

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*

*Université Mohamed Seddik Benyahia de Jijel*



*Faculté des sciences et de la technologie*  
*Département d'électrotechnique*

## *Support de cours*

---

---

# Commande des systèmes électriques

---

---

*Destiné aux :*

*Étudiants de 2<sup>ème</sup> année master électrotechnique industrielle*

*Préparé par :*

**MAKHLOUF Badr**

**2020-2021**

## *AVANT - PROPOS*

Ce cours s'adresse particulièrement aux étudiants de la filière électrotechnique, 2<sup>ème</sup> année master électrotechnique industrielle. Il a été préparé et structuré d'une manière simplifiée afin de faciliter la compréhension et permettre aux étudiants de maîtriser les concepts et les méthodes de commandes des systèmes électriques afin de les appliquer aux domaines industriels aussi variés que : pétrochimie, métallurgie, papetière, agroalimentaire,... etc. Les connaissances préalables recommandées sont : machines électriques, asservissement et régulation, identification des systèmes et entraînements électriques.



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
اللجنة البيداغوجية الوطنية لميدان العلوم والتكنولوجيا  
Comité Pédagogique National du domaine Sciences et Technologies



# HARMONISATION OFFRE DE FORMATION MASTER ACADEMIQUE

## 2016 - 2017

Domaine	Filière	Spécialité
<i>Sciences et Technologies</i>	<i>Electrotechnique</i>	<i>Electrotechnique Industrielle</i>

**Semestre: 3**

**UE Fondamentale Code : UEF 2.1.1**

**Matière: Commande des systèmes électriques**

**VHS: 45h (Cours: 1h30, TD 1h30)**

**Crédits: 4**

**Coefficient: 2**

**Objectifs de l'enseignement:**

Apprendre à choisir les éléments de la commande et des actionneurs d'un système électrique. Aborder la commande de systèmes industriels tels que les pompes, les ponts roulants, les extracteurs, ...etc.

**Connaissances préalables recommandées:**

Machines électriques, identification des systèmes, asservissement et régulation, ...etc.

**Contenu de la matière:**

**Chapitre 1 : Critères de choix d'un moteur électrique dans un environnement industriel**

**1.1 -Moteurs électriques**

- Utilisation des machines électriques de construction normale
- Moteurs de construction spécifique

**1.2- Choix des moteurs en fonction :**

- de l'environnement industriel
- de la puissance
- du régime de fonctionnement

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

- 2-1-Principes
- 2-2-Puissance en bout d'arbre
- 2-3-Démarrage des mécanismes à couple de ventilateurs
- 2-4- Commande électrique des ventilateurs

**Chapitre 3 : Alimentation et automatisation des ascenseurs et des extracteurs**

- 3-1- Principes
- 3-2- Précision du stationnement des systèmes de levage
- 3-3- Exigences dans les systèmes de commande des ascenseurs
- 3-4-Schémas types des commandes pour les ascenseurs
- 3-5-Automatisation des commandes de vitesse des ascenseurs

**Chapitre 4 : Automatisation des ponts roulants**

- 4-1- Principes
- 4-2- Charges des moteurs des mécanismes des ponts roulants
- 4-3- Systèmes de levage électromagnétique
- 4-4-Les systèmes de commande électriques des ponts roulants
- 4-5- Exigences des caractéristiques mécaniques des commandes électriques des ponts roulants
- 4-6- Automatisation des ponts roulants au moyen des convertisseurs à thyristors
- 4-7-Equipement des grands ponts roulants
- 4-8-Commande à distance des ponts roulants
- 4-9-Alimentation des ponts roulants

**Mode d'évaluation:**

Contrôle continue: 40% ; Examen: 60%

**Référence:** Livres et polycopiés.

## Chapitre I

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

<b>Introduction.....</b>	<b>01</b>
<b>I.1/ Identification des indices d'une plaque signalétique (Moteur asynchrone).....</b>	<b>01</b>
<b>I.2/ Mouvement de rotation.....</b>	<b>04</b>
I.2-1/ Réducteur.....	04
I.2-2/ Caractéristique couple-vitesse d'un MAS.....	05
I.2-3/ Quadrants de fonctionnement.....	05
<b>I.3/ Moteurs électriques et les critères de choix.....</b>	<b>07</b>
I.3-1/ Moteurs électriques.....	07
I.3-1-1/ Moteurs asynchrones (AS) pour des applications spécifiques.....	07
I.3-1-2/ Moteurs synchrones.....	09
I.3-1-3/ Moteurs à courant continu.....	09
I.3-2/ Différents types de charge de moteurs.....	09
I.3-2-1/ Charge à couple constant et puissance variable.....	09
I.3-2-2/ Charge à puissance constante et couple variable.....	10
I.3-2-3/ Charge à couple variable et puissance variable.....	10
I.3-3/ Comment faire le choix d'un moteur électrique ? .....	10
I.3-3-1/ Choix d'un moteur asynchrone.....	12
I.3-3-2/ Choix d'un moteur synchrone.....	13
I.3-3-3/ Choix d'un moteur à courant continu.....	13
I.3-3-4/ Bilan des puissances.....	14
I.3-3-5/ Rendement d'un moteur.....	14
I.3-4/ Moteurs sur mesure.....	14
<b>I.4/ Moteur asynchrone multi vitesse.....</b>	<b>15</b>
<b>I.5/ Recommandations générales.....</b>	<b>15</b>

## Chapitre II

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

<b>Introduction.....</b>	<b>17</b>
<b>II.1/ Pompes.....</b>	<b>17</b>
II.1-1/ Pompes centrifuges.....	17
II.1-1-1/ Constitution.....	17
II.1-1-2/ Différents montages.....	18

II.1-1-3/ Courbe caractéristique de la pompe.....	19
II.1-1-4/ Courbe caractéristique d'un circuit ou réseau hydraulique.....	19
II.1-2/ Pompes volumétriques.....	20
<b>II.2/ Compresseurs.....</b>	<b>21</b>
II.2-1/ Principe de fonctionnement des compresseurs volumétriques.....	21
II.2-2/ Compresseur multi étagé.....	22
<b>II.3/ Ventilateurs industriels.....</b>	<b>23</b>
II.3-1/ Différentes applications des ventilateurs.....	24
II.3-1-1/ Soufflage.....	24
II.3-1-2/ Aspiration.....	24
II.3-1-3/ Chauffage.....	24
II.3-1-4/ Aération.....	24
II.3-1-5/ Refroidissement.....	24
II.3-1-6/ Séchage.....	25
<b>II.4/ Automatisation des installations à : pompe, compresseur et ventilateur.....</b>	<b>25</b>
II.4-1/ Équipements et techniques industrielles de variation de vitesse.....	25
II.4-1-1/ Principales fonctions des variateurs de vitesse électroniques.....	26
II.4-1-2/ Commande scalaire.....	29
II.4-1-3/ Commande vectorielle.....	31
II.4-1-4/ Variateur avec commande directe du couple.....	33
II.4-2/ Présentation d'un variateur de vitesse de la marque ABB et Schneider Electric.....	34
II.4-2-1/ Le variateur ACS5000.....	34
II.4-2-2/ Le variateur ATV6000.....	35
II.4-2/ Automatisation d'une installation à pompe.....	37
II.4-2-1/ Équipements nécessaires pour une armoire (Coffret) de commande.....	37
II.4-2-2/ Régulation du débit par variation de vitesse.....	39
II.4-3/ Automatisation d'une installation à compresseur, le cas d'une centrale ou station d'air comprimé.....	42
II.4-3-1/ Composants et commande d'une centrale d'air comprimé.....	42
II.4-4/ Automatisation d'une installation à ventilateur, le cas pour une exploitation minière souterraine.....	45

### **Chapitre III**

#### **Alimentation et automatisation des ascenseurs**

<b>Introduction.....</b>	<b>47</b>
<b>III.1/ Définitions.....</b>	<b>47</b>
III.1-1/ Ascenseur.....	47

III.1-2/ Ascenseur de charge.....	47
III.1-3/ Monte voitures.....	48
III.1-4/ Ascenseur pour le transport de personnes handicapées.....	48
III.1-5/ Ascenseur sur plan incliné.....	49
<b>III.2/ Catégories d'ascenseurs.....</b>	<b>49</b>
III.2-1/ Ascenseurs hydrauliques.....	49
III.2-1-1/ Constitution.....	50
III.2-1-2/ Avantages et inconvénients.....	50
III.2-2/ Ascenseurs à vis.....	51
III.2-3/ Ascenseurs à traction à câbles.....	51
<b>III.3/ Types de motorisations d'ascenseurs à traction à câbles.....</b>	<b>51</b>
III.3-1/ Motorisation avec vis sans fin.....	51
III.3-2/ Motorisation avec réducteur de vitesse.....	52
III.3-3/ Motorisation sans réducteur de vitesse ou "Gearless".....	53
<b>III.4/ Organes principaux dans les ascenseurs.....</b>	<b>54</b>
<b>III.5/ Organes de sécurité dans les ascenseurs.....</b>	<b>62</b>
III.5-1/ Limiteur de charge.....	62
III.5-2/ Limiteur de pression.....	62
III.5-3/ Vanne parachute.....	62
III.5-4/ Limiteur de vitesse.....	62
III.5-5/ Parachute.....	62
<b>III.6/ Types d'ascenseurs.....</b>	<b>63</b>
<b>III.7/ Détection de la position de la cabine.....</b>	<b>63</b>
<b>III.8/ Couple et puissance.....</b>	<b>63</b>
III.8-1/ Calcul de la puissance d'un ascenseur à traction à câbles.....	64
III.8-2/ Calcul de la puissance d'un ascenseur hydraulique.....	65
III.8-2-1/ Force d'un vérin.....	65
III.8-2-2/ Puissance d'une pompe.....	65
III.8-3/ Évaluation de la consommation en énergie électrique le cas d'un ascenseur à traction.....	65
III.8-3-1/ Données techniques.....	65
III.8-3-2/ Étude de la descente de la cabine à vide.....	66
III.8-3-3/ Étude de la montée de la cabine à vide.....	66
III.8-3-4/ Étude de la descente de la cabine à moitié charge.....	67
III.8-3-5/ Étude de la montée de la cabine à moitié charge.....	67
III.8-3-6/ Étude de la descente de la cabine en plein charge.....	68
III.8-3-7/ Étude de la montée de la cabine en plein charge.....	68

<b>III.9/ Alimentation d'un ascenseur à traction par un variateur de vitesse.....</b>	<b>69</b>
<b>III.10/ Automatisation d'un ascenseur (Lois de parcours).....</b>	<b>69</b>
III.10-1/ Manœuvre à blocage.....	70
III.10-2/ Manœuvre collective descente.....	70
III.10-3/ Manœuvre collective montée-descente.....	70
III.10-4/ Manœuvre en batterie.....	71

## **Chapitre IV**

### **Automatisation des ponts roulants**

<b>Introduction.....</b>	<b>72</b>
<b>IV.1/ Éléments d'un pont roulant.....</b>	<b>72</b>
<b>IV.2/ Types des ponts roulants.....</b>	<b>73</b>
<b>IV.3/ Applications des ponts roulants.....</b>	<b>74</b>
IV.3-1/ Pont roulant pour l'industrie aéronautique.....	74
IV.3-2/ Pont roulant pour l'industrie du papier.....	74
IV.3-3/ Pont roulant pour le négoce d'acier.....	75
IV.3-4/ Pont roulant pour la production d'acier.....	75
<b>IV.4/ Caractéristiques mécaniques.....</b>	<b>75</b>
IV.4-1/ Charge nominale.....	75
IV.4-2/ Charge admissible.....	75
IV.4-3/ Hauteur de levage.....	75
IV.4-4/ Direction (Portée).....	76
IV.4-5/ Translation (Course).....	76
<b>IV.5/ Conditions de fonctionnement et de sécurité.....</b>	<b>76</b>
<b>IV.6/ Principaux dispositifs de sécurité.....</b>	<b>77</b>
<b>IV.7/ Systèmes de variation de vitesse (Convertisseurs et techniques de commandes).....</b>	<b>78</b>
IV.7-1/ Commande de vitesse en continu (CVC) .....	78
IV.7-2/ Contrôle en fréquence (CF) .....	79
IV.7-3/ Système de correction automatique du balancement de la charge.....	80
<b>IV.8/ Pont roulant automatique.....</b>	<b>81</b>
<b>IV.9/ Ponts roulants avec système de levage électromagnétique.....</b>	<b>82</b>
<b>IV.10/ Dimensionnement des moteurs du pont roulant.....</b>	<b>85</b>
IV.10-1/ Détermination de la puissance du moteur de mécanisme de translation du pont.....	85
IV.10-2/ Détermination de la puissance du moteur de mécanisme de translation du chariot.....	86
IV.10-3/ Détermination de la puissance du moteur de mécanismes de levage.....	87
IV.10-3-1/ Mécanismes de levage principal.....	87
IV.10-3-2/ Mécanismes de levage auxiliaire.....	89



**Complément de cours**

**Freinage électrique**

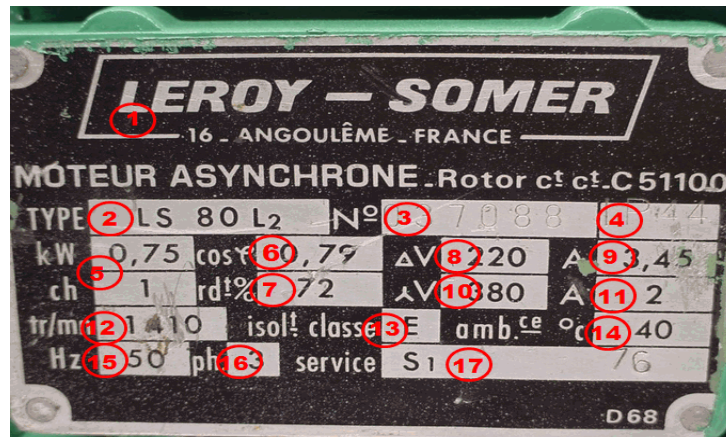
<b>Introduction.....</b>	<b>91</b>
<b>C.1/ Évaluation du temps de freinage naturel.....</b>	<b>91</b>
<b>C.2/ Freinage sans dispositif de l'électronique de puissance.....</b>	<b>92</b>
C.2-1/ Freinage par fonctionnement en hyper-synchrone.....	92
C.2-2/ Freinage par contre-courant.....	92
C.2-2-1/ Moteur à cage.....	93
C.2-2-2/ Moteur à rotor bobiné (Moteur à bagues) .....	93
C.2-3/ Freinage par injection de courant redressé.....	94
<b>C.3/ Techniques de freinages qui nécessitent de l'électronique de puissance.....</b>	<b>95</b>
C.3-1/ Ponts de thyristors en montage antiparallèle.....	95
C.3-2/ Hacheur et résistance de freinage ou freinage électronique.....	96
C.3-3/ Bus continu commun.....	99
<b>Bibliographie .....</b>	<b>100</b>

## **Introduction**

Un moteur électrique sert à convertir de l'électricité en mouvement, il doit être considéré comme une source de couple. Le courant crée un champ magnétique, afin que les pôles du stator, fixe, attirent ceux du rotor. Le rotor tourne grâce à l'alternance de la polarité. La vitesse du mouvement est contrôlée en amont avec un variateur, et la force en sortie est ajustée par un réducteur ou multiplicateur (Engrenage).

### **I.1/ Identification des indices d'une plaque signalétique (Moteur asynchrone)**

Sur la plaque signalétique d'un moteur électrique le fabricant indique les principales caractéristiques du moteur et ses conditions d'utilisations :



**Figure I.1 : Plaque signalétique**

- 1- Marque du moteur : LEROY-SOMER.
- 2- Type LS80L2 : (LS : lettre de la série), (80 (80mm) : hauteur d'axe, dans les standard on trouve : 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200), (L2 : type longueur tôle rotor).
- 3- N° de série.
- 4- IP 44 : catégorie de protection.\*
- 5- kW 0,75 : puissance du moteur en kilo-Watte, ch 1 : puissance du moteur en chevaux.
- 6-  $\cos \phi$  0,79 : cosinus phi (Facteur de puissance).
- 7- rdt% 72 : rendement en pourcentage.
- 8-  $\Delta V$  220 : tension d'alimentation du moteur couplé en triangle.
- 9- A 3,45 : intensité du courant du moteur couplé en triangle.
- 10- YV 380 : tension du moteur couplé en étoile.
- 11- A 2 : intensité du courant du moteur couplé en étoile.
- 12- tr/min 1410 : vitesse de rotation nominale du moteur.
- 13- isolt classe E : classe d'isolement (A : 105°C, E : 120°C, B : 130°C, F : 155°C, H : 180°C).\*\*
- 14- ambce °C 40 : température ambiante admissible.
- 15- Hz 50 : fréquence de la tension d'alimentation en Hertz.
- 16- Ph 3 : nombre de phase (1 : monophasé, 3 : triphasé).
- 17- service S1 : service de fonctionnement (S1 : 100%, S2 : 80%, S3 : 60%, S4 : 40%).\*\*\*

**\* : Indice de protection (IP<sub>xy</sub>) :**

Le code IP, est décrit dans la norme internationale CEI 60529. La CEI (Commission Électronique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électroniques nationaux. Le code IP correspond aux degrés de protection assurés par les enveloppes des matériels électriques dont la tension est inférieure ou égale à 72,5 kV.

Prenons l'exemple du code IP44 :

- Le chiffre **44** se décompose en deux nombres, le **4** indique le degré de protection contre les contacts fortuits et la pénétration contre les corps étrangers solides, le **4** donne le degré de protection contre les effets nuisibles dus à la pénétration de l'eau. Le tableau ci-dessous montre qu'un matériel IP 44 est protégé contre les corps étrangers supérieur à 1mm (**4**) et contre les éclaboussures (**4**)

**Tableau I.1 : Identification de l'indice de protection**

Intrusion de corps étrangers (x)								
Code	0	1	2	3	4	5	6	
Description externe (Description du code)	Sans protection	Protection contre les corps étrangers > 50 mm	Protection contre les corps étrangers > 12.5 mm	Protection contre les corps étrangers > 2.5 mm	Protection contre les corps étrangers > 1 mm	Protection contre les dépote de poussière	Protection contre l'intrusion de poussière	
Résistance à l'eau (y)								
Code	0	1	2	3	4	5	6	7 (8)
Description du code	Sans protection	Protection contre les gouttes verticale	Protection contre les gouttes obliques (inclinaison max 15°)	Protection contre l'eau « en pluie»	Protection contre les éclabousse-ments	Protection contre les jets d'eau	Protection contre les paquettes d'eau	Protection contre l'immersion (permanente)

**\*\* : Classe d'isolement :**

Les bobinages des moteurs peuvent être fabriqués avec différents isollements selon la température maximale que peuvent supporter sans les endommager avec température ambiante maximale de 40 °C. L'indication de la classe d'isolement sur la plaque signalétique est donnée par une lettre :

**Y** = température maximale admissible de 90 °C.

**A** = température maximale admissible de 105 °C.

**E** = température maximale admissible de 120 °C.

**B** = température maximale admissible de 130 °C.

**F** = température maximale admissible de 155 °C.

**H** = température maximale admissible de 180 °C.

**C** = température maximale admissible de plus de 180 °C.




Généralement la plupart des moteurs utilisent la classe d'isolation **F** avec l'échauffement de classe **B**, ce qui correspond aux exigences industrielles les plus fréquentes, avec l'avantage au moteur une réserve thermique de 25 °C, ce qui permet d'augmenter le niveau de charge jusqu'à 12% sur des périodes limitées.


\*\*\* : Service

**Tableau I.2 : Services de fonctionnement**

Services de fonctionnement	<b>S1</b>	Service continu	Fonctionnement à charge constante pour atteindre l'équilibre thermique
	<b>S2</b>	Service temporaire	Fonctionnement à charge constante pendant un temps déterminé inférieur au temps de l'équilibre thermique suivi d'un repos suffisant pour rétablir l'égalité de température entre le moteur et l'air de refroidissement. OBSERVATION : ce service peut permettre une puissance utile supérieure à la puissance nominale.
	<b>S3</b>	Service intermittent	Répétition de cycles identiques comprenant chacun une période de fonctionnement à la charge constante et une période de repos : on considère que l'intensité de démarrage n'affecte pas réchauffement du moteur de façon significative. OBSERVATION : ce service peut permettre une puissance utile supérieure à la puissance nominale.
	<b>S4</b>	Service intermittent périodique	Identique au service S3 mais avec période de démarrage longue affectant suffisamment réchauffement du moteur. Le cycle compte une période à marche constante et une période de repos. Les cycles sont trop courts pour que l'équilibre thermique soit atteint.
	<b>S5</b>	Service intermittent périodique à démarrage et freinage électrique	Répétition de cycles identiques comprenant chacun une période de démarrage, une période de fonctionnement à charge constante, une période de freinage électrique rapide, une période de repos. Les cycles sont trop courts pour que l'équilibre thermique soit atteint.
	<b>S6</b>	Service ininterrompu périodique à charge intermittent	Répétition de cycles identiques comprenant chacun une période de fonctionnement à charge constante et une période à vide sans période de repos.
	<b>S7</b>	Service ininterrompu périodique à démarrage et freinage électrique	Répétition de cycles identiques comprenant chacun une période de démarrage, une période de fonctionnement à charge constante, une période de freinage électrique, pas de période de repos. Les cycles sont trop courts pour que l'équilibre thermique soit atteint.
	<b>S8</b>	Service ininterrompu périodique à changement de vitesse	Répétition de cycles périodiques comprenant chacun une période de fonctionnement à charge constante suivi de période de fonctionnement à d'autres charges constantes et à d'autres vitesses de rotation. Les cycles sont trop courts pour que l'équilibre thermique soit atteint.
	<b>S9</b>	Service à changement de vitesse non périodique	Service dans lequel la charge et la vitesse varient en fonction de l'utilisation. Ce service permet de tenir compte des surcharges importantes

**N.B :** l'équilibre thermique : état atteint quand les températures observées des diverses parties de la machine ne varient pas de plus de 2 °C par heure.

 <b>LEROY SOMER</b> IEC 34.1.1990    MADE IN FRANCE					
 <b>MOTEUR A COURANT CONTINU</b> <b>DIRECT CURRENT MOTOR</b> 					
TYPE: LSK 1604 S 02    N° 700000/10    9/1992    M 249 kg					
Classe / Ins class    H    IM 1001    IP 23    IC 06					
M <sub>nom</sub> / Rated torque	301 N.m	Altit. 1000 m	Temp. 40 °C		
	<b>kW</b>	<b>min<sup>-1</sup></b>	<b>V</b>	<b>A</b>	<b>V</b>
Nom./Rat.	36,3	1150	440	95,5	360
	3,63	115	44	9,55	360
	36,3	1720	440	95,5	240
T système peinture: I    Induit / Arm.    Excit. / Field					
○ Service / Duty S1    DE 6312 2RS C3    NDE 6312 2RS C3 ○					

 <b>ELPROM</b> TROYAN BULGARIA			
ASYN. MOTOR <b>1</b> Ph <b>50</b> Hz Ip44 cl.kl E			
TYPE <b>EOPK-800-4</b>			
<b>0,37</b>	<b>KW</b>	<b>0,50</b>	<b>HP . P S . Ch</b>
	<b>220</b>	<b>V</b>	<b>4,4</b> <b>A</b>
<b>0,66</b>	<b>COS φ</b>	<b>90</b>	<b>μF</b> <b>280</b> <b>V</b>
<b>1425</b> <b>Rpm.U/min.t/min</b>			
<b>15</b>	<b>Kg</b>	<b>N° 5 1 8 1 6 9 0</b>	

**Figure I.2 : Autres modèles des plaques signalétiques**

## **I.2/ Mouvement de rotation**

Une des équations de base des moteurs électriques (Continu ou alternatif) décrit le rapport entre le moment d'inertie, la vitesse angulaire et les couples. Cette équation est la suivante :

$$\frac{d}{dt}(J.\Omega) = J.\frac{d\Omega}{dt} + \Omega.\frac{dJ}{dt} = C_m - C_r - \beta.\Omega$$

Avec :

$C_m$  : couple moteur ;  $C_r$  : couple résistant ou couple de charge ( $C_{ch}$ ) ;  $\Omega$  : vitesse de rotation

$J$  : moment d'inertie de la charge ;  $\beta$  : coefficient de frottement ;  $t$  : temps

La formule est cependant souvent donnée de sorte que le moment d'inertie est supposé constant :

$$J.\frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r - \beta.\Omega$$

Lorsque la vitesse du moteur varie, le couple moteur est différent de couple résistant. On peut considérer que le couple moteur est constitué d'une composante dynamique et d'une composante de charge :

$$C_m = C_{dyn} + C_r$$

Si la vitesse et le moment d'inertie sont constants, la composante dynamique est nulle.

La composante de couple dynamique produite par l'accélération/décélération d'un moment d'inertie constant :

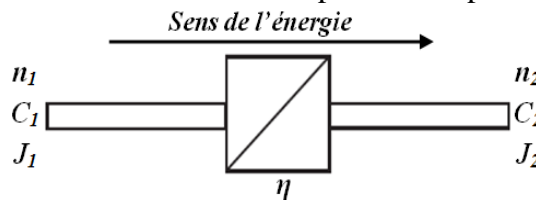
$$C_{dyn,\Omega} = J.\frac{\Delta\Omega}{\Delta t}$$

La composante de couple dynamique produite par un moment d'inertie variable à vitesse constante :

$$C_{dyn,J} = \Omega.\frac{\Delta J}{\Delta t}$$

### **I.2-1/ Réducteur**

Les réducteurs sont des éléments typiques des systèmes d'entraînement. Pour calculer le couple moteur et la plage de vitesse, les réducteurs doivent être pris en compte :



**Figure I.3 : Réducteur de vitesse avec un rapport de réduction  $n_1:n_2$**

La relation entre le côté charge et le côté moteur est donnée par les équations suivantes :

$$C_1 = \frac{C_2}{\eta} \cdot \frac{n_2}{n_1}$$

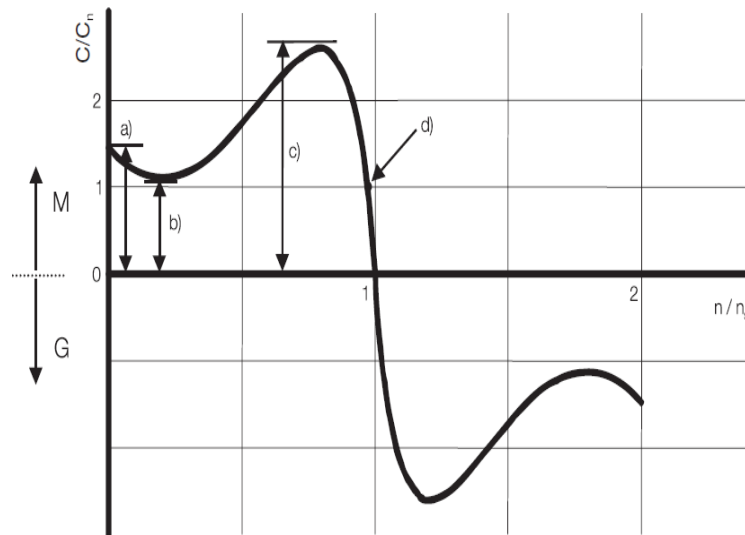
$$J_1 = J_2 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta}$$

### **I.2-2/ Caractéristique couple-vitesse d'un MAS**

Cette caractéristique est obtenue par un démarrage direct sur le réseau, les points signification sont :

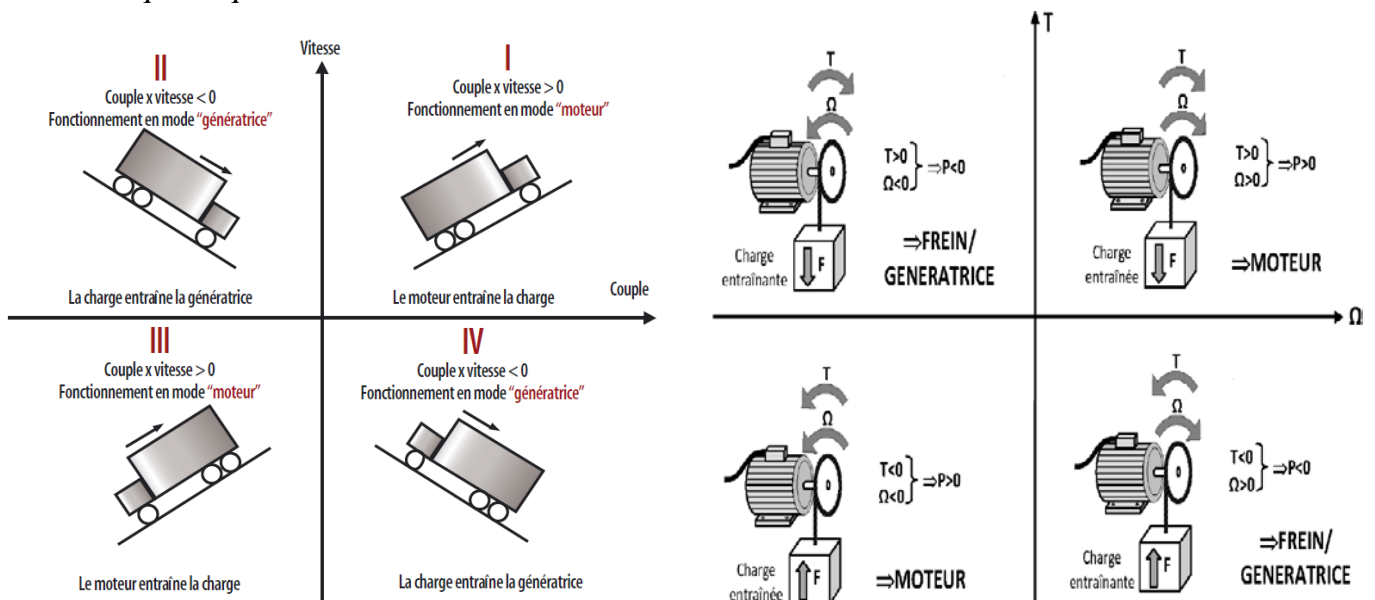
**a** : Couple de démarrage, **b** : Couple minimum, **c** : Couple maximum, **d** : Couple nominal



**Figure I.4 : Courbe type couple-vitesse**

### **I.2-3/ Quadrants de fonctionnement**

Les moteurs électriques (DC ou AC) peuvent en général fonctionner selon plusieurs modes, qui se distinguent par le sens de la vitesse appliquée au moteur et sa relation par rapport à la charge. Pour la vitesse, il y a deux sens possibles : horaire ou antihoraire, positive ou négative, marche avant ou marche arrière. Pour ce qui est de la relation à la charge, il y a là aussi deux cas à considérer, selon que le moteur fournit un couple à la charge ou qu'il reçoit un couple de la charge : dans le premier cas on parle de fonctionnement en mode moteur et dans le second cas le moteur fonctionne en mode génératrice ou frein. En combinant les deux sens de rotation et les deux régimes de fonctionnement, on définit quatre quadrants de fonctionnement :



**Figure I.5 : Quadrants de fonctionnement**

- Quadrant **I**, la vitesse et le couple sont positifs
- Quadrant **II**, la vitesse est positive, le couple est négatif
- Quadrant **III**, la vitesse et le couple sont négatifs
- Quadrant **IV**, la vitesse est négative, le couple est positif

**N.B** : pour fonctionner un moteur dans deux quadrants ou plus il est nécessaire d'alimenter le moteur à travers un variateur. Par exemple, quand on parle de vitesse positive ou négative, il faut que le changement de sens soit effectué électroniquement par le variateur, si ce changement est effectué mécaniquement par inversion des phases, après que le moteur soit passé par une phase d'arrêt. On considère que le moteur que tourne dans un seul sens et il ne peut donc fonctionner, au mieux, que dans un ou deux quadrants.

- **Fonctionnement dans un quadrant :**

C'est le cas du quadrant **I ou II**. Dans le quadrant **I**, la vitesse et le couple sont positifs, c.à.d. que le moteur ne tourne que dans un seul sens et qu'il fonctionne uniquement en régime moteur. Ce mode correspond à toutes les applications où l'on cherche à augmenter la vitesse d'une charge présentant une inertie. Les pompes, bon nombre de ventilateurs, les perceuses électriques, les escaliers roulants ou les convoyeurs montants, présentent un mode de fonctionnement dans le quadrant **I**. Dans le quadrant **II**, la vitesse est positive mais le couple est négatif, autrement dit le moteur ne tourne que dans un sens et la charge entraîne le moteur. Les alternateurs de voiture, les éoliennes constituent des exemples de fonctionnement dans le quadrant **II**.

- **Fonctionnement dans deux quadrants :**

C'est le cas des quadrants **I et II**, c.à.d. qui tournent uniquement dans un sens mais qui peuvent fonctionner en mode moteur ou en mode génératrice : les laminoirs et les dérouleurs.

Il existe également des machines fonctionnant dans les quadrants **I et III**, c.à.d. qui fonctionnent uniquement en mode moteur mais dans les deux sens. Ce sont par exemple les visseuses/dévisseuses électroniques et les portails automatiques.

Il existe aussi des cas de machines fonctionnant dans les quadrants **I et IV**, comme les applications de levage/descente de charges. Durant l'opération de montée, la vitesse et le couple sont positifs, durant l'opération de descente la vitesse est négative et le couple est positif.

- **Fonctionnement dans quatre quadrants :**

C'est le cas des variateurs qui peuvent actionner des moteurs dans les deux sens, et récupérer l'énergie de freinage.

### ***1.3/ Moteurs électriques et les critères de choix***

#### ***1.3-1/ Moteurs électriques***

##### ***1.3-1-1/ Moteurs asynchrones (AS) pour des applications spécifiques***

###### ***1.3-1-1-a/ Moteurs AS anti-déflagrants***

Moteurs asynchrones triphasés antidéflagrants à cage d'écureuil, ses utilisations sont : commandes industrielles dans des environnements à potentiel explosif dans l'industrie chimique et pétrochimique.

###### ***1.3-1-1-b/ Moteurs AS anti-déflagrants pour mine***

Moteurs asynchrones triphasés avec cage d'écureuil antidéflagrantes pour min, sont des appareils de groupe. Ses utilisations : commandes industrielles dans le souterrain des exploitations minières où se produisent des dégagements des gaz méthane et de poudre de charbon. Ces appareils sont destinés à être hors tension en présence d'une atmosphère explosive. ***Moteurs AS anti-déflagrants avec frein***  
Utilisation : entraînements industriels dans des environnements potentiellement explosifs où l'arrêt (Le freinage) rapide et précise des moteurs est nécessaire.

###### ***1.3-1-1-c/ Moteurs AS anti-étincelles***

Sont des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil à sécurité renforcée, ne produisant pas d'étincelles. Ils sont destinés pour des applications dans un environnement dangereux, où des étincelles ou des températures élevées risqueraient d'enflammer des gaz explosifs, des vapeurs ou de la poussière.

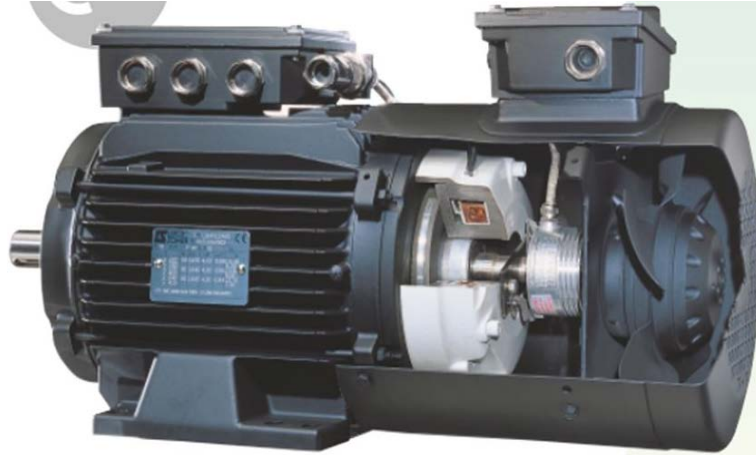
###### ***1.3-1-1-d/ Moteurs électriques pour installations de lavage***

Sont des moteurs asynchrones à rotor bobine dans la gamme triphasé ou monophasé, soit auto-ventilée ou servo-ventilée avec frein électromagnétique. Ces moteurs ne sont pas destinés à fonctionner dans des milieux à danger d'explosion ou dans des milieux chimiques agressifs. Le frein représente un sous ensemble indépendant, l'ensemble entier représentant une construction intégrée. Le frein est alimenté à courant continu ou alternatif, la source d'alimentation peut être du moteur ou d'une source séparée. Deux principes d'action des freins :

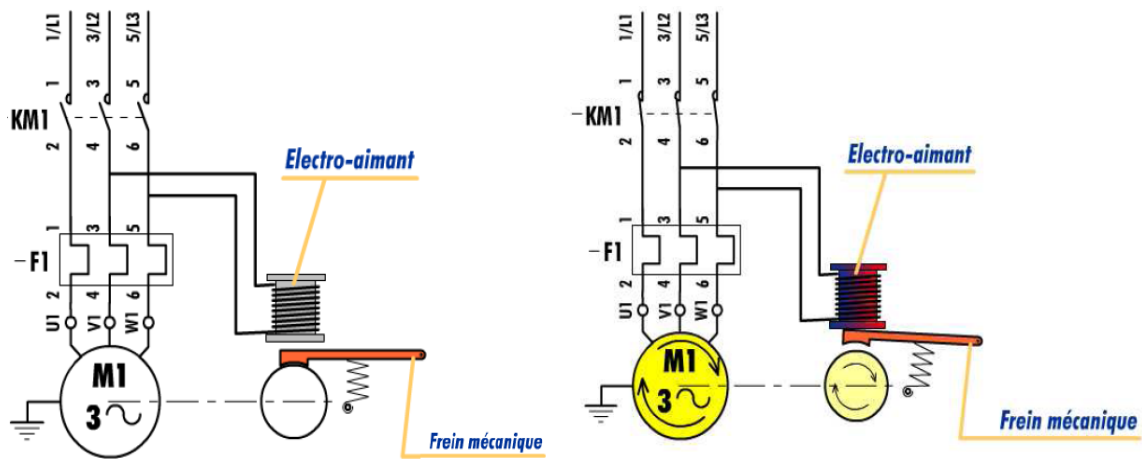
- ***Freins à action positive*** : le frein se déclenche quand sa bobine est sous tension, tandis que le moteur est libre si elle n'est pas alimentée.

- ***Frein à action négatif*** : qui se déclenche dès qu'il n'est plus alimenté; quand l'alimentation s'interrompt, la bobine d'excitation n'étant plus alimentée donc n'exerce plus la force magnétique nécessaire pour retenir l'armature mobile qui est poussée par le ressort de pression. Ce type de frein satisfait aux exigences fondamentales de sécurité.





**Figure I.6 : Vue éclatée d'un moteur-frein**



**Figure I.7 : Schéma de principe**

### **I.3-1-1-e/ Moteurs AS Submersibles**

Ces moteurs sont destinés à piloter les pompes submersibles, montées dans des puits profonds et à pomper de l'eau. Les unités de pompe à moteur fonctionnent uniquement en position verticale.



**Figure I.8 : Unité moteur-pompe submersible**

### ***1.3-1-2/ Moteurs synchrones***

Les moteurs synchrones fonctionnent à la vitesse de synchronisme sans baisse de vitesse sur toute leur gamme de charges. On devra opter pour ces moteurs, lorsqu'une vitesse précise et constante est nécessaire. Ces moteurs sont destinés généralement pour la production de l'énergie dans les centrales électriques, de plus, ils sont utilisés en tant que compensateur synchrone pour compenser l'énergie réactive dans les usines.

### ***1.3-1-3/ Moteurs à courant continu***

Leurs applications : la commande principale des machines à outils ou la commande d'autres équipements à régime de fonctionnement caractérisé par des domaines larges de réglage de nombre de tours, de l'accélération et à frein rapides.

### ***1.3-2/ Différents types de charge de moteurs***

Il existe trois types de charges de moteurs industriels :

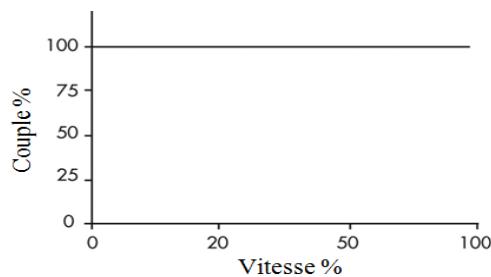
- ✓ ***Couple*** Constant et ***Puissance*** Variable
- ✓ ***Puissance*** Constante et ***Couple*** Variable
- ✓ ***Couple*** Variable et ***Puissance*** Variable

La relation entre ces grandeurs est la suivante :

$$P_u = \Omega_n \times C_u \quad (P_u : \text{puissance [W]}, \Omega : \text{vitesse [rad/s]}, C_u : \text{couple [N.m]})$$

#### ***1.3-2-1/ Charge à couple constant et puissance variable***

Elle est une charge caractérisée par un couple qui reste constant quelle que soit la vitesse. Il s'ensuit que la puissance nécessaire est directement proportionnelle à la vitesse de fonctionnement de l'application et varie directement avec cette vitesse.



***Figure I.9 : Couple en fonction de la vitesse***

Parmi les exemples, on peut citer : les convoyeurs (Transporteurs à bande ou les transporteurs à rouleaux) ; les mélangeurs et les ascenseurs.



***Convoyeur à bande***

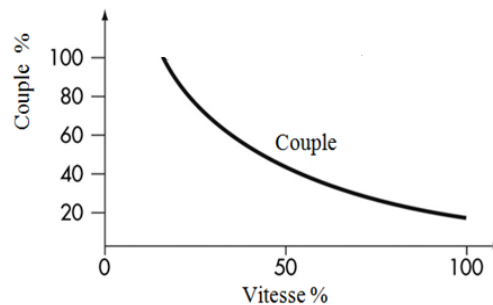
***Figure I.10 : Modèles de convoyeurs***

***Convoyeur à rouleaux***

### ***1.3-2-2/ Charge à puissance constante et couple variable***

Le couple varie inversement avec la vitesse, à mesure que le couple augmente la vitesse doit décroître pour maintenir une puissance constante de la charge.

Des exemples de machine présentant ce type de charge : les tours, les fraiseuses ou les perceuses qui tournent à faible vitesse pour de lourds travaux et à vitesse élevée pour des travaux légers.

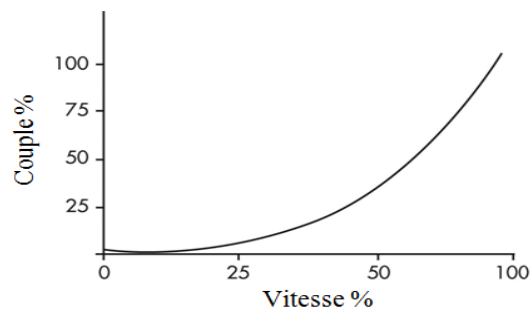


***Figure I.11 : Couple en fonction de la vitesse***

Un autre exemple dans l'industrie du papier et du textile, c'est les machines enrouleuses/dérouleuses. La vitesse du matériau reste constante, le diamètre du rouleau augmente, la charge augmente donc le couple augmente, ce qui signifie la puissance ne change pas.

### ***1.3-2-3/ Charge à couple variable et puissance variable***

Des exemples sont : les ventilateurs, soufflantes, pompes centrifuges et agitateurs. Dans ces applications, le couple varie directement avec le carré de la vitesse donc la puissance varie directement avec le cube de la vitesse, cela signifie que à mi-vitesse, la puissance requise est d'environ un huitième du maximum nominal.



***Figure I.12 : Couple en fonction de la vitesse***

### ***1.3-3/ Comment faire le choix d'un moteur électrique ?***

Le choix final se portera sur un moteur qui est disponible chez un fabricant et qui répond aux spécifications exigées ou les dépasse.

✓ Le type d'application oriente le choix de la technologie. Si le moteur doit fonctionner en continu, avec peu de changements de vitesse, un moteur asynchrone est suffisant. Pour des applications dynamiques, un moteur synchrone est plus indiqué. Dans certains cas, les deux technologies peuvent convenir donc le choix se fait alors, selon un compromis entre le coût et la précision.

✓ Le mouvement voulu détermine la puissance et le couple à déployer. Quelles doivent être la force et la vitesse en sortie du moteur ? Le mouvement doit-il être linéaire ou rotatif ?

✓ L'environnement définit les caractéristiques d'encombrement et de solidité. À puissance égale, la taille des moteurs est variable. Pour les environnements difficiles, il existe des carcasses renforcées, étanches, faciles à nettoyer, adaptées aux risques de chocs, de projections ou d'encrassement.

✓ Pour qu'un moteur puisse entraîner une charge de façon appropriée, il faut qu'il produise un couple suffisant pour accélérer cette charge depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse de fonctionnement, et qu'il fournisse une puissance répondant à toutes les demandes éventuelles sans dépasser ses limites théoriques. Par exemple, un moteur ayant un couple de démarrage insuffisant pour la charge qui lui est raccordée va ou bien ne pas tourner, ou bien être lent à l'accélération.

Le courant de démarrage risque de se prolonger trop longtemps et de faire déclencher alors la protection contre la surcharge. Pendant qu'il est en fonctionnement, un moteur sous-dimensionné peut décrocher, si sa charge augmente subitement. Les moteurs devront être dimensionnés pour correspondre aux exigences en matière de vitesse de fonctionnement et de couple de la charge.

Si l'on envisage de remplacer un moteur existant, l'analyse de la puissance absorbée par le moteur sur une certaine période de temps va déterminer son dimensionnement optimal.

Pour des moteurs entraînant des charges variables bien définies et qui se répètent, la puissance du moteur est déterminée, à partir de la moyenne quadratique (Valeur efficace) de la puissance.

La puissance efficace est calculée par la formule suivante :

$$P_{eff} = \sqrt{\frac{\sum P^2 \cdot t}{\sum t}}$$

Exemple :

Intervalle du temps (s)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60
Puissance (W)	3680	5152	736	6624	736	5888

En appliquant la formule de la puissance efficace on trouve :  $P_{eff} = 4468 \text{ W}$

Donc un moteur de 4,4 kW n'existant pas sur le marché, le choix approprié sera celui d'un moteur de la puissance assignée supérieure la plus proche. Donc soit de 5,5 kW.

✓ Fréquence des démarrages et arrêts : dans le cas de démarrages fréquents, s'assurer que la température des enroulements et du circuit magnétique n'est pas supérieure aux caractéristiques assignées du moteur.

✓ Le facteur de surcharge d'un moteur représente sa capacité à dépasser de façon continue sa puissance mécanique assignée. Un facteur de surcharge supérieur à 1 permet de disposer d'une marge de demande de puissance de pointe sans qu'il soit nécessaire d'acquérir un moteur plus puissant.

À une température ambiante de 40 °C, le facteur de surcharge normalisé pour les moteurs d'une puissance intégrale de 1 kW à 150 kW est de 1,15.

On peut définir des facteurs de surcharge pour des températures plus élevées ou des conditions d'altitude supérieure à 1000 m.

**I.3-3-1/ Choix d'un moteur asynchrone**

✓ Tension du réseau de distribution électrique :

Les moteurs à induction triphasés sont prévus pour fonctionner de façon satisfaisante sous des variations de tension de  $\pm 10\%$ . Le Tableau ci-dessous montre les effets d'une variation de tension de 10% sur un moteur à induction à pleine charge.

**Tableau I.3 : Effets de la variation de la tension d'alimentation sur les grandeurs du moteur**

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

On doit éviter d'utiliser un moteur dont la tension d'alimentation n'est pas normalisée ou n'est pas appropriée à celle du réseau. Par exemple, un moteur indiquant une tension de 440 V sur sa plaque signalétique est parfois raccordé à un réseau 480 V. Même si la tension maximale permise pour ce moteur est de 484 V ( $110\% \times 440$ ), on remarque bien qu'il n'existe aucune marge pour une hausse éventuelle de la tension d'alimentation. Par exemple, l'entreprise de distribution d'électricité peut très bien fournir une tension de 500 V et rester dans les tolérances acceptables ( $480 \pm 48$  V) étant donné que le moteur fonctionne déjà à sa limite de tension maximale admissible. On devra utiliser un moteur de tension appropriée ou bien installer un transformateur délivrant la tension voulue.

Pour qu'un moteur fonctionne adéquatement, le déséquilibre des tensions de phase doit être inférieur à 1%. Les conséquences d'un déséquilibre des tensions sont : la diminution du couple utile et l'augmentation des pertes.

Les déséquilibres se traduisent par une composante inverse qui génère de forts courants rotoriques, provoquant un échauffement très important du rotor et impliquant un sur échauffement du moteur.

**Tableau I.4 : Influence d'un déséquilibre des tensions sur les caractéristiques de fonctionnement d'un MAS**

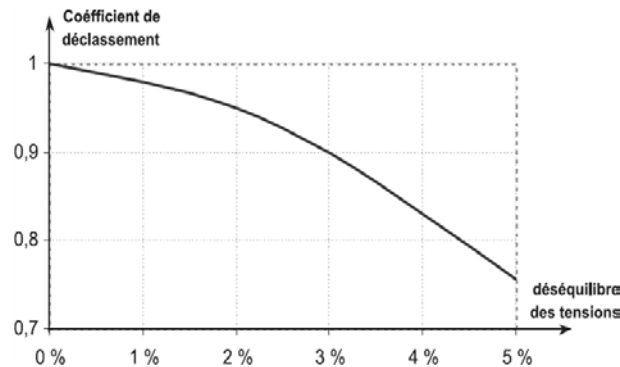
<b>Valeur du déséquilibre (%)</b>	0000000	0002000	003,500	0005000
<b>Courant statorique (A)</b>	$I_n$	$1,01.I_n$	$1,04.I_n$	$1,075.I_n$
<b>Augmentation des pertes (%)</b>	0	4	12,5	25
<b>Échauffement (%)</b>	100	105	114	128

Le déséquilibre des tensions se calcule comme suit :

$$\text{déséquilibre des tensions} = \frac{\text{écart maximal par rapport à la moyenne}}{\text{tension moyenne}} \%$$

Exemple :  $V_1 = 604V$ ,  $V_2 = 585V$ ,  $V_3 = 605V$ , donc la tension moyenne est de **598V**. L'écart maximal par rapport à la moyenne est de **13V**. Le déséquilibre est de  $(13/598) = 2,2\%$ .

Si un moteur doit fonctionner avec un déséquilibre des tensions supérieur à 1 %, il devra être déclassé.



**Figure I.13 : Déclassement d'un moteur en fonction d'un déséquilibre de tension**

On ne devrait pas faire fonctionner un moteur si le déséquilibre de phases est supérieur à 5 %.

✓ En fonctionnement normal, l'écart de fréquence admissible d'un moteur peut atteindre 5 %. En principe, la fréquence ne devrait pas poser de problème lorsque le réseau d'alimentation est celui d'une entreprise d'électricité.

#### ***1.3-3-2/ Choix d'un moteur synchrone***

C'est en raison de ses caractéristiques de fonctionnement, qu'un moteur synchrone est parfois choisi au lieu d'un moteur à induction. Les moteurs synchrones sont d'un coût nettement plus élevé et ne sont donc utilisés que si leur choix se justifie sur la base des facteurs ci-après :

##### ***1.3-3-2-a/ Vitesse***

Les moteurs synchrones fonctionnent à la vitesse de synchronisme sans baisse de vitesse sur toute leur gamme de charges. On devra opter pour ces moteurs lorsqu'une vitesse précise et constante est nécessaire.

##### ***1.3-3-2-b/ Correction du facteur de puissance***

Les moteurs synchrones peuvent produire de la puissance réactive pour corriger le faible facteur de puissance du réseau d'alimentation, tout en produisant une puissance mécanique. Lorsqu'ils fournissent de la puissance réactive, on dit que les moteurs synchrones fonctionnent avec un facteur de puissance capacitif.

##### ***1.3-3-2-c/ Coûts d'exploitation moins élevés***

Les moteurs synchrones ont souvent un rendement énergétique supérieur à celui des moteurs à induction, et plus particulièrement dans les gammes de puissances élevées.

#### ***1.3-3-3/ Choix d'un moteur à courant continu***

On choisit souvent un MCC lors qu'une régulation précise de la vitesse est nécessaire, car le contrôle de la vitesse d'un MCC est plus simple, moins coûteux et couvre une gamme de vitesses plus étendue que les systèmes de commande de vitesse des moteurs à courant alternatif.

On recherche souvent les MCC lorsque l'on souhaite un couple de démarrage élevé et/ou un sur couple élevé. Ces moteurs conviennent par ailleurs, aux équipements alimentés par piles ou accumulateurs.

#### ***1.3-3-4/ Bilan des puissances***

Les pertes du moteur consomment de l'énergie électrique, mais ne contribuent pas à la puissance mécanique utile qu'il fournit. Les pertes sont de cinq types :

- ***Les pertes dans le fer*** : comprennent les pertes par hystérésis (Énergie nécessaire à la magnétisation du circuit magnétique) ainsi que les pertes par courants de Foucault dans le circuit magnétique du stator. Les pertes dans le fer représentent environ 25% des pertes totales.
- ***Les pertes dans le stator*** : sont dues à l'effet d'échauffement (Effet Joule) du courant qui circule dans la résistance des enroulements du stator, elles représentent quelque 35% des pertes totales.
- ***Les pertes dans le rotor*** : sont attribuables à l'effet d'échauffement (Effet Joule) dans le rotor, elles représentent environ 25% des pertes totales.
- ***Les pertes mécaniques*** : comprennent les frottements dans les paliers et la charge du ventilateur de refroidissement du moteur. Elles représentent environ 5% des pertes totales.
- ***Pertes supplémentaires ou parasites***

#### ***1.3-3-5/ Rendement d'un moteur***

Les moteurs électriques sont en général des appareils efficaces, mais grâce aux matériaux améliorés et aux nouvelles technologies, ils peuvent fonctionner avec encore moins de pertes. Ces moteurs sont alors sous le nom de moteurs à haut rendement énergétique ou moteurs éconergétiques, vu qu'ils fournissent la même puissance mécanique tout en absorbant moins d'énergie électrique qu'un moteur standard. Le rendement d'un moteur est le rapport de la puissance mécanique qu'il fournit à la puissance électrique qu'il absorbe et s'exprime généralement en pourcentage. Les classes de rendement sont :  
- EFF3 moteurs à faible rendement - EFF2 moteurs à rendement augmenté - EFF1 moteurs à haut rendement.

La nouvelle classification des rendements :- IE1 moteurs à faible rendement - IE2 moteurs à rendement augmenté - IE3 moteurs à haut rendement - IE4 moteurs à très haut rendement

#### ***1.3-4/ Moteurs sur mesure***

Les gammes de moteurs standards des fabricants offrent des modèles qui conviennent bien à la plupart des applications. Les moteurs standards sont moins coûteux, leur technique est éprouvée et leurs délais de livraison sont plus courts. Il est toutefois possible, là où un moteur standard ne peut convenir, donc il est nécessaire de commander des moteurs avec d'illimitées variantes qui s'adaptent à certaines applications. Chaque fabricant de moteurs est en mesure de fournir des informations sur les délais d'approvisionnement et les prix des moteurs spéciaux.



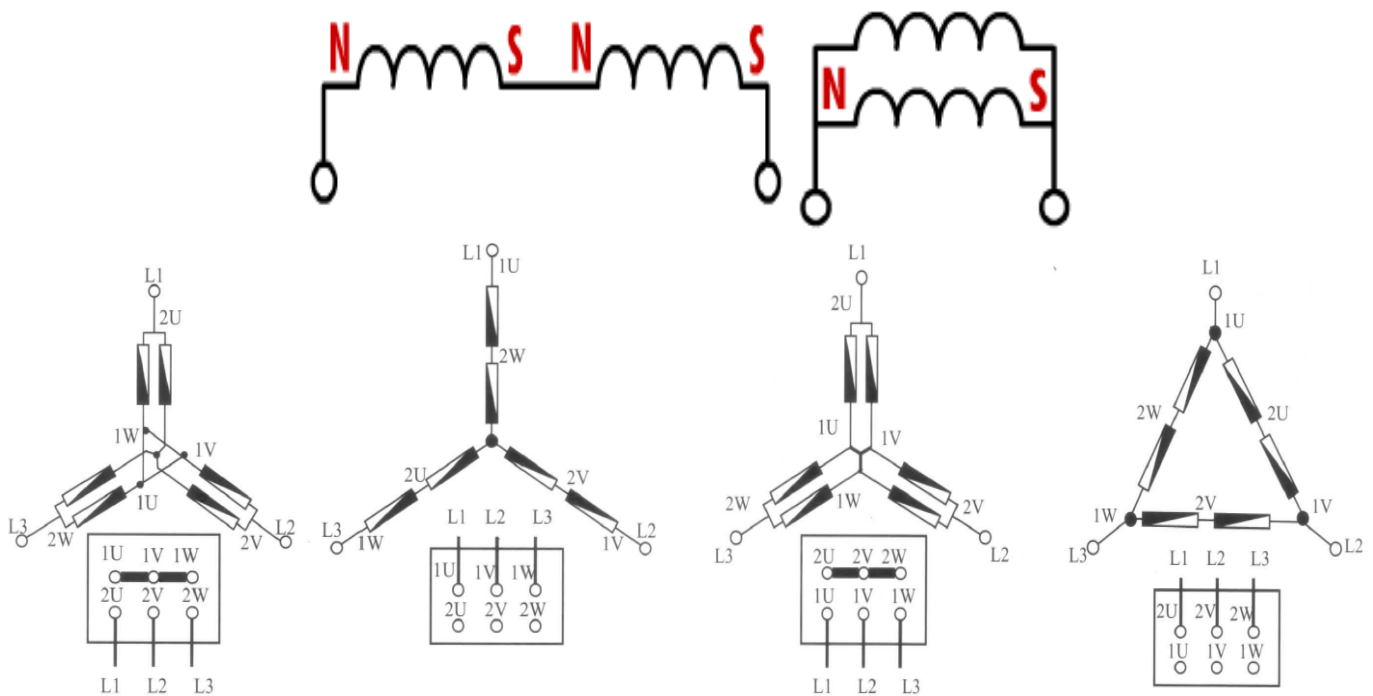
#### **I.4/ Moteur asynchrone multi vitesse**

Il est appelé moteur à deux vitesses à couplage Dahlander. Le moteur Dahlander dispose de deux vitesses de rotation par couplage de pôles ou couplage d'enroulement, c'est un moteur qui possède un seul enroulement triphasé et dont le rapport de vitesse est de un à deux, les vitesses les plus courantes sont 1500/3000 et 750/1500.

Il possède deux bobinages par phases que l'on peut coupler en parallèle, c.à.d. une paire de pôles ou en série donc deux paires de pôles :

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 deux.

En associant les deux bobinages en parallèle, leurs actions vont se superposer et ils se comporteront comme une seule bobine, donc une paire de pôles. Le moteur tournera à sa vitesse maximale.



*Couplage Dahlander étoile indépendante – étoile série*

*Couplage Dahlander étoile parallèle – triangle série*

**Figure I.14 : Bobinage du moteur Dahlander**

On trouve également des moteurs asynchrones à trois vitesses :

- Deux vitesses dans un rapport de un à deux par un bobinage de type Dahlander ;
- Une troisième vitesse plus faible que les deux autres, est obtenue par un bobinage spécifique, logé dans les mêmes encoches.

De tels moteurs sont souvent utilisés pour des engins de levage comme : les grues et les ponts roulants.

#### **I.5/ Recommandations générales**

➤ Au moment de l'installation d'un nouveau moteur ou du remplacement d'un moteur défectueux, il est toujours recommandé d'étudier l'option d'un moteur plus efficace dont la puissance est bien ajustée en fonction du travail à accomplir. Par contre, il est rarement économique de remplacer un moteur en bon état par un moteur plus efficace.



➤ Le démarrage des moteurs électriques entraînent une chute de tension sur le réseau d'alimentation résultant de l'effet entraîné sur l'impédance du circuit par leurs courants d'appel élevés; cette chute de tension se manifeste sous la forme d'un papillotement dans les circuits d'éclairage. À mesure que le moteur prend de la vitesse, le courant retombe à des valeurs de fonctionnement normales et la tension du réseau se rétablit. Ce papillotement devient inacceptable lorsque l'amplitude de la chute de tension et la fréquence d'apparition dépassent certains seuils.

Pour corriger ce problème, on peut alimenter les circuits d'éclairage par une ligne séparée.

➤ Pour créer leurs champs électromagnétiques, les moteurs asynchrones doivent absorber une puissance réactive, cette puissance ne produit aucun travail mécanique. La composante réactive demeure sensiblement constante, quelle que soit la charge du moteur faible ou forte. De ce fait, les moteurs à faible charge ont un facteur de puissance plus faible qu'un moteur à pleine charge.

Si vous êtes facturés en kVA, vous payez pour la composante réactive de la puissance, dont vous ne tirez aucun travail utile. Afin d'améliorer leur facteur de puissance, les clients industriels installent des condensateurs destinés à annuler la composante inductive des charges de moteurs. Par contre, une capacitance supérieure à l'inductance va se traduire par un facteur de puissance capacitif qui risque d'entraîner des problèmes de surtension et d'harmoniques. Pour éviter cette situation, les condensateurs installés à l'entrée du branchement doivent être commutés en fonction des besoins.

## Introduction

Les pompes, ventilateurs et compresseurs, destinés à véhiculer des fluides ou des gaz, ont pour objet de transférer de l'énergie mécanique aux fluides qui les traversent, en vue d'augmenter la pression et/ou le débit.

### II.1/ Pompes

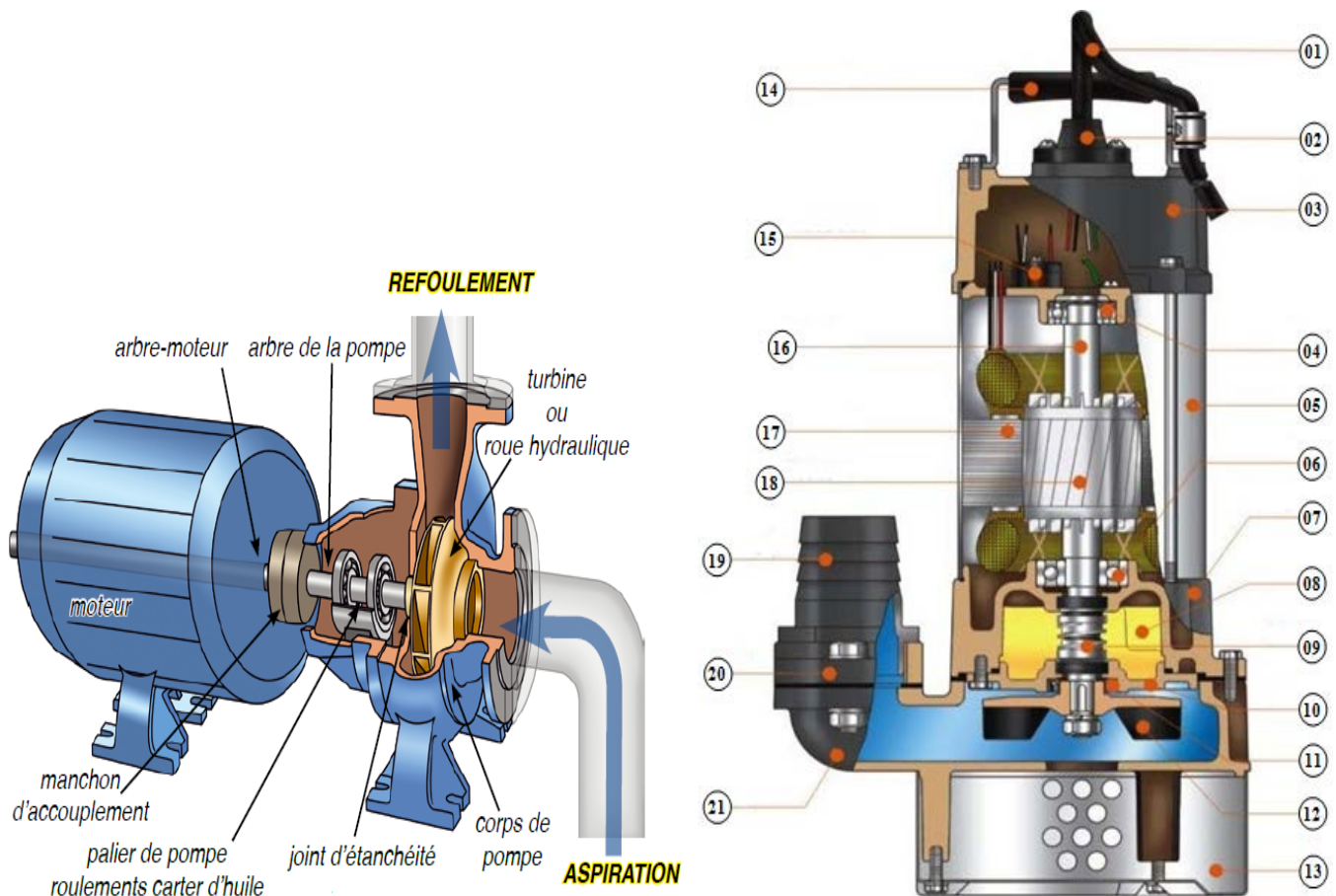
**Les circulateurs** : sont les équipements dont l'axe d'entrée et l'axe de sortie sont identiques. En général, ils sont réservés aux petites et moyennes puissances.

**Les pompes** : sont les équipements dont l'axe d'entrée et l'axe de sortie sont différents. En général, ils sont réservés aux gros débits. On distingue principalement, deux types de pompes : centrifuges et volumétriques.

#### II.1-1/ Pompes centrifuges

Le principe de base des pompes centrifuges repose sur la mise en rotation du fluide à pomper, en le faisant circuler dans une roue tournante à une vitesse plus ou moins élevée. Le fluide est admis au centre de la roue avec une pression dite pression d'aspiration. Lors de sa mise en rotation et de son déplacement vers la périphérie de la roue, sa vitesse et son énergie cinétique augmentent, à la périphérie de la roue le fluide est canalisé vers la tuyauterie de refoulement.

##### II.1-1-1/ Constitution



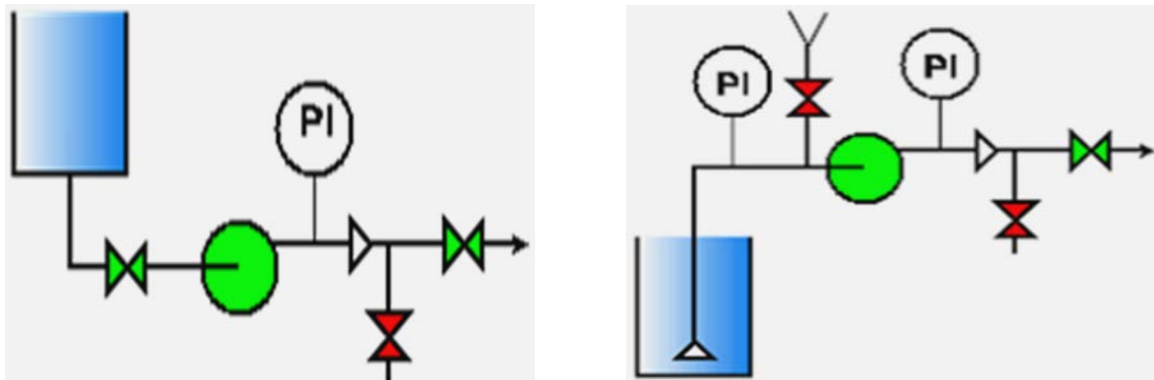
**Tableau II.1 : Désignation des éléments d'une pompe submersible**

Nº	Désignation	Nº	Désignation	Nº	Désignation
01	Câble d'alimentation	08	Lubrifiant	15	Coupeur automatique
02	Base de câble étanche	09	Joint mécanique	16	Arbre
03	Cache supérieur	10	Support de joint mécanique	17	Stator
04	Palier supérieur	11	Joint d'huile	18	Rotor
05	Corps de moteur	12	Roue	19	Tuyau de refoulement
06	Palier inférieur	13	Filtre à tamis	20	Bride de fixation
07	Support du palier	14	Poignée	21	Enveloppe de tuyau

### II.1-1-2/ Différents montages

**II.1-1-2-a/** Une pompe est dite **montée en charge** si, lorsque le circuit est correctement disposé, elle se remplit toute seule du produit à pomper, c.à.d. le bac d'aspiration est situé au dessus de la pompe.

**II.1-1-2-b/** Une pompe est dite **montée en aspiration** si son bac d'alimentation est situé en dessous du niveau de la pompe. Si elle est initialement vide de tout produit, elle doit donc se remplir de liquide avant de démarrer. Dans le cas où elle se remplit toute seule après démarrage, la pompe est dite auto-amorçante.



**Figure II.2 : Montages d'une pompe centrifuge**



**Figure II.3 : Autres montages**

### **II.1-1-2-c/ Amorçage**

Pour fonctionner, une pompe centrifuge doit être initialement remplie de liquide. En effet, la rotation de la roue dans le vide (Air à une très faible masse volumique), donne une pression dynamique trop faible pour créer une dépression suffisante pour aspirer le liquide.

En pratique, avec le montage en charge, la pompe se remplit naturellement de fluide et n'a pas donc besoin d'être "amorçée".

Le montage en aspiration, à l'inverse nécessite d'amorcer la pompe, c.à.d. de la remplir de liquide avant de la démarrer. Il convient également d'empêcher sa vidange en cas d'arrêt, par la présence d'un clapet à l'aspiration.

**N.B :** le débit pompé est essentiellement fonction :

- De la différence de pression entre aspiration et refoulement ;
- De la vitesse de rotation de la roue ;
- Du diamètre de la roue donc la vitesse périphérique.

### **II.1-1-3/ Courbe caractéristique de la pompe**

Selon l'équation de Bernoulli simplifiée, pour une pompe centrifuge et si les conduites d'aspiration et de refoulement ont le même diamètre, on peut écrire :

$$P_{ref} - P_{asp} = \Delta P_{pompe} = \rho \cdot g \cdot H - \Delta P_{f\,pompe}$$

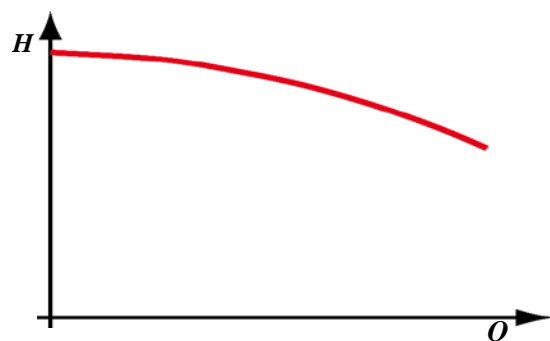
Avec :  $P_{ref}$  : pression au refoulement,  $P_{asp}$  : pression à l'aspiration,

$\rho$  : masse volumique,  $g$  : gravité terrestre (9.81 m/s<sup>2</sup>),

$\Delta P_{f\,pompe}$  : perte de charge de la pompe, sont dues principalement au frottement, du fluide dans la pompe.

$H$  ou  $H_{mt}$  : hauteur ou hauteur manométrique totale

Les pertes de charge augmentent lorsque le débit augmente, donc la courbe caractéristique de la pompe est de la forme suivante :



**Figure II.4 : Courbe caractéristique de la pompe**

### **II.1-1-4/ Courbe caractéristique d'un circuit ou réseau hydraulique**

La courbe caractéristique du réseau hydraulique comporte :

- Une composante statique, liée à une hauteur géométrique indépendante du débit (Composante nulle si le réseau est fermé).
- Une composante qui prend en compte les pertes de charge provoquées par le frottement dans la tuyauterie.

Dans le cas simple d'un réseau, constitué d'un bassin d'alimentation et d'un réservoir, la courbe du réseau est exprimée de façon générale par la relation suivante :

$$H = h_{géo} + \lambda \cdot \frac{8 \cdot L_{Tot}}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \cdot Q^2 = h_{géo} + K \cdot Q^2$$

Avec :  $h_{géo}$  représente la différence d'altitude,  $L_{Tot}$  : représente la longueur équivalente totale des conduites d'aspiration et de refoulement ( $L_{Tot} = L_{Asp} + L_{Ref}$ ),  $D$  : diamètre de la conduite,  $\lambda$  : coefficient de perte de charge.

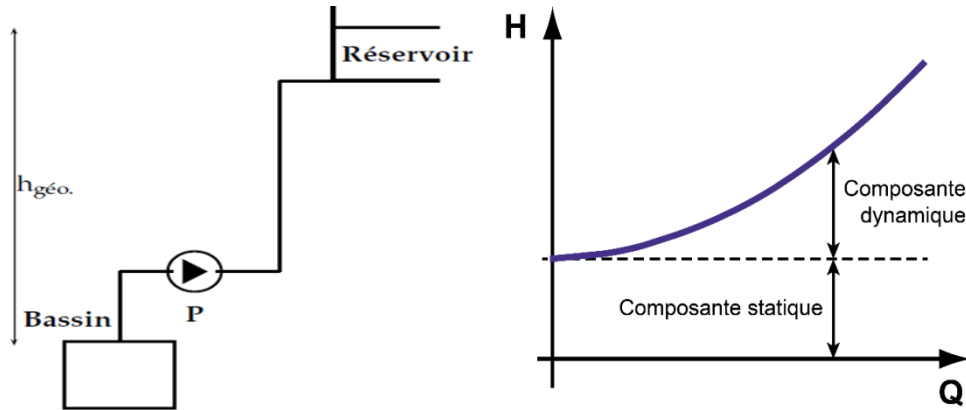


Figure II.5 : Courbe caractéristique d'un réseau hydraulique

### II.1-2/ Pompes volumétriques

Elles ont pour caractéristiques de prélever, en un temps donné, un volume de liquide incompressible à l'aspiration, et de l'envoyer au refoulement. Certaines pompes volumétriques sont dites rotatives, d'autres sont dites alternatives car font appel au mouvement alterné d'un piston.

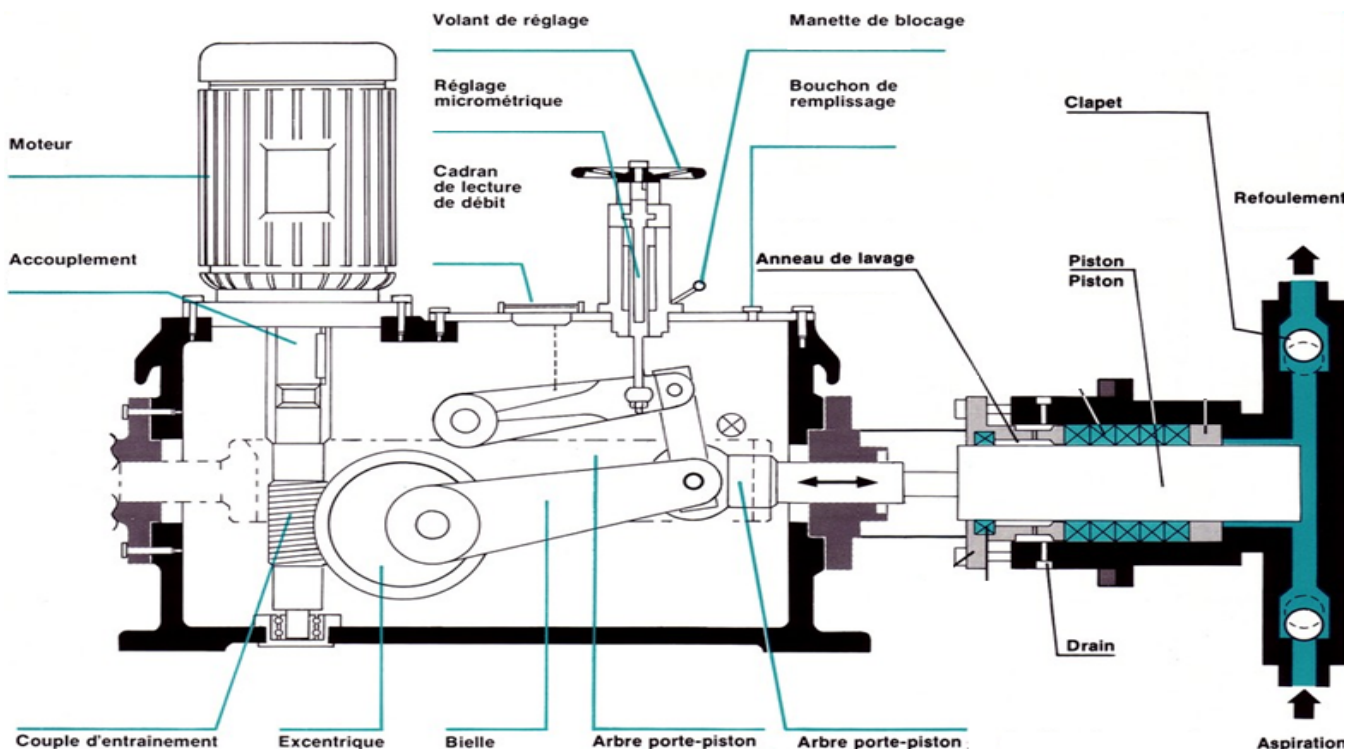


Figure II.6 : Pompe volumétrique alternative



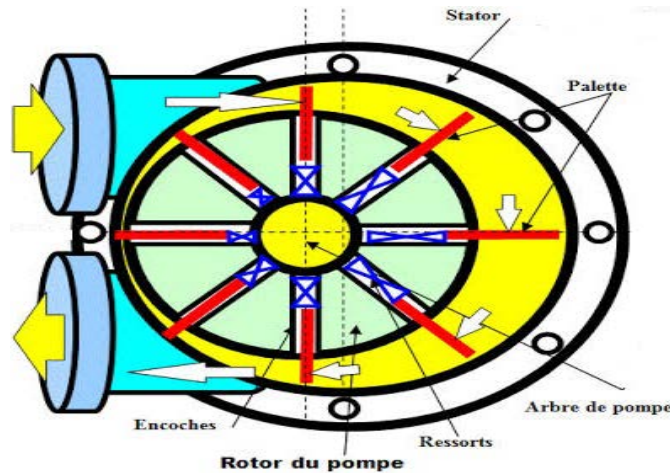


Figure II.7 : Pompe volumétrique rotative

## II.2/ Compresseurs

L'élévation de pression d'un gaz est utilisée pour atteindre un niveau de pression déterminé par des processus tels que :

- Réactions chimiques ;
- Liquéfaction ou la séparation ;
- Alimentation des réseaux d'air comprimé.

On distingue plusieurs types de compresseur suivant le :

### ➤ Principe de fonctionnement :

- Compresseurs volumétriques : un système mécanique isole le gaz dans une chambre dont le volume est variable. L'augmentation du volume de cette chambre crée une entrée du gaz côté aspiration. La réduction de son volume augmente sa pression avant de l'expulser côté refoulement. Les compresseurs volumétriques utilisés dans les petites et moyennes industries.
- Compresseurs dynamiques : un impulseur en rotation rapide accélère le gaz à son contact. L'énergie due à la vitesse acquise par le gaz est ensuite convertie en pression. Ces compresseurs sont utilisés dans les très grosses installations de fabrication.

### ➤ Les compresseurs d'air

### ➤ Les compresseurs des gaz

#### II.2-1/ Principe de fonctionnement des compresseurs volumétriques

Lorsque le volant tourne entraîné lui-même par un moteur électrique ou thermique, le piston est animé d'un mouvement alternatif quasi sinusoïdal.

Lorsqu'il descend, la pression dans le cylindre diminue. Dès qu'elle est inférieure à celle en amont du clapet d'aspiration, celui-ci s'ouvre, laissant l'air entrer à l'intérieur (Aspiration). Lorsqu'il monte, la pression dans le cylindre augmente. Dès qu'elle dépasse la pression au-dessus du clapet de refoulement celui-ci s'ouvre et laisse échapper l'air vers la sortie (Échappement).

Le compresseur à un étage se compose d'un :

- Cylindre ;
- Piston ;
- Clapet d'aspiration ;
- Clapet de refoulement ;
- Bielle ;
- Volant d'entraînement.

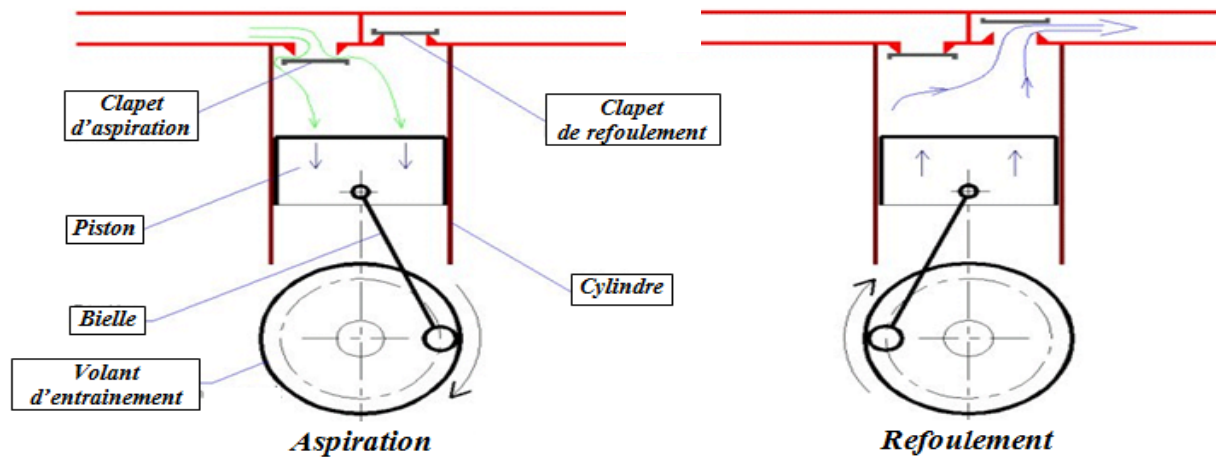


Figure II.8 : Éléments essentiels et principe de fonctionnement

Le taux de compression ( $\tau$ ) : est le rapport entre la pression de refoulement et la pression d'aspiration :

$$\tau = \frac{P_{ref}}{P_{asp}} > 1$$

### II.2-2/ Compresseur multi-étages

Le faible taux de compression possible avec un compresseur à un étage conduit à disposer plusieurs étages en série c.à.d.  $P_{ref} = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot P_{asp}$

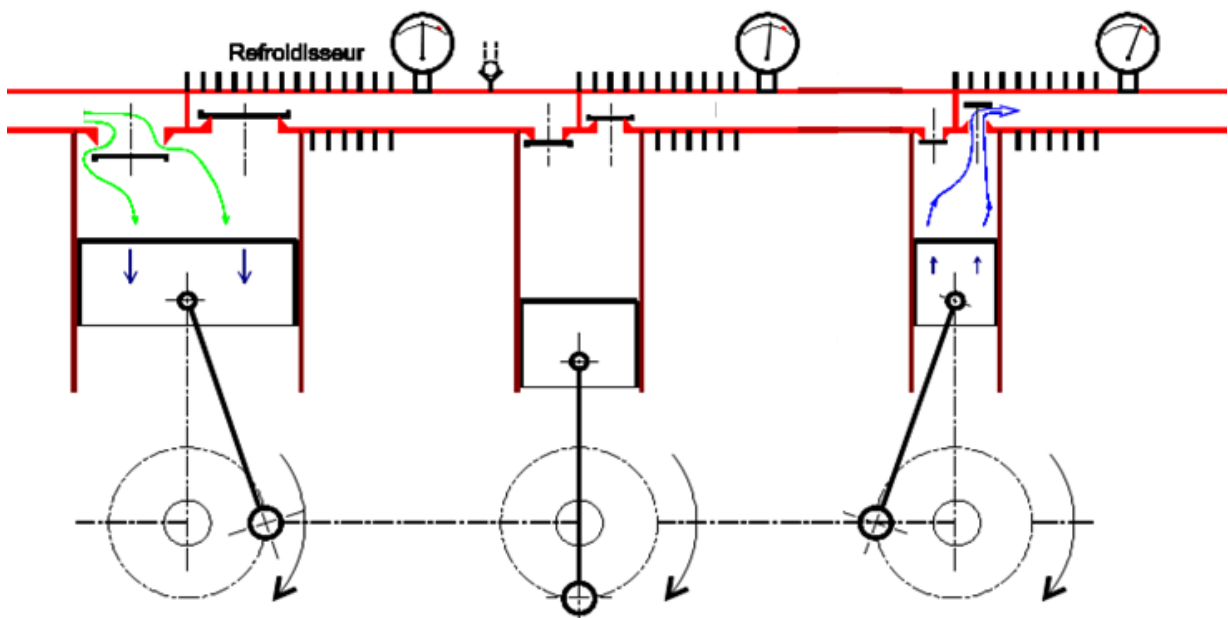


Figure II.9 : Compresseur à trois étages

### II.3/ Ventilateurs industriels

Sont des turbomachines destinées au refoulement de l'air avec un rapport de compression assez faible. On peut classer les ventilateurs :

➤ **En fonction de la valeur de la pression de l'air à son refoulement :**

- Ventilateur basse pression, quand la pression engendrée est inférieure à 7/1000 bar ;
  - Ventilateur moyenne pression, quand la pression maximale est comprise entre 7/1000 et 0.035 bar ;
  - Ventilateur haute pression quand la pression maximale est comprise entre 0.035 et 0.25 bar.
- Au-delà on se trouve dans le domaine des compresseurs.

➤ **En fonction de la direction de l'air pulsé :**

- Ventilateurs axiaux : l'air est aspiré et refoulé parallèlement à l'axe de rotation du ventilateur.



**Figure II.10 : Ventilateur axial**

- Ventilateurs centrifuges : l'air est aspiré parallèlement à l'axe de rotation et propulsé par force centrifuge perpendiculairement à ce même axe.



**Figure II.11 : Ventilateur centrifuge avec son roue**



- Ventilateurs tangentiels : l'air est aspiré et refoulé sensiblement perpendiculairement à l'axe de rotation.

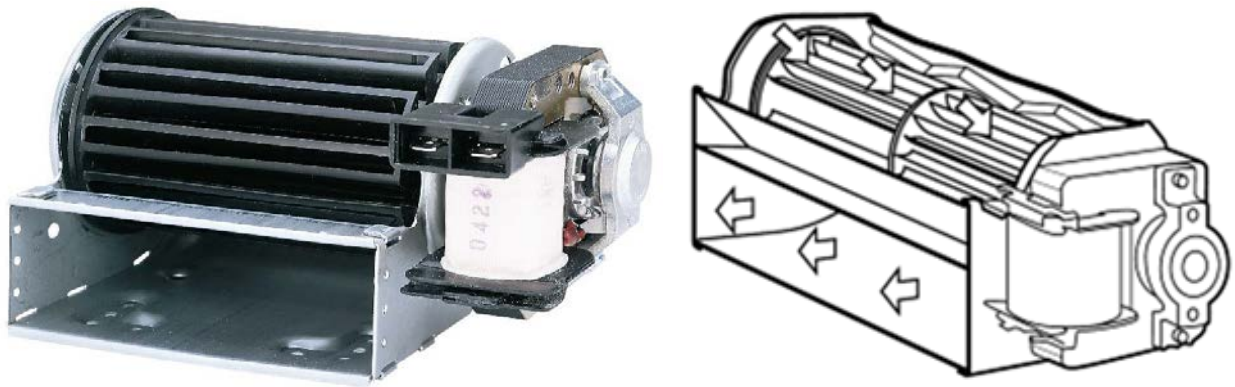


Figure II.12 : Ventilateur tangentiel

### II.3-1/ Différentes applications des ventilateurs

**II.3-1-1/ Soufflage** : Dans ces applications, on dit soufflante au lieu de ventilateur. Les soufflantes génèrent un flux d'air ciblé, ce dernier est notamment utilisé dans les domaines de la technique alimentaire et de la technique des surfaces pour souffler toutes sortes de fluides.

**II.3-1-2/ Aspiration** : Dans ces applications, on dit aspirateur au lieu de ventilateur. Il est extrêmement important que les matières restent fixées en un point donné lors de l'usinage sur les installations, servant notamment au travail du bois, de la pierre ou aussi de tissus.

Maintenant, on dit extracteur au lieu de ventilateur, un four pour la fabrication du ciment, a les problèmes suivants : haute température, poussières très fines, présence d'acides sous forme gazeuse, l'extraction de fumée et la filtration de celle-ci est importante et obligatoire.

**II.3-1-3/ Chauffage** : Une unité chauffante, installée en amont, permet de faire passer l'air chauffé jusqu'à 230°C directement à travers le ventilateur. Ce mode de chauffage est notamment utilisé pour le soudage, le collage et le séchage accéléré.

**II.3-1-4/ Aération** : Pour assurer l'aération de locaux ou des zones de travail, on souffle généralement, de l'air frais dans la zone où l'air est fortement pollué et on aspire l'air impur à travers des filtres. Cela assure un renouvellement permanent de l'air. L'aération est obligatoire dans les endroits entraînant des taux élevés de substances nocives tels que les cabines de peinture, les postes de soudage, les réservoirs d'huile et les garages automobiles.

**II.3-1-5/ Refroidissement** : Le refroidissement à air présente des avantages notables dans de nombreux domaines par rapport au refroidissement à l'eau. Le refroidissement à air peut se faire directement, mais il est sans contact et ne produit pas de vapeurs ni d'eaux usées. Il n'y a donc pas de risque de mélanger ou de salir les matières refroidies ni d'endommager par exemple des composants électroniques. Le dosage du flux d'air permet d'adapter parfaitement la durée du refroidissement aux besoins de l'application. Il est aussi possible d'avoir recours à de l'air refroidi artificiellement.

**II.3-1-6/ Séchage** : Avant d'être réutilisés, travaillés ou expédiés, de nombreux matériaux et biens doivent être soumis à un nettoyage approfondi. Ce nettoyage se fait généralement, à l'eau ou avec d'autres produits détergents. Après nettoyage, les résidus d'eau et de produits de nettoyage sont éliminés avec de l'air. Dans la plupart des cas, le séchage se fait sous pression.

#### ***II.4/ Automatisation des installations à : pompe, ventilateur et compresseur***

L'automatisme consiste en l'étude de la commande de systèmes industriels. Les techniques et méthodes d'automatisation sont en évolution croissante ; elles font appel à des technologies : électromécaniques, électroniques, pneumatiques et hydrauliques. Les automatismes sont présents dans tous les secteurs d'activité d'automobile, textile et agroalimentaire. La première amélioration des conditions de travail a été de remplacer l'énergie humaine fournie par l'ouvrier par une machine.

Tous les systèmes automatisés possèdent une structure générale composée de trois parties fondamentales :

- Partie opérative (PO) : que l'on appelle également partie puissance, c'est la partie visible du système qui permet de transformer la matière première. Elle est composée d'éléments mécaniques, d'actionneurs (Vérins et moteurs), de pré-actionneurs (Distributeurs et contacteurs) et des éléments de détection (Capteurs). Pour réaliser les mouvements, il est nécessaire de fournir une énergie à la PO (Électrique, pneumatique ou hydraulique).
- Partie commande (PC) : c'est la partie qui traite les informations, elle gère et contrôle le déroulement du processus complet.
- Pupitre : permet d'intervenir sur le système (Marche, arrêt, arrêt d'urgence...) et de visualiser son état sur des écrans ou par des voyants.

Un automate programmable industriel (API), est une forme particulière de contrôleur à microprocesseur qui utilise une mémoire programmable pour stocker les instructions et qui implémente différentes fonctions pour commander les machines et les processus. La création et la modification des programmes de l'API ne sont pas réservées aux seuls informaticiens. Les concepteurs de l'API l'ont préprogrammé pour que la saisie du programme puisse se faire à l'aide d'un langage simple.

#### ***II.4-1/ Equipements et techniques industrielles de variation de vitesse***

Le démarrage en direct sur le réseau électrique des moteurs asynchrones est la solution la plus répandue et est souvent convenable pour une grande variété de machines. Cependant, elle s'accompagne parfois, de contraintes qui peuvent s'avérer gênantes pour certaines applications, voire même incompatible avec le fonctionnement souhaité au niveau de la machine :

- Appel d'un fort courant au démarrage, pouvant perturber la marche d'autres appareils connectés sur le même réseau ;
- Impossibilité de contrôler l'accélération et la décélération et aussi de faire varier la vitesse.

Les variateurs de vitesse et les démarreurs suppriment ces inconvénients. La technologie électronique leur a donné plus de souplesse et a étendu leur champ d'application.

Pour démarrer les moteurs électriques et contrôler leur vitesse, les démarreurs rhéostatiques et les variateurs mécaniques ont été les premières solutions ; puis les variateurs électroniques de vitesse (Variateur) se sont imposés dans l'industrie comme la solution moderne, économique, fiable et avec le minimum d'entretien. Un variateur est un convertisseur statique d'énergie, dont le rôle consiste à moduler l'énergie électrique fournie au moteur.

Les variateurs assurent une mise en vitesse et une décélération progressives, ils permettent une adaptation précise de la vitesse aux conditions d'exploitation. Les variateurs sont : de type redresseur commandé, pour alimenter les moteurs à courant continu. Ceux destinés aux moteurs à courant alternatif sont des convertisseurs de fréquence comme les onduleurs et les cyclo-convertisseurs.

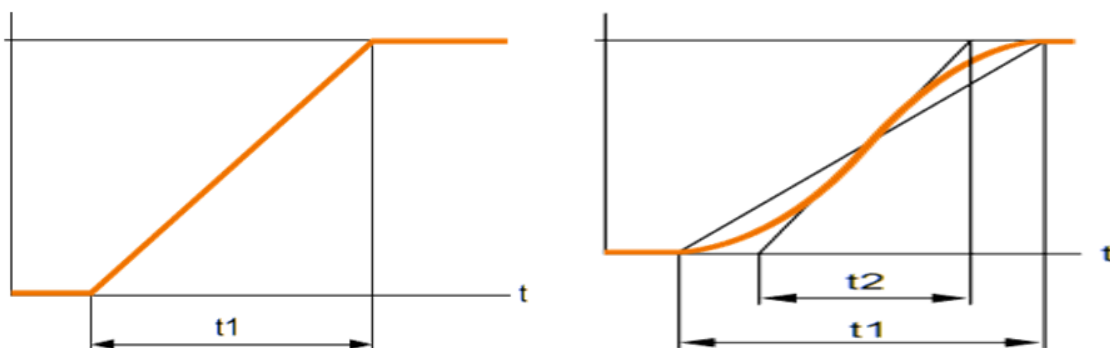
Les convertisseurs de fréquence modernes permettent l'alimentation des moteurs asynchrones standards, avec des performances analogues aux meilleurs variateurs de vitesse à courant continu. Certains constructeurs proposent même des moteurs asynchrones avec des variateurs insérés dans une boîte à bornes adaptée.

#### **II.4-1-1/ Principales fonctions des variateurs de vitesse électroniques**

Les variateurs intègrent également, des fonctionnalités spécifiques d'optimisation des performances des moteurs commandés et de maîtriser les procédés pilotés. Dans les sections suivantes, nous présentons plus en détails chacune de ces fonctionnalités.

##### **II.4-1-1-a/ Accélération contrôlée**

La mise en vitesse du moteur est contrôlée au moyen d'une rampe d'accélération linéaire ou en S. Cette rampe est généralement, réglable et permet par conséquent, de choisir le temps de mise en vitesse approprié à l'application.



**Figure II.13 : Formes des rampes d'accélération**

##### **II.4-1-1-b/ Variation de vitesse**

Un variateur peut ne pas être en même temps régulateur. Dans ce cas, c'est un système simple qui possède une commande élaborée, à partir des grandeurs électriques du moteur mais sans boucle de retour : il est dit en boucle ouverte. La vitesse du moteur est définie par une grandeur d'entrée appelée consigne ou référence. Pour une valeur donnée de la consigne, cette vitesse peut varier en fonction des perturbations comme la variation de la charge ou de la température.

#### **II.4-1-1-c/ Régulation de vitesse**

Un régulateur de vitesse est un variateur asservi, il possède un système de commande avec une boucle de retour : il est dit en boucle fermée. La vitesse du moteur est définie par une consigne. La valeur de la consigne est en permanence comparée à un signal de retour, image de la vitesse du moteur. Ce signal est délivré par une génératrice tachymétrique ou un générateur d'impulsions nommé codeur incrémentale monté en bout d'arbre du moteur.

Si un écart est détecté, suite à une variation de la vitesse, les grandeurs appliquées au moteur, tension et fréquence sont automatiquement corrigées de façon, à ramener la vitesse à sa valeur de consigne. Grâce à la régulation, la vitesse est pratiquement insensible aux perturbations. La précision d'un régulateur est généralement, exprimée en pourcentage de la valeur nominale de la grandeur à réguler.

#### **II.4-1-1-d/ Décélération contrôlée**

Quand un moteur est mis hors tension, sa décélération est due uniquement au couple résistant du moteur c.à.d. décélération naturelle. Les variateurs permettent de contrôler la décélération au moyen d'une rampe linéaire ou en S, généralement, indépendante de la rampe d'accélération. Cette rampe peut être réglée de manière à obtenir un temps de passage de la vitesse en régime établi à une vitesse intermédiaire ou nulle.

#### **II.4-1-1-e/ Inversion du sens de marche**

La majorité des variateurs permettent cette fonction en standard. L'inversion du sens de rotation du moteur est réalisée par inversion de la valeur de la consigne.

#### **II.4-1-1-f/ Freinage d'arrêt**

Ce freinage consiste à arrêter le moteur sans pour autant, contrôler la rampe de ralentissement. Pour les moteurs asynchrones, le freinage est réalisé de manière économique, en injectant du courant continu dans le moteur avec un fonctionnement particulier de l'étage de puissance. Pour un moteur à courant continu, cette fonction sera assurée en connectant une résistance aux bornes de l'induit.

#### **II.4-1-1-g/ Protections intégrées**

Les variateurs modernes assurent la protection thermique des moteurs et leur propre protection. À partir de la mesure du courant et d'une information sur la vitesse et si la ventilation du moteur dépend de sa vitesse de rotation, un microprocesseur calcule l'élévation de température du moteur et fournit un signal d'alarme ou de déclencher la ventilation en cas d'échauffement excessif.

Les variateurs sont fréquemment équipés de protections contre :

- Courts-circuits entre phases et entre phase et terre ;
- Surtensions et les chutes de tension ;
- Déséquilibre des tensions ;
- Manque d'une phase ;
- Blocage de rotor ;
- En cas des vibrations excessives.

#### II.4-1-2/ Architecture interne des variateurs de vitesse

Les variateurs sont composés de deux modules généralement regroupés dans une même enveloppe :

- Un module de contrôle qui gère le fonctionnement de module de puissance ;
- Un module de puissance qui alimente le moteur en énergie électrique.

##### II.4-1-2-a/ Module de contrôle

Pour les variateurs modernes toutes les fonctions sont commandées par un microprocesseur, pour les applications bien spécifiques on trouve des API. Ce dernier exploite les réglages, les ordres transmis par un opérateur ou par une unité de traitement, les signaux de mesures comme la vitesse et le courant. Les capacités de calcul des microprocesseurs, ont permis de réaliser des algorithmes de commandes extrêmement performants et en particulier, la reconnaissance des paramètres de moteur entraîné. À partir de ces informations, le microprocesseur gère les rampes d'accélération et de décélération, l'asservissement de vitesse, la limitation de courant et génère aussi la commande des composants de puissance.

Les réglages comme : limites de vitesse, rampes, limitation de courant se font soit, par claviers intégrés ou par PC.

Les paramètres de fonctionnement et les informations d'alarme et de défauts peuvent être visualisés par des voyants, des afficheurs ou des écrans.

Les tensions nécessaires pour l'ensemble des circuits de contrôle et de mesure sont fournies par une alimentation intégrée au variateur et séparée galvaniquement du réseau.

##### II.4-1-2-b/ Module de puissance

Le module de puissance est principalement constitué de :

- Composants de puissance (Diodes, thyristors, IGBT...)
- Interfaces de mesure des tensions et des courants,
- Fréquemment d'un ensemble de ventilation.

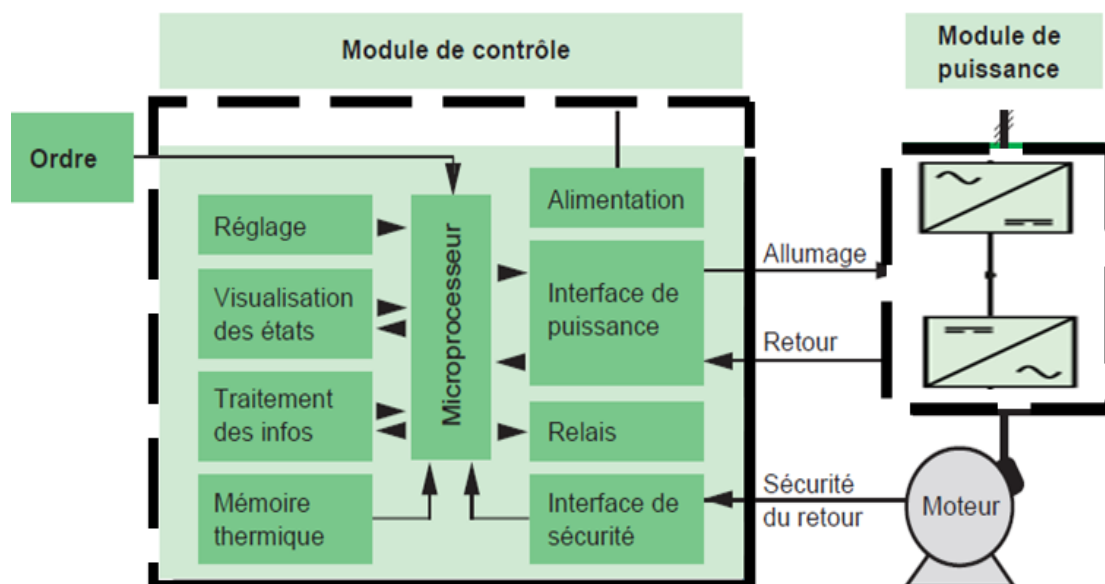
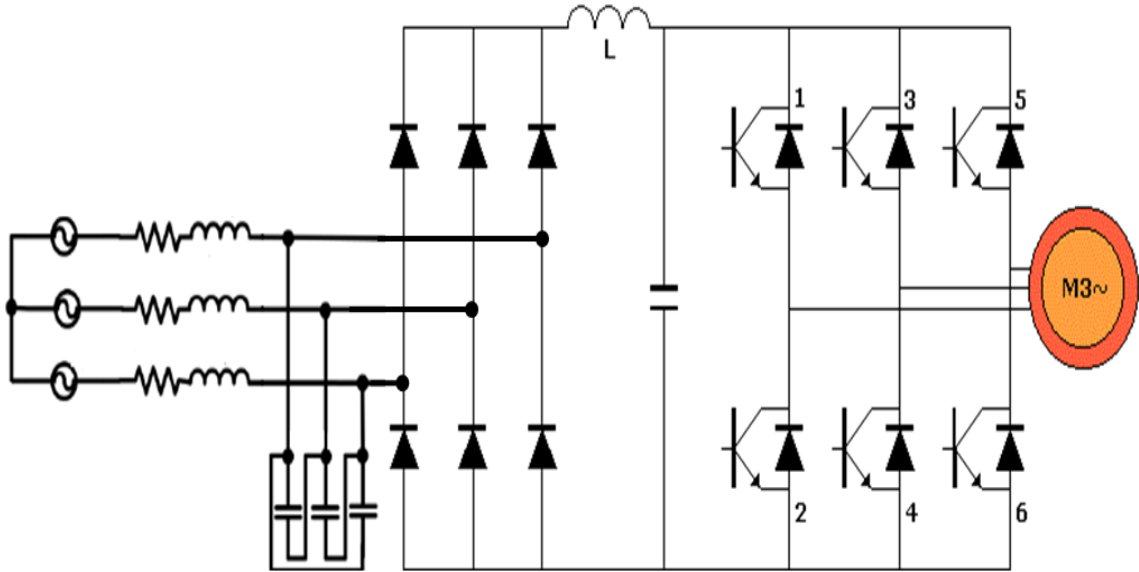


Figure II.14 : Architecture générale d'un variateur de vitesse

Le circuit de puissance est constitué par un redresseur et un onduleur qui, à partir de la tension redressée, produit une tension d'amplitude et fréquence variables. Pour respecter la directive CE et les normes associées, un filtre réseau est placé en amont du pont redresseur.



**Figure II.15 : Schéma simplifié d'un variateur de fréquence**

Le redresseur est généralement équipé d'un pont à diodes et d'un circuit de filtrage, constitué d'un self et d'un ou plusieurs condensateurs en fonction de la puissance.

Le pont onduleur utilise six semi-conducteurs de puissance en général, des IGBT et des diodes connectées en anti parallèles avec l'IGBT.

Des capteurs internes pour mesurer le courant moteur, la tension continue présente aux bornes des condensateurs et dans certains cas, les tensions présentes aux bornes des diodes du pont redresseur. Ainsi que toutes les grandeurs nécessaires au contrôle et à la protection de l'ensemble.

#### **II.4-1-2/ Commande scalaire**

##### **➤ Rappel**

$R_s(R_r)$ ,  $L_s(L_r)$  : la résistance et l'inductance statoriques (rotoriques) respectivement.

$L_m$  : la mutuelle entre le stator et le rotor.  $J$ ,  $f$ ,  $p$  : le moment d'inertie, le coefficient de frottements visqueux et le nombre de paires de pôles respectivement.

$\tau_r$  : La constante de temps rotorique  $\tau_r = L_r/R_r$

Les équations d'un MAS triphasé en régime permanent sinusoïdal sont les suivantes :

$$\vec{V}_s = V_{\max} \cos(2\pi \cdot f \cdot t) = R_s \cdot \vec{I}_s + \frac{d\vec{\phi}_s}{dt} \quad \vec{V}_r = 0 = R_r \cdot \vec{I}_r + \frac{d\vec{\phi}_r}{dt}$$

$$C_e = \left( \frac{3 \cdot p}{\omega_s} \cdot V_{\max} \right) \cdot \frac{\frac{R_r'}{g}}{\left( \frac{R_r'}{g} \right)^2 + (N_r' \cdot \omega_s)^2}$$

Avec :  $N_r = L_r \cdot \sigma$        $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r}$        $N_r' = N_r \cdot \left( \frac{L_s}{L_m} \right)^2$        $R_r' = R_r \cdot \left( \frac{L_s}{L_m} \right)^2$

- Pour un glissement faible c.à.d. une vitesse proche à la vitesse de synchronisme, on peut écrire :

$$C_e = \frac{3 \cdot p}{\omega_s} \cdot V_{\max} \cdot \frac{g}{R_r'}$$

Le couple maximum est donné par :  $C_{e_{\max}} = \frac{3 \cdot p}{N_r'} \cdot \left( \frac{V_{\max}}{\omega_s} \right)^2$

- On suppose que le flux statorique  $\phi_s$  est parfaitement sinusoïdal :  $\phi_s = \phi_{\max} \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$

En négligeant la chute de tension dans la résistance statorique :

$$V_{\max} \cos(2\pi \cdot f \cdot t) = \frac{d}{dt} (\phi_{\max} \sin(2\pi \cdot f \cdot t)) = \phi_{\max} \cdot 2\pi \cdot f \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$$

On trouve :  $\phi_{\max} = \frac{V_{\max}}{2\pi \cdot f}$

Ainsi  $V/f$  constant signifie un flux statorique à une amplitude constante.

Dans ce type de commande, la vitesse de référence impose une fréquence à l'onduleur et par voie de conséquence au moteur, ce qui détermine la vitesse de rotation :

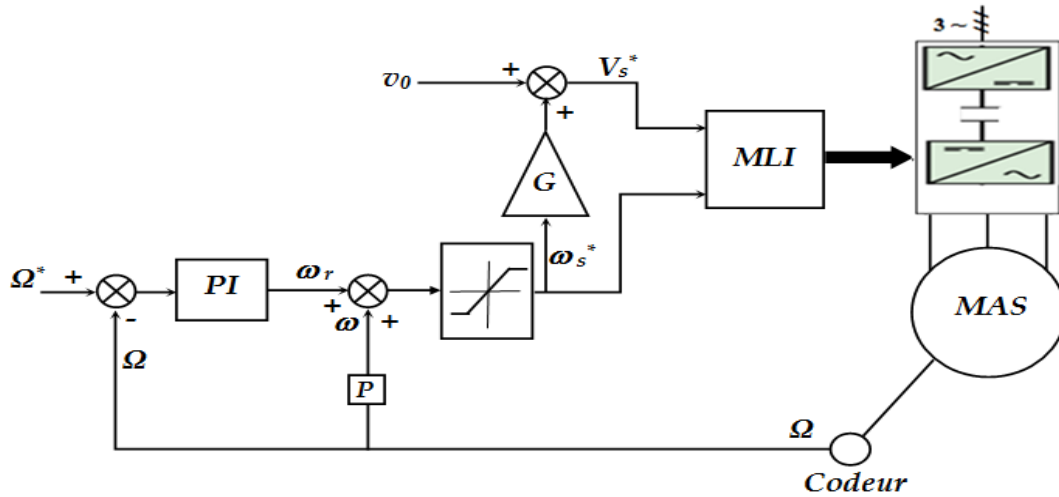
$$\omega_s = \omega_r + \omega = \omega_r + p \cdot \Omega$$

$\omega_s$  : pulsation statorique (rad/s) ,  $\omega_r$  : pulsation rotorique (rad/s)

$\omega = p \cdot \Omega$  : pulsation mécanique (rad/s)

La tension d'alimentation est en relation directe avec la fréquence  $V_s = G \cdot \omega_s$ .

Ce fonctionnement est souvent nommé fonctionnement à  $V/f$  constant ou fonctionnement scalaire.



**Figure II.16 : Schéma de principe de la commande scalaire**

L'inconvénient de cette technique, si aucune compensation n'est effectuée, la vitesse réelle varie avec la charge ce qui limite la plage de fonctionnement.

### II.4-1-3/ Commande vectorielle

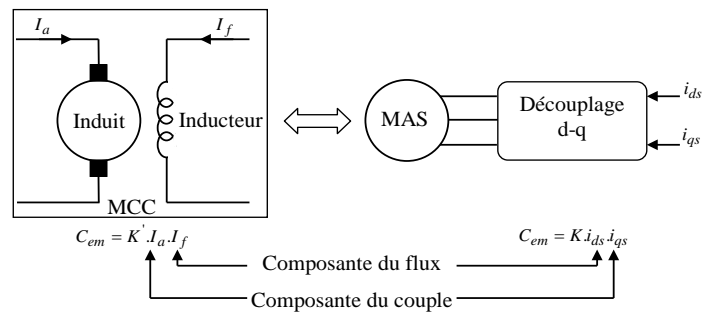
#### ➤ Rappel

Les équations d'un MAS triphasé dans le repère de Park sont les suivantes :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \end{cases}, \begin{cases} 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{dr} \end{cases}, \begin{cases} \phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \end{cases}, \begin{cases} \phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{p \cdot L_m}{L_r} \cdot (\phi_{dr} \cdot i_{qs} - \phi_{qr} \cdot i_{ds}) = p \cdot (\phi_{qr} \cdot i_{dr} - \phi_{dr} \cdot i_{qr}) = p \cdot L_m \cdot (i_{dr} \cdot i_{qs} - i_{qr} \cdot i_{ds}) = p \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot (\phi_{qs} \cdot i_{dr} - \phi_{ds} \cdot i_{qr}) \\ &= p \cdot \frac{1 - \sigma}{\sigma \cdot L_m} \cdot (\phi_{dr} \cdot \phi_{qs} - \phi_{qr} \cdot \phi_{ds}) \end{aligned}$$

La commande ou le contrôle vectoriel de flux (CVF) est une technique très largement appliquée industriellement et a fait preuve par ses nombreuses applications industrielles, de ses qualités de performances et de précision. Le contrôle vectoriel à flux rotorique orienté consiste à choisir un système d'axes et un type de commande (Directe ou indirecte), permettant de découpler le couple et le flux analogue à un moteur à courant continu c.à.d. permet de contrôler indépendamment le courant  $i_d$  assurant le flux et le courant  $i_q$  assurant le couple. La plupart des variateurs modernes intègrent cette fonction, ce mode de contrôle apporte des performances acceptables, sans augmentation de coût. Pour obtenir ces performances, certains paramètres du moteur doivent être connus. Dans ce cas, à la mise sous tension, le variateur avec le CVF pratique un autoréglage qui lui permet de déterminer les paramètres statoriques et rotoriques, la durée de cette mesure varie en fonction de la puissance du moteur entre 1 à 10 s, ces valeurs sont mémorisées pour élaborer les lois de commande.



**Figure II.17 : Analogie entre le MCC et le MAS commandée par flux orienté**

On oriente le système d'axes ( $d$ - $q$ ) de manière à ce que l'axe  $d$  soit en phase avec le flux rotorique :

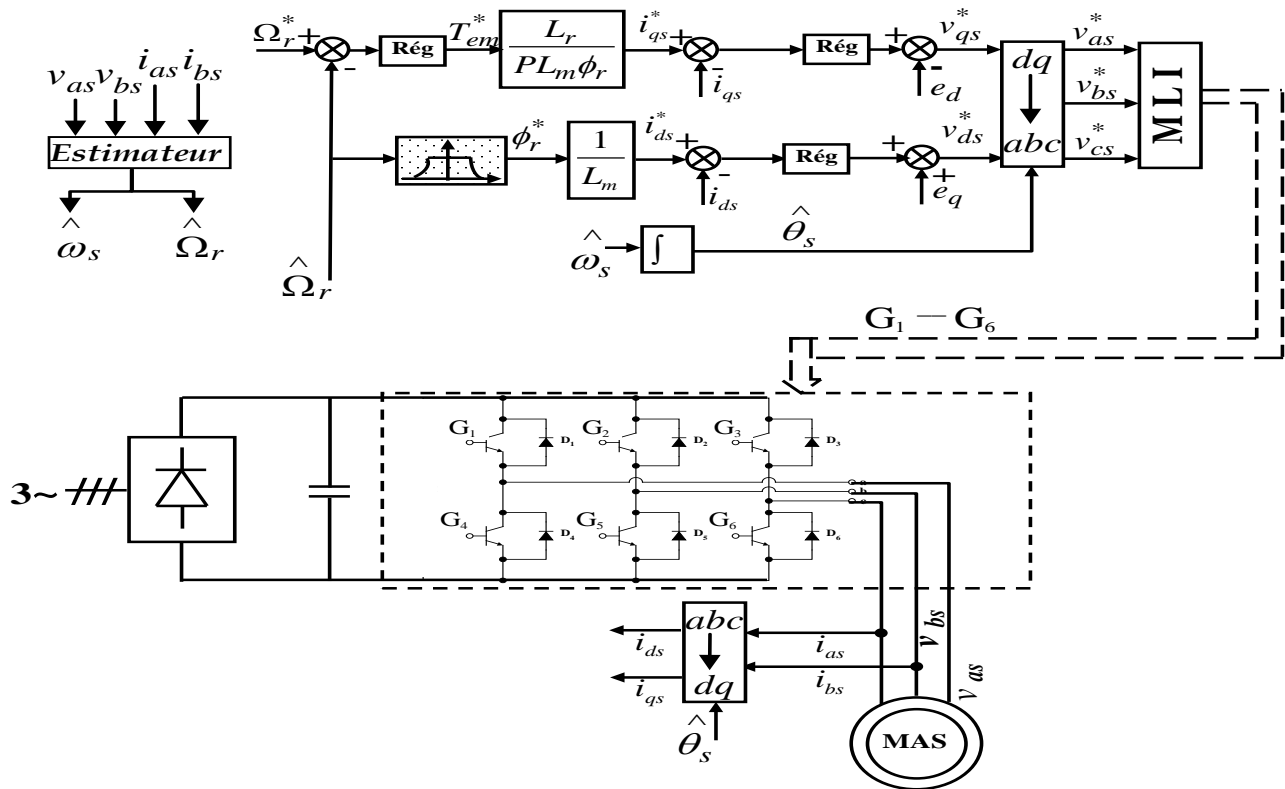
$$\phi_{dr} = \phi_r$$

$$\phi_{qr} = 0$$

$$T_{em} = \frac{p \cdot L_m}{L_r} \cdot (\phi_r \cdot i_{qs})$$



Il est appelé aussi la commande directe, car l'angle  $\theta_s$  est calculé directement, à l'aide des grandeurs mesurées ou estimées.


$$\text{Avec : } \begin{cases} e_d = \sigma \omega_s L_s i_{qs} \\ e_q = \sigma \omega_s L_s i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} \phi_r \end{cases}$$

Le contrôle vectoriel de flux avec capteur de vitesse ou la commande indirecte est une autre possibilité, l'angle  $\theta_s$  est calculé à partir de la pulsation statorique, cette dernière reconstituée à l'aide de la vitesse de rotation de MAS et de la pulsation rotorique :

$$\omega_s = \omega_r + \omega = \omega_r + p.\Omega$$

Ce type de contrôle autorise, une vitesse maximale atteint souvent le double de la vitesse nominale, ou davantage si le moteur le permet mécaniquement et thermiquement, de plus, des performances comparables et même supérieures aux meilleurs variateurs à courant continu.

En contrepartie, le moteur utilisé n'est pas de construction standard en raison de la présence d'une ventilation forcée.

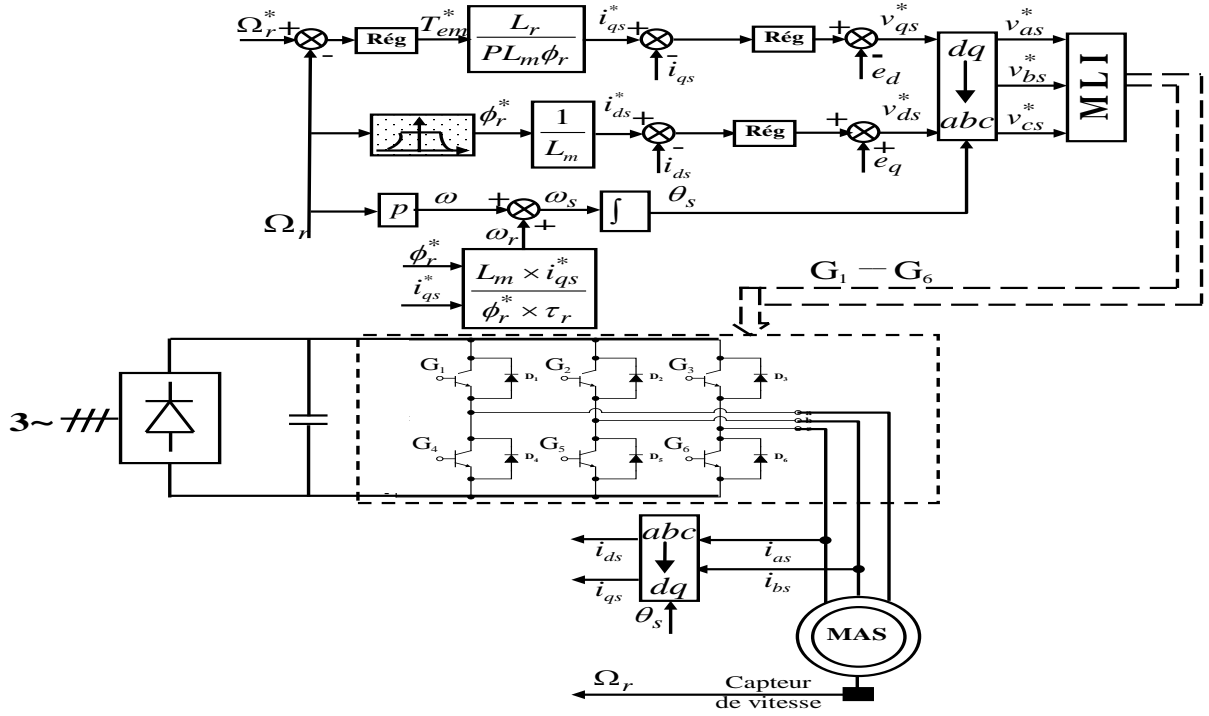


Figure II.19 : Schéma de principe de la CVF avec capteur

#### II.4-1-4/ Variateur avec commande directe du couple

Le contrôle de couple direct (Direct torque control : DTC) comme son nom l'indique : la méthode contrôle directement le couple du moteur, au lieu d'essayer de contrôler indirectement les courants du moteur comme la commande vectorielle. Cela entraîne une meilleure précision pour répondre aux exigences de charge du système entraîné. Avec la DTC, il est possible d'éviter l'installation de codeurs ou d'autres dispositifs de mesure de vitesse donc l'absence de besoin de retour de vitesse ou de position du moteur dans 95 % des applications.

On peut exprimer le couple électromagnétique en fonction du produit vectoriel des flux rotorique

$$\text{et statorique : } T_{em} = p \cdot \frac{1-\sigma}{\sigma \cdot L_m} \cdot (\vec{\phi}_r \wedge \vec{\phi}_s) = p \cdot \frac{1-\sigma}{\sigma \cdot L_m} \cdot (\phi_{dr} \cdot \phi_{qs} - \phi_{qr} \cdot \phi_{ds}) = p \cdot \frac{1-\sigma}{\sigma \cdot L_m} \cdot \phi_s \cdot \phi_r \cdot \sin(\gamma)$$

$\gamma$  : angle entre les deux flux.

$$\text{En régime permanent on a : } \phi_r = \frac{L_m}{L_s \cdot (1 + j\sigma \cdot \tau_r)} \phi_s$$

On peut dire qu'une variation du flux rotorique suit une variation du flux statorique à une constante du temps  $\sigma \cdot \tau_r$  près. Comme cette constante du temps n'est pas négligeable, on considère que le flux rotorique reste constant si la durée  $T_e$  (Période) de variation du flux statorique est :  $T_e \ll \sigma \cdot \tau_r$ .

On a :  $\vec{V}_s = R_s \cdot \vec{I}_s + \frac{d\vec{\phi}_s}{dt}$ , si on néglige la chute de tension dans la résistance statorique on trouve :

$$\vec{V}_s = \frac{d\vec{\phi}_s}{dt} \Leftrightarrow \vec{V}_s dt = d\vec{\phi}_s \Leftrightarrow \int_t^{t+T_e} \vec{V}_s dt = \int_t^{t+T_e} d\vec{\phi}_s \Leftrightarrow \vec{V}_s \cdot T_e = \vec{\phi}_s(t+T_e) - \vec{\phi}_s(t) = \Delta \vec{\phi}_s$$

La DTC consiste donc à contrôler le flux  $\phi_s$ , en choisissant le vecteur de tension  $\vec{V}_s$  qui le fera évoluer dans la direction souhaitée, pour cela et comme exigence on utilise la MLI vectorielle pour déterminer les états de commutation de chaque bras de l'onduleur et permet aussi un fonctionnement à fréquence constante c.à.d. la période  $T_e$ .

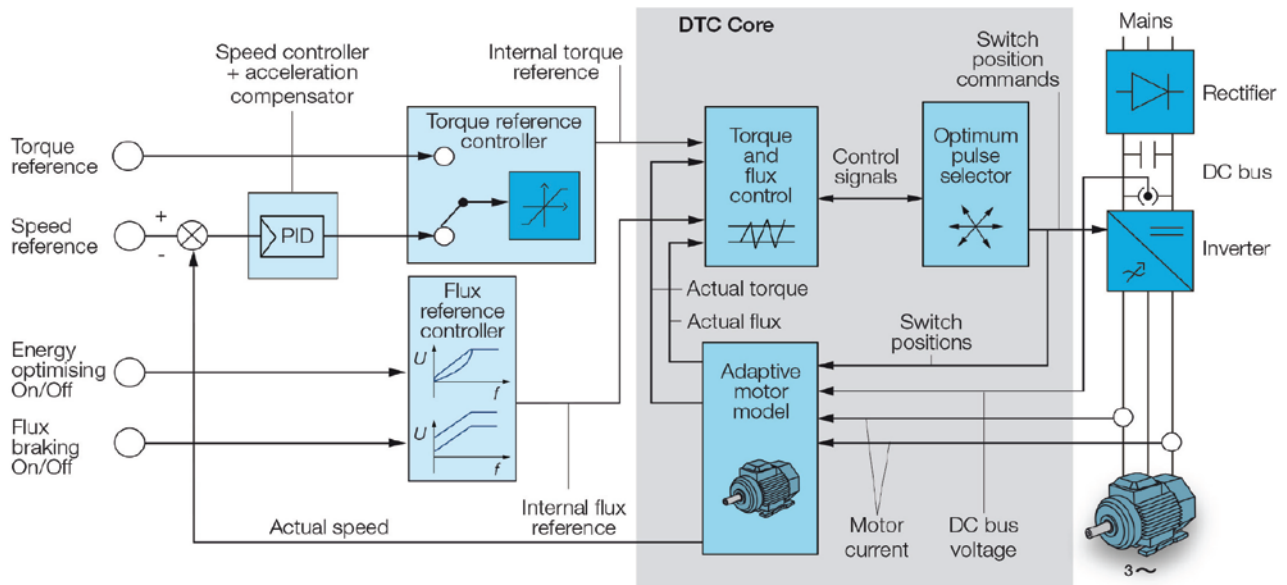


Figure II.20 : Schéma de principe de la DTC appliqué par ABB

#### II.4-2/ Présentation d'un variateur de vitesse de la marque ABB et Schneider Electric

##### II.4-2-1/ Le variateur ACS 5000

Le variateur moyenne tension **ACS5000** fait partie de la gamme de variateurs pour usage particulier d'**ABB**. Les variateurs pour usage particulier sont conçus pour les applications de forte puissance, haute vitesse ou particulières telles que : propulsion marine, laminoirs, broyeurs, grandes pompes, ventilateurs et compresseurs. Les variateurs couvrent une vaste plage de puissance et de tension, notamment des tensions jusqu'à 13,8 kV et des puissances de plus de 100 MW. Deux modes de refroidissement : refroidissement à l'eau et refroidissement à air.

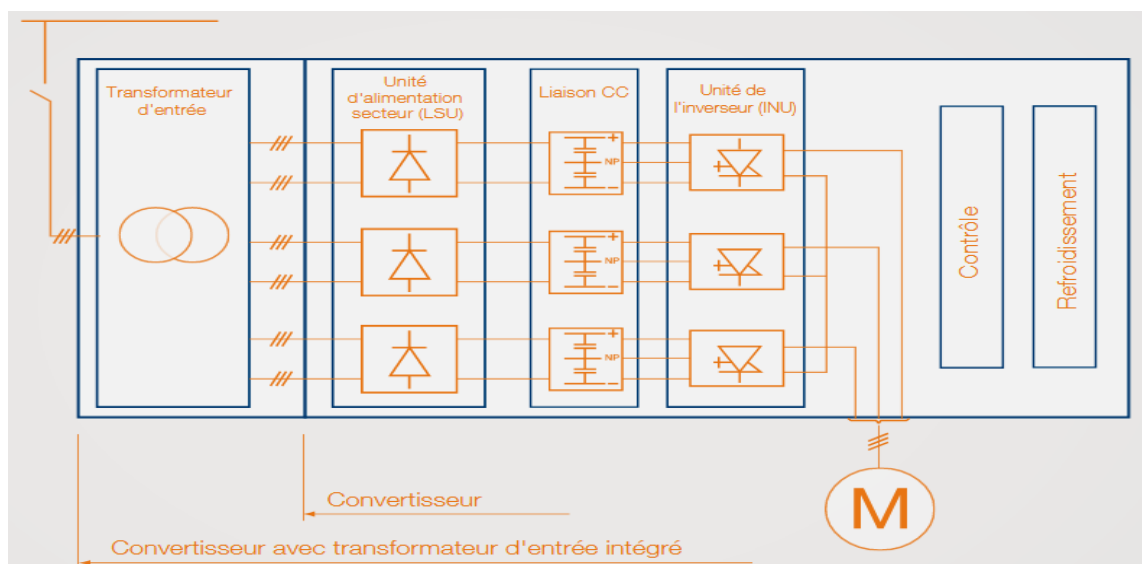


Figure 21 : Schéma synoptique de variateur ACS5000

### ***Semi-conducteurs IGCT***

L'**ACS5000** est équipé d'un semi-conducteur de puissance de type IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor), qui est un commutateur idéal pour les applications moyenne tension à forte puissance. L'utilisation des IGCT résulte en un minimum de pièces, fournissant un variateur efficace et fiable. L'**ACS5000** est équipé d'un redresseur à 36 impulsions, satisfaisant les exigences les plus strictes du taux de distorsion harmonique du courant et de la tension, comme définies dans les normes IEEE, CEI. Cela élimine le besoin d'un analyseur d'harmoniques ou d'installer un filtre de réseau.

### ***Condensateurs de liaison CC à longue durée de vie***

Des condensateurs bobinés avancés, auto régénérables, conçus pour une longue durée de vie, sont utilisés dans la liaison CC. Cette technologie vous apporte un avantage certain, par rapport aux technologies non fiables, qui nécessitent un entretien, basées sur des condensateurs électrolytique.

### ***Conception sans fusible***

La conception de L'**ACS5000** n'exige aucun fusible d'alimentation de moyenne tension, ces fusibles qui sont réputés être peu fiables et coûteux. L'**ACS5000** est équipé d'IGCT dédiés, qui fournissent une protection du variateur plus rapide et plus fiable. Ce programme de protection répond en moins de 25 µs c.à.d. environ deux cent fois plus rapidement que les fusibles.

### ***Fiche technique***

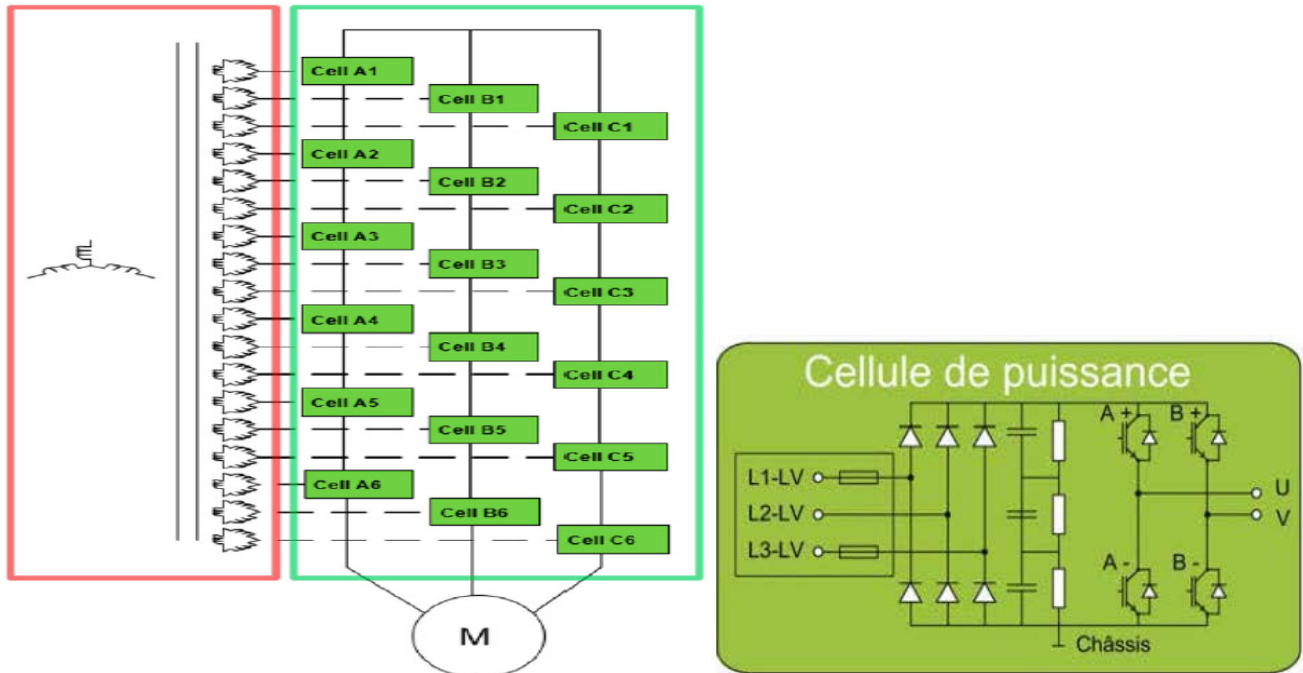
**Tableau II.2 : Données techniques de variateur ACS5000**

<b><i>Désignation</i></b>	<b><i>Valeur</i></b>
<b><i>Tension d'entrée vers le transformateur intégré</i></b>	<b><i>4,16 à 13,8 kV</i></b>
<b><i>Tension d'entrée vers le redresseur à diodes</i></b>	<b><i>1920 à 1980 V, 3700 à 3960 V</i></b>
<b><i>Variation de la tension d'entrée</i></b>	<b><i>± 10 % sans déclassement +20/-30 % avec déclassement</i></b>
<b><i>Fréquence d'entrée</i></b>	<b><i>50 / 60 Hz</i></b>
<b><i>Variation de la fréquence d'entrée</i></b>	<b><i>± 5 %</i></b>
<b><i>Facteur de puissance d'entrée</i></b>	<b><i>&gt; 96 %</i></b>
<b><i>Puissance de sortie</i></b>	<b><i>2000 à 36000 kW (Plus élevée sur demande)</i></b>
<b><i>Tension de sortie</i></b>	<b><i>6 à 13,8 kV</i></b>
<b><i>Fréquence de sortie</i></b>	<b><i>0 - 250 Hz</i></b>
<b><i>Rendement</i></b>	<b><i>&gt; 98.5 %</i></b>
<b><i>Type de commande</i></b>	<b><i>DTC</i></b>

### ***II.4-2-2/ Le variateur ATV6000***

Le variateur moyenne tension **ATV6000** de **Schneider Electric**, fait partie de la gamme de la nouvelle génération de variateurs de vitesse, doté d'une intelligence intégrée, pour collecter des données et partager des informations au niveau de l'entreprise, qui peuvent améliorer l'efficacité opérationnelle. Le variateur **ATV6000** moyenne tension de 2,4 à 13,8 kV pour la commande et la protection des moteurs de 0,3 à 20 MW dans les applications industrielles telles que : convoyeur

à bande, broyeur à haute pression, ventilateurs de dépoussiérage / de broyeur / de haut fourneau, four rotatif, pompe de transfert de pétrole brut, compresseur de gaz naturel liquéfié (GNL), mélangeur, pompe d'alimentation en eau de la chaudière, pompe de circulation d'eau de refroidissement, ventilateur de tirage primaire / secondaire. Le mode de refroidissement basé sur la ventilation par air pulsé.



**Figure II.22 : Schéma synoptique de variateur ATV6000**

### **Semi-conducteurs IGBT**

L'**ATV6000** est équipé d'un semi-conducteur de puissance de type IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), L'**ATV6000** est équipé d'un redresseur à diode avec 66 impulsions.

### **Fiche technique**

**Tableau II.3 : Données techniques de variateur ATV6000**

<b>Désignation</b>	<b>Valeur</b>
<b>Tension d'entrée vers le transformateur</b>	<b>2,4 à 13,8 kV</b>
<b>Variation de la tension d'entrée</b>	<b>± 10 % sans déclassement -25 % avec déclassement</b>
<b>Fréquence d'entrée</b>	<b>50 / 60 Hz</b>
<b>Variation de la fréquence d'entrée</b>	<b>± 5 %</b>
<b>Facteur de puissance d'entrée</b>	<b>96 %</b>
<b>Puissance de sortie</b>	<b>3000 à 20000 kW</b>
<b>Tension de sortie</b>	<b>2,4 à 13,8 kV</b>
<b>Fréquence de sortie</b>	<b>0,1 - 120 Hz</b>
<b>Rendement</b>	<b>98.5 %</b>
<b>Type de commande</b>	<b>CVF</b>

#### ***II.4-2/ Automatisation d'une installation à pompe***

D'une manière générale, pour automatiser une installation à pompe, la sélection et le montage des capteurs doivent être réalisés en tenant compte les critères suivants :

- Pression de service nominale ;
- Surpression admissible ;
- Limite de température : température ambiante, température du liquide pompé ;
- Transmission électrique des signaux ;
- Transmission optique des signaux en cas de conditions d'utilisation particulières, par exemple longue distance ou environnement très parasité.

#### ***II.4-2-1/ Équipements nécessaires pour une armoire (Coffret) de commande***

Sur le marché, on trouve un nombre très important de fabricants ou des fournisseurs des armoires suivant, les spécifications désirées par les clients. On va présenter quatre armoires de l'entreprise EDIEL : C'est une entreprise algérienne des équipements de transformation et de distribution électrique, ses activités sont la conception et les études d'installations électriques, la fabrication de matériels électriques à moyenne et basse tension et leur commercialisation :

#### ***II.4-2-1-a/ Armoire de commande d'une station de pompage avec démarrage direct 4,5kW à 18,5 kW***

Cet équipement est destiné à la commande de forage.

##### ***Composition :***

- Un disjoncteur général 4P, 3d, pour la protection différentielle et court-circuit ;
- Un relais pour chaque phase pour la protection contre la baisse de tension, la surtension et manque ou inversion de phases ;
- Un relais de niveau pour le contrôle de niveau ;
- Un relais thermique contre les surcharges ;
- Un jeu de barre, câbles.

##### ***Pour la commande***

- Un bouton poussoir marche ;
- Un bouton poussoir arrêt ;
- Un sélecteur de choix : manuel / automatique ;
- Un bouton poussoir effacement défaut.

##### ***Pour la mesure***

- Un voltmètre muni d'un commutateur de phases ;
- Un ampèremètre muni de trois transformateurs de courant et d'un commutateur d'ampèremètre ;
- Un compteur horaire.

##### ***Pour la signalisation***

- Un voyant vert en service ;
- Un voyant orange pour défaut pompe ;
- Un voyant rouge niveau bas et niveau haut.

**II.4-2-1-b/ Armoire de commande pour une station de pompage avec démarrage étoile triangle 15kW à 37kW**

Cet équipement est destiné à la commande de forage.

**Composition :**

- Le même que l'armoire décrit dans le titre **4-2-1-a** ;
- Un contacteur et un contacteur inverseur pour réaliser le démarrage étoile triangle.

**Pour la commande**

- Le même que l'armoire décrit dans le titre **4-2-1-a**.

**Pour la mesure**

- Le même que l'armoire décrit dans le titre **4-2-1-a**.

**Pour la signalisation**

- Le même que l'armoire décrit dans le titre **4-2-1-a**.

**II.4-2-1-c/ Armoire de commande d'une station de pompage avec démarrage statorique 30 kW à 450 kW**

Cet équipement est destiné à la commande et le contrôle d'une station de pompage.

**Composition :**

- Le même que l'armoire décrit dans le titre **4-2-1-a**.
- Deux départs assurant l'alimentation de deux pompes 110 kW, chaque départ comprend un démarrage statorique ;
- Un relais à sonde PTC pour détecter l'échauffement de chaque moteur.

**Pour la commande**

- Un micro automate SIEMENS Logo : le LOGO est rapide à installer, induit des économies consistantes de câblage et facile à programmer.
- Le même que l'armoire décrit dans le titre **4-2-1-a**.

**Pour la mesure**

- Le même que l'armoire décrit dans le titre **4-2-1-a**.

**Pour la signalisation**

- Le même que l'armoire décrit dans le titre **4-2-1-a**.

**II.4-2-1-d/ Armoire de commande d'une station de pompage avec démarreur progressif 15 kW à 630 kW**

Cet équipement est destiné à la commande et le contrôle d'une station de pompage. Il constitue la méthode la plus efficace, en raison de la réduction du courant et du couple pendant le démarrage. En augmentant progressivement, la tension aux bornes du moteur c.à.d. le démarrage progressif, avec une accélération douce en même temps qu'il limite le courant à une valeur juste suffisante pour assurer le démarrage.

**Composition :**

- Le même que l'armoire décrit dans le titre **4-2-1-a** ;
- Un gradateur triphasé à base des thyristors ;
- Un système de protection contre les sous ou sur fréquence  $40\text{Hz} < f < 60\text{Hz}$  ;
- Un système de protection contre le court-circuit des thyristors.

**Condition de démarrage :** le nombre de démarrages maximum admis est de un à dix pendant une heure. En cas d'un démarrage long, le démarreur est mis à l'arrêt par défaut si le moteur n'atteint pas sa pleine charge. Les démarreurs seront conçus pour un rapport  $I_d / I_n < 3$ .

#### **II.4-2-2/ Régulation du débit par variation de vitesse**

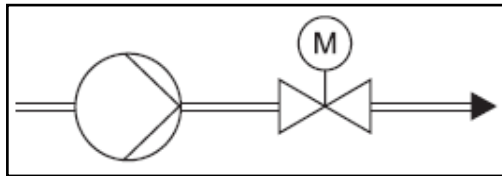
##### ➤ Rappel

On commence par la présentation d'une méthode classique de régulation de débit avant d'entamer la régulation du débit par variation de vitesse :

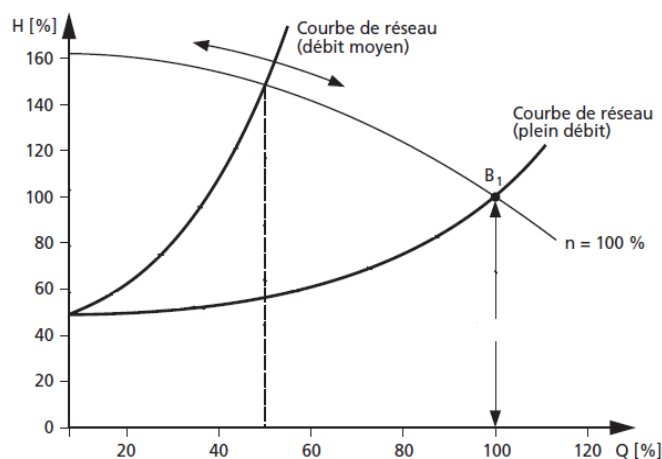
##### **Régulation de débit par laminage**

Quand tu lames avec une vanne cela veut dire que tu fermes progressivement la vanne pour réduire le débit dans la conduite.

Grâce à l'augmentation des pertes de charges dans la vanne de régulation, la courbe caractéristique du réseau se redresse, donc le point de fonctionnement remonte sur la courbe caractéristique de la pompe vers le débit nul. La pompe délivre alors une hauteur plus élevée.



**Schéma synoptique d'une pompe avec une vanne de laminage**



**Figure II.23 : Courbes caractéristiques**

##### **Inconvénients et avantages**

- Bruits hydrauliques se produisent quand la vanne est proche de la fermeture.
- Technique de régulation simple.

La variation de vitesse permet d'adapter en permanence la puissance de la pompe aux besoins de l'installation. Le rôle d'une pompe à vitesse variable consiste à répondre aux besoins de l'installation, avec la vitesse de rotation la plus faible c.à.d. la vitesse optimale et donc un coût énergétique minimal. Lorsque le débit augmente de façon linéaire, les pertes de charges de l'installation augmentent



avec le carré du débit. Les pompes centrifuges ont un comportement similaire: lorsque le débit et la vitesse augmentent de façon linéaire, la hauteur augmente avec le carré de la vitesse.

Pour les pompes centrifuges on a les lois suivantes :

- Débit volumique :  $Q_{i+1} = Q_i \cdot \left(\frac{n_{i+1}}{n_i}\right)$
- Hauteur :  $H_{i+1} = H_i \cdot \left(\frac{n_{i+1}}{n_i}\right)^2$
- Puissance :  $P_{i+1} = P_i \cdot \left(\frac{n_{i+1}}{n_i}\right)^3$

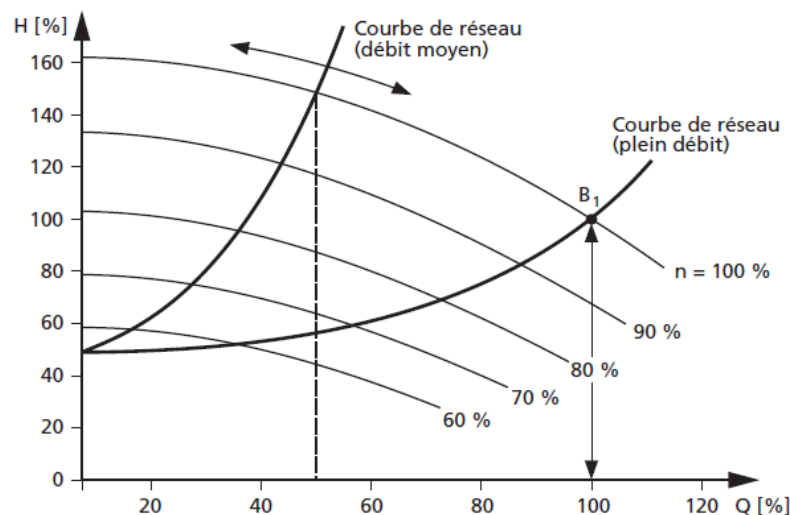
On remarque bien une faible variation de vitesse permet de couvrir une plage de fonctionnement importante surtout pour la hauteur.

***On peut citer quelques avantages***

- Usure moindre des organes mécaniques comme les : vannes, débitmètre... ;
- Réduction des réactions hydrauliques par exemple pics de pression ;
- Économies d'énergie.

***Inconvénient***

- Coût élevé de la régulation



**Figure II.24 : Courbes caractéristiques de la pompe à vitesse variable**

**II.4-2-2-a/ Rappel de base en régulation**

La figure ci-dessous représente un exemple simplifié d'une chaîne de régulation de débit :

- Grandeur de régulation **x** : c'est la grandeur qui doit être maintenue constante. La valeur mesurée de **x** présente la valeur instantanée de la grandeur de régulation, par exemple : la pression, la température, le débit.
- Grandeur de référence ou consigne **w** : donnée constante ou variable par exemple : la pression, la température, le débit.
- Ecart de régulation  **$x_s = w - x$**

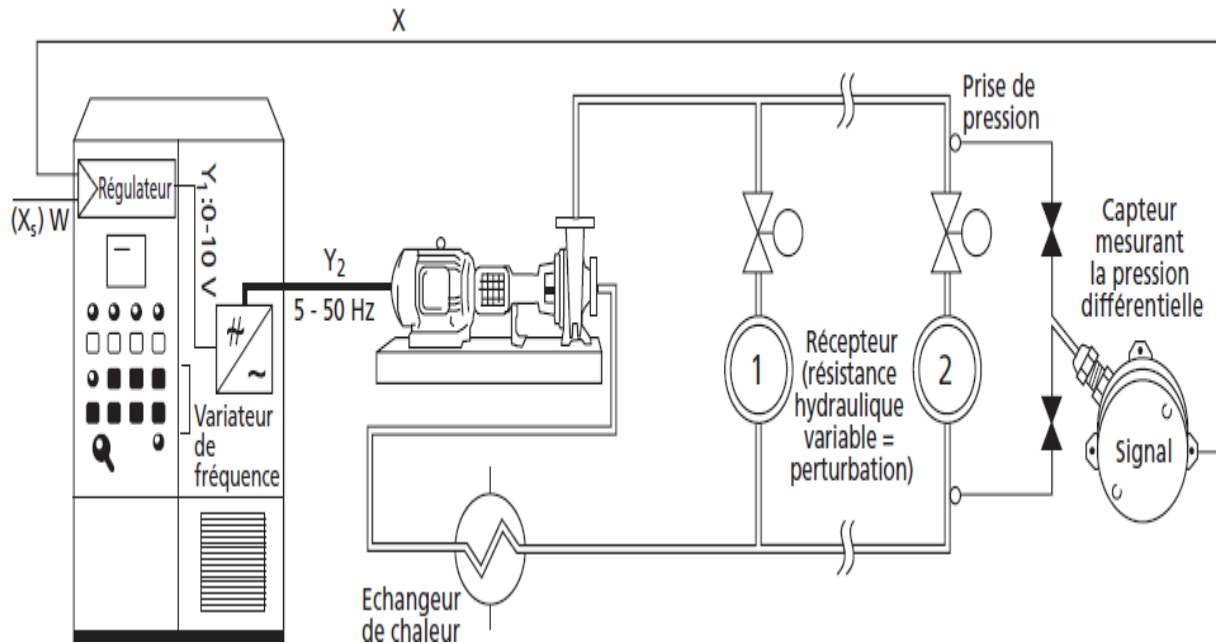


Figure II.25 : Exemple d'un schéma d'application

- Grandeur de commande **y<sub>1</sub>** : grandeur utilisée pour influencer de manière indirectement sur la grandeur de régulation (Génération des impulsions de commande de variateur).
- Grandeur de commande **y<sub>2</sub>** : grandeur utilisée pour influencer de manière directement sur la grandeur de régulation : tension et fréquence variable d'alimentation du moteur  $\Rightarrow$  variation de la vitesse de rotation  $\Rightarrow$  variation de débit.
- Capteur : transformer la mesure de la grandeur de régulation en un signal électrique, par exemple 0/4 - 20 mA ou 0/2 - 10 V.

#### II.4-2-2-b/ Régulation de la vitesse en fonction de la pression différentielle

Quand le débit est variable, la pression différentielle est la bonne grandeur de régulation. Dans des tuyaux remplis d'eau, les variations de pression se transmettent à la vitesse de 1000 m/s, elles sont donc mesurées de manière quasi immédiate. La pompe peut ainsi réagir rapidement aux différentes variations de débit, en modifiant instantanément sa vitesse de rotation.

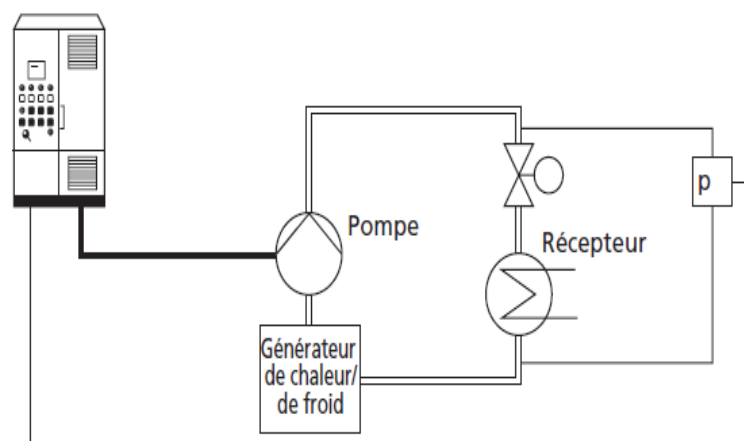


Figure II.26 : Exemple d'un schéma d'application

#### II.4-3/ Automatisation d'une installation à compresseur, le cas d'une centrale ou station d'air comprimé

Les compresseurs jouent un rôle important de l'alimentation des outils pneumatiques sur une chaîne de production et aussi pour le refroidissement et à la réfrigération.

Les réseaux d'air comprimé sont destinés à distribuer l'air comprimé aux différents points d'utilisation. L'air comprimé doit être de quantité, de qualité et de pression suffisante pour faire fonctionner les organes pneumatiques. L'air comprimé est utilisé dans beaucoup d'installations industrielles et est indispensable à la production.

La centrale d'air comprimé fonctionne sous le contrôle/commande des cartes électroniques basées sur le microprocesseur. La performance de l'exploitation est mise en question par les entreprises employant ces systèmes à carte électronique, conséquence de certains inconvénients qui le désavantagent:

**Économique** : les cartes électroniques sont très coûteuses, comme elles ne sont pas réparables, en cas de panne surtout en cas d'une carte grillée, donc obligation de les remplacer par de nouvelles cartes.

**Exploitation** : comme la carte électronique est un ensemble de circuits intégrés, formant un programme prédéterminé par un programmeur, alors ce système à carte n'offre pas la possibilité d'éventuelles modifications sur l'installation.

Pour remédier aux différents inconvénients cités précédemment, une solution pratique est le remplacement de la carte électronique par un API vu les avantages :

- Le coût raisonnable ;
- La flexibilité et adaptabilité à des éventuelles modifications dans la chaîne de production comme : l'installation d'un nouveau compresseur, dans ce cas en modifiant seulement le programme dans l'API ;
- La robustesse, car ils sont conçus pour fonctionner dans des ambiances industrielles très sévères : vibrations, humidité et ondes parasites.

#### II.4-3-1/ Composants et commande d'une centrale d'air comprimé

Les éléments principaux sont :

1- Compresseur (s) : chargé d'augmenter la pression de l'air.

2- Réservoir ou ballon de stockage : dans le cycle du traitement de l'air comprimé, les réservoirs ont deux fonctions essentielles :

- Fonction de stockage : équilibrer les variations de consommation d'air comprimé, réduit selon son dimensionnement les cycles marche/arrêt du compresseur et éventuellement, l'écart de pression de régulation par exemple un bar de plus augmente les coûts énergétiques presque de 6 %.
- Fonction de refroidissement : l'augmentation de la pression de l'air provoque une élévation de température de l'air qu'il faut refroidir. L'air comprimé se refroidit au contact avec les parois du réservoir. Ce phénomène participe au cycle d'épuration car une partie des condensats (40 à 60 %) précipite et s'accumule au fond du réservoir pour être ensuite évacuée par la purge.

3a et 3b- Purges : sont automatiques et temporisées, elles drainent les condensats, situés au fond du réservoir ou ceux issus du sécheur d'air.

- 4- Pré-filtre grade P ( $3\mu\text{m}$ ) : destiné à filtrer les particules liquides et solides supérieurs à 3 microns. Car à la sortie du compresseur l'air est chargé de d'eau, d'huile, de poussières et d'odeurs, ces éléments sont dus au processus de compression, ainsi qu'à la qualité de l'air aspiré.
- 5- By-pass : recommandé pour pouvoir effectuer les travaux de maintenance sur le sécheur sans interrompre la production d'air comprimé dans des situations bien définies.
- 6- Filtre grade S ( $0.1\mu\text{m}$ ) : destiné à filtrer les particules liquides et solides supérieurs à 0.1 microns.
- 7- Filtre grade A ( $0.03\mu\text{m}$ ) : filtre à charbon actif, recommandé pour éliminer les odeurs et vapeurs.
- 8- Sécheur d'air : il élimine la vapeur d'eau dans l'air afin de diminuer les risques de corrosion et de pollution de la canalisation.
- 9- Séparateur eau/huile : il sépare l'eau des résidus d'huile, c'est une solution fiable et économique pour que les rejets soient en conformité avec la législation.

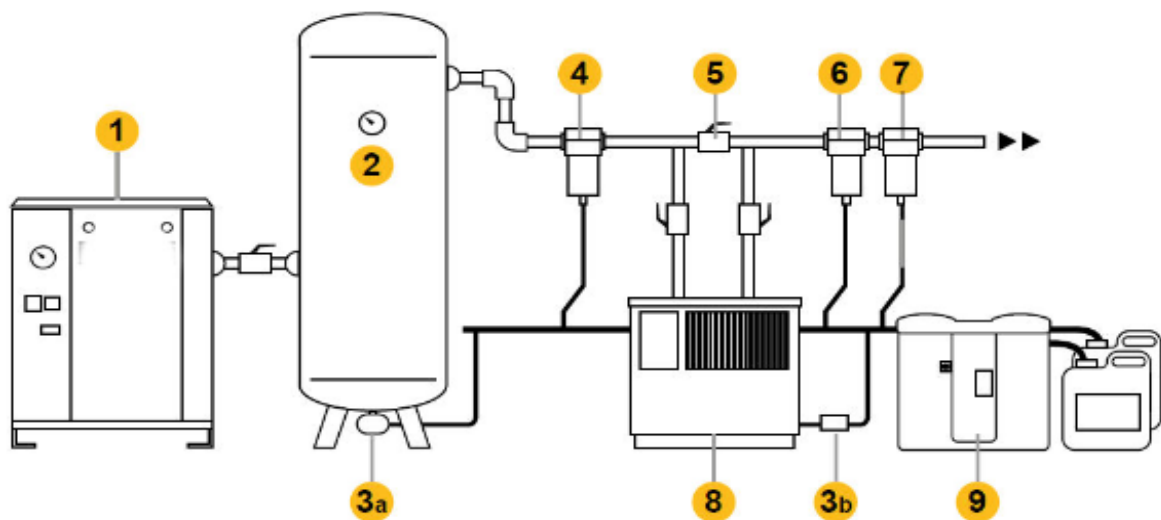


Figure II.27 : Schéma simplifié d'une centrale d'air comprimé

Il existe plusieurs modes de régulation d'un compresseur isolé parmi :

**En charge / À vide** : le compresseur est délesté lorsque la pression est atteinte. Ce mode de régulation fonctionne généralement avec une vanne à l'aspiration, qui se ferme complètement lorsque le point de consigne haut est atteint ; le moteur continue à tourner mais dans le vide. Lorsque la pression descend en-dessous du point de consigne bas, la vanne s'ouvre totalement et le compresseur fonctionne à charge nominale. Le moteur s'arrête si la durée du fonctionnement à vide dépasse un temps prédéfini, généralement, entre 15 et 20 minutes. La puissance appelée à vide est de l'ordre de 20% pour les compresseurs à piston, est d'autant plus importante que le temps de fonctionnement à vide est long.

Les stations d'air comprimé se composent généralement de plusieurs compresseurs de mêmes tailles ou de tailles différentes. Pour les coordonner entre les compresseurs, il faut une commande prioritaire qui adapte la production d'air comprimé aux besoins précis de l'utilisateur, tout en assurant le meilleur rendement énergétique possible surtout pour éviter les marches à vide du compresseur, c'est la régulation en cascade. C'est une technique simple pour un parc de compresseurs, elle est basée sur le contrôle de la pression avec la mise en place de plusieurs seuils.

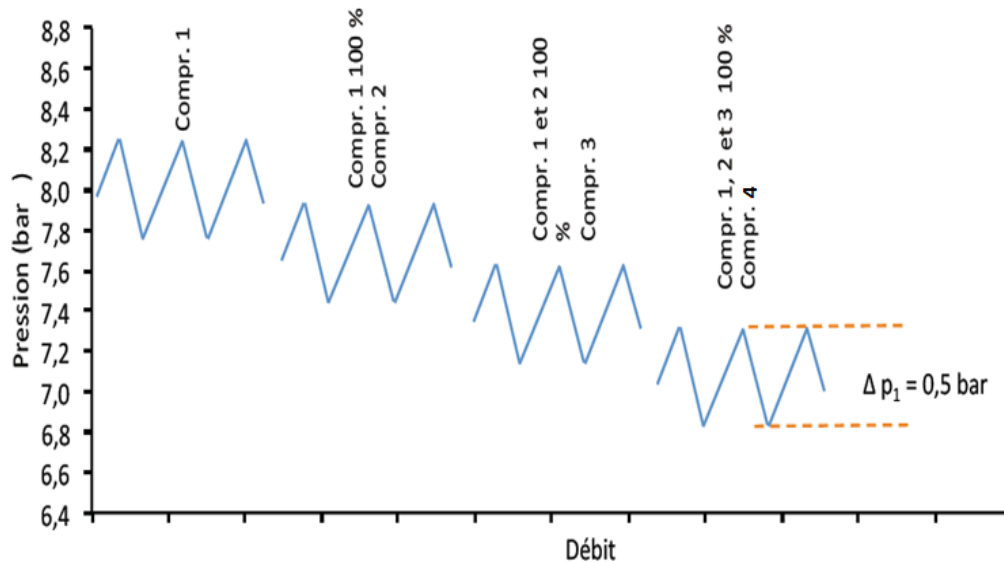


Figure II.28 : Différents seuils de la régulation en cascade pour un parc de quatre compresseurs

Le compresseur 1 fonctionne seul pour une demande faible en air comprimé ; la pression évolue entre deux points de consigne. Si la demande augmente au-delà de la capacité du compresseur 1, la pression chute provoque la mise en route du compresseur 2, après un écart de pression de  $\Delta p_2$ . Dans cette plage de fonctionnement, le compresseur 1 fonctionne à 100 % de charge, tandis que le compresseur 2 fait l'appoint. L'écart de pression  $\Delta p_2$  est suffisamment grand pour éviter un chevauchement intempestif des deux compresseurs. De manière similaire si la pression continue à chuter, le compresseur 3 se met en marche, ainsi de suite pour les compresseurs suivants. Chaque compresseur fonctionne dans une plage de pression donnée  $\Delta p_1 = 0,5$  bar suffisamment large pour éviter un nombre de cycles marche-arrêt trop important.

**Exemple** : le cas d'une usine de fabrication de bouteilles de verre qui utilise de grandes quantités d'air comprimé. C'est le seul domaine où il est possible de modifier notablement la consommation électrique qui représente environ 2000 kW sur un total de 6000 kW. La centrale d'air comprimé comprend : 2 compresseurs de 400 kW, 3 compresseurs de 300 kW et 3 compresseurs de 250 kW. La mise en service ou l'arrêt des groupes se fait manuellement pour maintenir la pression d'air entre 2,4 et 2,8 bars. Maintenant, ce réglage se fait par un automate. La pression sera maintenue à  $2,6 \pm 0,05$  bars et l'automate choisira le compresseur à démarrer ou à arrêter en limitant la consommation d'énergie. On a une économie d'énergie d'environ 2,5% de la consommation globale soit plus de 1000000 kWh/an.

Théoriquement, lorsqu'un parc comporte de multiples compresseurs d'air, un ou plusieurs compresseurs à vitesse fixe devraient assurer la demande de base en air comprimé, elle permet de faire fonctionner un ensemble de compresseurs à pleine charge, là où leur rendement est le plus élevé. Un compresseur à vitesse variable, répondant alors aux demandes d'air variables ou momentanées. Les variateurs de fréquence avec contrôle de couple direct (DTC) réagissent rapidement aux différences de pression de refoulement, disposent du contrôle de couple nécessaire pour maintenir

la pression stable depuis les demandes de couple élevé au démarrage jusqu'à l'utilisation continue. Les variateurs aident à réaliser des économies sur la consommation d'énergie à des charges partielles. Les variateurs modifieront la vitesse du moteur du compresseur pour l'adapter à la demande actuelle. Ils réagissent rapidement aux demandes.

Le compresseur à vitesse variable ne doit jamais fonctionner à moins de 20% de sa puissance nominale, puisqu'il doit pouvoir moduler la plage entre 20% et 120% de la puissance nominale d'un compresseur à vitesse fixe.

#### ***II.4-4/ Automatisation d'une installation à ventilateur, le cas pour une exploitation minière souterraine***

Nous comprenons qu'un contrôle fiable et efficace des ventilateurs est essentiel pour fournir efficacement un débit d'air, permettant de ventiler les souterraines minières et de réguler la température. Les ouvriers ont besoin d'une ventilation fiable pour travailler dans des conditions aussi bonnes que possible pour leur santé et sécurité. Cela signifie que, outre le contrôle de la température, toutes les odeurs toxiques et autres gaz et particules présents dans l'air doivent être remplacés par de l'air frais. Les coûts de fonctionnement de la ventilation représentent souvent une proportion significative des coûts globaux d'énergie électrique du site ; ainsi en ventilant le plus efficacement possible, les coûts d'exploitation sont sensiblement réduits. La ventilation standard ne peut pas être programmée pour fonctionner à un certain pourcentage donné. Ainsi, lorsque le ventilateur démarre, il démarre à 100% de sa capacité.

Les variateurs de fréquence sont largement reconnus comme la méthode la plus flexible, la plus économe en énergie et la moins exigeante en termes, de maintenance pour le contrôle des ventilateurs destinés à la ventilation des mines. Ils sont utilisés pour contrôler le débit d'air des ventilateurs et peuvent être facilement intégrés dans les systèmes de contrôle de la ventilation qui sont déjà installés.

La ventilation avancée est un module de ventilation qui fournit l'air proportionnellement au besoin, permettant ainsi de réaliser d'importantes économies au niveau des coûts d'énergie.

L'opérateur effectue les relevés de débit d'air, fourni par chacun des ventilateurs et ajoute ces informations au système. Les données liées à l'air requis par les véhicules et les travailleurs doivent aussi être ajoutées.

Ce besoin diffère selon le mode de fonctionnement du véhicule et du nombre d'ouvriers présents. Par exemple, la présence d'un véhicule à moteur diesel nécessite une plus grande circulation d'air qu'un véhicule électrique. Sur la base de ces informations, l'API calcule la vitesse à laquelle les ventilateurs devraient fonctionner, dans une zone donnée et envoie la commande au variateur de fréquence pour varier la vitesse en conséquence.





**Figure II.29 : Emplacement des systèmes de ventilation dans une exploitation minière souterraine**

## ***Introduction***

Depuis la plus haute antiquité, les hommes ont cherché un moyen de favoriser le déplacement vertical des charges. C'est en 1853, que naît véritablement le concept d'ascenseur moderne. Dans les années 50 l'ascenseur était peu répandu et était considéré comme un équipement de luxe. Les ascenseurs qui sont fabriqués et installés dans les années 90 ont subi une nouvelle évolution : plus rapides, plus sûrs et plus confortables. L'ascenseur d'aujourd'hui est plus communicant, les fabricants développent des systèmes d'information et de communication de plus en plus performants, permettant un dialogue avec l'extérieur. Avec ces systèmes associés à une organisation adaptée du service de maintenance, il est possible de mieux satisfaire les exigences des clients. Ces systèmes de téléalarme ou de télésurveillance permettent à la personne bloquée en cabine de lancer un appel au service de dépannage rapide et de recevoir des informations jusqu'à l'arrivée d'un technicien.

## ***III.1/ Définitions***

### ***III.1-1/ Ascenseur***

Appareil élévateur installé à demeure, desservant des niveaux définis, comportant une cabine, dont les dimensions et la constitution permettent manifestement l'accès des personnes.

### ***III.1-2/ Ascenseur de charge***

Ascenseur principalement destiné au transport de charges qui sont généralement accompagnées par des personnes. En particulier, les appareils élévateurs servant uniquement au transport des objets, lorsque les dimensions et la constitution de leur cabine permettent l'accès des personnes et permettent aux personnes d'atteindre les boutons de commande, doivent être classés dans la catégorie "Ascenseurs" et non "Monte charge".



***Figure III.1 : Exemple d'un monte charge***



### ***III.1-3/ Monte voitures***

Ascenseur dont, la cabine est dimensionnée pour le transport de véhicules automobiles de tourisme. Si les voitures sont accompagnées par des personnes, la réglementation est identique à celle des ascenseurs.



***Figure III.2 : Exemple d'une monte voitures***

### ***III.1-4/ Ascenseur pour le transport de personnes handicapées***

Toute installation installée à demeure, construite et utilisée principalement, pour le transport des personnes handicapées, debout ou en fauteuil roulant avec ou sans accompagnateur, sont à considérer comme ascenseurs pour le transport de personnes handicapées :

- Appareils élévateurs verticaux à plate forme;
- Appareils élévateurs à cabine.



***Figure III.3 : Exemple d'un appareil élévateur à plate forme***

### **III.1-5/ Ascenseur sur plan incliné**

Tout ascenseur sur plan incliné, est utilisé principalement, pour le transport de personnes à mobilité réduite. Cet appareil peut être équipé d'un siège ou d'une plate forme pour le transport d'une personne en position debout ou d'une plate forme pouvant recevoir un fauteuil roulant.

Les ascenseurs sur plan incliné peuvent être installés dans des cages d'escaliers droites ou présentant des virages.



**Figure III.4 : Exemple d'un ascenseur sur plant incliné**

### **III.2/ Catégories d'ascenseurs**

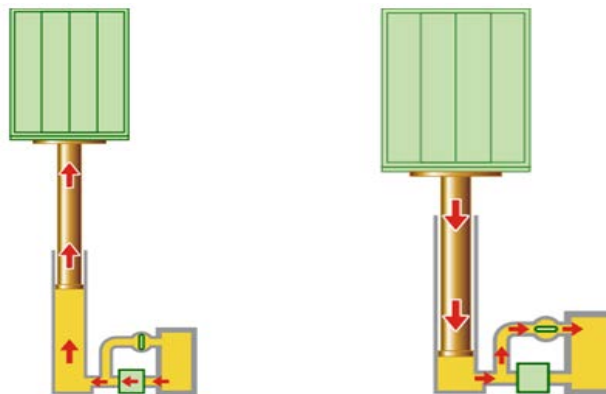
On distingue trois grandes familles d'ascenseurs :

- Ascenseur hydraulique ;
- Ascenseur à vis ;
- Ascenseur à traction à câble.

Ces types d'ascenseurs utilisent l'énergie électrique pour, déplacer verticalement la cabine d'ascenseur.

#### **III.2-1/ Ascenseur hydraulique**

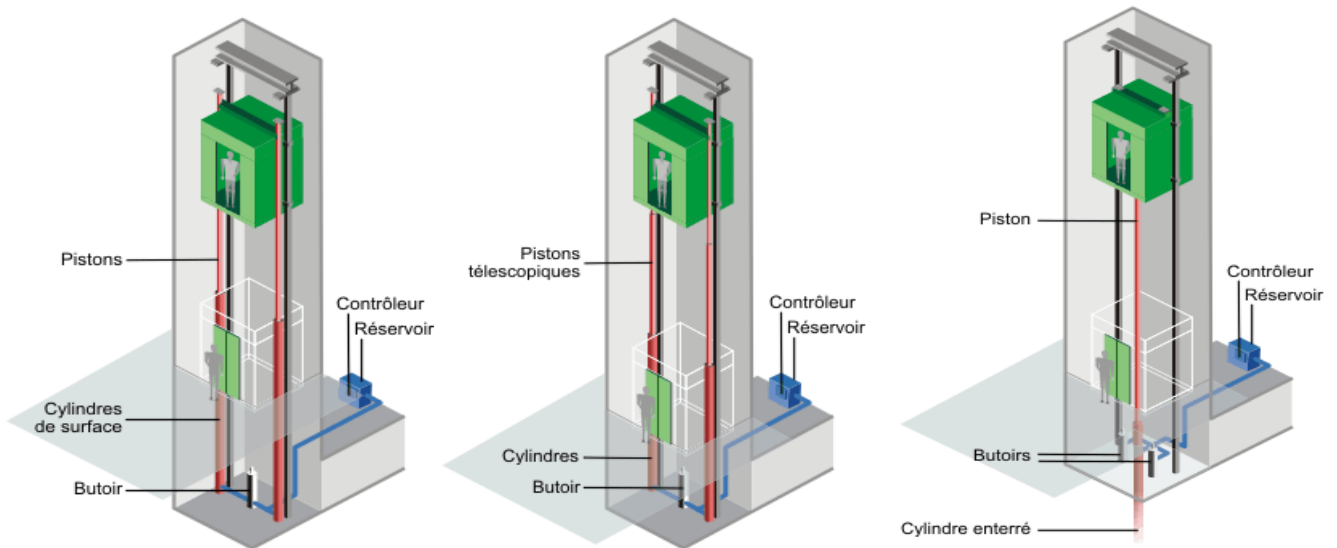
Comme toute machine hydraulique, la pompe met sous pression l'huile qui pousse le piston hors du cylindre vers le haut. Lorsque la commande de descente est programmée, le by-pass (Vanne) de la pompe permet de laisser sortir l'huile du cylindre vers le réservoir.



**Figure III.5 : Principe de fonctionnement**

Les ascenseurs hydrauliques sont utilisés en général, pour satisfaire des déplacements relativement courts de l'ordre de 15 à 18 m maximum. Plusieurs modèles existent sur le marché :

- À cylindre de surface ;
- Télescopiques à cylindre de surface ;
- À cylindre enterré.



**Figure III.6 : Modèles d'ascenseurs hydrauliques**

### **III.2-1-1/ Constitution**

Ils se composent principalement de :

- Cabine ;
- Guides ;
- Ensemble pistons-cylindres hydrauliques ;
- Moteur électrique accouplé à une pompe hydraulique et d'un contrôleur ;
- Réservoir d'huile.

### **III.2-1-2/Avantages et inconvénients**

✓ Les principaux avantages :

- Précision au niveau du déplacement ;
- Réglage facile de la vitesse de déplacement ;
- Charge importante ;
- Ne nécessite pas un local de machinerie ;

✓ Les principaux inconvénients :

- Course verticale limitée à une hauteur entre 15 et 18 m ;
- Vitesse réduite ;
- Sécurité incendie compliquée à cause de la quantité d'huile ;
- Risque de pollution du sous-sol.

### **III.2-2/ Ascenseurs à vis**

Ascenseur dont l'entraînement se fait au départ d'un écrou solidaire de la cabine. A l'aide d'un moteur, on fait tourner l'écrou autour d'une vis sans fin qui est placée sur toute la hauteur de l'immeuble.

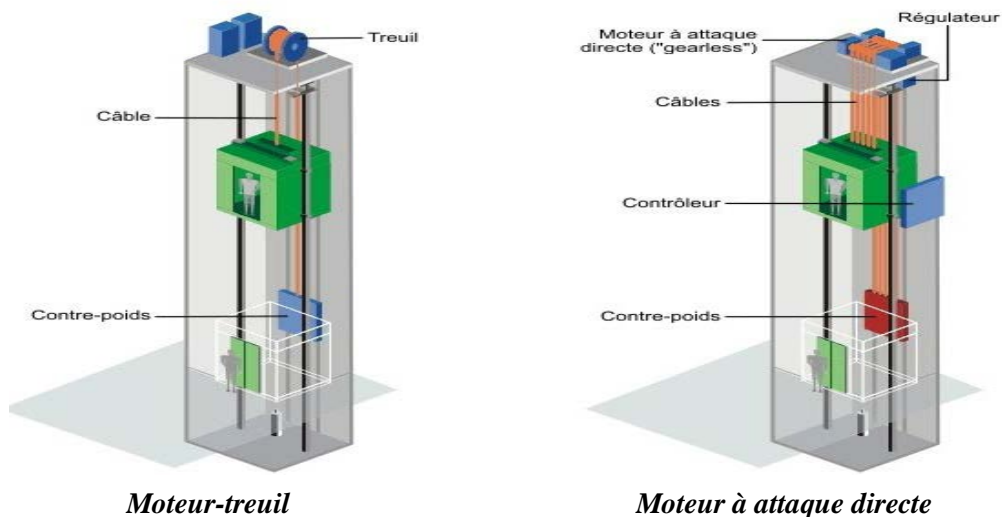


**Figure III.7 : Mécanisme d'un ascenseur à vis**

### **III.2-3/ Ascenseurs à traction à câbles**

C'est le type d'ascenseurs le plus fréquemment utilisé, notamment dans les bâtiments tertiaires. Ils se différencient entre eux selon le type de motorisation :

- À moteur-treuil à vis sans fin ;
- À moteur-treuil planétaire ;
- À moteur à attaque directe, couramment appelé "Gearless" ou sans treuil.



**Figure III.8 : Modèles d'ascenseur à traction à câbles**

## **III.3/ Types de motorisations d'ascenseurs à traction à câbles**

### **III.3-1/ Motorisation avec vis sans fin**

Ce type de motorisation est utilisé dans beaucoup de bâtiments, mais à l'heure actuelle, elle est de plus en plus abandonnée. Dans ce cas, une poulie de traction est mise en rotation par des engrenages, reliés au moteur par l'intermédiaire d'une vis sans fin. La vis sans fin provoque



de nombreuses pertes mécaniques, ce qui rend la consommation électrique plus importante. Cette motorisation est encombrante et demande d'être installée sur le toit.



**Figure III.9 : Exemple d'une vis sans fin**

Les moteurs électriques couplés au treuil à vis sans fin étaient généralement, des moteurs à courant continu à excitation indépendante ou shunt. Les moteurs électriques à courant alternatif utilisés sont en principe, des moteurs à deux vitesses : au démarrage, la vitesse est plus lente c.à.d. la petite vitesse, pour atteindre la vitesse de déplacement optimale, le moteur passe en seconde vitesse en provoquant un léger choc d'accélération.

Les moteurs-treuil à vis sans fin présentent les avantages suivants :

- Couple élevé ;
- Grande plage de variation de vitesse ;
- Précision dans les déplacements et sur la régulation de vitesse.

Ils ont les inconvénients suivants :

- Entretien important ;
- Efficacité énergétique faible.

### **III.3-2/ Motorisation avec réducteur de vitesse**

Dans ce type de motorisation, la poulie est reliée au moteur par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse, ce type est nommé le réducteur 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 de déplacement souhaitée.

Étant donné que le frottement dans ce genre de réducteur est très faible, le rendement de ce système est très élevé. En effet, les treuils planétaires ont un rendement presque de 98%. S'il est accouplé à un moteur performant, l'ensemble peut atteindre un rendement global de l'ordre de 80%, de ce fait, la consommation énergétique est fortement diminuée.

Les réducteurs planétaires peuvent être accouplés à des moteurs électriques : à courant continu, à courant alternatif asynchrone à deux vitesses et à courant alternatif asynchrone.

Ce type de motorisation présente les principaux avantages suivants :

- Couple important ;
- Grande plage de variation de vitesse ;
- Rendement énergétique important ;
- Précision dans les déplacements et sur la régulation de vitesse.

Le principal inconvénient réside dans son entretien nécessitant une main d'œuvre qualifiée.



**Figure III.10 : Exemple d'un réducteur planétaire**

### **III.3-3/ Motorisation sans réducteur de vitesse ou "Gearless"**

L'ascenseur Gearless a comme particularité, de ne pas posséder de réducteur de vitesse. En effet, le moteur est équipé d'un variateur de fréquences qui permet de faire varier sa vitesse. La poulie est donc reliée directement sur le moteur. Grâce au variateur de fréquences, le moteur tourne à des régimes optimisés, ce qui réduit la consommation électrique.

Ce système de motorisation possède un bon rendement car il est de l'ordre de 80%. Ce type d'ascenseur est généralement, installé dans les grands bâtiments car il permet d'atteindre des vitesses en course de l'ordre de 17 m/s.

✓ Les principaux avantages :

- Absence de limite de hauteur du bâtiment ;
- Rapidité de déplacement ;
- Grande plage de variation de vitesse ;
- Efficacité énergétique importante ;

✓ Les principaux inconvénients :

- Nécessite un local de machinerie en toiture ;
- Exigence très importante sur l'entretien ;
- Nécessite de tenir compte du poids de la cabine, des câbles, du contrepoids, de la structure de la salle des machines et d'autres équipements. Le poids total repose sur la structure du bâtiment et se reporte au niveau des fondations.

Une analyse effectuée sur les consommations d'une motorisation classique par rapport à une motorisation innovante :

**Tableau III.1 : Résumé d'une comparaison entre deux types de motorisation**

<i>Paramètres</i>	<i>Type de motorisation</i>	
	<i>Avec réducteur (Classique)</i>	<i>Sans réducteur (Gearless)</i>
<i>Vitesse de déplacement de la cabine [m/s]</i>	<b>1</b>	<b>1</b>
<i>Charge de l'ascenseur [kg]</i>	<b>630</b>	<b>630</b>
<i>Puissance du moteur électrique [kW]</i>	<b>5,5</b>	<b>3,3</b>
<i>Nombre de courses pour trois mois</i>	<b>27444</b>	<b>27444</b>
<i>Consommation électrique pour trois mois [kWh/3 mois]</i>	<b>958</b>	<b>447</b>

✓ **D'après l'étude il est clair que l'économie est importante environ 53%.**

### **III.4/ Organes principaux dans les ascenseurs**

#### **III.4-1/ Machinerie**

Local technique où se trouvent les différents équipements de l'ascenseur. Il se situe en haut de la gaine, dans le cas d'un ascenseur à traction, mais se trouve en bas de la gaine pour l'ascenseur hydraulique.



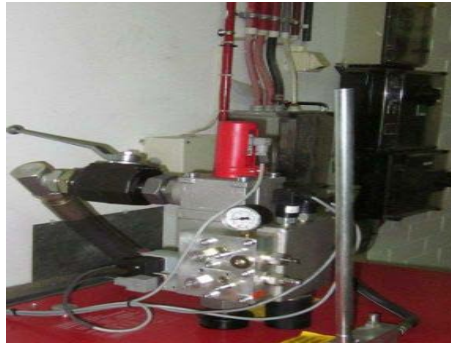
#### **III.4-2/ Moteur pompe**

Ensemble moteur électrique et pompe destiné à mettre sous pression l'huile dans le cas d'un ascenseur hydraulique. Le moteur est immergé dans l'huile.



#### **III.4-3/ Centrale hydraulique**

Il s'agit d'un ensemble constitué d'un réservoir d'huile, d'un moteur pompe et d'un groupe d'électrovannes. Ce dispositif met l'huile sous pression à une valeur environ de 40 bars pour l'injecter dans le vérin, via un jeu de vannes, afin de pousser le piston vers le haut pour monter la cabine. Pour descendre, c'est le poids de la cabine et de sa charge qui va par gravité faire redescendre la cabine. Les vannes servent à moduler la vitesse de l'ascenseur. Certaines vannes sont soit ouvertes ou fermées, Sur les centrales hydrauliques plus récentes, on place une seule vanne avec une régulation de son angle d'ouverture qui permet une meilleure maîtrise du débit d'huile et donc de la vitesse de l'ascenseur.



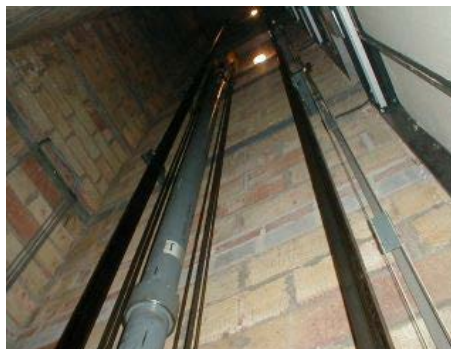
#### **III.4-4/ Piston**

Le piston est la partie mobile de l'ensemble vérin/piston qui va pousser la cabine sous la pression de l'huile qui est comprimée par le moteur pompe de la centrale hydraulique.



#### **III.4-5/ Vérin**

Le vérin est la partie fixe qui va accueillir le piston, l'huile est mise sous pression à la base du vérin par la centrale hydraulique ce qui propulse le piston vers le haut et donc la cabine. L'étanchéité entre vérin et piston est assurée par un jeu de joints.





#### **III.4-6/ Moteur de traction**

Moteur électrique destiné à déplacer la cabine dans le cas d'un ascenseur à traction.



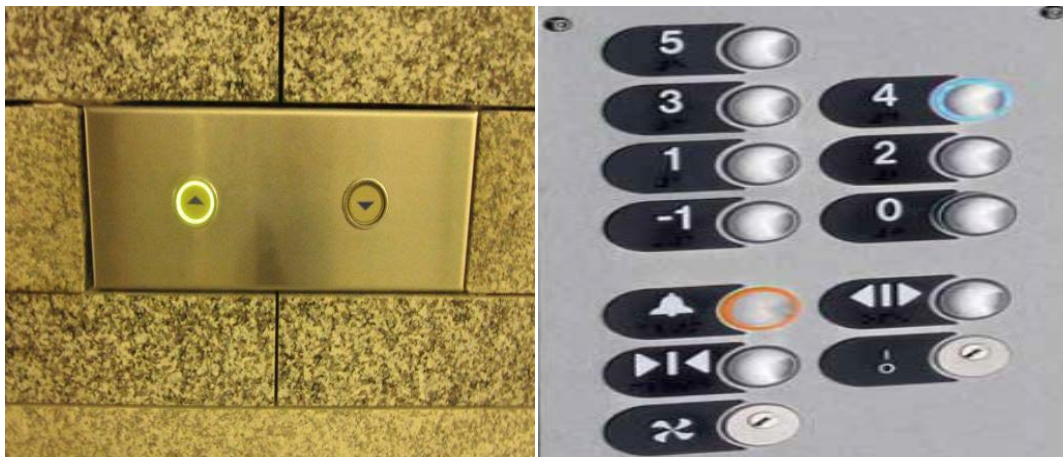
#### **III.4-7/ Moteur de porte**

Il s'agit d'un moteur électrique qui sert à ouvrir et fermer les portes de la cabine.



#### **III.4-8/ Boîtes à boutons**

Plaque de commande, comprenant les boutons d'appel et les boutons d'envoi et d'éventuels éléments de signalisation et d'information, qui se trouve sur chaque palier et dans la cabine respectivement.



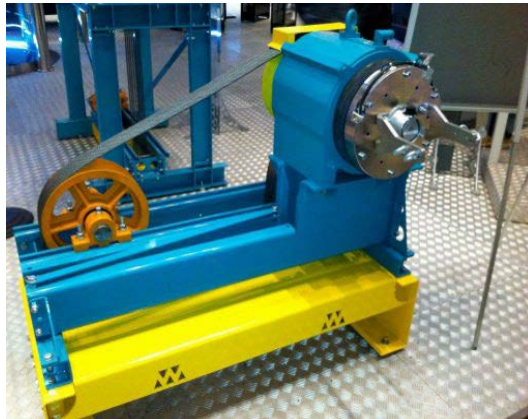
#### **III.4-9/ Poulie de traction**

Poulie équipée généralement, de gorges taillées en forme de V de manière, à agripper les câbles de traction.



#### **III.4-10/ Poulie de déflexion**

Poulie placée à proximité de la poulie de traction, permettant d'écarter les câbles de traction.



#### **4-11/ Amortisseur**

Dispositif placé en bas de la gaine et destiné à amortir le choc de la cabine ou du contrepoids si celle-ci dépasse son niveau extrême bas. En fonction de la vitesse, cet amortisseur de type statique (Ressort) ou dynamique (Hydraulique) selon la vitesse de l'ascenseur. En cas de vitesse supérieur à 1.6 m/s, il sera de type dynamique.



Amortisseurs à ressort



Amortisseurs hydrauliques

#### **III.4-12/ Câbles de traction**

Câbles en acier auxquels sont suspendus la cabine et le contrepoids. Ces câbles passent par les gorges de la poulie de traction et mis en mouvement par cette dernière, ce qui déplace la cabine dans la gaine. Leur nombre et leur diamètre sont dépendants de la charge qu'ils supportent, mais aussi de l'adhérence requise dans les gorges. En effet, les câbles ne peuvent pas glisser dans les gorges sans quoi, le déplacement de la cabine ne serait plus maîtrisé.



#### **III.4-13/ Contrepoids**

Le contrepoids est constitué d'un cadre en acier rempli de poids en fonte, en béton ou en acier. Pour un fonctionnement correct de l'ascenseur, on parle presque toujours d'équilibrage à 50%. Cela signifie que le contrepoids doit peser le poids de la cabine vide plus la moitié de la charge utile. Soit un ascenseur dont la cabine vide pèse 800 Kg et dont la charge utile est de 1000 Kg :

$$\text{poids du contrepoids} = 800 \text{ Kg} + 1000/2 \text{ Kg} = 1300 \text{ Kg}.$$


#### **III.4-14/ Treuil**

Ensemble du mécanisme d'entraînement des câbles de traction de la cabine. Il se compose essentiellement de :

- Moteur et de son accouplement ;
- Système de freinage ;
- Réducteur de vitesse.



**III.4-15/ Cabine**

« Boite » en bois ou en métal qui accueille les passagers. C'est quasi l'unique partie visible de l'ascenseur pour les usagers.



**III.4-16/ Fin de course**

Contact électrique qui coupe l'alimentation du moteur de traction si la cabine dépasse les extrémités de la gaine.



**III.4-17/ Gaine**

Tunnel vertical dans lequel se déplacent la cabine et le contrepoids.



#### **III.4-18/ Armoire de commande**

Armoire contenant le matériel électrique et les cartes électroniques, destiné à faire fonctionner l'ascenseur. C'est en quelque sorte le cerveau de l'ascenseur. Le rôle du variateur de vitesse est de moduler la vitesse du moteur de l'ascenseur, en faisant varier la fréquence et la tension d'alimentation du moteur. Comme sur un moteur à courant alternatif, la vitesse de rotation est directement fonction de la fréquence et la tension qui lui est appliquée, on pourra se servir de cette particularité pour faire accélérer et décélérer la vitesse des ascenseurs. De plus, grâce au fonctionnement en douceur qu'il assure, le variateur de fréquence a pour avantage de préserver la durée de vie des treuils par l'absence des chocs.



#### **III.4-19/ Volant**

Le rôle du volant est de faire bouger manuellement le moteur et donc la cabine quand par exemple des personnes sont bloquées dans la cabine suite à une coupure de courant.



#### **III.4-21/ Commande de rappel**

Boitier électrique situé dans la salle des machines et servant au personnel technique à déplacer la cabine.



#### **III.4-22/ Porte palière**

C'est la porte externe de l'ascenseur. Chaque ascenseur est équipé d'autant de portes palières que de nombre d'étages. Elles peuvent être commandées manuellement ou automatiques, coulissantes à ouverture centrale ou latérale. Elles doivent être équipées d'un dispositif, empêchant leurs ouvertures si la cabine n'est pas sur le niveau.

#### **III.4-23/ Porte cabine**

Porte à fermeture généralement automatique destinée à confiner l'utilisateur dans la cabine pendant le déplacement de celle-ci, lui interdisant tous contact avec les parties extérieures à la cabine.

#### **III.4-24/ Éclairage de la gaine**

Dispositif d'éclairage permettant d'éclairer la gaine ce qui permet aux techniciens de travailler dans des conditions de sécurité d'une manière pratique. Seuil minimum : 50 Lux.

#### **III.4-25/ Éclairage de la cabine**

Il s'agit de l'appareil d'éclairage à l'intérieur de la cabine. Seuil minimum : 50 Lux

#### **III.4-26/ Éclairage des paliers**

On parle ici du niveau d'éclairage en un point précis, au niveau de la porte palière à une hauteur de 1 mètre et ceci pour chaque étage. Seuil minimum : 50 Lux.

#### **III.4-27/ Éclairage de salle de machines**

Dispositif d'éclairage dans le local technique. Seuil minimum : 100 Lux.

### **III.5/ Organes de sécurité dans les ascenseurs**

#### **III.5-1/ Limiteur de charge**

La charge qu'un ascenseur peut transporter, qui est définie lors de la conception de ce dernier. Il est donc nécessaire de prévoir un système de limitation de charge empêchant son utilisation en cas de surcharge. C'est un dispositif électronique à base d'un capteur de force qui bloque le fonctionnement de l'ascenseur quand il est surchargé. Contrairement à ce que beaucoup de gens pensent, beaucoup d'appareil ne sont pas équipés de cette sécurité. Soyez donc responsable avant de prendre l'ascenseur avec trop de personnes.

#### **III.5-2/ Limiteur de pression**

Dispositif de sécurité, il va bloquer le fonctionnement de l'ascenseur si la pression qui sort de la centrale hydraulique est trop importante.

#### **III.5-3/ Vanne parachute**

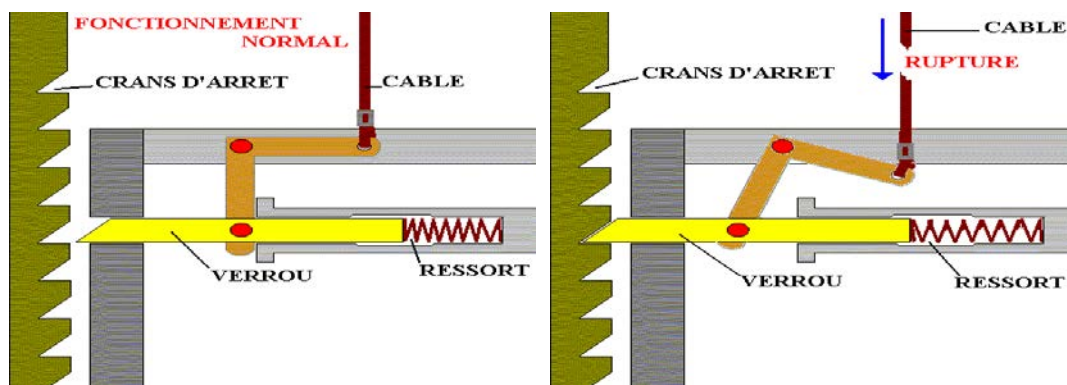
La vanne parachute est placée au pied du vérin à la jonction avec le tuyau provenant de la centrale hydraulique. En cas de fuite d'huile importante et donc de descente incontrôlée de la cabine, la vanne parachute va se fermer automatiquement afin de bloquer l'ascenseur. C'est un peu l'équivalent du parachute sur un ascenseur à câbles.

#### **III.5-4/ Limiteur de vitesse**

Basé sur une poulie, cette poulie est entraînée par un câble fixé à la cabine. Si la cabine se déplace à une vitesse excessive entre 15 et 30% de plus, cette poulie va se bloquer. Ce blocage va tendre le câble du limiteur, ce qui va entraîner une traction sur le mécanisme du parachute sous la cabine.

#### **III.5-5/ Parachute**

Mécanisme permettant de bloquer la cabine en cas de survitesse anormale. Ce parachute est activé par le limiteur de vitesse. Il existe un modèle à prise directe pour les ascenseurs à vitesse réduite et à prise amortie pour les ascenseurs à vitesse plus élevée.



### **III.6/ Types d'ascenseurs**

- ✓ **Type 480** : ascenseur de charge nominale de 480 kg (Maximum 6 personnes) comportant une cabine de petites dimensions de surface de 1,1m x 1,1m.
- ✓ **Type 630** : ascenseur de charge nominale de 630 kg (Maximum 8 personnes), avec une surface de cabine de 1,1m x 1,4m, permettant le transport des fauteuils roulants.
- ✓ **Type 1000** : ascenseur de charge nominale de 1000 kg (Maximum 13 personnes) comportant une cabine de grandes dimensions de 1,1m x 2,1m permettant le transport des brancards pour les malades.

### **III.7/ Détection de la position de la cabine**

L'électronique offre maintenant un procédé plus précis et plus robuste. Un capteur photoélectrique est fixé sur un côté de la cabine, des écrans sont disposés dans la gaine de façon qu'ils coupent le faisceau optique généré par le capteur lors de son passage. Chaque coupeur provoque la génération d'une impulsion. Ces impulsions sont acheminées dans un compteur/décompteur pour définir le numéro de l'étage

### **III.8/ Couple et puissance**

Le couple de démarrage de la motorisation doit être suffisant pour mettre en mouvement la charge de l'ascenseur. Les caractéristiques de la motorisation sont une corrélation entre : le couple, la vitesse et la puissance mécanique.

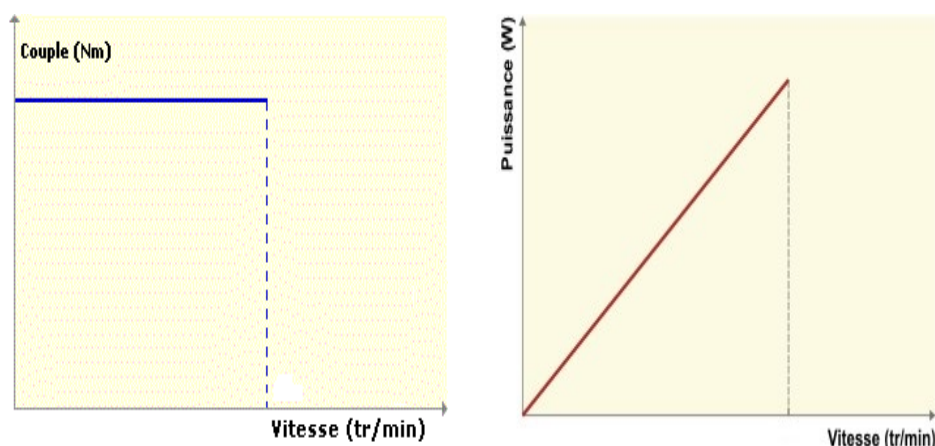
Suivant le type de motorisation, les profils des courbes du couple et de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation sont spécifiques. Typiquement :

Pour le couple :

- Les motorisations à traction ont un profil de couple constant, quelle que soit la vitesse de rotation.
- Les motorisations hydrauliques ont un profil de couple quadratique c.à.d.  $C = f(\Omega^2)$ .

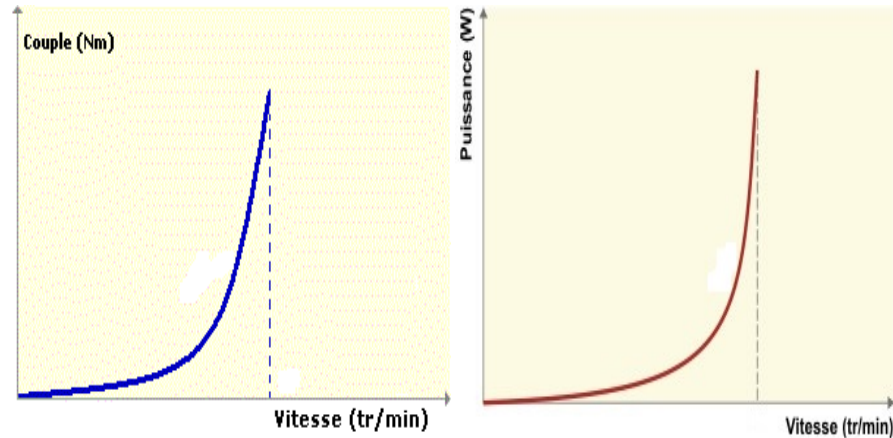
Pour la puissance :

- Les motorisations à traction ont un profil de puissance proportionnel à la vitesse de rotation.
- Les motorisations hydrauliques ont un profil de puissance proportionnel au cube de la vitesse de rotation de la roue.



**Figure III.11 : Courbes caractéristiques pour une motorisation à traction**





**Figure III.12 : Courbes caractéristiques pour une motorisation hydraulique**

### **III.8-1/ Calcul de la puissance d'un ascenseur à traction à câbles**

D'une manière simplifiée, le calcul du couple et de la puissance, nécessaires à la sortie d'une motorisation à traction est donné comme suit :

$$C = m \cdot \gamma \cdot r$$

$C$  : couple [N.m]

$m = m_1 - m_2$  : charge de l'ascenseur [kg]

$m_1$  : masse de la cabine

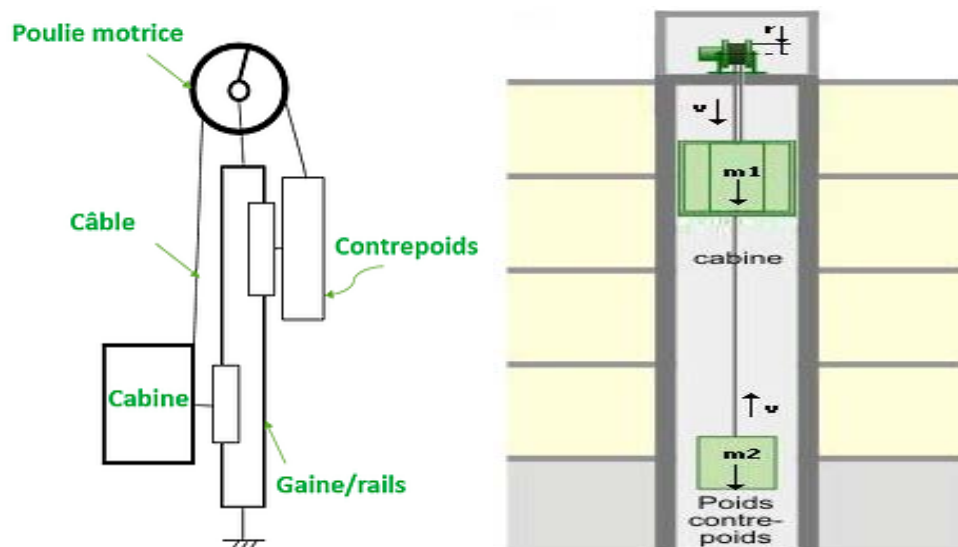
$m_2$  : masse du contrepoids.

$\gamma = v / t$  : accélération de la cabine [ $m/s^2$ ]

$v$  : vitesse de déplacement de la cabine et du contrepoids

$t$  : temps d'accélération

$r$  : rayon de la roue d'entraînement [m]



**Figure III.13 : Représentation simplifiée d'un ascenseur à traction**

La puissance mécanique à l'arbre du moteur est donnée par :

$$P = C \cdot \Omega = C \cdot v / r, \quad P : \text{la puissance [W]}, \quad C : \text{le couple [N.m]}, \quad \Omega : \text{la vitesse angulaire [rad/s]}$$

### **III.8-2/ Calcul de la puissance d'un ascenseur hydraulique**

#### **III.8-2-1/ Force d'un vérin**

$$F = p \cdot S, \quad S = \pi \cdot d^2 / 4$$

$F$  : force en Newton,  $p$  : pression en Pascal,  $S$  : section en mètre carré,  $d$  : diamètre du cylindre en mètre.

#### **III.8-2-2/ Puissance d'une pompe**

$$P_h = \Delta p \cdot Q$$

$P_h$  : puissance hydraulique [W],  $\Delta p$  : différence de pression entre l'aspiration et le refoulement [Pa],  
 $Q$  : débit volumique [m<sup>3</sup>/s]

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 ainsi que des caractéristiques du fluide (Viscosité, température).

### **III.8-3/ Évaluation de la consommation en énergie électrique le cas d'un ascenseur à traction**

La consommation d'un ascenseur comprend trois composantes :

$$E = E_1 + E_2 + E_3$$

- $E_1$  : consommation de l'éclairage
- $E_2$  : consommation de l'armoire de contrôle commande
- $E_3$  : consommation du moteur

Le trajet d'ascenseur comprend toujours un aller et un retour, l'un des deux trajets s'effectuant le plus souvent à vide.

Les mesures montrent que la majorité de la consommation d'énergie s'effectue à la descente, et qu'à la montée cette consommation est quasiment nulle, elle devrait même être négative dans l'absolu. Par ailleurs, la consommation maximale est celle d'une cabine vide à la descente. Pour justifier ce qui est dit précédemment on va présenter un exemple démonstratif numérique :

#### **III.8-3-1/ Données techniques**

La fiche technique de l'ascenseur utilisé est résumée comme suite :

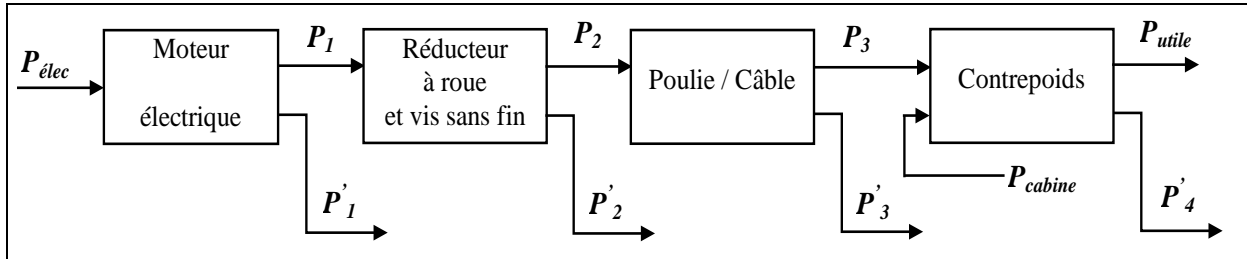
**Tableau III.2 : Fiche technique**

Désignation	Valeur	Désignation	Valeur
Masse de la cabine ( $m_1$ )	<b>400 kg</b>	Rendement du moteur électrique ( $\eta_1$ )	<b>0,90</b>
Masse du contrepoids ( $m_2$ )	<b>900 kg</b>	Rendement du réducteur à roue et vis sans fin ( $\eta_2$ )	<b>0,87</b>
Masse d'une personne ( $m_3$ )	<b>100 kg</b>	Rendement de la transmission par poulie/câble ( $\eta_3$ )	<b>0,95</b>
Nombre max des personnes	<b>6</b>	Forces de frottement du guidage en translation de la cabine ( $R_{cabine}$ )	<b>240 N</b>
Vitesse de la cabine et du contrepoids ( $v$ )	<b>2 m/s</b>		
Diamètre de la poulie ( $D_{tr}$ )	<b>800 mm</b>	Forces de frottement du guidage en translation du contrepoids ( $R_{contrepoids}$ )	<b>180 N</b>
Rapport de réduction roue/vis	<b>1 / 78.5</b>		

On peut distinguer six cas particuliers pour évaluer la puissance consommée par le moteur :

### III.8-3-2/ Étude de la descente de la cabine à vide

L'étude de la descente de la cabine revient à étudier la montée du contrepoids ; ainsi on considérera que ce qui est utile est la montée du contrepoids. Le schéma bloc simplifié de l'ascenseur est le suivant :



**Figure III.14 : Schéma bloc simplifié de l'ascenseur**

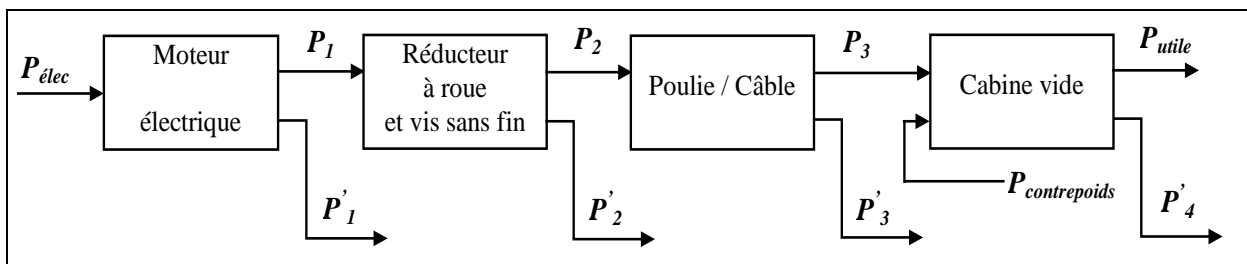
Avec :  $P_{elec}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_{cabine}$  et  $P_{utile}$  sont respectivement la puissance : absorbée par le moteur, à l'arbre du moteur, au niveau du réducteur à roue et vis sans fin, au niveau poulie/câble, motrice de cabine, utile pour monter le contrepoids.

Avec :  $P'_1$ ,  $P'_2$ ,  $P'_3$ ,  $P'_4$  sont respectivement les pertes au niveau du : moteur, réducteur à roue et vis sans fin, poulie/câble, frottement du guidage.

- La puissance utile  $P_{utile}$  pour monter le contrepoids :  $P_{utile} = m_2 \cdot g \cdot v = 18000 \text{ W}$
- La puissance perdue  $P'_4$  dans les guidages de la cabine et du contrepoids :  
 $P'_4 = P'_{cabine} + P'_{contrepoids} = R_{cabine} \cdot v + R_{contrepoids} \cdot v = 840 \text{ W}$
- La puissance motrice  $P_{cabine}$  développée par la chute de la cabine à vide :  $P_{cabine} = m_1 \cdot g \cdot v = 8000 \text{ W}$
- La puissance au niveau de la poulie/câble :  $P_3 + P_{cabine} = P_{utile} + P'_4$  donc  $P_3 = 10840 \text{ W}$
- La puissance absorbée par le moteur :  $P_{elec} = P_3 / (\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3) = 14573 \text{ W}$

### III.8-3-3/ Étude de la montée de la cabine à vide

L'étude de la montée de la cabine revient à étudier la descente du contrepoids ; ainsi on considérera que ce qui est utile est la montée de la cabine. Le schéma bloc simplifié de l'ascenseur est le suivant :



**Figure III.15 : Schéma bloc simplifié de l'ascenseur**

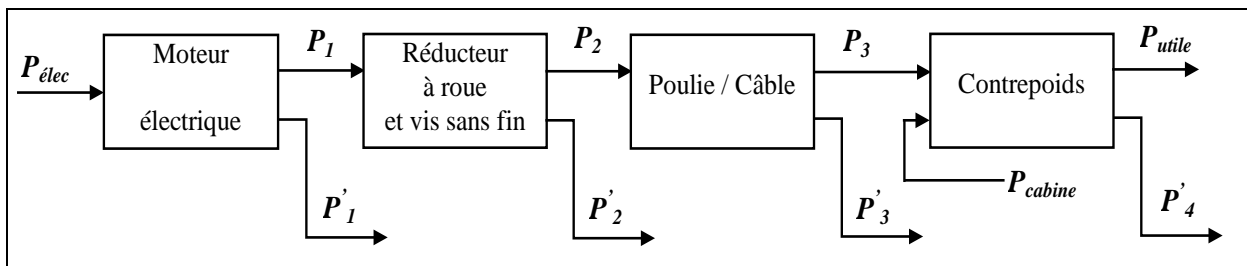
- La puissance utile  $P_{utile}$  pour monter la cabine à vide :  $P_{utile} = m_1 \cdot g \cdot v = 8000 \text{ W}$
- La puissance perdue  $P'_4$  dans les guidages de la cabine et du contrepoids :  
 $P'_4 = P'_{cabine} + P'_{contrepoids} = R_{cabine} \cdot v + R_{contrepoids} \cdot v = 840 \text{ W}$

- La puissance motrice  $P_{\text{contrepoids}}$  développée par la chute du contrepoids:  $P_{\text{contrepoids}} = m_2 \cdot g \cdot v = 18000 \text{ W}$
- La puissance au niveau de la poulie/câble :  $P_3 + P_{\text{contrepoids}} = P_{\text{utile}} + P'_4$  donc  $P_3 = -9160 \text{ W}$
- La puissance mécanique à l'arbre du moteur :  $P_1 = P_3 / (\eta_2 \cdot \eta_3) = -11083 \text{ W}$

➤ Dans ce cas on remarque bien le signe négatif de la puissance, donc le moteur ne fournit pas l'énergie mécanique mais il absorbe. Si cet ascenseur est connecté avec un système de récupération d'énergie, la puissance mécanique récupérée se transforme en énergie électrique, cette dernière est injectée sur le réseau.

#### III.8-3-4/ Étude de la descente de la cabine avec la moitié de la charge

L'étude de la descente de la cabine revient à étudier la montée du contrepoids ; ainsi on considérera que ce qui est utile est la montée du contrepoids. Le schéma bloc simplifié de l'ascenseur est le suivant :

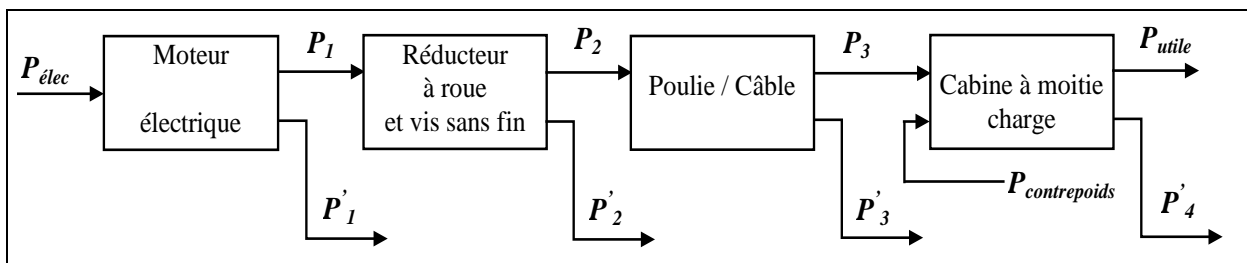


*Figure III.16 : Schéma bloc simplifié de l'ascenseur*

- $P_{\text{utile}} = m_2 \cdot g \cdot v = 18000 \text{ W}$
- $P'_4 = 840 \text{ W}$
- $P_{\text{cabine}} = (m_1 + 3m_3) \cdot g \cdot v = 14000 \text{ W}$
- $P_3 + P_{\text{cabine}} = P_{\text{utile}} + P'_4$  donc  $P_3 = 4840 \text{ W}$
- $P_{\text{élec}} = P_3 / (\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3) = 6506 \text{ W}$

#### III.8-3-5/ Étude de la montée de la cabine avec la moitié de la charge

L'étude de la montée de la cabine revient à étudier la descente du contrepoids ; ainsi on considérera que ce qui est utile est la montée de la cabine. Le schéma bloc simplifié de l'ascenseur est le suivant :

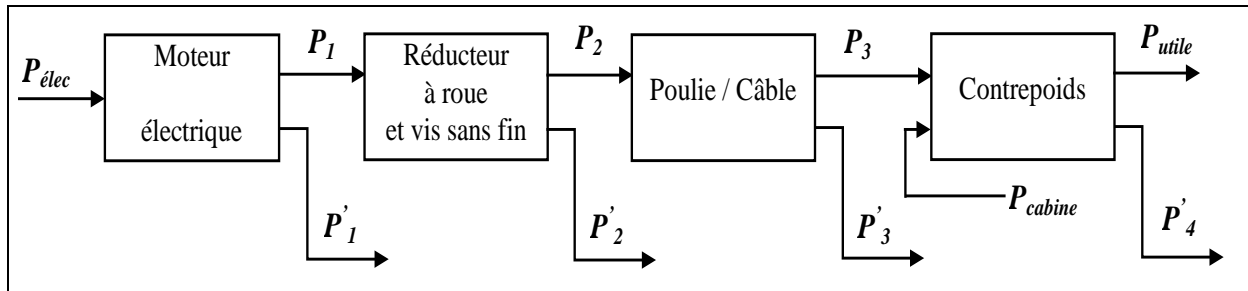


*Figure III.17 : Schéma bloc simplifié de l'ascenseur*

- $P_{\text{utile}} = (m_1 + 3m_3) \cdot g \cdot v = 14000 \text{ W}$
- $P'_4 = 840 \text{ W}$
- $P_{\text{contrepoids}} = m_2 \cdot g \cdot v = 18000 \text{ W}$
- $P_3 + P_{\text{contrepoids}} = P_{\text{utile}} + P'_4$  donc  $P_3 = -3160 \text{ W}$
- La puissance mécanique à l'arbre du moteur  $P_1$  :  $P_1 = P_3 / (\eta_2 \cdot \eta_3) = -3823 \text{ W}$

### III.8-3-6/ Étude de la descente de la cabine en plein charge

L'étude de la descente de la cabine revient à étudier la montée du contrepoids ; ainsi on considérera que ce qui est utile est la montée du contrepoids. Le schéma bloc simplifié de l'ascenseur est le suivant :

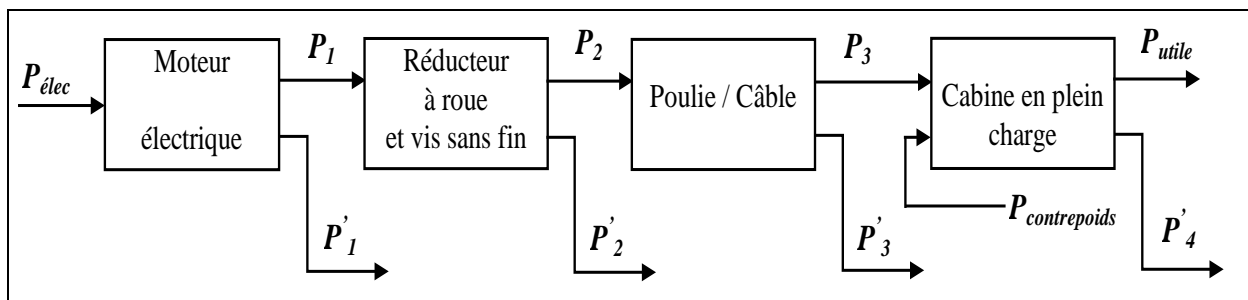


**Figure III.18 : Schéma bloc simplifié de l'ascenseur**

- $P_{utile} = m_2 \cdot g \cdot v = 18000 \text{ W}$
- $P'_4 = 840 \text{ W}$
- $P_{cabine} = (m_1 + 6.m_3) \cdot g \cdot v = 20000 \text{ W}$
- $P_3 + P_{cabine} = P_{utile} + P'_4$  donc  $P_3 = -1160 \text{ W}$
- $P_1 : P_1 = P_3 / (\eta_2 \cdot \eta_3) = -1403 \text{ W}$

### III.8-3-7/ Étude de la montée de la cabine en plein charge

L'étude de la montée de la cabine revient à étudier la descente du contrepoids ; ainsi on considérera que ce qui est utile est la montée de la cabine. Le schéma bloc simplifié de l'ascenseur est le suivant :



**Figure III.19 : Schéma bloc simplifié de l'ascenseur**

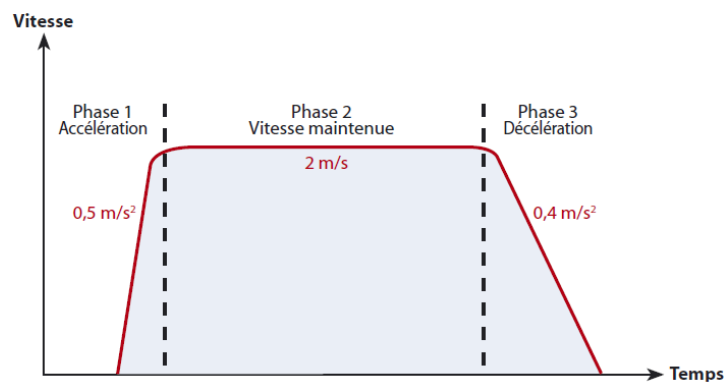
- $P_{utile} = (m_1 + 6.m_3) \cdot g \cdot v = 20000 \text{ W}$
- $P'_4 = 840 \text{ W}$
- $P_{contrepoids} = m_2 \cdot g \cdot v = 18000 \text{ W}$
- $P_3 + P_{contrepoids} = P_{utile} + P'_4$  donc  $P_3 = 2840 \text{ W}$
- $P_{élec} = P_3 / (\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3) = 3818 \text{ W}$

➤ À partir des résultats obtenus, on peut conclure que la consommation est plus importante lorsque la cabine est vide.

### **III.9/ Alimentation d'un ascenseur à traction par un variateur de vitesse**

Au niveau des ascenseurs, parmi la multitude de possibilités de fonctions qu'offrent les variateurs de vitesse, on peut citer :

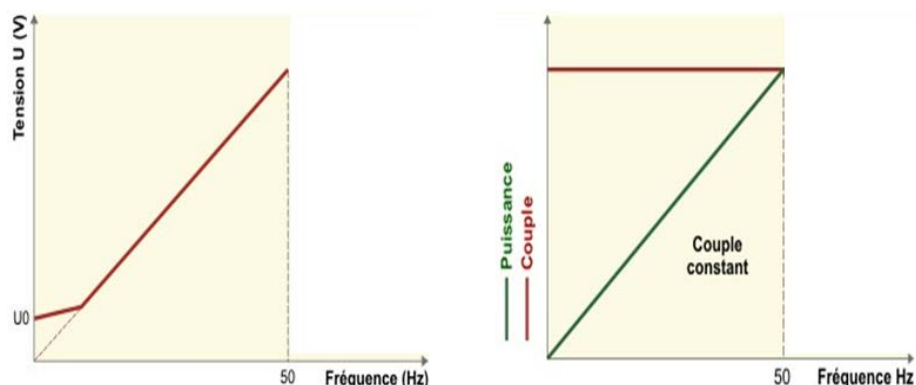
- Accélération et décélération contrôlée, avec la nouvelle technologie le microprocesseur générant des courbes d'accélération et de décélération dans un confort optimal c.à.d. l'ascenseur n'oscille pas non plus autour de la position finale avant de s'arrêter ;
- Variation et régulation de vitesse ;
- Freinage d'arrêt ;
- Inversion du sens de marche.



**Figure III.20 : Exemple de la courbe de déplacement**

Pour optimiser le couple du moteur, le variateur de fréquence et de tension maintient le rapport  $V/f$  ( $\Phi \approx V/f$ ) constant en adaptant la tension proportionnellement à la fréquence délivrée au moteur, c'est la commande scalaire. Le démarrage s'effectue initialement en tension  $V_0$ .

Afin de garder un flux constant dans le moteur et donc aussi une variation de vitesse à couple constant la tension et la fréquence varient proportionnellement jusqu'à la fréquence nominale du moteur.



**Figure III.21 : Variation des grandeurs électriques et mécaniques en fonction de la fréquence**

### **III.10/ Automatisation d'un ascenseur (Lois de parcours)**

✓ Sur chacun des paliers, l'utilisateur dispose de deux boutons : le bouton d'appel-montée qu'il appuie s'il désire monter et le bouton d'appel-descente qu'il appuie s'il désire descendre. Au niveau inférieur, le bouton d'appel-descente n'existe pas, au niveau supérieur le bouton d'appel-montée n'existe pas.

également. L'appui sur l'un ou l'autre de ces boutons est immédiatement "enregistré" c.à.d. mémorisé, un voyant s'allume pour indiquer l'enregistrement. Un appel demeure enregistré aussi longtemps que la cabine ne s'est pas arrêtée au niveau demandé dans le sens convenable. L'arrivée de la cabine est indiquée par un voyant ou un signal sonore.

Dans la cabine, les passagers disposent d'un bouton par niveau. Dès leur entrée en cabine, ils peuvent appuyer sur le bouton correspondant au niveau désiré. Ces demandes appelées "envois-cabine" sont également enregistrées et le demeurent tant que la cabine ne s'est pas arrêtée au niveau demandé.

✓ Comment la cabine va-t-elle se déplacer pour satisfaire toutes ces demandes des paliers et de la cabine ?

Il est tout-à-fait inconcevable de respecter l'ordre chronologique des demandes, l'ascenseur serait peu rempli et ferait des parcours en tous sens. Il est nécessaire de définir une loi plus ou moins complexe qui régit son déplacement.

#### ***III.10-1/ Manœuvre à blocage***

Elle est appelée également manœuvre universelle. C'est la manœuvre la plus simple par laquelle la cabine ne répond à un appel palier que si elle est disponible (Cabine au repos) et reste à la disposition des passagers en cabine jusqu'à la fin du parcours c.à.d. lorsque l'ascenseur est libre. D'une autre façon, la manœuvre à blocage enregistre le premier appel palier et la cabine se dirige vers l'étage correspondant, les autres appels paliers ne sont pas enregistrés. L'application de ce type de manœuvre est particulièrement adaptée aux ascenseurs de faible charge (320 Kg) pour un trafic très limité.

#### ***III.10-2/ Manœuvre collective descente***

Directe à la montée collective à la descente, les appels paliers et les ordres donnés en cabine sont enregistrés. La cabine dessert à la montée les ordres donnés en cabine dans l'ordre logique sans tenir compte des appels paliers. Elle n'inverse son sens de marche que lorsque tous les ordres donnés en cabine sont satisfaits et que le niveau le plus haut demandé ait été atteint. À la descente, tous les ordres cabine ainsi que tous les appels paliers sont satisfaits. Ce type de manœuvre correspond au trafic d'un immeuble d'habitation, le trafic le plus fréquent, étant celui du transport des usagers du niveau principal par exemple rez-de-chaussée à leurs appartements et inversement. Le trafic inter-étages est pratiquement nul.

#### ***III.10-3/ Manœuvre collective montée-descente***

L'ascenseur répond aux appels et envois, indépendamment de l'ordre d'enregistrement des appels et envois. Seules les commandes d'envoi en cabine et les commandes d'appel pour monter sont satisfaites, quand l'ascenseur monte et seules les commandes d'envoi en cabine et les commandes d'appel pour descendre sont satisfaites, quand l'ascenseur descend. Lorsque l'ascenseur atteint le palier pour le dernier appel ou envoi enregistré dans la direction imposée, il inverse son sens de marche et va répondre aux appels ou envois enregistrés.

***III.10-4/ Manœuvre en batterie***

Appelée également manœuvre de groupe ou multiplex pour une batterie comportant deux ascenseurs ou plus. Les batteries d'ascenseurs sont indispensables pour les immeubles à fort trafic. Les ordres effectués en cabine sont propres à chaque appareil, ils sont satisfaits comme pour un appareil isolé. Le principe de répartition des appels est souvent très complexe. Plusieurs systèmes sont utilisés :

- Système à recherche du plus près : l'appel est affecté à la cabine disponible ou ayant le sens de l'appel, qui aura le moins de distance à parcourir.
- Système zonamatic : une zone est attribuée à chaque appareil ; l'appel arrivant dans la zone de l'appareil sera desservi par cet appareil.

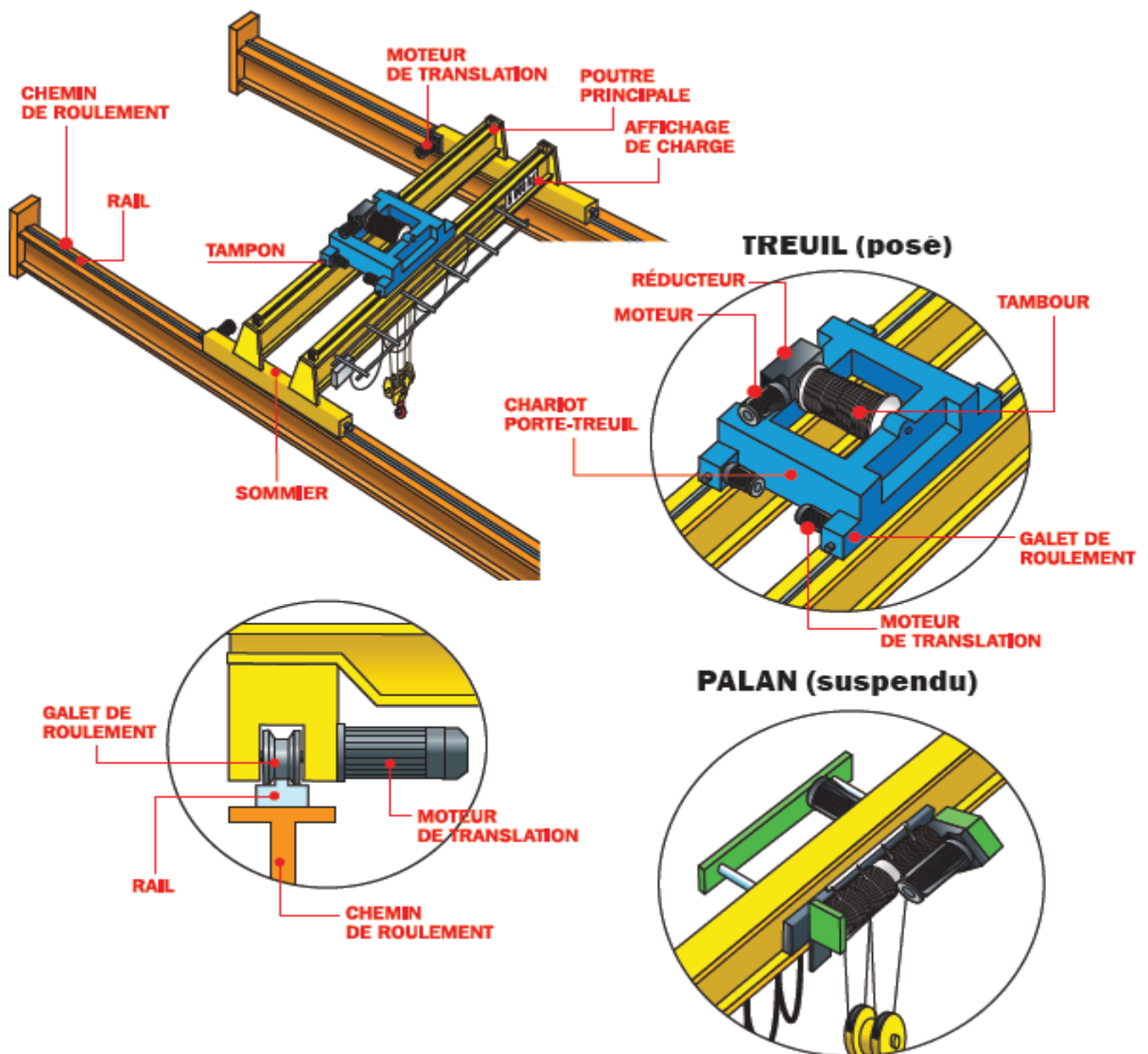


### **Introduction**

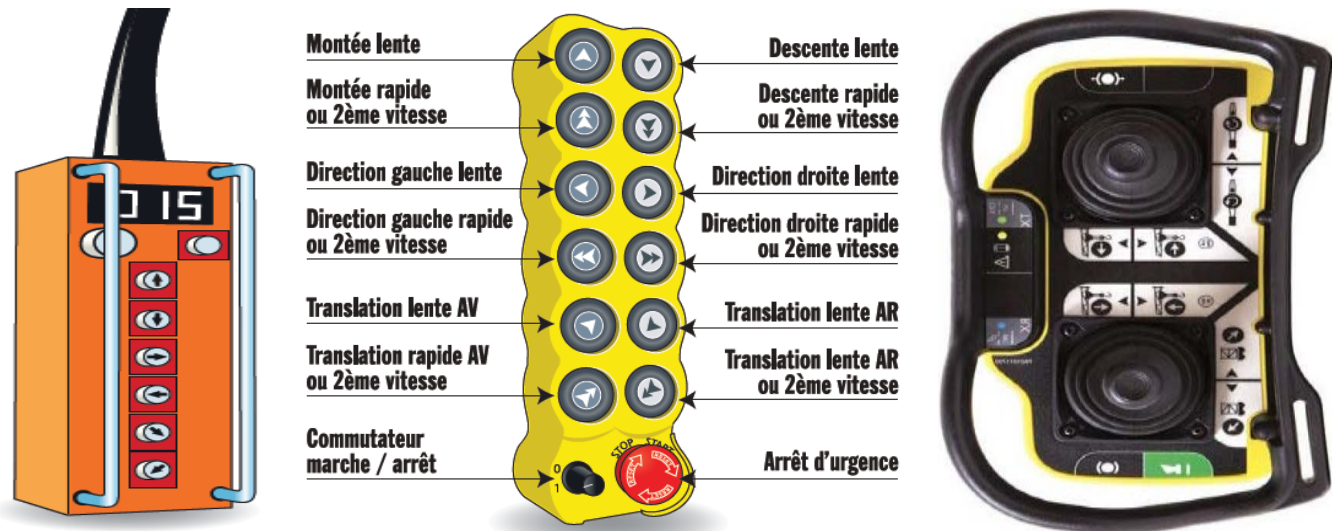
Les différents mécanismes que l'on trouve dans l'industrie, ont suivi un long chemin de développement avant de prendre la forme des machines modernes. Une industrie de production moderne constituée d'un nombre considérable de pièces, machines et appareils destinés à accomplir les fonctions les plus variées. Tout mécanisme se compose de trois parties essentielles : moteur, transmission et machine d'opération. Parmi ces mécanismes, le pont roulant, dont le rôle est très simple : levage et déplacement des charges à un point déterminé par les coordonnées x, y et z, sans envisager la nature de ces charges.

### **IV.1/ Éléments d'un pont roulant**

Le pont roulant est constitué des éléments suivants :



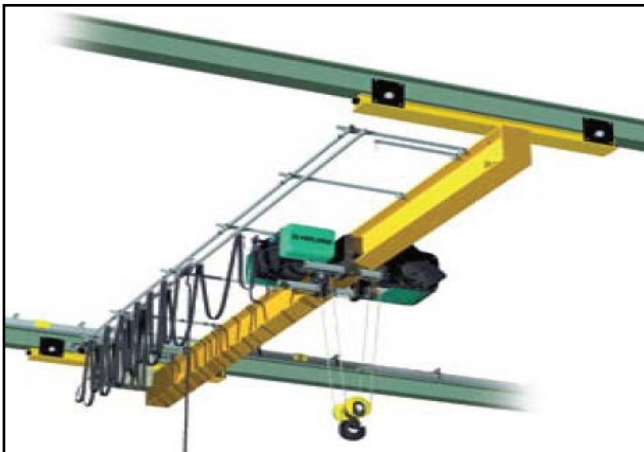
**Figure IV.1 : Éléments principaux d'un pont roulant**



*Figure IV.2 : Exemple d'une télécommande et radiocommande pour pont roulant*

#### *IV.2/ Type de ponts roulants*

On distingue six types de ponts roulants :

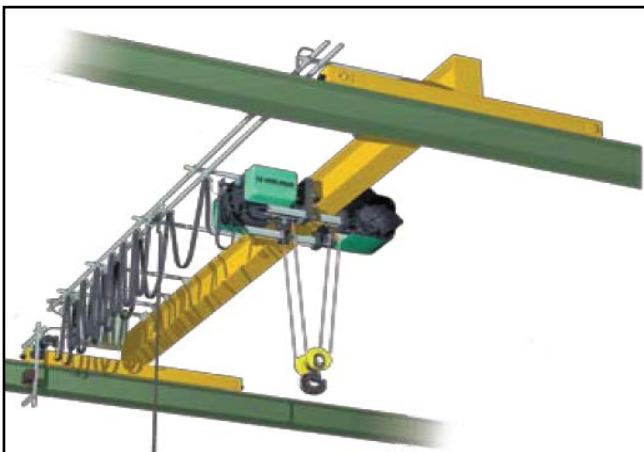


*Pont mono-poutre suspendu avec :*

*Palan électrique à câble*

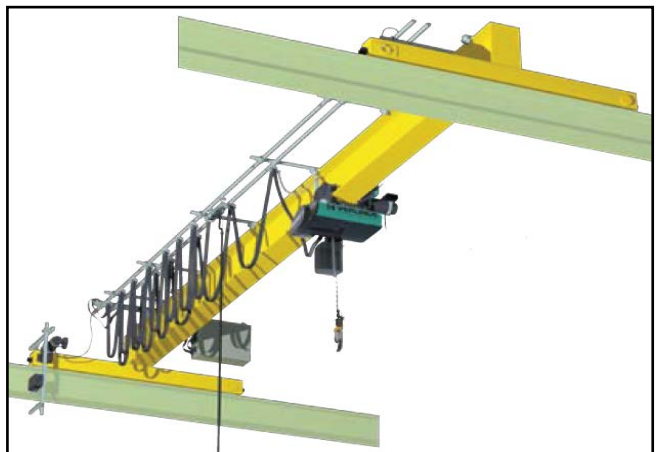


*Palan électrique à chaine*

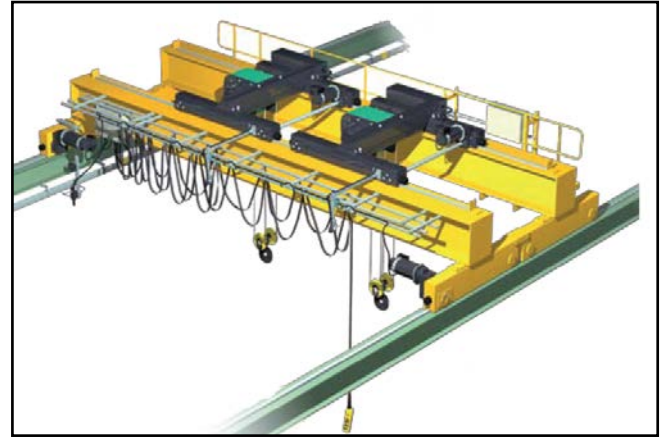
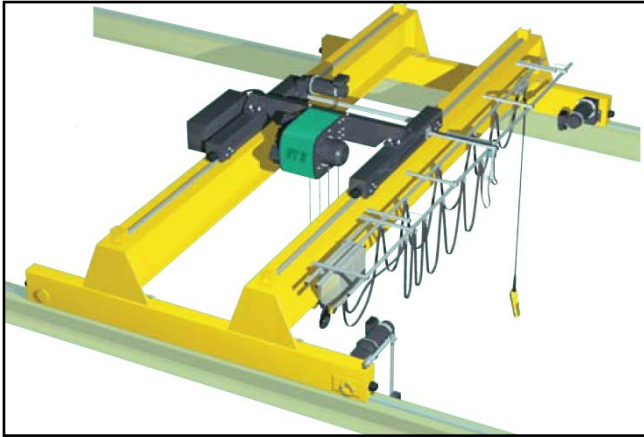


*Pont mono-poutre posé avec :*

*Palan électrique à câble*



*Palan électrique à chaine*



*Pont bipoutre posé avec :*

*Palan électrique à câble*

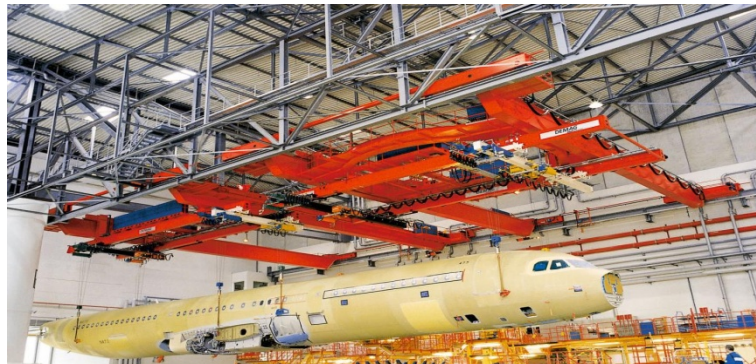
*Deux palans électriques jumelles à câble*

**Figure IV.3 : Différents types de ponts roulants**

### **IV.3/ Applications des ponts roulants**

#### **IV.3-1/ Pont roulant pour l'industrie aéronautique**

Sur les chaînes de montage de l'industrie aéronautique, il faut fréquemment soulever, tourner ou positionner des pièces volumineuses.



**Figure IV.4 : Exemple d'une application pour l'industrie aéronautique**

#### **IV.3-2/ Pont roulant pour l'industrie du papier**

Dans l'industrie du papier, les défis majeurs consistent à assurer, de manière très fiable, l'alimentation des machines à papier aussi bien en zone humide qu'en zone sèche et de disposer des équipements, pour réaliser leur maintenance. Par ailleurs, il faut stocker et déstocker les bobines de papier de manière précise et efficace, tout en veillant à ne pas les endommager.

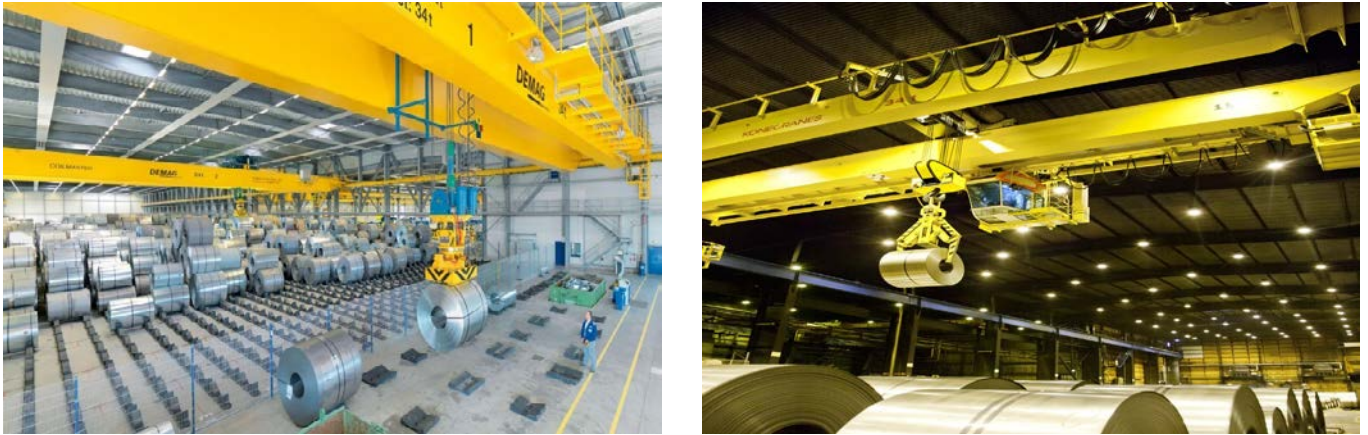


**Figure IV.5 : Exemple d'une application pour l'industrie du papier**



#### ***IV.3-3/ Pont roulant pour le négoce d'acier***

Les systèmes de manutention contribuent à la rentabilité des entreprises de négoce d'acier. La rapidité et la flexibilité de l'ensemble des opérations permettent aux entreprises de faire face aux exigences du marché grâce à une gestion des stocks efficace et une livraison « juste-à-temps ».



***Figure IV.6 : Exemple d'une application de négoce d'acier***

#### ***IV.3-4/ Pont roulant pour l'industrie de production d'acier***

Charges difficiles à transporter, températures ambiantes élevées ou très variables, avec ces conditions dures qui dominent dans les fonderies, posent de grands défis à la sécurité de fonctionnement et à la fiabilité des ponts.



***Figure IV.7 : Exemple d'une application pour l'industrie de métallurgie***

### ***IV.4/ Caractéristiques mécaniques***

#### ***IV.4-1/ Charge nominale***

Est définie comme charge maximale exprimée en tonne ou en Newton qui doit être admise pendant le levage. Dans cette charge, sont inclus tous les dispositifs spéciaux suspendus aux crochets.

#### ***IV.4-2/ Charge admissible***

C'est la charge utile qui peut être suspendue aux crochets.

#### ***IV.4-3/ Hauteur de levage***

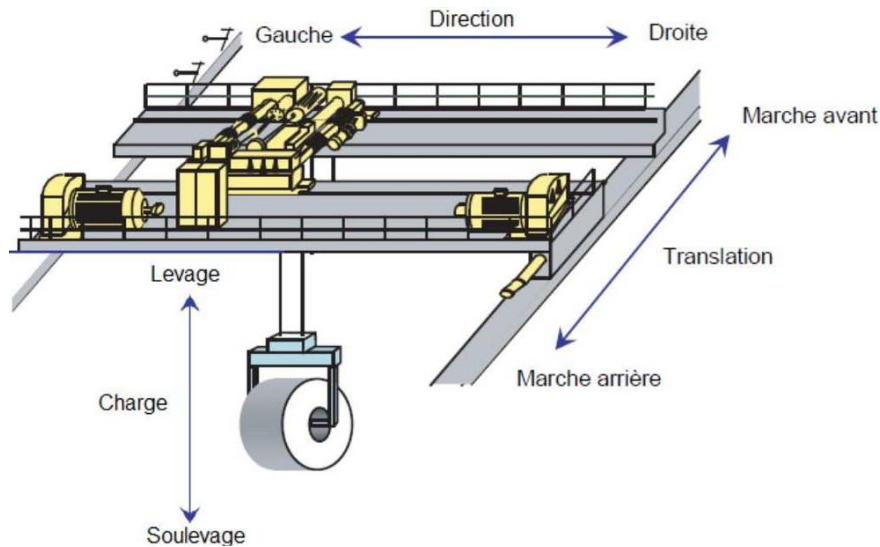
C'est la distance verticale de levage (Descente) de la charge.

#### **IV.4-4/ Direction (Portée)**

Axe transversal, c'est la distance de déplacement du chariot.

#### **IV.4-5/ Translation (Course)**

C'est la distance de roulement du pont c.à.d. axe des voies de roulement donc la plus grande distance.



**Figure IV.8 : Mouvements d'un pont roulant**

#### **IV.5/ Conditions de fonctionnement et de sécurité**

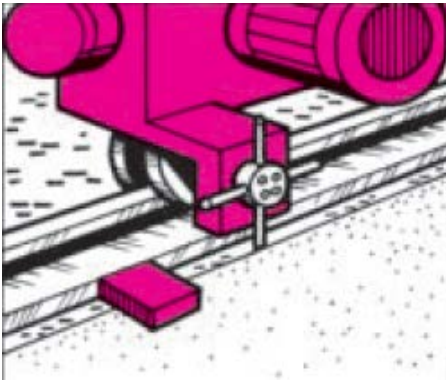
Le fonctionnement d'une machine de levage est caractérisé par une succession de cycle de travail, chaque cycle étant composé d'opération de levage, de descente et déplacement à vide ou en charge suivit d'une période de repos. Ce fonctionnement constitué au service intermittent S3.

- Tous les mouvements du pont roulant doivent être effectués sans choc, sans bruits et sans interruption ou déplacement oblique sur les voies de roulement.
- Durant le freinage, les mécanismes de translation du chariot et du pont à vide ou en charge, il ne faut pas qu'ils se produisent des glissements mécaniques.
- Tous les dispositifs de sûreté doivent fonctionner normalement, pour exclure toute possibilité d'accidents. Sans l'accomplissement de ces conditions, le fonctionnement est interdit.
- Il doit interrompre le fonctionnement de levage de la charge dans le cas d'une surcharge qui dépasse 10% de la charge nominale.
- Aux démarrages et de même pendant le freinage, les accélérations et les décélérations admissibles doivent être respectées.
- L'échauffement des paliers ne doit pas dépasser 70°C.
- Les systèmes de lubrification doivent toujours fonctionner normalement.

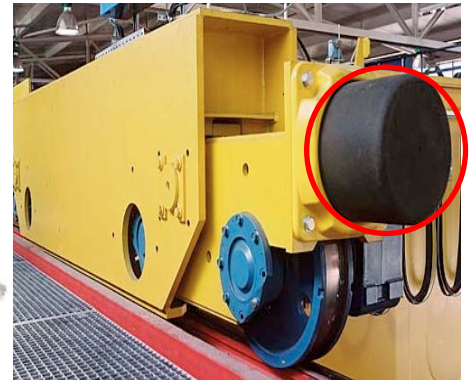
#### **IV.6/ Principaux dispositifs de sécurité**

Les ponts roulants et leurs chemins de roulement sont équipés de différents dispositifs de sécurité destinés à prévenir, dans la mesure du possible, les accidents qui pourraient résulter de l'utilisation du pont. Ces dispositifs facilitent dans de nombreux cas l'exploitation des ponts roulants donc un meilleur usage. Ils assurent notamment, le contrôle et la maîtrise des mouvements du pont et la protection du personnel contre les risques auxquels il se trouve exposés tels que : l'écrasement par la chute de la charge.

- Le limiteur de charge est particulièrement utile lorsque les charges à manutentionner sont très diversifiées et mal connues, le limiteur de charge interdit la montée en cas de surcharge.
- Les limiteurs de course haute et basse du crochet de levage arrêtent le mouvement de levage pour éviter la détérioration des mofles et aussi en interdisant le bloc à bloc qui pourrait entraîner la rupture du câble de levage et la chute de la charge. Ils permettent aussi, de conserver des tours morts de câble sur le tambour.
- Les limiteurs de course des mouvements horizontaux ralentissent les mouvements puis les arrêtent avant que le chariot ou le mécanisme de translation n'entre en contact avec les butées d'extrémité de voie ou avec tout obstacle permanent. Les limiteurs de course ne doivent pas être utilisés en service normal, pour éviter l'usure prématurée de ces dispositifs de sécurité. Ils doivent faire l'objet, à chaque prise de poste, d'une vérification de leur bon fonctionnement à vitesse réduite et sans charge. Le chariot et le mécanisme de translation et les extrémités des voies sont équipés de butoirs en caoutchouc, atténuant efficacement les chocs soit en fin de course, soit en cas de rencontre avec un autre pont circulant sur la même voie.



**Figure IV.9 : Exemple d'un limiteur de course**



**Emplacement de la butoir**

- Le dispositif anticollision permet de ralentir puis d'arrêter le mouvement de translation du 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 de la collision des ponts roulants et de leurs charges.
- Sur tous ses mouvements, le pont roulant doit être muni de freins, capables d'arrêter la charge ou le mécanisme de translation dans toutes ses positions. Certains ponts roulants sont munis d'un frein de secours, agissant sur le tambour du treuil de levage pour remédier la défaillance du frein principal, comme les ponts pour le transport du métal liquide.

- L'unité de supervision de la vitesse est séparée du variateur, cette unité de sécurité est utilisée dans les applications de levage, pour contrôler la vitesse du moteur. En cas de différence de vitesse ou de survitesse, il arrête le mouvement instantanément.

#### ***IV.7/ Systèmes de variation de vitesse (Convertisseur et technique de commandes)***

##### **Pourquoi la variation de vitesse est nécessaire dans les mécanismes des ponts roulants ?**

La variation de vitesse permet à l'opérateur de déplacer sa charge, avec davantage de précision et de souplesse, permet aussi d'adapter la vitesse du mouvement en fonction de la charge à déplacer. Pour cela, une gamme de variateurs de vitesse, conçus spécialement, pour être utilisés avec tous les systèmes de levage dans l'industrie.

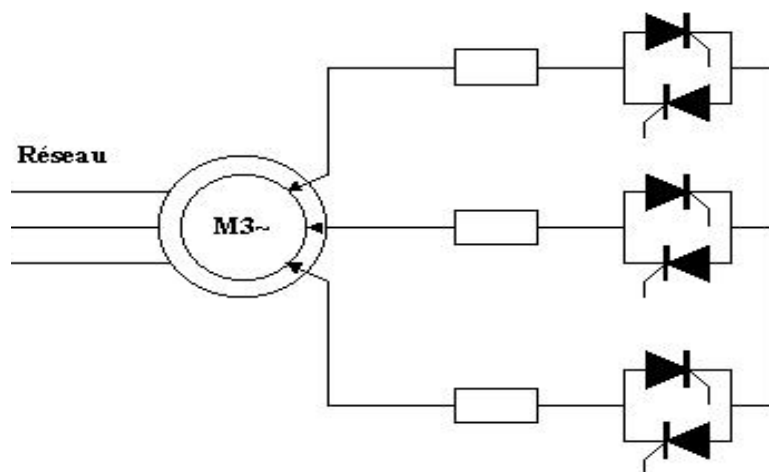
Le réglage de la vitesse des ponts roulants des années 70 se faisait à l'aide des rhéostats insérés avec le bobinage rotorique du MAS. Malgré elle conduit à des pertes d'énergie (Pertes Joule), leur grand volume et vu que son prix est plus faible que celui des autres systèmes de réglage, cette méthode est préférable.

La technologie appliquée actuellement, est basée sur les convertisseurs comme : les gradateurs et les onduleurs. Les systèmes de variation de vitesse ont été conçus, pour être utilisés dans le mécanisme de levage : palan (Treuil), chariot et aussi le mécanisme de translation du pont.

Deux méthodes de variation de vitesse sont présentées :

##### ***IV.7-1/ Commande de vitesse en continu (CVC)***

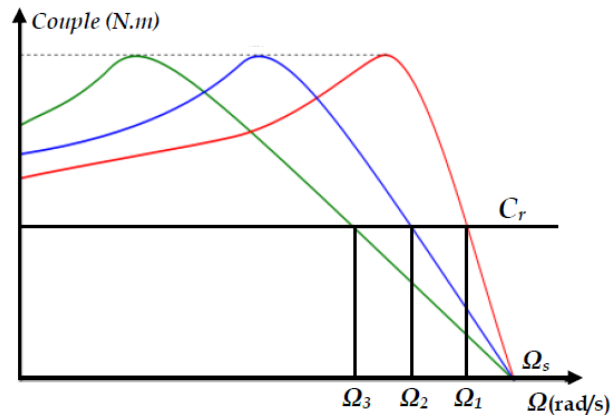
L'idée de cette commande est basée sur la variation de la résistance rotorique, pour obtenir une variation de la vitesse de rotation du moteur. Le but est de déplacer le point de fonctionnement, pour obtenir une variation continue de la vitesse. Les résistances additionnelles sont remplacées par un gradateur, dont l'effet est une modification de la résistance "apparente". Les bobines rotoriques sont fermées sur une résistance, montée en série avec un gradateur de courant. Ce gradateur permet d'ajuster la valeur efficace des courants rotoriques, faisant ainsi varier le glissement.



**Figure IV.10 : Schéma de variateur à base d'un gradateur du courant**



Lorsque le courant rotorique diminue, la situation est équivalente à insérer une résistance plus grande en série avec la bobine du rotor. Ceci explique les formes de la caractéristique mécanique couple-vitesse correspondant à ce régime de fonctionnement.



**Figure IV.11 : Caractéristique couple-vitesse**

La *CVC* a beaucoup d'avantages, comparée à la commande mono- et bi-vitesse ainsi qu'aux systèmes de commande multi-pas :

**IV.7-1-1/ Facile à utiliser** : La *CVC* assure une manutention de la charge facile, sûre et précise. *CVC* offre une vitesse minimum très petite pour une précision de positionnement améliorée. Pour les opérateurs les moins expérimentés, les charges endommagées par manque d'expérience seront moins fréquentes du fait, qu'ils peuvent ajuster la vitesse à leur connaissance.

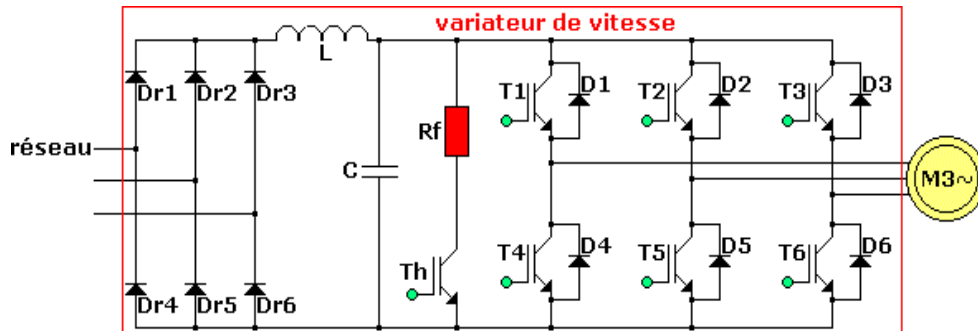
**IV.7-1-2/ Durée de vie plus longue et une productivité accrue** : La *CVC* offre des démarrages sans à-coups, des accélérations rapides et des arrêts doux, pour une manutention de charge optimisée sans abîmer la charge donc, une réduction du nombre et du niveau des chocs subis par les composants du pont et la structure autorise un fonctionnement plus long pour le pont. Un cycle réduit et une meilleure productivité peuvent être obtenus, lorsqu'une très petite vitesse d'approche et une très grande vitesse de croisière sont utilisées au même temps.

**IV.7-1-3/ Faible coût d'entretien** : La *CVC* permet d'utiliser le frein électrique, lors des décélérations avant d'appliquer le frein mécanique. Le freinage électrique réduit l'usure du frein mécanique. Ce dernier est utilisé seulement comme frein de maintien c.à.d. frein de parking.

#### **IV.7-2/ Contrôle en fréquence (CF)**

Les algorithmes de la commande vectorielle soit en boucle ouverte ou en boucle fermée divisent le courant moteur en deux composantes : la composante magnétisante (Flux) et la composante couple, donc il est possible de commander séparément, le flux et le couple et de faire tourner le moteur de façon précise.

Le variateur de vitesse est constitué par un redresseur avec son circuit de filtrage, circuit de freinage et un onduleur.



**Figure IV.12 : Schéma de variateur à base d'un redresseur et onduleur**

Le **CF** a beaucoup d'avantages et offre de nouvelles caractéristiques, comparé aux autres commandes :

**IV.7-2-1/ Moteur à cage d'écureuil :** Le **CF** s'applique au moteur à cage d'écureuil, qui est petit en taille et léger, lorsqu'on le compare aux autres types de moteurs. Un moteur à cage d'écureuil avec sa construction simple et robuste, ne nécessite qu'un entretien minimum régulier.

**IV.7-2-2/ Pas de composant extérieur :** Le **CF** ne nécessite pratiquement aucun composant extérieur, pour la commande du moteur, donc la variation de vitesse peut être obtenue sans aucun contacteur de rotor ou tachymètre.

**IV.7-2-3/ Sélection des valeurs de sorties :** Le **CF** offre la sélection de la tension moteur maximale et de la fréquence maximale, qui ne sont pas dépendantes de la tension et de la fréquence de l'alimentation. Cette faculté rend même possible, d'utiliser des moteurs qui ont des caractéristiques différentes de l'alimentation principale.

**IV.7-2-4/ Plage de commande de la vitesse :** Le **CF** possède une large plage de commande de la vitesse et permet l'utilisation de faibles vitesses, avec un temps de fonctionnement limité pour minimiser l'échauffement moteur.

**IV.7-2-5/ Alimentation économique :** Le **CF** offre un bon rendement au variateur, il permet aussi l'utilisation de composants d'alimentation, plus petits grâce à un faible courant de démarrage qui est proportionnel au couple d'accélération nécessaire.

#### **IV.7-3/ Système de correction automatique du balancement de la charge**

Traditionnellement, les effets de balancements d'une charge déplacée par un pont roulant, peuvent être réduits si l'opérateur possède l'expérience nécessaire, pour gérer les mouvements d'inertie de la charge lors de son déplacement. Le principe de fonctionnement de l'ESP (Electronic Stability Program) est basé sur le calcul du temps du mouvement de balancier et la hauteur de levage.

L'ESP calcule et corrige automatiquement, les mouvements de va-et-vient de la charge sous crochet. Parmi les avantages de l'ESP :

- Paramétrage facile depuis l'interface de commande ;
- Permet à l'utilisateur d'optimiser la surface de travail, la correction de balancement s'effectue pendant l'ensemble du trajet de la charge, quelque soit la hauteur de levage et l'emplacement de la charge ;
- Augmentation de la sécurité pour le personnel utilisateur de l'unité de levage ;
- Réduction des coûts de maintenance à cause de la réduction des effets de contraintes mécanique sur la structure et électriques sur les moteurs.



**Figure IV.13 : Manutention avec et sans ESP**

#### **IV.8/ Pont roulant automatique**

D'une façon générale, les ponts roulants sont commandés, à partir d'une cabine ou du sol (Télécommande ou radiocommande), plus rarement, ils sont automatisés totalement ou en partie. Dans les processus de fabrication, impliquant des opérations de levage lourd ou dans les environnements dangereux, le pont roulant automatisé s'impose comme moyen de sécuriser et rationaliser les manutentions. Parmi les applications courantes, on peut citer : la manutention des bobines d'acier et des rouleaux de papier, la revalorisation des déchets (Produit en vrac et ferraille) et la manutention des conteneurs.



**Figure IV.14 : Applications de la manutention automatique**

Avec un pont roulant, la charge suspendue par des câbles, est constituée d'un dispositif pendulaire. Avec un opérateur novice, ce phénomène dérègle considérablement, les temps de cycle. Expérimentalement, l'analyse montre que, avec l'intervention d'un opérateur humain, la plupart des charges seront transférées en un temps moyen, avec de bonnes et de mauvaises exécutions. Quand les déplacements sont automatisés, ils sont toujours répétés exactement, de la même manière et les mouvements de transfert de charge sont répétés, de façon identique et presque optimale.

D'une manière générale, un pont roulant autonome (Automatique) peut être divisé en trois processus :

- **La perception de l'environnement** : elle consiste à détecter l'environnement c.à.d. les obstacles soit statiques et/ou mobiles. La perception permet de fournir une carte dynamique de l'environnement proche du pont roulant.
- **La génération de trajectoire** : elle consiste à générer des trajectoires virtuelles et à choisir la trajectoire optimale.
- **L'actionnement du pont** : il consiste à manœuvrer le pont roulant, utilisant ces mécanismes de déplacement.

Deux types de ponts roulants automatisés :

- **Dans la version semi-automatique** : différentes fonctions assistent l'opérateur, mais permettent d'avantage de contrôle manuel.
- **Avec un pont roulant entièrement automatisé** : l'opérateur effectue les réglages du cycle et le pont roulant se charge automatiquement, des actions répétitives.

#### ***IV.9/ Ponts roulants avec système de levage électromagnétique***

Ce type de ponts roulants, utilisent le principe électromagnétique pour transporter des charges en acier. Ils sont particulièrement adaptés aux usines : métallurgiques (Plaques et bobines d'aciers) ou de recyclage de la ferraille.

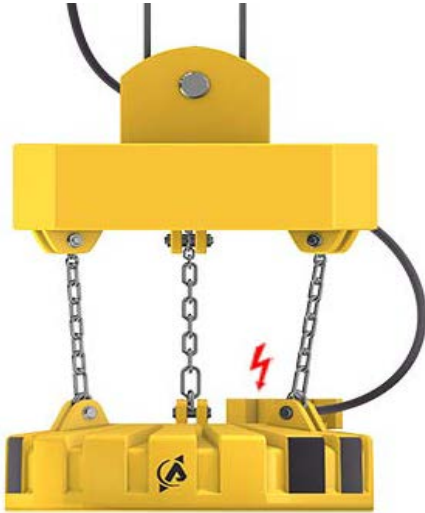
De nombreuses formes des dispositifs de levage électromagnétique, peuvent être intégrées avec le pont roulant ou fixées au crochet :

- Électroaimant round
- Électroaimant rectangulaire
- Palonnier fixe
- Palonnier télescopique

- **Les aimants permanents** : sont compacts et fonctionnent toujours : ils conservent leur force d'aimant ;
- **Les électroaimants** : commutent rapidement et sans usure et peuvent également soulever des charges lourdes, mais avec le risque que la charge tombe si l'alimentation est coupée.
- **Les systèmes magnétiques monostables** : sont activés par un signal de commutation électrique. Dès que ce signal est interrompu, le système revient à sa position de repos. D'une autre manière, lorsque le courant est passé, l'électroaimant maintient fermement les éléments en acier et les soulève à l'endroit désigné. Lorsque le courant est coupé, l'aimant disparaît et les éléments en acier sont posés.



- **Les systèmes magnétiques bistables** : sont activés et désactivés, par un signal de commutation c.à.d. ils restent activés jusqu'au signal de commutation suivant. Pour les applications de levage sensible, un système bistable est plus sûr qu'un système monostable, car celui-ci se désactive effectivement, après une coupure de courant accidentelle. Les systèmes magnétiques bistables sont toujours construits, avec une combinaison d'aimants permanents et d'électroaimants.





*Figure IV.15 : Formes de dispositifs de levage électromagnétique*

#### IV.10/ Dimensionnement des moteurs du pont roulant

Dans une première approximation, le choix de la puissance du moteur sera fait par la méthode du couple équivalent, nécessaire dans un régime stabilisé c.à.d. le régime permanent. La puissance réelle du moteur soit plus grande que la puissance équivalente résultante.

##### IV.10-1/ Détermination de la puissance du moteur de mécanisme de translation du pont

Désignation	Symbole	Valeur
Poids du pont	$P$	380 kN
Charge maximale de levage	$Q_p$	500 kN
Vitesse de translation	$V_p$	75 m/min
Rendement du mécanisme en charge	$\eta_1$	88 %
Rendement du mécanisme à vide	$\eta_2$	79 %
Diamètre du galet du pont	$D_p$	710 mm
Diamètre du tourillon du galet du pont	$d_p$	140 mm
Vitesse de rotation du moteur	$\Omega$	975 trs/min
Coefficient de correction qui tient compte des frottements entre les bords de galets et le rail	$\beta$	1,6
Coefficient du frottement du roulement	$\mu$	0,02
Coefficient d'adhérence entre le galet et le rail	$f$	0,0005
Coefficient qui tient compte de la pente du chemin de roulement	$\alpha$	0,002

##### IV.10-1-1/ Calcul de force

$F$  : force du mécanisme

$F_p$  : force due à la ponte du chemin de roulement

**En charge :**  $F_{t1} = F + F_p$

$$F = \beta \cdot \left( \frac{P + Q_p}{D_p} \right) \cdot (\mu \cdot d_p + 2 \cdot f) = 1,6 \cdot \left( \frac{500 + 380}{0,71} \right) \cdot (0,02 \cdot 0,14 + 2 \cdot 0,0005) \cdot 10^3 = 7535,77 \text{ N}$$

$$F_p = \alpha \cdot (P + Q_p) = 0,002 \cdot (500 + 380) \cdot 10^3 = 1760 \text{ N}$$

$$F_{t1} = F + F_p = 7535,78 + 1760 = 9295,78 \text{ N}$$

**À vide :**  $F_{t0} = F_0 + F_{p0}$

$$F_0 = \beta \cdot \left( \frac{P}{D_p} \right) \cdot (\mu \cdot d_p + 2 \cdot f) = 1,6 \cdot \left( \frac{380}{0,71} \right) \cdot (0,02 \cdot 0,14 + 2 \cdot 0,0005) \cdot 10^3 = 3254,08 \text{ N}$$

$$F_{p0} = \alpha \cdot P = 0,002 \cdot 380 \cdot 10^3 = 760 \text{ N}$$

$$F_{t0} = F_0 + F_{p0} = 3254,09 + 760 = 4014,09 \text{ N}$$

$$i : \text{c'est le rapport de réduction} : i = \frac{\Omega \cdot D_p}{2 \cdot V_p} = \frac{102,05 \cdot 0,71}{2 \cdot 1,25} = 28,98$$



**IV.10-1-2/ Calcul du couple et de la puissance**

**En charge :**  $C_1 = \frac{F_{t1} \cdot D_p}{2 \cdot i \cdot \eta_1} = \frac{9295,77 \cdot 0,71}{2 \cdot 28,98 \cdot 0,88} = 129,40 \text{ N.m}$

**À vide :**  $C_0 = \frac{F_{t0} \cdot D_p}{2 \cdot i \cdot \eta_2} = \frac{4014,09 \cdot 0,71}{2 \cdot 28,98 \cdot 0,79} = 62,24 \text{ N.m}$

**Couple équivalent approximatif du moteur :**  $C_{\text{eq.app}} = \sqrt{\frac{C_1^2 + C_2^2}{2}} = 101,53 \text{ N.m}$

**Puissance équivalente approximative du moteur :**  $P_{\text{eq.app}} = \Omega \cdot C_{\text{eq.app}} = 101,53 \cdot 102,05 = 10,36 \text{ kW}$

**IV.10-2/ Détermination de la puissance du moteur de mécanisme de translation du chariot**

Désignation	Symbole	Valeur
Charge maximale de levage	$Q_p$	500 kN
Poids du chariot	$P_c$	150 kN
Poids du moufle du mécanisme principal	$q_1$	21 kN
Poids du moufle du mécanisme auxiliaire	$q_2$	02 kN
Vitesse de translation du chariot	$V_c$	20 m/min
Rendement du mécanisme en charge	$\eta_1$	80 %
Rendement à vide du mécanisme	$\eta_2$	60 %
Diamètre du galet du chariot	$D_c$	500 mm
Diamètre du tourillon du galet du chariot	$d_c$	75 mm
Vitesse de rotation du moteur	$\Omega$	958 trs/min
Coefficient de correction qui tient compte des frottements entre les bords de galets et le rail	$\beta$	1,5
Coefficient du frottement du roulement	$\mu$	0,05
Coefficient d'adhérence entre le galet et le rail	$f$	0,0005
Coefficient qui tient compte de la pente du chemin de roulement	$\alpha$	0,002

**NB :** On applique les mêmes formules que le mécanisme de translation du pont

**IV.10-2-1/ Calcul de force**

**En charge**

$$F = \beta \cdot \left( \frac{P_c + q_1 + q_2 + Q_p}{D_c} \right) \cdot (\mu \cdot d_c + 2 \cdot f) = 1,5 \cdot \left( \frac{150 + 21 + 2 + 500}{0,5} \right) \cdot (0,05 \cdot 0,075 + 2 \cdot 0,0005) \cdot 10^3 = 9590,25 \text{ N}$$

$$F_p = \alpha \cdot (P_c + q_1 + q_2 + Q_p) = 0,002 \cdot (173 + 500) \cdot 10^3 = 1346 \text{ N}$$

$$F_{t1} = F + F_p = 10936,25 \text{ N}$$

**À vide**

$$F_0 = \beta \cdot \left( \frac{P_c + q_1 + q_2}{D_c} \right) \cdot (\mu \cdot d_c + 2 \cdot f) = 1,5 \cdot \left( \frac{150 + 21 + 2}{0,5} \right) \cdot (0,05 \cdot 0,075 + 2 \cdot 0,0005) \cdot 10^3 = 2465,25 \text{ N}$$

$$F_{p0} = \alpha.(P_c + q_1 + q_2) = 0,002.173.10^3 = 346 \text{ N}$$

$$F_{t0} = F_{p0} + F_0 = 2811,25 \text{ N}$$

$$i = \frac{\Omega.D_c}{2.V_p} = 75,20$$

#### IV.10-2-2/ Calcul du couple et de la puissance

$$\text{En charge : } C_1 = \frac{F_{t1}.D_c}{2.i.\eta_1} = \frac{10936,25.0,5}{2.75,20.0,80} = 45,44 \text{ N.m}$$

$$\text{À vide : } C_2 = \frac{F_{t0}.D_c}{2.i.\eta_2} = \frac{2811,25.0,5}{2.75,21.0,6} = 15,57 \text{ N.m}$$

$$\text{Couple équivalent approximatif du moteur : } C_{\text{éq.app}} = \sqrt{\frac{C_1^2 + C_2^2}{2}} = 33,96 \text{ N.m}$$

$$\text{Puissance équivalente approximative du moteur : } P_{\text{éq.app}} = \Omega.C_{\text{éq.app}} = 33,96.100,27 = 3,40 \text{ kW}$$

#### IV.10-3/ Détermination de la puissance du moteur de mécanismes de levage

##### IV.10-3-1/ Mécanismes de levage principal

Désignation	Symbole	Valeur
Charge maximale de levage	$Q_p$	500 kN
Poids du moufle	$q_1$	21 kN
Vitesse de levage	$V_r$	6,3 m/min
Hauteur de levage	$H$	16 m
Rendement du palan en charge	$\eta_1$	85 %
Rendement du palan (Levage ou la décente à vide)	$\eta_2$	32 %
Vitesse de rotation du moteur	$\Omega$	975 trs/min
Nombre des câbles	$z = 2.i_p$	12
Coefficient de correction	$e$	30
Coefficient de sécurité à la rupture	$C$	08
Diamètre du câble	$D_{ca}$	27 mm

##### IV.10-3-1-1/ Calcul du câble de levage

La tension maximale du câble s'exprime par la relation suivante :

$$F_c = \frac{Q_p + q_1}{z.\eta_p} = \frac{500 + 21}{12.0,85} = 51078,43 \text{ N}$$

$$F_r = C.F_c = 8.51078,43 = 408627,44 \text{ N}$$

**IV.10-3-1-2/ Dimensionnement du tambour**

**Diamètre minimal d'enroulement du câble**

$D_{me} = (0.95.e - 1).D_{ca} = (0,95.30 - 1).27 = 742,5 \text{ mm}$  , on adopte le diamètre normalisé qu'est supérieur au diamètre calculé donc :  $D_{me} = 800 \text{ mm}$

**Diamètre d'enveloppe du câble**

$$D_m = D_{me} + D_c = 800 + 27 = 827 \text{ mm}$$

**Nombre de tours du tambour lors du levage**

$$N_t = \frac{H.i_p}{\pi.D_m} + 6 = \frac{16.6}{\pi.0,827} + 6 = 42,96 \text{ tours} = 43 \text{ tours}$$

**IV.10-3-1-3/Calcul du couple et de la puissance**

$$i = \frac{\Omega.D_{me}}{2.V_r} = 388,76$$

**Couple moteur durant le levage en charge**

$$C_1 = \frac{Q_p + q_1}{i.\eta_1} \cdot \frac{D_{me}}{2} = \frac{500 + 21}{388,76.0,85} \cdot \frac{0,80}{2} \cdot 10^3 = 630,66 \text{ N.m}$$

**Couple moteur lors de la descente de la charge**

$$C_2 = \frac{Q_p + q_1}{i} \cdot \frac{D_{me}}{2} \cdot (2 - \frac{1}{\eta_1}) = \frac{500 + 21}{388,76} \cdot \frac{0,80}{2} \cdot (2 - \frac{1}{0,85}) \cdot 10^3 = 441,46 \text{ N.m}$$

**Couple moteur durant le levage à vide**

$$C_3 = \frac{q_1}{i.\eta_2} \cdot \frac{D_{me}}{2} = \frac{21}{388,76.0,32} \cdot \frac{0,80}{2} \cdot 10^3 = 67,52 \text{ N.m}$$

**Couple moteur lors de la descente à vide**

$$C_4 = (1 - \eta_1).C_3 - \frac{q_1}{i} \cdot \frac{D_{me}}{2} = (1 - 0,32).67,52 - \frac{21.10^3}{388,76} \cdot \frac{0,80}{2} = 24,31 \text{ N.m}$$

**Couple équivalent approximatif du moteur :**  $C_{eq.app} = \sqrt{\frac{C_1^2 + C_2^2 + C_3^2 + C_4^2}{4}} = 386,58 \text{ N.m}$

**Puissance équivalente approximative du moteur :**  $P_{eq.app} = \Omega.C_{eq.app} = 386,58.102,05 = 39,45 \text{ kW}$

#### IV.10-3-2/ Mécanismes de levage auxiliaire

Désignation	Symbole	Valeur
Charge maximale de levage	$Q_a$	100 kN
Poids du moufle	$q_2$	02 kN
Vitesse de levage	$V_r$	16 m/min
Hauteur de levage	$H$	16 m
Rendement du palan en charge	$\eta_1$	98 %
Rendement du palan (Levage ou la décente à vide)	$\eta_2$	22 %
Vitesse de rotation du moteur	$\Omega$	975 trs/min
Nombre des câbles	$z$	04
Coefficient de correction	$e$	30
Coefficient de sécurité à la rupture	$C$	08
Diamètre du câble	$D_{ca}$	22 mm

##### IV.10-3-2-1/ Calcul du câble de levage

La tension maximale du câble s'exprime par la relation suivante :

$$F_c = \frac{Q_a + q_2}{z \cdot \eta_1} = \frac{100 + 2}{4 \cdot 0,98} = 26020,40 \text{ N} \quad F_r = C \cdot F_c = 8 \cdot 26020,40 = 208163,20 \text{ N}$$

##### IV.10-3-2-2/ Dimensionnement du tambour

###### Diamètre minimal d'enroulement du câble

$D_{me} = (0,95 \cdot e - 1) \cdot D_{ca} = (0,95 \cdot 30 - 1) \cdot 22 = 605 \text{ mm}$  , on adopte le diamètre normalisé qu'est supérieur au diamètre calculé donc :  $D_{me} = 630 \text{ mm}$

###### Diamètre d'enveloppe du câble

$$D_m = D_{me} + D_c = 630 + 22 = 652 \text{ mm}$$

###### Nombre de tours du tambour lors du levage

$$N_t = \frac{H \cdot i_p}{\pi \cdot D_m} + 6 = \frac{16 \cdot 2}{\pi \cdot 0,652} = 21,63 \text{ tours} = 22 \text{ tours}$$

##### IV.10-3-2-3/ Calcul du couple et de la puissance

$$i = \frac{\Omega \cdot D_{me}}{2 \cdot V_r} = 120,54$$

###### Couple moteur durant le levage en charge

$$C_1 = \frac{Q_a + q_2}{i \cdot \eta_1} \cdot \frac{D_{me}}{2} = \frac{100 + 2}{120,54 \cdot 0,98} \cdot \frac{0,630}{2} \cdot 10^3 = 272 \text{ N.m}$$

###### Couple moteur lors de la descente de la charge

$$C_2 = \frac{Q_a + q_2}{i} \cdot \frac{D_{me}}{2} \cdot \left(2 - \frac{1}{\eta_1}\right) = \frac{100 + 2}{120,54} \cdot \frac{0,630}{2} \cdot \left(2 - \frac{1}{0,98}\right) \cdot 10^3 = 260,44 \text{ N.m}$$

***Couple moteur durant le levage à vide***

$$C_3 = \frac{q_2}{i \cdot \eta_2} \cdot \frac{D_{me}}{2} = \frac{2}{120,85 \cdot 0,22} \cdot \frac{0,630}{2} \cdot 10^3 = 23,69 \text{ N.m}$$

***Couple moteur lors de la descente à vide***

$$C_4 = (1 - \eta_2) \cdot C_3 - \frac{q_2}{i} \cdot \frac{D_{me}}{2} = (1 - 0,22) \cdot 23,70 - \frac{2}{120,85} \cdot \frac{0,630}{2} \cdot 10^3 = 13,26 \text{ N.m}$$

***Couple équivalent approximatif du moteur :***  $C_{\text{eq.app}} = \sqrt{\frac{C_1^2 + C_2^2 + C_3^2 + C_4^2}{4}} = 188,77 \text{ N.m}$

***Puissance équivalente approximative du moteur :***  $P_{\text{eq.app}} = \Omega \cdot C_{\text{eq.app}} = 188,77 \cdot 102,05 = 19,26 \text{ kW}$

## Introduction

Dans un grand nombre d'applications, l'arrêt du moteur est obtenu simplement, par décélération naturelle. Le temps de décélération dépend alors uniquement, de l'inertie et du couple résistant de la charge entraînée, mais il est souvent nécessaire de réduire ce temps, le freinage électrique apporte une solution efficace et simple par rapport aux freinages mécaniques, il offre l'avantage de la simplicité et de ne mettre en œuvre aucune pièce d'usure. Le frein mécanique ou électromécanique par friction sur l'arbre est utilisé dans les applications de sécurité c.à.d. lorsqu'une machine dangereuse doit être arrêtée, aussi rapidement que possible, ou dans les applications de levage, où il faut éviter que la charge ne redescende lorsqu'une consigne d'arrêt du moteur est envoyée, dans ce cas, on parle alors de frein de maintien ou de moteur frein.

### C.1/ Évaluation du temps de freinage naturel

En régime établi, le moteur doit vaincre le couple de frottement (Proportionnel à la vitesse angulaire) et le couple de la charge. Le couple et la puissance de freinage, requis en fonction du temps, varient beaucoup selon le type de charge :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \approx J \cdot \frac{\Delta\Omega}{\Delta t} = C_m - C_r - \beta \cdot \Omega \Leftrightarrow C_m = C_r + \beta \cdot \Omega$$

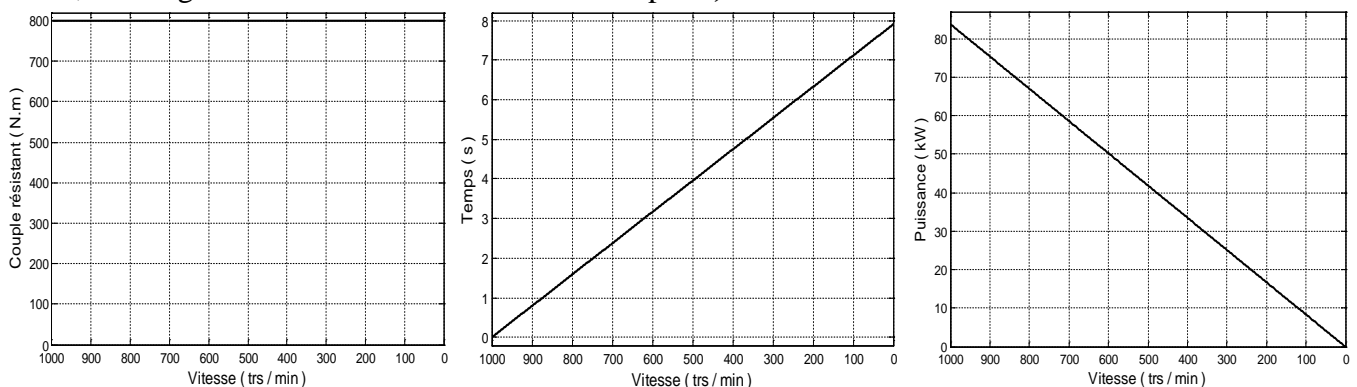
**Premier cas :** supposons une **charge à couple constant** ( $C_r = K$ ), pour calculer le temps de freinage ( $t_B$ ) requis, l'équation suivante peut être utilisée :

$$t_B = t_f - t_d = -\frac{J \cdot \Delta\Omega}{C_r + \beta \cdot \Omega}$$

Dans la pratique, il est difficile de connaître avec précision l'effet du frottement. En supposant un frottement nul ( $\beta = 0$ ), le temps calculé présente une marge de sécurité :

$$t_B = -J \cdot \frac{\Delta\Omega}{K} = J \cdot \frac{\Omega_d - \Omega_f}{K}$$

En supposant, une charge avec : une inertie de **60 kg.m<sup>2</sup>**, un couple de charge de **800 N.m** sur toute la plage de vitesse, une vitesse de rotation de la charge de **1000 trs/min** et un couple moteur ramené à zéro, la charge atteint la vitesse nulle dans le temps : **7,85 s**

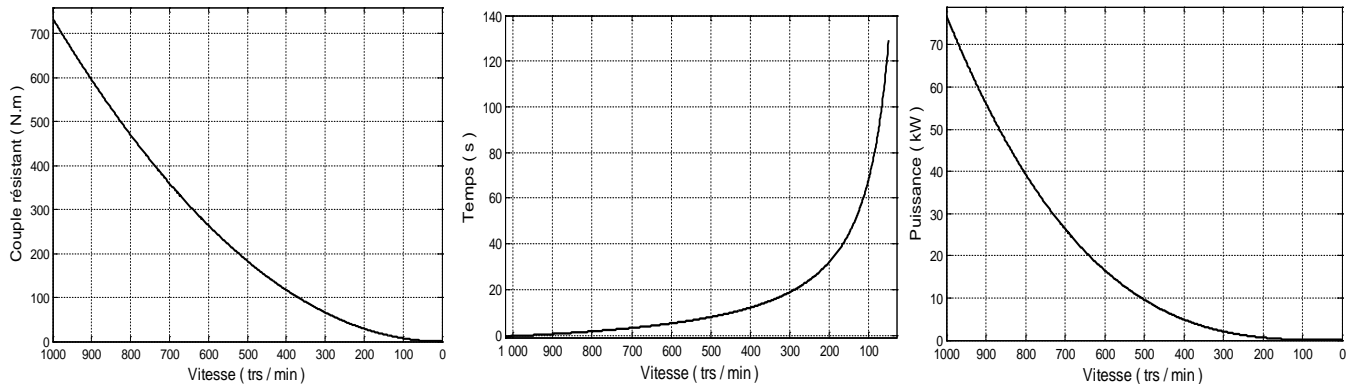


**Figure C.1 : Couple, temps de freinage cumulé et puissance de freinage en fonction de la vitesse**

**N.B :** cela concerne les applications, où le couple de charge reste constant. Si le couple de charge disparaît (Dans le cas d'une rupture de la bande transporteuse d'un convoyeur à bande), le moteur ne freine pas et la vitesse ne diminuera, que du fait du frottement mécanique.

**Deuxième cas :** supposons la même inertie et un couple de charge à **1000 tr/min** de **730 N.m** mais qui **varie, de manière quadratique** ( $C_r = K_c \cdot \Omega^2$ ). Si le couple moteur est forcé à zéro, le couple de charge diminue selon le carré de la vitesse, donc le temps de freinage est donné par la relation suivante :

$$t_B = t_f - t_d = J \cdot \frac{\Omega_d - \Omega_f}{K_c \cdot \Omega^2}$$



**Figure C.2 : Couple, temps de freinage cumulé et puissance de freinage en fonction de la vitesse**

**N.B :** on voit que le temps de freinage naturel à petite vitesse par exemple entre **200 et 100 tr/min** est très nettement supérieur à celui entre **1000 et 900 tr/min**.

## **C.2/ Freinage sans dispositif de l'électronique de puissance**

### **C.2-1/ Freinage par fonctionnement en hyper-synchrone**

C'est le cas, où le moteur est entraîné par sa charge, au-dessus de la vitesse de synchronisme. Il se comporte alors, comme une génératrice asynchrone et développe un couple de freinage. Aux pertes près, l'énergie est récupérée par le réseau.

Sur un moteur de levage, la descente de la charge à la vitesse nominale correspond à ce type de fonctionnement. Le couple de freinage équilibre alors exactement, le couple dû à la charge et amène non pas un ralentissement, mais une marche à vitesse constante. Ce fonctionnement possède les qualités suivantes :

- La vitesse est stable, pratiquement indépendante du couple entraînant ;
- L'énergie est récupérée et renvoyée au réseau.

### **C.2-2/ Freinage par contre-courant**

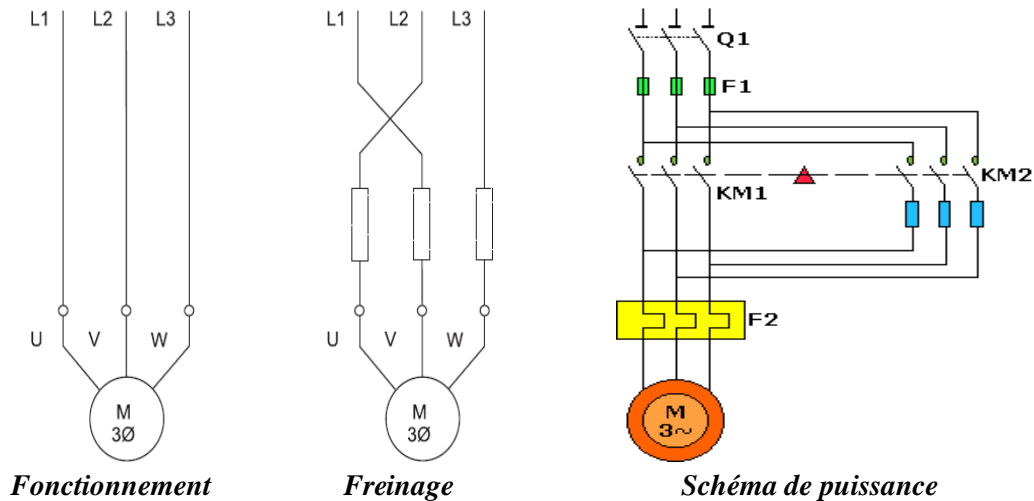
Le principe consiste, après avoir isoler le moteur du réseau alors qu'il tourne encore, à le reconnecter sur le réseau mais en sens inverse. C'est un mode de freinage très efficace avec un couple, en général supérieur au couple de démarrage, qui doit être arrêté suffisamment tôt, pour éviter que le moteur ne reparte en sens inverse. Divers dispositifs automatiques sont employés pour commander l'arrêt, dès que la vitesse approche de zéro :

- Détecteurs d'arrêt à friction, détecteurs d'arrêt centrifuges ;
- Relais de mesure de la fréquence ou du courant au rotor.



### **C.2-2-1/ Moteur à cage**

Avant d'adopter ce système, il faut absolument s'assurer que le moteur est capable de supporter des freinages en contre-courant, avec le service envisagé. En effet, outre les contraintes mécaniques, ce procédé impose des contraintes thermiques importantes au rotor, l'énergie correspondant à chaque freinage, étant dissipée dans la cage. Les sollicitations thermiques pendant le freinage sont trois fois plus importantes que pour une mise en vitesse. Afin d'obtenir un freinage sans brutalité, il est souvent inséré, lors du couplage en contre-courant, une résistance en série avec chaque phase du stator, le couple et le courant sont alors réduits.

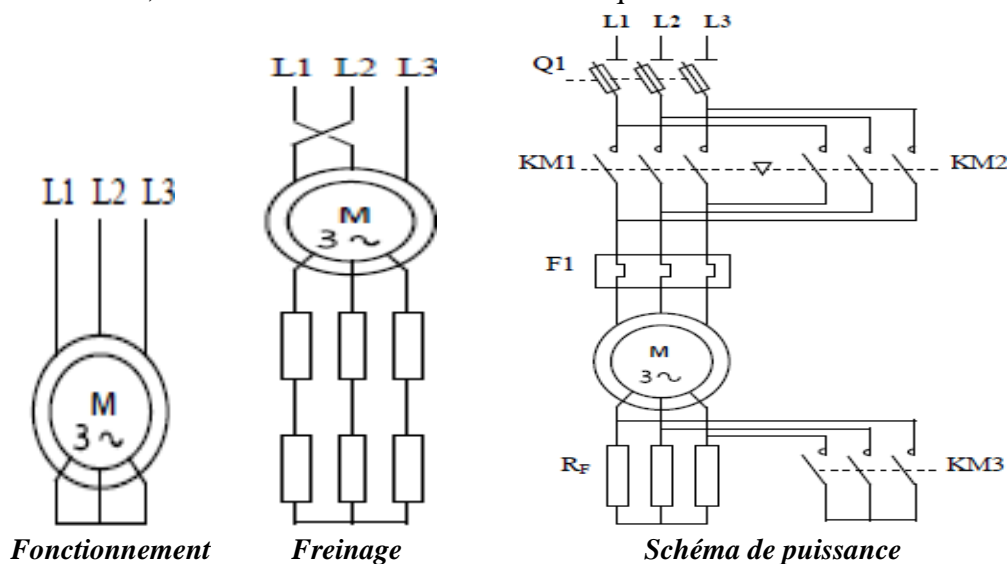


**Figure C.3 : Schéma de principe**

L'inconvénient du freinage par contre-courant, est qu'il n'est utilisé que sur certaines applications avec des moteurs de faible puissance.

### **C.2-2-2/ Moteur à rotor bobiné (Moteur à bagues)**

Afin de limiter la pointe de courant et de couple, il est impératif, avant de coupler le stator du moteur en contre-courant, de réinsérer les résistances rotoriques, ayant servi au démarrage, et souvent même d'ajouter une section supplémentaire dite de freinage. Le couple de freinage peut être facilement réglé, à la valeur désirée, en choisissant une résistance rotorique convenable.



**Figure C.4 : Schéma de principe**

Comme pour les moteurs à cage, une énergie importante est produite dans le circuit rotorique. Elle est dissipée en totalité dans les résistances.

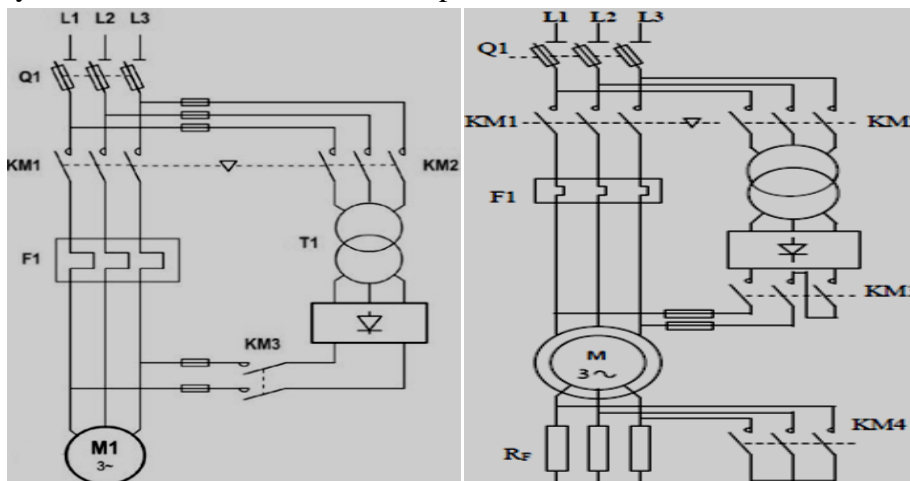
La commande automatique de l'arrêt à la vitesse nulle, peut être faite par l'un des dispositifs cités précédemment.

### ***C.2-3/ Freinage par injection de courant redressé***

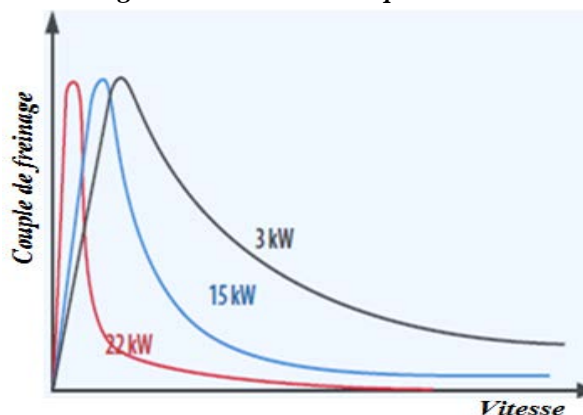
Ce mode de freinage est utilisé sur les moteurs à bagues et à cage. Par rapport au système à contre-courant, le prix de la source de courant redressé est compensé par un moindre volume des résistances. Le procédé consiste à envoyer du courant redressé dans le stator, préalablement séparé du réseau. Ce courant redressé crée un flux fixe dans l'entrefer du moteur. Pour que la valeur de ce flux corresponde à un freinage convenable, le courant doit être environ 1,3 fois le courant nominal.

La valeur du courant étant fixée par, la résistance des enroulements du stator et la tension de la source de courant redressé. Cette source est généralement constituée de redresseurs PD3 commandés.

Le mouvement du rotor représente un glissement par rapport à un champ fixe dans l'espace, alors que dans le système à contre-courant, le champ tourne en sens inverse.



**Figure C.5 : Schéma de puissance**



**Figure 6 : Couple de freinage en fonction de la vitesse**

Le freinage par injection de courant présente deux caractéristiques importantes : un couple de freinage élevé aux faibles vitesses et un couple de retenue à l'arrêt. Par contre, le couple de freinage généré se dégrade très vite lorsqu'on monte en vitesse. Il se dégrade également très rapidement, lorsque l'on monte en puissance. Le freinage par injection de courant est donc surtout intéressant, aux basses vitesses et pour les petits moteurs (Jusqu'à 15 kW).

### C.3/ Techniques de freinages qui nécessitent de l'électronique de puissance

#### ➤ Rappel

Les convertisseurs de fréquence actuels (Variateur de vitesse) sont constitués d'un redresseur d'entrée qui convertit la tension alternative en tension continue, stockée dans des condensateurs  $C$ , la self  $L$  filtre les pics de courant. L'onduleur reconvertit la tension continue en tension alternative, qu'il fournit au MAS à la fréquence et à l'amplitude requise. La quantité d'énergie emmagasinée dans le condensateur  $C$  est très faible, comparée à l'énergie totale absorbée par le MAS. Cela signifie que le redresseur doit, en permanence, fournir la puissance consommée par le moteur plus des pertes supplémentaires.

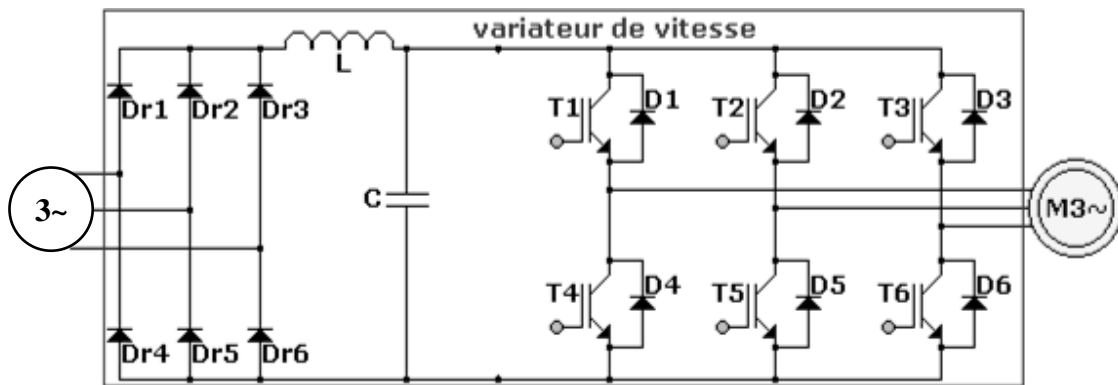


Figure C.7 : Schéma général d'un convertisseur de fréquence

#### C.3-1/ Ponts de thyristors en montage antiparallèle

Dans un convertisseur de fréquence, les ponts redresseurs à diodes peuvent être remplacés par deux redresseurs à thyristors en montage antiparallèle. Cette configuration permet d'adapter le pont redresseur au mode de fonctionnement : moteur ou générateur.

Le pont moteur convertit la tension alternative triphasée en tension continue, alimentant l'onduleur. Le pont générateur reconvertit la tension continue en tension alternative chaque fois qu'il faut renvoyer sur le réseau l'énergie de freinage récupérée du moteur.

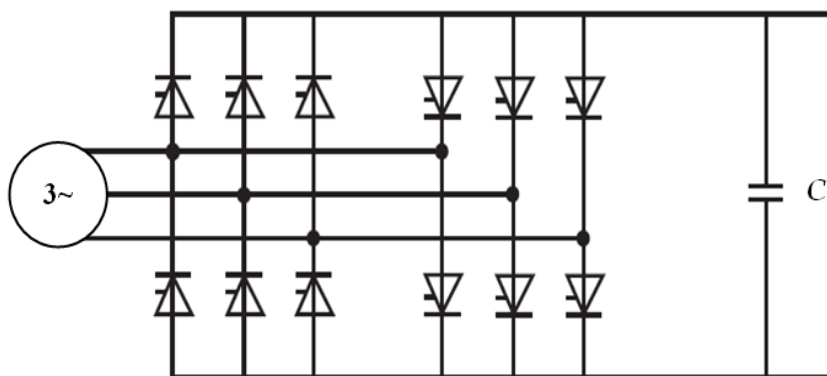


Figure C.8 : Schéma du redresseur à thyristors en montage antiparallèle

Un seul pont fonctionne à la fois, l'autre étant alors bloqué. L'angle d'allumage ou de retard à l'amorçage des thyristors est constamment réglé, pour maintenir la tension du condensateur au niveau désiré.

**Principaux avantages :**

- Solution techniquement maîtrisée ;
- Plus économique qu'une solution à composants IGBT ;
- Tension continue peut être régulée, à une valeur inférieure à celle du réseau, ce qui peut être intéressant dans des applications spécifiques.

**Principaux inconvénients :**

- En cas de perte réseau, il y a un risque de fusion des fusibles, suite à un défaut de commutation des thyristors ;
- Puissance de freinage n'est pas disponible pendant une perte réseau ;
- $\cos(\varphi)$  varie avec la charge, le courant déformé circule dans d'autres impédances du réseau et peut provoquer une distorsion de tension indésirable pour les autres dispositifs alimentés par la même ligne.

**C.3-2/ Hacheur et résistance de freinage ou freinage électronique**

Dans les variateurs standards, le redresseur est généralement, un redresseur à diodes, capable de transférer uniquement l'énergie du réseau vers le bus continu et non l'inverse. Si le sens de circulation du courant change, l'énergie renvoyée par la charge entraînée est stockée dans le condensateur  $C$  selon la formule :

$$W = P.t = \frac{C.U_{dc}^2}{2}$$

La capacité du condensateur  $C$ , étant relativement faible dans un convertisseur de fréquence, l'élévation de tension est rapide, alors que ses composants ne supportent qu'un niveau de tension donné. Pour prévenir une élévation excessive de la tension du bus continu, deux solutions sont envisageables :

**Première solution :**

L'onduleur lui-même empêche le renvoi de l'énergie de freinage de la charge entraînée vers le redresseur. Pour ce faire, on limite le couple de freinage pour maintenir le niveau de tension du bus continu constant. Cette fonction appelée contrôle de surtension, est également en standard dans la plupart des variateurs modernes. Cependant, elle signifie que la charge ne décélère pas en suivant la rampe de vitesse spécifiée par l'utilisateur.

Dans un variateur de **90 kW**, la capacité du condensateur est en moyenne de **5 mF**. Si le variateur est alimenté en (**400V/50Hz**), la tension du bus continu ( $U_{dc}$ ) est de **565 V**. En supposant que le condensateur peut supporter une tension maximum de **735 V**.

Le délai pendant lequel la puissance nominale de **90 kW** peut être envoyée au condensateur  $C$  est calculé comme suit :

$$t = \frac{C.U_{dc}^2}{2.P} = \frac{5.10^{-3}.(735^2 - 565^2)}{2.90.10^3} = 6,1 \text{ ms}$$

Ces valeurs s'appliquent en général, à tous les convertisseurs de fréquence basse tension modernes, indépendamment de leur puissance nominale. Dans la pratique, cela signifie que le contrôleur de surtension est basé sur le régulateur du couple de MAS, qui doit réagir très rapidement.

### Deuxième solution :

Pour limiter la tension du bus continu, cette méthode consiste à dissiper l'énergie de freinage dans une résistance  $R_f$ , via un hacheur de freinage. Celui-ci est un interrupteur électrique (Transistor), qui connecte le bus continu à une résistance, dans laquelle l'énergie de freinage est convertie en chaleur. Le MAS se comporte alors comme une génératrice et l'énergie mécanique est dissipée dans la résistance de freinage, sans augmentation des pertes dans le moteur. Le hacheur de freinage est automatiquement activé lorsque, la tension du bus continu franchit une valeur spécifiée.

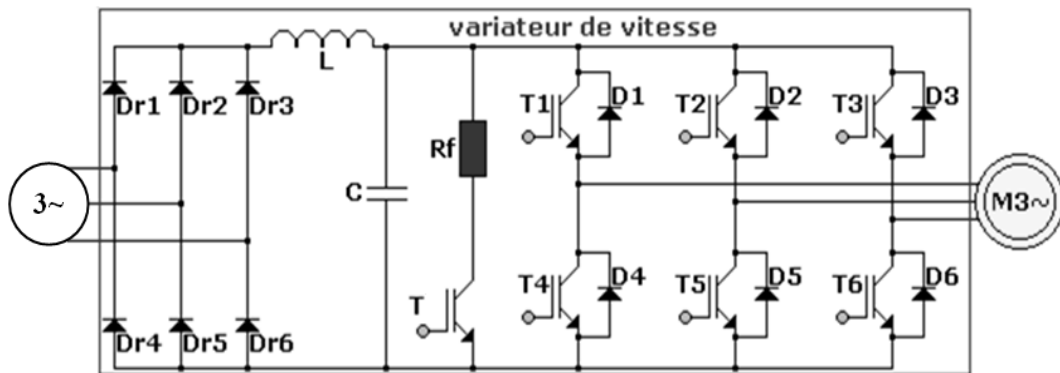


Figure C.9 : Schéma général d'un variateur de vitesse avec hacheur de freinage

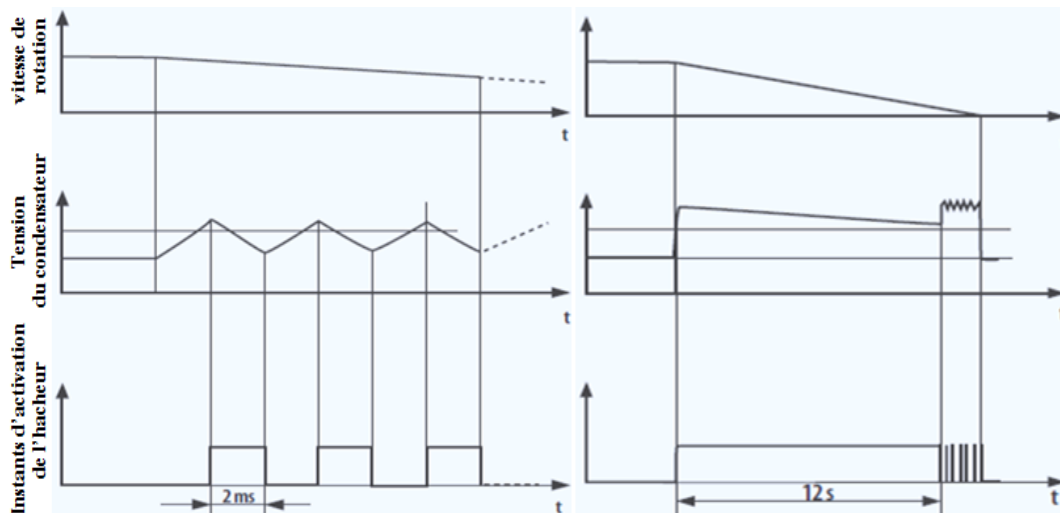


Figure C.10 : Influence du temps de décélération sur les grandeurs de l'hacheur de freinage

### Dimensionnement du hacheur de freinage :

Prenons maintenant, le cas d'un système d'entraînement qui doit être freiné dans un temps donné à partir d'une vitesse donnée :

Un ventilateur de **90 kW** avec une inertie de **60 kg.m<sup>2</sup>**, son point de fonctionnement nominal se situe à **1000 tr/min** et il doit s'arrêter en **20 s**. L'énergie maximale d'inertie peut être calculée par :

$$W_{cin} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \Omega^2$$

La puissance de freinage moyenne peut être calculée en divisant cette puissance de freinage par le temps :

$$P = \frac{W_{cin}}{t} = \frac{1}{2 \cdot t} \cdot J \cdot \Omega^2 = 16,45 \text{ kW}$$

**N.B :** cette valeur offre bien sûr, une marge de sécurité du fait, que la caractéristique de charge du ventilateur n'est pas prise en compte.

Lorsque le hacheur de freinage est dimensionné pour cette valeur de **16,45 kW** et que la capacité de freinage du moteur à une vitesse plus élevée est très nettement supérieure à **16,45 kW**, le variateur doit être doté d'une fonction de supervision de l'énergie de freinage maximale récupérée.

Pour optimiser le dimensionnement du hacheur de freinage, pour un temps de freinage donné, on peut commencer par regarder la figure 2, la vitesse diminue rapidement de **1000 à 500 trs/min**, sans freinage supplémentaire. L'effet de freinage naturel est à son maximum au début du freinage, ce qui indique clairement, qu'il est inutile de commencer à freiner le moteur avec la puissance de **16,45 kW** dans les premiers temps.

Comme le montre la figure 2, la vitesse passe de **1000 à 500 trs/min** sans aucun freinage supplémentaire en moins de **10 s**. À ce stade, le couple de charge n'est que de **25%** de sa valeur nominale et l'énergie cinétique, conservée dans le ventilateur, n'atteint également que **25%** de l'énergie à **1000 trs/min**. Si le calcul fait à **1000 trs/min** est refait à **500 tr/min**, on voit que la puissance de freinage requise pour passer de **500 à 0 trs/min** est de **8,2 kW**.

En résumé, le temps de décélération désiré de **20 s** pour passer de **1000 à 0 tr/min** est obtenu avec un hacheur et une résistance de freinage dimensionnés pour **8,2 kW**.

**Principaux avantages :**

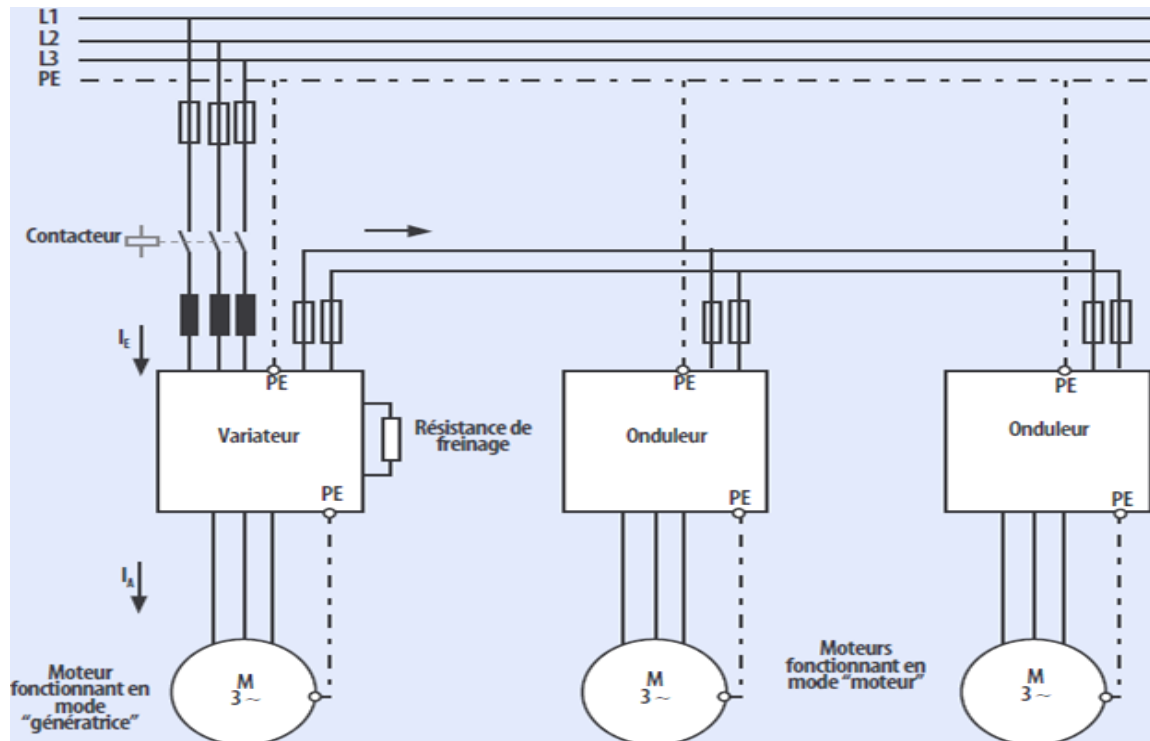
- Montage électrique simple et technologie maîtrisée ;
- Hacheur et résistance constituent un investissement faible ;
- Le hacheur continue de fonctionner, en cas de perte réseau c.à.d. un freinage peut être indispensable en cas de coupure de l'alimentation réseau. Par exemple, l'ascenseur ou autres applications avec arrêt de sécurité.

**Principaux inconvénients :**

- L'énergie de freinage est gaspillée en perte si la chaleur ne peut être utilisée ;
- Le hacheur et les résistances de freinage sont encombrants ;
- Peut exiger un investissement dans un système de refroidissement et de récupération de la chaleur ;
- Les hacheurs de freinage sont généralement dimensionnés pour un cycle donné par exemple, 100 % de puissance pendant une minute toutes les 10 minutes, des temps de freinage longs exigent un dimensionnement plus précis du hacheur de freinage ;
- Risque accru d'incendie du fait, des résistances qui chauffent et de la présence éventuelle de poussières et d'agents chimiques dans l'air ambiant ;
- Le niveau de tension plus élevé du bus continu pendant le freinage, accroît les contraintes électriques sur l'isolation du moteur.

### **C.3-3/ Bus continu commun**

Lorsqu'une application comporte plusieurs entraînements, dont certains fonctionnent en mode générateur et d'autres en mode moteur, le bus continu commun constitue une solution très efficace, pour réutiliser l'énergie de freinage. Un système d'entraînement à bus continu commun comporte un redresseur séparé, convertissant la tension alternative en tension continue et pour alimenter les MAS, des onduleurs raccordés au bus continu commun, ce dernier servant à récupérer l'énergie de freinage et à la mettre à la disposition des autres moteurs.



**Figure C.10 : Configuration d'un système d'entraînement à bus continu commun**

#### **Principaux avantages :**

- Méthode simple de répartition de la puissance entre plusieurs entraînements ;
- Faibles pertes de conversion de l'énergie de freinage grâce au bus continu commun ;
- Même si la puissance de freinage instantanée est plus élevée que la puissance en mode moteur, pas besoin de dimensionner le hacheur et la résistance de freinage pour la puissance de freinage maximale.

#### **Principaux inconvénients :**

- Si le nombre de moteurs est faible ;
- Pour que cette solution soit opérationnelle, il faut que l'on ait affaire à un entraînement, qui fonctionne très fréquemment en mode générateur, comme c'est le cas par exemple, des enrouleuses/dérouleuses et des bandes transporteuses. Pour que tout fonctionne efficacement, il faut bien calculer l'installation.



- [1] [https://sitelec.org/download\\_page.php?filename=cours/divers/plaque\\_signaletique\\_asynchrone.pdf](https://sitelec.org/download_page.php?filename=cours/divers/plaque_signaletique_asynchrone.pdf)
- [2] Fouillé. A « Problèmes d'électrotechnique à l'usage des ingénieurs, Machines électriques », édition Dunod 1978
- [3] Caron. J.P, Hautier. J.P « Modelisation et commande de la machine asynchrone », édition technip 1995
- [4] Chastelain. J « Traité d'électricité, Volume 10 : Machines électriques », édition Lavoisier 1983
- [5] ABB drives. Guide technique № 7, dimensionnement d'un système d'entraînement
- [6] <https://www.rncan.gc.ca/energie/produits/reference/15332>
- [7] <http://www.fsrn.ch/common/print.php?id=386&lang=e>
- [9] <http://www.volta-electricite.info/articles.php?lng=fr&pg=11099>
- [10] [http://formationenergetique.fr/images/LPChesnois/BacProTMSEC/Cours/MOTEUR\\_dahlander.pdf](http://formationenergetique.fr/images/LPChesnois/BacProTMSEC/Cours/MOTEUR_dahlander.pdf)
- [11] <https://www.electricalonline4u.com/2015/11/contacter-wiring-for-3phase-motor.html>
- [12] <https://www.atecfrance.fr/content/images/tab/moteur-electrique-maf-notice-00.pdf>
- [13] ABB drives. Guide technique № 8, le freinage électrique
- [14] [http://www.mesures.com/pdf/old/038\\_044\\_SOPE792SIEMENS\(1\).pdf](http://www.mesures.com/pdf/old/038_044_SOPE792SIEMENS(1).pdf)
- [15] <http://processs.free.fr/Pages/VersionMobile0.php?page=2130>
- [16] <https://www.rncan.gc.ca/energie/produits/reference/14974>
- [17] [http://www.azprocede.fr/Cours\\_GC/pompe\\_introduction.html](http://www.azprocede.fr/Cours_GC/pompe_introduction.html)
- [18] <http://www.ventilation-industrie.fr/1les-differentes-technologies-de-ventilateurs>
- [19] Savoir-faire KSB, volume 4 : Régulation de pompes / Automatisation de pompes
- [20] William. B « automates programmables industriels », édition Dunod 2015
- [21] Guide technique schneider-electric : la variation de vitesse au cœur des applications industrielles
- [22] <https://energieplus-lesite.be/techniques/ventilation8/ventilation-hygienique/composants-de-la-ventilation/ventilateurs/#c4192+c4193+c4194+c4195>
- [23] <https://www.technologuepro.com/cours-genie-electrique/cours-28-les-automatismes-industriels/>
- [24] Ceer. M « Instrumentation industrielles, volume 1 », édition Lavoisier 1990
- [25] Bonal. J « Entraînement électrique à vitesse variable : volume 3, interactions convertisseur-réseau et convertisseur-moteur-charge », édition Lavoisier 2000
- [26] Yvon. P « Variation de vitesse », édition Hermès et Lavoisier 1993
- [27] <https://www.rncan.gc.ca/efficacite-energetique/propos-denergy-star-canada/annonces-relatives-au-programme/publications/guide-de-reference-sur-lefficaci/introduction-aux-systemes-dair-comprime/14969>
- [28] <https://energie.wallonie.be/fr/production-de-l-air-comprime-en-industrie.html?IDC=8040&IDD=97785>
- [29] Brochure produit ABB : variateur moyenne tension ACS5000, 2 - 36 MW, 6 - 13,8 kV
- [30] Manuel schneider-electric : variateurs moyenne tension ATV6000, 0,3 à 20 MW, 2,4 - 13,8 kV
- [31] <https://www.ediel.net/-Produits-.html>

- [32] <https://meglab.ca/en/achievements/electrical-design-and-technologies-integration/>
- [33] <https://fr.aliexpress.com/item/32700202708.html>
- [34] <https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/types-d-ascenseurs/>
- [35] <https://www.danfoss.com/fr-fr/markets/buildings-commercial/dds/drives-for-elevators-and-escalators/#tab-overview>
- [36] <http://liftcontrolsystem.fr/products.html>
- [37] <https://energieplus-lesite.be/evaluer/ascenseurs4/Evaluer-l-efficacite-energetique-de-l-installation/evaluer-la-consommation-et-l-appel-de-puissance/>
- [38] <http://www.chimix.com/an7/concours/a3.htm>
- [39] <https://energieplus-lesite.be/concevoir/ascenseurs2/dimensionner-l-ascenseur/>
- [40] <https://fr.aliexpress.com/item/32822917679.html>
- [41] <https://domolift.fr/lexique-ascenseurs>
- [42] [http://www.lycee-ferry-versailles.fr/si-new/index.php?rubrique=3\\_4\\_rendement](http://www.lycee-ferry-versailles.fr/si-new/index.php?rubrique=3_4_rendement)
- [43] <https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/types-de-gestion-du-traffic/>
- [44] Mémo Format. Manuel de formation professionnel «Utilisation des ponts roulants et élingage »
- [45] <https://www.directindustry.fr/prod/imet-radio-remote-control/product-29498-1918801.html>
- [46] <https://www.demagcranes.com/fr>
- [47] [https://www.verlinde.com/assets/pdf/broch\\_europont\\_2016.pdf](https://www.verlinde.com/assets/pdf/broch_europont_2016.pdf)
- [48] VERLINDE guide technique : système de variation de vitesse en levage et/ou direction
- [49] <http://4electromecanique.blogspot.com/2017/03/introduction-il-existe-plusieurs.html>
- [50] <http://hoistoverheadcrane.french.sell.everychina.com/p-95485393-electric-overhead-crane-electromagnet-crane-with-top-slewing-rotating-magnetic-chuck-for-steel-mill.html>
- [51] <https://french.alibaba.com/product-detail/electromagnetic-revolving-overhead-crane-with-carrier-beam-magnet-overhead-crane-electromagnet-crane-60650931244.html>
- [52] <http://fr.yuntiancrane.com/overhead-crane/overhead-crane-for-special-industries/double-girder-overhead-crane-with.html>
- [53] <https://www.pop-industrie.com/pont-roulant-pour-la-manutention-levage-de-l-acier-siderurgie-produit-5980-150#product-description>
- [54] <https://www.pop-industrie.com/pont-roulant-automatise-de-process-pour-fabrication-en-continu-produit-5992-150#product-description>