

# Moteur asynchrone triphasé

## 1. Constitution et principe de fonctionnement

### 1.1. Stator = inducteur

Il est constitué de trois enroulements (bobines) parcourus par des courants alternatifs triphasés et possède p paires de pôles.

Champ tournant

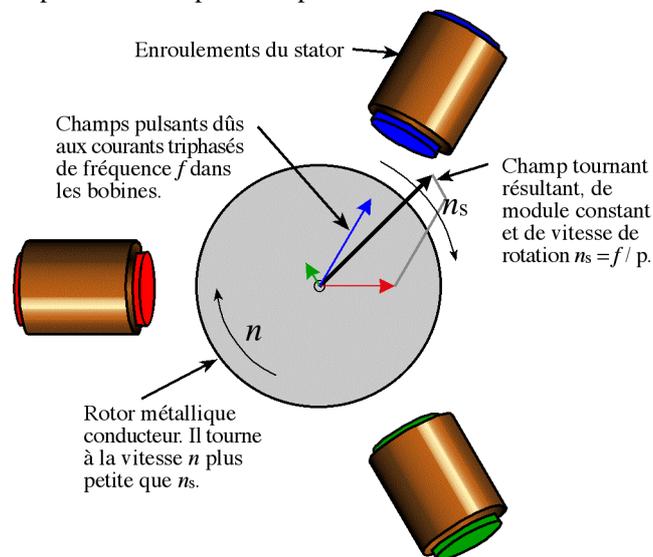
Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique  $\vec{B}_1$  tournant à la pulsation de synchronisme :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

$\Omega_s$  : vitesse synchrone de rotation du champ tournant en  $\text{rad.s}^{-1}$ .

$\omega$  : pulsation des courants alternatifs en  $\text{rad.s}^{-1}$ .  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

p : nombre de paires de pôles.



### 1.2. Rotor = induit

Le rotor n'est relié à aucune alimentation. Il tourne à la vitesse de rotation  $\Omega$ .

Rotor à cage d'écureuil

Il est constitué de barres conductrices très souvent en aluminium. Les extrémités de ces barres sont réunies par deux couronnes également conductrices. On dit que **le rotor est en court-circuit**.

Sa résistance électrique est très faible.

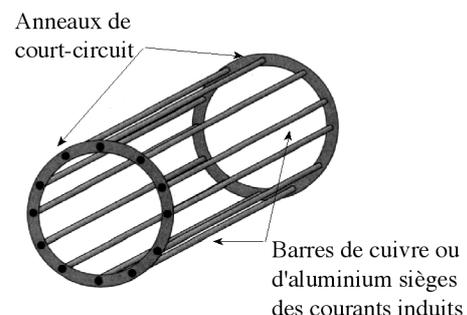
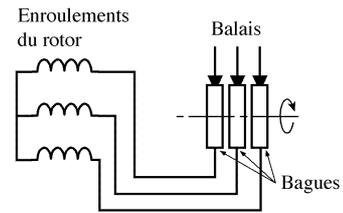


Schéma de principe d'une cage d'écureuil

### 1.3. Rotor bobiné

Les tôles de ce rotor sont munies d'encoches où sont placés des conducteurs formant des bobinages. On peut accéder à ces bobinages par l'intermédiaire de trois bagues et trois balais. Ce dispositif permet de modifier les propriétés électromécaniques du moteur.



### 1.4. Courants induits

Des courants induits circulent dans le rotor.

### 1.5. Entrefer

L'entrefer est l'espace entre le stator et le rotor.

### 1.6. Glissement

Le rotor tourne à la vitesse  $\Omega$  plus petite que la vitesse de synchronisme  $\Omega_s$ . On dit que le rotor « glisse » par rapport au champ tournant. Ce glissement  $g$  va dépendre de la charge.

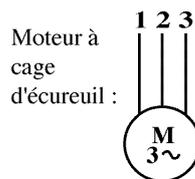
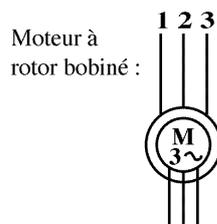
$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

$n_s$  : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant (trs.s<sup>-1</sup>).

$n$  : vitesse de rotation du rotor (trs.s<sup>-1</sup>).

$\Omega_s = 2\pi n_s$  (rad.s<sup>-1</sup>) et  $\Omega = 2\pi n$  (rad.s<sup>-1</sup>)

## 2. Symboles



## 3. Caractéristiques

### 3.1. Fonctionnement à vide

A vide le moteur n'entraîne pas de charge.

**Conséquence** : le glissement est nul est le moteur tourne à la vitesse de synchronisme.

A vide :  $g = 0$  et donc  $n_0 = n_s$

#### Autres observations :

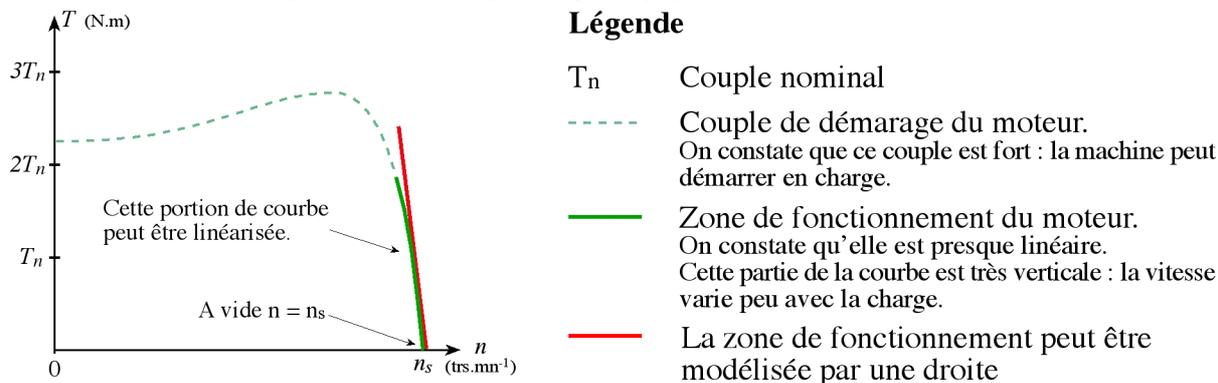
- le facteur de puissance à vide est très faible (<0,2) et le courant absorbée reste fort (P est petit et Q est grand). On parle alors de courant réactif ou magnétisant (ils servent à créer le champ magnétique).

### 3.2. Fonctionnement en charge

Le moteur fournit maintenant de la puissance active, le stator appelle un **courant actif**.

**Remarque :** le moteur asynchrone est capable de démarrer en charge.

### 3.3. Caractéristique mécanique $T_u = f(n)$



### 3.4. Modélisation de la partie utile de la courbe

On veut déterminer l'équation de la droite qui modélise la partie utile de la caractéristique mécanique.

Il faut deux points : - 1<sup>er</sup> point évident :  $A_1 \begin{pmatrix} n_s \\ 0 \end{pmatrix}$

- 2<sup>e</sup> point : il faut un essai de la machine  $A_2 \begin{pmatrix} n_2 \\ T_2 \end{pmatrix}$

Equation d'une droite :  $y = a.x + b$  soit  $T_u = a.n + b$

Coefficient directeur (pente) :  $a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$  soit  $a = \frac{T_2 - 0}{n_2 - n_s}$

$|a|$  est grand (droite presque verticale) et  $a$  est négatif.

Ordonnée à l'origine : point  $A_1$   $0 = a.n_s + b$  soit  $b = -a.n_s$

**Remarque :** le point  $A_2$  peut aussi être fourni par les informations figurant sur la plaque signalétique de la machine (couple nominal  $T_n$  et vitesse nominale  $n_n$ ).

### 3.5. Caractéristique mécanique en fonction du glissement

#### 3.5.1. Changement d'axe

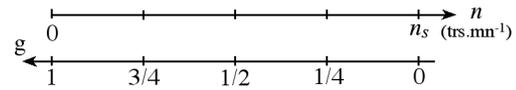
L'axe des abscisses de la caractéristique mécanique peut être représenté par le glissement

En effet :  $n = n_s \Rightarrow g = \frac{n_s - n}{n_s} = 0$

$n = n_s / 2 \Rightarrow g = 0,5$

$n = 0 \Rightarrow g = 1$

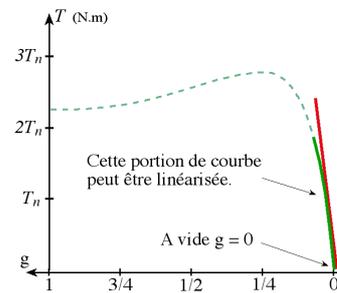
L'axe en  $n$  et l'axe en  $g$  sont inversés.



D'où la même caractéristique avec l'axe en  $g$ .

Cette fois ci le modèle est une droite passant par l'origine, donc d'équation :

$$y = k.x \quad \text{soit} \quad T_u = k.g$$



**Finalement :**

Au voisinage du point de fonctionnement nominal, le couple utile est proportionnel au glissement.

$$\boxed{T_u = k.g} \quad k \text{ est une constante de proportionnalité (coefficient directeur) en N.m.}$$

**3.5.2. Relation entre a et k**

Au paragraphe 3.4, nous avons vu que :  $T_u = a.n + b$  avec  $b = -a.n_s$

Ce qui donne :  $T_u = a.n - a.n_s = -a(n_s - n)$

En remarquant que :  $g = \frac{n_s - n}{n_s}$  soit  $n_s - n = n_s.g$

On obtient :  $T_u = -a.n_s.g = k.g$  avec  $\underline{k = -a.n_s}$

**3.6. Résumé des caractéristiques**

- A vide, le courant est non négligeable, mais la puissance absorbée est surtout réactive (Q) ;
- le couple et le courant de démarrage sont importants ;
- l'intensité du courant absorbée augmente avec le glissement ;
- la machine asynchrone peut démarrer en charge.

**On retiendra que :**

- la vitesse du champ tournant est :  $n_s = \frac{f}{p}$  ( $f$  la fréquence du courant et  $p$  le nombre de paires de pôles) ;
- le glissement est le rapport entre la vitesse du champ et celle du rotor :  $g = \frac{n_s - n}{n_s}$  ;
- à vide  $g = 0$  et  $n_0 = n_s$  ;
- quelle que soit la charge la vitesse de rotation varie très peu ( $n \approx n_s$ ) ;
- en fonctionnement nominal le moment du couple utile est proportionnel au glissement  $T_u = k.g$

### 4. Démarrage du moteur

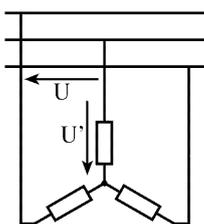
Nous venons de dire que le courant de démarrage est très important (4 à 8 fois  $I_n$ ). Pour ne pas détériorer le moteur, il convient de réduire cet appel de courant.

- Il existe deux procédés :
- utilisation de résistances de démarrage ;
  - démarrage sous tension réduite.

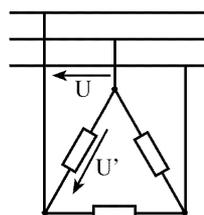
Nous allons voir deux solutions pour démarrer sous tension réduite.

#### 4.1. Démarrage étoile - triangle

Cette méthode consiste à diminuer, le temps du démarrage, la tension d'alimentation.



**Montage étoile :**  
la tension aux bornes d'un enroulement est plus faible que la tension entre phase du réseau.  
 $U' = U / \sqrt{3}$



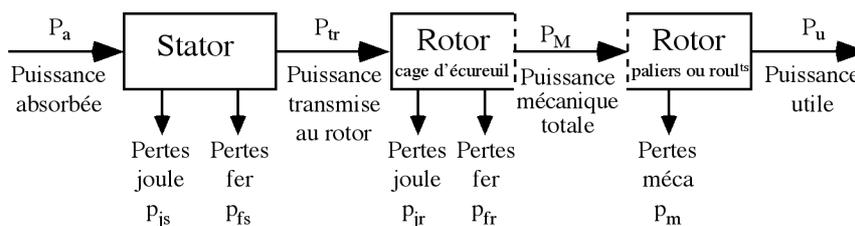
**Montage triangle :**  
 $U' = U$

La tension aux bornes d'un enroulement est plus faible en étoile qu'en triangle.

#### 4.2. Démarrage par auto-transformateur

On augmente progressivement la tension aux bornes des phases du moteur à l'aide d'un auto-transformateur triphasé.

### 5. Bilan des puissances



#### 5.1. Puissance électrique absorbée : $P_a$

$$P_a = \sqrt{3}UI \cos \phi$$

U : tension entre deux bornes du moteur  
I : courant en ligne

#### 5.2. Pertes par effet joule au stator : $p_{js}$

$$P_{js} = \frac{3}{2} RI^2$$

R : résistance entre deux bornes du stator

### 5.3. Pertes fer au stator : $p_{fs}$

Elles ne dépendent que de la tension  $U$  et de la fréquence  $f$  et sont donc constantes si le moteur est couplé au réseau.

### 5.4. Puissance transmise : $P_{tr}$

$$\boxed{P_{tr} = P_a - p_{js} - p_{fs}}$$
 C'est la puissance que reçoit le rotor.

### 5.5. Moment du couple électromagnétique : $T_{em}$

Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse  $\Omega_s$  : elles **glissent** sur le rotor qui, lui, ne tourne qu'à la vitesse  $\Omega$ .

L'action de l'ensemble des forces électromagnétiques se réduit à un couple électromagnétique résultant de moment  $T_{em}$ .

$$T_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s}$$

$T_{em}$  (N.m)  
 $P_{tr}$  (W)  
 $\Omega_s$  (rad.s<sup>-1</sup>)

### 5.6. Puissance mécanique totale : $P_M$

Le couple électromagnétique de moment  $T_{em}$  entraîne le rotor à la vitesse  $\Omega$ . Il lui communique donc la puissance mécanique totale  $P_M$ .

$$P_M = T_{em} \Omega \quad \text{soit} \quad P_M = T_{em} \Omega = P_{tr} \frac{\Omega}{\Omega_s} = P_{tr} (1 - g)$$

$$\boxed{P_M = P_{tr} (1 - g)}$$
 Cette puissance comprend la puissance utile et les pertes mécaniques.

### 5.7. Pertes par effet joule et pertes dans le fer au rotor : $p_{jr}$ et $p_{fr}$

Ces pertes représentent la différence entre  $P_{tr}$  et  $P_M$ . Elles sont dues aux courants induits.

Elles ne sont pas mesurables car le rotor est court-circuité. On les calcule.

$$\text{Donc : } p_{jr} + p_{fr} = P_{tr} - P_M = P_{tr} - P_{tr} (1 - g) = g P_{tr}$$

$$\boxed{p_{jr} \approx g P_{tr}}$$
 Les pertes fer du rotor sont négligeables.

### 5.8. Pertes mécaniques : $p_m$

$$p_m = P_u - P_M$$

La vitesse de rotation variant peu en marche normale, ces pertes sont pratiquement constantes.

### 5.9. Pertes « collectives » : $p_c$

Ces pertes ne dépendent que de U, f et n. Comme ces grandeurs sont généralement constantes, les pertes fer au stator et les pertes mécaniques le sont aussi.

$$p_c = p_{fs} + p_m$$

On définit le couple de perte :

$$T_p = \frac{p_c}{\Omega_s}$$

Le couple de perte est une grandeur constante quelle que soit la vitesse et la charge de la machine

### 5.10. Puissance utile : $P_u$

Puissance utile :  $P_u = P_M - p_m$

Couple utile :  $T_u = \frac{P_u}{\Omega}$

Rendement :  $\eta = \frac{P_u}{P_a}$

### 5.11. Bilan des puissances à vide

Le bilan total, quelque soit la situation, est :  $P_a = P_u + p_{js} + p_{jr} + p_c$

A vide :  $T_u = 0 \Rightarrow P_u = 0$   
 $g = 0 \Rightarrow p_{jr} = 0$  (voir § 3.7)

$$P_{a0} = \sqrt{3}UI_0 \cos\phi_0$$

$$p_{js0} = \frac{3}{2}RI_0^2$$

$$p_c \text{ à vide} \approx p_c \text{ en charge}$$

Bilan à vide :  $P_{a0} = p_{js0} + p_c$

En simplifiant :  $P_{a0} \approx p_c$  (les pertes joules à vide sont négligeables)

Un essai à vide permettra de déterminer les pertes collectives.

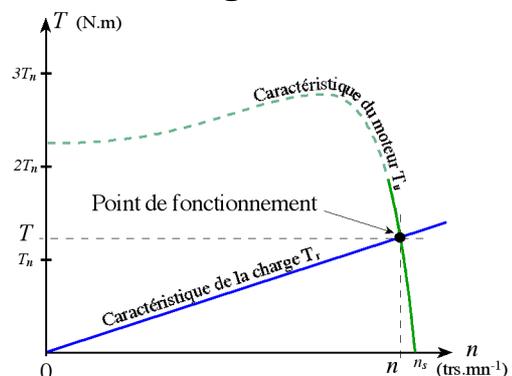
## 6. Point de fonctionnement du moteur en charge

C'est le point d'intersection des caractéristiques  $T = f(n)$  du moteur et de la charge.

$T_u$  : couple utile du moteur

$T_r$  : couple résistant

La courbe du couple résistant dépend de la charge.



### 6.1 Méthode de résolution graphique

Tracer à l'échelle sur du papier millimétré les deux caractéristiques et relever les coordonnées du point d'intersection.

## 6.2 Méthode de résolution par le calcul

Il faut résoudre :  $T_u = T_r$  soit :  $a.n + b = T_r$

**Exemple :** cas d'une charge ayant un couple résistant proportionnel au carré de la vitesse.

$$T_r = c.n^2$$

$$T_u = T_r \Rightarrow a.n + b = c.n^2$$

Finalement, il faut résoudre une équation du second degré :

$$c.n^2 - a.n - b = 0$$

Une solution sur les deux trouvées sera la bonne.

## 7. Branchement du moteur sur le réseau triphasé

Il n'est pas toujours possible de brancher un moteur asynchrone en étoile ou en triangle.

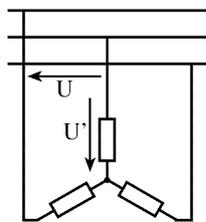
**Exemple :**

- sur une plaque signalétique d'un moteur on lit :  $\Delta$  380 /  $\Delta$  220

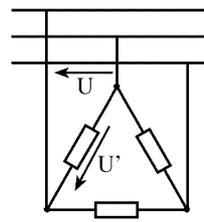
- le réseau est en 220 / 380 V

De la plaque signalétique on déduit que la tension nominale d'une phase du moteur est de 220 V.

Si on branche ce moteur en triangle, la tension au borne d'une phase sera de 380 V ce qui est trop élevé.



$U = 380 \text{ V}$   
 $U' = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ V}$   
 Ce montage est possible



$U = 380 \text{ V}$   
 $U' = U = 380 \text{ V}$   
 Ce montage n'est pas possible

**Conclusion :** ce moteur peut être branché uniquement en étoile sur le réseau 220 / 380 V

**Remarque :** il s'agit en fait d'un vieux moteur. Actuellement tous les moteurs supportent 380V par phase. Ils supportent même souvent 400 V et 415 V, car le réseau EDF évolue progressivement vers ces tensions.

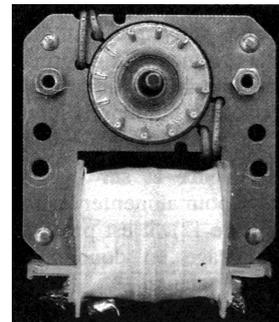
**Exemple d'une plaque signalétique d'un moteur asynchrone :**

		MOT. 3 ~ LS 100 L				
		N° 8945/79		22 kg		
Code :		T				
DIM 1502  MADE IN FRANCE	IP 55	I cl. F	40°C	S1	%	c/h
		Hz	min <sup>-1</sup>	kW	cos φ	A
	Δ 380	50	1415	3	0,83	7,1
	Δ 400	50	1420	3	0,78	7,2
	Δ 415	50	1430	3	0,74	7,3
DE NDE				g h		
MOTEURS LEROY-SOMER						I.E.C. 34-1 (87)

### 8. Moteur asynchrone monophasé

En monophasé le moteur peut tourner dans un sens ou l'autre. De ce fait il a également du mal à démarrer tout seul. Il faut prévoir un dispositif supplémentaire qui lui permettra de démarrer tout seul dans un sens déterminé. Il s'agit souvent d'un enroulement ou de spires auxiliaires.

Exemple : moteur à spires de Frager.



### 9. Utilisation du moteur asynchrone

Le moteur asynchrone triphasé, dont la puissance varie de quelques centaines de watts à plusieurs mégawatts est le plus utilisé de tous les moteurs électriques. Son rapport coût/puissance est le plus faible.

Associés à des onduleurs de tension, les moteurs asynchrones de forte puissance peuvent fonctionner à vitesse variable dans un large domaine (les derniers TGV, le Tram de Strasbourg, ...).

Toutefois l'emploi de ce type de moteur est évité en très forte puissance ( $P > 10 \text{ MW}$ ) car la consommation de puissance réactive est alors un handicap.

**Remarques :** en électroménager (exemple : lave-linge) la vitesse des moteurs asynchrones n'est pas réglée par un onduleur, mais ces moteurs possèdent plusieurs bobinages. Il est alors possible de changer le nombre de paires de pôles et donc la vitesse.

### 10. Réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone

La vitesse de synchronisme  $n_s$  dépend de la fréquence  $f_s$  des courants statoriques.

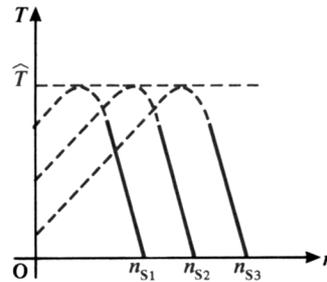
Et comme la vitesse  $n$  reste très proche de la vitesse de synchronisme, pour varier la vitesse du moteur il faut en fait varier la fréquence  $f_s$ .

En réalité pour faire varier la vitesse sans modifier le couple utile il faut garder le rapport  $\frac{V_s}{f_s}$

constant ( $V_s$  est la tension d'alimentation d'un enroulement).

Si on augmente la vitesse, il faut augmenter la fréquence et la tension d'alimentation dans les limites du bon fonctionnement de la machine.

On obtient le réseau de caractéristiques. La zone utile est l'ensemble des segments de droites parallèles. Sur le plan technique, cela permet un très bon réglage de la vitesse.



Un moteur asynchrone pouvant fonctionner sous 220V / 50Hz n'est pas sous-alimenté si, à l'aide d'un onduleur, on ne lui applique qu'une tension de 110V à 25Hz. Il peut ainsi développer, à vitesse réduite, le même couple maximal que celui qu'il peut fournir à vitesse élevée.

### 11. Réversibilité

Toutes les machines tournantes sont réversibles. Dans le cas de la machine asynchrone, étant donné que son rotor n'est pas excité, elle ne peut être autonome. Mais elle est réversible dans le sens où elle peut fournir de la puissance au réseau en fonctionnant en charge.

### 12. Vocabulaire

asynchrone  
 champ tournant  
 synchrone  
 cage d'écureuil  
 rotor bobiné

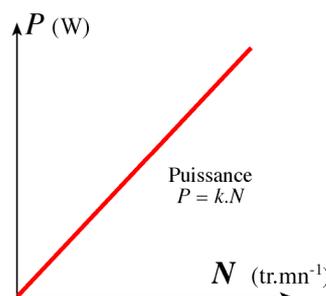
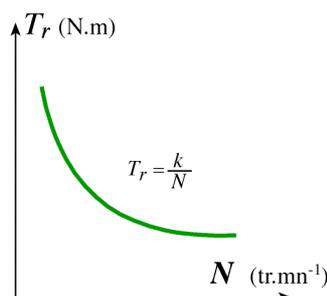
courants induits  
 glissement  
 courant réactif ou magnétisant  
 démarrage étoile - triangle  
 démarrage statorique

démarrage rotorique  
 puissance transmise  
 puissance mécanique totale  
 pertes constantes

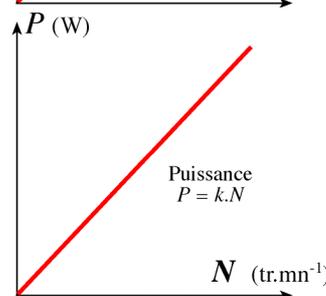
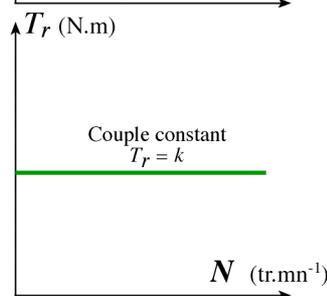
### 13. Complément : caractéristiques $T=f(n)$ de quelques charges

Le démarrage d'un système (charge) par un moteur ne peut avoir lieu que si à chaque instant le couple moteur est supérieur au couple résistant plus l'inertie du système.

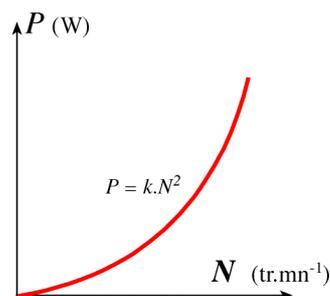
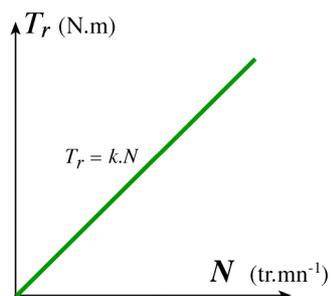
Machine à puissance constante (enrouleuse, compresseur, essoreuse)



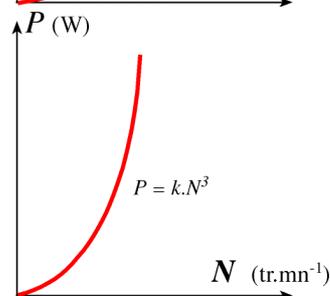
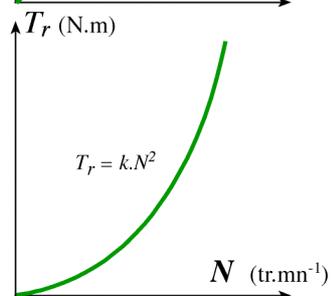
Machine à couple constant (levage, pompe)



Machine à couple proportionnel à la vitesse (pompe volumétrique, mélangeur)



Machine à couple proportionnel au carré de la vitesse (ventilateur)



#### 14. Bibliographie et origine de certaines illustrations

Physique Appliquée, terminale électrotechnique - collection R. Mérat et R. Moreau - édition Nathan technique 1994.

Electrosystème, première STI - H. Ney - édition Nathan technique 1996.

Physique appliquée, terminale génie électrotechnique - Delva, Leclercq, Trannoy - édition Hachette éducation 1994.