

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université KASDI Merbah Ouargla

Faculté des sciences appliquées

Département de génie électrique



Polycopié de Cours

Dimensionnement des systèmes industriels

Année universitaire : 2017-2018

Préparé par :

Yacine BOUREK

Maître de Conférences « B »

Avant-propos

Ce polycopié met à la disposition des étudiants électrotechniciens un cours sur le dimensionnement des machines électriques. Un bon choix d'une machine électrique intégrée dans un système industriel peut améliorer le rendement de ce système. Ce document permet à l'étudiant de savoir différents critères du choix d'une machine électrique. Grâce aux ces critères fondamentaux, l'étudiant pourra faire le choix d'une machine en consultant les catalogues proposés par les constructeurs convenable avec l'application envisagée.

Le contenu de ce polycopié est conforme au programme du module " Dimensionnement des systèmes industriels" proposé par le comité pédagogique national du domaine sciences et technologies pour l'harmonisation de l'offre de formation des master académique de la spécialité électrotechnique industrielle de la filière électrotechnique pour l'année universitaire 2017-2018.

TABLE DE MATIERES

Avant propos.....	I
Table de matière	II

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre 1 : Eléments des équipements des mécanismes industriels	1
Chapitre 2 : Types de service des moteurs électriques.....	1
Chapitre 3 : Courbes de couples caractéristiques.....	2
Chapitre 4 : Choix et dimensionnement des moteurs électriques.....	2
Chapitre 5 : Applications diverses.....	2

CHAPITRE I: Eléments des équipements des mécanismes industriels

I.1-Principes généraux sur les systèmes industriels.....	3
I.2- Critères de choix d'un moteur.....	3
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.	7

CHAPITRE II : Types de service des moteurs électriques

II.1-Types de services principaux: S1...S9.....	11
II.2-Valeurs moyennes de puissance, couple et intensité.....	15
II.3-Puissance d'un moteur et types de service.....	16
II.4-Augmentation de puissance par rapport au S1.....	16
II.5-Capacité limite mécanique.....	16
II.6-Réduction de puissance par rapport au S1.....	16

CHAPITRE III : Courbes de couples caractéristiques

III.1-Couples de charge en fonction de la vitesse.....	18
III.2-Couples de charge en fonction du parcours.....	20
III.3-Couples de charge en fonction du temps.....	20
III.4 -Couple initial de décollement.....	20

CHAPITRE IV : Choix et dimensionnement des moteurs électriques

IV.1-Puissance du moteur.....	21
IV.2-Données catalogue et paramètres d'application.....	21
IV.3-Détermination de la puissance homologuée.....	21
IV.4-Données des catalogues.....	22
IV.5-Conditions de fonctionnement.....	23
IV.6-Procédure de sélection des moteurs.....	23
IV.7-Dimensionnement à l'aide du couple de charge.....	25
IV.8-Calcul à l'aide du couple ou du temps d'accélération.....	25
IV.9- Temps et couple d'accélération.....	26
IV.10- Le choix préliminaire du moteur.....	26
IV.11- La vérification du moteur.....	27
IV.12- La vérification du moteur au démarrage.....	27
IV.13- La vérification du moteur d'après l'échauffement.....	28

IV.14-Calcul à l'aide de la fréquence de commutation.....	28
IV.15-Sélection en consultant le catalogue.....	29
IV.16-Coût du cycle de vie.....	29

Chapitre V : Applications diverses

A-Choix et dimensionnement des moteurs électriques dans les cas :.....	30
	30
-Elévateurs, monte-charges, machines-outils.....	30
-Véhicules à faibles et grandes vitesses.....	31
-Compresseurs.....	31
-Ventilateurs et pompes centrifuges.....	32
-Broyeurs.....	32

B-Applications industrielles

Bibliographie

Bibliographie.....	33
--------------------	----

Introduction Générale

La conception d'un système industriel s'avère être une tâche délicate en génie électrique. Elle fait souvent appel à plusieurs disciplines (mécanique, électrique, magnétique, thermique) au sein d'un même système ou d'un même composant.

Le cahier des charges est un document qui fixe le cadre de réalisation d'un projet ou d'un système. Il définit les besoins, la finalité du système et ses contraintes auxquelles il doit répondre, qu'elles soient économiques, écologiques, mécaniques, industrielles, etc.

Le processus de dimensionnement d'un système industriel propose un enchaînement d'étapes qui permet la réalisation du cahier des charges. De nombreux systèmes industriels, font appel à des machines électriques de tous types et de toutes tailles qui fonctionnent sans éveiller l'attention. Or, ces machines occasionnent des dépenses énergétiques parfois considérables pouvant être sensiblement réduites par l'amélioration des équipements et de leurs conditions de fonctionnement.

Tout dimensionnement d'actionneur notamment les moteurs est une opération délicate et critique, il faut trouver un compromis entre puissance voulue, équipement de sécurité, fiabilité et bien sûr le prix.

Le choix des moteurs électriques fera l'objet du contenu de la matière intitulée " Dimensionnement des systèmes industriels ". Ce contenu est composé de **cinq** chapitres :

Chapitre I : *Eléments des équipements des mécanismes industriels*

Dans un premier temps, nous exposerons des généralités sur les critères de choix d'un moteur électrique en considérant différentes conditions (électriques, environnemental, etc.). Dans un second temps, nous expliquerons la prise en compte des paramètres propres de la machine (moment d'inertie, etc.) dans son le choix du moteur. Nous terminerons ce chapitre par un aperçu sur les calculs de réducteur/multiplication.

Chapitre II : *Types de service des moteurs électriques*

Le fonctionnement de la machine est lié au type du service envisagé durant un cycle de son fonctionnement. Ce chapitre explique dans une première étape les différents types de services principaux (de S1 à S9). Dans une deuxième étape un calcul de la puissance pour différents types de service sera détaillé.

Chapitre III : *Courbes de couples caractéristiques*

La charge électrique peut être représenté par une courbe caractéristique qui donne la variation du couple résistant en fonction de différents paramètres (vitesse, angle, temps, parcours). Ce chapitre sera consacré à l'explication de ces différentes courbes caractéristiques de la charge.

Chapitre IV : *Choix et dimensionnement des moteurs électriques*

Dans ce chapitre nous détaillerons l'enchaînement des différentes étapes du dimensionnement d'un moteur électrique. En commençant par la considération de la puissance du moteur et en terminerons par le coût du cycle de vie du moteur.

Chapitre V : *Applications diverses*

Ce chapitre est constitué de deux parties. La première donne un aspect sur le choix d'un moteur électrique pour différentes charges rencontrées dans la pratique (pompe centrifuge, compresseur, etc.). La deuxième partie donne un accent sur le choix des moteurs électriques dans quelques applications industrielles connues. Cette dernière partie sera réalisée sous forme des minis projets réalisés par les étudiants.

Chapitre I : Eléments des équipements des mécanismes industriels

Les moteurs électriques sont partout, à tel point qu'il serait difficile de réunir même quelques appareils sans en trouver un seul qui n'en contienne aucun. Depuis les jouets aux ventilateurs des climatiseurs, jusqu'aux systèmes industriels, les moteurs électriques font partie des composants électriques les plus courants de nos jours.

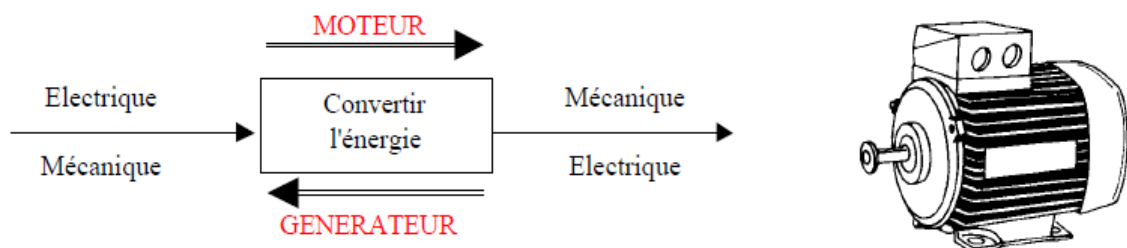
I.1. Principes généraux sur les systèmes industriels

Les machines électriques prennent une place prépondérante dans l'industrie, le rôle qu'ils jouent dans les démarches de production industriel est important.

On définit une machine électrique comme étant un dispositif de conversion Mécanique / Electrique ou Electrique / Mécanique.

Conversion Electrique / Mécanique => Moteurs

Conversion Mécanique / Electriques => Générateurs



I.2. Critères de choix d'un moteur

I.2.1. Critères de choix électrique

-alternatif monophasé, triphasé avec ou sans neutre, multiphasé...

-Continu ;

a.1.1. Influence des variations de tension sur le fonctionnement du MAS.

Les moteurs sont donnés pour une tension nominale d'alimentation $U_n \pm 5\%$. En dehors de cette plage, les caractéristiques mécaniques se dégradent rapidement. Dans la pratique, plus un moteur est gros, plus il est sensible aux tensions :

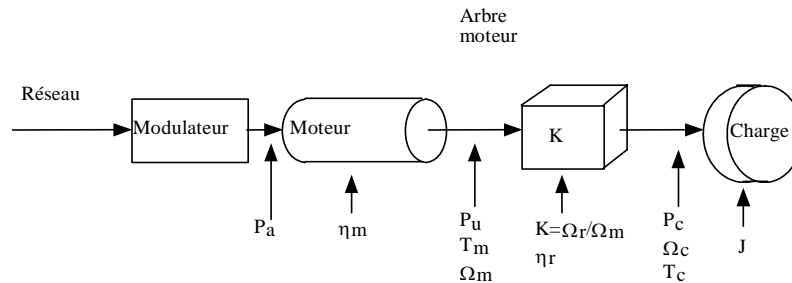
	Variation de la tension en %				
	$U_n - 10\%$	$U_n - 5\%$	U_n	$U_n + 5\%$	$U_n + 10\%$
Courbe de couple	0,81	0,90	1	1,10	1,21
Glissement	1,23	1,11	1	0,91	0,83
Courant nominal	1,10	1,05	1	0,98	0,98
Rendement nominal	0,97	0,98	1	1,00	0,98
Cos φ nominal	1,03	1,02	1	0,97	0,94
Courant de démarrage	0,90	0,95	1	1,05	1,10
Echauffement nominal	1,18	1,05*	1	1*	1,10
P (Watt) à vide	0,85	0,92	1	1,12	1,25
Q (var) à vide	0,81	0,9	1	1,1	1,21

* Le supplément d'échauffement selon la norme CEI 60034-1 ne doit pas excéder 10 K aux limites $\pm 5\%$ de U_n .

I.2.2. Critères de choix mécaniques :

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

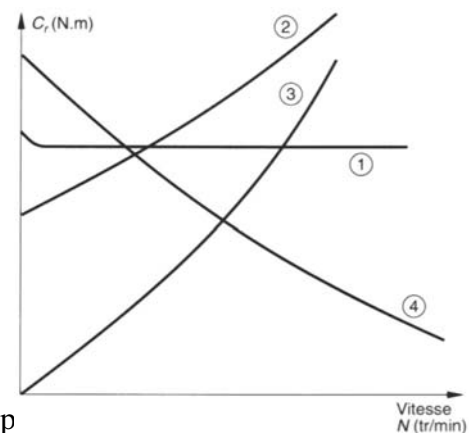
* Chaîne De Transmission



a.1. Type de couple résistant sur l'arbre de la machine :

* Notion de charge :

La caractéristique du couple résistant en fonction de la vitesse définit les besoins de la machine entraînée. Lorsque cette caractéristique n'est pas connue, elle est assimilée à l'une des trois caractéristiques ci dessous.



a.1.4. fonctionnement stable de la machine :

Le point de fonctionnement stable de la machine est le point où les couples moteur et résistant sont égaux.

*Remarque :

Le moteur est généralement choisi afin que le point de fonctionnement A soit le plus proche possible du fonctionnement en régime nominal.

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

a. Choix en fonction de l'environnement

a.1. Déclassement :

Les conditions normales d'utilisation des machines standard sont : une température comprise entre -16 °C et 40 °C ; l'altitude **inférieure à 1000 m**.

Des corrections doivent être apportées en dehors de ces valeurs.

$$P_{\text{installée}} = P_{\text{calculée}} \cdot \frac{P_1}{P}$$

a.2. Indice de protection IP

L'indice IP est donné pour tous les équipements électriques et est indiqué par deux chiffres :

- le premier correspond à la protection contre la pénétration des corps solides ;
- le deuxième correspond à la protection contre la pénétration des liquides
 - Il faut s'assurer que la machine choisie sera protégée contre l'insertion de corps étrangers ainsi que contre les projections d'eau. Il faut que l'IP de la machine soit supérieur chiffre à chiffre à l'IP du local ou de l'armoire.

Lettre additionnelle IP X X B

Une lettre peut être ajoutée après les deux premiers chiffres. Cette lettre va de A à D et correspond à la protection des personnes contre l'accès aux parties dangereuses.

A = dos de la main, B = doigt, C = outil de diamètre de 2,5 mm, D = outil de diamètre de 1 mm (fil).

a.3. IK

L'indice IK détermine le degré de protection du matériel contre les chocs d'origine mécanique. Pour chaque degré IK, la mesure de résistance est faite en joule (c'est une unité de mesure d'énergie).

- IK 00 : Pas de protection
- IK 01 : Protection contre une énergie de choc de 0,15 joule
- IK 02 : Protection contre une énergie de choc de 0,20 joule
- IK 03 : Protection contre une énergie de choc de 0,35 joule
- IK 04 : Protection contre une énergie de choc de 0,50 joule
- IK 05 : Protection contre une énergie de choc de 0,70 joule
- IK 06 : Protection contre une énergie de choc de 1 joule
- IK 07 : Protection contre une énergie de choc de 2 joules
- IK 08 : Protection contre une énergie de choc de 5 joules
- IK 09 : Protection contre une énergie de choc de 10 joules

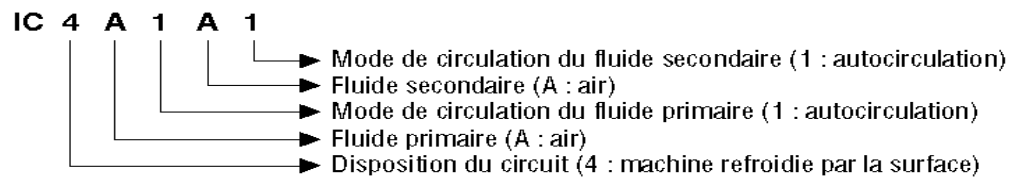
a.4. Classe de T° (Classe d'isolation)

La classe d'isolation est la température maximale de fonctionnement des bobinages. Les trois classes les plus utilisées et définies par les normes CEI 85 et CEI 34-1 ont été reportées dans le tableau ci-après.

Classe d'isolation	A	E	B	F	H
Température limite	110 °C	115 °C	130 °C	155 °C	180 °C

a.4.2. Les modes de refroidissement - IC (International Cooling)

La désignation du mode de refroidissement comporte les lettres «IC» suivies des chiffres et des lettres représentant la disposition du circuit, le fluide de refroidissement et les modes de circulation de ce fluide.



a.5. Services de marche

S1	Service continu
S2	Service temporaire
S3	Service périodique intermittent sans démarrage
S4	Service périodique intermittent à démarrage
S5	Service périodique intermittent à démarrage et freinage électrique
S6	Service continu à charge intermittente
S7	Service ininterrompu à démarrage et freinage électrique
S8	Service ininterrompu à variations périodiques de charge/de vitesse
S9	Service ininterrompu à variations non périodiques de charge/de vitesse

a.6. Considérations en matière de montage et de base de fixation

Les moteurs sont généralement montés à l'horizontale, leurs pattes étant attachées au sol; mais d'autres dispositions sont également assez courantes :

- montage au mur
- montage au plafond
- montage sur socle
- montage frontal (sur flasque)
- montage sur bride

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

I.3.1. Vitesse

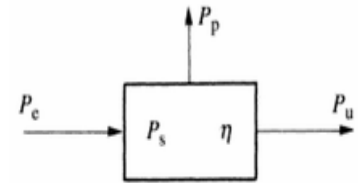
La vitesse n est normalement exprimée en tr/min. En général, la plaquette signalétique contient les données relatives à la vitesse nominale n_n et à la charge nominale équivalente à sa puissance maximale.

I.3.2. Couple électromagnétique

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

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.



$$P_e = \frac{P_u}{\eta}$$

a. 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.

b. Service périodique - couple variable

Ce régime d'utilisation convient à des moteurs entraînant des charges variables bien définies et qui se répètent.

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

$$HP = \sqrt{\frac{\sum HP^2 t}{\sum t}}$$

$$1 \text{ HP} = 745,7 \text{ w}$$

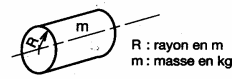
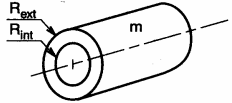
c. Rendement

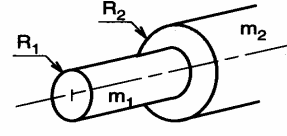
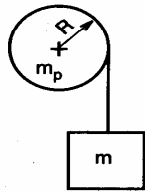
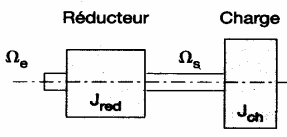
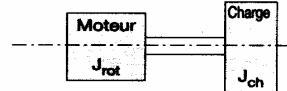
Le rendement d'un moteur est le rapport de la puissance mécanique qu'il fournit à la puissance électrique qu'il absorbe et s'exprime généralement en pourcentage.

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Puissance fournie}}{\text{Puissance absorbée}} \times 100 = \frac{\text{Puissance absorbée} - \text{pertes}}{\text{Puissance absorbée}} \times 100$$

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^2

SYSTÈMES	FORMES	RELATIONS
Cylindre	 R : rayon en m m : masse en kg	$J = \frac{1}{2} mR^2$
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		- Inertie d'un mobile en translation ramené sur l'axe de rotation. $W_T = W_R \iff \frac{1}{2} mV^2 = \frac{1}{2} J\Omega^2 \iff$ $J = \frac{mV^2}{\Omega^2} = \frac{m\Omega^2 R^2}{\Omega^2} = mR^2$ $J_T = J_{poulie} + J_{charge} = mp \frac{R^2}{2} + mR^2$
Inertie ramenée sur l'arbre moteur		$J_T = \left(\frac{\Omega_s}{\Omega_e}\right)^2 J_{ch} + J_{red}$
Moment d'inertie total		$J_T = J_{rot} + J_{ch}$ (J_ch ramenée sur l'arbre moteur)

a.1. Équation fondamentale :

$$T_m = T_a + T_r \text{ et } T_a = J \frac{d\Omega}{dt}$$

T_m : couple moteur, T_a : couple accélérateur, T_r : Couple résistant opposé par la charge, J : moment d'inertie.

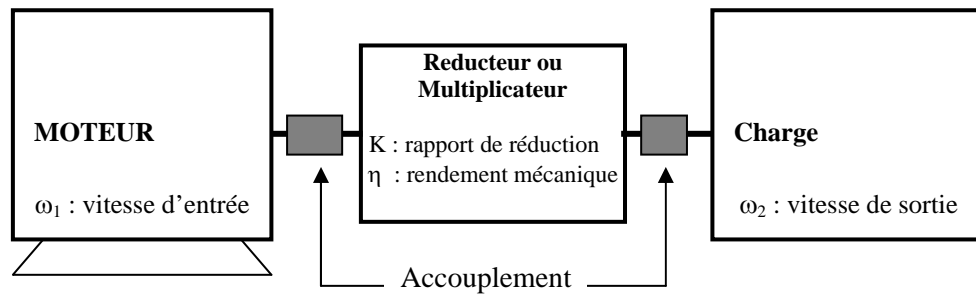
a.1.2. Régime établi (point de fonctionnement) :

En régime établi la vitesse est constante. Donc le couple d'accélération n'existe plus

$$\text{Si } \Omega = cte \implies \frac{d\Omega}{dt} = 0 \implies T_m = T_r$$

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 :** ω_1 : Vitesse en 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** ω_2 : Vitesse en rd.s^{-1} C_2 : Couple en Nm P_2 : Puissance en watts W_2 : Energie cinétique en joules J_2 : Inertie en $\text{m}^2.\text{kg}$ **Aspet cinématique**

Lorsque l'on a $\frac{\omega_2}{\omega_1} < 1$, on parle de réducteur. Lorsque l'on a $\frac{\omega_2}{\omega_1} > 1$, on parle de multiplicateur.

On appelle rapport de transmission ou rapport de réduction le rapport : $\frac{\omega_1}{\omega_2}$

Le rapport de multiplication est l'inverse du rapport de transmission $\frac{\omega_2}{\omega_1}$.

Chapitre 2 : Types de service des moteurs électriques

Les caractéristiques d'une machine électrique sont fournies par son constructeur pour une utilisation continue permettant d'atteindre l'équilibre thermique (correspond au service type1). Par contre, si la même charge doit entraînée avec de nombreux accélération et freinage, le moteur 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.

A l'opposé, si un moteur doit entraîner une charge de sur une durée très courte, avec très peu de démarrages à l'heure, la machine aura suffisamment de temps de refroidir entre chaque cycle, on pourra donc sous dimensionner le moteur pour un moindre coût à l'achat.

II.1. Types de services principaux: S1...S9 ;

La plupart des moteurs fonctionnent souvent en service non continu. Certains moteurs ne fonctionnent que pendant une brève période, d'autres tournent toute la journée mais avec une faible charge, et de nombreux moteurs doivent accélérer de fortes inerties ou sont commandés en mode commuté et freinés électriquement.

Le service des moteurs est indiqué sur la plaque signalétique. il indique le cycle de fonctionnement d'un moteur, correspondant à sa puissance nominale.

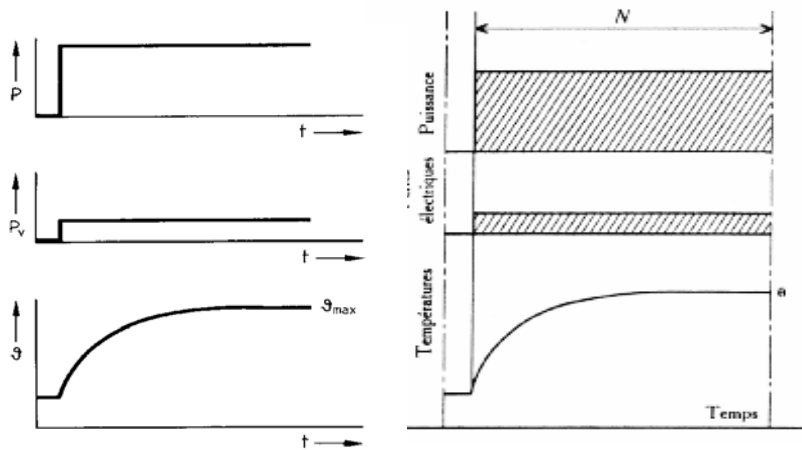
* Les types de service possibles sont théoriquement illimités. Pour permettre aux fabricants et aux opérateurs de parvenir à un accord, neuf types de services principaux, de **S1 à S9** ont été spécifiés dans la norme **CEI 34**. La plupart des cas qui se présentent dans la pratique peuvent être ramenés à l'un de ces types de service :

- | | |
|-------|--|
| • S1: | Service continu |
| • S2: | Service temporaire |
| • S3: | Service périodique intermittent sans démarrage |
| • S4: | Service périodique intermittent à démarrage |
| • S5: | Service périodique intermittent à démarrage et freinage électrique |
| • S6: | Service continu à charge intermittente |
| • S7: | Service ininterrompu à démarrage et freinage électrique |
| • S8: | Service ininterrompu à variations périodiques de charge/de vitesse |
| • S9: | Service ininterrompu à variations non périodiques de charge/de vitesse |

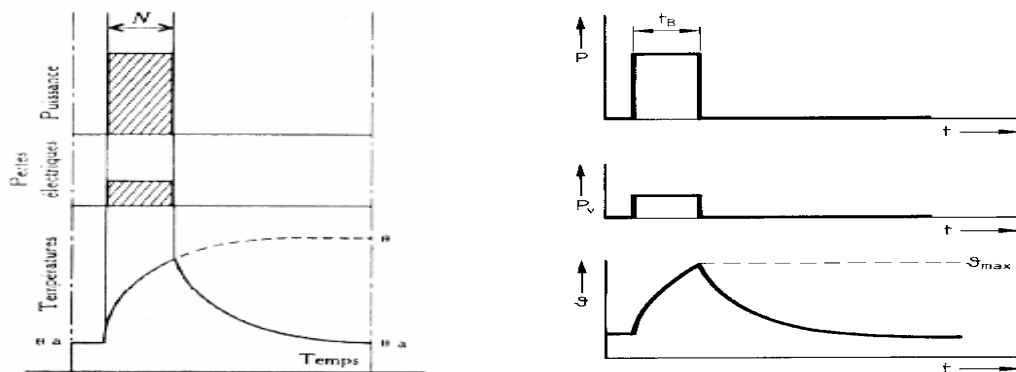
Les descriptions et les diagrammes concernant les types de service de S1 à S9 présentent les symboles suivants :

P	= puissance en kW	t_{Br}	= temps de freinage en s, min
P_v	= pertes en kW	t_L	= temps de fonctionnement à vide en s, min, ou h
n	= vitesse/min	t_r	= facteur de service relatif (%)
ϑ	= température en °C	t_S	= durée du cycle en secondes
ϑ_{max}	= temp. maximum en °C	t_{St}	= temps d'inactivité en s, min, ou h
t	= temps en s, min, ou h	T	= constante de temps thermique en min
t_B	= période de charge	t_A	= temps de démarrage en s, min
J_M	= moment d'inertie du moteur en kgm^2		
J_{ext}	= moment d'inertie de la charge par rapport à l'arbre moteur kgm^2		

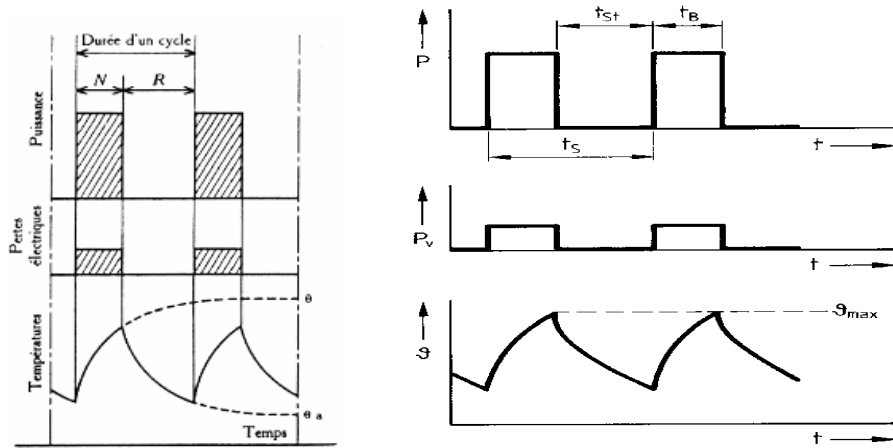
II.1.1. Service continu S1



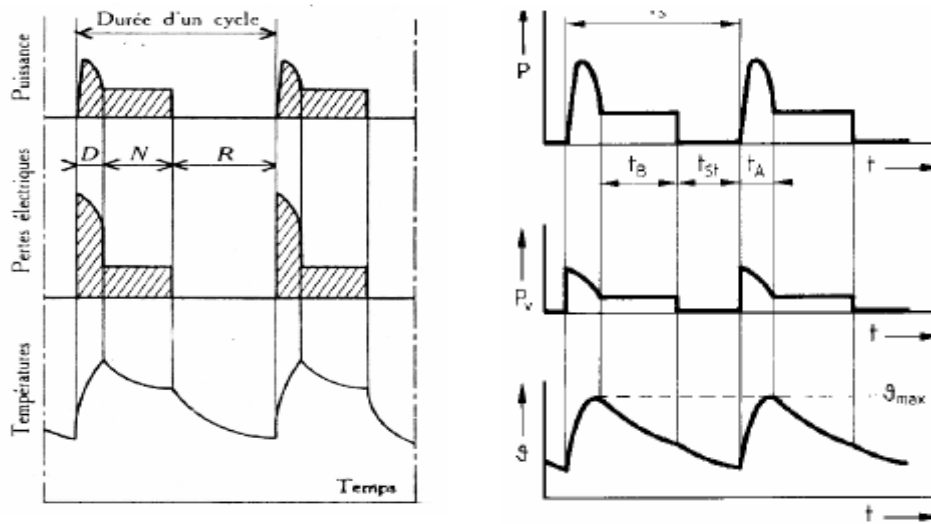
II.1.2. Service temporaire S2



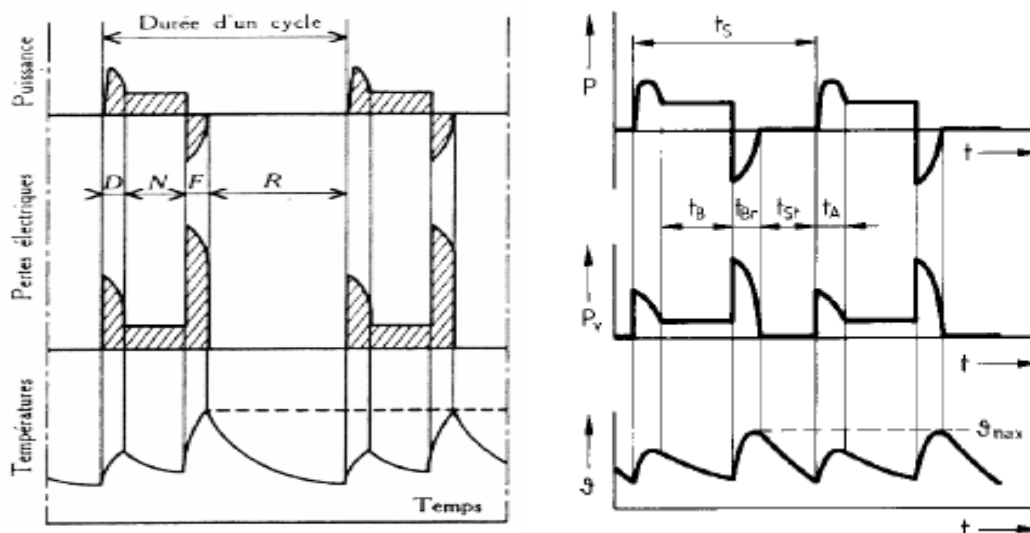
II.1.3. Service périodique intermittent sans démarrage S3



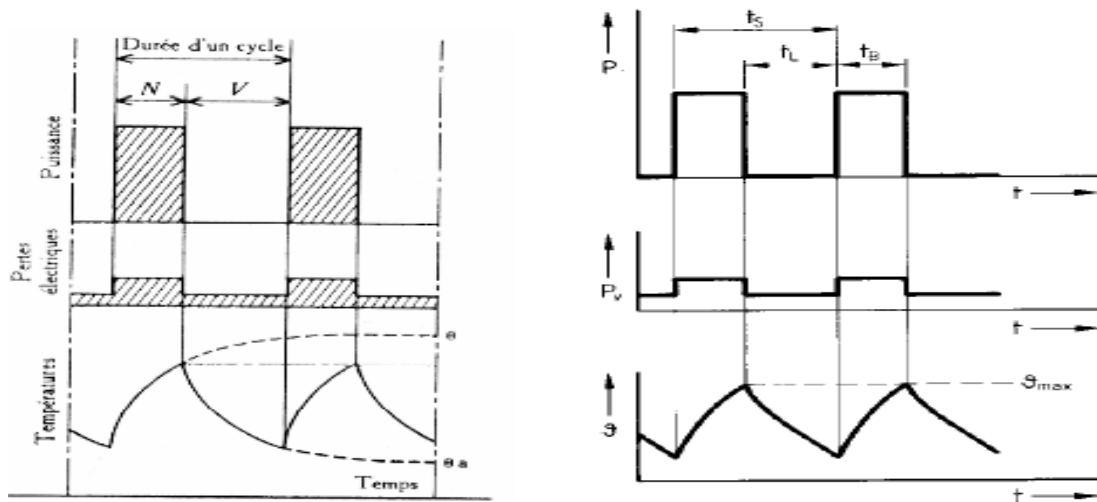
II.1.4. Service périodique intermittent avec démarrage S4



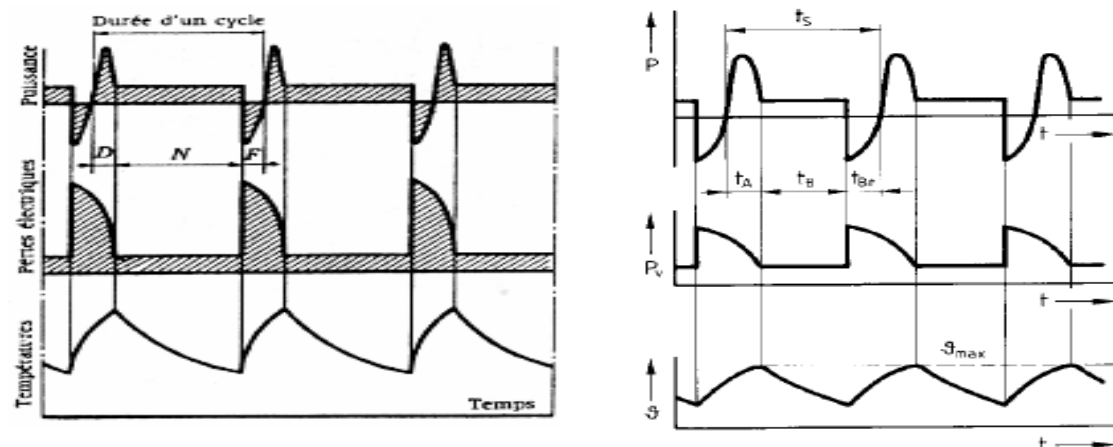
II.1.5. Service périodique intermittent avec démarrage et freinage électrique S5



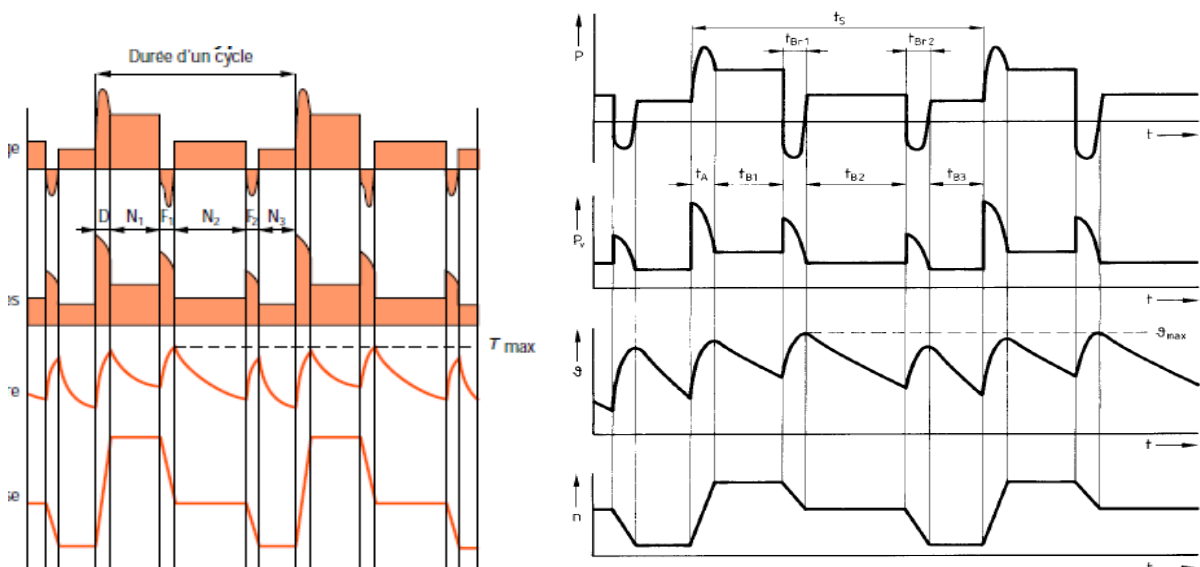
II.1.6. Service continu à charge intermittente S6



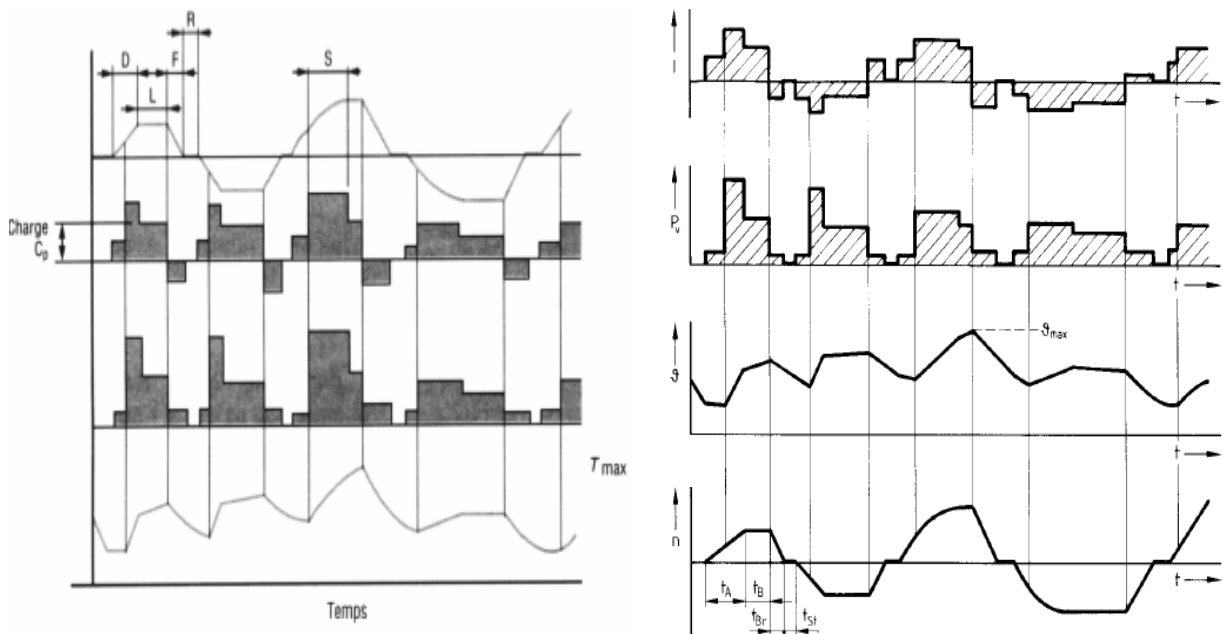
II.1.7. Service intermittent avec démarrage et freinage électrique S7



II.1.8. Service ininterrompu à variations périodiques de charge et de vitesse S8

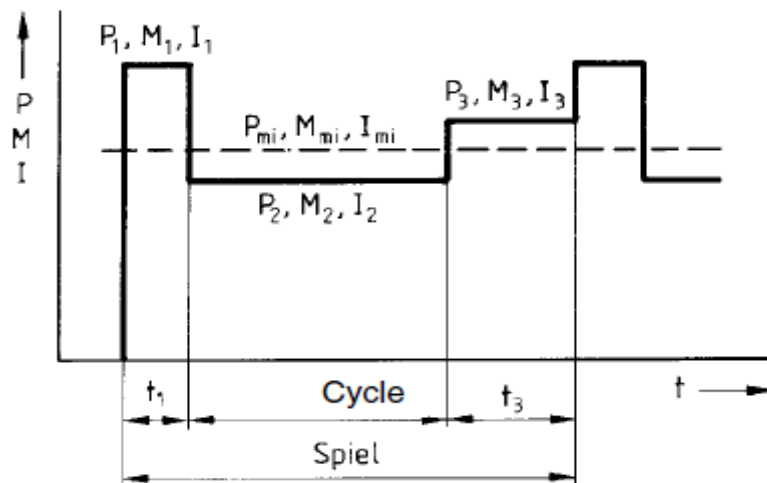


II.1.9. Service ininterrompu à variations non périodiques de charge et de vitesse



Fdm = 1. Calcul de P pour régime intermittent.

II.2. Valeurs moyennes de puissance, couple et intensité



$$\text{Puissance moyenne } P_{mi} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}}$$

Ces valeurs sont déterminées en utilisant les puissances unitaires et les temps effectifs associés.

Couple moyen
$$M_{mi} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}}$$

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

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 F_{dm} 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 x P

Le temps de démarrage réel ne dépasse pas 5 s

Le couple accélérateur reste toujours suffisant sur la période de démarrage

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:

I.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

I.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 z₀. 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} :

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

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

J_{zus} = moment d'inertie de la charge en 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_{Mot} :

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

M_L = couple de charge M_{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 3 : Courbes de couples caractéristiques

Les moteurs sont dimensionnés correctement s'ils sont actionnés, en moyenne, au couple nominal M_n et à la vitesse nominale n_n leur permettant également de développer, la puissance nominale P_n et d'absorber l'intensité nominale I_n . Il est possible de ramener les caractéristiques de couple de la plupart des machines entraînées à des courbes typiques et donc caractéristiques, ce qui facilite énormément la conception du moteur.

La structure détaillée de la charge (machine entraînée) n'est pas habituellement prise en compte lors de la conception d'un moteur étant donné qu'on peut se limiter à préciser la courbe caractéristique de couple $M_L = f(n)$ ou $M_L = f(t)$, 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.

En principe, les caractéristiques diffèrent énormément entre les fonctionnements à vide et à pleine charge. Le moment d'inertie peut également varier suivant qu'il y a plus ou moins de matériaux à traiter dans la machine.

Il est impératif de connaître le comportement du couple résistant M_L en fonction de la vitesse afin de dimensionner le moteur et de vérifier les cycles de démarrage et de freinage.

Chaque machine entraînée oppose un couple déterminé au moteur, qui est normalement fonction de la vitesse. La courbe caractéristique du couple de la charge étant connue dans la plupart des cas.

On peut établir une classification des machines entraînées suivant leurs couples comme suit:

- Couples résistants en fonction de la vitesse (mécanismes de levage, tapis transporteurs, moteurs d'alimentation, pompes centrifuges,.....)
- Couples résistants en fonction de l'angle (appareils à piston,.....)
- Couples résistants en fonction du parcours (téléphériques,.....)
- Couples résistants en fonction du temps (concasseurs de pierres, broyeurs à boules,....)

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

D'après les principes physiques d'ingénierie des moteurs, la puissance mécanique P d'un moteur est fonction du couple M et de la vitesse n ou de la vitesse angulaire ω :

Le couple résistant d'une machine entraînée par un moteur électrique peut s'apparenter à l'un des cas suivants :

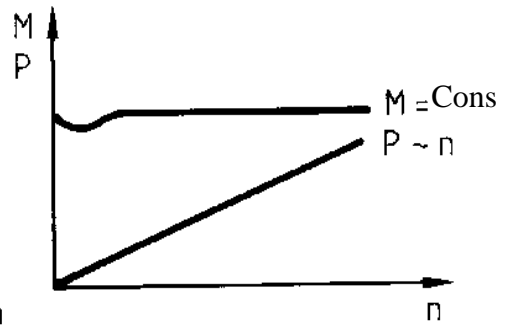
a) Couple constant

La puissance demandée est directement proportionnelle à la vitesse. C'est le cas des machines-outils.

$$P = M \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n = M \cdot \omega$$

En cas de couple constant M, la puissance P est proportionnelle à la vitesse n

$M \approx \text{const.} \Rightarrow P \text{ proportionnel à } n$

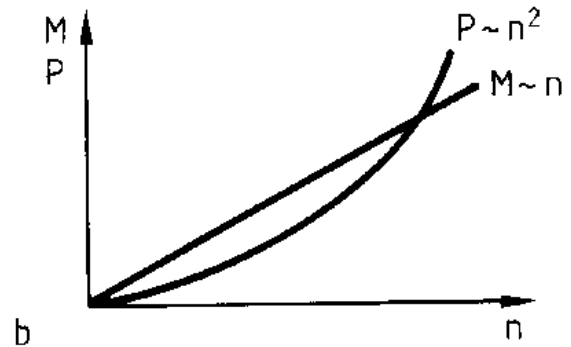


b) Couple proportionnel à la vitesse

La puissance demandée est proportionnelle au carré de la vitesse. C'est le cas des machines à grande vitesse de fonctionnement.

Lorsque le couple M augmente proportionnellement à la vitesse, la puissance P augmente comme le carré de la vitesse n:

$$P \sim n^2$$

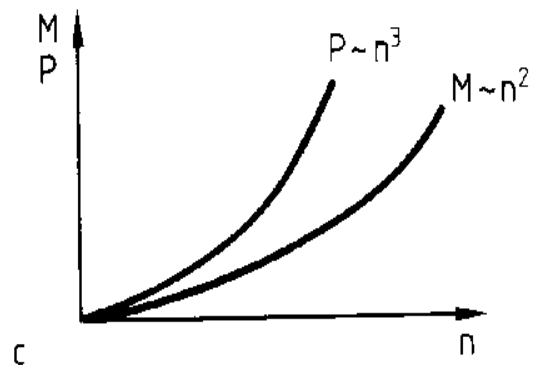


c) Couple parabolique

La puissance est proportionnelle au cube de la vitesse. C'est le cas des ventilateurs et des pompes centrifuges.

Lorsque le couple M augmente comme le carré de la vitesse la puissance P augmente comme le cube de la vitesse n.

$$P \sim n^3$$

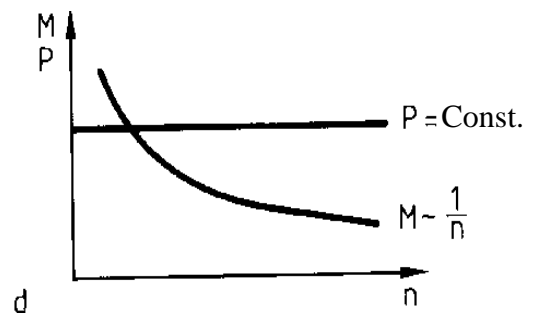


d) Couple hyperbolique

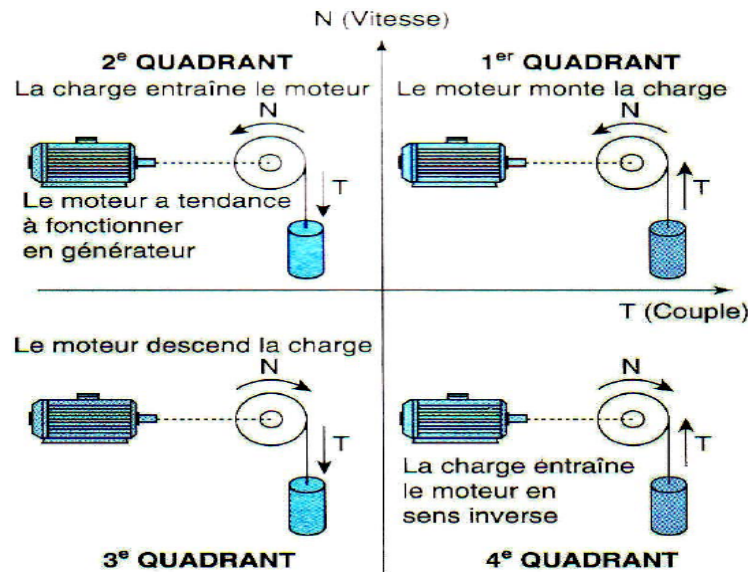
La puissance demandée par le récepteur est constante. C'est le cas des machines à enrouler, ou à dérouler, et des machines de bobinages.

Si le couple M diminue de façon inversement proportionnelle à la vitesse n, la puissance P demeure constante.

$$P \approx \text{const.}$$



*** Marche en quatre quadrants**



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

Le rôle d'un moteur électrique est de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique utilisée par les appareils des édifices et industries tels que ventilateurs, pompes, refroidisseurs, compresseurs, etc., pour des utilisations diverses (réfrigération, traitement de l'air, ascenseurs, procédés industriels, etc.). Chaque moteur offre des caractéristiques d'opération et de rendement différentes, spécifiées par le constructeur. Plusieurs types de moteurs électriques sont disponibles. Dans le choix d'un moteur pour une application particulière, on devra tenir compte des facteurs suivants :

1. Exigences mécaniques de la charge à entraîner.
2. Choix de la classe de moteur.
3. Réseau de distribution électrique.
4. Aspects physiques et environnementaux.

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

IV.1. Puissance du moteur

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

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 données et paramètres d'application des moteurs sont indiqués dans des catalogues réalisés par les constructeurs.

IV.3. Détermination de la puissance homologuée

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.

La puissance nominale d'un moteur est la puissance qu'il peut fournir en régime continu, dans les conditions normales d'emploi, sans subir aucun dommage. 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 surchargeable en cas de marche à régime variable (service temporaire, service intermettant) 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

La table suivante présente quelques données d'un moteur électrique que peut contenir un catalogue.

Données à définir	Remarques
Désignation de type	Spécifications du fabricant
Régime	Pour moteurs multi-vitesse, indiquer la vitesse pour chaque puissance
Vitesse	Pour moteurs multipolaires, indiquer la vitesse par puissance.
Courant nominal	Spécification du fabricant
Courant initial de démarrage/nominal	Spécification du fabricant
Couple	Pour applications spéciales
Couple initial de démarrage/nominal	Spécification du fabricant
Couple initial de décollement/nominal	
Couple maximale de démarrage/nominal	
Contre couple ou couple résistant Nm Constant Augmentation en raison du carré vitesse Couple spéciale	Spécification du fabricant
Type de protection	
Type de refroidissement	
Classe d'isolation	
Temps de blocage maxi	Spécification du fabricant
Temps de démarrage maxi	Spécification du fabricant
Moment d'inertie de la charge kgm^2	Spécification du fabricant
Rendement	Spécification du fabricant
Type de démarrage Etoile-triangle...etc.	Spécification du fabricant
Mode de fonctionnement S1, S2,...S9.	Service continu, service temporaire,...etc.
Température ambiante °C Altitude	Mètres au-dessus du niveau de la mer
Sens de rotation	Horaire, anti-horaire ou les deux
Charge de roulement et d'arbre Force axiale N	Direction de la force par rapport à la position de l'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.6.1. 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 :

$$HP_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum HP^2 t}{\sum t}}$$

1HP= 0,7457 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.

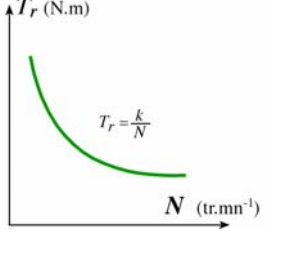
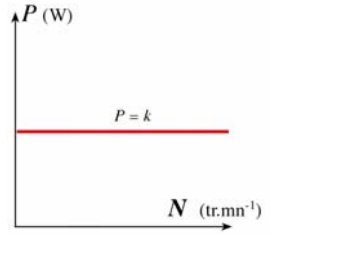
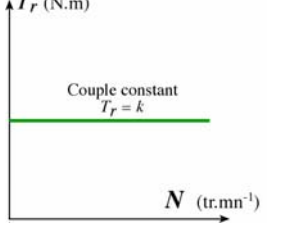
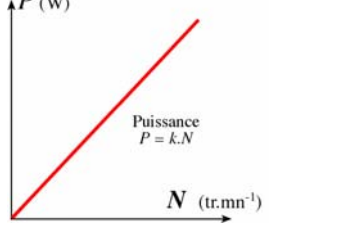
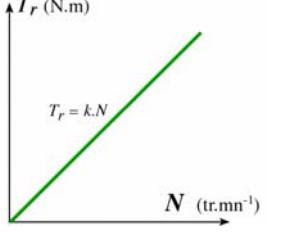
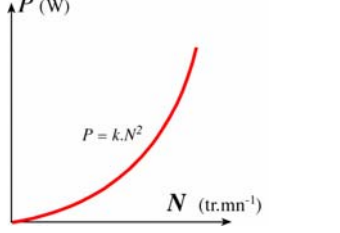
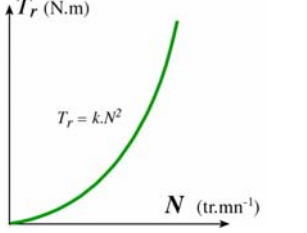
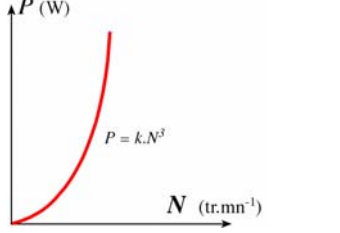
$$\text{Rendement} = \frac{\text{Puissance fournie}}{\text{Puissance absorbée}} \times 100 = \frac{\text{Puissance absorbée} - \text{pertes}}{\text{Puissance absorbée}} \times 100$$

Une bonne pratique d'ingénierie impose de surdimensionner 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.

Machine à puissance constante (enrouleuse, compresseur, essoreuse)	 <p>$T_r = \frac{k}{N}$</p>	 <p>$P = k$</p>
Machine à couple constant (levage, Broyeur, pompe...)	 <p>Couple constant $T_r = k$</p>	 <p>Puissance $P = k.N$</p>
Machine à couple proportionnel à la vitesse, (mélangeur)	 <p>$T_r = k.N$</p>	 <p>$P = k.N^2$</p>
Machine à couple proportionnel au carré de la vitesse (ventilateur, pompe centrifuge)	 <p>$T_r = k.N^2$</p>	 <p>$P = k.N^3$</p>

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_d 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.

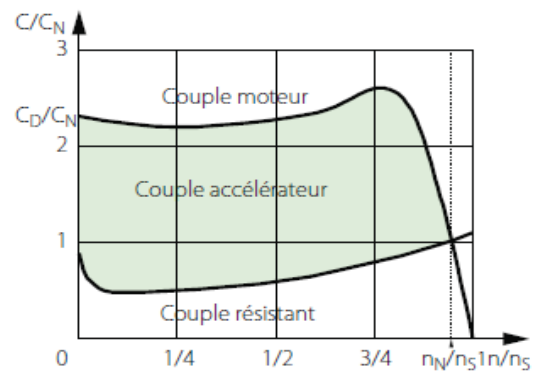
IV.9. Temps et couple d'accélération.

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 donné par la formule suivante :

$$\begin{aligned} C_a &= C_m - C_r = J_{Total} \cdot \frac{\omega}{t_A} \\ &= J_{Total} \cdot \frac{2\pi n}{60 \cdot t_A} = J_{Total} \cdot \frac{n}{9,55 \cdot t_A} \end{aligned}$$



IV.9.2. Temps d'accélération

On peut estimer le temps de démarrage du moteur avec la formule :

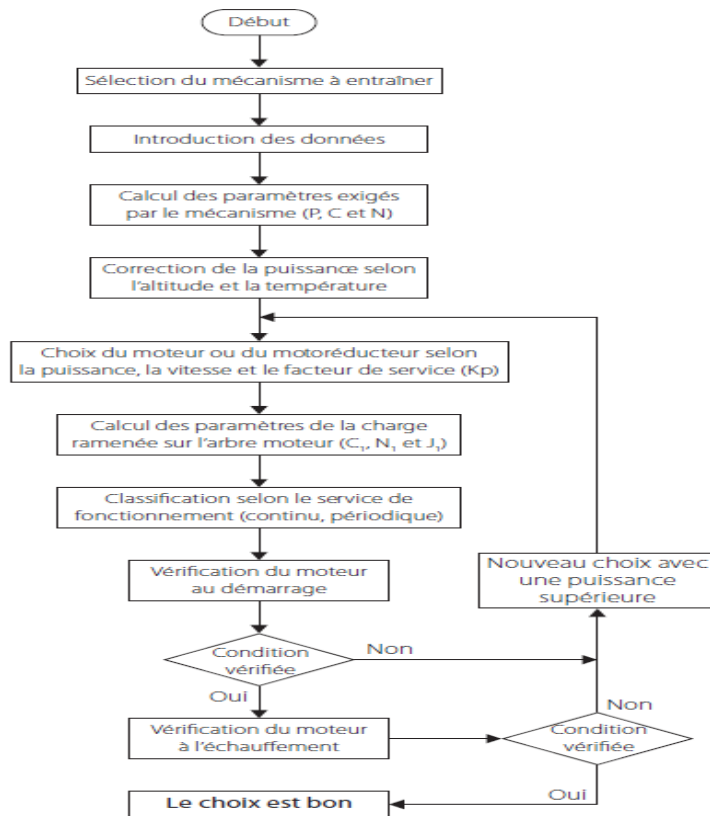
$$t_A = \int_0^{\omega_1} \frac{J_{total}}{C_{amot}} d\omega$$

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

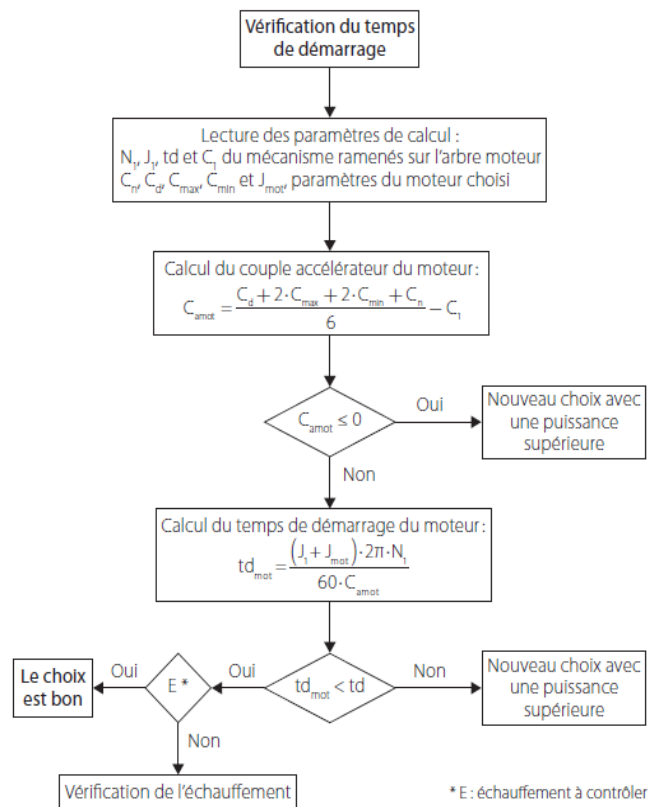
IV.10. Le choix préliminaire du moteur

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 cote encombrement.

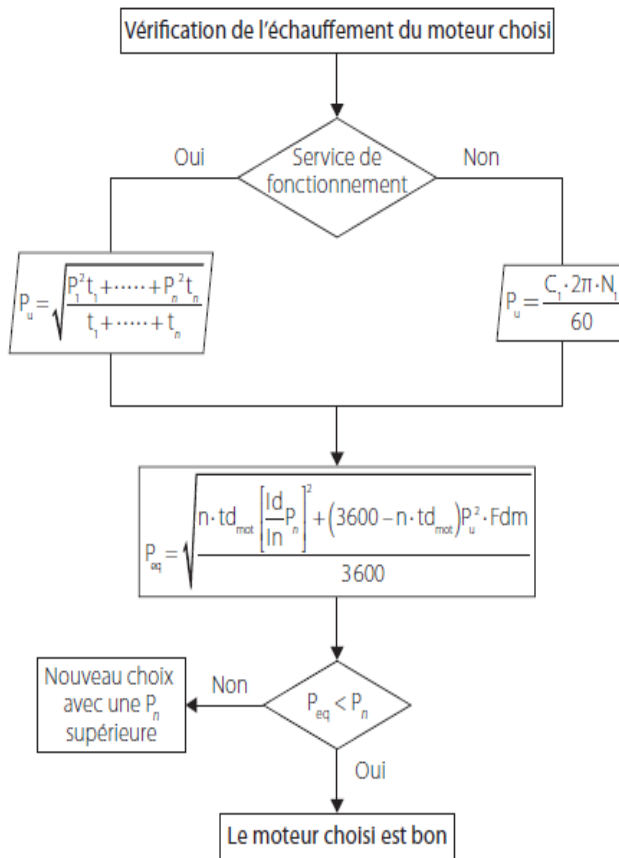
IV.11. La vérification du moteur



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 = commutations admissibles horaires avec masse supplémentaire

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

z_0 = commutations admissibles horaires à vide

J_M = moment d'inertie de la masse du moteur en kgm^2

J_z = moment d'inertie masse supplémentaire réduit en 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

$$\text{Coût du cycle de vie} = C + E_T + M$$

où :

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

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

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

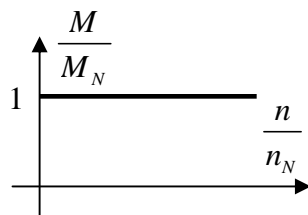
Chapitre V : Applications diverses

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* $M_L = f(n)$ ou $M_L = f(t)$, 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.

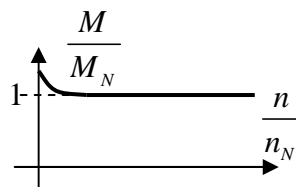
Partie A : Choix et dimensionnement des moteurs électriques dans les cas :

I. Elévateurs, monte-charges, machines-outils

I.1. Elévateur et monte charge : couple constant



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

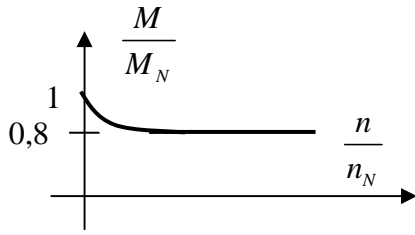


II. Véhicules à faibles et grandes vitesses

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.

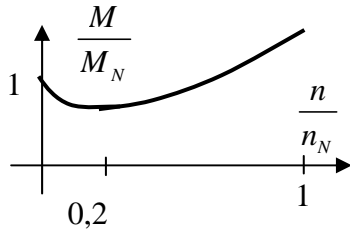
II.1. Véhicule à faible vitesses

Le couple caractéristique est donné par la courbe suivante :



II.2. Véhicule à grandes vitesses

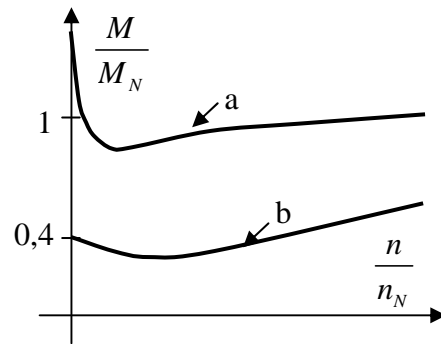
Le couple caractéristique est donné par la courbe suivante :



III. Compresseurs

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

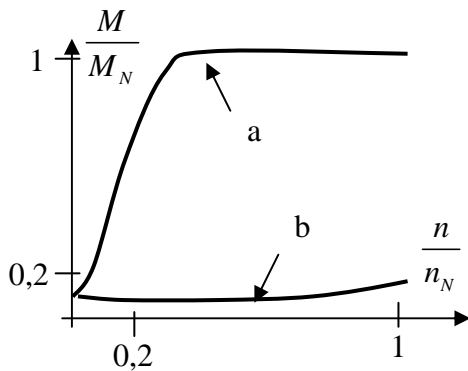
- Compresseur à piston et contre-piston
- A vide



IV. Ventilateurs et pompes centrifuges

IV.1. Ventilateurs

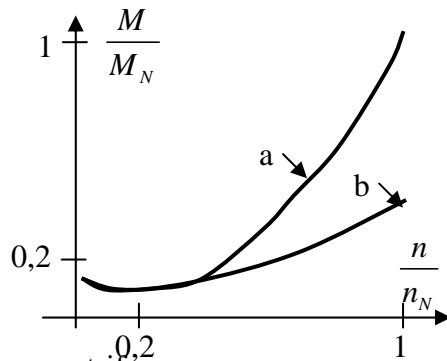
La courbe caractéristique d'un ventilateur est donnée par la figure suivante :



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 :

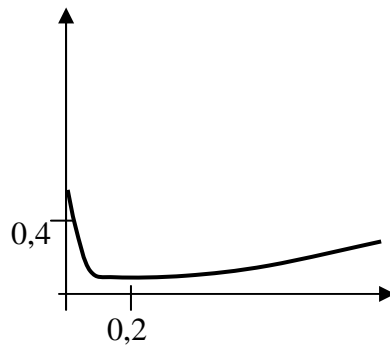


a. Pompe centrifuge

b. A vide

V. Broyeurs.

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



Broyeurs à chocs

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

métallique.

Bibliographie

- [1] Claude CHEVASSU, "MACHINES ÉLECTRIQUES- Cours et Problèmes", [document électronique], Ecole nationale supérieure maritime, France. [Consulté novembre 2017].
mach.elec.free.fr/electricite/cours-machines-electriques.pdf
- [2] Critères de choix d'un moteur, Ressources naturelles -Canada. [En ligne].
<http://www.rncan.gc.ca/energie/produits/reference/15332> [page consultée le 05/11/2017].
- [3] Détermination des conditions de démarrage, [document électronique], Méthode Sect° 4423, France, 2013.
studylibfr.com/doc/2603438/2.-calcul-du-temps-de-démarrage
- [4] Entraînement des machines, [document électronique], Cours: Entraînement des machines, CI : Conversion d'énergie en régime permanent [Consulté novembre 2017].
<http://www.frigoristes.fr/static/telechargement/Electricite/Entrainement%20des%20machines.pdf>
- [5] Georges Splinner, "Conception des machines principe et applications 3-Dimensionnement", Edition Presses polytechniques et universitaires Romandes, 2014.
- [6] M. Nasser, "Cours d'Electrotechnique 2^{ème} partie- Les entraînements électriques", [document électronique], Ecole Des Hautes Etudes D'ingénieur, Cycle Ingénieur – HEI 3, 2014 [Consulté novembre 2017].
www.da-engineering.com/wp-content/uploads/2014/11/Poly-Cours-Chap-1-a-7.pdf
- [7] Notions fondamentales d'utilisation des moteurs triphasés à courant alternatif – Conception- types de service- Sélection- Dimensionnement, [document électronique], Copyright © 1996 par Sprecher + Schuh AG Rockwell Automation, Aarau [Consulté novembre 2017].
http://jltimin.free.fr/bts_mi_2012_2013/11_types_de_service.pdf
- [8] Philippe LE BRUN, "Machine asynchrone -Technologie, choix et alimentation des machines asynchrones", [document électronique], Lycée Louis ARMAND, France [Consulté novembre 2017]
<http://studylibfr.com/doc/3944501/machine-asynchrone---lyc%C3%A9e-louis-armand>
- [9] Rachid YOUSFI, "Vérifier son moteur asynchrone", [document électronique], Techno-élec [Consulté novembre 2017].
<http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/1275/1275-146-p68.pdf>.
- [10] Réal-Paul BOUCHARD, Guy OLIVIER, " Conception de moteurs asynchrones triphasés - Edition corrigée-", Edition Presses internationales polytechnique, 1997.