

## 2. Clefs de compréhension des motorisations : l'ascenseur

« Le courage est l'arme de ceux qui n'ont plus le choix.  
Nous serons tous, dans nos pauvres existences, courageux  
à un moment ou un autre. Ne soyez pas impatients. »

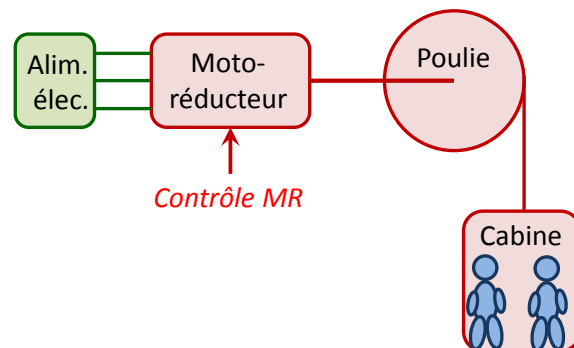
Caroline Laurent, in Rivage de la colère

Cette seconde séance conserve le point focal de la première séance et analyse le besoin de motorisation d'un nouveau système. Cette analyse s'appuie sur les outils de fondamentaux de la mécanique établis par Newton, en envisageant cette fois-ci les mouvements de translation et rotation.

Cette nouvelle étude porte sur le cas d'usage de l'ascenseur. Nous étudierons l'époque rêvée où, à midi, l'ascenseur de la tour Montparnasse amenait les clients au restaurant panoramique « Ciel de Paris ».

### 0. Avant la séance : préparer sa boîte à outils

- 0.1. Rappeler la relation fondamentale de la dynamique dans le cas d'un solide en rotation.
- 0.2. Donner l'expression littérale du moment d'inertie par rapport à un axe  $\Delta$ .



On s'intéresse au dimensionnement de la motorisation de l'ascenseur rapide de la **Tour** Montparnasse. Il permet de s'élever de 196 m (56 étages) en 38 s. Pour atteindre sa vitesse maximale, il accélère constamment pendant 3 s. Pour s'arrêter à l'étage demandé, il décélère constamment pendant 3 s.

La **cabine** de l'ascenseur

- a une masse de  $M_{cab} = 1000 \text{ kg}$
- peut emporter une masse utile de  $M_{ut} = 1000 \text{ kg}$  (12 personnes)

Elle est tractée par un câble de masse faible, lui-même relié à une **poulie motrice**

- en acier inoxydable de masse volumique :  $\rho = 9000 \text{ kg.m}^{-3}$
- en forme de cylindre creux avec :  $R_{int} = 0,9 \text{ m}$ ,  $R_{ext} = 1,0 \text{ m}$  et  $L = 2,0 \text{ m}$

Par simplicité, les **pertes** sont négligées.

✍ On demande :

### 1. Vitesse de croisière

Etablissez la vitesse de croisière  $V_p$  de la cabine d'ascenseur.

### 2. Moment d'inertie de la poulie motrice

2.1. Etablir que le moment d'inertie de la poulie par rapport à son axe de rotation est donnée par :

$$J_{\Delta} = \frac{M}{2} (R_{int}^2 + R_{ext}^2)$$

où  $M$  est la masse de la poulie.

2.2. Faire l'application numérique et comparer

- a) les masses d'inertie  $M$  et  $M'$
- b) ainsi que les moments d'inertie  $J_{\Delta}$  et  $J'_{\Delta}$

dans le cas d'un cylindre creux et dans le cas d'un cylindre plein. Pourquoi les rapports sont-ils différents ?

### 3. Moment du couple, puissance et énergie totale nécessaires pour assurer la montée

Dans cette partie, on souhaite évaluer le moment du couple et la puissance instantanés nécessaires à tout instant pour assurer la montée. Pour cela, nous allons subdiviser le problème en sous-problèmes élémentaires interconnectés.

3.1. Système étudié : cabine

Appliquer le principe fondamental de la dynamique pour déterminer la tension du câble à son point d'attache avec la cabine.

3.2. Système étudié : câble

- a) Appliquer le principe fondamental de la dynamique pour déterminer la tension du câble à son point de contact avec la poulie motrice.
- b) Que devient-il si on néglige la masse du câble ?
- c) Cette hypothèse est-elle « raisonnable » dans le cas étudié de la Tour Montparnasse ?

3.3. Système étudié : poulie motrice

- a) Appliquer le principe fondamental de la dynamique pour déterminer le moment du couple moteur.
- b) Décomposer cette expression en une partie statique et une partie dynamique.
- c) Tracer l'évolution du moment du couple moteur en fonction du temps. (ascenseur en pleine charge)
- d) Tracer, en concordance des temps, l'évolution de la puissance motrice en fonction du temps.
- e) En déduire l'énergie nécessaire pour accomplir la montée complète. Cette valeur était-elle prédictible ? Pourquoi ?

#### 4. Le contrepoids

Madame Schindler, responsable du projet d'implantation d'ascenseur, est effrayée par les prix et les volumes des motoréducteurs qu'elle découvre dans le catalogue Leroy-Somer (groupe Nidec). Heureusement, sa jeune recrue Myriam, qui a beaucoup joué avec son jeune frère à la balançoire, est convaincue qu'on peut réduire les 3 indicateurs prix, volume, énergie en plaçant un contrepoids à l'autre extrémité du câble. Grâce à son excellente formation initiale à Sorbonne Université, elle tient à le prouver à sa responsable.



##### 4.1. Système avec le contrepoids

- Redessiner le système avec l'ajout de l'idée de Myriam.
- Quelle masse de contrepoids adopteriez-vous afin de prévoir toutes les possibilités de masse utile embarquée ?

##### 4.2. Système étudié : poulie motrice

En s'appuyant sur la démarche précédente,

- Déterminer directement le moment du couple moteur nécessaire pour l'ascension de la cabine.
- Décomposer cette expression en une partie statique et une partie dynamique et comparer leur évolution par rapport au système de départ. Le principe du contre poids est-il favorable pour les deux composantes.
- Tracer l'évolution du moment du couple moteur en fonction du temps. (ascenseur en pleine charge)
- Tracer, en concordance des temps, l'évolution de la puissance motrice en fonction du temps.
- En déduire l'énergie nécessaire pour accomplir la montée complète. Cette valeur était-elle prédictible ? Pourquoi ?
- Comparer les nouvelles valeurs obtenues avec celles de la première étude. L'idée du contrepoids permet-elle d'améliorer les indicateurs de performance précités ?

*Fin de la partie visée. La curiosité peut nous pousser à aller plus loin...*



## 5. Descente à vide de la cabine

C'est midi, heure d'affluence pour profiter d'un repas au « Ciel de Paris ». A peine ses passagers débarqués, la cabine descend à vide chercher d'autres clients.

En se fondant sur la partie précédente, tracer en concordance des temps, les évolutions temporelles suivantes :

- a) la vitesse de la cabine.
- b) le moment du couple moteur nécessaire à ce nouveau trajet.
- c) la puissance électrique injectée au moto-réducteur.

## 6. Réducteur mécanique de vitesse

Madame Schindler choisit un moteur électrique triphasé du fabricant français Leroy-Somer permettant d'atteindre une puissance crête instantanée de  $P_{pic} = 200 \text{ kW}$ . Elle constate que, arguant de leur compacité, le fabricant ne propose que des machines électriques tournant à une vitesse nominale de  $N_{nom} = 3000 \text{ tours/min}$ .

De plus, le moteur choisi possède un moment d'inertie de  $J_{mot} = 0,5 \text{ kg.m}^2$ . Totalement confiante dans les capacités techniques de Myriam, elle lui demande de vérifier que ce choix ne remet pas en cause les ordres de grandeurs calculés précédemment.



### 6.1. Rapport de transformation du réducteur mécanique

- a) Déterminer  $r$ , le rapport de transformation du réducteur de vitesse à intercaler entre l'axe de la machine électrique et l'axe de poulie.
- b) Déterminer alors le couple maximal  $C_{mot,pic}$  que devra fournir la machine électrique. (sous l'hypothèse de l'absence de pertes dans le réducteur)

**6.2.** Ecrire la relation fondamentale de la dynamique de la machine et montrer que son moment d'inertie est faible devant les autres moments d'inertie ramenés sur cet axe de rotation.

## 7. Inauguration

### 7.1. Contrôle du respect du cahier des charges

Lors de l'inauguration, Myriam, qui veut vérifier que la commande de l'ascenseur, élaborée par son collègue répond bien au cahier des charges, décide de venir avec son pèse personne. Dans sa salle de bains, Myriam relève une masse de 50 kg.

- a) Cette indication va-t-elle changer lors du trajet ?
- b) Comment Myriam peut-elle en déduire que le cahier des charges de l'ascenseur rapide de Montparnasse est respecté ?

### 7.2. Un abonnement EDF onéreux

Lors du cocktail d'inauguration, le responsable de la Tour Montparnasse vient se plaindre à Myriam du coût exorbitant de l'abonnement EDF qui, en effet, augmente rapidement avec la puissance souscrite. Myriam qui a bien en tête les ordres d'idées des « packs batterie » embarqués dans les véhicules électriques pour particulier (Note : La capacité des batteries des voitures électriques de série varie généralement entre 15 et 100 kWh) lui dit qu'elle peut lui proposer un aménagement de l'installation à faible surcoût d'investissement. En retour, cette nouvelle conception lui permettra de réduire de manière significative ses frais opérationnels.

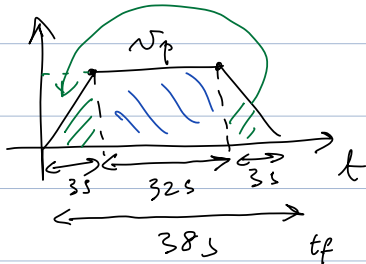
- a) Que va-t-elle proposer à madame Schindler, sa responsable de projet, pour que leur société d'ingénierie continue à remporter les appels d'offres sur les ascenseurs ?
- b) Que va-t-il falloir également prévoir pour un bon fonctionnement du nouveau système ?

☺ Les cours de S5 vous ont appris à élaborer le contrôle de ces deux cas d'usage (voiture et ascenseur)...



👉 A bientôt pour une exploration des principes de l'électromagnétisme régissant les moteurs électriques de puissances supérieures au Watt...

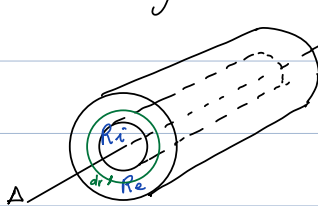
1)



$$\Delta z = 196 \text{ m} = \int_{t_i}^{t_f} \left( \frac{dz}{dt} \right) dt$$

$$\Delta z = v_p \cdot (\Delta t_p + \Delta t_{acc}) \Rightarrow v_p = \frac{\Delta z}{\Delta t_p + \Delta t_{acc}} = 20,2 \text{ m/s}$$

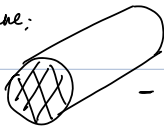
$$2) \quad J_A = \int r^2 dm = \int_{r=R_i}^{r=R_e} r^2 \cdot \rho (2\pi r \cdot dr \cdot L)$$



$$= \rho \cdot 2\pi \cdot L \left[ \frac{r^4}{4} \right]_{R_i}^{R_e}$$

$$= \rho \frac{\pi L}{2} (R_e^2 - R_i^2) (R_i^2 + R_e^2)$$

volume:



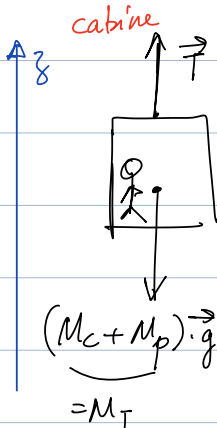
$$\pi R_e^2 L - \pi R_i^2 L$$

$$= \frac{M}{2} (R_i^2 + R_e^2)$$

$$\text{AN } M = 10744 \text{ kg} \approx 0,19 \cdot M' \quad \begin{matrix} \nearrow \text{creux} \\ \nearrow \text{plein} \end{matrix}$$

$$J_A = 9724 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \approx 0,34 \cdot J'_A$$

3)

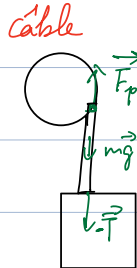


$$\vec{T} + M_T \cdot \vec{g} = M_T \cdot \vec{a}_z$$

Sum  $O_z$ :

$$T - M_T g = M_T a$$

$$\Rightarrow T = M_T (a + g)$$



$$\vec{F}_p + m\vec{g} + (-\vec{T}) = m\vec{a}_z$$

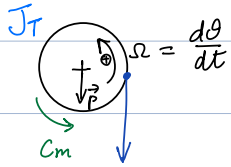
Sum  $O_z$ :

$$F_p = T + m(a + g)$$

$$F_p = (M_T + m)(a + g)$$

$$F_p = M_T(a + g) \quad m \ll M_T$$

3 *poulie*



$$\sum \vec{r} \cdot \vec{F}_{\text{ext} \rightarrow \text{syst}} = J_T \frac{d\Omega}{dt}$$

$$C_m + 0 + \vec{F}_{cp} \cdot R = J_T \frac{d\Omega}{dt} \quad \begin{matrix} v = R \cdot \Omega \\ a = R \cdot \gamma \end{matrix}$$

$$= \frac{J_T}{R} \cdot a$$

$$F_{cp} = -F_{p \rightarrow c}$$

$$C_m - M_T(a+g) \cdot R = \frac{J_T}{R} \cdot a$$

$$C_m = +M_T g R + a \left( \frac{J_T}{R} + M_T R \right)$$

$$\vec{F}_{cp} = F_{cp} \cdot \vec{u}_g$$

avec  $F_{cp} < 0$

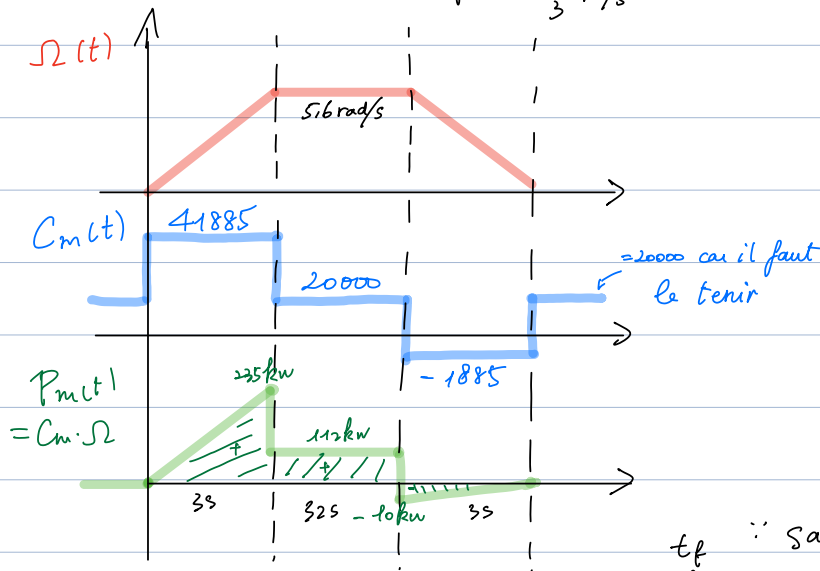
$$C_{\text{stat}} = M_T g R = 20000 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$C_{\text{dyna}} = a \cdot \left( \frac{J_T}{R} + M_T R \right) = \pm 21885 \text{ N} \cdot \text{m}$$

11724 même 0.

$$20.2 \text{ km/h} \rightarrow 5.6 \text{ m/s}$$

$$\begin{cases} + \frac{5.6}{3} \text{ m/s}^2 \\ 0 \\ - \frac{5.6}{3} \text{ m/s}^2 \end{cases}$$



$$W = \text{Poids} \times \text{distance}$$

$$= 20000 \text{ N} \cdot 196 \text{ m}$$

$$= 3.92 \text{ MJ}$$

$$W = \int_{t_i}^{t_f} P_m(t) dt \quad \because \text{sans pertes}$$

$$= 3 \cdot \frac{235}{2} + 3 \cdot 112 - 3 \cdot \frac{10}{2}$$

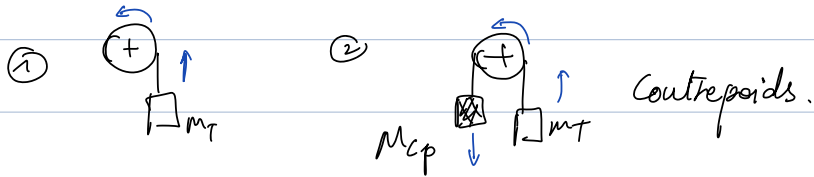
$$= 3.92 \text{ MJ} = \Delta E_{\text{mot}}$$

$$C_m + M_{cp} R - M_T(a+g) \cdot R = \frac{J_T}{R} \cdot a$$

$$C_m = -M_{cp} R + M_T a R + M_T g R + \frac{J_T}{R} \cdot a$$

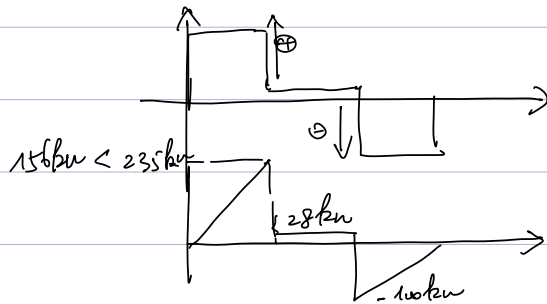
$$= (M_T - M_{cp}) g \cdot R + a \left( \frac{J_T}{R} + (M_T + M_{cp}) \cdot R \right)$$

4)



$$① \quad C_m = + M_T g R + a \left( \frac{J_T}{R} + M_T R \right)$$

$$② \quad C_m = (M_T - M_{cp}) g R + a \left( \frac{J_T}{R} + (M_T + M_{cp}) R \right)$$



$$E = (M_T - M_{cp}) \cdot g \cdot \Delta z$$

↑  
Système de stockage en freinage.

$$6) \quad 3000 \text{ tr/min} = 314 \text{ rad/s} \quad \longleftrightarrow \quad 5.6 \text{ rad/s}$$

$$\gamma = \frac{\Omega_{\text{lent}}}{\Omega_{\text{rapide}}} = \frac{5.6}{314} = 0.018$$

$$\Omega_{\text{lent}} = \frac{\Omega}{\gamma} + r^2 J_{\text{mot}}$$

$$C_{\text{mot}} = \gamma \cdot C_{\text{stat}} = \gamma (M_T - M_{cp}) g R$$

$$+ r^2 \left( \frac{J_T}{R} + (M_T + M_{cp}) R \right) \cdot a$$

$$+ \left[ J_{\text{mot}} + r^2 \left( \frac{J_T}{R} + (M_T + M_{cp}) R \right) \right] \cdot a$$

