

Les fiches techniques

31

Les machines tournantes Le moteur asynchrone triphasé



Moteur asynchrone triphasé

Le moteur asynchrone est un convertisseur d'énergie électrique fournie par le réseau en énergie mécanique.

31.1 Caractéristiques

Un moteur est caractérisé essentiellement par sa puissance, la fréquence de rotation de son arbre, sa fixation, ses éléments mécaniques, ses protections.

31.11 Puissance

Puissance d'entrée, en triphasé :

$$P_e = U \cdot I \sqrt{3} \cos \varphi$$

- P_e : puissance électrique en watts ;
 U : tensions entre phases en volts ;
 I : intensité dans un fil de ligne en ampères.

Puissance de sortie :

$$P_m = T_m \cdot \Omega$$

- P_m : puissance mécanique en watts ;
 T_m : couple moteur en mètres newtons ;
 Ω : vitesse angulaire en radians par seconde.

Vitesse angulaire :

$$\Omega = 2 \pi \cdot n'$$

- n' : fréquence de rotation du rotor.

31.12 Fréquence de rotation du champ tournant

La fréquence de rotation du champ tournant, encore appelée vitesse de synchronisme, est donnée par la relation :

$$n = f / p$$

- f : fréquence du réseau en hertz ;
 p : nombre de paires de pôles au stator ;
 n : fréquence de rotation du champ tournant.

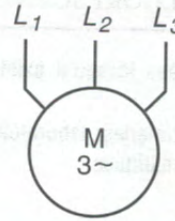
31.13 Glissement

Si la fréquence de rotation du rotor est inférieure à celle du champ tournant, le rotor glisse par rapport au champ statorique.

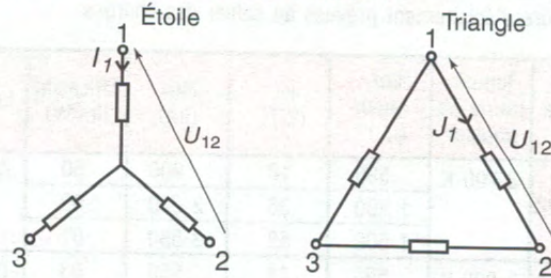
$$g = \frac{n - n'}{n}$$

- n : fréquence de rotation du champ tournant ;
 n' : fréquence de rotation du rotor.

SYMBOLE



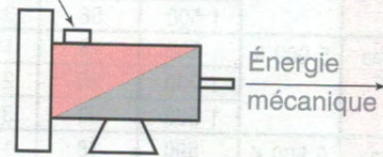
COUPLAGE DES ENROULEMENTS



PUISSANCE

Énergie électrique

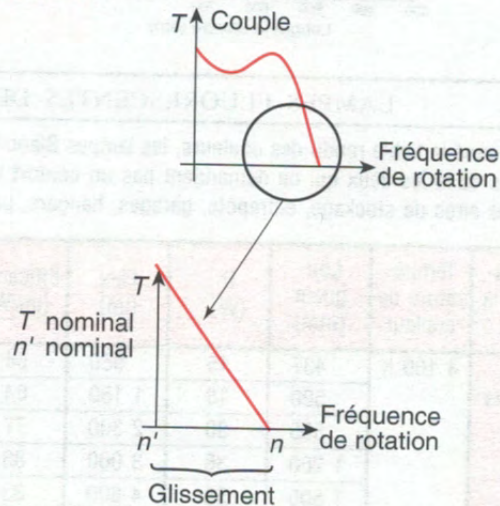
$$P_e = U \cdot I \sqrt{3} \cos \varphi$$



FRÉQUENCE DE ROTATION CHAMP TOURNANT

p	(tr/s)	(tr/min)
1	50	3 000
2	25	1 500
3	16,5	1 000
4	12,5	750

GLISSEMENT



31.2 Échanges énergétiques

L'énergie convertie par un moteur est utilisée sous forme mécanique par une chaîne cinématique. Cette énergie mécanique peut être consommée ou accumulée.

Elle est consommée lorsque son utilisation conduit à déformer une pièce (laminage, usinage par enlèvement de copeaux). Dans ces cas il y a généralement production de chaleur.

Elle est accumulée si elle est mise en réserve :

- soit sous forme potentielle ;
- soit sous forme cinétique.

31.21 Énergie potentielle

Lorsque le mécanisme entraîné par le moteur a pour fonction de modifier l'altitude d'une masse (levage), l'énergie mécanique est stockée sous forme potentielle.

31.22 Énergie cinétique

Tout élément en mouvement peut accumuler une énergie mécanique sous forme cinétique, par exemple les rotors, les poulies ou engrenages, ...

31.23 Réversibilité

Lorsque l'énergie est transformée en chaleur (usinage), le phénomène est irréversible, l'énergie de départ est consommée.

L'énergie potentielle, l'énergie cinétique peuvent être accumulées ou restituées :

- par variation de l'altitude d'un élément,
- par inversion du signe de la vitesse.

La conversion d'énergie effectuée par le moteur devient alors réversible.

Si l'énergie est accumulée, le convertisseur fonctionne en moteur : le sens de la conversion est :

Électrique → Mécanique.

Si l'énergie est restituée, le convertisseur fonctionne en générateur : le sens de la conversion est :

Mécanique → Électrique.

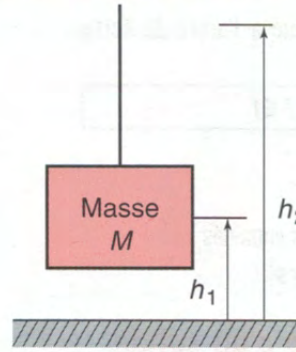
REMARQUES :

Une partie de l'énergie est consommée lors de la conversion, car le rendement des constituants est toujours inférieur à l'unité.

Cette énergie transformée en chaleur correspond :

- aux pertes par effet Joule dans les roulements,
- aux frottements, aux résistances passives.

ÉNERGIE POTENTIELLE



Initiale : $W_{P1} = mgh_1$
 Finale : $W_{P2} = mgh_2$

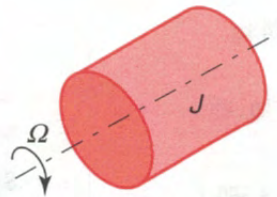
L'accroissement d'énergie potentielle entre les altitudes h_1 et h_2 est :

$$W_p = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

W_p en J ; m en kg ;
 h en m ; g accélération de la pesanteur.

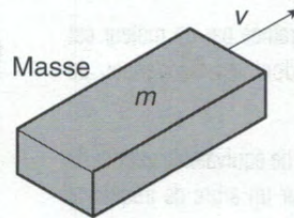
ÉNERGIE CINÉTIQUE

Cylindre tournant autour de son axe



$$W_c = \frac{1}{2} J \Omega^2$$

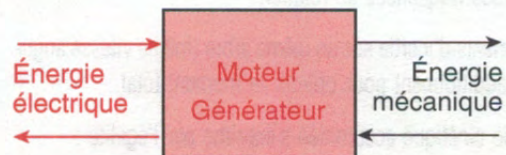
Masse animée d'un mouvement de translation



$$W_c = \frac{1}{2} mv^2$$

W_c en J J en $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ m en kg
 Ω en rd/s v en m/s

RÉVERSIBILITÉ



31.3 Contraintes mécaniques

L'équation mécanique qui s'applique à l'arbre de sortie s'écrit :

$$T_m = T_r + J d\Omega / dt$$

- T_m : couple moteur en mN,
- T_r : couple résistant en mN,
- J : moment d'inertie des éléments entraînés,
- $d\Omega/dt$: accélération angulaire en rd/s².

31.31 Moment d'inertie d'un solide

Un moteur, accouplé à une chaîne cinématique, entraîne des pièces en rotation (arbres, engrenages, poulies, ...). Son rotor possède une inertie propre capable de stocker une énergie cinétique. Il en est de même pour les pièces de révolution.

EXEMPLE :

Un rotor de diamètre 200 mm et de longueur 300 mm en acier est entraîné à 1 500 tr/min (157 rd/s).

La masse est $m = \pi R^2 \cdot L \cdot \rho$, $m = 74$ kg.

Son moment d'inertie est :

$$J = 1/2 m \cdot R^2, \quad J = 0,37 \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

L'énergie accumulée $W_c = 1/2 J \Omega^2$:

$$W_c = 1/2 \times 0,37 \times 157^2 = 4 560 \text{ J}.$$

31.32 Moment équivalent ramené sur l'arbre moteur

En général, une chaîne cinétique entraînée par un moteur est composée de plusieurs éléments dont les fréquences de rotation sont différentes.

La représentation des moments d'inertie équivalents permet de les additionner s'ils sont ramenés sur un arbre de fréquence de rotation n .

Le moment d'inertie équivalent ramené sur l'arbre moteur se calcule en tenant compte du rapport des fréquences de rotation de l'élément entraîné et de celle du moteur.

Le rapport s'écrit $k = D_2 / D_1$ ou $k = n_2 / n_1$.

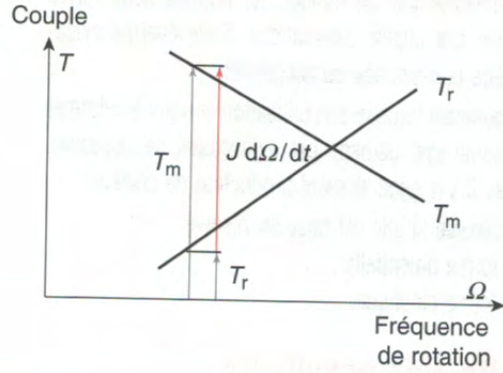
Le moment d'inertie équivalent ramené sur l'arbre dépend du rapport des fréquences de rotation.

Les moments d'inertie sur un même arbre (même vitesse angulaire) s'additionnent pour obtenir le moment total.

L'énergie cinétique accumulée s'exprime par l'égalité :

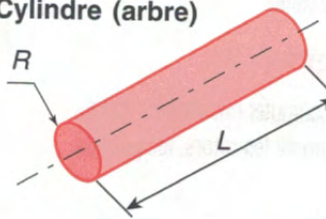
$$W_c = 1/2 [J_2 \Omega_2^2] = 1/2 [J_e \Omega_1^2].$$

CONTRAINTES MÉCANIQUES



MOMENT D'INERTIE

Cylindre (arbre)

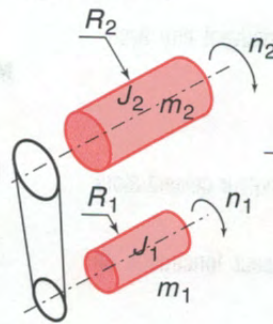


$$J = 1/2 m \cdot R^2$$

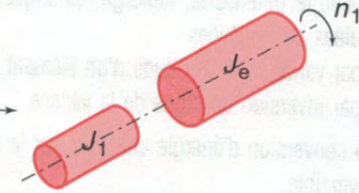
- m masse en kg ;
- R rayon en m ;
- J moment en kg.m².

MOMENT RAMENÉ SUR UN ARBRE

Système réel



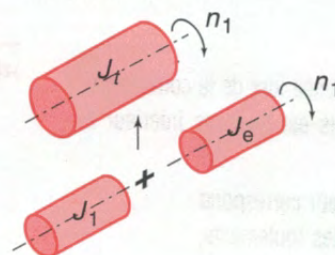
Modèle équivalent



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

$$J_2 = m_2 \frac{R_2^2}{2}$$

Modèle simplifié



$$J_t = J_1 + J_e$$

Addition des inerties

EXEMPLE D'APPLICATION :

Soit à calculer les moments d'inertie ramenés sur l'arbre 1 et le moment d'inertie totale si :

- $J_1 = 0,054 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $n_1 = 2\,940 \text{ tr} \cdot \text{min}$;
- $J_2 = 0,22 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $n_2 = 650 \text{ tr} \cdot \text{min}$;
- $J_3 = 2,9 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $n_3 = 120 \text{ tr} \cdot \text{min}$.
- $J_{e2} = 0,01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $J_{e3} = 0,048 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $J_T = 0,069 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

31.4 Loi de couple

Un moteur asynchrone est caractérisé par sa loi de couple en fonction de la fréquence de rotation de son arbre.

Les valeurs précisées par les constructeurs sont :

- T_d le couple de démarrage, cette valeur permet de connaître le couple accélérateur au démarrage ;
- T_m le couple maximal, cette donnée permet de déterminer la contrainte de couple maximale imposée au mécanisme entraîné ;
- T_n le couple nominal, cette valeur donne le couple et la fréquence de rotation en régime établi.

Les rapports donnés par les constructeurs sont généralement :

- T_d / T_n est compris entre 2,2 et 4 ;
- T_m / T_n est compris entre 2 et 3.

31.41 Fonctionnement en 4 quadrants

Le plan couple-fréquence de rotation définit 4 quadrants de fonctionnement.

La conversion d'énergie est :

énergie électrique → énergie mécanique pour les quadrants 1 et 3.

Le moteur entraîne le mécanisme en lui fournissant de l'énergie ;

énergie mécanique → énergie électrique pour les quadrants 2 et 4.

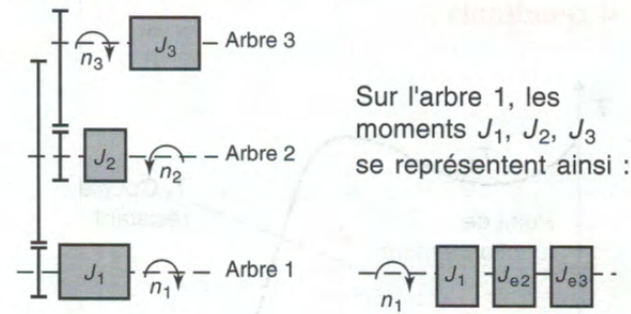
Le moteur reçoit une énergie mécanique et fonctionne alors en générateur d'énergie électrique (l'énergie mécanique en entrée est potentielle ou cinétique).

Le fonctionnement est symétrique par rapport à la fréquence de rotation, il suffit d'étudier le comportement de la machine dans les quadrants 1 et 4 si l'ensemble est réversible.

La loi de couple dépend de la technologie employée, en particulier de la constitution du rotor.

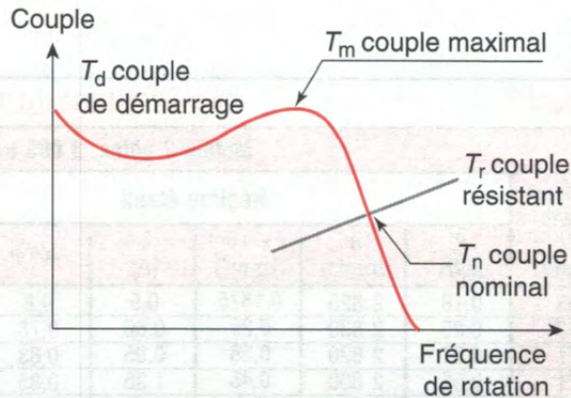
Les constructeurs adaptent le couple de démarrage en fonction de l'application prévue par l'utilisateur.

APPLICATION

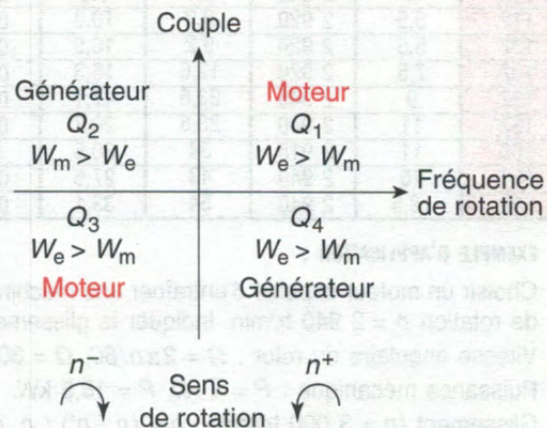


Sur l'arbre 1, les moments J_1, J_2, J_3 se représentent ainsi :

COUPLE



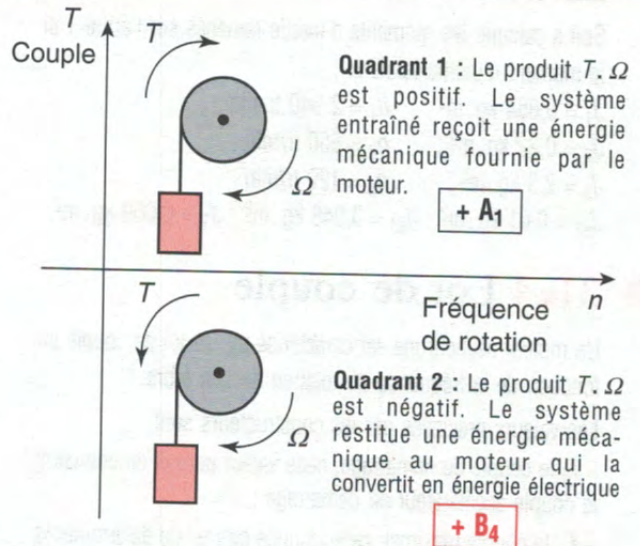
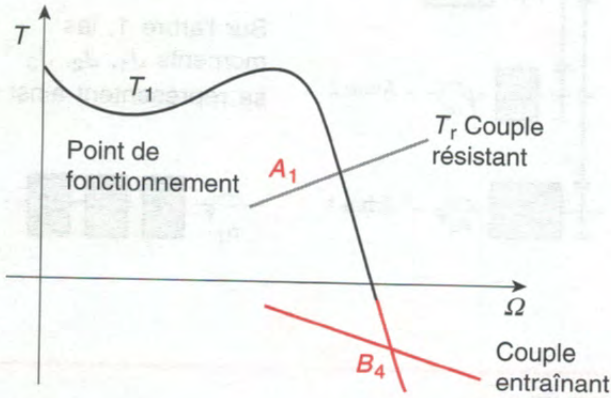
La loi de couple dépend de la technologie employée, en particulier de la constitution du rotor.



Le produit du couple par la fréquence de rotation est :

- positif dans les quadrants 1 et 3 ;
- négatif dans les quadrants 2 et 4.

31.42 Relation loi de couple - 4 quadrants



31.43

CARACTÉRISTIQUES CONSTRUCTEURS

Moteur 2 pôles, 3 000 tr/min, réseau triphasé 400 V

Hauteur d'axe H (mm)	Régime établi						Régime transitoire				
	P (kW)	n (tr/min)	$J \times 10^{-3}$ (kg.m ²)	I_n (A)	Cos φ	η	I_d / I_n	T_d / T_n	T_m / T_n	Masse (kg)	Courbe*
63	0,18	2 825	0,1875	0,5	0,8	0,67	5,5	3,3	2,8	4,8	1
63	0,25	2 830	0,25	0,66	0,78	0,71	6,8	3,3	4	6	1
71	0,37	2 820	0,35	0,95	0,83	0,71	4,8	3	3,5	6,4	1
71	0,55	2 800	0,45	1,35	0,85	0,75	5	2,6	2,8	7,3	1
71	0,75	2 810	0,6	1,8	0,82	0,75	6	2,8	3,2	8,3	1
80	0,75	2 800	0,7	1,9	0,83	0,71	5,8	3	3,2	9	1
80	1,1	2 825	0,9	2,6	0,82	0,76	6,4	3	3,2	10,5	1
80	1,5	2 835	1,1	3,4	0,82	0,77	7	3	2,9	9,5	1
90	1,5	2 870	1,4	3,3	0,82	0,79	7,7	3	3,4	15	1
90	1,8	2 870	1,7	3,6	0,89	0,82	8,3	4	3,2	16	1
90	2,2	2 850	2,1	4,4	0,89	0,82	6,8	2,9	2,9	18	1
100	3	2 860	2,4	6,3	0,83	0,8	7,6	3,8	3,9	21	1
112	4	2 840	2,9	8,2	0,86	0,81	8,4	4,2	3,5	26	1
112	5,5	2 920	9,2	10,9	0,88	0,83	8,6	2,7	2,8	36	2
132	5,5	2 920	9,2	10,9	0,88	0,83	8,6	2,7	2,8	37	2
132	7,5	2 920	12,6	15,3	0,84	0,85	8,6	3,3	3,6	43	1
132	9	2 945	23,6	17,1	0,87	0,87	8,6	2,5	3,4	63	1
132	11	2 940	28,5	20,7	0,87	0,88	9,6	2,9	3,7	72	1
160	11	2 915	34	20,5	0,9	0,86	6,4	2,6	2,6	76	2
160	15	2 940	43	27,5	0,88	0,895	8	3,6	3,3	90	1
160	18,5	2 940	54	33,1	0,89	0,906	8,2	3,5	3,2	105	1

EXEMPLE D'APPLICATION :

Choisir un moteur capable d'entraîner une machine dont le couple résistant est estimé à 60 N.m à une fréquence de rotation $n = 2\ 940$ tr/min. Indiquer le glissement et l'intensité de démarrage I_d .

Vitesse angulaire du rotor : $\Omega = 2\pi n/60$, $\Omega = 308$ rd/s.

Puissance mécanique : $P = T \cdot \Omega$, $P = 18,5$ kW.

Glissement ($n = 3\ 000$ tr/min) : $g = (n - n') / n$, $g = 0,02$ ou 2 %.

REMARQUE :

La fréquence de rotation en charge est proche de celle du synchronisme ($g = 2$ %).

Moteur 4 pôles, 1 500 tr/min, réseau triphasé 400 V

Hauteur d'axe <i>H</i> (mm)	Régime établi						Régime transitoire				
	<i>P</i> (kW)	<i>n</i> (tr/min)	$J \times 10^{-3}$ (kg.m ²)	<i>I_n</i> (A)	<i>Cos φ</i>	<i>η</i>	<i>I_d / I_n</i>	<i>T_d / T_n</i>	<i>T_m / T_n</i>	Masse (kg)	Courbe*
63	0,18	1 410	0,475	0,62	0,75	0,63	3,7	2,3	2,3	5	2
71	0,25	1 435	0,675	0,7	0,74	0,70	4,6	2,3	2,7	6,4	2
71	0,37	1 425	0,85	1,12	0,7	0,7	4,4	2,3	2,6	7,3	2
71	0,55	1 390	1,1	1,65	0,75	0,66	3,7	1,9	2,2	8,3	2
80	0,55	1 400	1,3	1,6	0,74	0,68	4,4	2,1	2,2	9	3
80	0,75	1 400	1,8	2	0,77	0,69	4,5	2,4	2,5	10,5	3
80	0,9	1 425	2,4	2,3	0,73	0,73	5,7	2,6	3,8	11,5	2
90	1,1	1 415	3,2	2,7	0,79	0,75	5,2	2,1	2,6	14	3
90	1,5	1 420	3,9	3,5	0,79	0,78	5,9	2,8	3	15	2
90	1,8	1 410	4,9	4,1	0,82	0,79	5,7	2,5	2,6	17	2
100	2,2	1 430	3,9	5,1	0,81	0,75	5,3	1,9	2,4	19,5	3
100	3	1 420	5,1	7,2	0,78	0,77	5,1	2,3	2,5	22	3
112	4	1 425	7,1	9,1	0,79	0,80	5,7	2,4	2,6	26	2
132	5,5	1 430	17,7	11,9	0,82	0,82	6,3	2,4	2,5	39	3
132	7,5	1 450	33,4	15,2	0,84	0,84	7,7	2,7	3,1	56	2
132	9	1 450	38,5	18,4	0,83	0,85	7,8	3	3,4	62	1
160	11	1 450	54	21,3	0,85	0,878	5,6	2,1	2,5	80	8
160	15	1 455	73	28,6	0,85	0,891	6,5	2,7	2,8	97	8
180	18,5	1 455	89	35,1	0,85	0,896	6,7	2,8	2,9	113	8

EXEMPLE D'APPLICATION :

Calculer l'énergie accumulée par un moteur développant un couple de 59 N.m à 1 450 tr/min. Indiquer le choix du moteur.

Vitesse angulaire du rotor : $\Omega = 2 \pi n/60$, $\Omega = 151$, 8 rd/s.

Puissance du moteur : $P = T \times \Omega$, $P = 8,96$ kW, soit 9 kW.

Énergie accumulée : $W = 1/2 J \Omega^2$, $W = 444$ J.

Moteur 6 pôles, 1 000 tr/min, réseau triphasé 400 V

Hauteur d'axe <i>H</i> (mm)	Régime établi						Régime transitoire				
	<i>P</i> (kW)	<i>n</i> (tr/min)	$J \times 10^{-3}$ (kg.m ²)	<i>I_n</i> (A)	<i>Cos φ</i>	<i>η</i>	<i>I_d / I_n</i>	<i>T_d / T_n</i>	<i>T_m / T_n</i>	Masse (kg)	Courbe*
71	0,18	940	1,1	0,92	0,54	0,56	3,2	2,3	2,7	7,6	3
71	0,25	915	1,275	1,16	0,6	0,55	2,8	2,2	2,3	7,9	3
80	0,25	955	2,4	0,85	0,67	0,64	3,8	1,4	1,6	8	5
80	0,37	950	3,2	1,1	0,72	0,67	4,3	1,7	2,1	9	5
80	0,55	950	4,2	1,8	0,64	0,67	4,9	2	2,6	10	3
90	0,75	950	3,9	2	0,75	0,73	4,6	2,1	2,4	15	3
90	1,1	935	4,8	2,8	0,78	0,73	4,4	1,6	2	17	4
100	1,5	930	5,8	3,8	0,8	0,72	4,3	1,9	2,1	21	4
112	2,2	945	8,7	5,8	0,74	0,74	4,7	2,2	2,4	23	3
132	3	945	17,7	7,1	0,78	0,78	5,8	2,4	2,4	45	6
132	4	965	51,7	9,4	0,75	0,82	6,7	2,8	2,7	56	1
132	5,5	970	59,5	12,9	0,75	0,82	6,9	3,1	3	61	1
160	7,5	965	84	15,9	0,8	0,852	4,5	1,3	1,3	81	5
160	11	970	126	22,9	0,8	0,865	5,3	1,6	1,6	105	5
180	15	975	191	29,7	0,82	0,889	7,1	2,1	2,1	135	8
200	18,5	975	237	37,3	0,8	0,895	6,9	2,3	2,3	160	8

EXEMPLE D'APPLICATION :

Calculer les contraintes maximales électriques et mécaniques imposées par un moteur 11 kW à démarrage direct sous 3 × 400 V.

Intensité de démarrage : $I_d = 5, 3 I_n$, $I_d = 121$ A. ; puissance apparente au démarrage : $S = U / \sqrt{3}$, $S = 83, 8$ kW.

Vitesse angulaire de l'arbre : $\Omega = 2 \pi n$, $\Omega = 101,6$ rd/s.

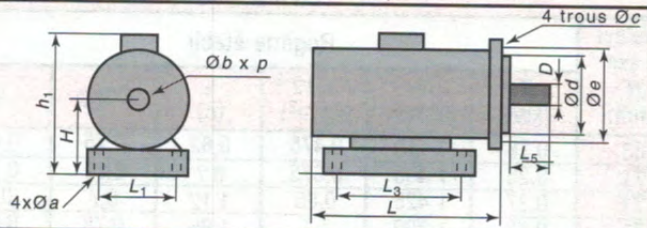
Couple nominal : $T_n = P/\Omega$, $T_n = 108$ N.m.

Couple maximal : $T_m = 1,6 T_n$, $T_m = 172,8$ N.m.

ENCOMBREMENT ET FIXATION (côtes en mm)

Moteurs à pattes et brides de fixation

- C₁ : bride à trous taraudés.
- C₂ : bride à trous lisses.



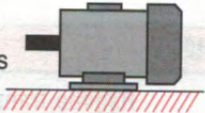
H	h ₁	L ₁	L ₃	L	L ₅	D	Øa	Øb x ρ	C1	C2	Ød	Øe
63	154	100	80	172	23	11j6	7	M4 x 10	M5	10	95	115
71	173	112	90	183	30	14j6	7	M5 x 15	M6	10	110	130
80	203	125	100	215	40	19j6	9	M6 x 16	M6	12	130	165
90S	223	140	100	238	50	24j6	10	M8 x 19	M8	12	130	165
90L	223	140	125	265	50	24j6	10	M8 x 19	M8	12	130	165
100	238	160	140	290	60	28j6	12	M10 x 22	M8	15	180	215
112M	250	190	140	290	60	28j6	12	M10 x 22	M8	15	180	215
112MG	260	190	140	315	60	28j6	12	M10 x 22	M8	15	180	215
112MU	260	190	140	334	60	28j6	12	M10 x 22	M8	15	180	215
132S	280	216	140	350	80	38k6	12	M12 x 28	M12	15	230	265
132SM	307	216	178	387	110	38k6	12	M12 x 28	M12	15	230	265
160M	390	254	210	495	110	42k6	14	M16 x 36		18,5	250	300
160L	390	254	254	495	110	42k6	14	M16 x 36		18,5	250	300
180MT	433	279	241	495	110	48k6	14	M16 x 36		18,5	250	300
180L	430	279	279	552	110	48k6	14	M16 x 36		18,5	250	300

MODE DE FIXATION ET POSITIONS DE FONCTIONNEMENT SELON LA NORME CEI 34-7

Moteur à pattes de fixation

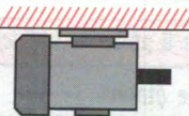
IM 1001

L'arbre est horizontal, les pattes sont fixées au sol.



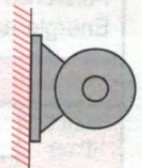
IM 1071

L'arbre est horizontal, les pattes sont fixées au plafond.



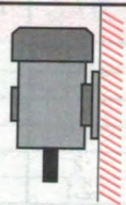
IM 1051

L'arbre est horizontal, les pattes sont fixées sur le mur à gauche vu en bout d'arbre.



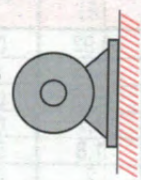
IM 1011

L'arbre est vertical vers le bas, les pattes sont fixées au mur.



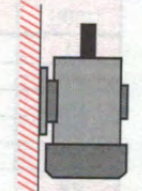
IM 1061

L'arbre est horizontal, les pattes sont fixées sur le mur à droite vu en bout d'arbre.



IM 1031

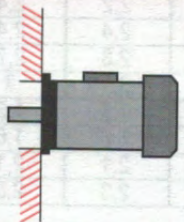
L'arbre est vertical vers le haut, les pattes sont fixées au mur.



Moteurs à brides de fixation à trous lisses

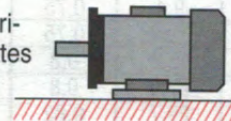
IM 3001

L'arbre est horizontal.



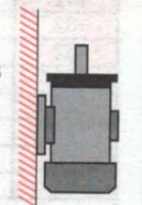
IM 2001

L'arbre est horizontal, les pattes sont fixées au sol.



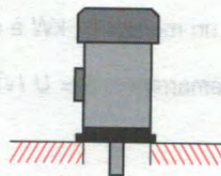
IM 2031

L'arbre est vertical vers le plafond, les pattes sont fixées au mur.



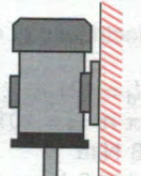
IM 3011

L'arbre est vertical dirigé vers le sol.



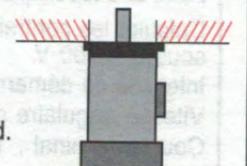
IM 2011

L'arbre est vertical vers le sol, les pattes sont fixées au mur.



IM 3031

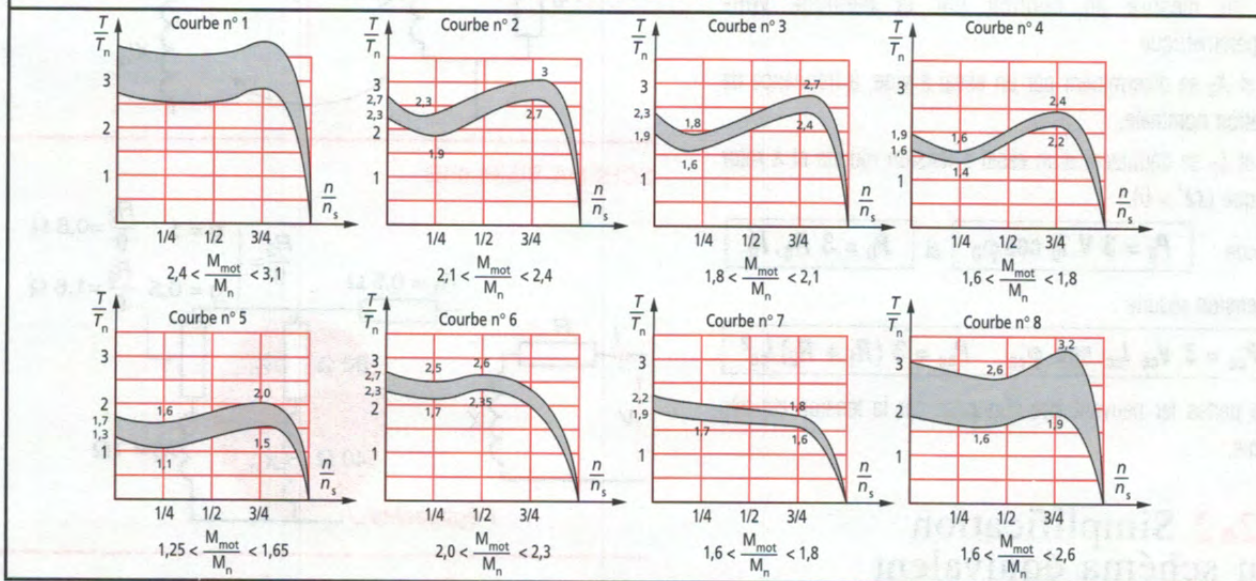
L'arbre est vertical dirigé vers le plafond.



Choix d'une motorisation asynchrone	Commentaires
À partir du cahier des charges, déterminer : le couple nécessaire, la fréquence de rotation, la puissance à fournir.	Les éléments à prendre en compte sont : ■ l'énergie à fournir : cinétique ; potentielle ; ■ la forme du couple résistant : constant ; parabolique ; proportionnel à n .
le nombre de pôles, la hauteur d'arbre.	La fréquence de rotation est liée au nombre de pôles : $f = p \times n$. La puissance est liée à la hauteur d'arbre.
le type de réseau, la tension entre phases, la fréquence.	Le réseau conditionne le couplage des enroulements, les intensités absorbées : I_d et I_n . La fréquence de rotation rotor dépend du glissement de la fréquence.
l'altitude, la température ambiante, le mode de ventilation, le type de service.	Le moteur doit être déclassé car l'évacuation des pertes (fer, Joule, mécaniques) dépend des conditions de l'environnement.
le mode de fixation (pattes ou bride), l'accouplement, la plaque.	Le mode de fixation agit sur : ■ la liaison entre le moteur et la machine entraînée ; ■ la transmission de la chaleur par conduction ; ■ l'orientation de la plaque à bornes.
la classe d'isolation, l'indice de protection, les sondes de protection thermique.	Les conditions thermiques déterminent la classe d'isolation (pompe de chauffage dont le fluide est à 85 °C). La carcasse du moteur doit résister aux conditions climatiques et mécaniques. Les gros moteurs sont protégés par sondes.
Rédiger le bon de commande.	La référence doit être complète et interprétable par le constructeur.

31.44

COURBES DE COUPLE



31.45 Calcul simplifié du temps de démarrage

Le couple moteur peut être assimilé à un couple constant pendant la période de démarrage. L'accélération angulaire se calcule par : $d\Omega / dt$ ou $\Omega' = (T_m - T_r) / J$.

Le temps de démarrage s'estime alors :

$$t = \Omega / \Omega'$$

