



**POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL**

LE GÉNIE
EN PREMIÈRE CLASSE

Machines et entraînements électriques

ELE8401

Keyhan Sheshyekani

École Polytechnique de Montréal
e-mail: Keyhan.sheshyekani@polymtl.ca

Hiver 2019

Entraînements électriques

- La commande des machines électriques est l'une des applications des convertisseurs statiques (redresseur, hacheur, onduleur).
- En fait, le choix d'entraînement électrique dépend
 - ✓ du travail demandé
 - ✓ du lieu de travail
 - ✓ de la puissance à fournir
 - ✓ de la source d'énergie dont on dispose
 - ✓ des contraintes sur les paramètres que l'on doit fournir
 - ✓ le prix

Importances des entraînements électriques

L'évolution de toutes les machines a été principalement conditionnée par l'introduction de commandes numériques. Il en résulte de nouvelles contraintes pour les entraînements électriques :

- une plus grande souplesse d'exploitation, impliquant une dynamique plus élevée et un contrôle dans un large domaine de vitesse ;
- des exigences croissantes en matière de positionnement ;
- une plus grande fiabilité, impliquant un accroissement de la durée de vie des moteurs ;

Avantages d'un entraînement

- Dans un entraînement électrique statique, on convertit l'énergie électrique fournie au moteur pour que celui-ci fournisse avec le minimum de pertes les caractéristiques mécaniques demandées par le processus.
- Outre les économies d'énergie, cette technique offre des avantages supplémentaires qui peuvent être déterminants dans le dimensionnement d'une installation.

Avantages d'un entraînement

☞ Pour ce qui concerne le réseau d'alimentation, nous pouvons citer :

- La suppression des fortes surintensités du courant appelé par le moteur alternatif au démarrage.
- La diminution de la puissance du système d'alimentation.

☞ Pour ce qui concerne le moteur, la technique d'entraînement à vitesse variable permet d'allonger sa durée de vie grâce à la diminution des contraintes qui lui sont appliquées.

☞ Pour ce qui concerne la charge entraînée, nous pouvons citer la possibilité de régler le couple et la vitesse en tout point du plan effort-vitesse. Cet avantage provient des qualités de souplesse, de flexibilité, de précision et de rapidité attachées aux régulations du système.

Opération de Moteur Asynchrone

An [induction motor](#) connected directly to the power supply draws a constant magnetizing current at full speed, no matter what the load is. At anything less than full load, power factor of the induction motor is less than its rated power factor because the torque producing current decreases as the load decreases, but the magnetizing current does not change.

The lighter the load, worse the power factor.

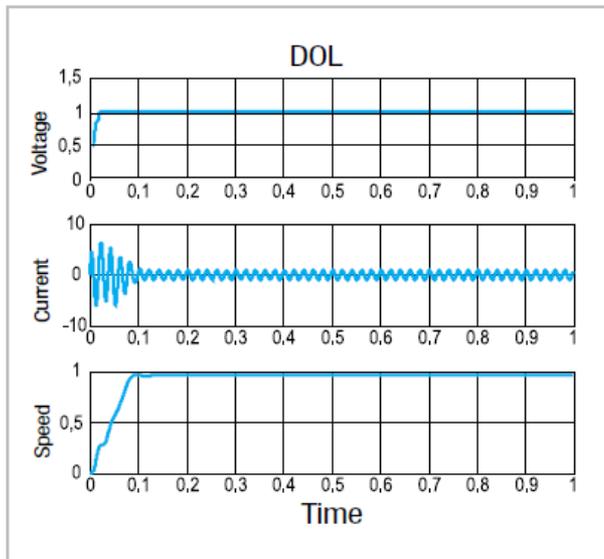
The AC induction motor with a permanently coupled load, when it is operated without the benefit of a [soft starter](#) draws a high starting current. Typically, more than 7 times it's rated full load current. "Reduced voltage-starting decreases the demand". A Soft starter makes use of this principle.

The mechanical shock delivered to the rotor or to couplings or to any intermediate gearing and the driven load by a high starting current is most severe when the motor is started direction-line.

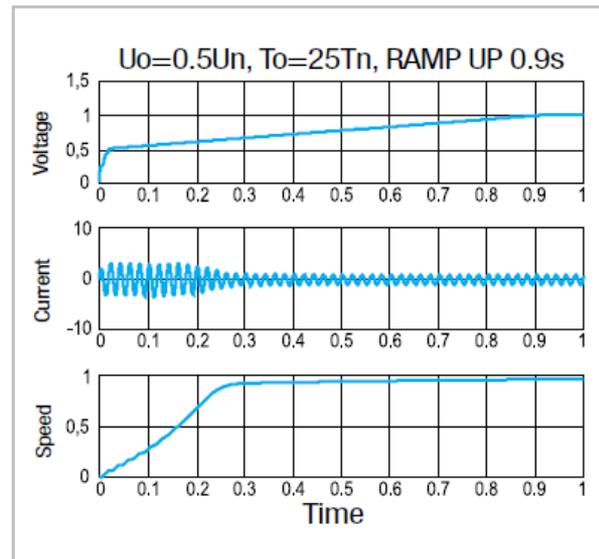
The effect of such repeated shocks is to decrease the life of the motor and increase the cost of maintenance

Avantages d'un Soft Starter

Direct-on-line start



ASTAT S soft start

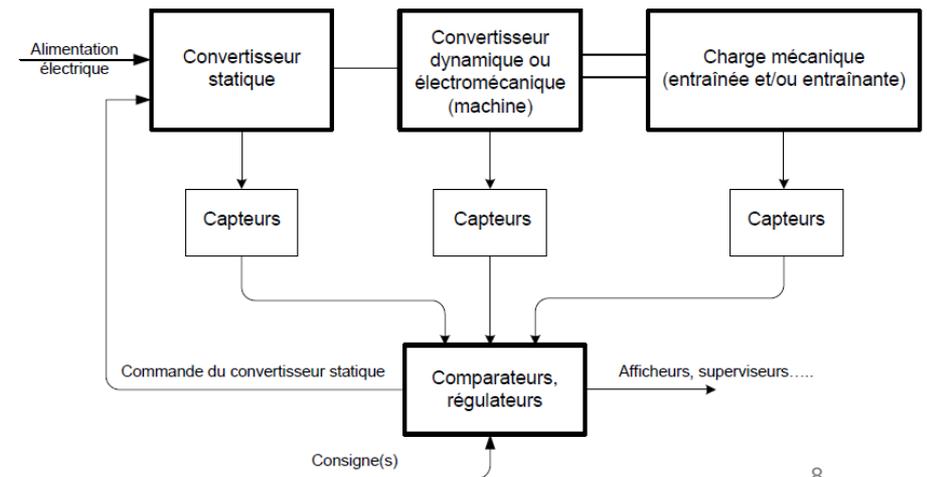
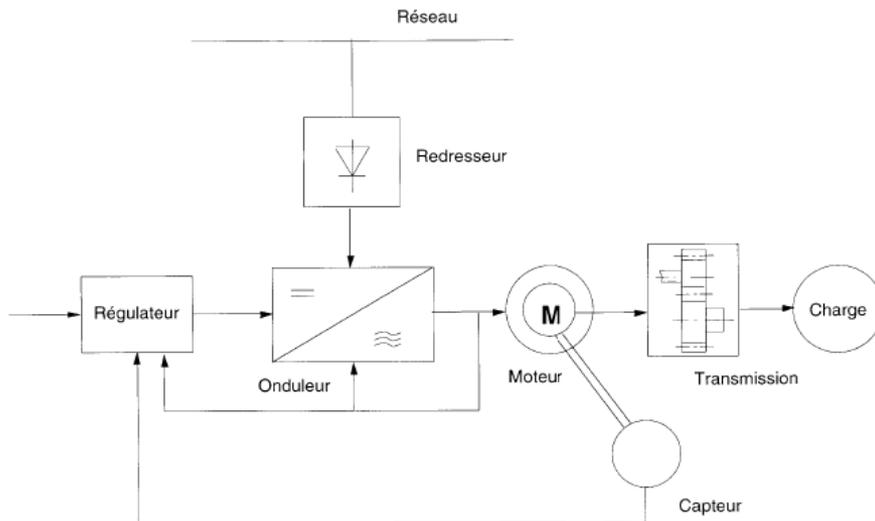


GE induction motor soft starter

Eléments d'un entraînement

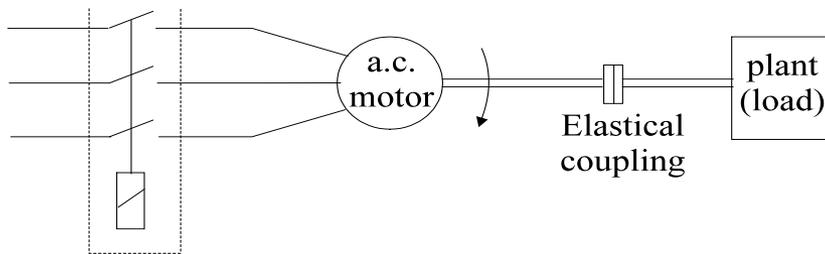
Dans un variateur de vitesse on trouve :

- Une machine électrique : moteur à courant continu, moteur asynchrone, moteur synchrone...
- Alimentation électronique (convertisseur statique) à partir d'une source d'alimentation : Redresseur, hacheur, onduleur, gradateur.
- Des capteurs : de vitesse, de position, de niveau...
- Une régulation



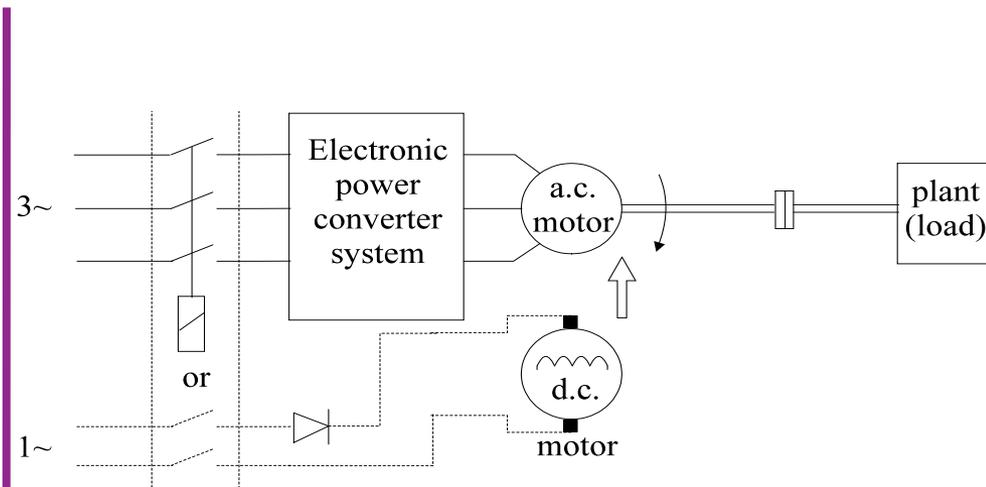
Conversion d'énergie dans les entraînements électriques

Environ 50% de l'énergie électrique produite est utilisée dans les entraînements électriques aujourd'hui.



Electromechanical
(or electronic)
start/stop and
protection system

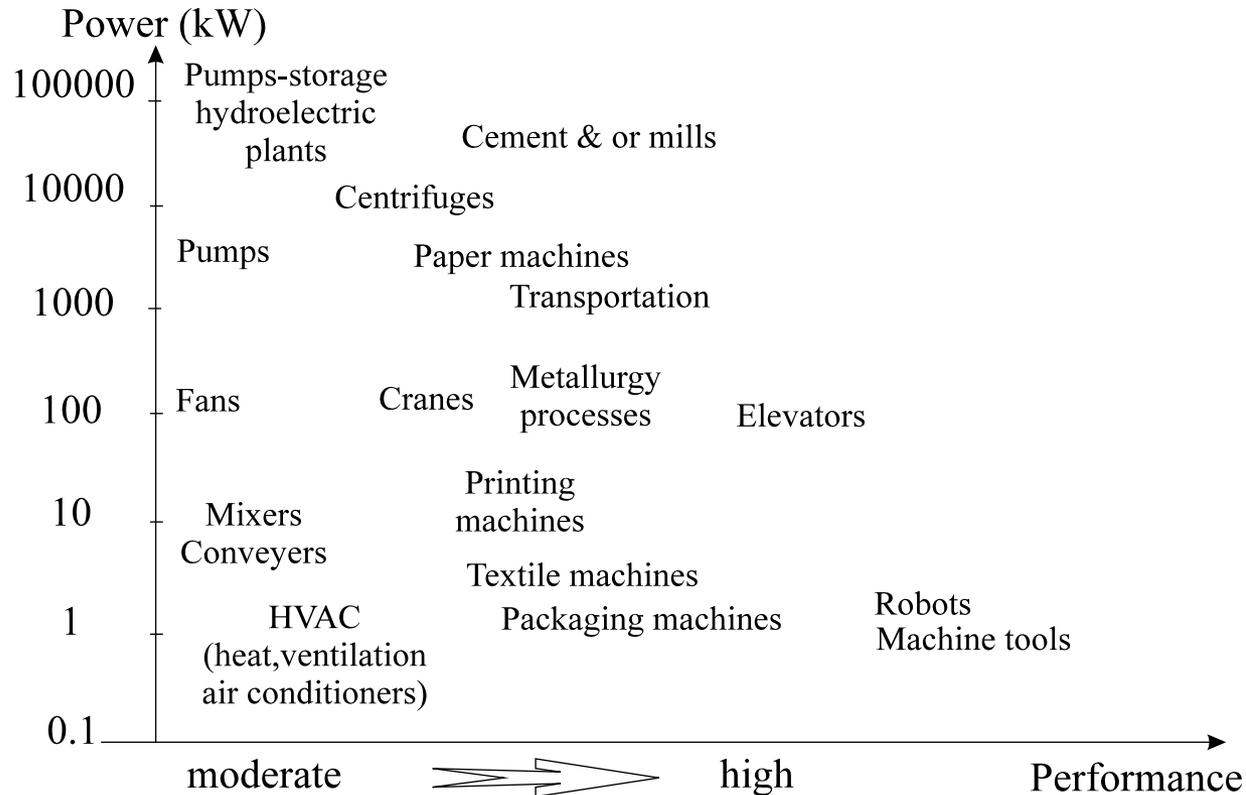
Entraînement électrique à vitesse
constante



Electromechanical
separator and
protection system

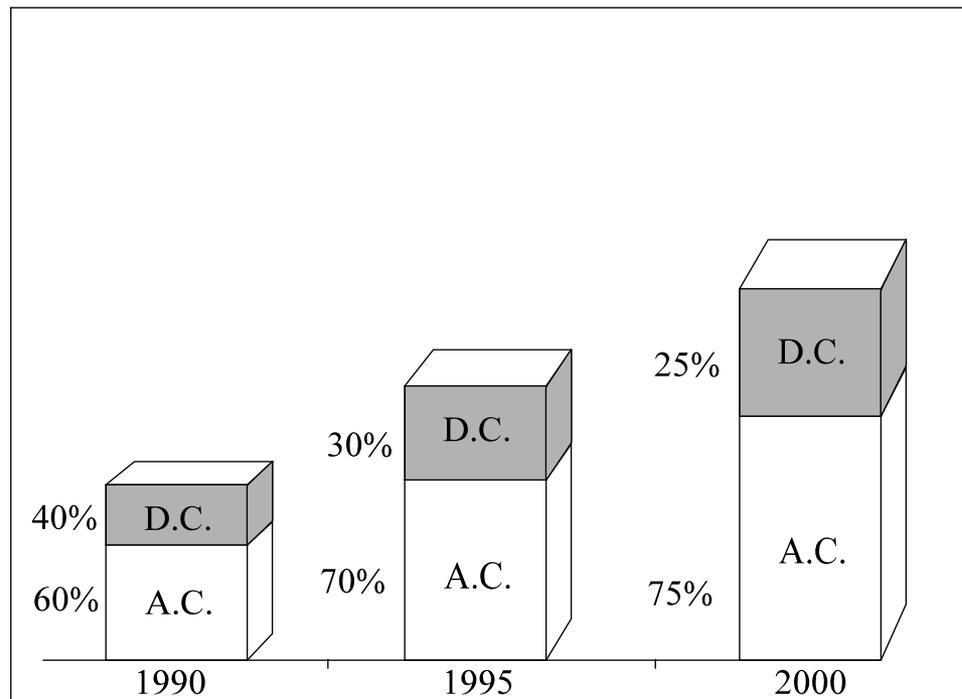
Entraînement électrique à vitesse
variable

Domaine d'application des entraînements électriques



Entraînements électriques sur les marchés

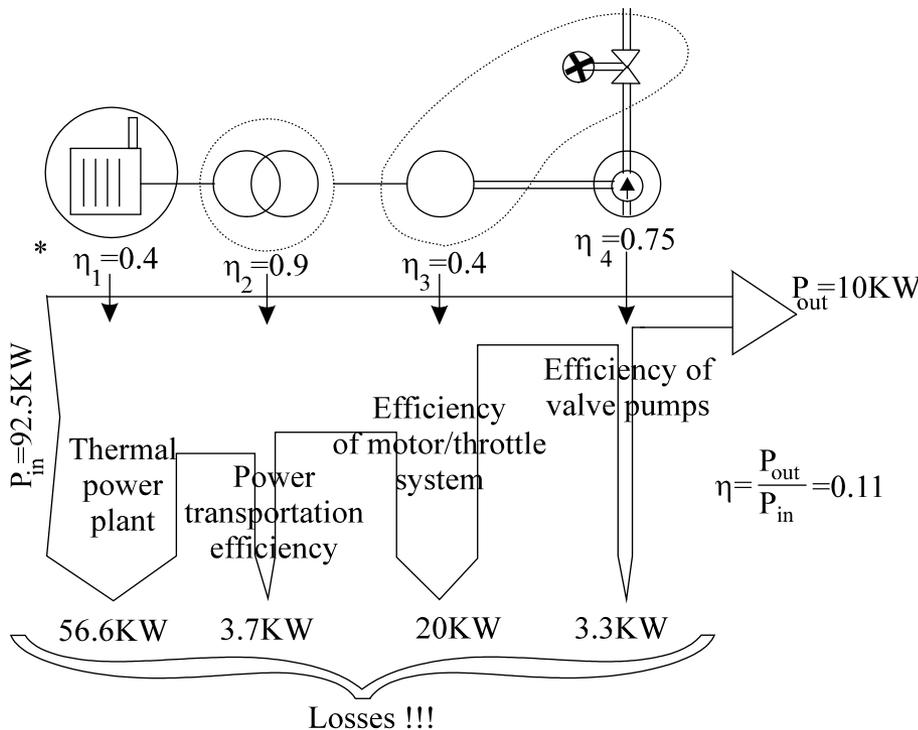
Depuis 1990, les entraînements électriques à courant alternatif sont de plus en plus utilisés que les entraînements électriques à courant continu.



Entraînements électriques sur les marchés (AC vs DC)

Économie d'énergie grâce à des entraînements électriques basés sur PEC

Consommation d'énergie primaire pour le système d'accélérateur / moteur / pompe

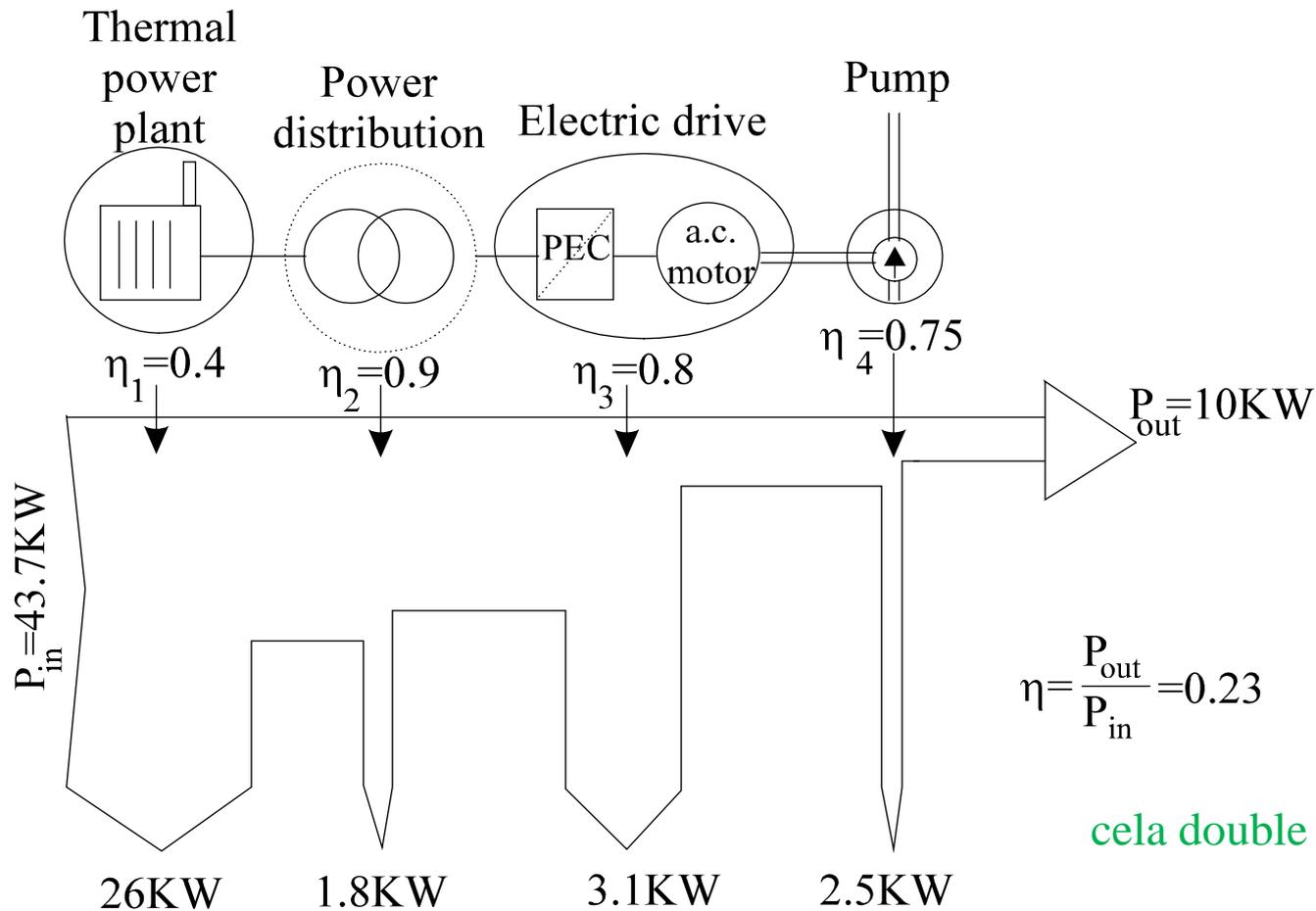


*with recent combined cycle gasturbines $\eta_1 = 0.6$ by the year 2000!

Le terme (throttle) accélérateur est venu pour se référer à tout mécanisme par lequel la puissance ou la vitesse d'un moteur est régulée, comme la pédale d'accélérateur d'une voiture

Économie d'énergie grâce à des entraînements électriques basés sur PEC

Consommation d'énergie primaire pour le système P.E.C / moteur / pompe



cela double l'efficacité

Étude du mouvement

Notions mécaniques

- Caractéristique $C-\Omega$ de charge
- Diagramme 4 quadrants $C-\Omega$
- Critère de stabilité
- Démarrage et freinage



compresseur



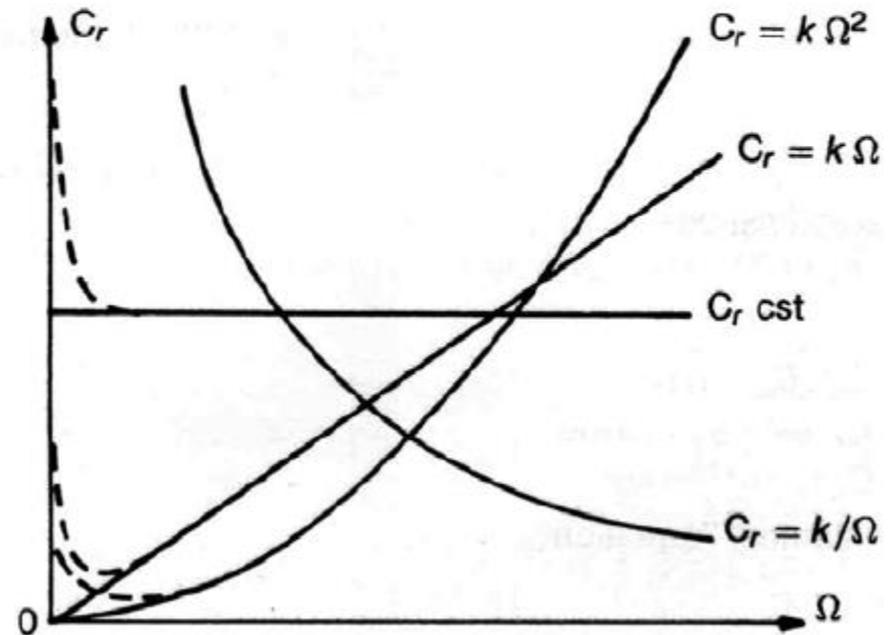
pompes à hélice
Propeller pump
(axial-flow)

Caractéristique C- Ω de charge

Couple résistant proportionnel
au carré la vitesse ($k\Omega^2$)

- Les pompes centrifuges
- Les compresseurs centrifuges
- Les ventilateurs
- Les soufflantes
- Les pompes à vis
- Les pompes à hélice
- Les centrifugeuses

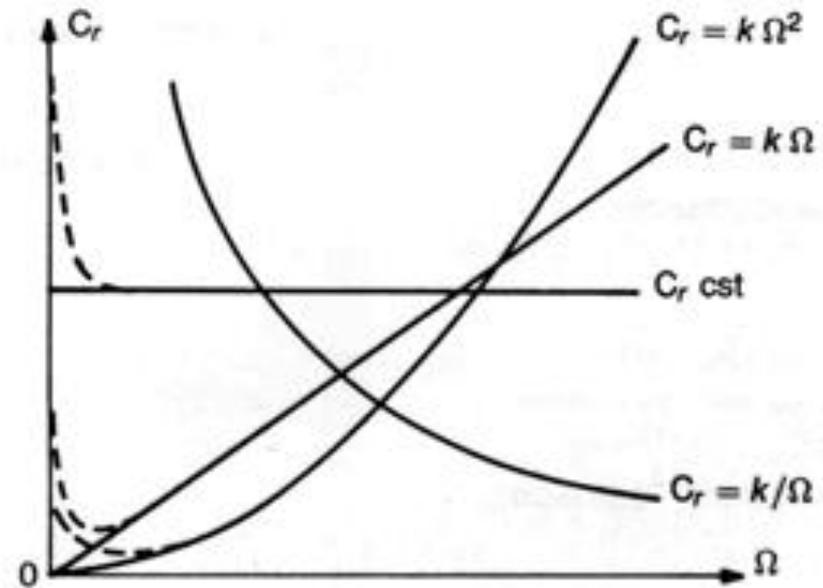
Caractéristique C- Ω de charge
Caractéristiques types



Caractéristique C- Ω de charge

Couple résistant proportionnel
à la vitesse ($k\Omega$)

- Les presses
- Les calandres à frottement visqueux
- Les freins à courant de Foucault
- Les machines-outils

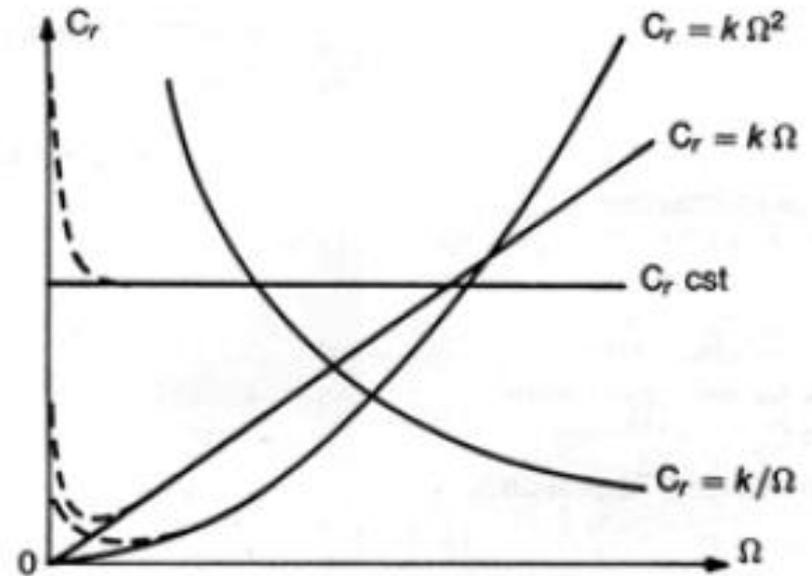


CNC machine

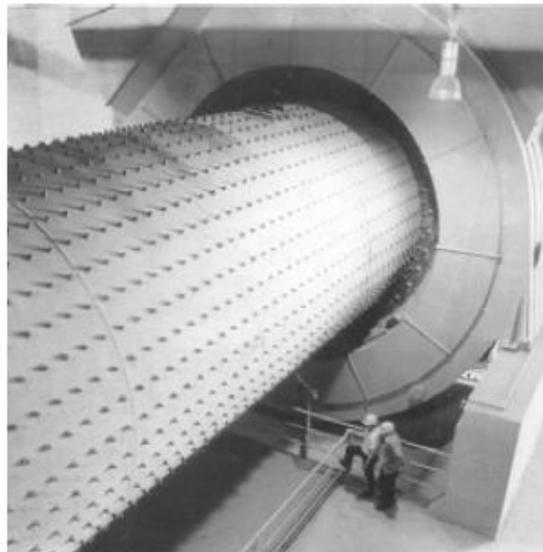
Caractéristique C- Ω de charge

Couple résistant constant (k)

- Les compresseurs et les pompes à pistons
- Les engins de levage et de manutention
- Les bandes transporteuses
- Les broyeurs et concasseurs



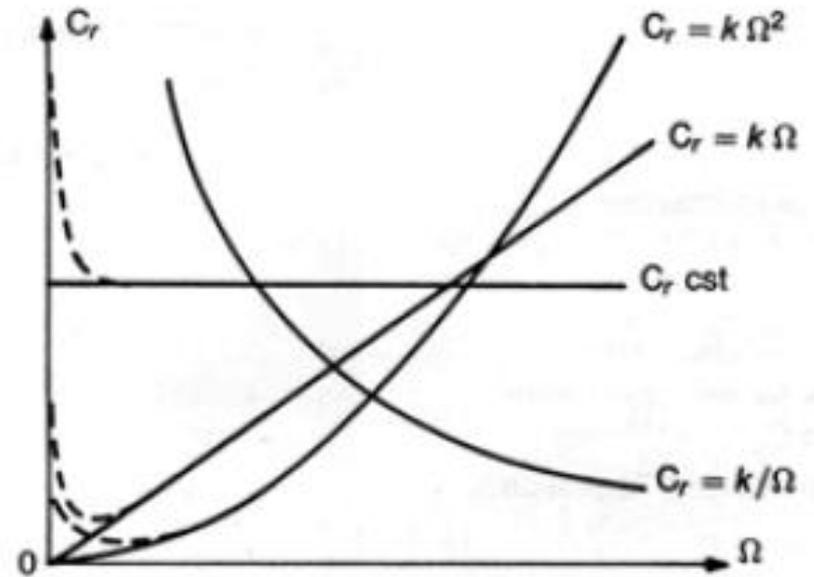
concasseur
5,0 MW



Caractéristique C- Ω de charge

Couple résistant inversement proportionnel a la vitesse constant (k/Ω)

- Les bobineuses
- Les tours
- Les dérouleuses à bois



Caractéristique C- Ω de charge

Caractéristiques réelles

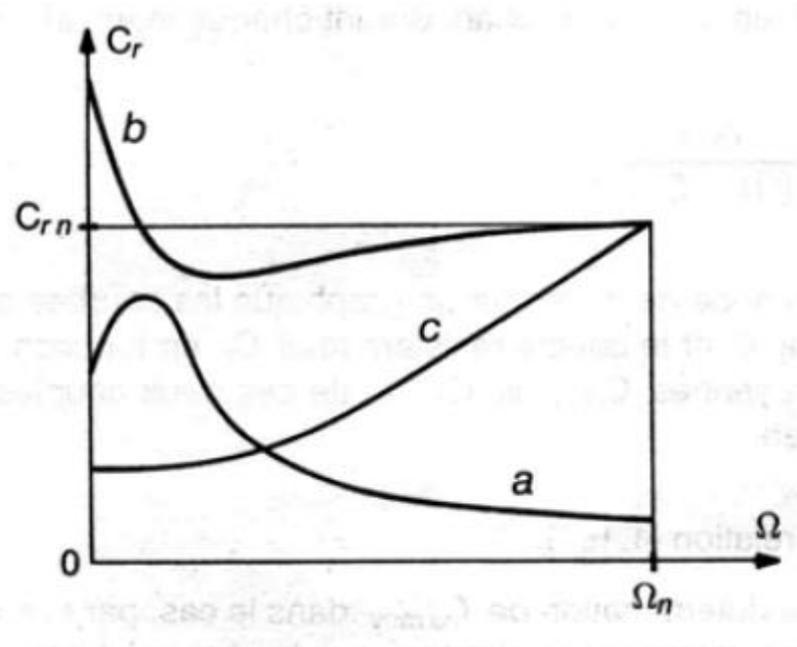
- Bien que les caractéristiques théoriques sont commodes pour dégrossir certains calculs et faire des études comparatives, les caractéristiques réelles ne sont pas si simples.
- Des pertes par paliers, par ventilation ... viennent modifier la forme de la courbe
- En plus du couple résistant de la charge, il faut ajouter celui dû aux pertes mécaniques et aux pertes dans le fer du rotor du moteur.

Caractéristique C- Ω de charge

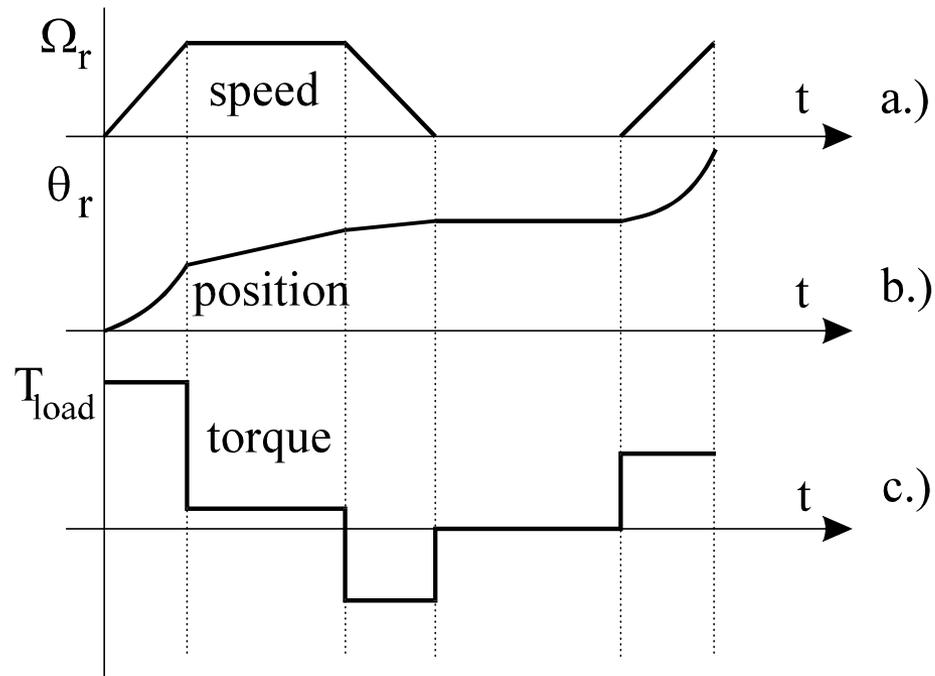
Caractéristiques réelles

Vacuum crusher

- (a) un concasseur à vide (couple théoriquement nul)
- (b) un compresseur à piston (couple théoriquement constant)
- (c) une pompe centrifuge (couple théorique en $k\Omega^2$)



Profil de mouvement/temps

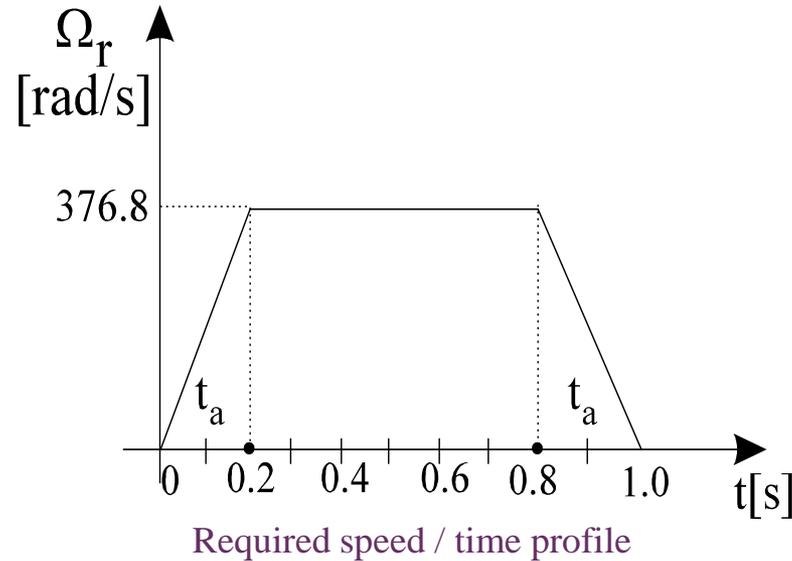


Profil de mouvement / temps

a.) Vitesse b.) Position c.) Couple de charge requis

Exemple:

Un entraînement direct doit fournir une courbe de vitesse / temps montrée ci-dessous contre un couple de charge constant de $T_L = 10\text{Nm}$, pour une inertie de charge du moteur $J = 0.02 \text{ kgm}^2$.



En négligeant les pertes mécaniques, calculons le couple moteur (T_e) / temps requis. L'équation de mouvement pour un entraînement direct est:

$$T_e(t) = J \cdot \dot{\Omega}_r(t) + T_L(t)$$

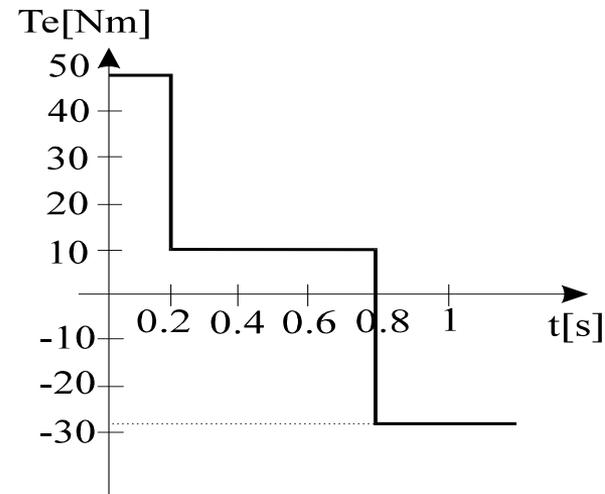
Pour les zones linéaires vitesse / temps (accélération - décélération), la dérivée de vitesse est:

$$\dot{\Omega}_r = \pm \frac{\Omega_{r\max}}{t_a} = \pm \frac{376.8}{0.2} = \pm 1884 \text{ rad} / \text{s}^2$$

Pour la zone de vitesse constante (croisière) $\dot{\Omega}_r = 0.0$

Par conséquent, les exigences de couple du moteur pour les trois zones sont:

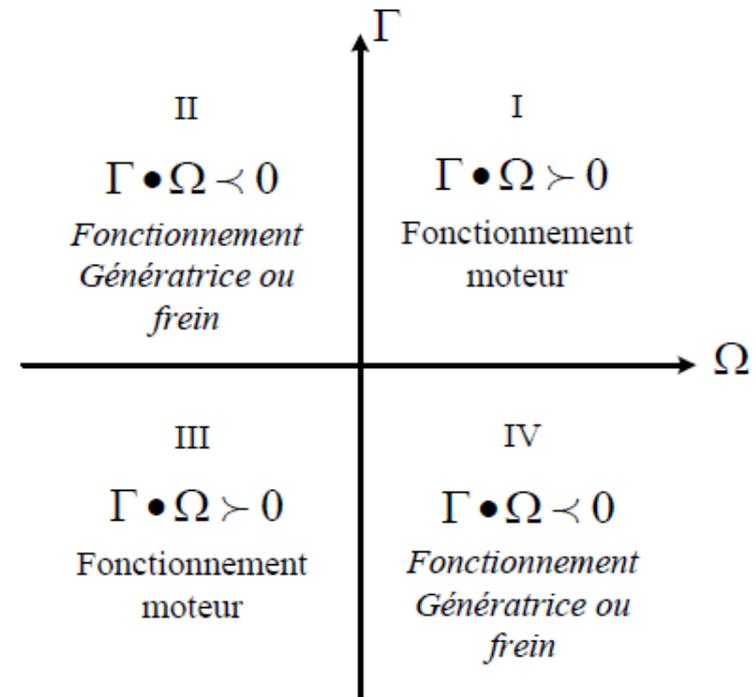
$$T_e = \begin{cases} 1884 \cdot 0.02 + 10 = 37.68 + 10 = 47.68 \text{ Nm}; & \text{for } 0 \leq t \leq 0.2 \text{ s} \\ 0 + 10 = 10 \text{ Nm}; & \text{for } 0.2 \leq t \leq 0.8 \text{ s} \\ -1884 \cdot 0.02 + 10 = -37.68 + 10 = -27.68 \text{ Nm}; & \text{for } 0.8 \leq t \leq 1 \text{ s} \end{cases}$$



Couple moteur / temps requis

Diagramme 4 quadrants C- Ω

- Dans le quadrant 1, le couple moteur C et sa vitesse sont positifs: la machine fonctionne en moteur, tournant dans le sens direct.
- Dans le quadrant 2, la machine fonctionne en génératrice recevant de la puissance mécanique de la charge et la transformant en puissance électrique au réseau. C'est le freinage par récupération d'énergie.
- Dans le quadrant 3, la machine fonctionne en moteur tournant dans le sens inverse de celui du quadrant 1.
- Dans le quadrant 4, la machine, tournant dans le sens inverse de celui du quadrant 2, fonctionne en génératrice, donc assurant le freinage par récupération



caractéristiques $\Gamma = f(\Omega)$

Diagramme 4 quadrants C- Ω

Mode of operation	Forward motoring	Forward regenerative braking	Reverse motoring	Reverse regenerative braking
Speed, ω_r	+	+	-	-
Torque, T_e	+	-	-	+
Electric power flow	+	-	+	-

Diagramme 4 quadrants C-Ω

Dans le diagramme couple vitesse, on trace :

- Les lieux de fonctionnement de la machine sous certaines conditions.
- La caractéristique électromécanique de la charge.
- Les limites de fonctionnement.

Le point d'intersection de la caractéristique de la charge donne le point de fonctionnement en régime établi puisque le 1^{er} principe de la dynamique en rotation:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \sum \Gamma = \Gamma_{em} - \Gamma_r$$

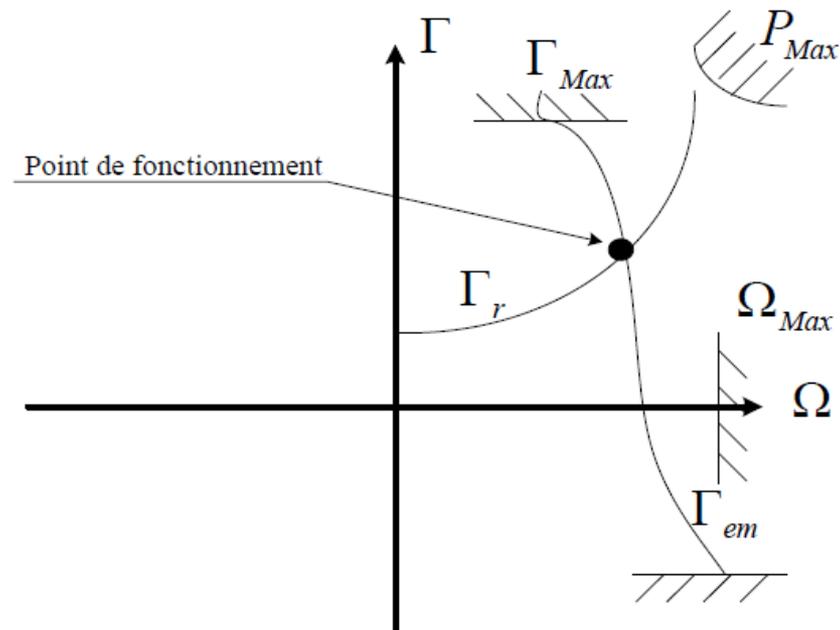
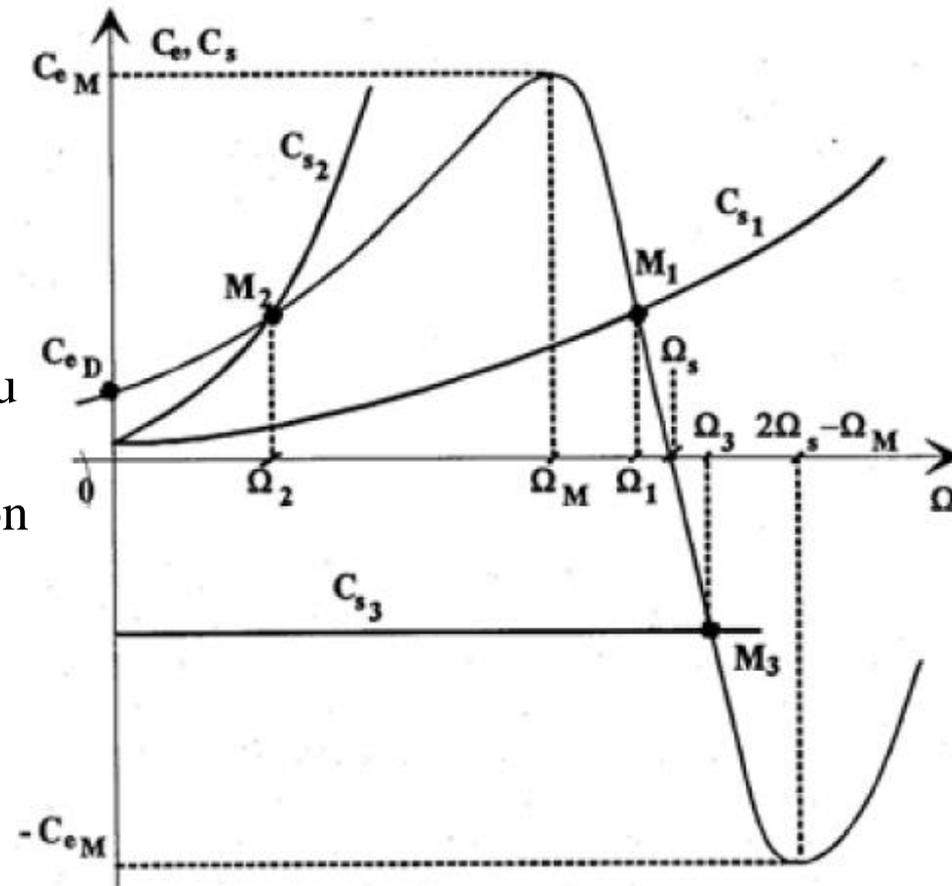


Diagramme C- Ω

Diagramme - Point de fonctionnement

- Le point de fonctionnement M_i , dans le plan Couple-Vitesse (C- Ω), définit le point d'intersection des caractéristiques C_e , C_s Pour lequel la vitesse est devenue constante ($d\Omega/dt=0$).
- Selon le type de machine, la position du point M_i dépend de la
 - tension et de la fréquence d'alimentation du moteur
 - de la nature de la charge entraînée



stabilitée Point de fonctionnement

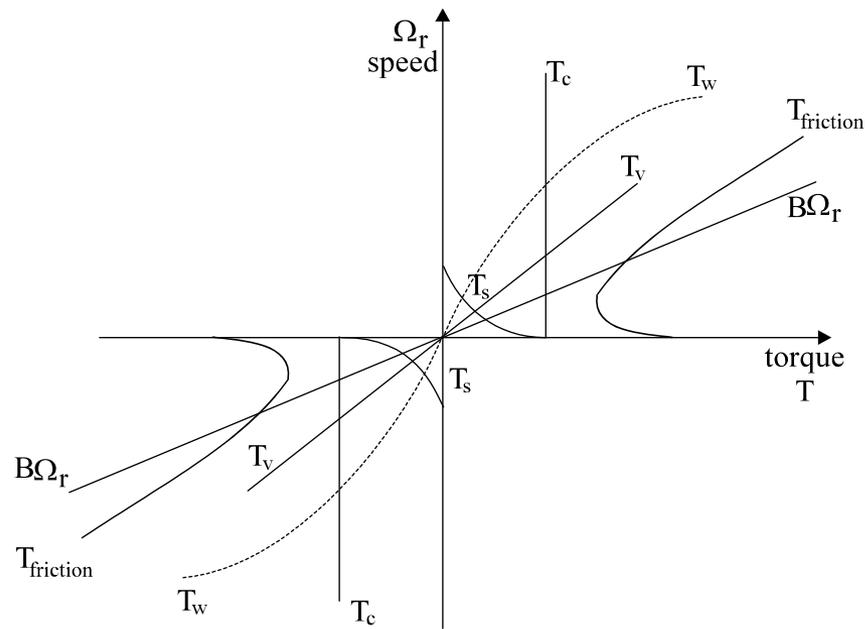
$$J_t \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = T_e - T_{\text{friction}} - T_{\text{load}}$$

$$T_{\text{friction}} = T_S + T_C + T_V + T_W$$

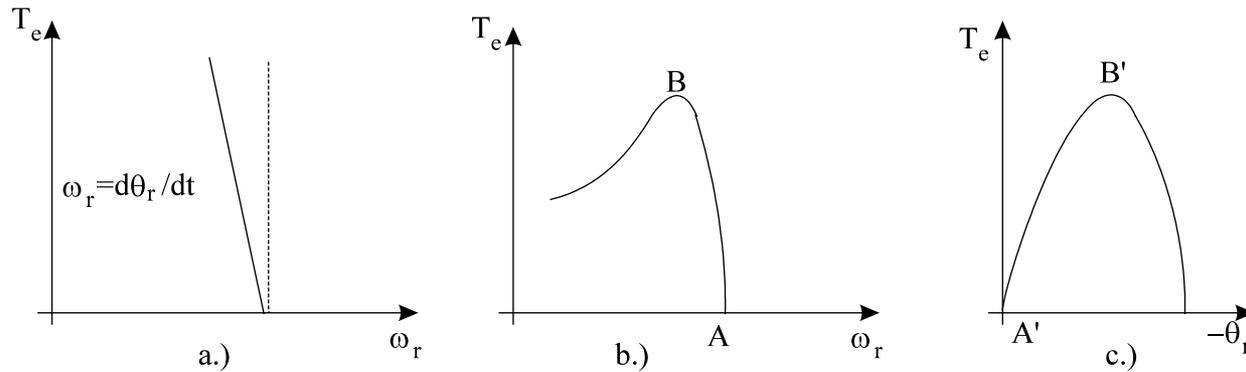
where T_S is the static friction torque (at zero speed); T_C is Coulomb friction torque (constant with speed); T_V is viscous friction torque (proportional to speed) and T_W is windage friction (including the ventilator braking torque, proportional to speed squared):

$$T_V = B' \cdot \Omega_r$$

$$T_W = C \cdot \Omega_r^2$$



Components of friction torque, $T_{friction}$



Mechanical characteristics:

a.) d.c. brush motor with separate excitation

b.) induction motor

c.) synchronous motor

Diagramme C- Ω

Diagramme - Point de fonctionnement

La figure illustre à travers trois exemples, le fonctionnement en régime permanent; les allures C_{s1} et C_{s2} sont caractéristiques de pompes centrifuges (désignées P1 et P2); l'allure C_{s3} négative correspond au cas où la charge est entraînée.

- D'après la figure, le moteur est mal choisi pour activer la pompe P₂ car, au point M₂, 2 inconvénients majeurs sont identifiés :
 - rendement rotorique Ω_2/Ω_s trop faible
 - et surintensité permanente.

Overcurrent

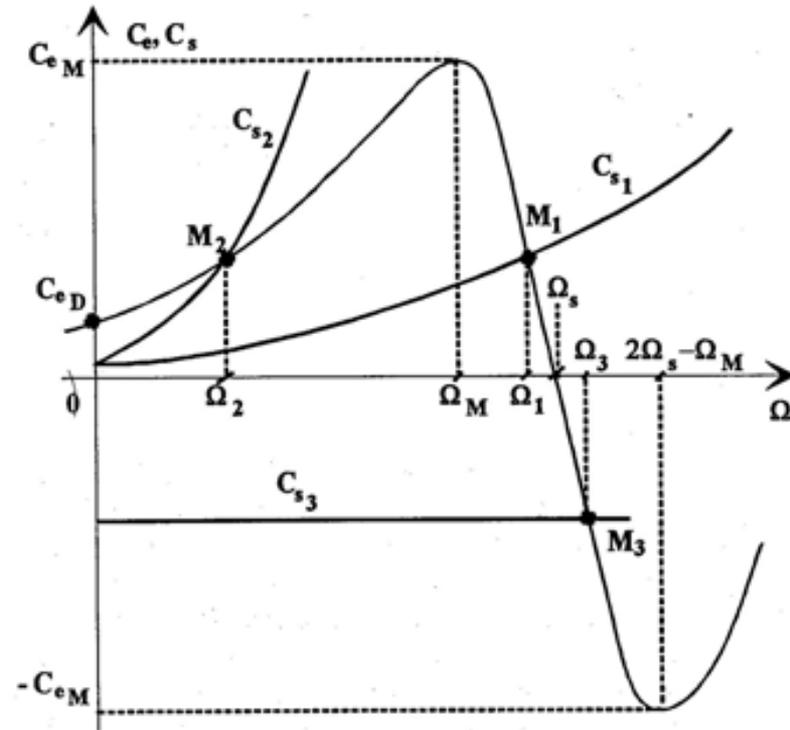


Diagramme C-Ω

Diagramme - stabilité Point de fonctionnement

- La stabilité de l'équilibre, atteint en M, peut-être étudiée en boucle ouverte à l'aide de considérations simples effectuées sur les caractéristiques statiques sans tenir compte des variations de la tension d'alimentation ni des transitoires électriques.
- On montre à partir de représentations graphiques simples, que la condition de stabilité de l'équilibre au point M s'exprime par l'inégalité :

$$\frac{dC_s}{d\Omega} > \frac{dC_e}{d\Omega}$$

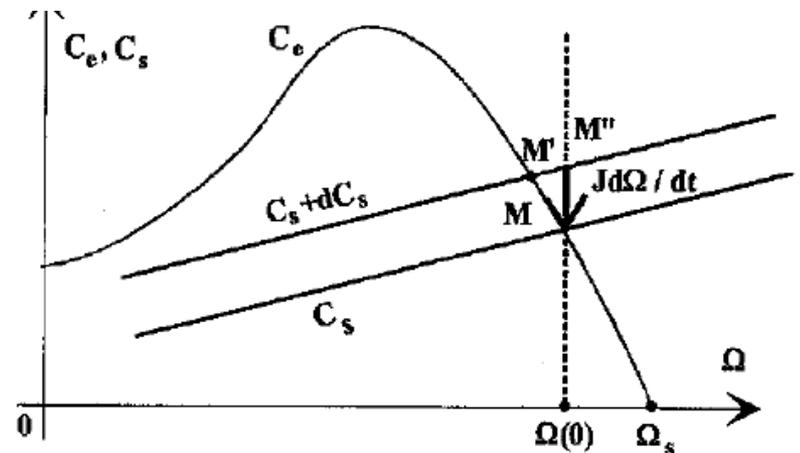
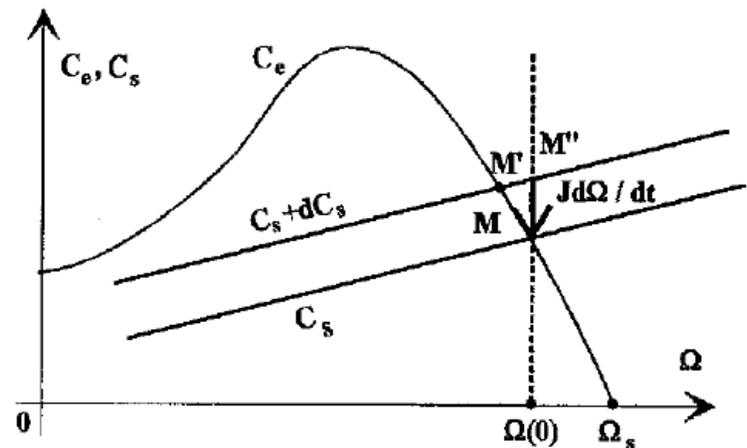


Diagramme C-Ω

Diagramme - stabilité Point de fonctionnement

- À un instant origine, C_s est augmenté de dC_s supposé positif. La vitesse angulaire Ω ne pouvant varier instantanément en tant que variable d'état, l'accélération devient négative puisqu'elle est alors égale à $-dC_s/J$.
- La mesure algébrique $M''M$ représente la dérivée du moment cinétique $J\Omega$; la vitesse décroît tant que cette valeur est négative, donc M'' (charge) et M (moteur) se rapprochent de M' . Au point M l'inégalité est bien vérifiée :

$$\frac{dC_s}{d\Omega} > \frac{dC_e}{d\Omega}$$



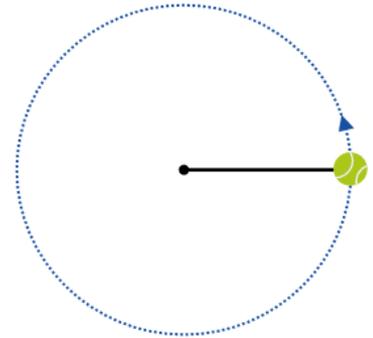
Lois élémentaires de la mécanique – Moments d'inertie

- Le moment d'inertie, par rapport à un axe $x'x$, d'un corps formé de “ m ” masses situées à une distance “ r ” de cet axe est défini par:

$$J = \sum m r^2$$

- Dans le cas d'un corps homogène, on calcule le moment d'inertie par intégration des moments d'inertie élémentaires, dus aux éléments de masse (dm):

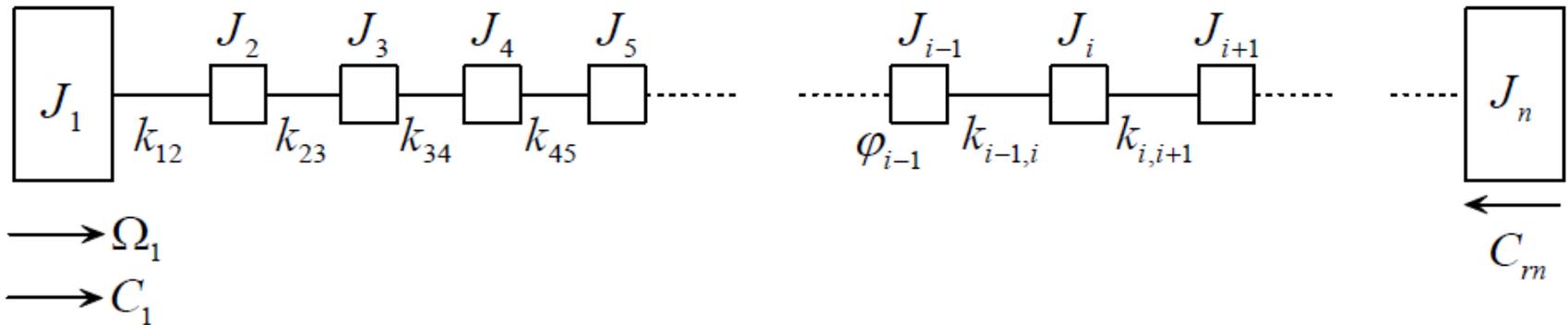
$$J = \int r^2 dm. \quad (m^2 \cdot kg)$$



Lois élémentaires de la mécanique – Moments d'inertie

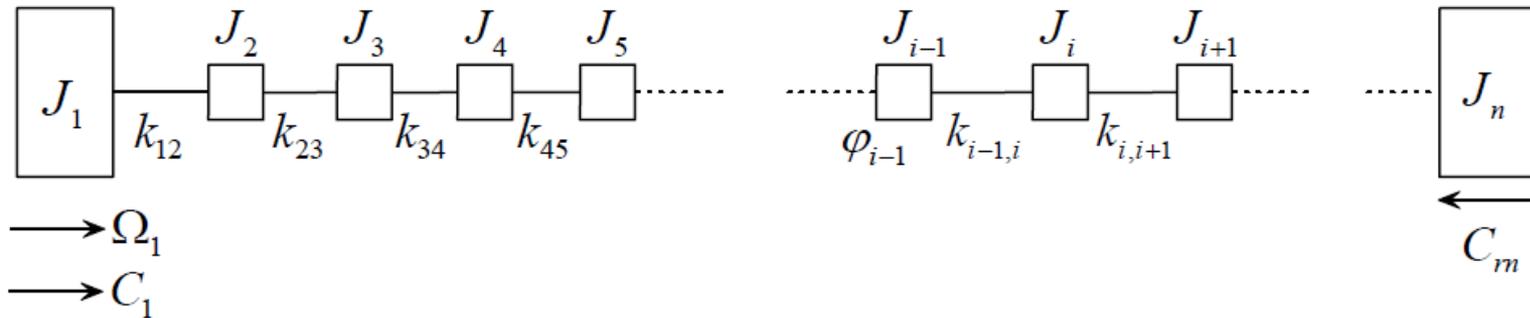
- Le moment d'inertie, d'un ensemble de masses fixées sur le même arbre, est la somme des moments d'inertie de ces masses.
- Dans une chaîne cinématique, si on a plusieurs masses tournant à des vitesses différentes (présence de transmissions par engrenages, par courroies), il faut ramener les moments d'inertie à la même vitesse avant de les additionner.

Diagramme cinématique de l'entraînement



- Le modèle cinétique équivalent est tel que tous les éléments effectuent le même type de mouvement: *rotation ou translation*.
- Dans le cas des entraînements électriques, le mouvement de rotation est préféré et il est généralement référé à celui du rotor de la machine. On obtient alors un modèle “uni-axe” du schéma cinématique.
- Ce modèle contient également tous les paramètres (moments d'inertie J_i , coefficients de rigidité $k_{i,i+1}$, vitesses angulaires Ω_i ou linéaires V_i , etc...) caractérisant le mouvement du rotor et ceux associés à chacune des autres parties mobiles de l'entraînement.

Simplification du modèle cinétique équivalent - Méthodologie



- La méthodologie de simplification du modèle cinétique équivalent suit les étapes suivantes:
 - l'élément no. 1 du schéma est associé au rotor du moteur; il devient alors l'élément de référence;
 - on ramène tous les éléments du schéma à la vitesse de référence Ω_1 ;
 - on détermine le moment d'inertie équivalent et le couple résistant équivalent référés à Ω_1 ;
 - on identifie les éléments dominant du modèle cinétique et
 - on met en place un modèle à nombre réduit de masses en mouvement.

Simplification du modèle cinétique équivalent - Méthodologie

- Ainsi, en se référant à la vitesse Ω_1 , le moment d'inertie de l'élément d'ordre i tournant à la vitesse Ω_i est :

$$J_{ri} \frac{\Omega_1^2}{2} = J_i \frac{\Omega_i^2}{2}$$

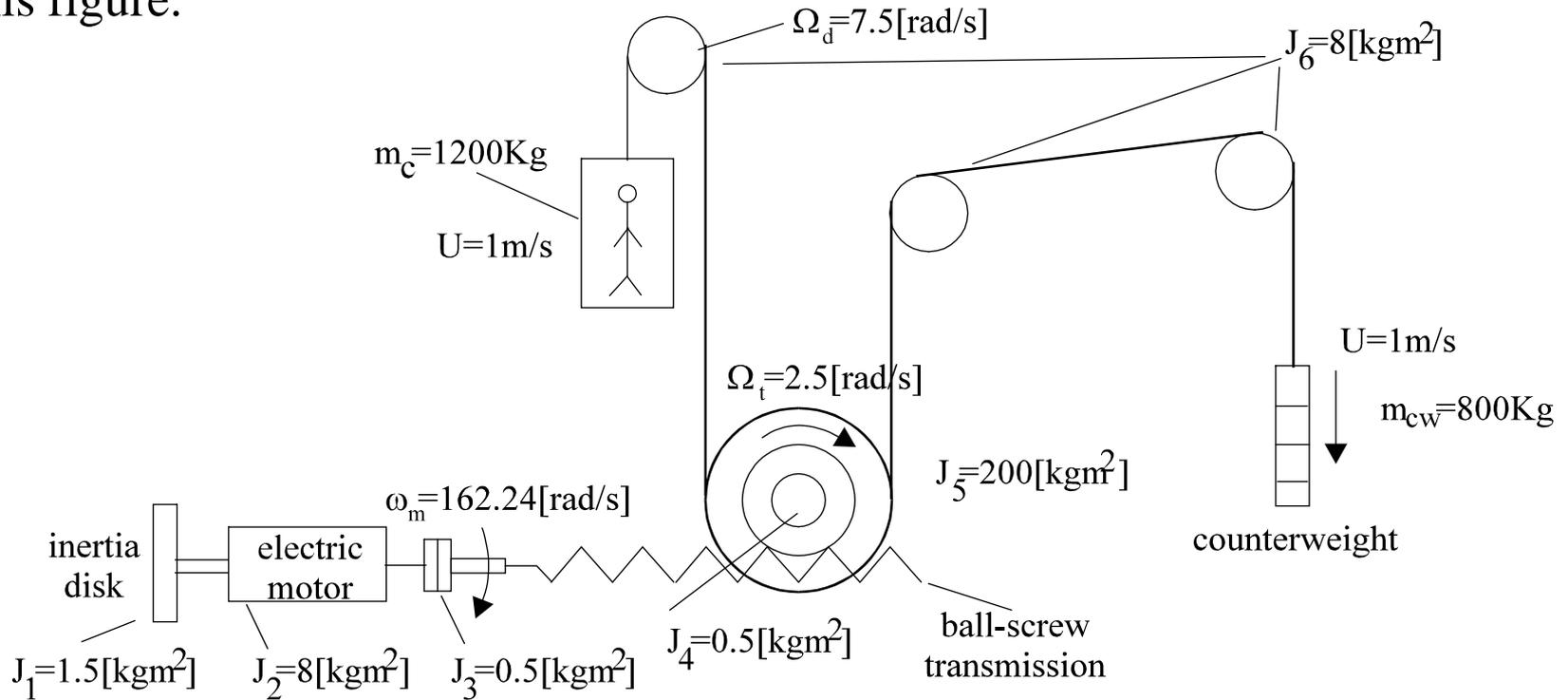
- On obtient l'expression de référence

$$J_{ri} = J_i \frac{\Omega_i^2}{\Omega_1^2} = \frac{J_i}{i_{1i}^2}$$

où $i_{1i} = \frac{\Omega_1}{\Omega_i}$ est le rapport de passage de l'arbre de référence à l'arbre i du mécanisme.

Example : gear - box drive torque / time curve

Let us consider an electric drive for an elevator with the data shown in this figure.



Elevator electric drive with multiple mechanical transmissions and counterweight

The motor rated speed $n_n = 1550\text{rpm}$. The efficiency of gearing system is $\eta = 0.8$.

Let us calculate the total inertia (reduced to motor shaft), torque and power without and with counterweight.

First the motor angular speed ω_m is:

$$\omega_m = 2 \cdot \pi \cdot n_n = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1550}{60} = 162.22 \text{ rad/s} \quad (1.12)$$

The gear ratios may be defined as speed ratios - Ω_t/ω_m for J_4+J_5 and Ω_d/ω_m for J_6 .

Consequently the inertia of all rotating parts J_r , reduced to the motor shaft, is:

$$\begin{aligned} J_r &= J_1 + J_2 + J_3 + (J_4 + J_5) \cdot \frac{\Omega_t^2}{\omega_m^2} + J_6 \cdot \frac{\Omega_d^2}{\omega_m^2} = \\ &= 15 + 8 + 2 + (0.5 + 200) \cdot \left(\frac{2.5}{162.22} \right)^2 + 8 \cdot \left(\frac{7.5}{162.22} \right)^2 = 25.062 \text{ kgm}^2 \end{aligned} \quad (1.13)$$

For the cabin and the counterweight, the inertia, reduced to motor shaft (J_e) is:

$$J_e = (m_c + m_{cw}) \cdot \frac{u^2}{\omega_m^2} = (1200 + 800) \cdot \frac{1^2}{166.22^2} = 0.07238 \text{ kgm}^2$$

Thus the total inertia J_t is:

$$J_t = J_r + J_e = 25.062 + 0.07238 = 25.135 \text{ kgm}^2$$

In absence of counterweight the law of energy conservation leads to:

$$T_{em} \cdot \omega_m \cdot \eta = m_c \cdot g \cdot u$$

Consequently the motor torque, T_{em} , yields:

$$T_{em} = \frac{1200 \cdot 9.81 \cdot 1}{162.22 \cdot 0.8} = 90.71 \text{ Nm}$$

The motor electromagnetic power P_{em} is:

$$P_{em} = T_{em} \cdot \omega_m = 90.71 \cdot 162.22 = 14715 \text{ W}$$

On the other hand in presence of counterweight (1.16) becomes:

$$T_{em}' \cdot \omega_m \cdot \eta = (m_c - m_{cw}) \cdot g \cdot u$$

$$T_{em}' = \frac{(1200 - 800) \cdot 9.81 \cdot 1}{162.22 \cdot 0.8} = 30.71 \text{ Nm}$$

So the motor electromagnetic P'_{em} is:

$$P_{em}' = T_{em}' \cdot \omega_m = 30.71 \cdot 162.22 = 4905 \text{ W}$$