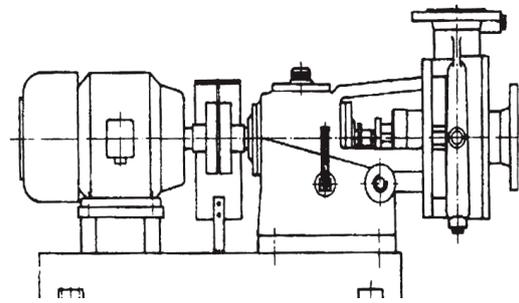


# Commande électrique des mécanismes industriels

*Polycopié*



GHLAM Karima

# Table des matières



<b>Objectifs</b>	4
<b>Introduction</b>	5
<b>I - pré-requis</b>	7
<b>II - Exercice</b>	8
<b>III - Exercice</b>	9
<b>IV - Les applications et charges mécaniques</b>	10
1. L'inertie .....	10
2. Mise en mouvement des masses .....	11
3. Mécanismes de transmission du mouvement .....	12
3.1. Les mécanismes de transmission du mouvement de rotation .....	13
3.2. Les mécanismes de transformation du mouvement de rotation en mouvement de translation .....	14
4. La notion de quadrants .....	16
5. Quatre quadrant .....	16
5.1. Quadrant 1 .....	18
5.2. Quadrant 2 .....	18
5.3. Quadrant 3 .....	18
5.4. Quadrant 4 .....	19
6. Les types des applications et charges mécaniques .....	19
6.1. Charges à couple constant .....	19
6.2. Charges à couple linéaire (proportionnel à la vitesse) .....	20
6.3. Charges à couple quadratique .....	20
6.4. Charges à puissance constante .....	21
7. série de TD .....	21
8. Exercice .....	22
9. Exercice .....	23
10. Exercice .....	24
<b>V - Test final</b>	26
1. Exercice .....	26
2. Exercice .....	26

3. Exercice ..... 26

4. Exercice ..... 26

5. Exercice ..... 26

6. Exercice ..... 27

7. Exercice ..... 27

8. Exercice ..... 27

9. Exercice ..... 27

# Objectifs



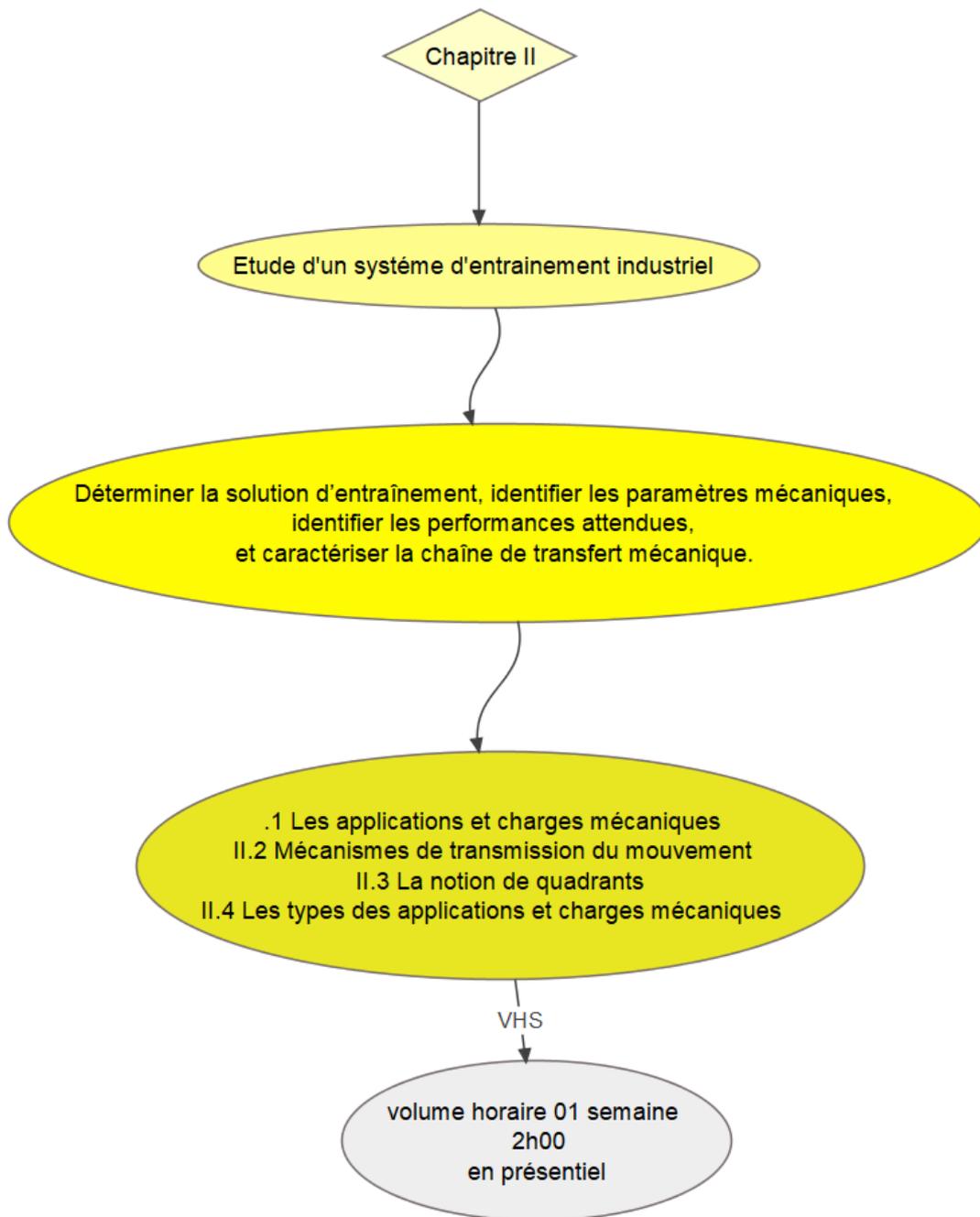
Déterminer la solution d'entraînement, identifier les paramètres mécaniques, identifier les performances attendues, et caractériser la chaîne de transfert mécanique.

# Introduction



Un système d'entraînement électrique se compose en principe du moteur électrique et de la machine productrice; selon la tâche à accomplir, il peut être complété par un engrenage mécanique et un convertisseur. En fonction des exigences requises par le processus de travail, à savoir par exemple la capacité de commande ou de régulation et la précision des grandeurs réglées, il sera nécessaire de prévoir un système de traitement de l'information.<sup>1</sup>





[cf. La quatrième révolution industrielle. L'Industrie 4.0.]

# pré-requis



- L'étudiant est en mesure de définir simplement un entraînement électrique
- sait énumérer des exemples d'utilisation
- sait démontrer l'effet des différents éléments sur le rendement global de la chaîne
- connaît les caractéristiques d'une commande optimale au plan énergétique  
sait interpréter les indications figurant sur les plaquettes signalétiques des moteurs, pompes et ventilateurs,.....

# Exercice



De quoi est composé un système d'entraînement ?

# Exercice

Donner des exemples de systèmes d'entraînement.



# Les applications et charges mécaniques

IV

L'inertie	10
Mise en mouvement des masses	11
Mécanismes de transmission du mouvement	12
La notion de quadrants	16
Quatre quadrant	16
Les types des applications et charges mécaniques	19
série de TD	21
Exercice	22
Exercice	23
Exercice	24

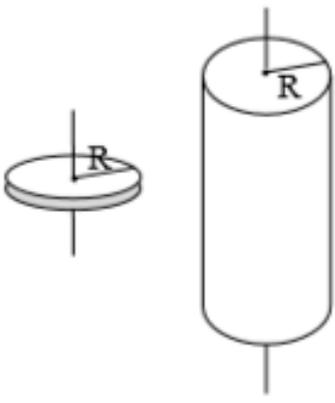
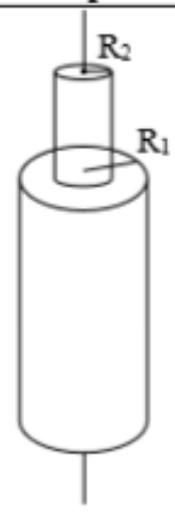
L'application : broyage, laminage, ventilation..., est l'action sur le produit à traiter. Les contraintes mécaniques de la charge se traduisent par des réactions sur le moteur et donc sur le réseau d'alimentation, par exemple : la variation de couple de la charge entraîne une variation du courant moteur, l'inertie du moteur et l'inertie de la charge influent sur le temps de démarrage, la vitesse de rotation de la charge peut nécessiter une adaptation de la vitesse du moteur,

L'application concernée est souvent incluse dans un procédé global. Les procédés sont caractérisés par des critères de performance : rapidité d'exécution, répétitivité des cycles, précision. Satisfaire ces critères est dimensionnant pour le moteur et son système d'entraînement. Pour déterminer la solution d'entraînement, il faut : identifier les paramètres mécaniques, identifier les performances attendues, et caractériser la chaîne de transfert mécanique<sup>4</sup>.

## 1. L'inertie

Elle est d'autant plus importante que la masse de la charge est grande et s'oppose à la mise en mouvement. Elle est caractérisée par le moment d'inertie  $J$ , qui s'exprime en  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ .

Le tableau ci-dessous montre les moments d'inerties de quelques solides (ou  $M$  est la masse en  $\text{kg}$ ,  $R$  le rayon en  $\text{m}$  et  $J$  moment d'inertie en  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ).

Poulie ou Cylindre homogène	Cylindre creux	Arbre épaulé
		
$J = \frac{1}{2} MR^2$	$J = \frac{1}{2} M(R_1^2 + R_2^2)$	$J = \frac{1}{2} M_1 R_1^2 + \frac{1}{2} M_2 R_2^2$

## 2. Mise en mouvement des masses

Le couple moteur doit vaincre le couple résistant et mettre en mouvement des masses possédant une inertie. La condition d'entraînement résulte de l'application de la loi fondamentale de la dynamique s'écrit :

$$C_m = C_r + J \frac{d\Omega}{dt}$$

$C_m$  : Couple moteur

$C_r$  : Couple résistant

$J \frac{d\Omega}{dt}$  : Couple d'inertie ou couple d'accélération ou de décélération

$J$  : Moment d'inertie total ramené à l'arbre du moteur (supposé constant).

Le couple d'inertie produit par l'accélération/décélération lorsque la vitesse du moteur change de  $\Delta n$  [tr/min] en  $\Delta t$  [s] est :

$$C_m - C_r = J \frac{\Delta\Omega}{\Delta t} = J \frac{2\pi}{60} \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

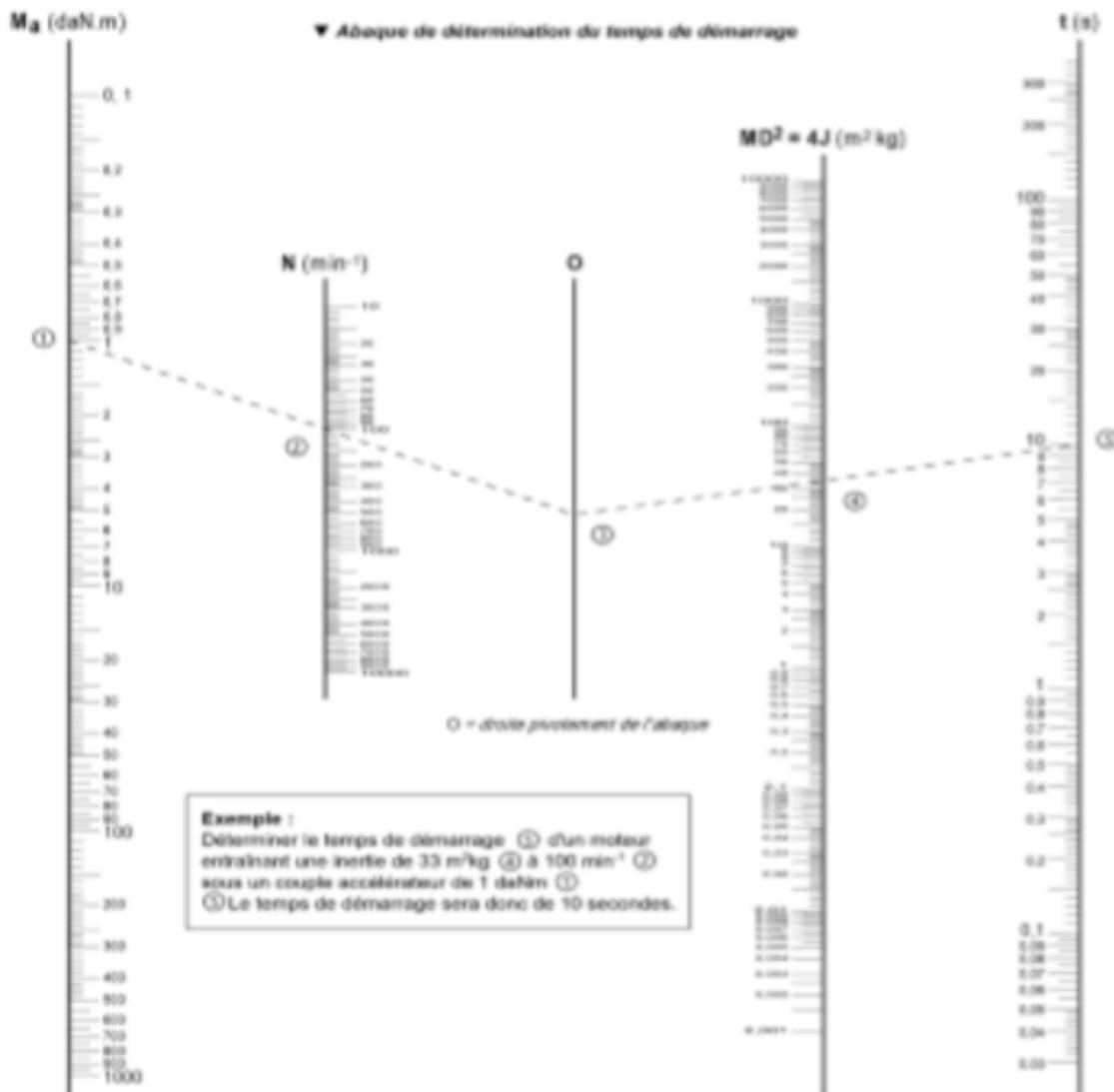
Au démarrage ce couple est un couple d'accélération, la relation(2) devient

$$C_a = J \frac{d\Omega}{dt} = C_{\dot{\Omega}} - C_r$$

Il est défini comme étant le couple moyen développé par le moteur durant la phase de démarrage diminué du couple résistant moyen pendant la même période. Le temps de démarrage est déterminé par la relation suivante :

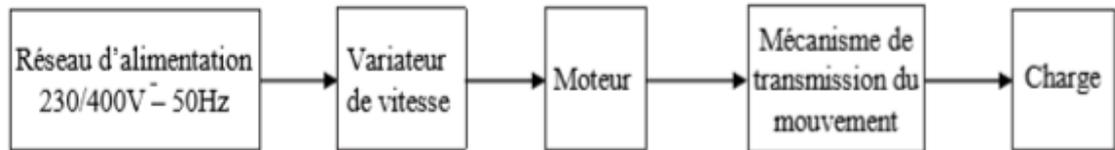
$$t_d = J \cdot \pi / 30 \cdot n / C_a$$

Il est aussi déterminé par l'abaque figure I.1 ( $MD2 = 4J$ ) avec  $J$  le moment d'inertie total ramené à l'arbre du moteur).



### 3. Mécanismes de transmission du mouvement

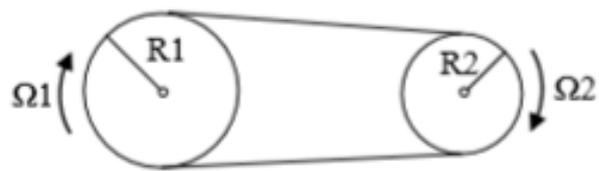
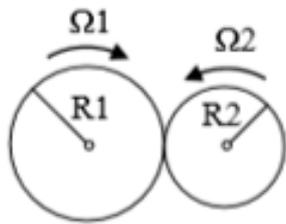
Un mécanisme de transmission du mouvement est généralement représenté sous la forme d'un schéma-bloc. Il faut réaliser l'étude de la chaîne de puissance dans le but de connaître la puissance transmise par chaque étage du mécanisme ainsi qu'à ses entrées et ses sorties. En effet, à partir de la détermination de la puissance sous la forme d'une vitesse de rotation et d'un couple (ou d'une vitesse de translation et d'une force), il est possible de déterminer les efforts mis en jeu en différents points du système. Un moteur asynchrone est le plus souvent connecté au réseau d'alimentation par l'intermédiaire d'un variateur de vitesse. Alors que son axe est le plus souvent relié à la charge par l'intermédiaire d'un mécanisme de transmission de mouvement. Si le variateur de vitesse et le mécanisme de transmission de mouvement sont tous les deux réversibles, la chaîne de transfert d'énergie est totalement réversible.



### 3.1. Les mécanismes de transmission du mouvement de rotation

Ces mécanismes sont classés en deux catégories3 ;

- Systèmes dentés : sont formée de trains d'engrenages, roue-vis sans fin et les courroies
- Systèmes non dentés : la transmission du mouvement se fait, soit par friction (utilisation des roues), soit par courroies (utilisation des roues reliées par courroie),



A l'entrée du réducteur (arbre du moteur)	A la sortie du réducteur (arbre de la charge)
$n_1$ : vitesse de rotation du moteur	$n_2$ : vitesse de rotation de la charge
$\Omega_1$ : vitesse angulaire du moteur	$\Omega_2$ : vitesse angulaire de la charge
$C_1$ : couple moteur	$C_2$ : couple de la charge
$P_1$ : puissance du moteur	$P_2$ : puissance de la charge
$J_1$ : Moment d'inertie (moteur + réducteur)	$J_2$ : Moment d'inertie (réducteur + moteur)

Connaissant les grandeurs mécaniques du système d'entraînement, on peut calculer les caractéristiques suivantes :  $i = \Omega_1 / \Omega_2 = n_1 / n_2$  On a souvent  $i > 1$

#### 3.1.1. Rendement du réducteur

Rendement du réducteur : C'est le rapport entre la puissance de sortie et la puissance d'entrée.

$$\eta = P_1 / P_2 = (C_1 \Omega_2) / (C_2 \Omega_1)$$

#### 3.1.2. Grandeurs mécaniques ramenées à l'arbre du moteur

Pour le dimensionnement du moteur, le moment d'inertie de la charge et son couple résistant doivent être toujours ramenés à son arbre.

### a) Moment d'inertie

L'énergie cinétique du mouvement de rotation de la charge est :

$$E_c = 1/2 J_2 (\Omega_2^2) / i^2$$

D'où le moment d'inertie de la charge ramené à la roue 1

$$J_2 = J_2 / i^2$$

### b) Couple

En régime permanent, on a :

$$C_1 \Omega_1 = (C_2 \Omega_2) / \eta, \Omega_2 = \Omega_1 / i \text{ d'où } C_1 \Omega_1 = (C_2 \Omega_1) / (\eta \cdot i)$$

Donc le couple résistant de la charge ramené à l'arbre du moteur

$$c_2 = C_2 / (\eta \cdot i)$$

### c) Le couple d'inertie de la charge en régime transitoire

En régime transitoire le couple d'inertie de la charge est

$$c_{i2} = j_2 (d\Omega_2) / dt$$

en appliquant la relation précédente, le couple d'inertie ramené à l'arbre du moteur est comme suit

$$C_{ir} = j_2 / \eta i * d\Omega_2 / dt$$

et d'après la relation du rapport de réduction.

$$C_{ir} = j_2 / (\eta i^2) * d\Omega_1 / dt$$

d'où

$$C_{ir} = (j_2') / \eta * d\Omega_1 / dt$$

D'où l'équation mécanique en régime transitoire

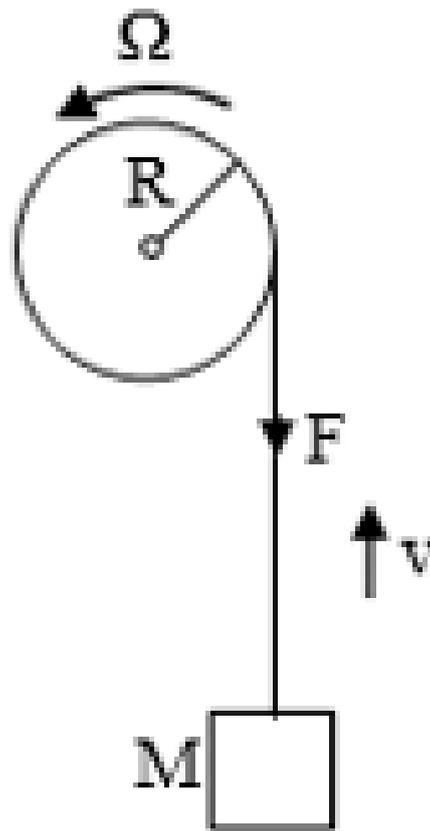
$$(J_1 + (j_2') / \eta) * (d\Omega_1 / dt) = C_1 - C_2 / (\eta \cdot i)$$

## 3.2. Les mécanismes de transformation du mouvement de rotation en mouvement de translation

On cite parmi ces mécanismes les systèmes de poulies et palans, vis-écrou et pignon-crémaillère.

La poulie : C'est le système le plus simple. Il se compose d'une poulie de rayon R qui en tournant à une vitesse  $\Omega$ , fait déplacer en translation une charge de masse M à une vitesse V. La relation de transformation des vitesses est

$$\Omega = V / R$$



### 3.2.1. Rendement de la poulie

Rendement de la poulie : C'est le rapport entre la puissance de sortie et la puissance d'entrée

$$\eta = P_2 / P_1 = Fv / C\Omega$$

### 3.2.2. Grandeurs mécaniques ramenées à l'arbre de la poulie

#### a) Moment d'inertie

L'énergie cinétique du mouvement de translation de la charge est :

$$E_c = 1/2 MV^2 = 1/2 MR^2 \Omega^2$$

D'où le moment d'inertie de la charge ramené à l'arbre de la poulie

$$J = MR^2$$

#### b) Couple

d'après math-17 on a

$$C\Omega = FV / \eta = FR / \eta \Omega$$

d'où le couple résistant de la charge ramené à l'arbre de la poulie :

$$C = FR / \eta$$

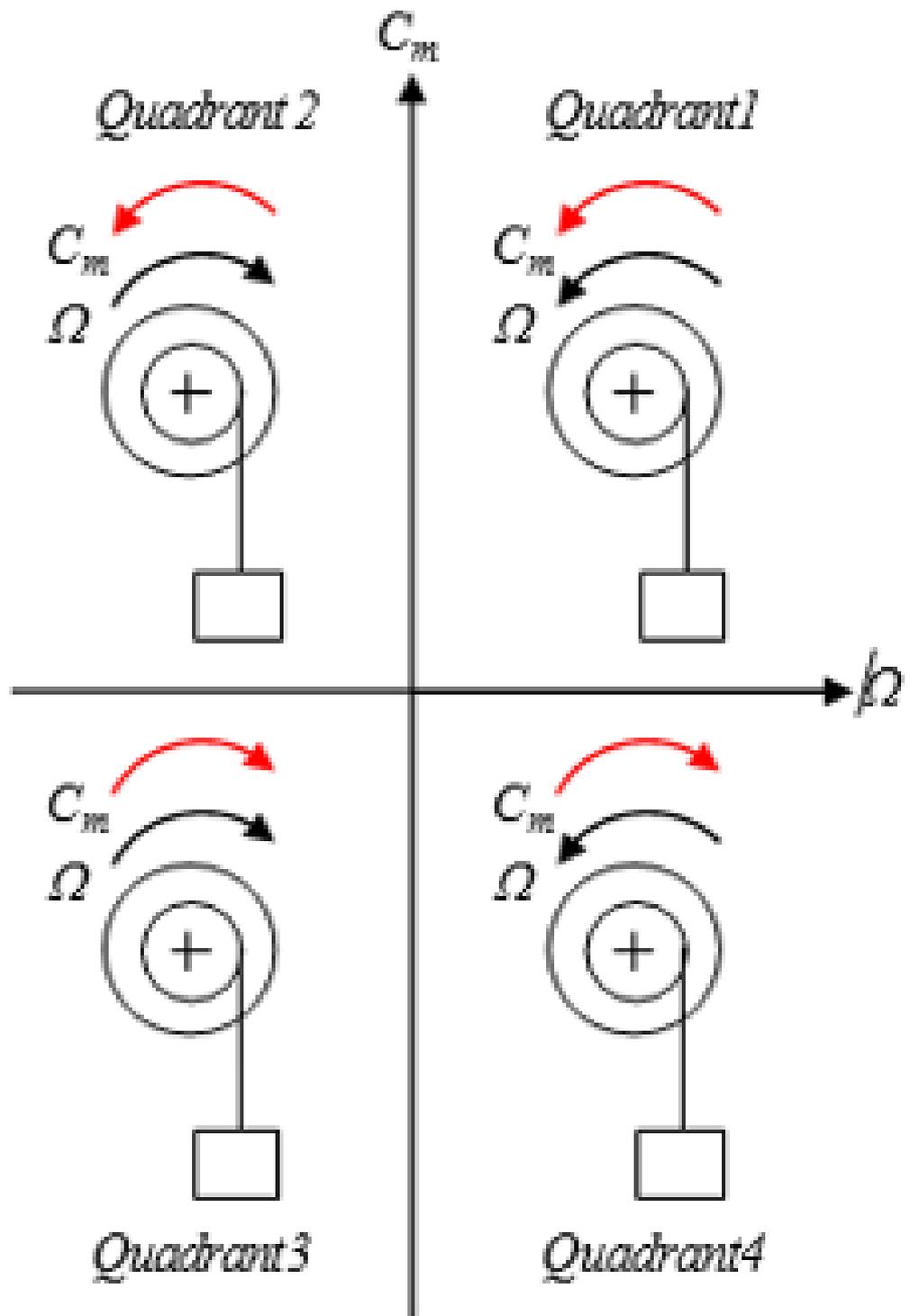
## 4. La notion de quadrants

La notion de quadrant permet d'identifier le mode de fonctionnement de la charge. Elle est représentée dans le repère couple-vitesse du schéma ci-contre. Elle permet, entre autres, de différencier les charges résistantes (qui s'opposent au mouvement) et les charges entraînant (qui favorisent

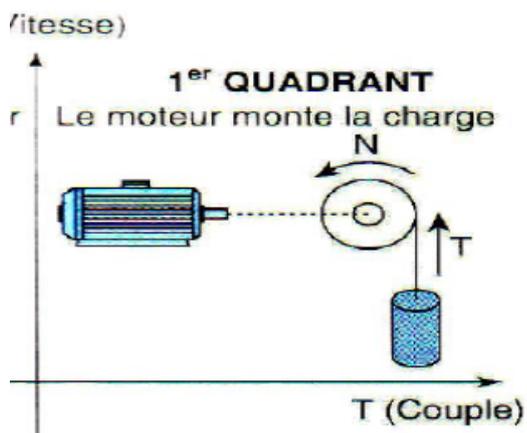
le mouvement). Le fonctionnement dans les 4 quadrants est requis pour les applications avec récupération d'énergie.

## 5. Quatre quadrant

Généralement, un mécanisme a besoin de 2 mouvements de sens opposés, obtenus par inversion du sens de marche du moteur d'entraînement. De plus, il est souvent nécessaire d'obtenir un temps d'arrêt du mouvement plus court que celui obtenu naturellement, ce qui nécessite un couple de freinage. Il existe donc, pour un moteur accouplé à une charge, quatre zones de fonctionnement ou quadrants de fonctionnement :

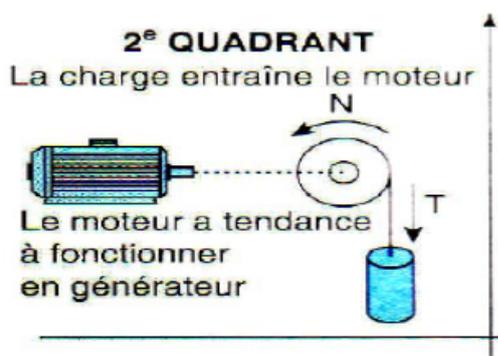


### 5.1. Quadrant 1



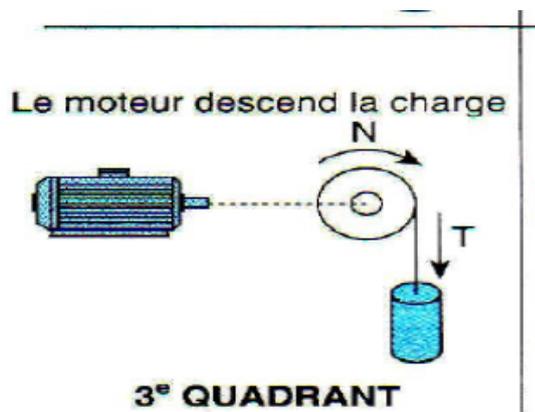
fonctionnement moteur en marche avant. (Le moteur entraîne la charge à la montée)

### 5.2. Quadrant 2



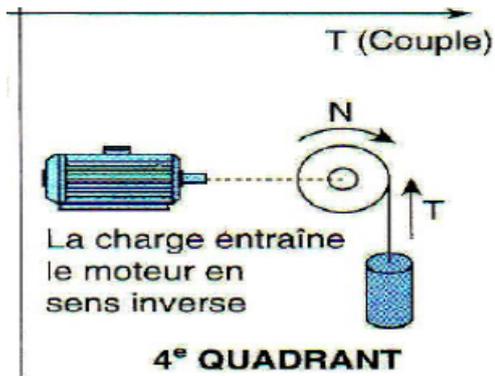
fonctionnement en générateur en marche arrière. (Le moteur freine la charge à la descente)

### 5.3. Quadrant 3



fonctionnement moteur en marche arrière. (Le moteur entraîne la charge à la descente)

## 5.4. Quadrant 4



fonctionnement générateur en marche avant. (Le moteur freine la charge à la montée)

Les divers fonctionnements sont donc caractérisés par :

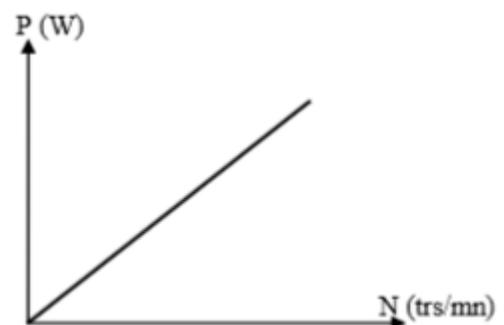
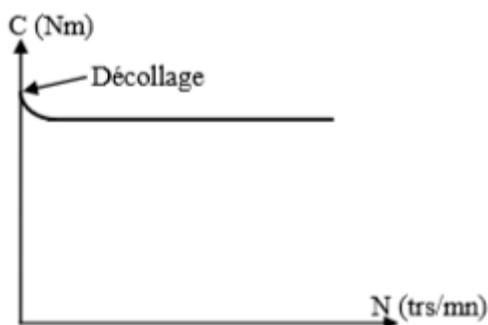
- une marche en moteur dans les quadrants 1 et 3 :  $C_m$  et  $\Omega$  de mêmes signes où la charge est résistante, la puissance électrique est transformée en puissance mécanique fournie à la charge.
- une marche en freinage dans les quadrants 2 et 4 :  $C_m$  et  $\Omega$  de signes contraires où la charge est entraînante, la puissance mécanique est fournie par la charge, le moteur se comporte en frein convertissant la puissance mécanique en puissance électrique qui sera soit renvoyée vers le réseau (récupération) soit dissipée dans des résistances

## 6. Les types des applications et charges mécaniques

Les couples résistants des machines à entraîner par les moteurs asynchrones sont classés en 4 catégories

### 6.1. Charges à couple constant

Le couple de la machine entraînée résulte essentiellement du frottement mécanique qui reste constant dans une vaste plage de vitesses, alors que la puissance varie linéairement. Un sur couple se présente lors du démarrage (décollage)



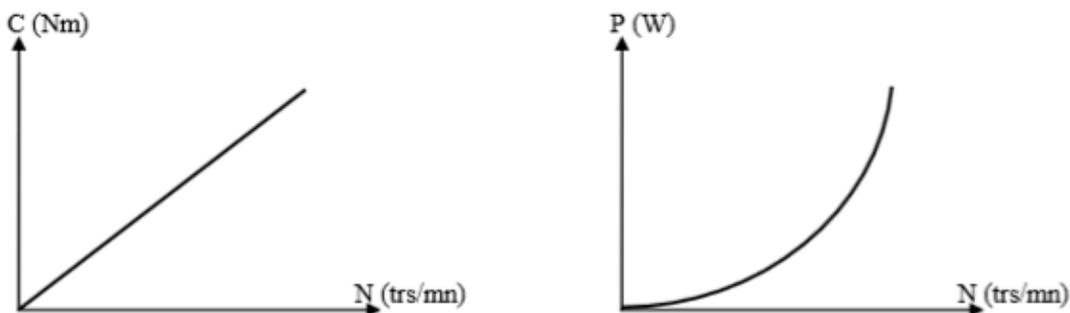
### Exemple

---

mécanismes de levage, ascenseurs, élévateurs, ponts roulants, treuils... - machines-outils à force de coupe constante- bandes transporteuses horizontales. - pompes à pistons et compresseurs à pression constante. - laminoirs ou broyeurs à rouleaux. - cisailles et poinçons. - Presses mécaniques. - fours.

## 6.2. Charges à couple linéaire (proportionnel à la vitesse)

Le couple de la machine entraînée est dû essentiellement au frottement visqueux se présentant au cours du laminage et du Traitement de papier, de textiles ou de carreaux en caoutchouc. Dans ce cas, le couple est proportionnel à la vitesse, alors que la puissance est proportionnelle au carré de la vitesse. La machine présente un faible couple au démarrage.



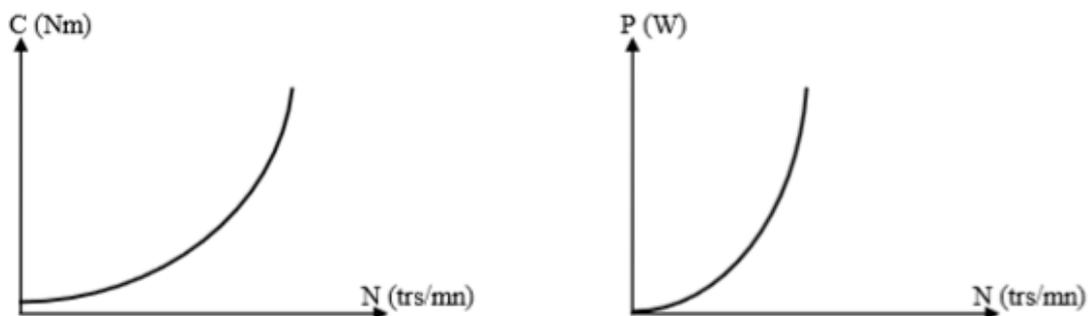
### Exemple

---

calandres, extrudeuses (boudineuses). - satinage du papier, mélangeurs, Convoyeurs à vis d'Archimède.

## 6.3. Charges à couple quadratique

Le couple de la machine entraînée se présente surtout en cas de frottement de gaz ou de liquides. Dans ce cas, le couple est proportionnel au carré de la vitesse, alors que la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse. La machine présente un faible couple à basses vitesses.



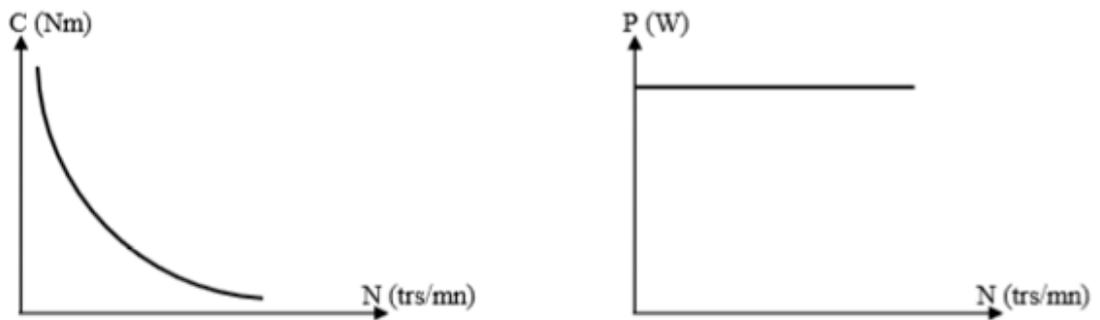
### Exemple

---

ventilateurs de tous les types. - compresseurs. - pompes centrifuges. - agitateurs, centrifugeuses.

## 6.4. Charges à puissance constante

Le couple de la machine entraînée diminue au fur et à mesure que la vitesse augmente. Il est inversement proportionnel au carré de la vitesse, alors que la puissance est constante. La machine présente un couple fort à basses vitesses.



### Exemple

---

essoreuses. - machines-outils. - malaxeurs. - enrouleuses, dérouleuses, bobineuses.

## 7. série de TD

### Exercice

---

Calculer le couple d'accélération d'un moteur devant entraîner un système avec volant d'inertie.

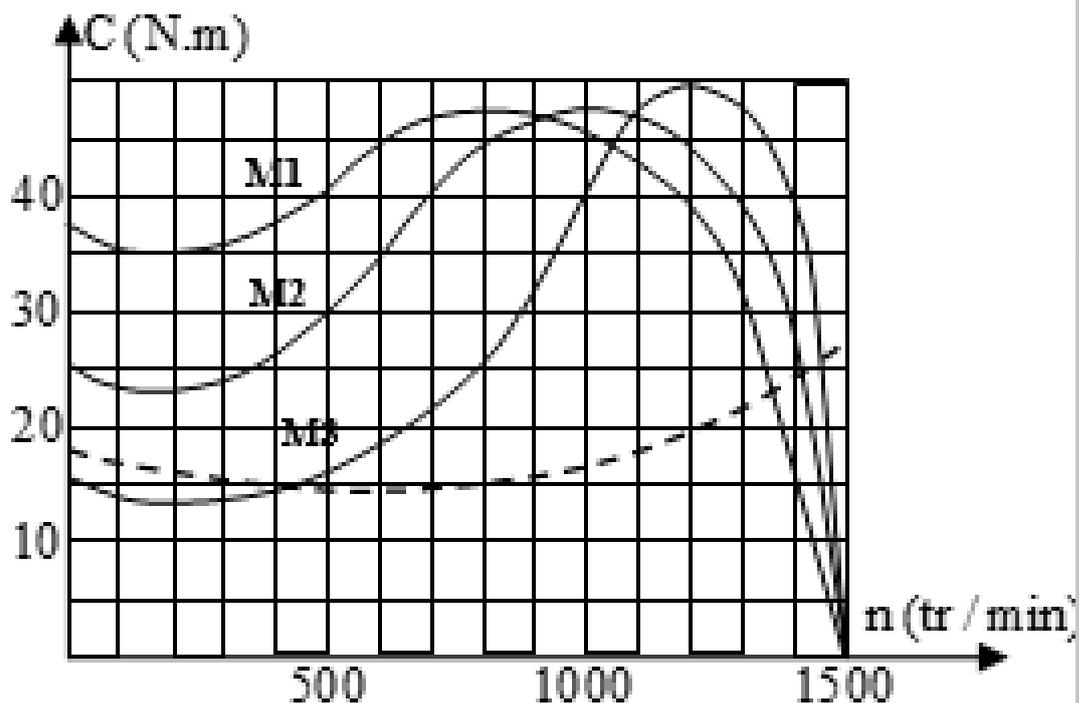
$J = 7,65 \text{ kg.m}^2$  (moteur compris),  $N$  de 0 à 900 tr.min<sup>-1</sup> en 12 s.

### Exercice

---

Un cylindre est une forme courante de charge (Rouleaux, tambours, accouplements, Ets.) Quelle est l'inertie d'un cylindre en rotation (masse = 1600kg, rayon = 0,7m)?

## 8. Exercice



Pour avoir une température homogène dans un four, destiné au traitement thermique des pièces, on utilise un ventilateur dont la caractéristique  $C_r = f(n)$  est représentée en pointillés.

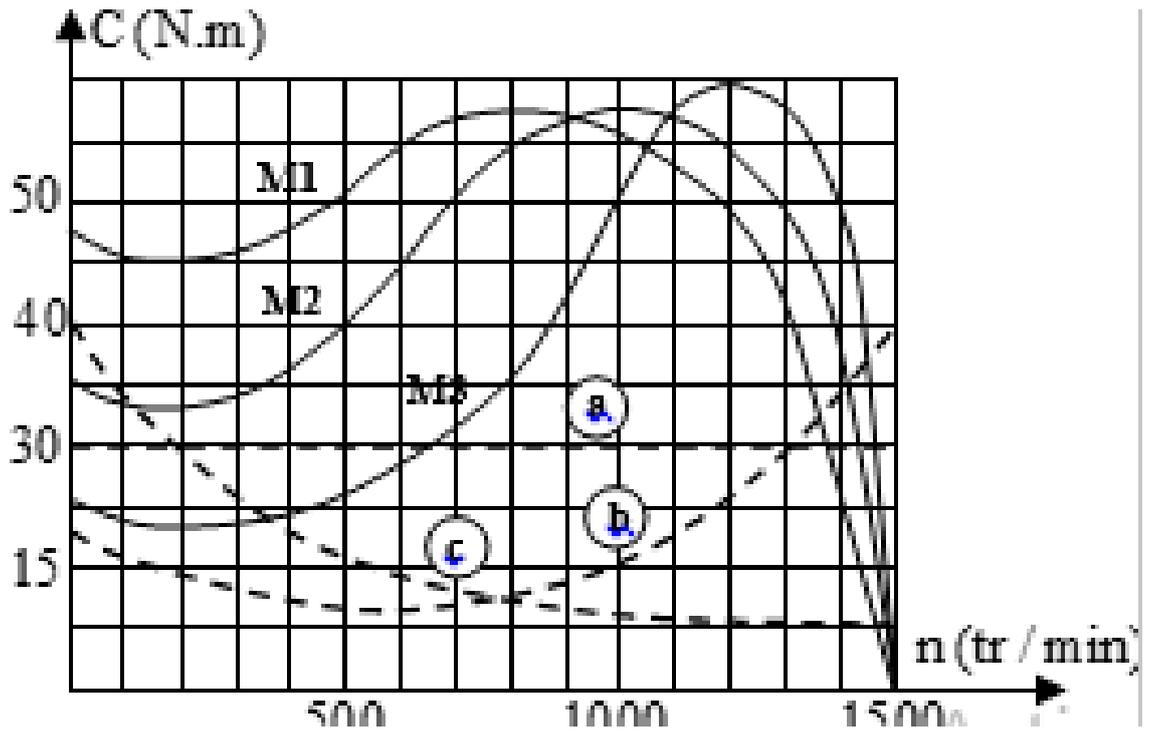
On dispose de trois moteurs asynchrones triphasés à cage M1, M2 et M3. Leurs caractéristiques  $C_m = f(n)$  sont représentées en traits pleins.

Choisir le type de moteur le mieux adapté à cette application.

Justifier votre choix.

- M1
- M2
- M3

9.



Les caractéristiques  $C_r = f(n)$  ; (a) ; (b) et (c) représentées en pointillés sont respectivement celles des machines suivantes :

un monte-charge, un ventilateur et une dérouleuse. On dispose de trois moteurs asynchrones triphasés à cage M1, M2 et M3 dont les caractéristiques  $C_m = f(n)$  représentées en traits pleins.

Question

Choisir le moteur qui convient à chaque machine.

Indice :

M1 M2 M3

## 10. Exercice

Calculer le temps de démarrage d'un moteur entraînant un compresseur :

$P_n = 11 \text{ kW}$ ,  $N = 1450 \text{ tr.min}^{-1}$

$T_d = 1,6 T_n$ ,  $T_r = 0,75 T_n$

$J_{\text{total}} = 2,7 \text{ kg.m}^2$

## 11. Exercice

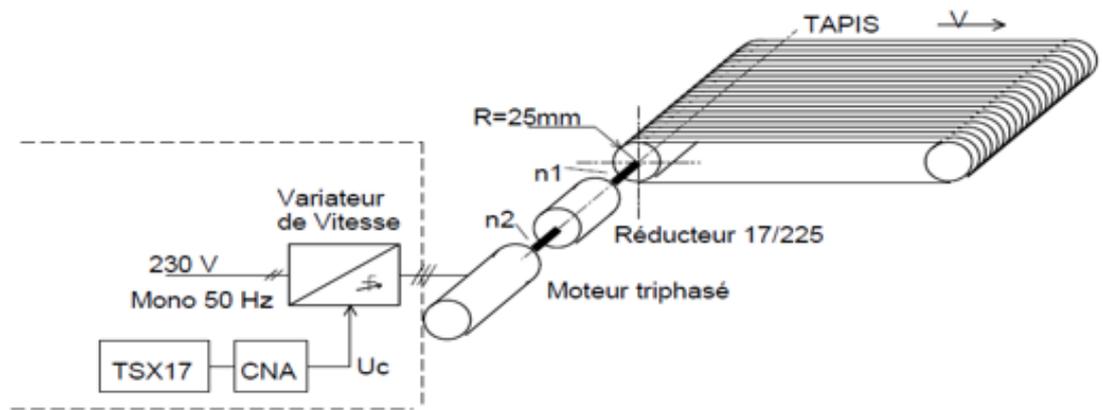
Soit une machine automatique à fabriquer les yaourts.  $J = 3,25 \text{ kg.m}^2$   $N = 2950 \text{ tr.min}^{-1}$ ,  $Tr = 55 \text{ N.m}$

Fixation du moteur par flasque-bride. Réseau 230/400 V triphasé 50Hz

- $U_{\text{max}} = 8\%$  (transformateur privé)
- $amb_{\text{max}} = 40^\circ\text{C}$  Altitude = 250m moteur à l'intérieur
- Calculer la puissance
- Choisir le moteur
- Calculer le temps de démarrage

12.

## ETUDE DE L'ENTRAINEMENT D'UN TAPIS



$V$  : vitesse linéaire du tapis en m/min

$n_1$  : vitesse de sortie du réducteur de vitesse en tr/min

$n_2$  : vitesse de l'arbre du moteur en tr/min

Question 1

Établir la relation  $n_1 = f(V)$

Question 2

Calculer  $n_1$  pour  $V = 10$  m/min

Question 3

Établir la relation  $n_2 = f(V)$

Question 4

Calculer  $n_2$  pour  $V = 10$  m/min

# Test final

V

Exercice	26
Exercice	27

## 1. Exercice

Les moteurs électriques sont de nos jours, les récepteurs les plus nombreux dans les industries et les installations tertiaires.

1- Cité les critères de choix d'un moteur synchrone.

## 2. Exercice

- Pour qu'elle raison on choisir le moteur à courant continu.

## 3. Exercice

Donner la définition de l'inertie

## 4. Exercice

Donner la définition du couple d'une machine :

## 5. Exercice

citez les quadrant de fonctionnement de la charge.

## 6. Exercice

citez les types des applications et charges mécaniques

## 7. Exercice

- Donner des exemples de machines de levage

## 8. Exercice

- Dans quels quadrants peuvent fonctionner les machines de levage.

## 9. Exercice

- A la montée, dans quel quadrant se trouve l'ascenseur ?