Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

Chapitre 9 : Conversion électromécanique

ADC

I. Introduction

La conversion électromécanique transforme l'énergie électrique en énergie mécanique et vice-versa. Cette technologie est essentielle dans divers appareils comme les moteurs électriques, les générateurs, et les transformateurs, jouant un rôle crucial dans l'industrialisation, les transports, et les systèmes énergétiques modernes pour améliorer l'efficacité et la fonctionnalité.

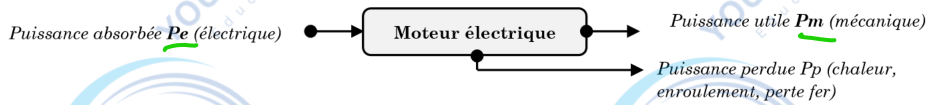


II. Conversion de l'énergie électromécanique

Un convertisseur électromagnétique, aussi appelé "machine tournante", transforme l'énergie électrique en énergie mécanique et inversement. Il peut fonctionner sous deux régimes distincts.

1. Fonctionnement Moteur

Lorsqu'une machine fonctionne en mode moteur, elle convertit l'énergie électrique entrante en énergie mécanique de rotation, comme illustré dans la figure ci-dessous :



➲ **Principe de conservation de l'énergie** peut s'énoncer de la manière suivante :

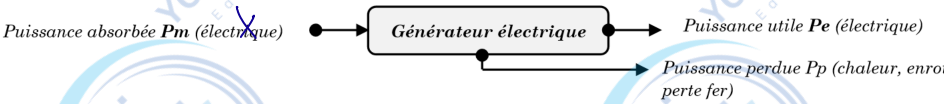
L'énergie totale reçue par un système est égale à la somme des énergies restituées par ce système :

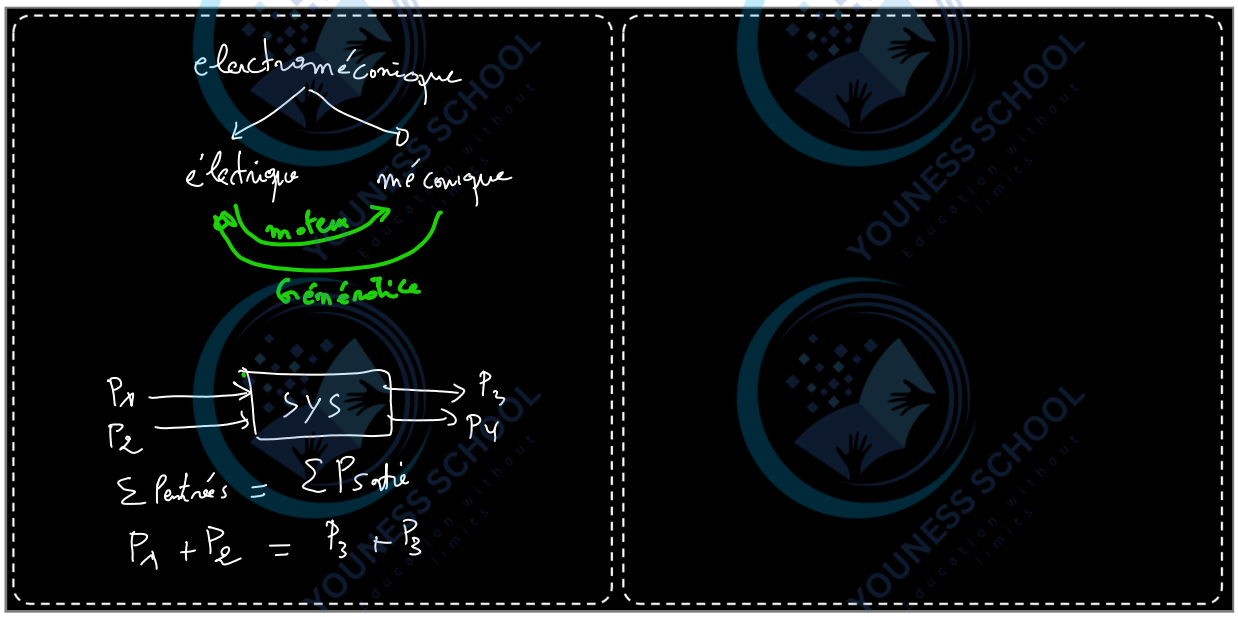
$P_e = P_m + P_p$

2. Fonctionnement Générateur

Lorsqu'une machine fonctionne en mode générateur, elle convertit l'énergie mécanique de rotation entrante en énergie électrique, comme illustré dans la figure ci-dessous

$P_m = P_e + P_p$





Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515
Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515
Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

3. Expression des puissances

- Puissance mécanique Pm : $P_m = C_m \cdot \Omega_m$ C_m [Nm], Ω_m (rad/s)
- Puissance électrique en régime continu : $P_e = U \cdot I$
- Puissance électrique en régime alternatif : 1φ $P_e = U \cdot I \cos\varphi$, 3φ $P_e = \sqrt{3}\, U \cdot I \cdot \cos\varphi$
- Puissance de perte dans les machines tournantes : $P_p = P_{fer} + P_j + P_{mec}$
- Rendement : $\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_m}{P_m + P_p}$

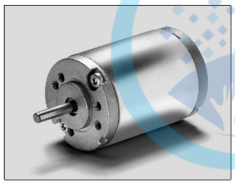
En réalité, les pertes dans les machines électriques sont généralement dues :

- Aux pertes ferromagnétiques P_{fer} (hystérésis PH et courant de Foucault PF). ⇒ C.M
- Aux pertes mécaniques P_{mec} : frottement aux contacts, ventilation
- Aux pertes cuivre par effet joule P_j dans les bobinages de la machine ⇒ R $P_j = R I^2$

Puissance perdue Pp s'exprime par : $\boldsymbol{Pp = Pfer + Pmec + Pj}$

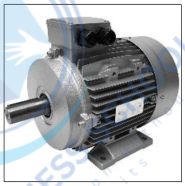
4. Réversibilité des machines électriques tournantes

Les machines électriques tournantes sont réversibles, pouvant fonctionner comme moteur ou générateur, Offrant ainsi une grande flexibilité et efficacité dans les systèmes électromécaniques. On distingue :



Machine à courant continu (MCC)

Réversible



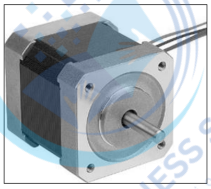
Machine asynchrone MAS

Réversible



Machine synchrone MS

Réversible



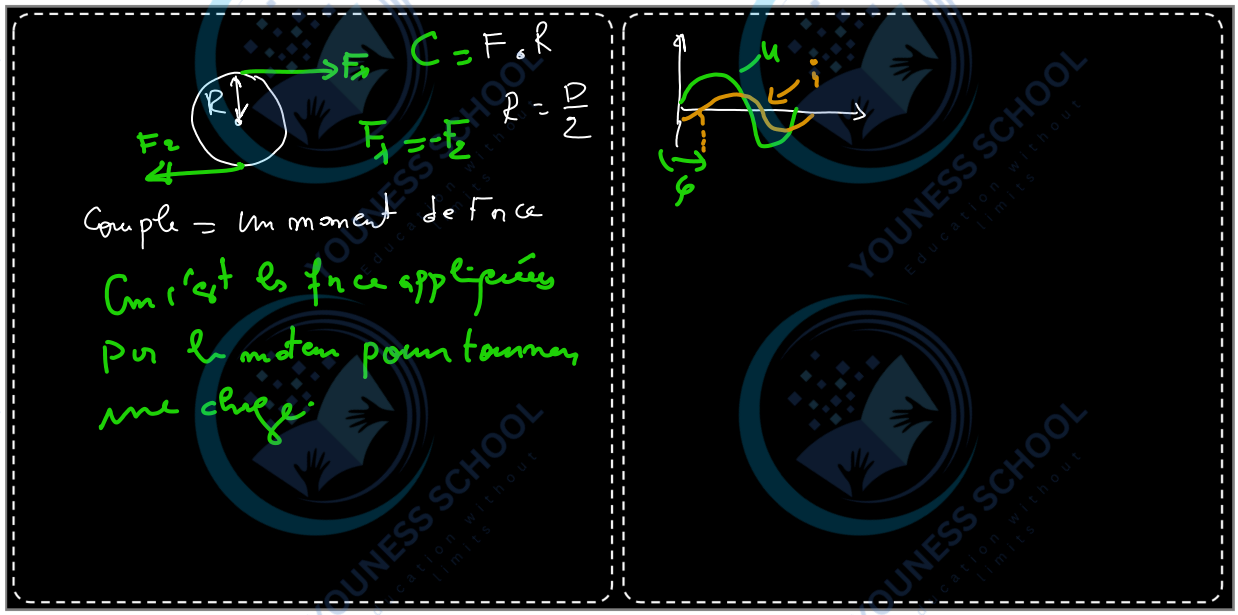
Machine pas à pas

non réversible



Servomoteur

non réversible

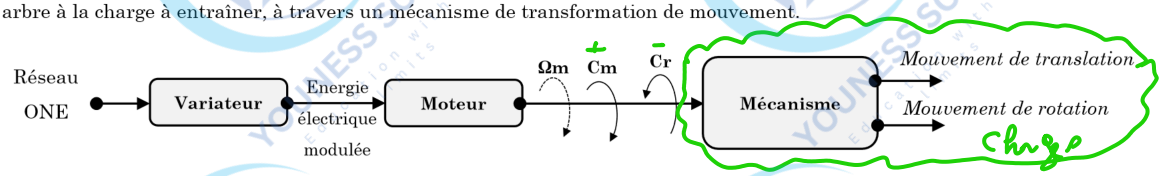


Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515
Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515
Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

III. Chaine de conversion d'énergie électromécanique

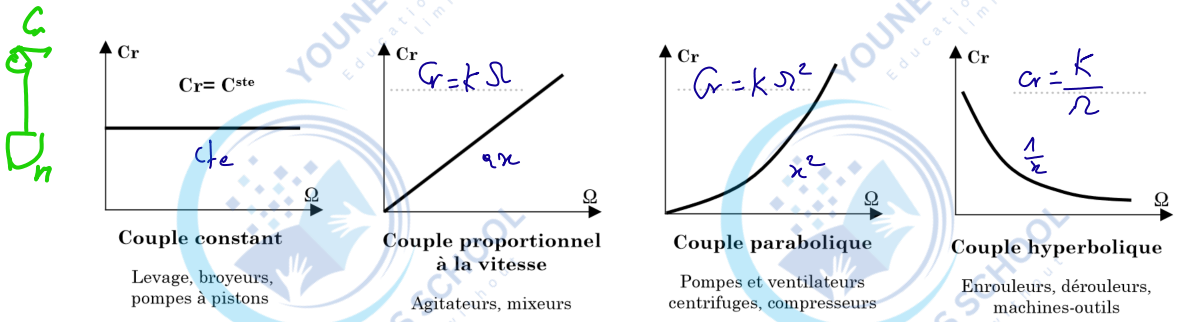
L'énergie électrique (alternative ou continue) est acheminée à un convertisseur de puissance (variateur), qui module l'énergie fournie au moteur d'entraînement. Ce moteur transforme l'énergie électrique en énergie mécanique, qu'il transmet via son arbre à la charge à entraîner, à travers un mécanisme de transformation de mouvement.



Cm : le couple moteur (couple utile) **Cr** : le couple résistant **Ωm :** la vitesse angulaire de moteur

1. Type de charges : Couple résistant Cr

La charge est la partie entraînée par la machine électrique, générant un couple résistant Cr qui s'oppose au mouvement de la machine. La caractéristique Cr = f(Ω) définit le type de charge à entraîner. On distingue essentiellement quatre familles de caractéristiques.



Couple constant
Levage, broyeurs, pompes à pistons

Couple proportionnel à la vitesse
Agitateurs, mixeurs

Couple parabolique
Pompes et ventilateurs centrifuges, compresseurs

Couple hyperbolique
Enrouleurs, dérouleurs, machines-outils

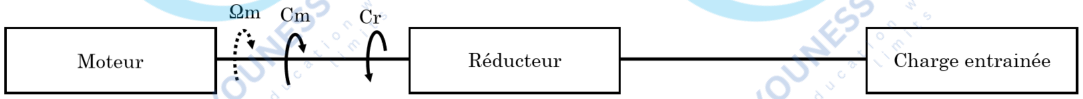
Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

2. Point de fonctionnement à l'équilibre

2.1. Principe Fondamental de la Dynamique (PFD)

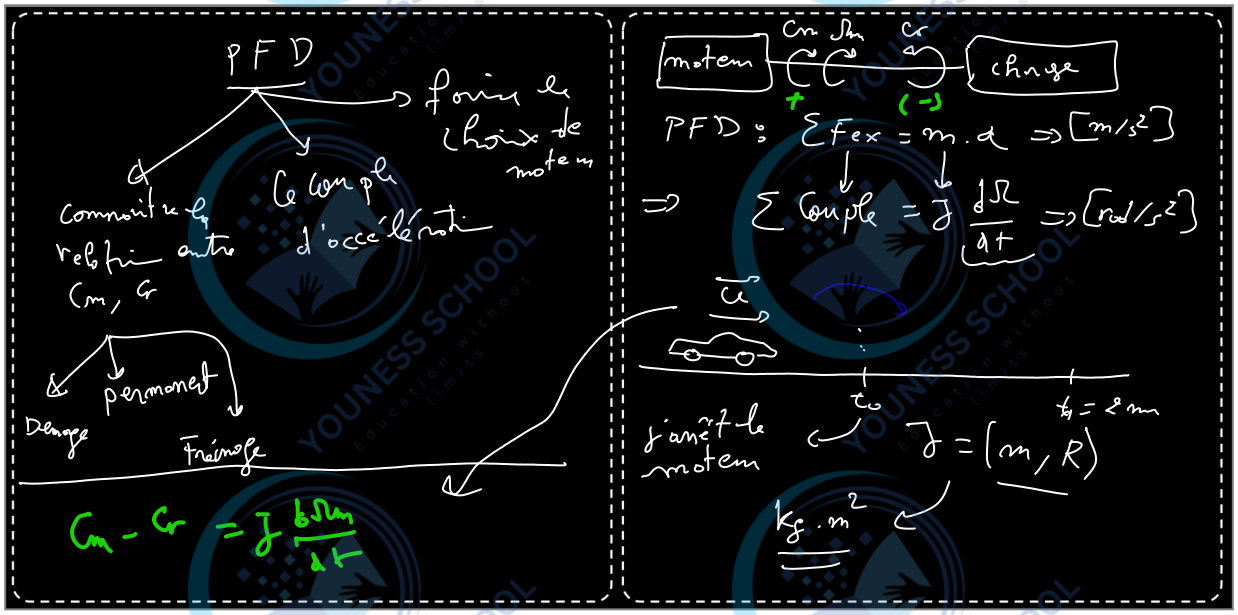
Dans la pratique une machine électrique fonctionnant en moteur est destinée à entraîner une charge (machinerie) en rotation.



L'arbre du moteur exerce un couple moteur Cm destiné à entraîner la charge. La charge présente un couple résistant Cr qui généralement s'oppose au couple moteur.

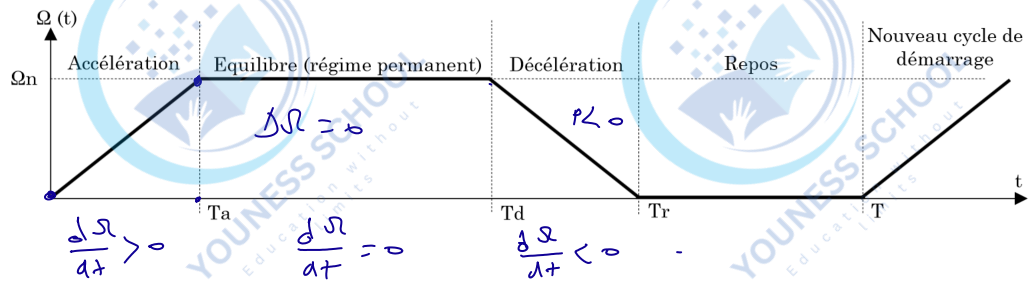
La loi fondamentale de la dynamique $(\Sigma \vec{F} = m.\vec{\gamma})$ se ramène lors d'un mouvement de rotation auteur d'un axe fixe à l'expression : $J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r$

J désigne le moment d'inertie de l'ensemble tournant (moteur + charge) et Ω la vitesse angulaire



2.2. Profil de vitesse : Démarrage, régime permanent (équilibre) et freinage

Les profils de vitesse de **type trapézoïdal** (le plus utilisé) sont utilisés pour le contrôle des moteurs afin d'assurer des accélérations et des décélérations douces, limiter les courants de démarrage (protection des bobinages), minimisant ainsi les chocs mécaniques et optimisant la performance et la durée de vie des systèmes motorisés.



Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r \Rightarrow C_m - C_r > 0 \Rightarrow C_m > C_r$

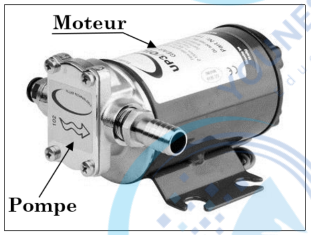
Accélération (régime transitoire)	Equilibre (régime permanent)	Décélération (régime transitoire)
• La variation de vitesse : $\frac{d\Omega(t)}{dt} > 0 \Rightarrow Cm - Cr > 0$ • Compte tenu de l'équation générale de la dynamique, il faut que : $Cm > Cr$	$\frac{d\Omega}{dt} = 0$ → $C_m - C_r = 0$ → PFD → $C_m = C_r$	$\frac{d\Omega}{dt} < 0 \Rightarrow C_m - C_r < 0$ → $C_m < C_r$

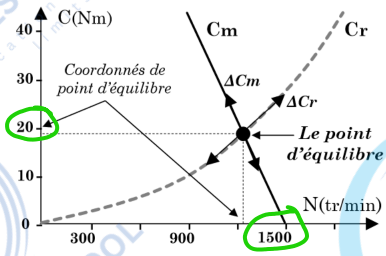
Freinage

2.3. Point d'équilibre (régime établit)

Le point d'équilibre d'un moteur et d'une charge est atteint lorsque le couple moteur égalise le couple résistant, stabilisant ainsi la vitesse de rotation du système.

Exemple 1 : moteur à courant continu MCC couplé à une pompe centrifuge





- Question : déterminer les cordonnés du point d'équilibre du groupe (MCC +charge)

$N_0 \simeq 1200$ tr/min

$C_0 = \ldots N_m$

Remarque importante : *Les variations du couple résistant ΔCr et du couple moteur ΔCm peuvent entraîner l'arrêt complet du système ou l'emballement de la machine MCC (vitesses élevées). Pour qu'il y ait stabilité, il faut qu'au voisinage de l'intersection, on ait :* $\frac{dCm}{dN} < \frac{dCr}{dN}$

Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

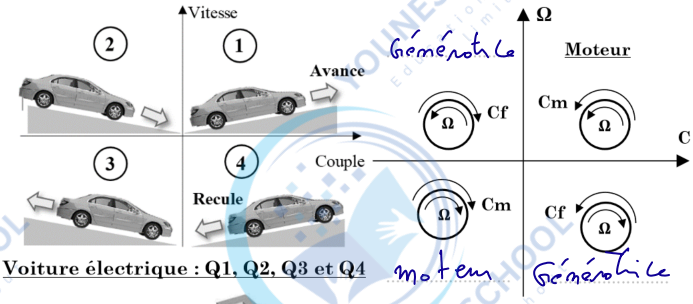
Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

3. Les quadrants de fonctionnement

Les quadrants de fonctionnement d'un système moteur + charge décrivent les quatre modes opérationnels : **motricité positive**, **freinage régénératif**, **motricité négative** et **freinage dissipation**. Chaque quadrant illustre une combinaison de direction de rotation et de couple.

On distingue :

- Le fonctionnement **moteur** lorsque : $C.\Omega > 0$
  Quadrants sont : 1 et 3
- Le fonctionnement **freinage** lorsque : $C.\Omega < 0$
  Quadrants sont : 2 et 4



Voiture électrique : Q1, Q2, Q3 et Q4



Vélo électrique : Q1

Le moteur fonctionne uniquement dans un sens ($\Omega > 0$), la marche arrière étant superflue. Le freinage électrique n'est pas employé.



Assesseur : Q1 et Q4

Lors de la phase de descente, la charge devient entraînante, nécessitant ainsi un freinage ($C.\Omega < 0$ avec $\Omega < 0$).



Train TGV : Q1 et Q2

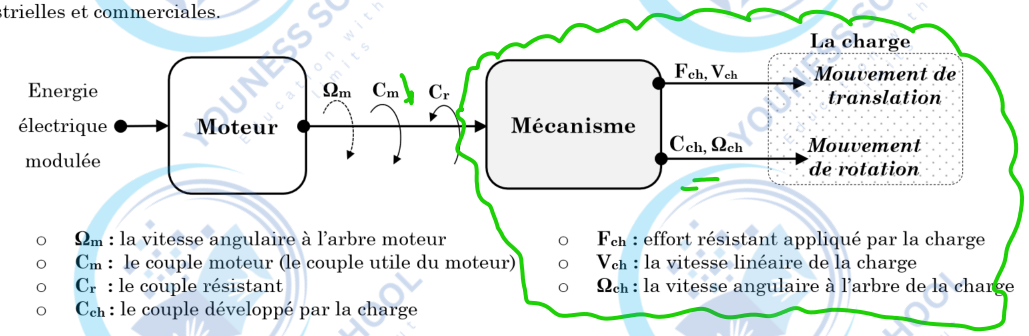
Le moteur tourne dans un seul sens ($\Omega > 0$), la marche arrière étant superflue. Le freinage électrique est employé ($C.\Omega < 0$) pour limiter la vitesse maximale du TGV en roue libre lors des descentes. Cependant, la récupération d'énergie est stockée dans des batteries pour l'utiliser dans l'éclairage par exemple.

Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

IV. Mécanismes associés aux moteurs

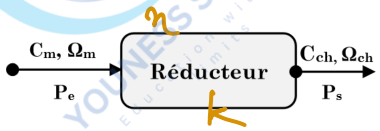
Les mécanismes associés aux moteurs transfèrent le mouvement, modifient le couple, convertissent les types de mouvements et améliorent la stabilité, assurant ainsi une efficacité et une adaptabilité optimales des machines dans diverses applications industrielles et commerciales.



- Ω_m : la vitesse angulaire à l'arbre moteur
- C_m : le couple moteur (le couple utile du moteur)
- C_r : le couple résistant
- C_{ch} : le couple développé par la charge
- F_{ch} : effort résistant appliqué par la charge
- V_{ch} : la vitesse linéaire de la charge
- Ω_{ch} : la vitesse angulaire à l'arbre de la charge

1. Réducteur de vitesses

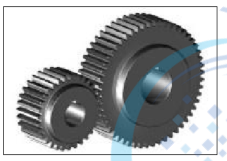
Le réducteur de vitesses diminue la vitesse du moteur tout en augmentant le couple, permettant ainsi un meilleur contrôle et une efficacité accrue des machines dans diverses applications industrielles.

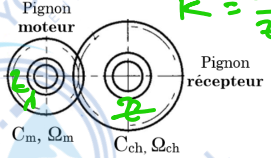


De nombreux types de réducteurs sont proposés par les constructeurs. On rencontre souvent :



➲ **Les engrenages**





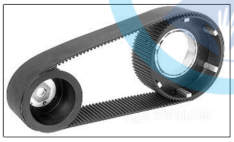
- **Rapport de réduction :**

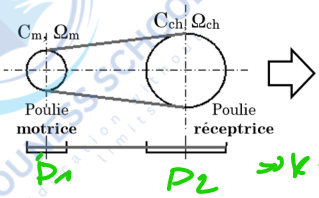
$$K = \frac{\Omega ch}{\Omega m} < 1$$

- **Rapport de couple transmissible :**

$$\frac{C_{ch}}{C_m} = \frac{\eta}{K} \quad \text{Avec } \eta = \frac{Ps}{Pe} = \frac{\textit{Puissance de sortie}}{\textit{puissance d'entrée}}$$

➲ **Poulies – courroie**





- **Rapport de réduction :**

$$K = \frac{\Omega ch}{\Omega m} < 1$$

- **Rapport de couple transmissible :**

$$\frac{C_{ch}}{C_m} = \frac{\eta}{K} \quad \text{Avec } \eta = \frac{Ps}{Pe} = \frac{\textit{Puissance de sortie}}{\textit{puissance d'entrée}}$$

Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515
Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515
Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

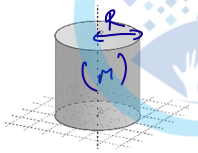
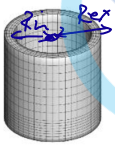
Bilan de puissances :

Puissance d'entrée : $P_e = C_m \cdot \Omega_m$	**Puissance de sortie :** $P_s = C_{eq} \cdot \Omega_{eq}$

2. Moment d'inertie

Connaître le moment d'inertie J d'une charge est crucial pour dimensionner correctement un moteur. Il permet de prédire la résistance au changement de vitesse, assurant un démarrage et un arrêt efficaces, ainsi qu'une performance optimale et une durée de vie prolongée des systèmes mécaniques. Le moment d'inertie J dépend de la masse et de la forme du solide mais pas de la vitesse.

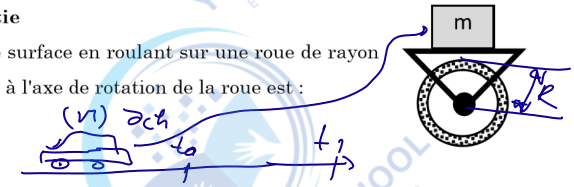
On donne ci-dessus, les Pièces les plus courantes :

Cylindre		**Cylindre creux**	
	$J = m\frac{R^2}{2}$ Avec : ○ m : la masse du cylindre ○ R : le rayon du cylindre		$J = m\frac{R_{ex}^2 + R_{in}^2}{2}$ Avec : ○ R_{ex} : le rayon extérieur ○ R_{in} : le rayon intérieur

Conversion de la Masse en Translation au Moment d'Inertie

Si une masse m se déplace linéairement à une vitesse V sur une surface en roulant sur une roue de rayon R, le moment d'inertie équivalent Jeq de cette masse par rapport à l'axe de rotation de la roue est :

$$J_{eq} = m \cdot R^2$$





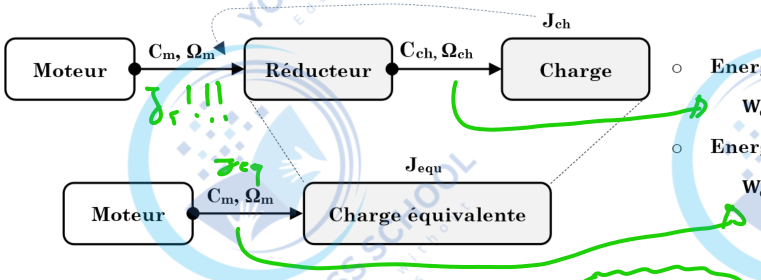
Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515
Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515
Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

3. Moment d'inertie ramené sur l'arbre moteur

Le calcul du moment d'inertie total ramené à l'arbre principal d'un système permet de simplifier l'analyse dynamique et de faciliter le dimensionnement et le contrôle du moteur. Cela permet d'évaluer la réponse du système, la stabilité, et d'optimiser les performances énergétiques.

D'après le théorème d'énergie cinétique :



- **Energie cinétique de la charge**

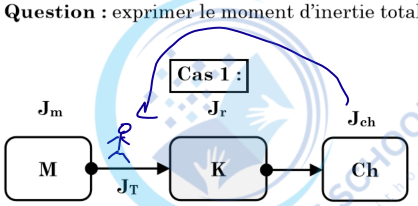
$$W_{ch} = \frac{1}{2} J_{ch} \Omega_{ch}^2$$

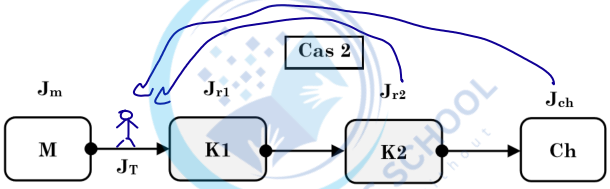
- **Energie cinétique de la charge équivalente**

$$W_{chequ} = \frac{1}{2} J_{eq} \Omega_m^2 \quad \text{Et} \quad K = \frac{\Omega ch}{\Omega m}$$

La conservation de l'énergie cinétique ($W_{ch} = W_{chequ}$) impose : $\boxed{J_{eq} = K^2 . J_{ch}}$ avec $K < 1$

Question : exprimer le moment d'inertie totale J_T ramené à l'arbre moteur dans les deux cas suivants :







Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515

4. Conversion d'un mouvement de rotation en mouvement de translation

La conversion d'un mouvement de rotation en mouvement de translation permet de transformer l'énergie rotative en mouvement linéaire, essentiel pour diverses applications mécaniques comme les presses et les systèmes de direction (Parabole TV).

On rencontre souvent les systèmes suivants :

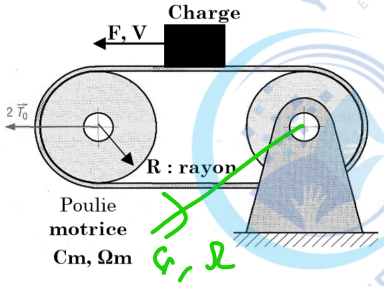


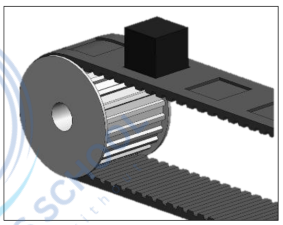
❖ Système de Poulies – courroie

Lorsque l'arbre moteur effectue une rotation de l'angle θm, la charge se déplace sur une distance de : $x = R . \theta m$

La charge se déplace avec la vitesse linéaire : $V = R . \Omega m$

L'effort transmissible à la charge F s'exprime par $F = \eta . \frac{Cm}{R}$ avec η est le rendement du système mécanique.



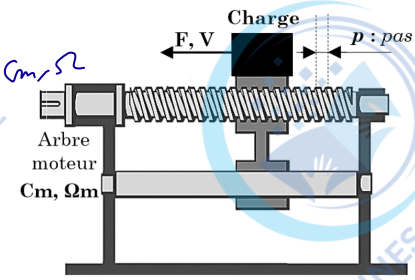


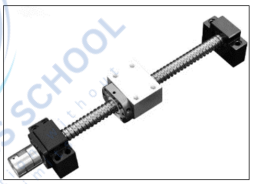
❖ Système Vis – écrou

Lorsque l'arbre moteur effectue une rotation de l'angle θm, la charge se déplace sur une distance de : $x = \frac{p}{2\pi} . \theta m$

La charge se déplace avec la vitesse linéaire : $V = \frac{p}{2\pi} . \Omega m$

L'effort transmissible à la charge F s'exprime par : $F = \eta . \frac{p}{2\pi} . Cm .$





Bilan de puissances :

Puissance d'entrée : $P_{em} = C_m . \Omega_m$	Puissance de sortie : $P_s = F . v$

5. Relations supplémentaires

La vitesse angulaire Ω et la fréquence de rotation N	*La vitesse linéaire V et la vitesse angulaire Ω*
$\Omega = \frac{2\pi N}{60}$ / $\Omega = \frac{\pi N}{30}$	$v = R \Omega$
Avec **Ω [rad/s] et N [tr/min]**	R : le rayon (en m), V **[m/s]**

Pour toute demande/question, merci de nous contacter sur WTSP au : +212 625-197515