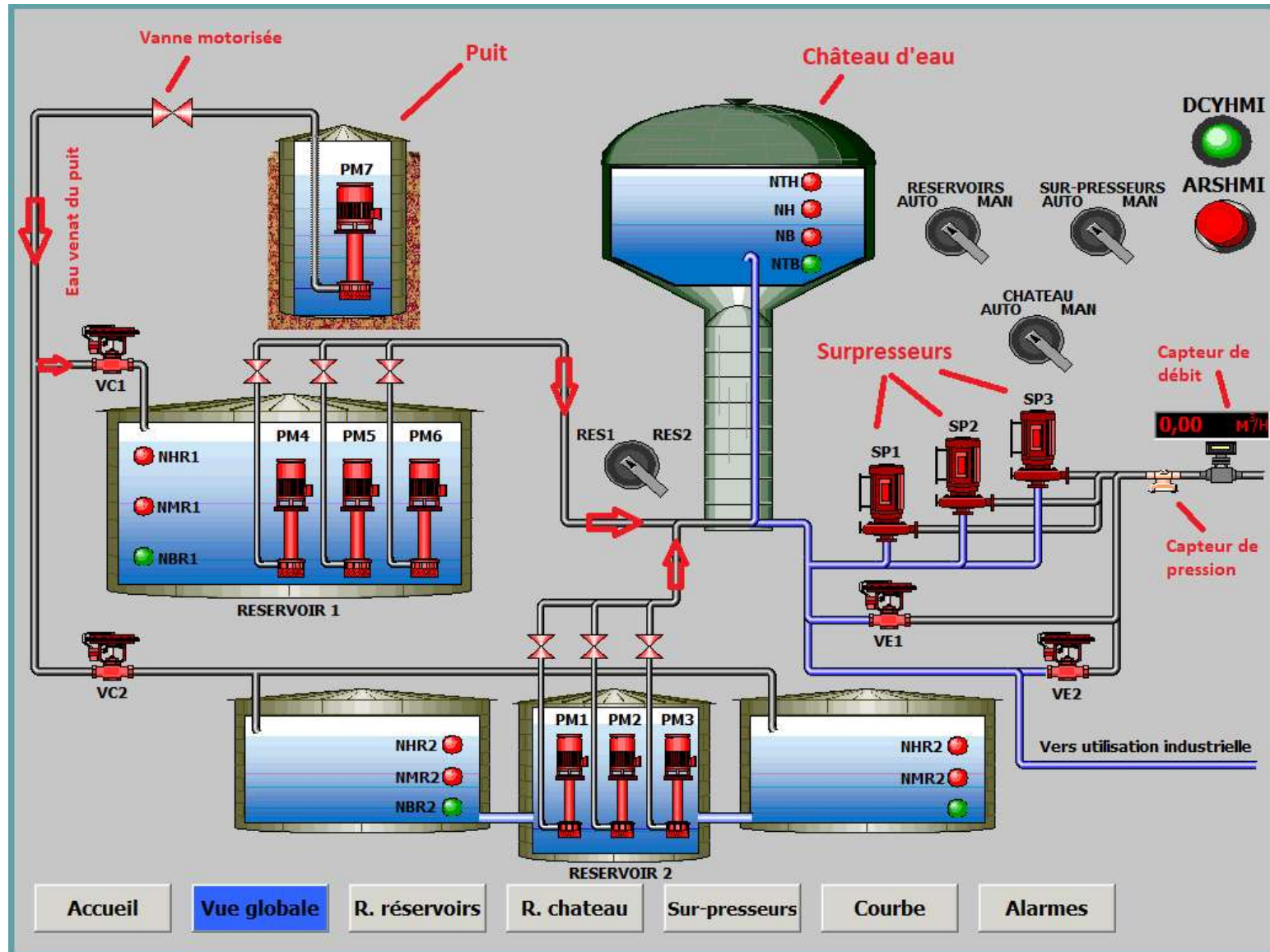


Figure II.10 : Vue globale d'une installation hydraulique

### II.2.5.1. Surpresseur

Un surpresseur (figure II.11), aussi appelé groupe de surpression ou groupe hydrophore, sert à augmenter la pression de l'eau lorsqu'il y a des soucis de sous-pression. Le surpresseur permet d'atteindre des pressions élevées dans une conduite d'un liquide. Il est utilisé notamment en cas d'urgence (incendie).



**Figure II.11 :** Groupe de Surpression

### II.2.5.2. Vannes motorisées

Elle est commandée par un actionneur dont les variations continues de la position modifient la taille de l'orifice de passage du fluide. De cette façon, la chute de pression aux bornes de la vanne est modulée lors du passage d'un fluide, avec pour conséquence la maîtrise du débit traversant. On trouve des vannes à opercule et de vannes à papillon.

Les vannes opercule sont conçues pour être entièrement ouverte ou fermée. Lors de la manœuvre de la vanne, l'opercule se déplace vers le haut ou vers le bas sur la partie filetée de la tige (figure II.12).



Vanne à opercule



Vanne à papillon

**Figure II.12 :** Vannes



### II.2.5.3. Les servovalves

Elles sont utilisées pour le contrôle précis de la position, de la vitesse et de la force dans des systèmes hydrauliques servocommandés. Elles reçoivent des signaux électriques de commande et les transforment en mouvement précis du fluide hydraulique (figure II.13).



Servovalve hydraulique



Servovalve pneumatique

**Figure II.13 : Servovalve**

### II.2.5.4. Les électrovannes

De type TOR, les électrovannes permettent d'agir sur le débit dans un circuit hydraulique à la suite d'un signal reçu de la PC (figure II.14). La différence par rapport à la vanne motorisée est que : l'électrovanne a besoin d'être alimentée en permanence pour maintenir la position ouverte ou fermée selon le modèle. Si on coupe l'alimentation, elle revient à sa position de repos. Tandis que la vanne



**Figure II.14 : Electrovanne**

motorisée est alimentée uniquement pendant le mouvement de rotation (ouverture ou fermeture). L'alimentation se coupe dès qu'arrivé en butée d'ouverture ou de fermeture, donc elle ne consomme que lors de la transition.

### II.2.5.5. Capteurs

Les principaux types de capteurs rencontrés dans un circuit hydrauliques sont :

- **Capteur de pression (pressostat)**

Un pressostat est un dispositif détectant le dépassement d'une valeur prédéterminée de la pression d'un fluide. L'information rendue peut être électrique, pneumatique, hydraulique, ou électronique (figure II.15).



**Figure II.15 : Pressostat**

- **Capteur de débit**

Le capteur de débit (ou débitmètre) est un instrument industriel utilisé pour mesurer la quantité de fluide qui circule dans un circuit en un temps donné. Les fluides mesurables peuvent être des liquides ou des gaz à plus ou moins haute pression, selon les modèles. Un exemple de débitmètre utilisé dans le traitement des eaux est donné sur la figure II.16.



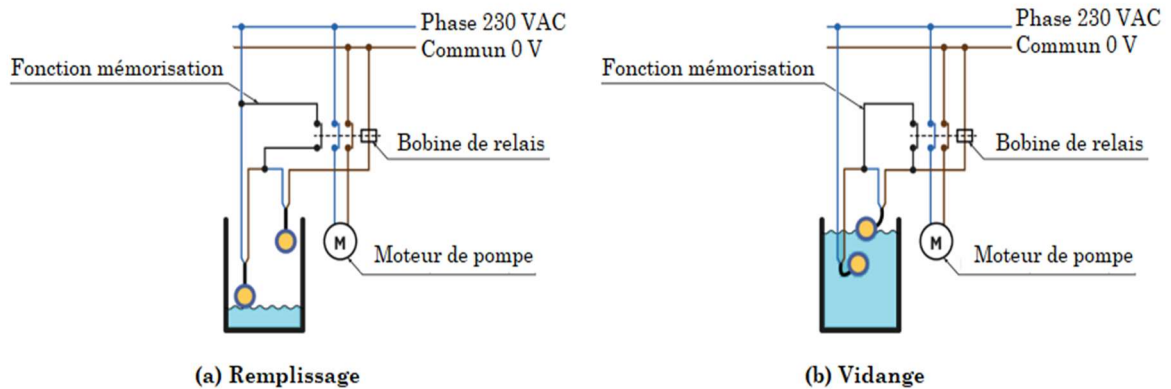
**Figure II.16 : Capteur de débit**

- **Flotteurs de niveau**

Les flotteurs sont utilisés pour détecter le niveau du fluide dans un réservoir (figure II.17). Son principe de fonctionnement est donné sur la figure II.18.



**Figure II.17 : Flotteur de niveau**

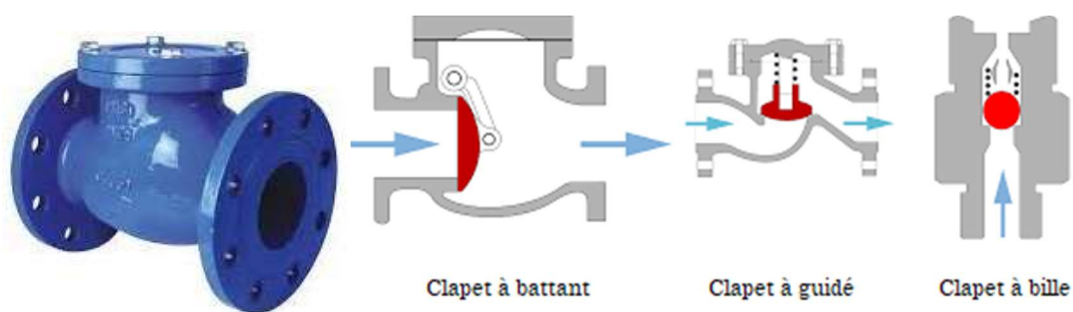


**Figure II.18 :** Principe de fonctionnement d'un flotteur de niveau

D'autres capteurs tels que les manomètres, les compteurs sont également présents dans toute installation hydraulique.

#### II.2.5.6. Clapet anti-retour

Un clapet anti-retour est un dispositif (une vanne) permettant de contrôler le sens d'un fluide dans une tuyauterie. Il instaure donc un sens unique de circulation pour un liquide ou un gaz : ils peuvent s'écouler vers l'aval, mais le clapet évite les remontées en amont. La figure II.19, montre les différents types de clapets.



**Figure II.19 :** Clapet anti-retour

### II.2.5.7. Exercice

Le réservoir N°1 du synoptique donné en figure II.10 permet d'alimenter un château d'eau à l'aide des 3 pompes (PM4, PM5 et PM6). Ces 3 pompes fonctionnent en alternance suivant la combinaison : pompes 4-5, pompes 5-6, pompes 6-4.

On souhaite automatiser l'alimentation de ce château d'eau avec la combinaison des pompes 4-5 suivant le cahier des charges ci-dessous :

- Conditions initiales : les pompes sont à l'arrêt et les vannes fermées.
- Le cycle démarre si le château d'eau est vide (niveau <NTB)
- Par appui sur le bouton départ cycle DCYHMI, les pompes PM4 et PM5 démarrent et leurs vannes VP4 et VP5 s'ouvrent.
- Si le remplissage atteint le niveau NB, la pompe PM5 s'arrête et sa vanne VP5 se ferme tandis que la pompe 4 reste toujours en marche.
- Sachant que le château d'eau alimente, par gravité, la station des surpresseurs ainsi que le site industriel, son niveau d'eau peut donc augmenter ou diminuer après une certaine période selon la consommation. Après une temporisation de 30 min, si le niveau d'eau redescend au niveau très bas (<NTB) ou même avant cette temporisation, la pompe 5 redémarrera et sa vanne s'ouvrira de nouveau.
- Si l'eau atteint le niveau NH, la pompe 4 s'arrête et sa vanne se ferme tandis que la pompe 5 démarre et sa vanne VP5 se ferme.
- Lorsque l'eau atteint le niveau NTH, tout doit impérativement s'arrêter.
- Le cycle redémarrera lorsque le niveau devient inférieur à NTB.

Etablir le Grafcet de niveau 2 de ce système.

La table mnémorique des différentes variables utilisées est la suivante :

Désignation	Définition
DCYHMI	Bouton départ cycle
PM4	Pompe 4
PM5	Pompe 5
VP4O	Vanne de la pompe 4 ouverte
VP4F	Vanne de la pompe 4 fermée
VP5O	Vanne de la pompe 5 ouverte
VP5F	Vanne de la pompe 5 fermée
NTB	Niveau d'eau très bas du château
NB	Niveau d'eau bas du château
NH	Niveau d'eau haut du château
NTH	Niveau d'eau très haut du château
T0	Temporisation de 30 minutes pour que la pompe 5 redémarre.

### Solution

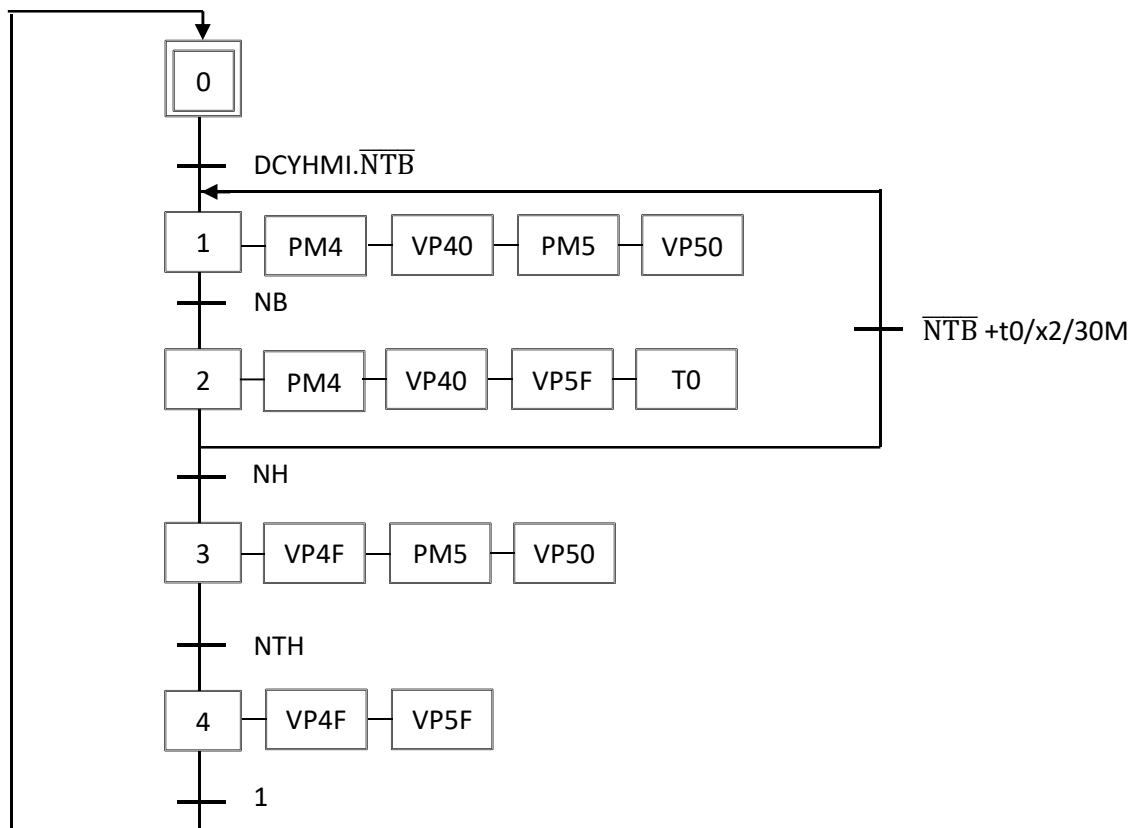


Figure II.20 : Grafset de remplissage du château d'eau

### II.3. Les ventilateurs

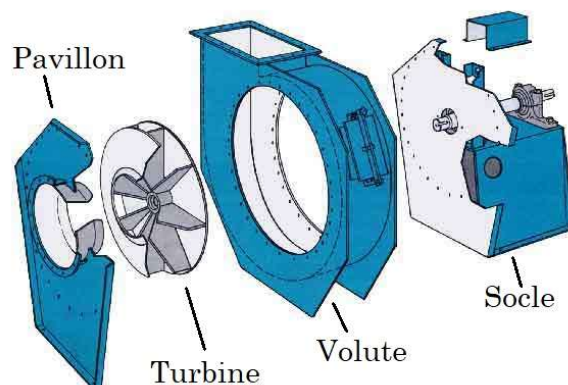
Contrairement à un système de climatisation, le ventilateur ne crée pas d'air frais. La fonction d'un ventilateur est de brasser de l'air en créant une pression différentielle qui crée un courant d'air.

#### II.3.1. Principe de fonctionnement

Pour comprendre le principe de fonctionnement d'un ventilateur, il est utile de connaître les composants principaux qui le constituent.

Les éléments principaux d'un ventilateur sont :

- 1) Le pavillon à l'aspiration : placé à l'entrée du ventilateur, il permet une alimentation optimale de l'air.
- 2) La turbine : constituée de pales ou aubes montées sur l'axe du moteur, elle sert à brasser l'air en tournant. Les pales peuvent être soit inclinées vers l'avant, soit inclinées vers l'arrière, soit incurvées vers l'arrière du sens de marche, soit planes.
- 3) La volute ou enveloppe : c'est le revêtement extérieur qui enveloppe les pales. Sa fonction principale est de rediriger les lignes de flux.
- 4) Le socle support : servant de support au ventilateur, le socle comporte le dispositif d'entraînement et les éléments de transmission de la vitesse de rotation.

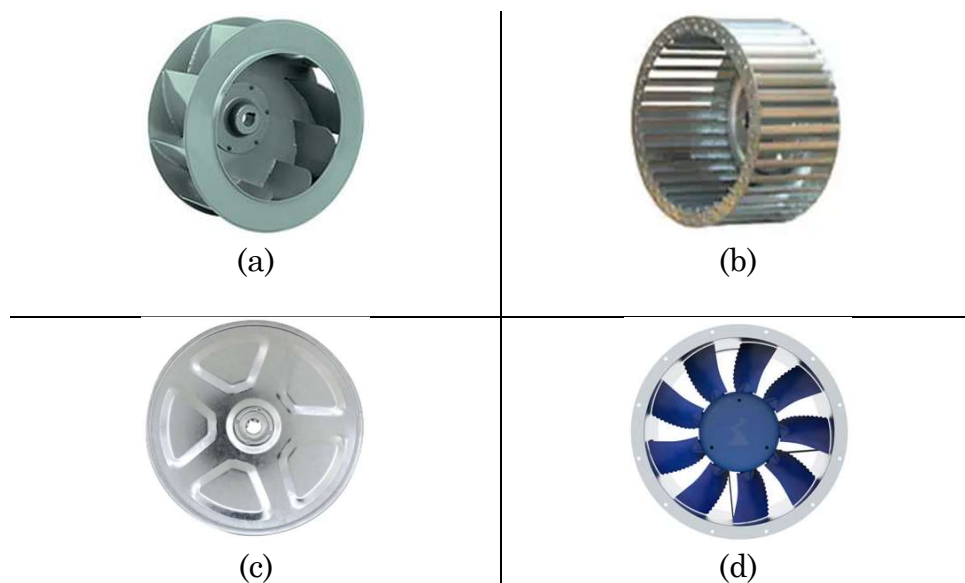


**Figure II.21** : Eléments constituant un ventilateur

Le moteur de commande entraîne la turbine (les pales). Ces dernières brassent l'air vers l'extérieur en propulsant un courant d'air. C'est l'inclinaison des pales et leur sens de rotation qui vont définir la direction vers laquelle l'air va être soufflé.

On rencontre quatre principaux types de roues qui se distinguent les unes des autres en fonction de la forme des aubes :

- Ventilateur centrifuge à aubes inclinés vers l'arrière ou ventilateur à Réaction (figure II.22.a).
- Ventilateur centrifuge à aubes inclinés vers l'avant ou ventilateur à Action (figure II.22.b).
- Ventilateur à aubes radiales (figure II.22.c).
- Ventilateur Hélicoïde (figure II.22.d).



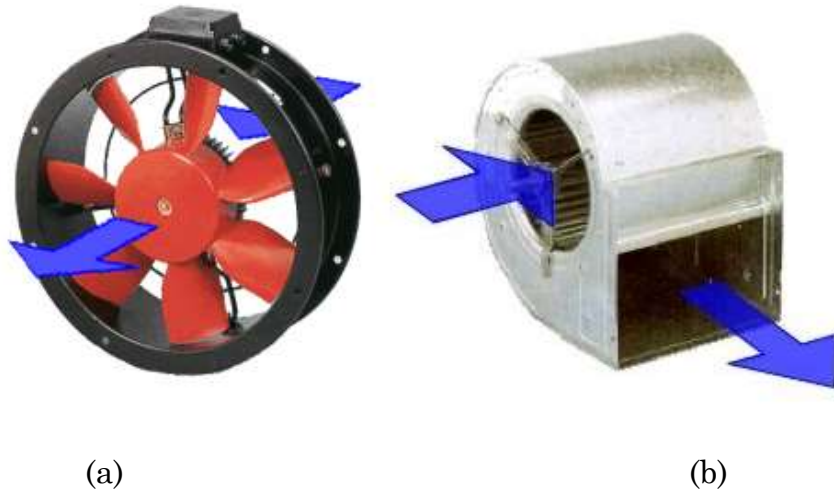
**Figure II.22** : Différents types de roues

### II.3.2. Différents types de ventilateurs

En fonction de la direction de l'air pulsé, on distingue deux types de ventilateurs :

- Les ventilateurs axiaux ou hélicoïdes (figure II.23.a) : l'air est aspiré et propulsé parallèlement à l'axe de rotation du ventilateur.

- Les ventilateurs radiaux ou centrifuges (figure II.23.b) : l'air est aspiré parallèlement à l'axe de rotation du ventilateur et propulsé par force centrifuge perpendiculairement à ce même axe.



**Figure II.23** : Types de ventilateurs

### II.3.3. Caractéristique couple – vitesse d'un ventilateur centrifuge

Le ventilateur centrifuge est caractérisé par un couple résistant proportionnel au carré de la vitesse de rotation. Il est donné par la relation :

$$T_r = K. \Omega^2 \quad (\text{II.30})$$

Avec :

K : une constante.

Le point de fonctionnement se trouve à l'intersection de la courbe caractéristique couple – vitesse du moteur et de la courbe caractéristique couple – vitesse du ventilateur (figure II.24).



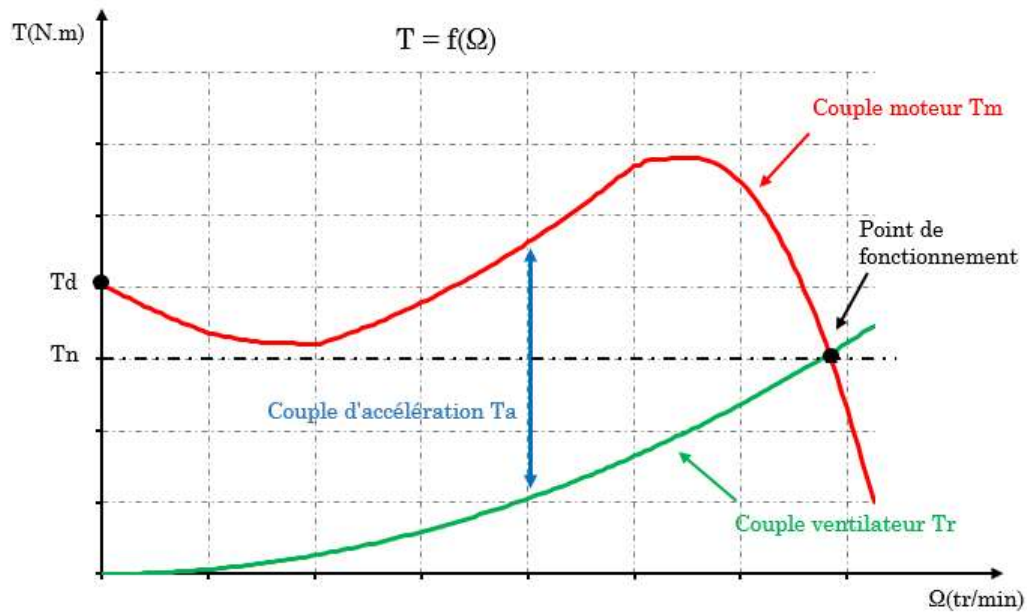


Figure II.24 : Point de fonctionnement

### II.3.4. Démarrage des mécanismes à couple de ventilateurs

L'accélération d'un ventilateur jusqu'à la vitesse nominale se fait à couple nominal. Cependant, la roue d'un ventilateur centrifuge présente parfois une inertie importante, si on la met en relation avec la puissance du moteur chargé de l'entraîner. Dans un tel cas, il est nécessaire de prendre certaines précautions lors du démarrage du ventilateur, sous peine que le courant de démarrage – dont on sait qu'il peut atteindre 5 à 9 fois le courant nominal – se prolonge pendant un temps inadéquat et provoque un échauffement préjudiciable au moteur.

Selon le type et la construction des moteurs, le fabricant préconise que le temps de mise en vitesse soit au maximum de 8 à 12 secondes, en démarrage direct.

Il convient dès lors de calculer ce temps de démarrage, et si celui-ci est trop long, on optera pour une des solutions suivantes :

- Démarrage vanne fermée : le couple résistant est donc plus faible, ce qui permet d'accroître le couple accélérateur, mais cette solution est rarement suffisante.

- Sélection d'un moteur de puissance supérieure. Solution simple, mais du fait du surdimensionnement, le couple moteur travaillera à un rendement qui n'est pas optimum.
- Installation d'un couple hydraulique entre le moteur et le ventilateur. Le démarrage sera très souple, mais le coupleur représente un poste d'entretien supplémentaire, et il faut sélectionner le ventilateur en sachant qu'il y aura un glissement supplémentaire permanent de la vitesse de l'ordre de 3%, lorsque le moteur aura atteint sa vitesse nominale. Le coupleur hydraulique consomme également de la puissance.
- Installation d'un variateur de vitesse. (Ces appareils fonctionnent avec  $U/f = \text{constante}$ , donc avec un couple constant jusqu'à 50 Hz). Cette solution devient très fréquente, grâce à la diminution considérable de son coût d'investissement.

Il est important de noter :

- Un démarrage étoile – triangle n'est absolument d'aucun secours dans ce cas. En effet, en étoile, le courant est divisé par 3, le couple moteur également. Le temps de démarrage est donc plus long avec les mêmes risques de préjudice pour le moteur.
- Les démarreurs électroniques (à la différence des variateurs de vitesse, ceux-ci travaillent avec une tension réduite pour une fréquence constante) ne fournissent pas un couple moteur suffisant pour démarrer et sont à exclure également.

Le calcul du temps de démarrage direct s'effectue comme suit :

Le couple accélérateur est la différence entre le couple moteur et le couple résistant :

$$T_a = T_m - T_r \quad (\text{II.31})$$

Qui peut également s'écrire :

$$T_a = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.32})$$

D'où :

$$dt = \frac{J}{T_m - T_r} \cdot d\Omega \quad (\text{II.33})$$

Dès lors, l'intégration de L'équation II.33 permettrait de trouver le temps de démarrage si le couple avait une expression simple en fonction de  $\Omega$ .

## **II.4. Les compresseurs**

Un compresseur est une machine servant à comprimer un fluide compressible (par exemple de l'air) à une pression voulue. Le compresseur est le principal composant des systèmes de réfrigération de base et est souvent considéré comme le cœur du système de refroidissement. Les compresseurs frigorifiques sont conçus pour aspirer le frigorigène gazeux et le refouler à une pression plus élevée.

Le processus de compression diffère selon la technologie, le type et la conception du compresseur.

Pour compresser l'air, il existe deux techniques éprouvées : la compression dynamique et la compression volumétrique.

### **II.4.1. Compresseurs dynamiques**

Un compresseur dynamique accélère, grâce à un mécanisme rotatif, le mouvement de l'air aspiré pour le comprimer. La compression de l'air s'obtient grâce à la transformation de l'énergie produite par l'accélération en pression. L'air ressort au niveau du diffuseur sous une pression statique grâce à l'énergie cinétique produite. Le compresseur dynamique permet un débit très élevé avec une pression moyenne.

Le mécanisme rotatif peut être axial ou radial (centrifuge). Les compresseurs centrifuges sont utilisés dans les installations de moyenne et forte puissance.

### **II.4.2. Compresseurs volumétriques**

Un compresseur volumétrique aspire l'air et l'emmagasine dans une cuve de compression. L'air emprisonné diminue progressivement en volume et augmente en pression. Lorsque la compression voulue est atteinte, le gaz est évacué du compresseur, sous forme d'air comprimé, par un mécanisme de clapet ou un orifice spécifique. Le compresseur volumétrique permet d'atteindre de hautes pressions avec un débit moyen.

On retrouve les compresseurs à piston et les compresseurs rotatifs (à vis ou à palette).

- **Compresseurs à piston**

Le fonctionnement d'un compresseur à piston est basé sur le mouvement alternatif (mouvement régulier de va-et-vient) d'un piston à l'intérieur d'un cylindre. Un compresseur à piston s'équipe d'un piston étagé, différentiel, à simple ou double effet. Il produit des pressions de l'ordre de 30 bars et plus.

Les compresseurs à piston sont utilisés dans les installations de faible puissance.

- **Compresseurs à vis**

Le compresseur à vis est muni de 2 vis hélicoïdales en rotation synchronisée, d'un rotor mâle et d'un rotor femelle sur lesquels se base son fonctionnement. L'air capturé entre les 2 vis est aspiré et comprimé grâce aux profils concaves et convexes des filets avant d'être évacué par l'orifice de refoulement.

Les compresseurs à vis sont utilisés dans les installations de moyenne et forte puissance.

- **Compresseurs à palettes**

Le compresseur à palettes utilise un rotor pourvu de palettes coulissantes dans un cylindre et tournant autour d'un axe excentré pour produire l'air comprimé. La compression de l'air résulte du mouvement des palettes mobiles.

# **Chapitre III**

---

## **Alimentation et automatisation des ascenseurs**

### III.1. Définition

Un ascenseur est un appareil élévateur destiné au transport des personnes ou des marchandises, desservant des niveaux définis, comportant une cabine dont les dimensions et la constitution permettent manifestement l'accès des personnes, se déplaçant, au moins partiellement, le long de guides verticaux ou dont l'inclinaison sur la verticale est inférieure à 15°.

### III.2. Classification des ascenseurs

Les ascenseurs sont répartis en cinq classes :

**Classe I :** Ascenseur pour personnes : ce type d'ascenseur est destiné à l'usage unique des personnes, il se distingue des autres types d'ascenseur par l'esthétique de la cabine, un meilleur confort et une sécurité plus élevée.

**Classe II :** Ascenseurs destinés principalement au transport des personnes et accessoirement des charges.

**Classe III :** Ascenseur pour malades : ce type d'ascenseur est destiné au transport des malades.

**Classe IV :** Monte-charge : appelé aussi ascenseur accompagné, ils sont destinés principalement au transport des charges généralement accompagnées par des personnes. Ils sont identiques aux autres types d'ascenseurs du point de vue construction et caractéristiques techniques.

**Classe V :** Monte-charge industriel : il comporte une cabine ou un plateau accessible aux personnes pour le chargement ou déchargement, qui se déplace le long d'un ou de plusieurs guides verticaux, dont la commande ne peut se faire que de l'extérieur. Ce type d'ascenseur est interdit au transport des personnes.

### III.3. Les catégories d'ascenseurs

Il existe deux types d'ascenseurs :

Les ascenseurs électriques peuvent être rangés dans deux catégories principales :

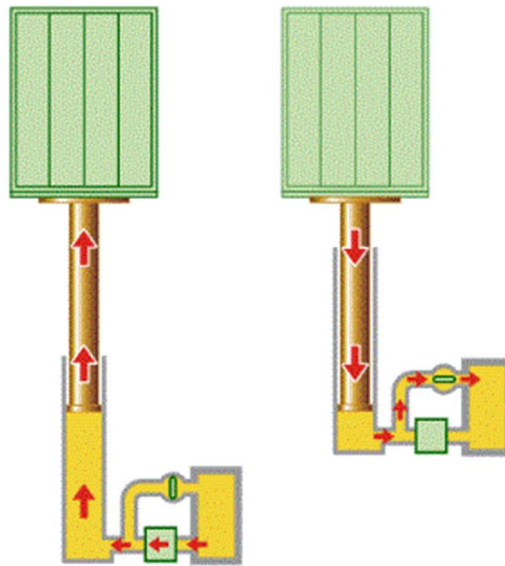
- Ascenseurs hydrauliques
- Ascenseurs à câble à traction

### III.3.1. Les ascenseurs hydrauliques

Les ascenseurs hydrauliques comportent une cabine, une centrale hydraulique avec son distributeur, un ou plusieurs vérins, des flexibles hydrauliques, un réservoir d'huile, une pompe entraînée par un moteur électrique et une armoire de commande. Son fonctionnement est basé sur la pression exercée par la centrale hydraulique qui alimente en huile le piston d'un vérin. Ce piston à son tour fait monter verticalement la cabine de l'ascenseur. Le mouvement de descente de la cabine est assuré par la vanne de la pompe qui contrôle le retour de l'huile dans le réservoir.

L'utilisation de ce type d'ascenseur présente les limitations ci-dessous :

- Ce type d'ascenseur n'étant pas équipé d'un contrepoids, l'effort de mise en pression de l'huile est donc élevé.
- Son rendement est faible (de l'ordre de 20%).
- L'échauffement de l'huile est important durant son retour au passage de la vanne, il est donc nécessaire de prendre des précautions particulières par rapport à la ventilation de salle des machines.
- La perte d'huile est loin d'être négligeable et doit être compensée lors d'un contrôle régulier.
- Ce type d'ascenseur est généralement utilisé pour des déplacements relativement courts de l'ordre de 15 à 18 m au maximum.



**Figure III.1 :** Ascenseur hydraulique

### III.3.2. Les ascenseurs à traction à câble

Ce type d'ascenseur est le type d'ascenseur le plus utilisé. Il est composé mécaniquement de trois constituants :

**Cabine** : organe de l'ascenseur destiné à recevoir des personnes.

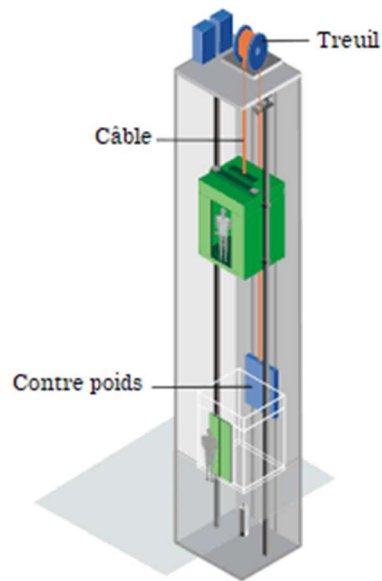
**Contre poids** : organe mobile de l'ascenseur circulant le long des guides verticaux et constitué par une masse pesante dont le poids équilibre celui de la cabine et d'une partie de la charge.

**Treuil** : ensemble du mécanisme d'entraînement des câbles ou chaînes de suspension de la cabine. Il se compose essentiellement :

- D'un moteur et son accouplement
- D'un système de freinage
- D'un réducteur de vitesse actionnant soit une poulie motrice soit un tambour.

La cabine et le contre-poids circule dans un volume appelé gaine. Cette dernière est matériellement délimitée par le fond de la cuvette, les parois et le plafond.





**Figure III.2 :** Ascenseur à traction à câble

### III.4. Système de motorisation

L'efficacité énergétique des systèmes de motorisation des ascenseurs dépend surtout du type de moteur d'entraînement accouplé (au treuil pour les ascenseurs à traction et à la pompe pour les ascenseurs hydrauliques).

Dans les ascenseurs à traction à câble, on trouve 3 types de motorisation :

- Moteur-treuil à vis sans fin.
- Moteur-treuil planétaire.
- Moteur à attaque directe (couramment appelé "Gearless" ou sans treuil).

#### III.4.1. Moteur – treuil ou moteur à traction

##### III.4.1.1. Moteur – treuil à vis sans fin à une ou deux vitesses

À l'heure actuelle, les moteurs-treuil avec vis sans fin sont abandonnés au profit des moteurs à attaque directe (sans réducteur ou "gearless"). Dans ce type de motorisation, la vis sans fin entraîne beaucoup de pertes mécaniques et, par conséquent, des consommations électriques plus importantes.

Les moteurs électriques couplés au treuil à vis sans fin étaient généralement des moteurs à courant continu à excitation indépendante ou shunt avec la faculté bien connue de pouvoir faire varier très facilement la vitesse de rotation. Les moteurs électriques à courant alternatif utilisés avec ce type de réducteur sont en principe des moteurs à deux vitesses.



**Figure III.3 :** Moteur-treuil à vis sans fin

#### III.4.1.2. Moteur – treuil planétaire

Les appareils à treuil planétaire utilisent le système de réduction de vitesse par engrenages planétaires. Accouplés à un moteur électrique, ils permettent d'avoir un rapport de réduction appréciable pour obtenir une plage de vitesse compatible avec le confort et l'efficacité de déplacement souhaitée.

Les réducteurs planétaires peuvent être accouplés à des moteurs à courant continu (grande plage de variation de vitesse), à courant alternatif asynchrone à deux vitesses, ou à courant alternatif asynchrone commandé par un variateur de fréquence.



**Figure III.4 :** Moteur-treuil planétaire

### III.4.2. Moteur sans réducteur

La poulie de traction est montée directement sur l'arbre de sortie du moteur et la régulation de vitesse est obtenue grâce à un variateur de fréquence.

Ce système est énergétiquement performant principalement de part de la présence d'un variateur de fréquence qui optimise la consommation énergétique. Aussi les pertes mécaniques sont réduites vu l'absence des engrenages.



**Figure III.5 :** Moteur sans réducteur

### III.5. Exigences dans les systèmes de commande des ascenseurs

Les caractéristiques essentielles d'un ascenseur sont :

- La vitesse.
- La charge.
- Temps d'ouverture et de fermeture des portes.
- Temps d'entrée et de sortie des passagers.
- Surface de la cabine par rapport à la charge.

Du point de vue commande électrique, nous pouvons considérer :

- La vitesse (de la montée et descente).
- Régulation de la vitesse.
- Limitation d'accélération.
- Freinage.

Le tableau III.1 donne quelques caractéristiques des ascenseurs de classes I, II et III.

**Tableau III.1 :** Caractéristiques des ascenseurs

Charge (kg)	Vitesse (m/s)
400, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500	0.63, 1.00, 1.6, 2.5

### III.5.1. Précision d'arrêt

La précision d'arrêt de la cabine d'un ascenseur est une mesure indispensable pour l'accessibilité de celui-ci. La loi SAE (Sécurité des Ascenseurs Existants) exige que la précision d'arrêt de la cabine soit **inférieure à 20 millimètres**.

### III.5.2. Vitesse d'approche

Dans le cas d'un entraînement par moteur mono vitesse, la vitesse de déplacement de la cabine entre le palier de départ et le palier d'arrivée est constante. Elle est, en général, comprise entre 0.63 m/s et 0.8 m/s. L'arrêt est plus ou moins brutal sans phase de ralentissement préalable.

Dans le cas d'un entraînement par moteur bi-vitesse, on distingue :

- La vitesse rapide (grande vitesse) lors du déplacement de la cabine
- La vitesse lente (petite vitesse ou vitesse d'approche) à l'approche du palier.

La phase de transition étant marquée par un léger à coup lié à la décélération.

La vitesse rapide privilégiée est comprise entre 0.63 m/s et 1 m/s. La vitesse d'approche est généralement le quart de la vitesse rapide. Cette vitesse doit être **égale ou inférieure à 0.25 m/s**. Des vitesses supérieures peuvent être rencontrées dans des ascenseurs de classe II et III.

### III.5.3. La sécurité

Tout système mécanique présente des dangers pour les personnes et les biens. Les ascenseurs, monte-charge, escaliers mécaniques et trottoirs roulants n'échappent pas à cette règle.

Un dispositif de protection qui a permis l'essor de l'ascenseur est le parachute inventé par l'Américain Elisha Grave Otis dans les années 1850. D'autres dispositifs ont été ensuite imaginés, réalisés, améliorés au fil des années pour pallier les risques prévisibles ou ceux révélés à l'usage et résultant du développement du parc et de l'utilisation banalisée des appareils.

On peut citer :

- Le parachute : destinée à arrêter et à maintenir à l'arrêt la cabine sur ses guides en cas de rupture du gain ou de survitesse à la descente.
- Verrouillage des portes de la cabine : lorsque la cabine se met en mouvement, l'ouverture de ses portes n'est permise que lorsque la cabine est en face du palier.
- Un bouton poussoir d'urgence à placer à l'intérieur de la cabine. Ce bouton sert à activer une alarme attirant ainsi l'attention du technicien intervenant pour la sécurité des utilisateurs.
- La cellule photo-électrique : à placer aux niveaux des portières. Si jamais un utilisateur entre dans la cabine aux moments de la fermeture des portes, ces dernières s'ouvrent de nouveau pour permettre à ce retardataire d'entrer dans la cabine en toute sécurité.

### III.6. Automatisation des ascenseurs

L'étape la plus importante dans l'automatisation des ascenseurs est de dresser la table mnémotique qui est fonction des variables d'entrée/sortie.

Il existe trois types de variables d'entrée : contacts de sécurité, capteurs et boutons de commande. Les variables de sortie sont principalement les voyants et les différents actionneurs (moteurs, freins et bobines de maintien, etc...).

### III.6.1. Variables d'entrée

#### III.6.1.1. Contact de sécurité

- Bouton d'arrêt d'urgence
- Contact parachute
- Contact de fermeture et de verrouillage de la porte de la cabine
- Fin de course haut
- Fin de course bas
- Fin de course d'ouverture de porte
- Fin de course de fermeture de porte

#### III.6.1.2. Capteurs

- Capteur de surcharge
- Capteur d'étage
- Capteur d'existence de passager
- Capteur de la cellule photo-électrique entrée/sortie passager.

#### III.6.1.3. Bouton de commande (exemple ascenseur à 04 étages)

Les différents boutons de commande présents dans un système d'ascenseur sont récapitulés dans le tableau III.2 suivant :

**Tableau III.2 : Boutons de commande d'un ascenseur à 4 étages**

Appel intérieur (cabine)	Bouton intérieur étage 1
	Bouton intérieur étage 2
	Bouton intérieur étage 3
	Bouton intérieur étage 4
Appel extérieur vers le haut	Demande extérieur haut étage 1
	Demande extérieur haut étage 2
	Demande extérieur haut étage 3
Appel extérieur vers le bas	Demande extérieur bas étage 2
	Demande extérieur bas étage 3
	Demande extérieur bas étage 4

### III.6.2. Variables de sortie

Les variables de sortie présentes dans un système d'ascenseur sont récapitulées dans le tableau III.3 suivant :

**Tableau III.3** : Les variables de sortie d'un ascenseur à 4 étages

Montée	Montée de la cabine
Descente	Descente de la cabine
Ouverture	Ouverture porte
Allumage voyants des demandes extérieures (mémoire des appels)	Allumer voyant ext. Haut étage1
	Allumer voyant ext. Haut étage2
	Allumer voyant ext. Haut étage3
	Allumer voyant ext. bas étage2
	Allumer voyant ext. bas étage3
Allumage voyants de l'afficheur	Allumer voyant ext. bas étage4
	Allumer voyant étage1
	Allumer voyant étage2
	Allumer voyant étage3
	Allumer voyant étage4

### III.7. Exercice

Soit un ascenseur à 4 niveaux dont le fonctionnement est décrit dans le cahier des charges comme suit :

Au démarrage, les conditions initiales CID doivent être satisfaites (porte fermée, non arrêt d'urgence, poids non dépassé, ...). Lorsque l'étape des conditions initiales (CIDS) est franchie, la mise en marche de la cabine est provoquée par un usager en appuyant sur un bouton d'envoi en cabine ou un bouton d'appel palière (ET0, ET1, ET2 ou ET3).

La cabine monte (Mo) ou descend (De) selon sa dernière position. Lorsque la cabine arrive à l'étage définie, le capteur de position de l'étage (CP0, CP1, CP2 ou CP3) s'active et enclenche l'arrêt de la cabine. Ce même capteur de position active une temporisation (T0) d'une durée de 3 secondes à partir de l'arrêt de la cabine pour ensuite ouvrir la porte cabine et la porte palière (OP).

Une fois que les portes sont ouvertes, le capteur porte ouverte (CPOU) active une autre temporisation (T1) de 30 secondes qui permettra aux passagers de sortir ou de rentrer à l'intérieur de la cabine en toute sécurité. Une fois le temps écoulé,

la porte cabine et la porte palière se ferme (FP). Le capteur de porte fermée est désigné par la variable CPF.

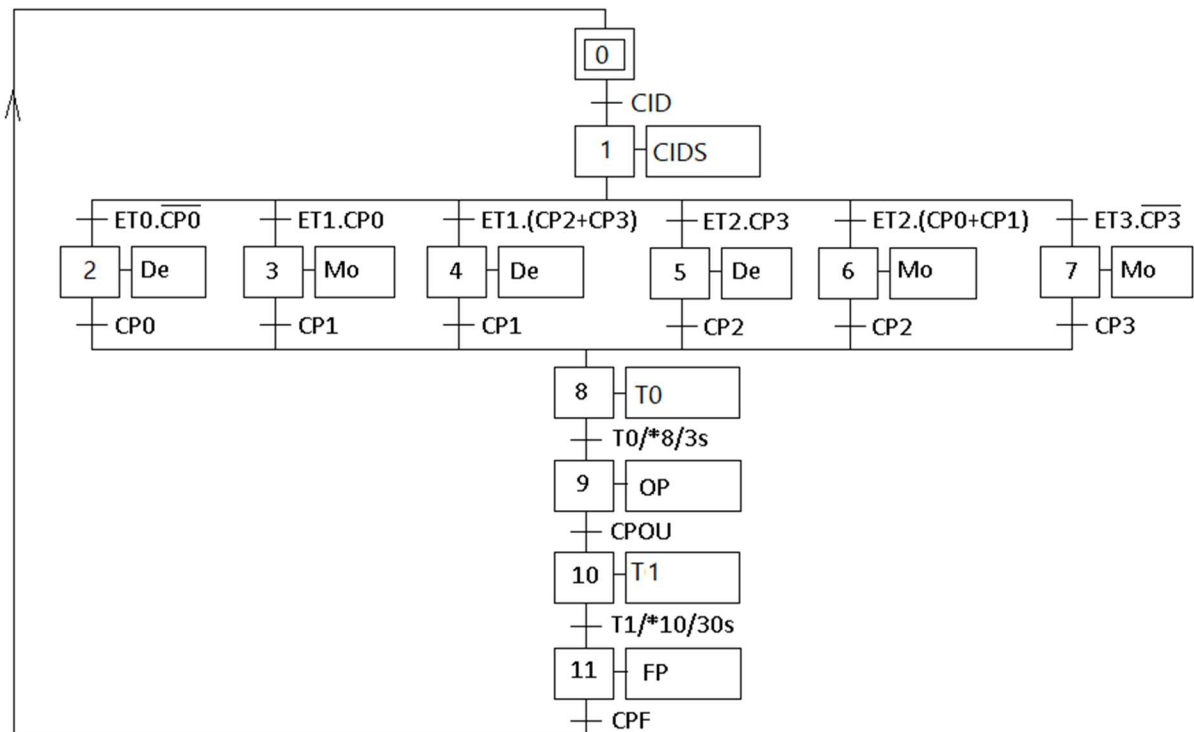
1. Dresser une table mnémonique du système automatisé.
2. Etablir le Grafcet de niveau 2 répondant au fonctionnement décrit dans ce cahier des charges.

**Solution**

1. La table mnémonique :

Entrées		Sorties	
CID	Conditions initiales de démarrage	CIDS	Conditions initiales de démarrage satisfaites
ET0, ET1, ET2, ET3	Boutons d'appel étage 0, 1, 2 et 3	De	Descente cabine
CP0, CP1, CP2, CP3	Capteurs de position cabine étage 0, 1, 2 et 3	Mo	Montée cabine
CPOU	Capteur porte ouverte	OP	Ouverture porte
CPF	Capteur porte fermée	FP	Fermeture porte

2. Grafcet





# **Chapitre IV**

---

## **Automatisation des ponts roulants**

### IV.1. Définition

Un pont roulant est un appareil de manutention utilisé par les industries pour le déplacement et le levage des matériels de grande taille et de poids lourd (allant jusqu'à des centaines de tonnes). Ils sont utilisés pour les manutentions en usine, entrepôt, atelier, zones de stockage, déchargement, rechargements de wagons et des camions. Dans certaines applications particulières, ils peuvent être équipés de pinces, de godets, de grappins, d'électro-aimants.

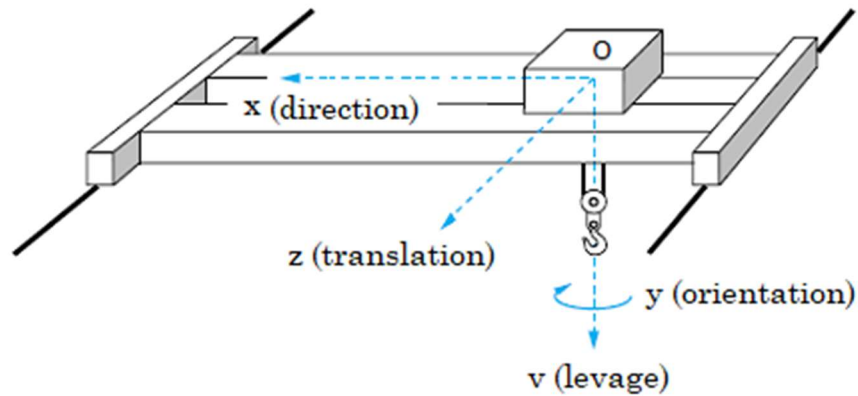
### IV.2. Principe

Les ponts roulants sont installés en hauteur et circulent sur des rails fixés sur des poutres de roulement en acier ou béton. Les axes de déplacement sont appelés :

- **Levage** : axe vertical, levage ou descente de la charge dû à un mouvement du treuil et donc des câbles.
- **Direction** : axe transversal, généré par un déplacement du chariot.
- **Translation** : axe des voies de roulement (plus grande distance) correspondant à un mouvement d'ensemble du pont.

Ces mouvements, selon les trois axes orthogonaux, permettent au crochet ou au chariot de desservir n'importe quel point dans l'enceinte du hall.

Sur les ponts plus spécialisés, on peut trouver des mouvements complémentaires comme la rotation.



**Figure IV.1** : Axes de déplacement

### IV.3. Classification des ponts roulants

On distingue 4 familles principales d'appareils dont la construction peut être des deux types suivants :

- Ponts roulants posés (figure IV.2-a et b).
- Ponts roulants suspendus (figure IV.2-c et d).
- Portiques (figure IV.2-e).
- Semi-portiques (figure IV.2-f).



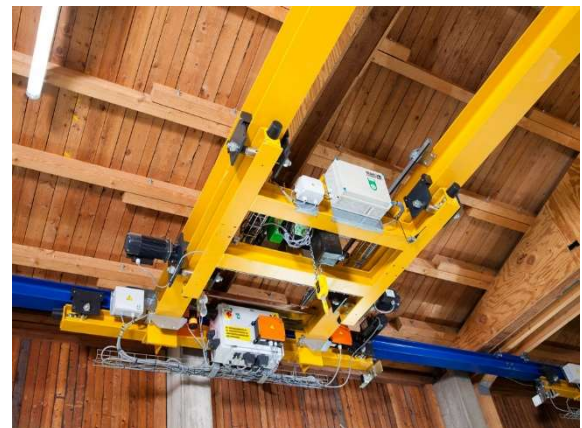
a) Ponts roulants posés monopoutre



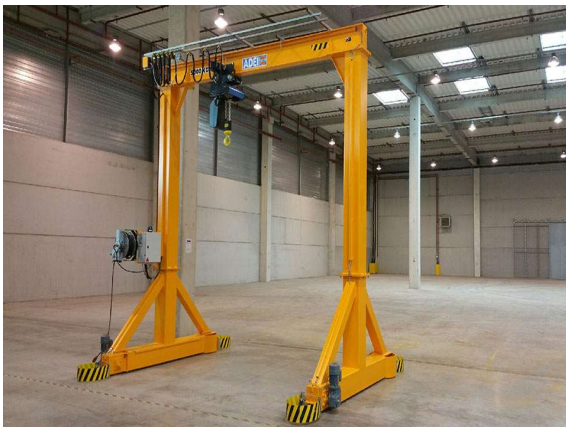
b) Ponts roulants posés bipoutres



c) Ponts roulants suspendu monopoutre



d) Ponts roulants suspendu bipoutres



e) Portique (monopoutre)



f) Semi portique (bipoutre)

**Figure IV.2** : Types de ponts roulants

Le pont (ou le portique) est dit monopoutre, lorsque sa charpente est réalisée avec une seule poutre (le chariot de levage est alors monorail), le pont est

dit bipoutre lorsque sa charpente est constituée de deux poutres, le chariot de levage est alors du type birail.

#### IV.4. Charge des moteurs des mécanismes des ponts roulants

Les différents mouvements d'un pont roulant sont assurés par les mécanismes décrits ci-après :

##### IV.4.1. Mécanisme de levage

La structure générale du système de levage est donnée sur la figure IV.3 : (1) Moteur de levage ; (2) Réducteur ; (3) Tambour ; (4) Fin de course de travail ; (5) Câbles ; (6) Poulie ; (7) Crochet ;

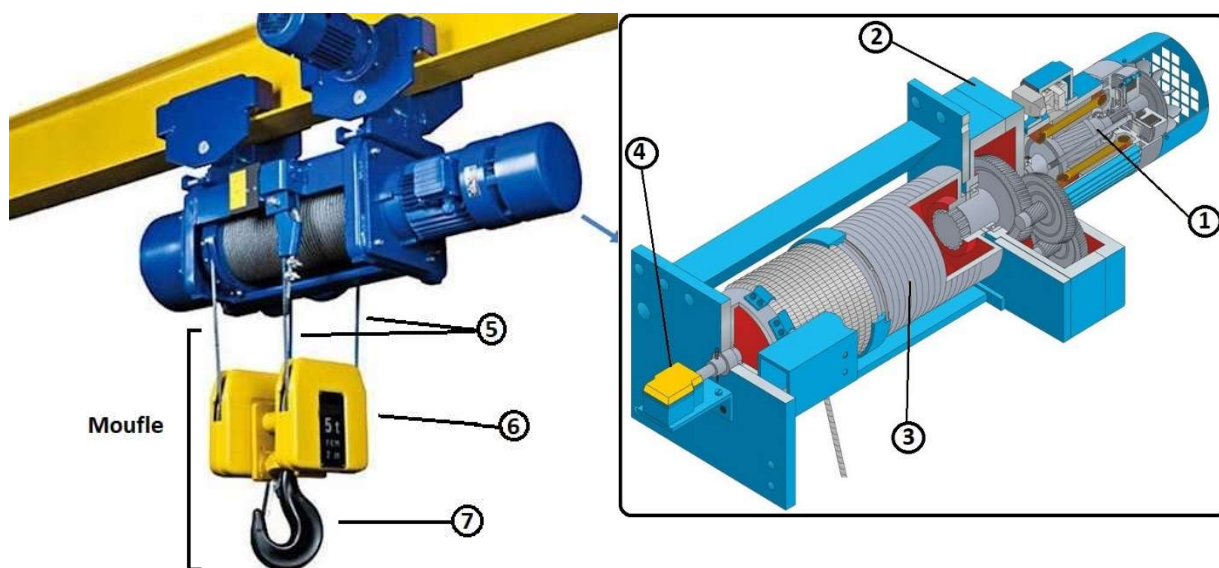


Figure IV.3 : Mécanisme de levage

Les données de base nécessaires pour le dimensionnement du mécanisme de levage sont :

- La charge utile  $Q$  (kN).
- La hauteur de levage  $H$  (m).
- La vitesse de levage  $V_L$  (m/min).

- La multiplicité  $m$  qui est fonction de la charge utile. Elle est déterminée suivant le tableau IV.1.

**Tableau IV.1 : Choix de la multiplicité**

Q (kN)	10	20-80	100-150	200-300	400-500
m	1 ou 2	2	2 ou 3	3 ou 4	4 ou 5

#### IV.4.1.1. Moteur de levage principal

Le moteur principal de levage est choisi en fonction de la charge à soulever  $Q$  (kN) et de la vitesse linéaire de montée  $V_L$  (m/min).

La puissance mécanique (utile du moteur) est déterminée par la formule :

$$P_u = \frac{Q \cdot V_L}{60} \quad (\text{IV.1})$$

Où :

- $Q$  (kN) : est la charge à soulever.
- $V_L$  (m/min) : la vitesse linéaire de la montée
- $P_u$  (kW) : la puissance utile du moteur

**Exemple :** pour soulever une charge de 120 kN avec une vitesse de 15m/min, la puissance utile nécessaire est de 30 kW.

#### IV.4.1.2. Réducteur

Le réducteur est choisi en fonction du rapport de transmission  $r$  donné par l'expression :

$$r = \frac{N_m}{N_T} \quad (\text{IV.2})$$

Où :

- $N_T$  (tr/min) : la vitesse de rotation du tambour
- $N_m$  (tr/min) : la vitesse de rotation du moteur

### IV.4.1.3. Tambour

Le tambour est fabriqué à partir d'un tube en acier laminé. Il est dimensionné de sorte que la rainure soit en une seule couche. L'enroulement sur le tambour est assuré par un guide câble presse câble métallique.

La vitesse de rotation  $N_T$  (tr/min) du tambour est calculée par l'expression :

$$N_T = m \cdot \frac{V_L}{\pi \cdot D_T} \quad (\text{IV.3})$$

Où :

- $D_T$  (m) : est le diamètre du tambour.
- $N_T$  (tr/min) : la vitesse de rotation du tambour.
- $m$  : multiplicité.

**Exemple** : Dans l'exemple précédent ( $Q = 120$  kN donc  $m=2$ ), pour un tambour de diamètre égale à 0.42 m, sa vitesse de rotation sera égale à 22.74 tr/min.

### IV.4.1.4. Fin de course de travail

Un sélecteur limitant la course de levage haute et basse est entraîné directement par l'axe du tambour. Certains palans sont équipés d'un surcourse haut indépendant du fin de course de travail. Le contact est actionné directement par le moufle, agissant sur la bobine du contacteur général. Il assure ainsi la protection, en cas de défaillance du contact de fin de course travail, de rupture d'arbre de sélecteur ou de collage du contacteur de levage.

### IV.4.1.5. Moufle

Une moufle est un dispositif mécanique qui permet le levage d'une charge par plusieurs brins de câble, afin de démultiplier l'effort de traction. Il est formé d'un groupe de poulies.

Un palan est constitué d'une moufle supérieure fixe portant les poulies de renvoi et d'une moufle inférieure mobile supportant la charge (figure IV.4).

Le moufle est un moyen de transmission du mouvement. Il sert à réduire l'effort nécessaire (ou démultiplier la force utilisée) pour rapprocher les deux groupes de poulies.



Figure IV.4 : Palan

On mesure le taux de démultiplication au nombre de brins, c'est-à-dire le nombre de passages que fait la corde entre les deux groupes de poulies (figure IV.5). L'effort nécessaire au final est divisé par le nombre de brins, tandis que la longueur de corde à tirer pour rapprocher les groupes de poulies est multipliée d'autant. La partie de la corde sur laquelle l'on tire pour soulever la charge s'appelle le *garant*.

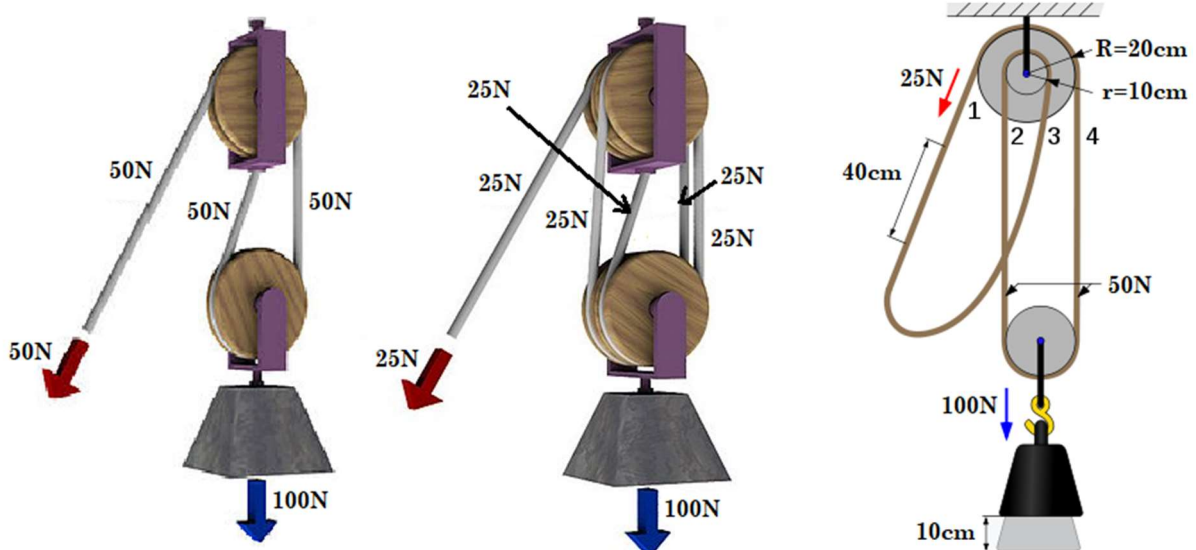


Figure IV.5 : Décomposition de la charge entre les brins



Dans l'exemple de la figure IV.5, le cas d'un mouflage à quatre brins, la tension du câble est de l'ordre du quart de la charge à lever et la longueur de câble enroulée est de l'ordre de quatre fois la course de levage.

#### **IV.4.2. Mécanismes de direction/translation**

Le mécanisme de direction assure le déplacement du/des chariots porte palan, ou du/des chariots porte treuil perpendiculairement au sens de déplacement du pont, tandis que le mécanisme de translation assure le mouvement du pont roulant sur les chemins de roulement. Ce mouvement de translation est assuré :

- Soit par un moteur commandant un arbre de transmission relié aux galets de roulement.
- Soit par deux ou quatre moteurs synchronisés entraînant chacun un galet de roulement.

Les limiteurs de course ou fin de course des mouvements horizontaux ralentissent les mouvements puis les arrêtent avant que le chariot ou le pont roulant n'entre en contact avec tout obstacle permanent.

Le dispositif anticollision permet de ralentir puis d'arrêter le mouvement de translation d'un pont roulant circulant sur la même voie, ou sur des voies parallèles situées à des niveaux différents, en évitant ainsi les accidents qui pourraient résulter.

#### **IV.5. Systèmes de levage électromagnétique**

Le levage magnétique peut être effectué soit par des aimants permanents, des électro-aimants ou des aimants hydrauliques.

##### **IV.5.1. Les aimants permanents**

Ces aimants sont compacts et fonctionnent en permanence : ils conservent leur force magnétique.

Les aimants permanents sont des matériaux magnétiques durs. ayant une grande aimantation rémanente, cela leur donne des propriétés particulières de conserver leur force magnétique pour exercer une force d'attraction sur tout matériau ferromagnétique.

#### **IV.5.2. Les électro-aimants**

L'électro-aimant produit un champ magnétique lorsqu'il est alimenté par un courant électrique : il convertit de l'énergie électrique en énergie magnétique. Il est constitué d'un bobinage et d'une pièce polaire en matériau ferromagnétique doux appelée noyau magnétique qui canalise les lignes de champ magnétiques.

Ils peuvent être utilisés pour la collecte et la manutention de matériaux ferreux tels que la tôle ou la ferraille. Ils sont capables de commuter rapidement et sans usure et peuvent également soulever des charges lourdes. Cependant, ils présentent le risque que la charge tombe si l'alimentation est coupée.

Des électro-aimants alimentés par batterie sont également utilisés dans l'industrie. On distingue :

- Des électro-aimants alimentés par une batterie externe.
- Des électro-aimants alimentés par une batterie intégrée. Ces électro-aimants sont indépendants, et peuvent être commandés par radiocommande et/ou un automate programmable. Ils sont utilisés avec différents profils de magnétisation dans divers secteurs pour la collecte et le déplacement de matériaux ferreux, même de petite taille.

#### **IV.5.3. Les aimants hydrauliques**

Relié à un générateur hydraulique, le fonctionnement de ce type d'aimants est contrôlé par le débit d'huile du générateur. Il ne nécessite aucune connexion électrique. L'aimant se magnétise lorsque l'huile de la machine est en circulation et se démagnétise lorsque le flux s'arrête. Ils sont utilisés dans la collecte de

matériaux ferreux dans les parcs de démolition, de recyclage et de ferraille et, en raison de leur taille, ils sont souvent appliqués à des machines massives telles que des excavatrices.

#### IV.6. Les systèmes de commande électrique des ponts roulants

D'une façon générale, les ponts roulants sont commandés à partir d'une cabine ou du sol ; plus rarement, ils sont automatisés totalement ou en partie. Dans le cas de plusieurs postes de commande pour un appareil de levage, un seul poste doit être opérationnel à la fois afin que les opérateurs ne puissent se mettre en danger mutuellement.

Les appareils de commande utilisés sont généralement des boutons poussoirs de mise en marche, des boutons d'arrêt d'urgence (figure IV.6)...etc.



**Figure IV.6** : Appareils de commande

##### IV.6.1. Commande en cabine

Les commandes en cabine procurent au pontier une meilleure visibilité de la charge et de l'itinéraire à emprunter. Elles peuvent être fixes, mobiles ou orientables. Elles sont notamment utilisées lorsque les tâches à effectuer nécessitent la présence d'un pontier à temps complet.

### **IV.6.2. Commande au sol**

Les commandes au sol s'effectuent à l'aide d'une boîte à boutons pendante ou d'une télécommande. Elles sont admissibles pour des vitesses de direction et translation compatibles avec le déplacement d'un homme au pas et avec l'encombrement au sol. La vitesse de déplacement doit être limitée :

- Pour les appareils n'ayant qu'une seule vitesse de déplacement : inférieure ou égale à 1 m/s.
- Pour les appareils ayant plusieurs vitesses de déplacement, la plus petite vitesse ne doit pas dépasser 0.75 m/s.

### **IV.7. Phénomène de balancement**

Pour répondre aux exigences de productivité, les ponts roulants doivent être en mesure d'effectuer rapidement des déplacements de grande précision. La principale difficulté rencontrée pour un tel déplacement est le balancement de la charge, qui se produit lorsque la charge soulevée se déplace horizontalement.

L'un des principaux dangers du balancement des ponts roulants est qu'il peut provoquer la collision de la charge avec d'autres objets, ce qui peut causer des dommages et des blessures. Un autre danger du balancement est qu'il peut déstabiliser le système lui-même. Lorsqu'une charge oscille, cela crée des forces supplémentaires sur la charge du pont ce qui peut causer son dysfonctionnement.

Afin de prévenir ce phénomène différentes méthodes sont mises en place :

#### **IV.7.1. Equilibrage de la charge**

Lors du levage d'une charge, il est important de s'assurer que le poids est uniformément réparti sur les câbles de levage. Pour se faire, il est important de déterminer le centre de gravité de la charge et de la positionner en conséquence. Cela peut être fait à l'aide de calculs mathématiques où les vitesses de déplacement, l'accélération et la décélération du pont roulant et du chariot de

direction, la position du crochet et la longueur de l'équipement d'accrochage de la charge sont pris en compte.

Le modèle mathématique calcule le mouvement du pendule attendu pour les changements de vitesse ou de direction. Ensuite, le pont ou le chariot reçoit une commande pour compenser ce mouvement. Le même mouvement serait également effectué par un opérateur de pont expérimenté.

#### **IV.7.2. Utilisation des dispositifs anti-balancement**

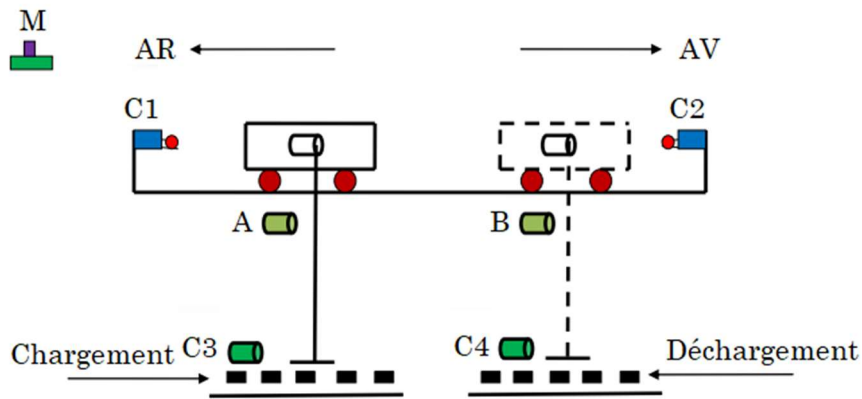
Ces dispositifs, qui peuvent être soit mécanique ou électronique, fonctionnent en utilisant des capteurs pour détecter tous les mouvements de la charge, puis ajuste automatiquement les mouvements de la charge pour les contrecarrer. Les systèmes anti-balancement à câble en huit inversé sont couramment utilisés.

#### **IV.8. Automatisation des ponts roulants**

L'automatisation des ponts roulants nécessite de déterminer la trajectoire de déplacement de la charge. Cette trajectoire doit tenir compte du phénomène de balancement d'une part et de l'autre éviter la collision avec d'autres objets qui existent dans l'espace.

##### **Exercice**

Dans une usine de fabrication des tôles, il existe un pont roulant utilisé pour prendre les déchets métalliques et qui se déplace du point C1 au point C2 (figure IV.7). Pour le chargement et le déchargement des déchets métalliques, ce pont fait monter et descendre la charge. Les capteurs de position C1 et C2 sont des capteurs mécaniques et les capteurs A, B, C3 et C4 sont des capteurs magnétiques de position.

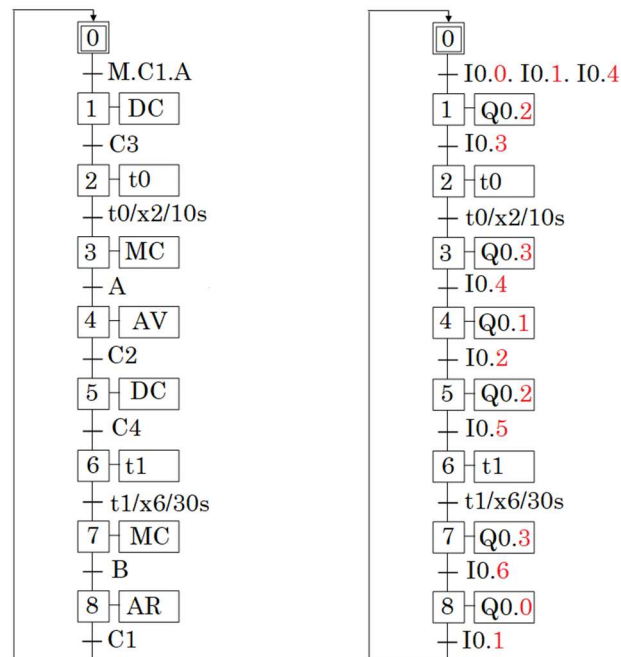


**Figure IV.7 :** Cycle de fonctionnement d'un chariot

Réaliser le Grafcet de niveau 2 et niveau 3 pour un cycle complet de chargement et déchargement des déchets.

A l'état initial, le pont se trouve au point C1 et la charge au point A. La durée du chargement est de 10sec et le déchargement 30sec. La table mnémonique est dressée dans le tableau suivant :

Les entrées			Les sorties		
Adresse	Symbole	Définition	Adresse	Symbole	Définition
I0.0	M	Bouton marche	Q0.0	AR	Pont en arrière
I0.1	C1	Capteur mécanique	Q0.1	AV	Pont en avant
I0.2	C2	Capteur mécanique	Q0.2	DC	Descente charge
I0.3	C3	Capteur mécanique	Q0.3	MC	Monté charge
I0.4	A	Capteur magnétique			
I0.5	C4	Capteur magnétique			
I0.6	B	Capteur magnétique			

**Solution**

Grafcet de niveau 2

Grafcet de niveau 3

**Figure IV.8** : Grafcet de commande du chariot**IV.9. Equipements des grands ponts roulants**

Les grands ponts roulants sont des ponts à quatre poutres. De tels engins, qu'on trouve exceptionnellement dans les aciéries, sont capables de lever plusieurs centaines de tonnes. Un pont roulant de grande taille est constitué :

- D'un quadrilatère, structure constituée de :
  - Sommiers équipés de galets (roues) assurant le déplaçant sur l'une et l'autre des voies de roulement.
  - Deux poutres de grande taille reliant les sommiers et supportant le chariot.
- D'un chariot ou plusieurs se déplaçant sur les poutres du quadrilatère et équipé d'un ou deux palans ou treuils permettant d'enrouler le câble de levage.
- D'une ou d'un moufle reprenant les accessoires de levage à l'extrémité basse des câbles.

#### **IV.10. Commande à distance des ponts roulants**

La transmission des ordres du boîtier de commande aux organes de commande des différents mécanismes du pont roulant se fait :

- Soit par voie hertzienne.
- Soit par rayonnement infrarouge.

La mise en place d'un dispositif de radiocommande sur un pont roulant nécessite des précautions particulières pour éviter qu'il ne soit à l'origine de nouveaux risques. Si un pont roulant est équipé d'un système de commande sans fil, ceci doit être marqué au niveau de l'accès. De plus, le pont roulant devra posséder en termes d'avertissement soit un signal sonore et/ou visuel précédent tout mouvement du pont.

#### **IV.11. Alimentation des ponts roulants**

L'alimentation électrique est en général fournie sous forme d'un courant électrique triphasé, dont la tension entre phases est de 380 V dans les cas les plus courants. Les défaillances de l'alimentation électrique des circuits internes des moteurs ou des circuits de commande peuvent avoir pour conséquences :

- Un mouvement à vitesse non contrôlée de la charge (appelé « dérive »).
- Une inversion du sens de déplacement de la charge lors du mouvement montée (appelé « dévirage »).

Un dispositif à coupure omnipolaire (appelé « interrupteur tête de ligne ») doit être installé entre la source d'énergie et les conducteurs d'alimentation du pont roulant. Cet interrupteur est muni d'un dispositif permettant un verrouillage mécanique en position d'ouverture. D'autres dispositifs de protection tels que le détecteurs de présence de phase, détecteur de survitesse, systèmes d'autodiagnostic de variateurs électroniques de vitesse, sont également prévus afin d'éviter ces risques.

Les masses dans un pont roulant sont toutes les parties métalliques de celui-ci ainsi que celles sur lesquelles il prend appui. Il convient, donc, de s'assurer de la continuité de la liaison à la terre des masses, notamment au niveau des éclissages



des rails et également entre ce chemin de roulement et le pont roulant (surface des rails à maintenir propre).

---

# Références bibliographiques

## Références bibliographiques

- [1] Chabani Sououdi Boumediene, Commande électrique des mécanismes industriels, Support de cours, 2ème année master, spécialité : Commande électrique. Université Ahmed Draya, Adrar.
- [2] Adel Bagghi, Les moteurs asynchrones triphasés, Technologie 116, Novembre-Décembre 2001.
- [3] F. Tazerart, Cours et exercices corrigés : Mécanismes Industriels de Transmission Mécanique de Puissance, Université A.Mira, Béjaia, Algérie.
- [4] NEMA MG-1, Motors and Generators, National Electrical Manufacturers Association, [www.nema.org](http://www.nema.org)
- [5] ABB drives, Dimensionnement d'un système d'entraînement, Guide technique N°7.
- [6] Hydro Group : Pompes et Broyeurs pour le transfert des eaux chargées, lien : <https://www.hydro-group.com/blog/c-est-quoi-le-npsh-d-une-pompe-et-pourquoi-faut-il-bien-le-surveiller/>
- [7] Chouchène Mohamed, Recueil des travaux dirigés corrigés, Technologie des systèmes hydrauliques, ISET Siliana
- [8] A.Saidoun et T.Zabot, Automatisation et supervision d'une station de pompage et distribution d'eau à la SNVI, Mémoire de Master professionnel, 2018, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.
- [9] <https://www.kone.fr/outils-normes-documentation/faq/ascenseur-hydraulique.aspx>
- [10] <https://energieplus-lesite.be> [Consulté le 28 avril 2022]
- [11] Solutions techniques pour répondre à l'obligation réglementaire de précision d'arrêt et maintien à niveau des ascenseurs. Utilisation des variateurs électriques de vitesse. Mise en sécurité des ascenseurs, Guide d'aide à la décision, février 2010, COPREC
- [12] Technique de l'ingénieur, Ponts roulants et portiques, Réf AG7020 v1, lien : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/appareils-de-levage-et-chariots-de-manutention-42118210/ponts-roulants-et-portiques-ag7020/definition-des-materiels-ag7020niv10001.html>
- [13] Ponts roulants, appareils de levage, Manuel de sécurité, Octobre 2018, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS)

# **Annexe**

---

## **Mise en ligne du cours**

En plus de la version du cours dispensé en présentiel, un enseignement à distance de ce cours est conçu et géré via la plateforme Moodle de l'université de Bouira. Dans cette partie, le scénario d'apprentissage en ligne est présenté en se basant sur des captures d'écran.

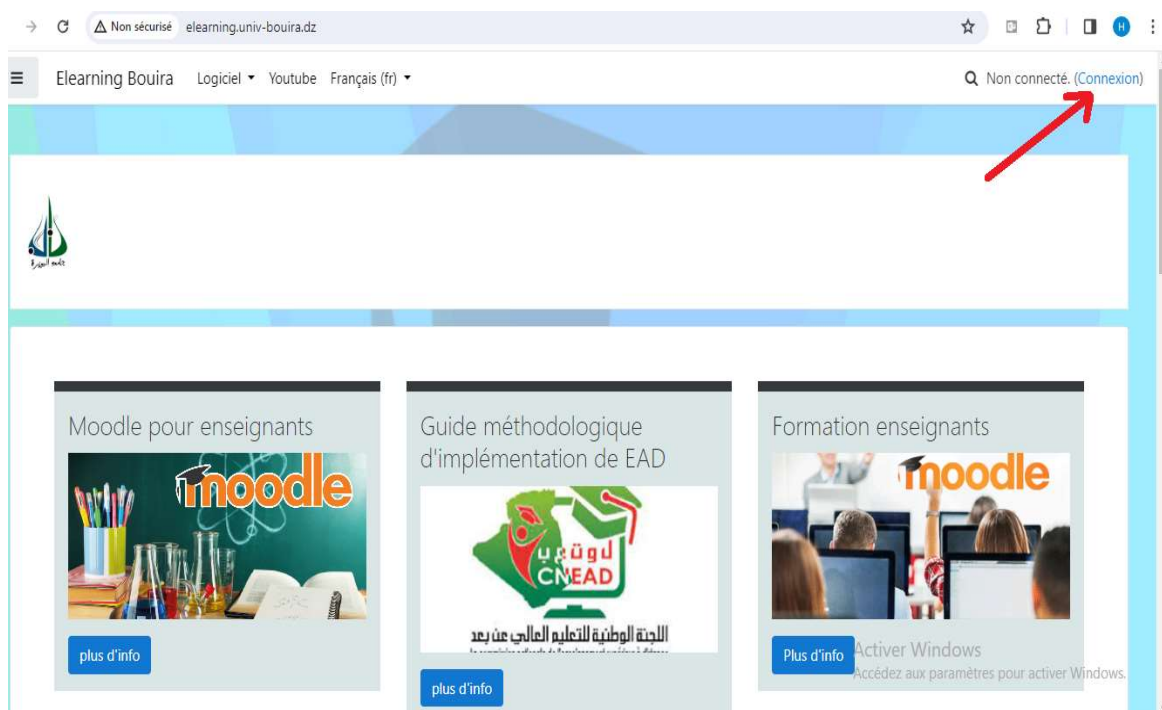


### A.1. Connexion au site d'apprentissage en ligne de l'Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira (e-learning)

Ce cours est mis en ligne sur la plateforme Moodle de l'université de Akli Mohand Oulhadj de Bouira à l'adresse ci-dessous :

<http://elearning.univ-bouira.dz/>

Une fois sur cette adresse, cliquer sur connexion.



Connectez-vous en utilisant votre identifiant qui vous a été fourni par l'administrateur de la plateforme ou allez dans le lien :

<http://elearning.univ-bouira.dz/course/view.php?id=7127>

<input type="text" value="houria.smail"/> <input type="password" value="....."/> <input type="checkbox"/> Se souvenir du nom d'utilisateur	Nom d'utilisateur ou mot de passe oublié ?  Votre navigateur doit supporter les cookies ?  Des cours peuvent être ouverts aux visiteurs anonymes
<input type="button" value="Connexion"/>	<input type="button" value="Connexion anonyme"/>

## A.2. Organisation du cours

### A.2.1. Page d'accueil

#### Page d'accueil



Ce cours intitulé « Commande des systèmes électriques » est destiné aux étudiants de 2<sup>ème</sup> année Master en électrotechnique industriel durant le semestre 3.

Le cours, structuré en quatre chapitres, a pour objectif de permettre à l'étudiant d'apprendre en premier lieu à choisir les éléments de la commande dans un système industriel et d'aborder, par la suite, la commande et l'automatisation des systèmes électriques tels que les pompes, les ponts roulants, les ascenseurs,...etc.

### A.2.2. Fiche de contact



**Nom de la matière :** Commande des systèmes électriques, UEF 2.1.1, 2<sup>ème</sup> année Master : Electrotechnique Industrielle (S3)

**Nom du responsable de la matière :** Mme Houria SMAIL

**Disponibilité et contact :** [h.smail@univ-bouira.dz](mailto:h.smail@univ-bouira.dz),

**Dates du cours ou période du cours :** du 03 Octobre au 16 Décembre 2022.

**Code de l'UE :** UEF 2.1.1

**Découpage du cours (CM/TD) :** CM 1.5 heures, TD 1.5 heures

**Nombre de crédits :** 4

**Coefficient :** 2

### A.2.3. Objectifs du cours

#### Objectifs



*Le cours commande des systèmes électriques vise à savoir comment choisir les éléments de la commande dans un système industriel et à connaître le fonctionnement des systèmes électriques tels que les ascenseurs, les pompes et les ponts roulants.*

A la fin de ce cours, l'étudiant sera capable de :

- Dimensionner et choisir les actionneurs dans un système électrique ;
- Elaborer des programmes de commande et d'automatisation des systèmes électriques ;

### A.2.4. Pré-requis

#### Pré-requis



*Les connaissances requises pour suivre cet enseignement sont celles relatives aux machines électriques, l'identification des systèmes, l'asservissement et la régulation.*

**Question 7**  
Pas encore répondu  
Noté sur 10,00  
[Marquer la question](#)  
[Modifier la question](#)

Proposer un schéma de montage pour la mesure de la résistance de l'induit

**Veillez choisir une réponse.**

a. Aval

b. Amont




[Test des pré-requis \(test d'entrée\)](#)

En cliquant sur ce lien la fenêtre contenant le test s'ouvre

## A.2.5. Table des matières






### Plan global

	<b>Chapitre 1 : Critères de choix d'un moteur électrique dans un environnement industriel</b>
	<b>Chapitre 2 : Commande électrique et automatisation des pompes, des ventilateurs et des compresseurs</b>
	<b>Chapitre 3. Alimentation et automatisation des ascenseurs</b>
	<b>Chapitre 4. Automatisation des ponts roulants</b>

## A.2.6. Chapitre I

### Chapitre I : Critères de choix d'un moteur électrique dans un environnement industriel



-  Principe de fonctionnement d'un moteur à induction
-  Explication de la plaque signalétique d'une machine à courant continu
-  Chapitre 1
-  Série de TD 1
-  QCM

Nous cherchons à déterminer un moteur capable d'entraîner une charge dont le couple résistant est évalué à environ 12 N.m à une vitesse de rotation d'environ 1430 tr/mn et un autre moteur pour entraîner une charge de 9 N.m à la même vitesse de rotation. Le réseau d'alimentation est de 400V. Choisir le moteur à partir du tableau suivant :

Type	Puissance nominale $P_n$ (kW)	Vitesse nominale $n_n$ (tr/min)	Facteur de puissance $\cos \Phi$	Rendement $\eta$ (%)	$I_d/I_n$
LS 90S	1.1	1415	0.81	76	5
LS 90L	1.5	1430	0.81	78	5.9
LS 90L	1.8	1425	0.83	79	5.7
LS 100L	2.2	1430	0.81	78	5.3
LS 100L	3	1420	0.78	79	5.1

Charge de 12 N.m

LS 90L de 1.5 kW

Choisir...

LS 90L de 1.5 kW

Charge de 9 N.m

LS 100L de 3 kW

LS 90S

LS 90L de 1.8 kW

LS 100L de 2.2 kW



## A.2.7. Chapitre II


Chapitre 2 : Commande électrique et automatisation des pompes, des ventilateurs et des compresseurs



---

 Chapitre 2

 Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge

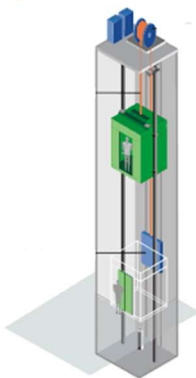
 Pompe immergée

 Série d'exercices

 QCM

## A.2.8. Chapitre III

Chapitre 3 : Alimentation et automatisation des ascenseurs et des extracteurs



---

 Chapitre 3 (cours)

 série d'exercices

 QCM non terminé

## A.2.9. Chapitre IV

### Chapitre 4 : Automatisation des ponts roulants



 [Chapitre 4 \(cours\)](#)

 [Série d'exercices](#)

 [QCM](#)

## A.2.10. Références

### Référence bibliographique




[1] Chabani Sououdi Boumediene, Commande électrique des mécanismes industriels, Support de cours, 2<sup>ème</sup> année master, spécialité : Commande électrique. Université Ahmed Draya, Adrar.

[2] Adel Bagghi, Les moteurs asynchrones triphasés, Technologie 116, Novembre-Décembre 2001. 1197-116-p30.pdf

[cliquer pour voir plus](#)

## A.2.11. Forum

### Forum

 [Salon de discussion \(Forum\)](#)