

Entraînement des machines			
OBJECTIF DU COURS	Etablir l'ensemble des critères de choix d'un moteur électrique.	ELEMENTS D'EVALUATION	- Justifier le choix d'un moteur - Choisir un moteur

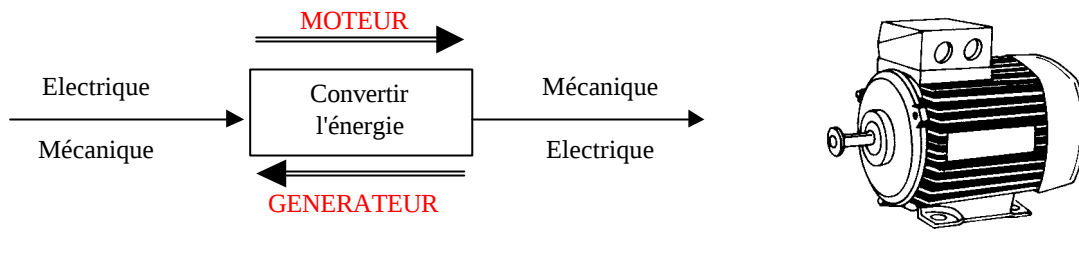
1. Définitions :	2
1.1. Convertisseurs Electromécanique ou Machine Electrique :	2
1.2. Choix d'une Machine Electrique :	2
1.3. Point de fonctionnement :	2
1.4. Point nominal de fonctionnement :	2
1.5. Notion de charge :	3
2. Critères de choix Electrique :	3
2.1. La nature réseau :	3
2.2. Les caractéristiques :	3
3. Critères de choix mécaniques :	3
3.1. Chaîne de transmission :	3
3.2. Type de couple résistant sur l'arbre de la machine :	4
Caractéristique de pompage 1 et 2 :	4
Caractéristique de ventilation 3 :	4
Caractéristique d'essorage 4 :	4
3.3. Le moment d'inertie :	4
3.4. Etude de la dynamique :	5
3.4.1. Equation fondamentale :	5
Conditions de démarrage :	5
3.5. Régime établi (point de fonctionnement) :	5
3.5.1. Fonctionnement stable de la machine :	5
3.5.2. Ralentissement naturel de la machine :	5
3.5.3. Freinage du moteur :	6
4. Quadrants de fonctionnement d'une machine :	6
5. Autres critères de choix d'un convertisseur électromécanique :	6
5.1. Choix en fonction de l'environnement :	6
5.1.1. Déclassement :	6
5.2. Services :	8
5.3. Critères géométriques :	9
6. Exercice :	10

1. DEFINITIONS :

1.1. CONVERTISSEURS ELECTROMECHANIQUE OU MACHINE ELECTRIQUE :

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

Conversion Electrique / Mécanique => **Moteurs** Conversion Mécanique / Electriques => **Générateurs**.



1.2. CHOIX D'UNE MACHINE ELECTRIQUE :

On doit pour choisir une machine électrique connaître les caractéristiques des énergies Entrantes et Sortantes. Soit pour l'énergie :

Electrique :

La nature réseau ;
Les caractéristiques ;
...

Mécanique :

Le couple ;
La fréquence de rotation ou vitesse de déplacement ;
La puissance ...

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) ;

Exemples de convertisseur Electromécanique :

- Machine à courant continu (**Moteur ou Dynamo**) ;
- Machine asynchrone (**Moteur ou Générateur**) ;
- Machine synchrone (**Moteur ou Alternateur**) ;
- Machines spéciales (Moteur asynchrone 2 vitesses, Moteur pas à pas, Moteur linéaire)

1.3. POINT DE FONCTIONNEMENT :

En fonctionnement MOTEUR : C'est le point où le couple '**tension, courant**' permet le fonctionnement de la machine pour un couple '**fréquence de rotation, couple**' donné.

En fonctionnement GENERATEUR : C'est le point où le couple '**fréquence de rotation, couple**' permet le fonctionnement de la machine pour un couple '**tension, courant**' donné.

DANS TOUS LES CAS, C'EST LA CHARGE QUI IMPOSE LE POINT DE FONCTIONNEMENT D'UNE MACHINE ELECTRIQUE (sauf cas particuliers).

1.4. POINT NOMINAL DE FONCTIONNEMENT :

C'est le point de fonctionnement « normal » prévu par le constructeur du moteur.

1.5. NOTION DE CHARGE :

Pour un moteur, on appelle charge, le dispositif mécanique qui **impose** le couple de caractéristiques 'Fréquence de rotation, Couple'. (exp. Pour un ascenseur, c'est la vitesse de déplacement qui impose la fréquence de rotation, et la masse à déplacer qui impose le couple).

Pour un générateur, on appelle charge le dispositif électrique qui **impose** le couple de caractéristiques 'Tension, Courant'. (exp. L'éclairage d'un phare de vélo est imposé par la tension à ces bornes. Pour un éclairage constant, il faut rouler à une vitesse constante).

2. CRITERES DE CHOIX ELECTRIQUE :

2.1. LA NATURE RESEAU :

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

2.2. LES CARACTERISTIQUES :

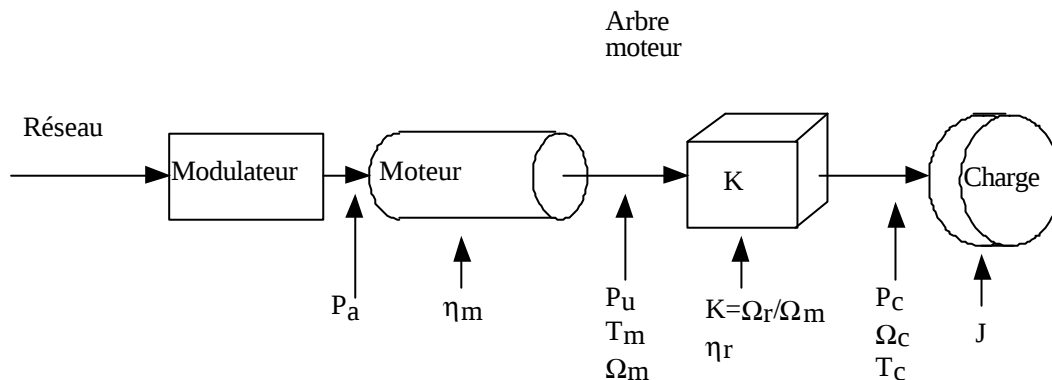
- Tension ;
- Fréquence ;
- Puissance ;
- ...

Voir les différents cours de physique et d'ESTI.

3. CRITERES DE CHOIX MECANIQUES :

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

3.1. CHAINE DE TRANSMISSION :

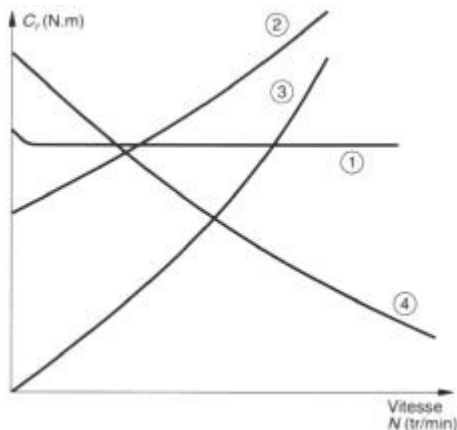


P_a	:	Puissance absorbée par le moteur en W ou kW ;
η_m	:	Rendement du moteur ($\eta_m = P_u / P_a$) ;
P_u	:	Puissance utile fournie par le moteur sur l'arbre en W ou kW ($P_u = T_m \Omega_m$) ;
T_m	:	Couple utile sur l'arbre moteur ou couple résistant opposé par la charge en Nm ;
Ω_m	:	Vitesse de rotation de l'arbre moteur en rad/s ;
K	:	Rapport de réduction du réducteur ($K = \Omega_r / \Omega_m$) ;
η_r	:	Rendement du réducteur ($\eta_r = P_c / P_u$) ;
P_c	:	Puissance demandée par la charge en W ou kW ;
Ω_c	:	Vitesse de rotation de la charge en rad/s ;
T_c	:	Couple résistant de la charge en Nm ;
J	:	Moment d'inertie de la charge en kg/m^2 ;

On doit à l'aide des lois de la mécanique déterminer les paramètres P_u, Ω_m, T_m .

3.2. TYPE DE COUPLE RESISTANT SUR L'ARBRE DE LA MACHINE :

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.



3.2.1. CARACTERISTIQUE DE LEVAGE 1 :

Le couple résistant T_r est plus fort au décollage.

$$T_r = cte$$

Exemples :

- Bande transporteuse horizontale,
- levage,

3.2.2. CARACTERISTIQUE DE VENTILATION 3 :

Le couple résistant T_r est assez faible au décollage. Il croît avec la vitesse selon une loi donnée : $T_r = k' \Omega^2$

Exemples :

- Pompe centrifuge,
- Ventilateur.

3.2.3. CARACTERISTIQUE D'ESSORAGE 4 :

Le couple résistant T_r est important au décollage, il décroît avec la vitesse.

La puissance P est constante.

$$T_r = \frac{k''}{\Omega}$$

Exemple :

- Essoreuse,
- Concasseur.

3.3. LE 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		$J = \frac{1}{2} m R^2$
Cylindre creux		$J = m \frac{R_{ext}^2 + R_{int}^2}{2}$

Arbre épaulé		$J = m_1 \frac{R_1^2}{2} + m_2 \frac{R_2^2}{2}$
Poids poulie		– Inertie d'un mobile en translation ramené sur l'axe de rotation. $W_T = W_R \Leftrightarrow \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} J \Omega^2 \Leftrightarrow$ $J = \frac{m v^2}{\Omega^2} = \frac{m (\Omega R)^2}{\Omega^2} = m R^2$ $J_T = J_{poulie} + J_{charge} = m_p \frac{R^2}{2} + m R^2$
Inertie ramenée sur l'arbre moteur		$J_T = \left(\frac{\Omega_m}{\Omega_{ch}} \right)^2 J_{ch} + J_{red}$
Moment d'inertie total		$J_T = J_{mot} + J_{ch}$ (J_{ch} ramenée sur l'arbre moteur)

3.4. ETUDE DE LA DYNAMIQUE :

3.4.1. EQUATION FONDAMENTALE :

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

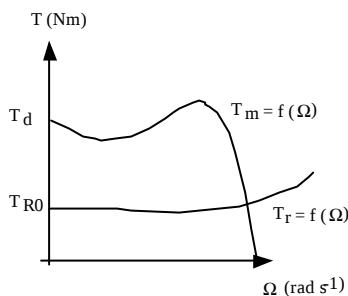
T_m : Couple moteur ;
 T_a : Couple accélérateur ;
 T_r : Couple résistant opposé par la charge ;
 J : Moment d'inertie ;

3.4.2. CONDITIONS DE DEMARRAGE :

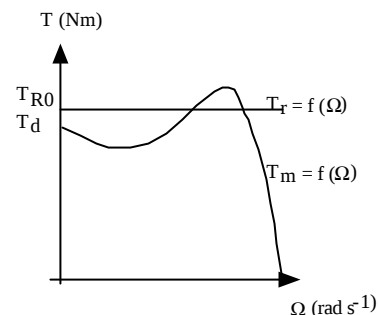
La machine ne peut démarrer que si le couple de démarrage de la machine est supérieur au couple résistant de la charge.

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

- Exemples :



Le moteur **démarre** $T_d > T_{R0}$



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

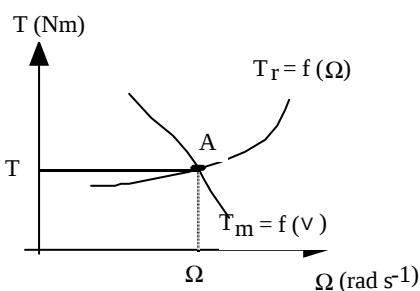
L'accélération est d'autant plus importante que : T_m est grand devant T_r ; J est **faible**.

3.5. REGIME ETABLI (POINT DE FONCTIONNEMENT) :

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

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

3.5.1. FONCTIONNEMENT STABLE DE LA MACHINE :

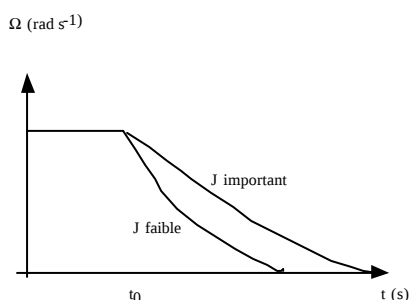


Le point de fonctionnement stable de la machine est le point où les couples moteur et résistant sont **égaux**.

- Remarque :

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

3.5.2. RALENTISSEMENT NATUREL DE LA MACHINE :



Le ralentissement naturel de la machine est obtenu par arrêt à la coupure de l'alimentation du moteur à l'instant t_0 .

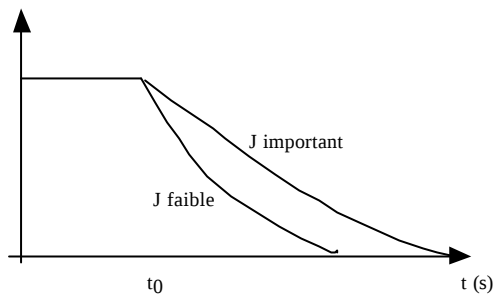
- Remarque :

L'arrêt de la machine est d'autant plus court que le moment d'inertie est faible.

$$\text{À } t = t_0 \quad T_r + T_a = 0 \Rightarrow T_r = -T_a \Rightarrow \frac{d\Omega}{dt} = -\frac{T_r}{J}$$

L'accélération est **négative** donc ralentissement de la machine.

3.5.3. FREINAGE DU MOTEUR :

 Ω (rad s⁻¹)


Pour réaliser un freinage on **ajoute** à l'instant t_0 un couple de freinage C_f .

$$\text{À } t = t_0 \Rightarrow T_r + T_a + T_f = 0 \Rightarrow T_r + T_f = -T_a \Rightarrow \frac{d\Omega}{dt} = -\frac{(T_r + T_f)}{J}$$

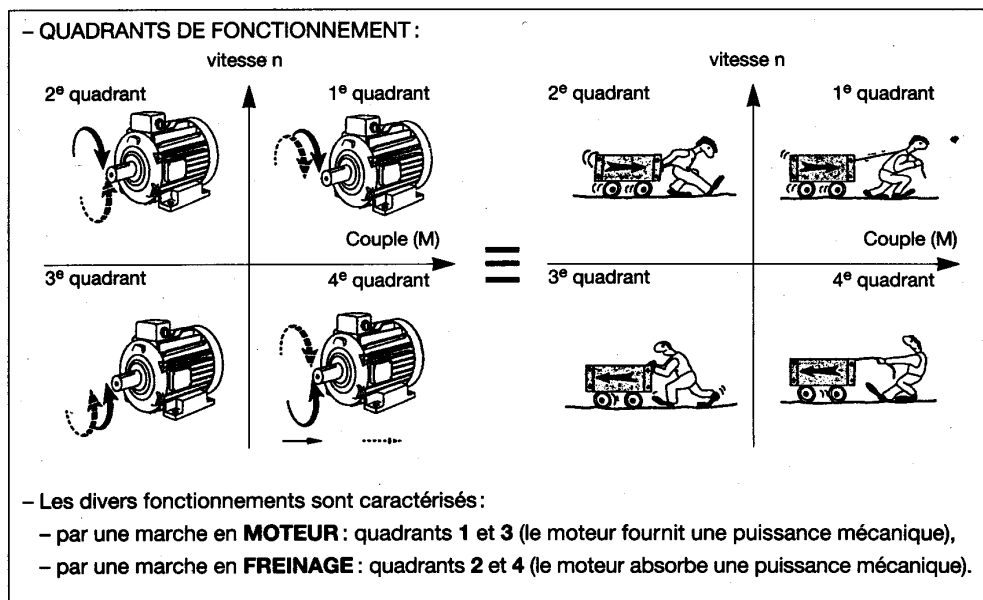
Le couple de freinage peut être produit par :

- Un élément mécanique ;
- Un système électrique extérieur (frein à poudre, frein à courant de Foucault) ;
- Par le moteur lui-même :
- Par injection de courant continu ;
- Un fonctionnement en génératrice.

En cas de coupure réseau, seul le frein mécanique assure l'immobilisation de la charge.

4. QUADRANTS DE FONCTIONNEMENT D'UNE MACHINE :

• Zones de fonctionnement ou quatre quadrants



• Analyse de fonctionnement

Sens de rotation	Vitesse	Couple	Puissance $P = T\Omega$	Quadrant	Travail machine électrique	Charge
sens 1	+	+	+	1	moteur	résistante
	+	-	-	2	génératrice	entraînante
sens 2	-	-	+	3	moteur	résistante
	-	+	-	4	génératrice	entraînante

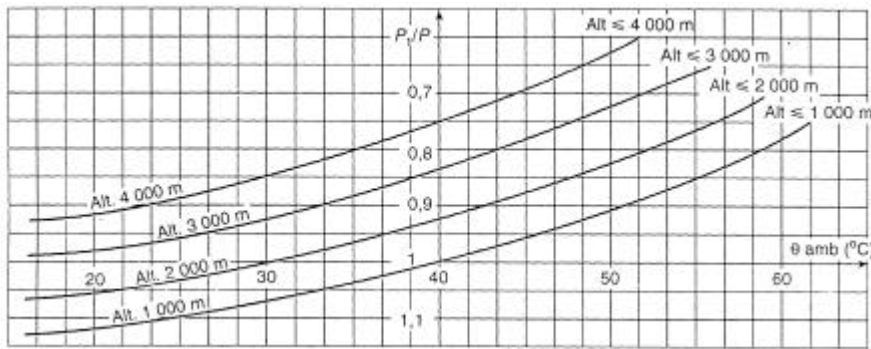
5. AUTRES CRITERES DE CHOIX D'UN CONVERTISSEUR ELECTROMECHANIQUE :

5.1. CHOIX EN FONCTION DE L'ENVIRONNEMENT :

5.1.1. DECLASSEMENT :

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.



$$P_{installée} = P_{calculée} \cdot \frac{P_i}{P}$$

5.1.1.1. IP :

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.

Degré de protection : IP

1 ^{er} chiffre Protection contre les corps solides	2 ^e chiffre Protection contre les corps liquides
0 pas de protection 1 protégé contre les corps solides supérieurs à 50 mm 2 protégé contre les corps solides supérieurs à 12,5 mm 3 protégé contre les corps solides supérieurs à 2,5 mm 4 protégé contre les corps solides supérieurs à 1 mm 5 protégé contre les poussières (pas de dépôt nuisible) 6 totalement protégé contre les poussières	0 pas de protection 1 protégé contre les chutes verticales de gouttes d'eau (condensation) 2 protégé contre les chutes de gouttes d'eau jusqu'à 15° de la verticale 3 protégé contre l'eau de pluie jusqu'à 60° de la verticale 4 protégé contre les projections d'eau de toutes directions 5 protégé contre les jets d'eau de toutes directions à la lance 6 protégé contre les projections d'eau assésibles aux paquets de mer 7 protégé contre les effets de l'immersion temporaire 8 protégé contre les effets de l'immersion permanente

5.1.1.2. IK :

Comme pour l'IP, on doit s'assurer que la machine pourra supporter les chocs éventuels qui pourraient survenir en fonctionnement normal.

Protection contre les chocs mécaniques : IK

énergie de choc (joules)	3 ^e chiffre indiqué dans le tableau p. 593 (ancienne désignation)	code IK selon la norme NF EN 50102 (nouvelle désignation)
0,00	0	00
0,15		01
0,2	1	02
0,35		03
0,375	2	
0,5	3	04
0,7		05
1		06
2	5	07
5		08
6	7	
10		09
20	9	10

Lettre additionnelle (en option)

Protection des personnes contre l'accès aux parties dangereuses.

lettre	désignation
A	protégé contre l'accès du dos de la main
B	protégé contre l'accès du doigt
C	protégé contre l'accès d'un outil ϕ 2,5 mm
D	protégé contre l'accès d'un outil ϕ 1 mm

Elle est utilisée seulement si la protection effective des personnes est supérieure à celle indiquée par le 1^{er} chiffre de l'IP.

Lorsque seule la protection des personnes est intéressante à préciser, les deux chiffres caractéristiques de l'IP sont remplacés par X.
Exemple : IP XXB.

5.1.1.3. CLASSE DE T° :

Les bobinages d'une machine sont enduits d'un vernis qui s'altère avec des températures élevées. La norme a défini des classes d'isolation en température qui assurent un fonctionnement correct pendant au moins 10^5 heures.

Dans le cas où la machine utilisée fonctionnerait avec une température supérieure à celle de sa classe, il convient de corriger la durée de vie de la machine à l'aide du tableau de vieillissement thermique des isolants.

Classe d'isolation	Echauffement Maxi $\Delta\theta$ (si $\theta_i \leq 40$ °C)	Température Maxi $\theta_i + \Delta\theta$
A	60 °C	100 °C
E	75 °C	115 °C
B	80 °C	120 °C
F	100 °C	140 °C
H	125 °C	165 °C

Pour une température ambiante > 40 °C, on décline la machine suivant les coefficients suivants :

θ_i	k
45 °C	100/95
50 °C	100/90
55 °C	100/85

$$P_{\text{installée}} = k \cdot P_{\text{choisie}}$$

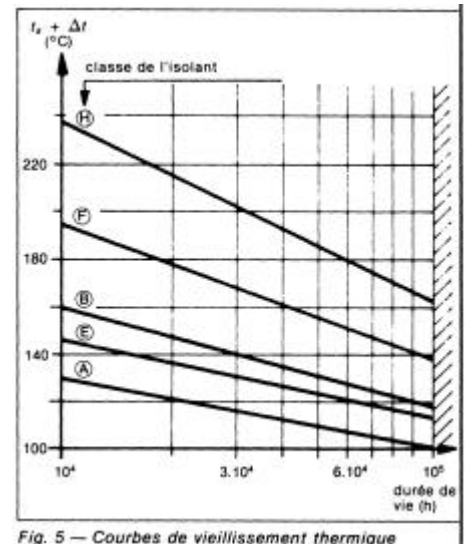
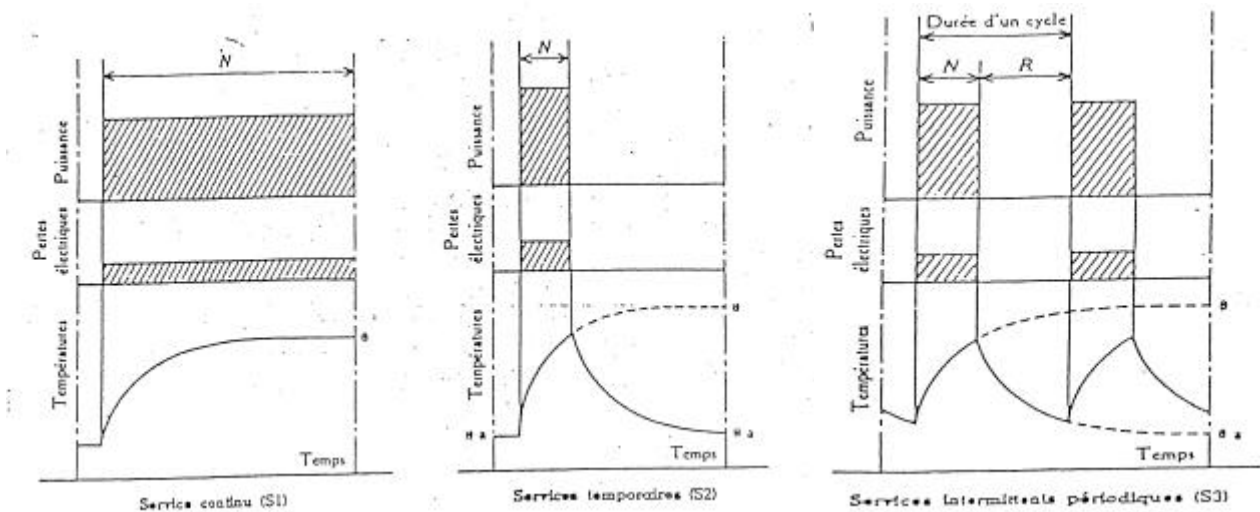
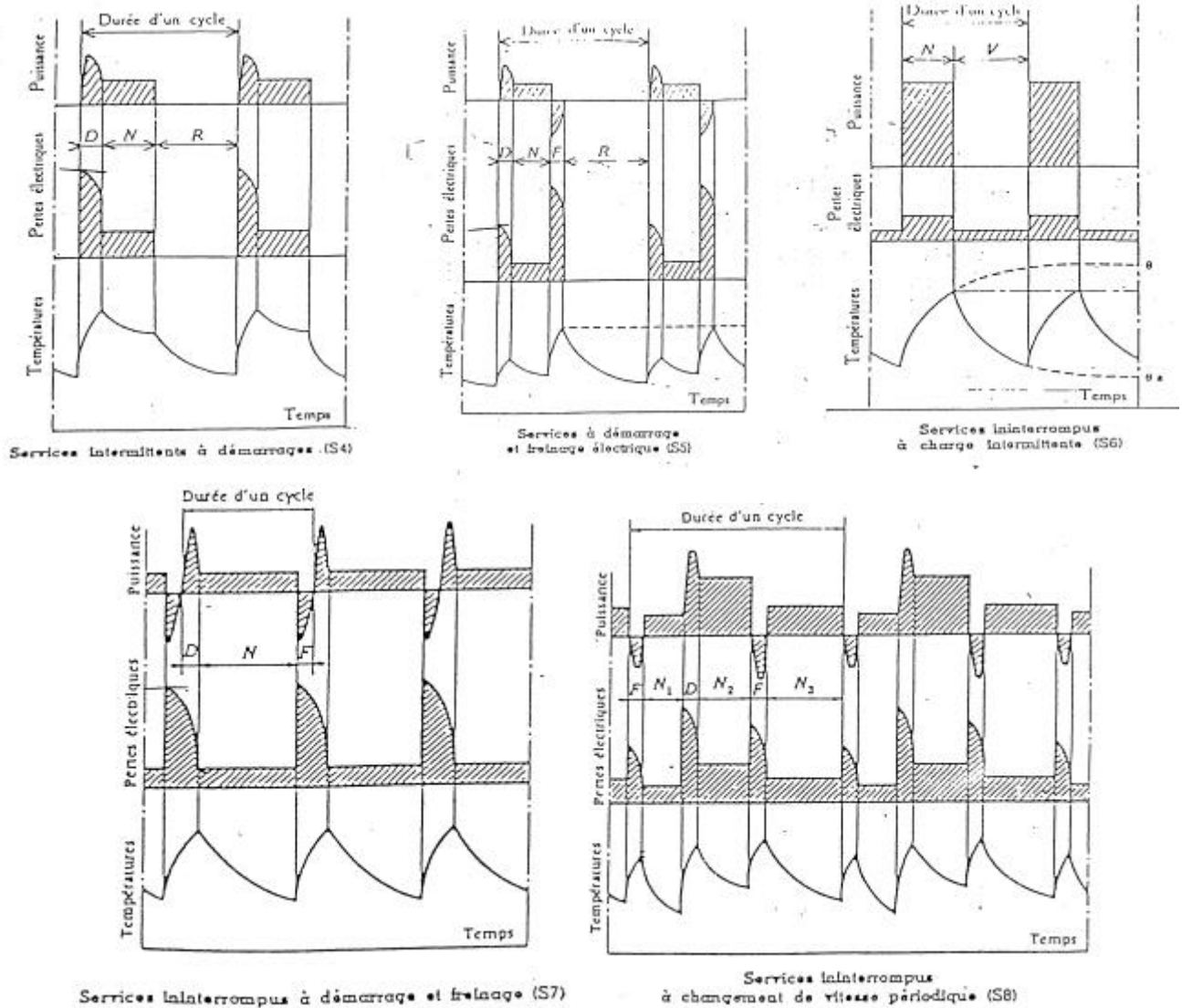


Fig. 5 — Courbes de vieillissement thermique

5.2. SERVICES :

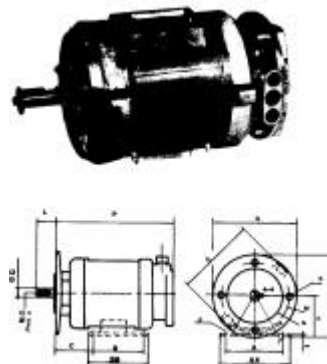
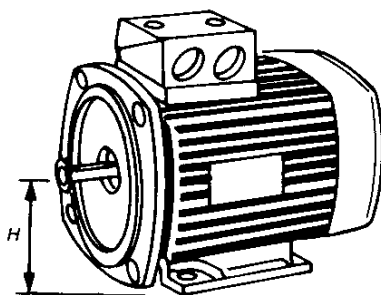
Le choix d'une machine est également conditionné par ses **conditions** de fonctionnement. Ainsi on définit 8 "services" type en fonction des régimes de fonctionnement (Démarrage, Fonctionnement nominal, fonctionnement à vide, freinage, arrêt).





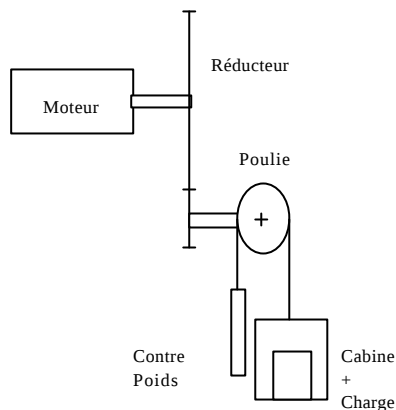
5.3. CRITERES GEOMETRIQUES :

L'encombrement de la machine peut dans certains cas poser des problèmes. On doit donc vérifier la position (horizontale ou verticale) et les cotes de la machine.



6. EXERCICE :

Un ascenseur est composé d'une cabine de masse m_c , d'un contre poids de masse m_p qui peut transporter des personnes pour une charge m . Le synoptique de ce système est donné ci dessous :



Données :

- $m = 200$ kg;
- $m_p = 220$ kg;
- $m_c = 170$ kg;
- le rapport de réduction du réducteur de vitesse est de $1 / 149$;
- Rendement du réducteur 70 %
- le rayon de la poulie est de $0,305$ m;
- La vitesse de déplacement verticale de la cabine est de $0,317$ m/s
- Accélération de la pesanteur $9,81$ m.s⁻²

On néglige :

- le moment d'inertie de la poulie;
- les frottements sec et visqueux;
- la masse du câble;

L'étude se fera en régime établi et on suppose que les moments d'inertie sont négligeables.

a- Donner l'expression du couple sur l'arbre de la poulie. Calculer ce couple pour une charge de :

- $m = 200$ kg ; - $m = 100$ kg ;
- $m = 50$ kg ; - $m = 0$ kg ;

b- Montrer que le couple est constant. En déduire le couple minimum de démarrage du moteur.

c- Donner les caractéristiques mécaniques du moteur nécessaire à son choix.

L'ascenseur se trouve dans un immeuble d'une station de ski à une altitude de 2000 m. Le local d'IP 235 à une température maximale de 50 °C.

Le moteur choisi à une puissance nominale de 1 ch, pour une fréquence de rotation de 3000 tr/min. Sa classe d'isolation thermique est A et son $\Delta\theta$ est de 60 °C, son IP est de 55. Service S1.

d- Déterminer si les contraintes de l'environnement doivent induire une modification dans le choix de la machine. (Déclassement par rapport à la température, déclassement par rapport à l'altitude, IP). Si oui calculer la nouvelle puissance du moteur.

e- Rechercher le service du moteur sachant qu'il possède un dispositif de démarrage et de freinage.

f- On suppose en première approximation que le moteur fonctionne 2 h par jours. Compte tenu de cette donnée, et des résultats précédents, calculer la durée de vie du moteur si la température augmente de 10 °C.