

## Chapitre I : Eléments des équipements des mécanismes industriels

I.1-Principes généraux sur les systèmes industriels

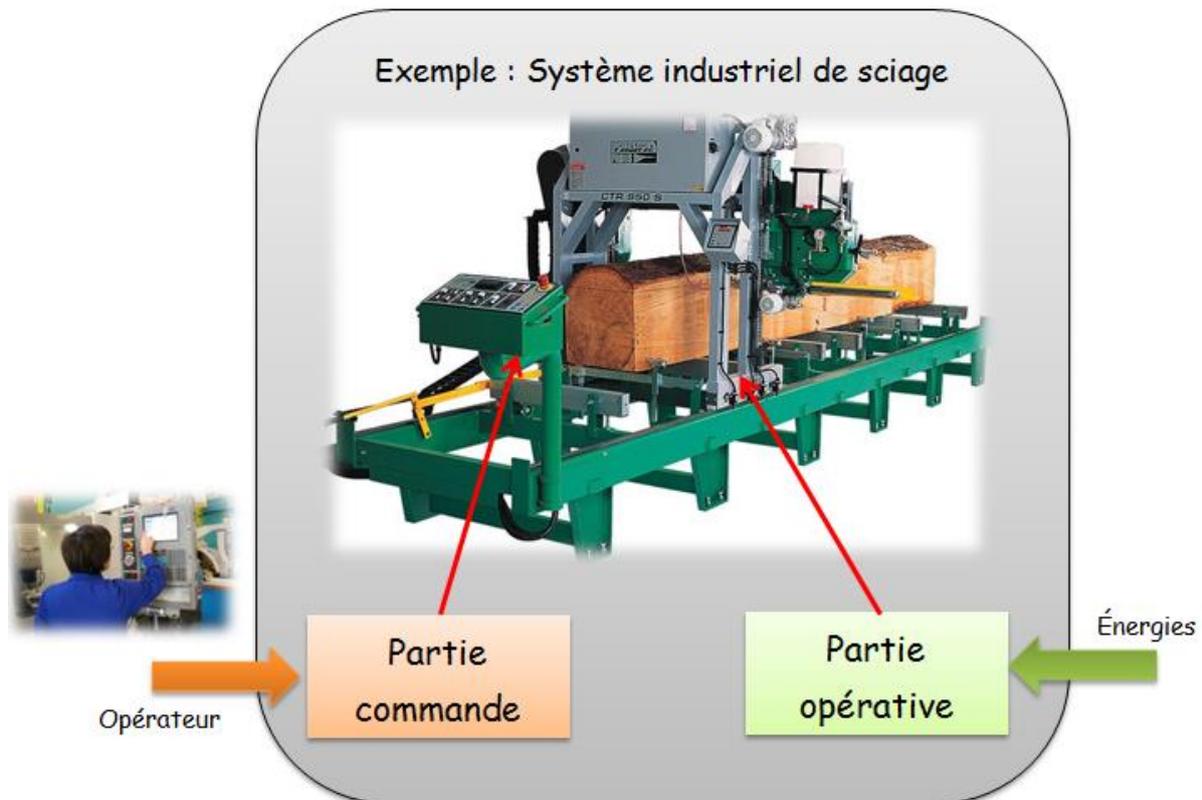
I.2- Critères de choix d'un moteur

I.3- Principales grandeurs à prendre en compte pour le choix d'un moteur de l'entraînement :  
Vitesses, couples, puissances, moment d'inertie, réducteur/multiplication.

### I.1-Principes généraux sur les systèmes industriels

Un système industriel est composé de deux parties :

- une partie opérative, qui effectue les actions nécessaires à la réalisation du processus de fabrication à partir des ordres de la partie commande ;
- une partie commande, qui donne les ordres à la partie opérative selon les informations et les comptes rendus qu'elle reçoit.



Une **machine électrique** est un dispositif permettant la conversion d'énergie électrique en travail ou énergie mécanique :

- Produit d'un couple par un déplacement angulaire pour les moteurs rotatifs,
- Produit d'une force par un déplacement linéaire pour les moteurs linéaires.



**Moteur électrique rotatif**

## I.2- Critères de choix d'un moteur

### I.2.1. Critères de choix électrique

-alternatif monophasé, triphasé avec ou sans neutre, multi phase...

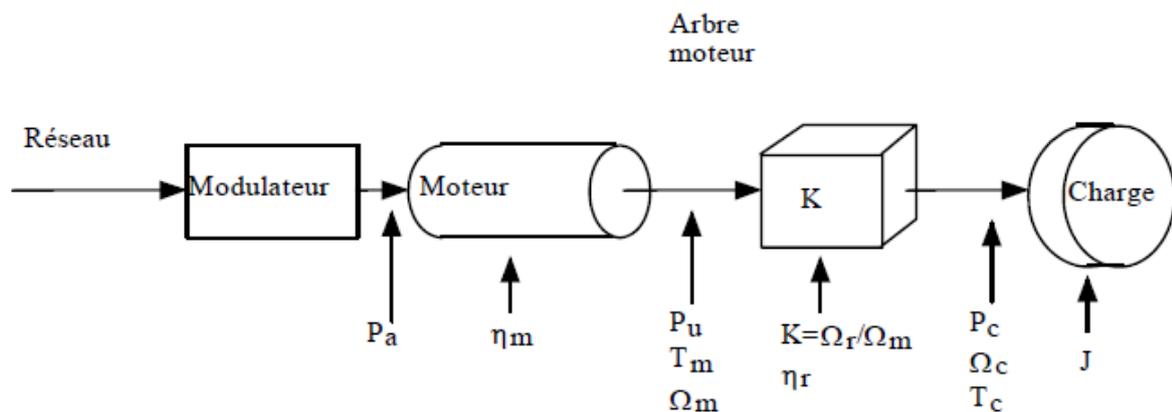
-Continu ;

### I.2.2. Critères de choix mécaniques :

Le choix d'un convertisseur dépend essentiellement du type de charge : couple, vitesse, Accélération, cycle de fonctionnement.

Les moteurs devront être dimensionnés pour correspondre aux exigences en matière de vitesse de fonctionnement et de couple de la charge. Les types de charges sont classés selon différents régimes d'utilisation caractérisant le temps de fonctionnement et les variations de la charge.

### Chaîne De Transmission :



Pa : Puissance absorbée par le moteur en W ou kW ;

$\eta_m$  : Rendement du moteur ( $\eta_m = P_u / P_a$ ) ;

Pu : Puissance utile fournie par le moteur sur l'arbre en W ou kW ( $P_u = T_m \omega_m$ ) ;

Tm : Couple utile sur l'arbre moteur ou couple résistant opposé par la charge en Nm ;

$\omega_m$  : Vitesse de rotation de l'arbre moteur en rad/s ;

K : Rapport de réduction du réducteur ( $K = \omega_r / \omega_m$ ) ;

$\eta_r$  : Rendement du réducteur ( $\eta_r = P_c / P_u$ ) ;

Pc : Puissance demandée par la charge en W ou kW ;

$\omega_c$  : Vitesse de rotation de la charge en rad/s ;

Tc : Couple résistant de la charge en Nm ;

J : Moment d'inertie de la charge en  $\text{kg/m}^2$  ;

On doit à l'aide des lois de la mécanique déterminer les paramètres Pu,  $\omega_m$ , Tm.

### I.2.3. Autres critères de choix d'un convertisseur électromécanique :

Outre ces caractéristiques fondamentales pour le choix d'une machine électrique, d'autres critères doivent néanmoins pris en compte.

Citons entre autre :

· L'environnement (définition de l'IP, de l'IK, de la classe de température, l'altitude de fonctionnement, nature de

L'atmosphère....)

· Le service de fonctionnement ;

· Les dimensions de la machine (Hauteur d'axe, ... ) ;

· La position de fonctionnement (Verticale, Horizontale) ;

## I.3- Principales grandeurs à prendre en compte pour le choix d'un moteur de l'entraînement :

### I.3.1. Vitesse

La vitesse  $n$  est normalement exprimée en tr/min. En général, la plaquette signalétique contient les données relatives à la vitesse nominale  $n_n$  et à la charge nominale équivalente à sa puissance maximale.

### I.3.2. Couple électromagnétique

Lorsqu'un moteur électrique entraîne une charge, celle-ci s'oppose à la rotation en résentant un couple résistant. Pour que la charge soit entraînée, il est nécessaire que le couple moteur soit toujours supérieur au couple résistant.

**EQUATION FONDAMENTALE :**

$$T_m = T_a + T_r \quad \text{Et} \quad T_a = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$$

$T_m$  : Couple moteur ;

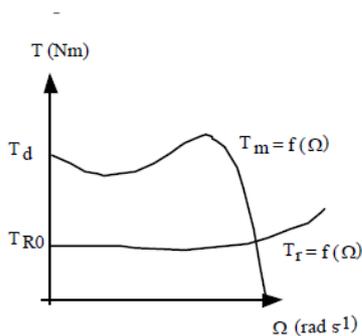
$T_a$  : Couple accélérateur ;

$T_r$  : Couple résistant opposé par la charge ;

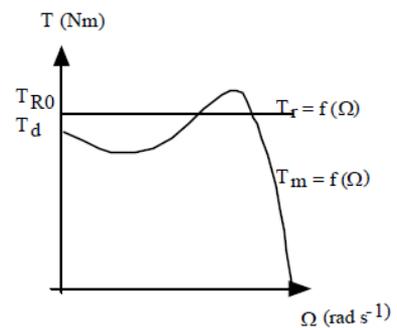
$J$  : Moment d'inertie ;

La machine ne peut démarrer que si le couple de démarrage de la machine est supérieur au couple résistant de la charge.

$$T_d > T_m \Rightarrow T_a = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = T_m - T_r$$



Le moteur **démarr**e  $T_d > T_{R0}$



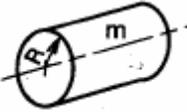
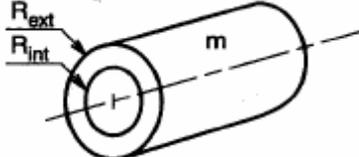
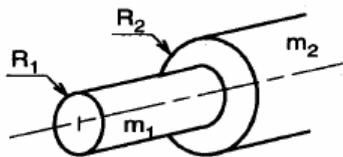
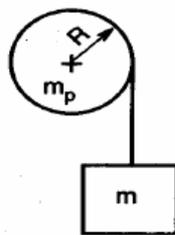
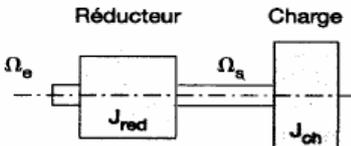
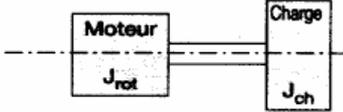
Le moteur **ne démarre pas**  $T_d < T_{R0}$

### I.3.3. Puissance

Le choix d'un moteur exige de connaître la puissance d'entraînement  $P_e$  requise. La puissance utile  $P_u$  nécessaire au travail de la machine est généralement connue.

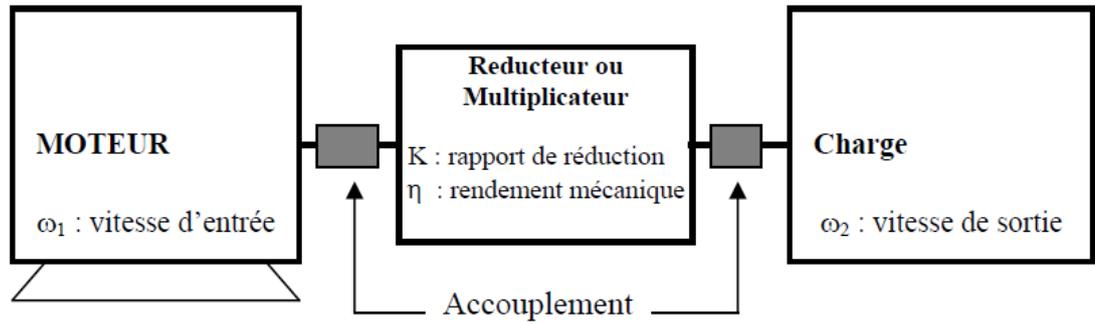
### I.3.4. Moment d'inertie

L'inertie caractérise les masses en mouvement (paramètre dynamique). C'est par son inertie qu'un système s'oppose aux changements de vitesse que l'on veut lui imposer. La grandeur physique associée à l'inertie est le moment d'inertie  $J$  en **kg.m<sup>2</sup>**

SYSTÈMES	FORMES	RELATIONS
Cylindre	 <p>R : rayon en m m : masse en kg</p>	$J = \frac{1}{2} mR^2$
Cylindre creux		$J = m \frac{R_{ext}^2 + R_{int}^2}{2}$
Arbre épaulé		$J = m1 \frac{R1^2}{2} + m2 \frac{R2^2}{2}$
Poids poulie		<p>- Inertie d'un mobile en translation ramené sur l'axe de rotation.</p> $W_T = W_R \Leftrightarrow \frac{1}{2} mV^2 = \frac{1}{2} J\Omega^2 \Leftrightarrow$ $J = \frac{mV^2}{\Omega^2} = \frac{m\Omega^2 R^2}{\Omega^2} = mR^2$ $J_T = J_{poulie} + J_{charge} = mp \frac{R^2}{2} + mR^2$
Inertie ramenée sur l'arbre moteur		$J_T = \left(\frac{\Omega_s}{\Omega_e}\right)^2 J_{ch} + J_{red}$
Moment d'inertie total		$J_T = J_{rot} + J_{ch}$ <p>(J<sub>ch</sub> ramenée sur l'arbre moteur)</p>

### I.3.4. réducteur/multiplication

Les réducteurs/multiplicateurs 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.



**MOTEUR :**

$\omega_1$  : Vitesse en  $\text{rd.s}^{-1}$

$C_1$  : Couple en Nm

$P_1$  : Puissance en watts

$W_1$  : Energie cinétique en joules

$J_1$  : Inertie en  $\text{m}^2.\text{kg}$

**Charge**

$\omega_2$  : Vitesse en  $\text{rd.s}^{-1}$

$C_2$  : Couple en Nm

$P_2$  : Puissance en watts

$W_2$  : Energie cinétique en joules

$J_2$  : Inertie en  $\text{m}^2.\text{kg}$

## Chapitre II: Types de service des moteurs électriques

- II.1-Types de services principaux: S1...S9 ;
- II.2-Valeurs moyennes de puissance, couple et intensité ;
- II.3-Puissance d'un moteur et types de service ;
- II.4-Augmentation de puissance par rapport au S1 ;
- II.5-Capacité limite mécanique ;
- II.6-Réduction de puissance par rapport au S1.

## II.1 Présentation

Les caractéristiques d'une machine électrique sont fournies par son constructeur pour une utilisation continue permettant d'atteindre l'équilibre thermique (correspond au service-type S1). Par exemple, une machine de 1,5 kW pourra effectivement fournir cette puissance en marche continue et constante sans échauffement dangereux.

Par contre, si la même charge doit être entraînée avec de nombreux accélérations et freinages, le moteur de 1,5 kW aura tendance à chauffer, parfois jusqu'à se détériorer. Il faudra donc choisir un moteur de puissance supérieure permettant d'évacuer correctement l'énergie calorifique.

Le calcul de la puissance apparente (puissance équivalente-S1) permet de choisir le moteur adapté au mode de service.

### ***Extraits de la norme***

ART. 16. - 1. - un service-type est une forme simplifiée de service.

NOTE. - Cela signifie qu'un service sera complètement défini par l'indication du service-type et d'un régime constant. Toutefois, dans le cas particulier du service-type S 8, on considère plusieurs régimes constants.

2. - Les termes utilisés dans les spécifications des services-types ont la signification suivante :

Equilibre thermique. - Etat atteint quand les températures observées des diverses parties de la machine ne varient pas de plus de 2°C par heure.

Repos. - Suppression complète de tout mouvement et de toute alimentation électrique ou mécanique.

Fonctionnement à vide. - Etat obtenu après suppression de la charge.

- *NOTE : Sauf indication contraire on considère le fonctionnement à vide sous la tension nominale.*

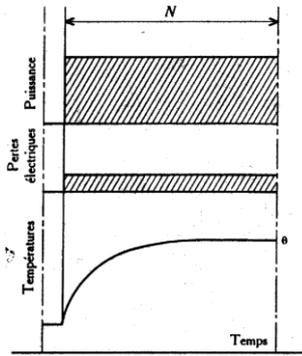
Facteur de marche. - Dans certains services-types, rapport entre le temps de fonctionnement en régime, y compris le démarrage et le freinage électrique, et la durée d'un cycle.

- *Le couple accélérateur reste toujours suffisant sur la période de démarrage*

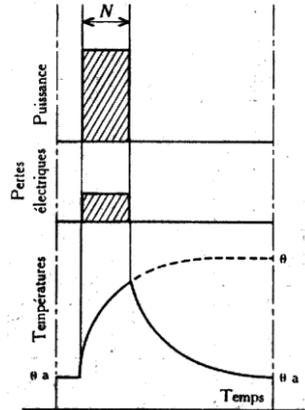
## II.2 Services types

### **Graphes de fonctionnement**

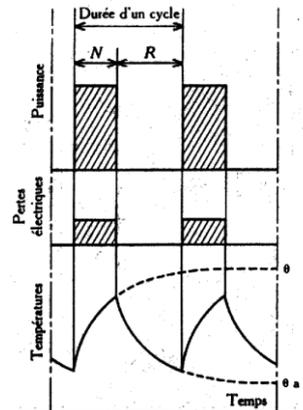
S1 : Service continu



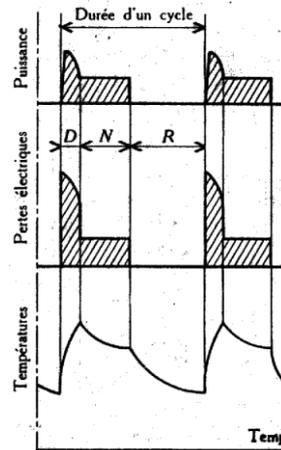
S2 : Service temporaire



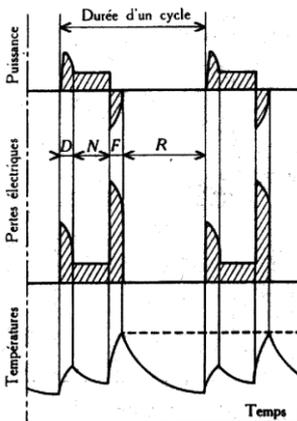
S3 : Service intermittent périodique



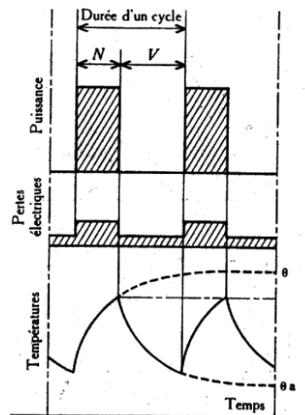
S4 : Service intermittent périodique à démarrage



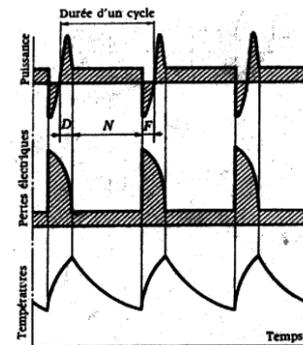
S5 : Service intermittent périodique à freinage électrique



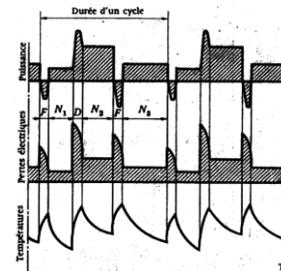
S6 : Service ininterrompu périodique à charge intermittente



S7 : Service ininterrompu périodique à freinage électrique



S8 : Service ininterrompu périodique à changements liés de charge et de vitesse



S9 : Service à variations non périodiques de charge et de vitesse

S10 : Service avec charges constantes distinctes

Légende

## **Définitions**

### **Service continu S 1**

Forme de service comportant un fonctionnement à régime constant d'une durée suffisante pour que l'équilibre thermique soit atteint.

- $F_{dm} = 1, n \leq 6$

### **Services temporaires S 2**

Formes de services comportant un fonctionnement à régime constant pendant un temps N déterminé, moindre que celui requis pour atteindre l'équilibre thermique, suivi d'un repos d'une durée suffisante pour rétablir l'égalité de température avec celle du milieu refroidissant.

- $F_{dm}$  selon CdC,  $n = 1$

### **Services intermittents périodiques S 3**

Forme de services composés d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps N de fonctionnement à un régime constant, et un temps R de repos, ces temps étant insuffisants pour que l'équilibre thermique soit atteint aussi bien pendant les périodes d'échauffement que pendant les périodes de refroidissement.

- $F_{dm} = N / (N + R), n = 0$

### **Services intermittents à démarrage S 4**

Formes de services composés d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps D de démarrage, un temps N de fonctionnement à un régime constant et un temps R de repos. Les temps de fonctionnement et de repos sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au cours d'un cycle.

- $F_{dm} = (N+D) / (N+D+R)$ , n selon cahier CdC ; remplacer n par 4n dans la formule.
- *Dans ces services, l'arrêt du moteur est obtenu, soit par ralentissement naturel après coupure de courant, soit par un moyen de freinage tel qu'un frein mécanique ne provoquant pas d'échauffement supplémentaire des enroulements*

### **Services intermittents à démarrage et freinage électrique S 5**

Formes de services composés d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps D de démarrage, un temps N de fonctionnement à régime constant, un temps F de freinage et un temps R de repos. Les temps de fonctionnement et de repos sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au cours d'un cycle.

- $F_{dm} = (N+D+F) / (N+D+F+R)$ , n selon CdC, remplacer n par 4n dans la formule
- *Dans ces services, le freinage est rapide et réalisé par un procédé électrique.*

### **Services ininterrompus à charge intermittente S 6**

Formes de services composés d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps N de fonctionnement à régime constant et un temps V de fonctionnement à vide, ces temps étant insuffisants

pour que l'équilibre thermique soit atteint, aussi bien pendant les périodes d'échauffement que pendant les périodes de refroidissement.

- $F_{dm} = N/(N+V)$ ,  $n = 0$

### **Services ininterrompus à démarrage et freinage S 7**

Formes de services composées d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps de démarrage, un temps de fonctionnement à régime constant et un temps de freinage électrique. Les temps de fonctionnement sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au cours d'un cycle. Il n'existe pas de temps de repos, le moteur restant pratiquement toujours sous tension.

- $F_{dm} = 1$ ,  $n$  selon CdC ; remplacer  $n$  par  $4n$  dans la formule

### **Services ininterrompus à changement de vitesse périodique S 8**

Formes de services composés d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps de fonctionnement à régime constant correspondant à une vitesse de rotation déterminée suivi de temps de fonctionnement à d'autres régimes correspondant à des vitesses de rotation différentes réalisées par exemple par changement du nombre de pôles dans le cas de moteur à induction.

- $F_{dm} = 1$ ,  $n$  selon CdC ; remplacer  $n$  par  $4n$  dans la formule
- *Les temps de fonctionnement sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au cours du cycle. Il n'existe pas de temps de repos, le moteur restant pratiquement toujours sous tension.*

### **Service à variations non périodique de charge et de vitesse S9**

Service dans lequel la charge et la vitesse ont une variation non périodique dans la plage de fonctionnement admissible. Ce service inclut fréquemment des surcharges appliquées qui peuvent être largement supérieures à la pleine charge. Pour ce service type, des valeurs appropriées à pleine charge devront être considérées comme bases du concept de surcharge.

- $F_{dm} = 1$ ,  $n$  selon CdC ; remplacer  $n$  par  $4n$  dans la formule. Calcul de  $P$  pour régime intermittent.

### **Service avec charges constantes distinctes S10**

Service comprenant au plus quatre valeurs distinctes de charges (ou charges équivalentes), chaque valeur étant appliquée pendant une durée suffisante pour que la machine atteigne l'équilibre thermique. La charge minimale pendant un cycle de charge peut avoir la valeur zéro (fonctionnement à vide ou temps de repos).

- $F_{dm} = 1$  et  $n = 0$ . Calcul de  $P$  pour régime intermittent.

## **II.3. Puissance d'un moteur et types de service**

## Calculs

- Calcul de la **puissance équivalente-S1** en fonction des services S2 à S7

$$P_{SI} = \sqrt{\frac{n \times t_d \times \left(\frac{I_d}{I_n} \times P_n\right)^2 + (3600 - n \times t_d) \times P_u^2 \times F_{dm}}{3600}} \quad \text{avec : } \frac{I_d}{I_n} = \text{propriété du moteur}$$

Les paramètres n et Fdm sont définis pour chacun des services-types.

## Cas des charges intermittentes : service S8 à S10

$$P_u = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

Les  $P_i$  inférieurs à  $P_n / 2$  (puissance nominale moteur) seront remplacée par  $P_n / 2$

Aucun des  $P_i$  ne dépassera  $2 \times P$

Le temps de démarrage réel ne dépasse pas 5 s

Le couple accélérateur reste toujours suffisant sur la période de démarrage

## Puissance apparente en fonction des services S2 à S10

$$P_a = \sqrt{\frac{n \times t_d \times \frac{I_d}{I_n} \times P_n - n \times t_d \times P_u^2 \times F_{dm}}{3600}} \quad \text{avec :}$$

Les paramètres n et Fdm sont définis pour chacun des services-types.

## Charges intermittentes

$$p_u = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

⑩ Les  $P_i$  inférieurs à  $P_n / 2$  (puissance nominale moteur) seront remplacée par  $P_n / 2$

⑩ Aucun des  $P_i$  ne dépassera  $2 \times P$

⑩ Le temps de démarrage réel ne dépasse pas 5 s

⑩ Le couple accélérateur reste toujours suffisant sur la période de démarrage

$t_d$  (s) : temps de démarrage avec un moteur de puissance  $P_n$

n : nombre de démarrages équivalents par heure :

$n = n_D + 3 \cdot n_F + 0,5 \cdot n_i$  (moteur à cage)

$n = n_D + 0,8 \cdot n_F + 0,25 \cdot n_i$  (moteur à bagues)

$n_D$  : nombre de démarrages dans l'heure

$n_F$  : nombre de freinages électriques dans l'heure

$n_i$  : nombre d'impulsions (démarrage incomplet jusqu'à 1/3 de la vitesse finale) dans l'heure

Fdm (%) : facteur de marche = durée de fonctionnement à  $P_u$  / durée totale du cycle

$I_d / I_n$  : appel de courant avec un moteur de puissance  $P_n$

$P_u$  : puissance utile du moteur pendant le cycle d'utilisation hors démarrage

$P_n$  : puissance nominale du moteur pressenti

⑩  $t_d$  (s) : temps de démarrage avec un moteur de puissance  $P_n$

⑩	<b>n</b> : nombre de démarrages équivalents par heure :
	$n = n_D + 3.n_F + 0,5.n_i$ (moteur à cage)
	$n = n_D + 0,8.n_F + 0,25.n_i$ (moteur à bagues)

⑩  $n_D$  : nombre de démarrages dans l'heure

⑩  $n_F$  : nombre de freinages électriques dans l'heure

⑩  $n_i$  : nombre d'impulsions (démarrage incomplet jusqu'à 1/3 de la vitesse finale) dans l'heure

⑩ **Fdm (%)** : facteur de marche = durée de fonctionnement à  $P_u$  / durée totale du cycle

⑩  $I_d / I_n$  : appel de courant avec un moteur de puissance  $P_n$

⑩  $P_u$  : puissance utile du moteur pendant le cycle d'utilisation hors démarrage

⑩  $P_n$  : puissance nominale du moteur present

#### I.4. Augmentation de puissance par rapport au S1

Etant donné que dans les types de service S2, S3 et S6 la machine n'est pas actionnée continuellement à pleine charge, mais uniquement par intermittence, elle peut refroidir de nouveau pendant le temps d'inactivité  $t_{St}$ , et s'échauffer mécaniquement et thermiquement au cours de la période de charge  $t_B$ . Les variables suivantes jouent un rôle déterminant dans le calcul de l'augmentation maximum.

#### II.5. Capacité limite mécanique

$$\text{Capacité limite mécanique } P_{\text{mech}} \leq \frac{M_K}{M_n} \cdot \frac{P_n}{1.76}$$

$P_n$  = puissance nominale en W

$M_n$  = couple nominal en Nm

$M_k$  = couple maximal au démarrage en Nm

#### II.6. Réduction de puissance par rapport au S1

Dans les types de service S4, S5, S7, S8 et S9, la puissance du moteur doit être réduite étant donné que les pertes au démarrage ou au freinage jouent un rôle essentiel dans ces cas.

La méthode de calcul se base sur la fréquence de commutation à vide maximum  $z_0$ . Il s'agit du nombre maximum de commutations admissibles par heure sans que le moteur surchauffe. Il est possible de déterminer la fréquence de commutation maximum admissible  $z$  pour une condition de charge donnée à l'aide de facteurs de réduction comme le facteur d'inertie, le facteur de contre-couple et le facteur de charge.

**Le facteur d'inertie  $FI$**  prend en considération des moments d'inertie externes comme le moment d'inertie du moteur  $J_{Mot}$  et le moment d'inertie de la charge  $J_{zus}$ :

$$\text{Facteur d'inertie } FI = \frac{J_{\text{Mot}} + J_{\text{zus}}}{J_{\text{Mot}}}$$

$J_{\text{Mot}}$  = moment d'inertie du moteur en  $\text{kgm}^2$

$J_{\text{zus}}$  = moment d'inertie de la charge en  $\text{kgm}^2$

Le *facteur de contre-couple*  $k_g$  prend en considération un groupe de charge moyen  $M_L$ , présent au cours de l'accélération, devant être dépassé par le couple moyen du moteur  $M_{\text{Mot}}$ :

$$\text{Facteur de contre-couple } k_g = 1 - \frac{M_L}{M_{\text{Mot}}}$$

$M_L$  = couple de charge

$M_{\text{Mot}}$  = couple du moteur

*Facteur de charge*  $k_L$  : à prendre en considération avec la charge pendant le fonctionnement, dans les cas où les caractéristiques de la charge ne seraient pas connues précisément :

$$\text{Facteur de charge } k_L = 1 - (P / P_n)^2 \cdot \frac{(1 - k_0)t_r}{(1 - k_0)t_r + (1 - t_r)h}$$

$k_L$  = Facteur de charge

$P$  = Puissance requise en kW

$P_n$  = Puissance nominale du moteur

$k_0$  = Rapport des pertes équivalentes à vide/en charge (Tableau 2.18.2)

$h$  = Rapport de dissipation de chaleur ventilé/non ventilé (Tableau 2.19.1)

$t_r$  = Facteur de cycle relatif (voir types de service S1 à S9)

### **Chapitre III : Courbes de couples caractéristiques**

III.1-Couples de charge en fonction de la vitesse ;

III.2-Couples de charge en fonction du parcours ;

III.3-Couples de charge en fonction du temps ;

III.4 -Couple initial de décollement.

## Introduction

La machine entraînée Selon la nature de l'organe entraîné, un certain nombre de grandeurs mécaniques doivent être connues.

### Puissance et couple

La puissance, le couple et la vitesse sont liés par la relation fondamentale :  $P = T \times \Omega$

P : puissance en watts (W),

T : Couple en newtons-mètres (Nm),

$\Omega$ : vitesse angulaire en radians par seconde (rd/s).

### Inertie au démarrage

Durant la période de démarrage, le moteur doit fournir :

- l'énergie nécessaire pour vaincre le couple résistant ;
- l'énergie cinétique pour la mise en mouvement des parties à l'arrêt (machine entraînée plus le rotor du moteur).

### Couples résistants

Le démarrage d'une machine par un moteur ne peut avoir lieu que si le couple moteur est à chaque instant supérieur au couple résistant de la machine entraînée, et ce à toutes les vitesses (sinon le moteur s'arrête : on dit qu'il cale).

$C_{\text{Moteur}} > C_{\text{résistant}}$

**Le moteur asynchrone doit être choisi pour fonctionner à puissance nominale, c'est à cette puissance que le rendement du moteur et le  $\cos\phi$  sont les meilleurs**

Le démarrage d'un moteur asynchrone ne peut avoir lieu que si le couple moteur est à chaque instant supérieur au couple résistant de la machine à entraîner. (Le couple résistant d'une machine définit l'effort que la charge mécanique oppose au maintien de sa mise en mouvement. Il s'exprime en Newton mètre (Nm)).

***Couple résistant, puissance et réseau constituent les facteurs principaux pour le choix d'un moteur asynchrone triphasé et son mode de démarrage.***

**Remarque :** En critère de choix on ajoute en plus l'inertie ?

L'inertie est une résistance des objets pesants (lourd) au mouvement qui leur est imposé. Elle est d'autant plus importante que la masse de la charge est grande et s'oppose à la mise en mouvement.

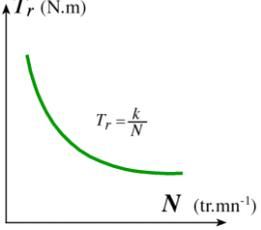
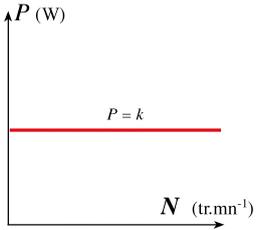
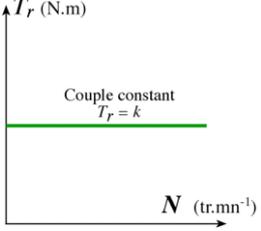
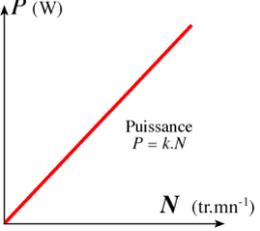
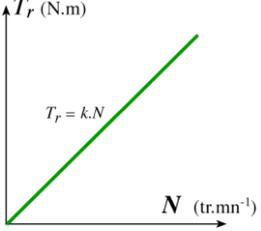
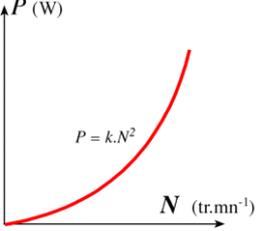
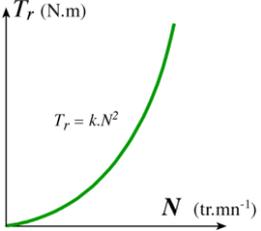
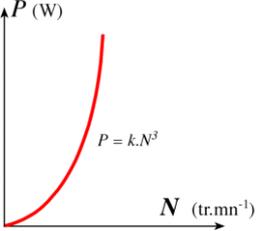
**Elle est caractérisée par le moment d'inertie  $J$ , qui s'exprime en  $\text{kg/m}^2$ .**

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

### III.1-Couples de charge en fonction de la vitesse ;

Certains types de charge sont caractéristiques dans les applications industrielles. Connaître le profil de la charge (plage de vitesse, couple et puissance) est essentiel pour bien sélectionner l'association moteur/convertisseur de fréquence pour l'application.

Nous décrivons les types de charge les plus courants. Une même application peut combiner plusieurs types de charge.

<p>Machine à puissance constante (enrouleuse, compresseur, essoreuse)</p>		
<p>Machine à couple constant (levage, Broyeur, pompe...)</p>		
<p>Machine à couple proportionnel à la vitesse, (mélangeur)</p>		
<p>Machine à couple proportionnel au carré de la vitesse (ventilateur, pompe centrifuge)</p>		

### III.2. Couples de charge en fonction du parcours

Ce sont les couples typiques, des véhicules, par exemple, ou des moteurs de table, des téléphériques et des tapis transporteurs

### III.3. Couples de charge en fonction du temps

Ces moteurs sont chargés de façon intermittente ou périodiquement

#### a. Couple de charge oscillatoire à une fréquence unique

Ce couple de charge peut être exprimé par :

$$C_r = C_{r,m} + C_{r,osci} \cdot \cos(2\pi f_0 \cdot t)$$

Avec  $C_{r,osci}$  est le terme oscillatoire du couple de charge,  $f_0$  est la fréquence unique d'oscillation,

$C_{r,m}$  est le couple de charge moyen.

#### b. Couple de charge périodique avec intermittent

La perturbation périodique typique de la charge est sous forme des commutations dans le couple. Dans ce cas, le spectre du couple de charge, en supposant une période égale à  $1/f_0$ , contiendra une composante fondamentale à la fréquence  $f_0$ , et une séquence d'harmoniques d'ordre élevé à des fréquences  $kf_0$ , dont leurs amplitudes dépendent évidemment du rapport cyclique des commutations du couple.

#### **III.4. Couple initial de décollement**

Un autre concept fondamental est le soi-disant couple initial au décollement ou statique qui est dû au frottement statique. Pour qu'un moteur puisse démarrer de façon fiable, il faut connaître cette valeur le plus précisément possible et le couple de démarrage  $M_A$  du moteur doit dépasser le couple résistant. En cas de grandes machines équipées de paliers à glissement, il peut dépasser considérablement le couple nominal  $M_n$ .

## Chapitre IV : Choix et dimensionnement des moteurs électriques

- IV.1-Puissance du moteur ;
- IV.2-Données catalogue et paramètres d'application ;
- IV.3-Détermination de la puissance homologuée ;
- IV.4-Données des catalogues ;
- IV.5-Conditions de fonctionnement ;
- IV.6-Procédure de sélection des moteurs ;
- IV.7-Dimensionnement à l'aide du couple de charge ;
- IV.8-Calcul à l'aide du couple ou du temps d'accélération ;
- IV.9- Temps et couple d'accélération ;
- IV.10- Le choix préliminaire du moteur ;
- IV.11- La vérification du moteur ;
- IV.12- La vérification du moteur au démarrage ;
- IV.13- La vérification du moteur d'après l'échauffement ;
- IV.14-Calcul à l'aide de la fréquence de commutation ;
- IV.15-Sélection en consultant le catalogue.
- IV.16-Coût du cycle de vie.

#### IV.1-Puissance du moteur ;

La **puissance** nominale ou **puissance** utile est celle que l'on retrouve sur la plaque signalétique du **moteur**. Elle correspond à la **puissance** sortant de l'arbre et qui est délivrée à la machine entraînée. On la **calcule** en multipliant la **puissance** absorbée par le rendement.

$$\text{Rendement \%} = \frac{\text{Puissance mécanique à l'arbre du moteur}}{\text{Puissance électrique utilisée}} \times 100$$

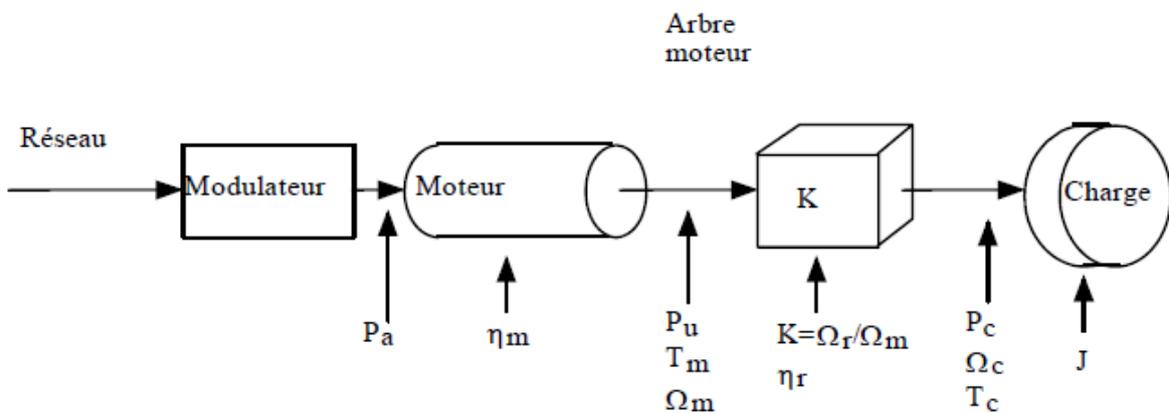
Les puissances moteurs sont données généralement pour une utilisation à température ambiante de + 40 °C et 1000 m d'altitude (au niveau de la mère). Dans le cas d'une utilisation d'un moteur à une température ambiante ou une altitude différente, il faut multiplier la puissance moteur par des coefficients de déclassement (ou sur classement) donnés dans des tableaux ou par des abaques.

#### IV.2-Données catalogue et paramètres d'application ;

En général, Le catalogue des moteurs électriques est réalisé à l'attention des utilisateurs des moteurs électriques. La fiabilité des moteurs électriques dépend en grande partie du choix correct du type des moteurs et des conditions d'utilisations. Les paramètres d'application des moteurs sont indiqués dans des catalogues réalisés par les constructeurs.

#### IV.3-Détermination de la puissance homologuée ;

On détermine la puissance du moteur à partir de la charge entraînée, puis en remontant vers le moteur en ajoutant toutes les pertes dans la transmission.



La puissance d'entraînement requise se détermine en partant du récepteur situé au bout de la chaîne cinématique, puis en remontant vers le moteur en ajoutant toutes les pertes dans la transmission.

Pour des conditions normales d'emploi, La puissance nominale d'un moteur est la puissance fournie en régime continu. Elle dépend étroitement du refroidissement ; la puissance nominale des moteurs électriques est définie pour une température ambiante de °C et une altitude de 1000 m. Elle diminue au-delà de ces limites.

La puissance nominale d'un moteur doit en principe être égale ou supérieure à la puissance d'entraînement. Mais un moteur électrique est sur chargeable en cas de marche à régime variable (service temporaire, service intermittent) tant que ses éléments critiques ne dépassent pas leur température admissible. Dans ces cas, il est avantageux de choisir un moteur dont la puissance nominale est plus petite.

#### **IV.4. Données catalogue**

En général, on retrouve dans le catalogues moteur les donnée suivantes ;

**Désignation de type** (Spécifications du fabricant)

**Régime**

**Vitesse**

**Courant nominal**

**Courant initial de démarrage/nominal**

**Couple**

**Couple initial de démarrage/nominal**

**Couple initial de décollement/nominal**

**Couple maximale de démarrage/nominal**

**Contre couple ou couple résistant Nm**

**Type de protection**

**Type de refroidissement**

**Classe d'isolation**

**Temps de blocage maxi**

**Temps de démarrage maxi**

**Moment d'inertie de la charge kgm<sup>2</sup>**

**Rendement** Spécification du fabricant

**Type de démarrage** (Etoile-triangle...etc.)

**Mode de fonctionnement** (S1, S2,...S9. Service continu, service temporaire,...etc.)

**Température ambiante °C**

**Altitude**

**Sens de rotation** (Horaire, anti-horaire ou les deux)

**Charge de roulement et d'arbre**

#### **IV.5. Conditions de fonctionnement**

Dans certains modes de fonctionnement (S2, S3 et S6), le couple nominal peut être dépassé dans une certaine mesure à condition que la température limite ne soit pas dépassée au sein de la plage de fonctionnement. D'autres conditions de fonctionnement comme la capacité de surcharge, la fréquence de démarrage, le mode de fonctionnement, les couples de crête, la température ambiante ...etc., influent aussi la sélection des moteurs.

IV.6-Procédure de sélection des moteurs ;

#### **IV.6. Procédure de sélection des moteurs**

##### **IV.6.1. Aspects de l'alimentation électrique**

Il est important de choisir un moteur qui possède une tension d'utilisation le plus près possible de la tension du réseau sur lequel il sera branché. Pour qu'un moteur fonctionne adéquatement, le déséquilibre des tensions de phase doit être inférieur à **1 %**. Un déséquilibre de tension de **3,5 %** occasionne une augmentation de température de 25 % et un accroissement de courant de l'ordre de 6 à 10 fois la valeur du déséquilibre de tension. Ces effets sont attribuables à la circulation des courants inverses dans le moteur.

##### **IV.6.2. Facteur de puissance**

Le facteur de puissance d'un moteur baisse considérablement pour les charges inférieures à 75 % de sa charge nominale (figure suivante). Un moteur sous faible charge va généralement avoir un facteur de puissance médiocre, se traduisant par une consommation plus élevée en kVAr que celle d'un moteur mieux adapté à la charge.

### IV.6.3. Charges entraînées

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.

#### a. Type de service S :

Il est en rapport avec l'échauffement des enroulements lors des périodes de marche et d'arrêt du moteur.

Trois classes de régimes d'utilisation caractérisent la plupart des charges de moteurs : service continu, service périodique et service intermittent.

##### a.1. Service continu – constante de couple

La plupart des applications de moteurs sont du type à service continu. Ce régime d'utilisation consiste essentiellement en une charge constante appliquée durant une période de temps de longueur indéfinie.

##### a.2. Service périodique - couple variable

Ce régime d'utilisation convient à des moteurs entraînant des charges variables bien définies et qui se répètent. **Exemple : une machine à mouler les plastiques par injection.**

Pour ce type de charge, la puissance du moteur est déterminée à partir de la moyenne quadratique ou valeur efficace (RMS) de la puissance.

La puissance efficace ( $HP_{RMS}$ ) est calculée par la formule suivante :

$$1HP = 0,7457 \text{ kW}$$

##### a.3. Service intermittent

Ce régime d'utilisation présente successivement des intervalles indéfinis de périodes de charge ou hors charge, charge et pause, ou charge, hors charge et pause. Exemple : les ouvre-porte de Garage).

**b. Moment d'inertie du rotor :** Il intervient dans les phases de démarrage et d'arrêt du moteur.

#### c. Facteur de marche :

Il est lié au type de service, et donc de l'échauffement des enroulements du moteur qui risquent de surchauffer.

### IV.6.5. Rendement d'un moteur

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.

Une bonne pratique d'ingénierie impose de sur dimensionner légèrement un moteur et ce, pour les raisons suivantes :

### IV.7. Dimensionnement à l'aide du couple de charge

#### IV.7.1. Divers couples résistants

Les couples résistants des machines à entraîner par les moteurs asynchrones sont classés en 4 catégories comme représenté dans la partie (III.1).

### IV.8. Calcul à l'aide du couple ou du temps d'accélération

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

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

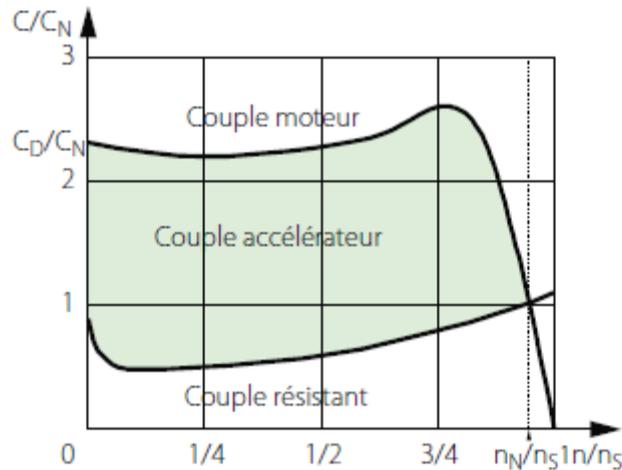
Ainsi le couple de démarrage  $T_a$  peut se calculer par :

$$T_d = T_a + T_r$$

**Par exemple pour un moteur asynchrone :** Au moment du démarrage, le couple moteur est en moyenne de 1,5 à 2 fois le couple nominal.

#### IV.9. Temps et couple d'accélération.

Le moteur doit fournir un couple au démarrage supérieur au couple résistant pour qu'il y ait entraînement (figure ci-contre).



##### IV.9.1. Couple d'accélération

Le couple accélérateur moteur  $C_a$  est exprimé par la formule suivante :

$$C_a = C_m - C_r = J_{Total} \cdot \frac{\omega}{t_A}$$

$$= J_{Total} \cdot \frac{2\pi n}{60 \cdot t_A} = J_{Total} \cdot \frac{n}{9,55 \cdot t_A}$$

##### IV.9.2. Temps d'accélération

On peut estimer le temps d'accélération du moteur par la formule suivante :

$$t_A = \int_0^{\omega_1} \frac{J_{total}}{C_{amot}} d\omega$$

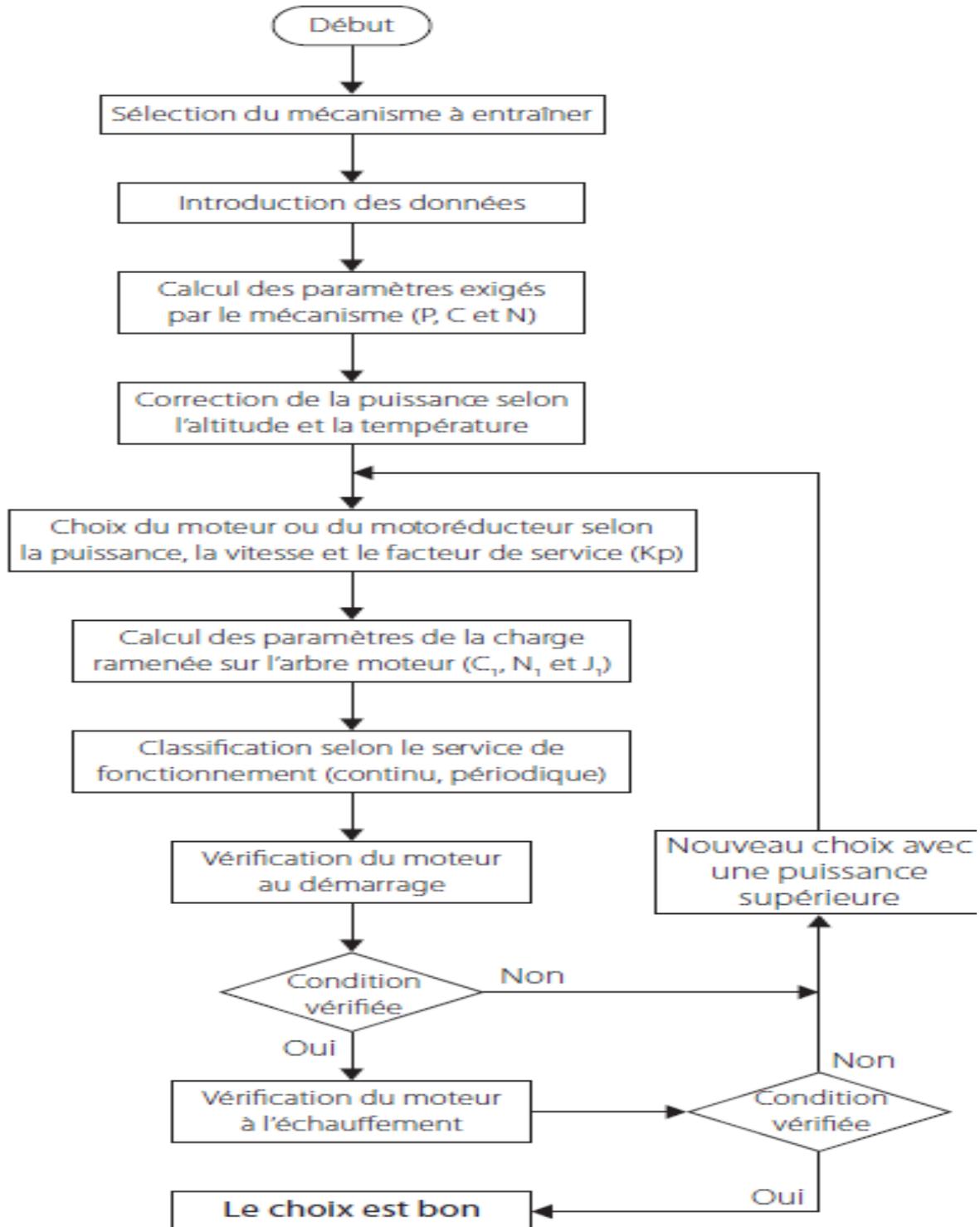
$$t_A = J_{Total} \cdot \frac{n}{9,55 \cdot C_a}, \quad C_a : \text{est le couple d'accélération moyen}$$

#### IV.10. Le choix préliminaire du moteur

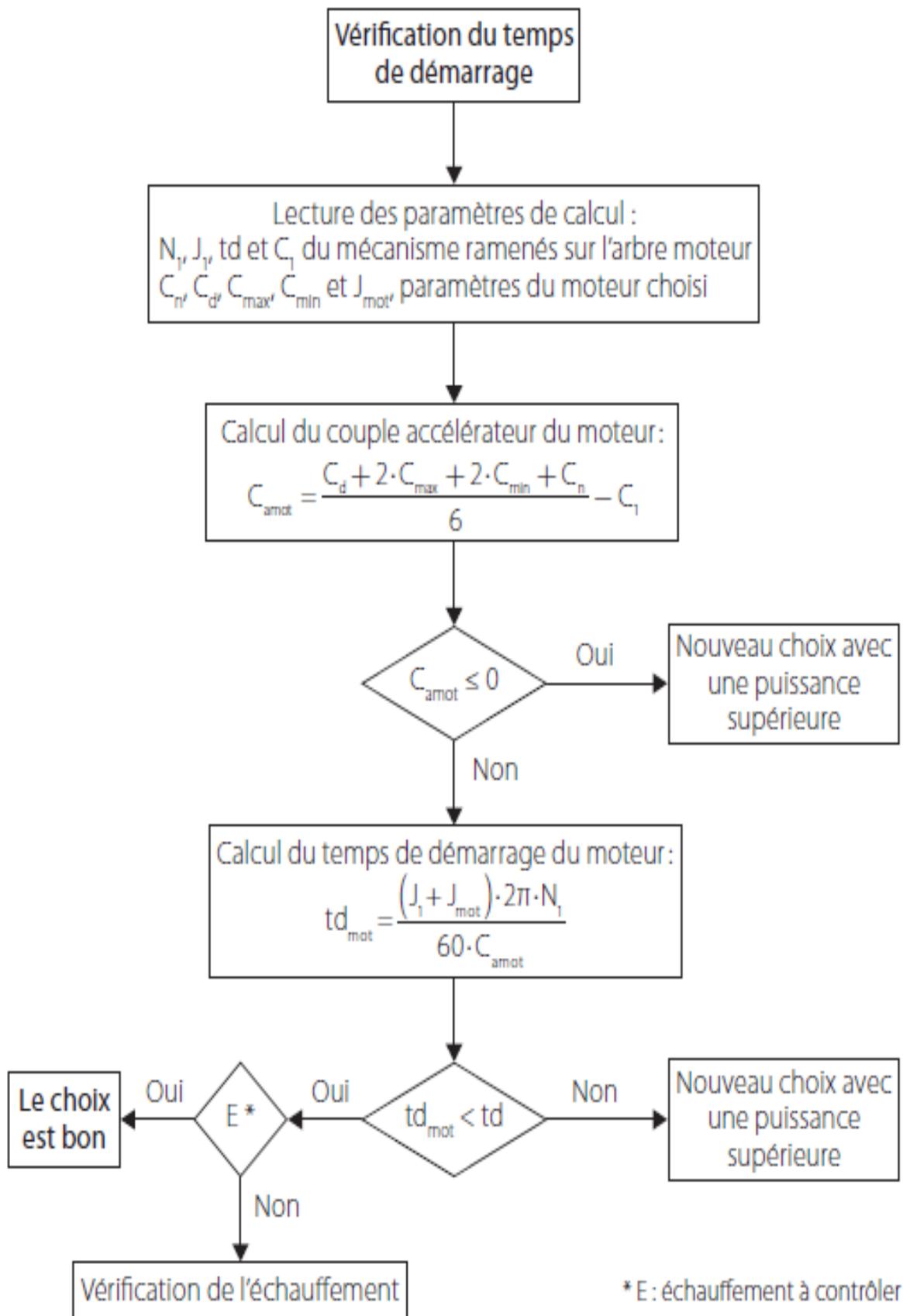
Une fois que la puissance exigée du mécanisme à entraîner est déterminée et que les corrections nécessaires lui ont été apportées, on effectue un choix préliminaire du moteur. Ce dernier doit développer une puissance supérieure ou égale à celle de la charge et une vitesse proche de celle du mécanisme. Néanmoins, le choix définitif de la vitesse de rotation du moteur électrique s'opère en considérant simultanément le moteur et la transmission, notamment au

niveau du coût. Les moteurs rapides, plus petits, sont, en principe, meilleur marché que les lents, mais ils exigent des rapports de transmission plus élevés, présentent des rendements très faibles et des facteurs de puissance défavorables. Et la recherche du réducteur adéquat doit prendre en compte le côté encombrement.

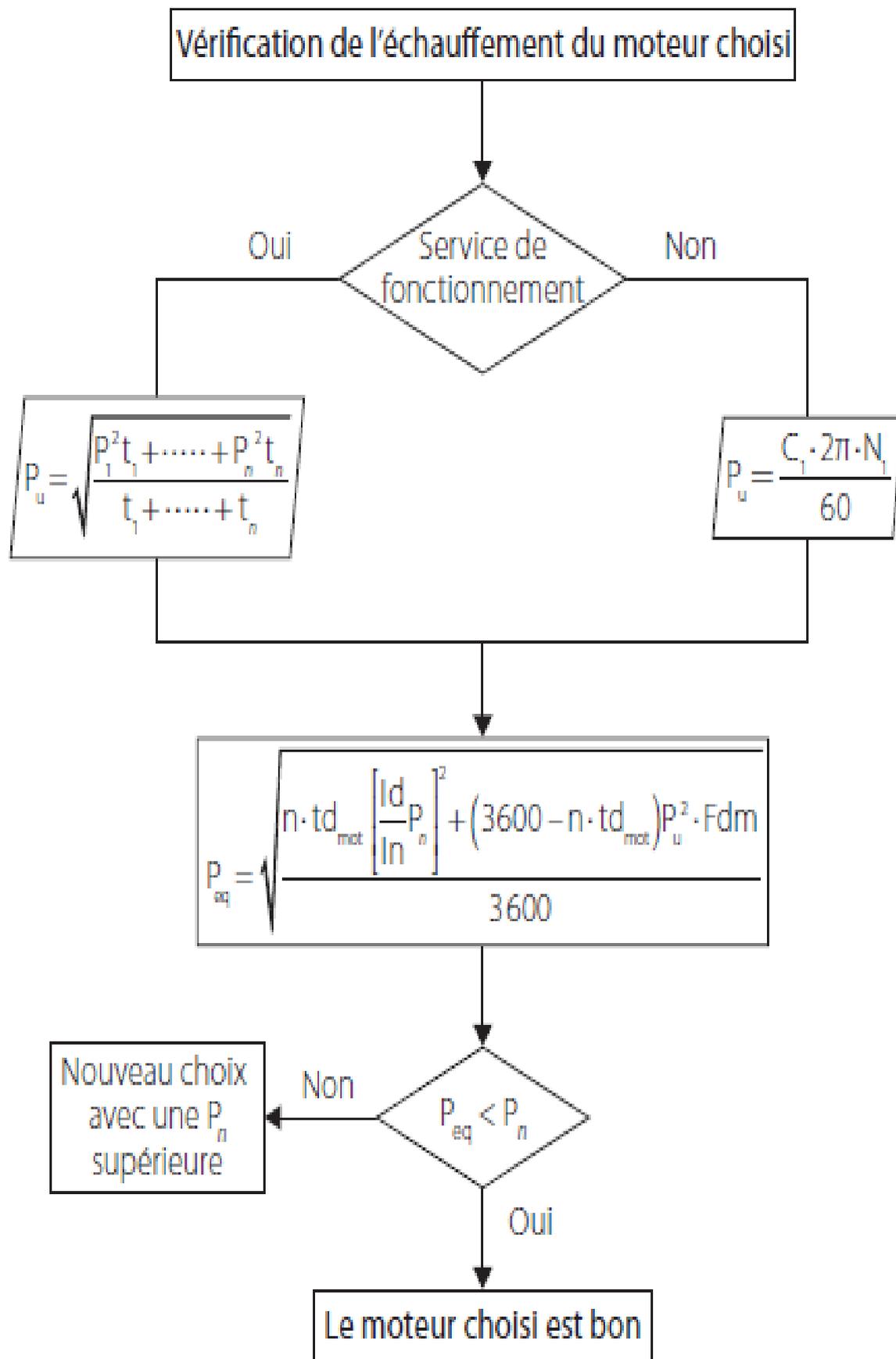
#### IV.11. La vérification du moteur



#### IV.12. La vérification du moteur au démarrage



#### IV.13. La vérification du moteur d'après l'échauffement



#### IV.14. Calcul à l'aide de la fréquence de commutation

##### Commutations admissibles avec masse supplémentaire

$$z_z = \frac{z_0 \cdot J_M}{J_M + J_z}$$

$z_z$  = commutations admissibles horaires avec masse supplémentaire  
 $z_0$  = commutations admissibles horaires à vide  
 $J_M$  = moment d'inertie de la masse du moteur en  $\text{kgm}^2$   
 $J_z$  = moment d'inertie masse supplémentaire réduit en  $\text{kgm}^2$

Dans le cas d'un service de commutation avec un moment de charge existant  $M_L$ , le nombre de commutations admissibles  $z_L$  par heure est déterminé comme suit :

##### Commutations admissibles avec couple de charge

$$z_L = \frac{z_0 \cdot (M_M - M_L)}{M_M}$$

$z_L$  = commutations admissibles par heure avec couple de charge

$z_0$  = commutations à vide admissibles par heure

$M_M$  = couple du moteur moyen pendant l'accélération en Nm

$M_L$  = couple résistant moyen pendant l'accélération en Nm

#### IV.15. Sélection en consultant le catalogue

En utilisant les valeurs moyennes relatives à la puissance  $P_{mi}$ , au couple  $M_{mi}$  et à l'intensité  $I_{mi}$  calculées au préalable pour des conditions moins sévères, on peut choisir un moteur sur la base des données de catalogue.

#### I.16. Coût du cycle de vie

**Cout du cycle de vie = C+M+ET**

où :

C = coût d'investissement initial plus coûts d'installation

ET = Coût total de l'énergie = h/an x \$ /kWh x kW moyens x années

M = Coût total d'entretien = \$ annuels x années

## **Chapitre V : Applications diverses**

### **Chapitre V : Applications diverses**

#### **A-Choix et dimensionnement des moteurs électriques dans les cas :**

1. Elévateurs, monte-charges, machines-outils.
2. Véhicules à faible et grande vitesses,
3. Compresseurs.
4. Ventilateurs et pompes centrifuges.
5. Broyeurs.

#### **B- Applications industrielles**

1. Fours électriques ;
2. Equipements de soudure ;
3. Electrolyse et revêtement des métaux ;
4. Usines métallurgiques ;
5. Industrie agro-alimentaires;
6. Station de forage du pétrole ;
7. Industrie du papier ;
8. Industrie du ciment
9. Industrie du verre
10. Industrie métallique.

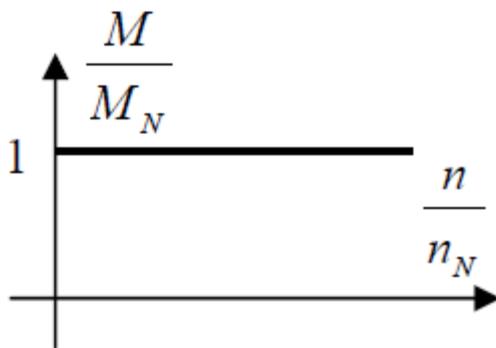
## A-Choix et dimensionnement des moteurs électriques dans les cas :

Les *charges* ou *machines entraînées* sont des dispositifs mécaniques utilisés pour usiner ou forger des matériaux, par exemple les *machines-outils*, les *presses*, les *calandres*, les *centrifuges*, etc., mais également des *systèmes de transport* comme les *grues*, les *tapis transporteurs*, et les *mécanismes de roulement*. En outre, les *pompes* et les *ventilateurs* peuvent être réunis en un seul groupe. Dans des machines très grandes et complexes comme les *laminoirs* ou *machines à papier*, le système d'entraînement est divisé en parties dont chaque moteur doit être examiné séparément aux fins de la conception. La structure détaillée de la machine entraînée n'est pas habituellement prise en compte lors de la conception d'un moteur étant donné qu'on peut se limiter à indiquer la *courbe typique de couple*  $ML = f(n)$  ou  $ML = f(t)$ , la vitesse en *fonction du temps*  $n = f(t)$ , l'*accélération/décélération admissible* maximum et le moment d'inertie total, ramené à l'arbre d'entraînement.

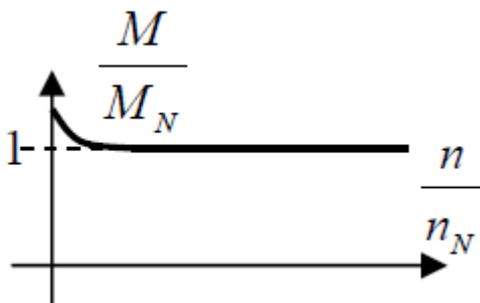
## Partie A : Choix et dimensionnement des moteurs électriques dans les cas :

### I. Elévateurs, monte-charge, machines-outils

#### I.1. Elévateur et monte-charge : couple constant



#### I.2. machines-outils (machine –outils à force de coupe constante)

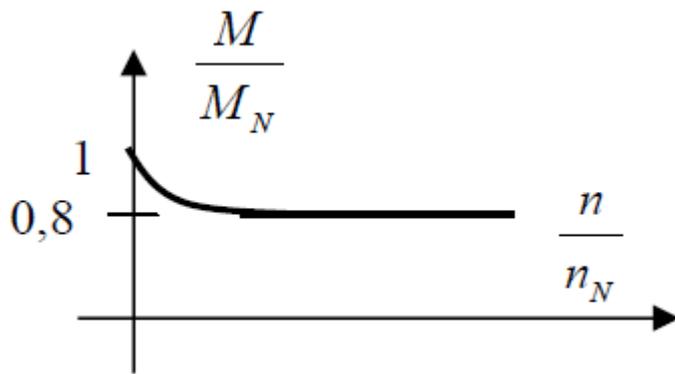


## II. Véhicules à faibles et grandes vitesses

Le dimensionnement prend en considération la courbe caractéristique dans chaque type de véhicule. Cela donne information sur le couple de démarrage et le temps de démarrage.

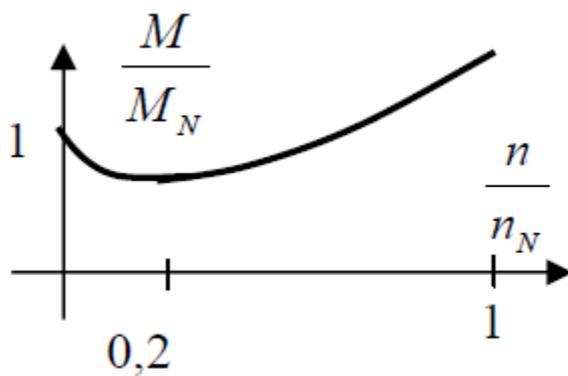
### II.1. Véhicule à faible vitesses

Le couple caractéristique est donné par la courbe suivante :



## II.2. Véhicule à grandes vitesses

Le couple caractéristique est donné par la courbe suivante :

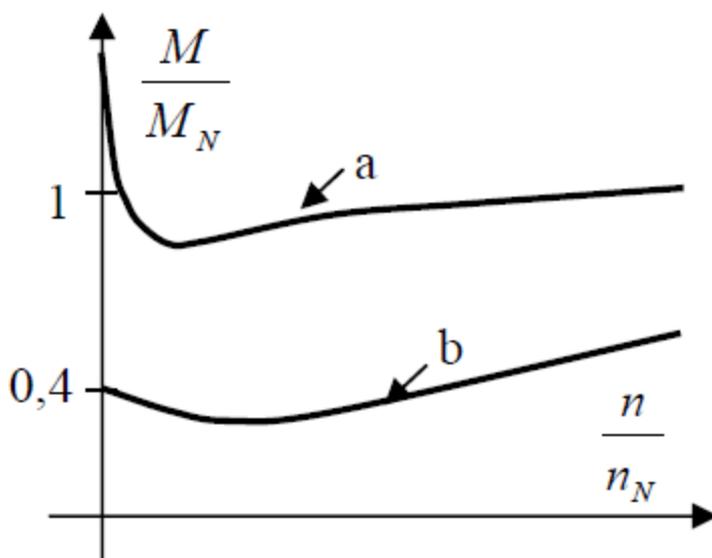


## III. Compresseurs

La courbe caractéristique du compresseur est donnée par la figure ci-contre.

a. Compresseur à piston et contre -piston

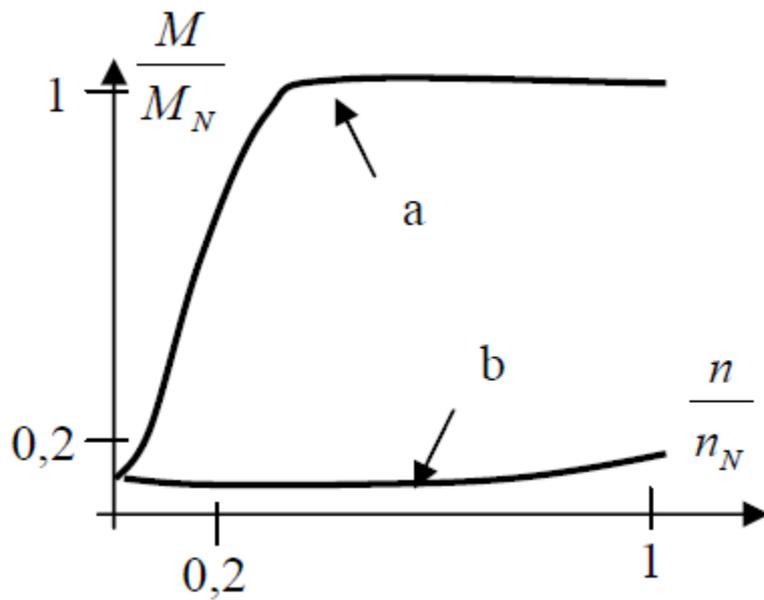
b. A vide



## IV. Ventilateurs et pompes centrifuges

#### IV.1. Ventilateurs

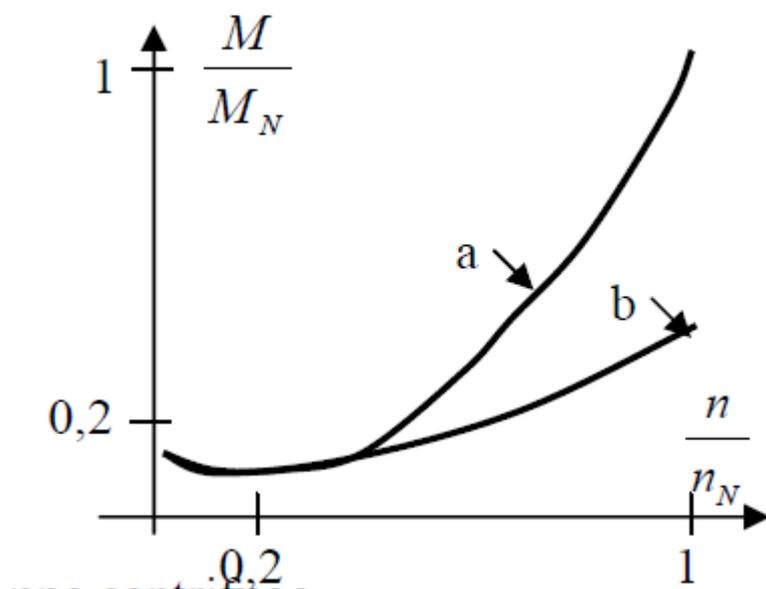
La courbe caractéristique d'un ventilateur est donnée par la figure suivante :



a : ventilateurs à piston rotatif, b : à vide

#### IV.2. Pompes centrifuges

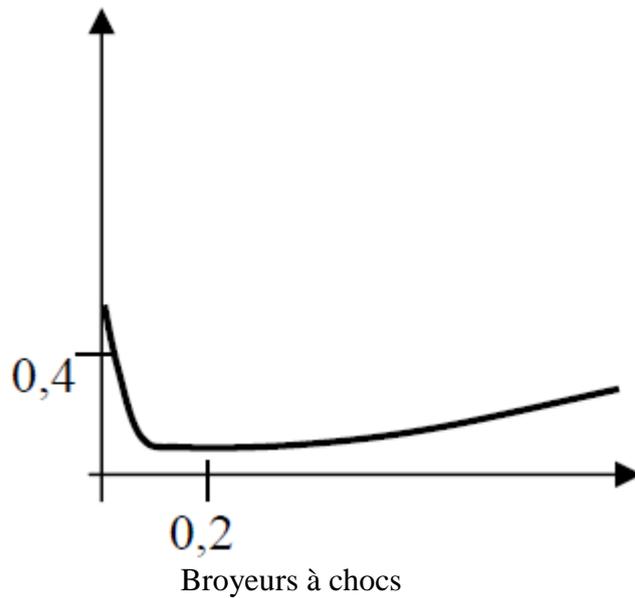
La courbe caractéristique d'une pompe centrifuge est donnée par la figure suivante :



a. Pompe centrifuge  
b. A vide

## V. Broyeurs.

La courbe caractéristique d'un broyeur est donnée par la figure suivante :



## Partie B : Applications industrielles

Cette partie du cours « applications industrielles », il serait plus utile de les faire sous forme de

mini -projets, et de visites pédagogiques.

Les minis -projets proposés sont :

1. Fours électriques ;
2. Equipements de soudure ;
3. Electrolyse et revêtement des métaux ;
4. Usines métallurgiques ;
5. Industrie agro-alimentaires;
6. Station de forage du pétrole ;
7. Industrie du papier ;
8. Industrie du ciment
9. Industrie du verre
10. Industrie