

Modéliser le comportement des systèmes mécaniques dans le but d'établir une loi de comportement en utilisant les méthodes énergétiques.

Sciences
Industrielles de
l'Ingénieur

Cours

Chapitre 1 Approche énergétique

Savoirs et compétences :

- Mod2.C16 : torseur cinétique
- Mod2.C17 : torseur dynamique
- Res1.C1.SF1 : proposer une démarche permettant la détermination de la loi de mouvement

1	Introduction	2
1.1	Objectif de la modélisation	2
2	Puissance	2
2.1	Puissance d'une action mécanique extérieure à un ensemble matériel	2
2.2	Puissance d'une action mécanique extérieure à un solide	2
2.3	Puissance d'actions mutuelles entre deux solides	2
2.4	Puissances d'actions mutuelles dans les liaisons	3
3	Travail	3
3.1	Définition	3
3.2	Travail conservatif	3
4	Énergie cinétique	4
4.1	Définition	4
4.2	Propriétés	4
4.3	Énergie cinétique équivalente	5
5	Théorème de l'énergie cinétique	5
5.1	Introduction	5
5.2	Énoncé pour un solide	5
5.3	Énoncé pour un ensemble de solides	5
6	Notion de rendement énergétique	5
6.1	Définition du rendement d'une chaîne fonctionnelle	5
6.2	Détermination d'une puissance dissipée	6
1		82

1 Introduction

1.1 Objectif de la modélisation

Dans ce chapitre nous aborderons les notions de **puissance**, **travail**, et **énergie**. Ces notions sont fondamentales pour :

- dimensionner des composants d'une chaîne d'énergie en terme de puissance transmissible;
- déterminer des équations de mouvement pour prévoir les performances d'un système;
- estimer le rendement d'une chaîne complète d'énergie.

2 Puissance

2.1 Puissance d'une action mécanique extérieure à un ensemble matériel

Définition On définit la **puissance d'une action mécanique extérieure** à un ensemble matériel (E) en mouvement par rapport à un référentiel R subissant une densité d'effort $\vec{f}(M)$ (où M est un point courant de (E)) comme :

$$\mathcal{P}(\text{ext} \rightarrow E/R) = \int_{M \in E} \vec{f}(M) \cdot \overrightarrow{V(M \in E/R)} dV.$$

R On appellera **puissance galiléenne**, la puissance d'un ensemble matériel (E) en mouvement dans un **référentiel galiléen** R_g : $\mathcal{P}(\text{ext} \rightarrow E/R_g)$.

! **Dimensions et homogénéité.**

- Une puissance est une **grandeur scalaire** s'exprimant en *Watt*.
- Elle est homogène à un produit entre un effort et une vitesse et peut donc s'exprimer en unité SI en Nms^{-1} .
- Historiquement on a utilisé longtemps les « chevaux » ou « cheval vapeur » (1 ch = 736 W).

Propriété — Calcul des actions mécaniques s'appliquant sur un ensemble E . On considère un ensemble matériel E composé de n solides S_i .

Dans la pratique pour calculer la puissance totale des actions mécaniques s'appliquant sur E dans son mouvement par rapport à R il faut sommer toutes les puissances s'appliquant sur les S_i venant de l'extérieur de E :

$$\mathcal{P}(\text{ext} \rightarrow E/R) = \sum_{\forall S_i \in E} \mathcal{P}(\text{ext} \rightarrow S_i/R).$$

2.2 Puissance d'une action mécanique extérieure à un solide

Définition — Puissance d'une action mécanique extérieure à un solide (S). La **puissance d'une action mécanique extérieure** à un solide (S) en mouvement dans un référentiel R peut s'écrire comme le comoment entre le torseur des actions mécaniques que subit (S) et le torseur cinématique du mouvement de S dans le référentiel R .

$$\mathcal{P}(\text{ext} \rightarrow S/R) = \{\mathcal{T}(\text{ext} \rightarrow S)\} \otimes \{\mathcal{V}(S/R)\}.$$

! On veillera bien, pour effectuer le **comoment** de deux torseurs, à les avoir exprimé au préalable **en un même point**.

R

- Le comoment des torseurs est défini par $\{\mathcal{T}(\text{ext} \rightarrow S)\} \otimes \{\mathcal{V}(S/R)\} = \left\{ \begin{array}{c} \overrightarrow{R(\text{ext} \rightarrow S)} \\ \mathcal{M}(P, \text{ext} \rightarrow S) \end{array} \right\}_P \otimes \left\{ \begin{array}{c} \overrightarrow{\Omega(S/R)} \\ \overrightarrow{V(P \in S/R)} \end{array} \right\}_P$
 $= \overrightarrow{R(\text{ext} \rightarrow S)} \cdot \overrightarrow{V(P \in S/R)} + \mathcal{M}(P, \text{ext} \rightarrow S) \cdot \overrightarrow{\Omega(S/R)}$.
- Lorsque le torseur cinématique de S/R est un couple (mouvement de translation) alors en tout point A la puissance est alors donnée par $\mathcal{P}(\text{ext} \rightarrow S/R) = \overrightarrow{R(\text{ext} \rightarrow S)} \cdot \overrightarrow{V(P \in S/R)} \forall P$.
- Lorsque le torseur des actions mécaniques est un torseur couple alors la puissance est donnée par $\mathcal{P}(\text{ext} \rightarrow S/R) = \mathcal{M}(P, \text{ext} \rightarrow S) \cdot \overrightarrow{\Omega(S/R)} \forall P$.

2.3 Puissance d'actions mutuelles entre deux solides

Définition — Puissance d'actions mutuelles entre deux solides. Soient deux solides (S_1) et (S_2) distincts, en mouvement par rapport à un référentiel galiléen R_g , et exerçant une action mécanique l'un sur l'autre. La **puissance des actions mutuelles** entre (S_1) et (S_2), dans leur mouvement par rapport au repère R , est :

$$\mathcal{P}(S_1 \leftrightarrow S_2/R_g) = \mathcal{P}(S_1 \rightarrow S_2/R_g) + \mathcal{P}(S_2 \rightarrow S_1/R_g).$$

La **puissance des actions mutuelles** entre (S_1) et (S_2) **est indépendante du repère R** . Ainsi,

$$\mathcal{P}(S_1 \leftrightarrow S_2/R) = \mathcal{P}(S_1 \leftrightarrow S_2).$$

R

- On peut parler parfois de **puissance des inter-efforts**.
- Pour un ensemble E , on peut exprimer l'ensemble de la puissance des inter-effort comme la puissance intérieure à l'ensemble E :

$$\mathcal{P}_{\text{int}}(E) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{j-1} \mathcal{P}(S_i \leftrightarrow S_j).$$

2.4 Puissances d'actions mutuelles dans les liaisons

Définition — Puissances d'actions mutuelles dans les liaisons. Si deux solides S_1 et S_2 sont en liaison, on a :

$$\mathcal{P}(S_1 \leftrightarrow S_2) = \{\mathcal{T}(S_1 \rightarrow S_2)\} \otimes \{\mathcal{V}(S_2/S_1)\}.$$

La **liaison parfaite** si et seulement si quel que soit le mouvement de S_2 par rapport à S_1 autorisé par la liaison entre ces deux solides, la **puissance des actions mutuelles entre S_1 et S_2 est nulle**.

$$\mathcal{P}(S_1 \leftrightarrow S_2) = 0.$$

R

- La notion de **liaison parfaite** s'étend facilement à une liaison équivalente à plusieurs liaisons placées en parallèle et en série entre deux solide S_1 et S_2 . Pour cela il suffit de considérer les torseurs d'action mécanique transmissible et cinématique de la liaison équivalente.
- L'hypothèse d'une liaison parfaite a pour avantage de mettre en place le théorème de l'énergie cinétique (qui est une conséquence du principe fondamental de la dynamique) sans préjuger de la technologie de la liaison.

3 Travail

3.1 Définition

Définition — Travail. Le travail entre deux instants t_1 et t_2 d'une action mécanique s'exerçant sur un ensemble matériel E dans son mouvement par rapport au repère R est donné par :

$$W_{t_1}^{t_2}(\text{ext} \rightarrow E/R) = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{P}(\text{ext} \rightarrow E/R) dt.$$

R

On peut également définir le travail élémentaire par :

$$dW(\text{ext} \rightarrow E/R) = \mathcal{P}(\text{ext} \rightarrow E/R) dt.$$

- Le travail est une grandeur scalaire.
- L'unité de travail est le **Joule**.
- Le travail est homogène au **produit entre une force et une distance**.

3.2 Travail conservatif

Définition — Travail conservatif. On dit que le **travail est conservatif** (noté $W_c^{t_1}(\text{ext} \rightarrow E/R)$) s'il est indépendant du chemin suivi pour passer de l'état initial (instant t_1) à l'état final (instant t_2). Dans ce cas là il existe une grandeur appelée énergie potentielle de l'action mécanique extérieure à E dans son mouvement par rapport à R qui vérifie :

$$dW_c(\text{ext} \rightarrow E/R) = -dE_p(\text{ext} \rightarrow E/R) \quad \text{avec} \quad dW_c(\text{ext} \rightarrow E/R) = \mathcal{P}(\text{ext} \rightarrow E/R) dt.$$

On peut également l'écrire sous la forme :

$$\mathcal{P}(\text{ext} \rightarrow E/R) = - \frac{dE_p(\text{ext} \rightarrow E/R)}{dt}.$$

R

- On dit que la puissance à travail conservatif dérive d'une énergie potentielle (au signe près).
- L'énergie potentielle est une primitive de la puissance. Elle est donc définie à une constante près arbitraire.

3.2.1 Énergie potentielle de la pesanteur

Définition — Énergie potentielle de la pesanteur. L'énergie potentielle associée à l'action de la pesanteur sur un ensemble matériel (E) de masse m dans son mouvement par rapport à R est donnée par :

$$E_p(g \rightarrow E/R) = m g z_G + k.$$

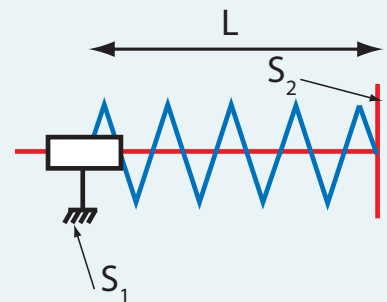
Où z_G correspond à la position du centre de gravité G de S suivant la verticale ascendante \vec{z} (colinéaire au champs de pesanteur \vec{g}) et k une constante.

3.2.2 Énergie potentielle associée à un ressort

Définition — Énergie potentielle associée à un ressort.

L'énergie potentielle associée à l'action d'un ressort r de raideur K et de longueur à vide L_0 situé entre deux solides S_1 et S_2 dans son mouvement par rapport à R est donnée par :

$$E_p(r \rightarrow S_1, S_2/R) = \frac{K}{2}(L - L_0)^2 + k \quad \text{où } k \text{ est une constante.}$$



4 Énergie cinétique

4.1 Définition

Définition — Énergie cinétique. On définit l'énergie cinétique E_c d'un système matériel S en mouvement dans un référentiel R comme la somme des carrés de la vitesse en chaque point courant P de S pondéré de la masse élémentaire :

$$E_c(S/R) = \frac{1}{2} \int_{P \in S} (\vec{V}(P/R))^2 dm.$$

4.2 Propriétés

Propriété — Expression avec les comoments. L'énergie cinétique peut s'exprimer comme le comoment du torseur cinématique et du torseur cinétique :

$$E_c(S/R) = \frac{1}{2} \{ \mathcal{V}(S/R) \} \otimes \{ \sigma(S/R) \}.$$



Il faudra bien veiller à ce que chacun des torseurs soit exprimé en un même point.

Propriété — Cas particuliers.

- Solide S de masse M de centre d'inertie G en mouvement de **translation** par rapport à R :

$$E_c(S/R_0) = \frac{1}{2} M \overline{V(G \in S/R)}^2.$$

- Solide S de moment d'inertie $I_{Oz}(S)$ en mouvement de rotation par rapport à l'axe fixe (O, \vec{z}) par rapport R :

$$E_c(S/R) = \frac{1}{2} I_{O_z}(S) \overline{\Omega(S/R)}^2.$$

4.3 Énergie cinétique équivalente

Définition — Énergie cinétique équivalente. Lorsqu'un problème ne comporte qu'un seul degré de liberté et pour simplifier les calculs, on peut exprimer l'énergie cinétique galiléenne d'un ensemble E composé de n solides S_i en fonction d'un seul paramètre cinématique. On peut alors écrire $E_c(E/R)$

- avec son **inertie équivalente** $J_{eq}(E)$ (en kg m^2) rapportée à un paramètre de rotation $\dot{\theta}(t)$:

$$E_c(E/R_g) = \frac{1}{2} J_{eq}(E) \dot{\theta}^2.$$

- avec sa **masse équivalente** $M_{eq}(E)$ (en kg) rapportée à un paramètre de translation $\dot{x}(t)$:

$$E_c(E/R_g) = \frac{1}{2} M_{eq}(E) \dot{x}^2.$$

5 Théorème de l'énergie cinétique

5.1 Introduction

Le théorème de l'énergie cinétique est la traduction du Principe Fondamental de la Dynamique d'un point de vue énergétique.

5.2 Énoncé pour un solide

Théorème — Théorème de l'énergie cinétique. La dérivée par rapport au temps de l'énergie cinétique d'un solide S dans son mouvement par rapport au référentiel galiléen R_g est égale à la puissance galiléenne des actions mécaniques extérieures à S . Soit :

$$\frac{dE_c(S/R_g)}{dt} = \mathcal{P}(\vec{S} \rightarrow S/R_g).$$

5.3 Énoncé pour un ensemble de solides

Théorème — Théorème de l'énergie cinétique pour un ensemble de solides. Soit (E) un ensemble de n solide (S_1, S_2, \dots, S_n) en mouvement par rapport à un repère galiléen R_g . Le théorème de l'énergie cinétique s'écrit alors :

$$\frac{dE_c(E/R_g)}{dt} = \mathcal{P}(\text{ext} \rightarrow E/R_g) + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{j-1} \mathcal{P}(S_i \leftrightarrow S_j/R_g) = \mathcal{P}(\text{ext} \rightarrow E/R_g) + \mathcal{P}_{\text{int}}(E).$$

Avec :

- $\mathcal{P}_{\text{int}}(E)$ la puissance intérieure à E qui est nulle s'il n'y a pas d'apport d'énergie interne ni de dissipation (liaisons parfaites) ;
- $\mathcal{P}(\text{ext} \rightarrow E/R_g)$, la puissance galiléenne de E dans son mouvement par rapport à R_g .



- Dans le théorème de l'énergie cinétique, contrairement au principe fondamental de la dynamique, on tient compte de la puissance des actions mutuelles donc internes à l'ensemble matériel E que l'on considère.
- Ce théorème permet d'obtenir une seule équation scalaire. Cette méthode est donc moins riche que le principe fondamental de la dynamique mais permet d'obtenir quasiment directement les équations de mouvements.
- Pour obtenir une équation de mouvement (*ie* éliminer les inconnues en actions mécaniques) il faut alors combiner d'autres équations issues des théorèmes généraux de la dynamique.

6 Notion de rendement énergétique

6.1 Définition du rendement d'une chaîne fonctionnelle

Une étude dynamique d'une chaîne fonctionnelle peut se décomposer en deux parties :

- en **régime permanent** (variation d'énergie cinétique négligeable) : étude des effets dissipatifs pour estimer une puissance nominale des actionneurs ;
- en **régime transitoire** : évaluation du complément de puissance pour permettre au système de fonctionner.

Définition — Rendement d'une chaîne fonctionnelle. Le rendement se définit **en régime permanent** comme la puissance utile sur la puissance d'entrée d'une chaîne fonctionnelle :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}(\text{utile})}{\mathcal{P}(\text{entrée})}.$$

- $\eta \in [0, 1]$;
- $\mathcal{P}(\text{entrée}) > 0$ définit la puissance fournie par l'actionneur **en régime permanent** ;
- $\mathcal{P}(\text{utile}) > 0$ définit la puissance fournie à l'aval d'une chaîne fonctionnelle (effecteur par exemple) **en régime permanent**.

Propriété — Rendement global d'une chaîne d'énergie. Le **rendement global** d'une chaîne d'énergie comportant n éléments de rendements η_i est donné par :

$$\eta = \prod_{i=1}^n \eta_i \leq 1.$$

Chacun des rendements successifs η_i étant au plus égale à 1, le rendement global est nécessairement inférieur ou égal au plus mauvais rendement.

6.2 Détermination d'une puissance dissipée

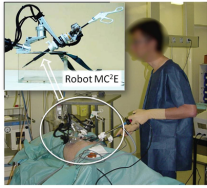
Propriété — Estimation des dissipations. On peut évaluer en régime permanent les pertes ou puissance dissipée à partir de la connaissance du rendement η :

$$\mathcal{P}(\text{dissipée}) = (1 - \eta) \cdot \mathcal{P}(\text{entrée}).$$

Références

[1] Émilien Durif, *Approche énergétique des systèmes*, Lycée La Martinière Monplaisir, Lyon.

Application 1



Micromanipulateur compact pour la chirurgie endoscopique (MC²E)

Concours Commun Mines Ponts 2016

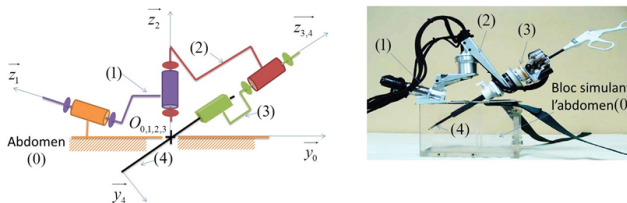
Savoirs et compétences :

- Mod2.C18.SF1 : Déterminer l'énergie cinétique d'un solide, ou d'un ensemble de solides, dans son mouvement par rapport à un autre solide.
- Res1.C1.SF1 : Proposer une démarche permettant la détermination de la loi de mouvement.

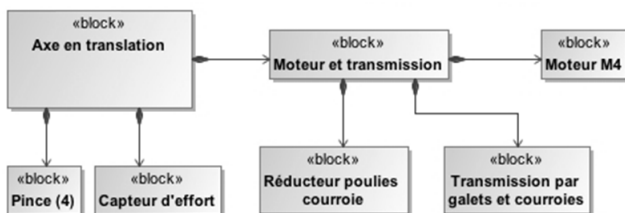
Mise en situation

Le robot MC²E est utilisé par des chirurgiens en tant que troisième main lors de l'ablation de la vésicule biliaire. La cinématique du robot permet de garantir que le point d'insertion des outils chirurgicaux soit fixe dans le référentiel du patient.

Le robot est constitué de 3 axes de rotations permettant de mettre en position une pince. La pince est animée d'un mouvement de translation permettant de tirer la vésicule pendant que le chirurgien la détache du foie.



Les blocs permettant de réaliser le mouvement de translation sont présentés ci-dessous.



Pour cela un moto réducteur entraîne via 3 systèmes poulie-courroie 3 galets qui entraînent la pince. 3 autres galets permettent de guider la pince. Au total 6 galets permettent d'entraîner et guider la pince par adhérence. Le premier étage de poulie-courroie permet de réduire la vitesse du moteur. Les deux autres étages ont un rapport de réduction unitaire (voir figure au verso).

Objectif Modéliser l'équation de mouvement et la caractériser en fonction des actions mécaniques extérieures, du couple moteur et des grandeurs cinétiques appropriées.

Équation de mouvement

Hypothèses

- La compensation de la pesanteur est parfaitement réalisée (système non étudié dans le cadre de cet exercice). On ne tiendra pas compte des actions mécaniques dues à la pesanteur par la suite.
- Les axes de rotation du MC²E sont asservis en position. En conséquence, les repères liés aux solides (1), (2) et (3) seront supposés fixes par rapport au repère lié au bâti (0) dont le repère associé est supposé galiléen.
- L'instrument chirurgical est vertical.
- Toutes les courroies sont inextensibles et il n'y a pas de glissement entre les galets et les courroies.
- Tous les galets G_i ont même rayon noté R_g et roulent sans glisser sur la pince (4) au niveau des points I_1 à I_6 .
- La poulie réceptrice est liée à un pignon. Ce pignon entraîne un deuxième pignon de même rayon primitif pour assurer la transmission de puissance. Il n'y a pas de glissement en leur point de contact.

Remarque : Dans la suite, toutes les vitesses sont définies par rapport au bâti (0).

Modélisation simplifiée du problème

- La vitesse de rotation du rotor moteur M4 par rapport à son stator fixe (lié au bâti (0)) est notée $\omega_m(t)\vec{x}_0$ où $\omega_m(t) = \frac{d\theta_m(t)}{dt}$ (vitesse de rotation avant réduction de rapport r).
- La poulie motrice a un rayon R_i et tourne à la vitesse $\omega_i(t)$ (vitesse de rotation après réduction de rapport r).
- La poulie réceptrice a un rayon R_e et tourne à la vitesse $\omega_e(t)$.
- Les deux pignons en contact ont même rayon primitif, supposé égal à R_e .
- Le couple du stator sur le rotor moteur M4 est noté $\vec{C}_m = C_m \vec{x}_0$.
- L'action mécanique qu'exerce le ressort sur la pince (4) est modélisable par un glisseur noté $\{\mathcal{T}(\text{ressort} \rightarrow 4)\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}(\text{ressort} \rightarrow 4) = -kz(t)\vec{z}_0 \\ 0 \end{array} \right\}_{O_4}$

où O_4 est le point de contact entre la pince (4) et le ressort, k la raideur du ressort et $z(t)$ la variation de position de l'extrémité de (4) autour de la position d'équilibre.

- On note $\overrightarrow{V}(O_4 \in 4/0) = v(t)\overrightarrow{z_0} = \frac{dz(t)}{dt}\overrightarrow{z_0}$.
- Les masses des courroies sont négligées.

Données

- I_m , moment d'inertie de l'arbre moteur par rapport à son axe de rotation.
- I_r , moment d'inertie du réducteur par rapport à son axe de rotation de sortie.
- I_i , moment d'inertie de la poulie, de rayon R_i , par rapport à son axe de rotation.
- I_e , moment d'inertie de la poulie, de rayon R_e , par rapport à son axe de rotation.
- I_p , moment d'inertie de chaque pignon, de rayon R_e , par rapport à son axe de rotation.
- I_g , moment d'inertie de chaque galet G_i , de rayon R_g , par rapport à son axe de rotation.
- m_4 , masse de la pince (4).
- $r = \frac{\omega_i(t)}{\omega_m(t)}$, rapport de réduction constant du motoréducteur.

L'équation de mouvement est définie par l'équation

différentielle suivante : $J \frac{d^2 \theta_m(t)}{dt^2} = C_m(t) - C_e(t)$ avec :

- J , inertie équivalente à l'ensemble en mouvement, ramenée sur l'arbre moteur;
- $C_e(t)$, couple regroupant l'ensemble des couples extérieurs ramenés à l'arbre moteur, notamment fonction de la raideur du ressort.

Travail demandé

Question 1 Déterminer la relation entre $v(t)$ et $\omega_m(t)$.
Sous hypothèse de conditions initiales nulles, en déduire la relation entre $z(t)$ et $\theta_m(t)$.

Question 2 Réaliser le graphe de structure associé à la translation de la pince.

Question 3 Donner l'expression de l'énergie cinétique de l'ensemble en mouvement par rapport à (0). Définir l'inertie équivalente J ramenée sur l'axe du moteur M4 en fonction, notamment, des moments d'inertie, de m_4 et des données géométriques.

Question 4 Effectuer un bilan des puissances extérieures et intérieures à ce même ensemble. Préciser l'expression analytique de chaque puissance.

Question 5 Par l'application du théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble en mouvement par rapport à (0), déterminer l'expression du terme $C_e(t)$ en fonction des données du problème et de $\theta_m(t)$.

Corrigé résumé

- $v(t) = R_g r \frac{R_i}{R_e} \omega_m(t)$ et $z(t) = R_g r \frac{R_i}{R_e} \theta_m(t)$.
- .
- $J = I_m + (I_r + I_i) r^2 + (I_e + 2I_p + 6I_g) \left(\frac{R_i}{R_e} r \right)^2 + m_4 \left(R_g r \frac{R_i}{R_e} \right)^2$.
- $\mathcal{P}(\text{res} \rightarrow 4/\mathcal{R}_g) = -kz(t) \frac{R_g r R_i}{R_e} \omega_m(t)$,
 $\mathcal{P}(\text{mot} \rightarrow 4/\mathcal{R}_g) = C_m \omega_m(t)$, $\mathcal{P}(\text{pes} \rightarrow E/\mathcal{R}_g) = 0$
et $\mathcal{P}_{\text{int}}(E) = 0$.
- $C_e(t) = k \left(R_g r \frac{R_i}{R_e} \right)^2 \theta_m(t)$.

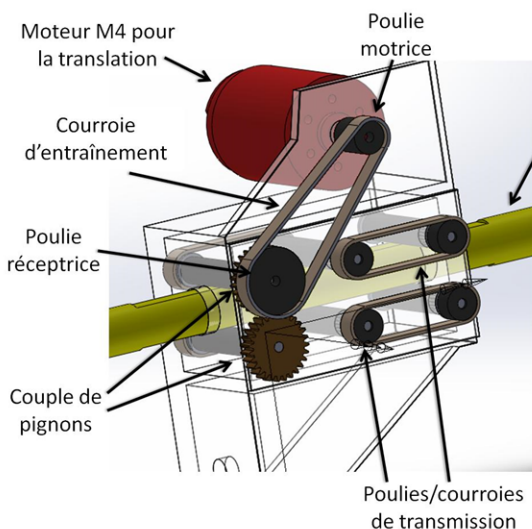


Axe en translation

Exemple de géométrie d'un galet

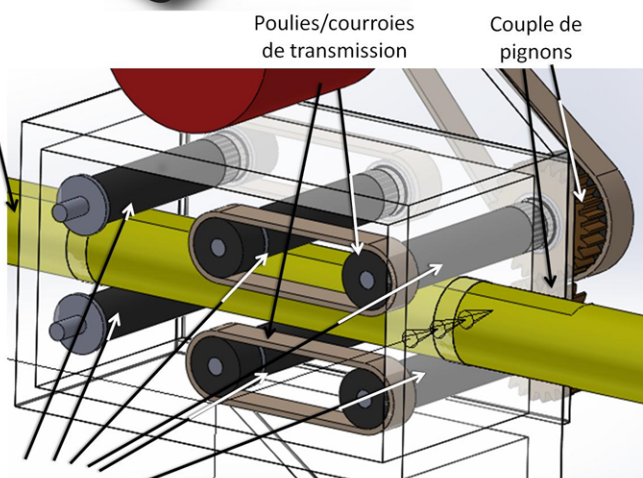
Zone de contact avec la courroie

Zone de contact avec la pince

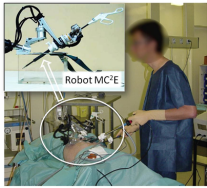


Pince

Galets en contact avec la pince



Colle



Micromanipulateur compact pour la chirurgie endoscopique (MC²E)

Concours Commun Mines Ponts 2016

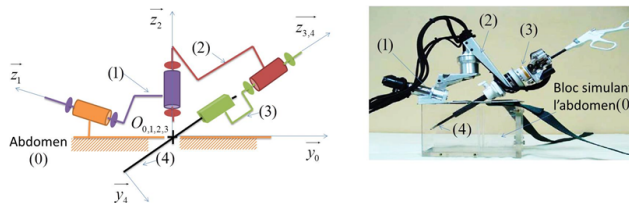
Savoirs et compétences :

- Mod2.C18.SF1 : Déterminer l'énergie cinétique d'un solide, ou d'un ensemble de solides, dans son mouvement par rapport à un autre solide.
- Res1.C1.SF1 : Proposer une démarche permettant la détermination de la loi de mouvement.

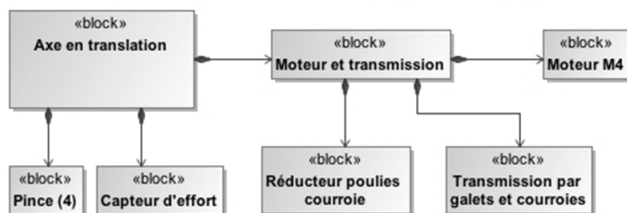
Mise en situation

Le robot MC²E est utilisé par des chirurgiens en tant que troisième main lors de l'ablation de la vésicule biliaire. La cinématique du robot permet de garantir que le point d'insertion des outils chirurgicaux soit fixe dans le référentiel du patient.

Le robot est constitué de 3 axes de rotations permettant de mettre en position une pince. La pince est animée d'un mouvement de translation permettant de tirer la vésicule pendant que le chirurgien la détache du foie.



Les blocs permettant de réaliser le mouvement de translation sont présentés ci-dessous.



Pour cela un moto réducteur entraîne via 3 systèmes poulie-courroie 3 galets qui entraînent la pince. 3 autres galets permettent de guider la pince. Au total 6 galets permettent d'entraîner et guider la pince par adhérence. Le premier étage de poulie-courroie permet de réduire la vitesse du moteur. Les deux autres étages ont un rapport de réduction unitaire (voir figure au verso).

Objectif Modéliser l'équation de mouvement et la caractériser en fonction des actions mécaniques extérieures, du couple moteur et des grandeurs cinétiques appropriées.

Équation de mouvement

Hypothèses

- La compensation de la pesanteur est parfaitement réalisée (système non étudié dans le cadre de cet exercice). On ne tiendra pas compte des actions mécaniques dues à la pesanteur par la suite.
- Les axes de rotation du MC²E sont asservis en position. En conséquence, les repères liés aux solides (1), (2) et (3) seront supposés fixes par rapport au repère lié au bâti (0) dont le repère associé est supposé galiléen.
- L'instrument chirurgical est vertical.
- Toutes les courroies sont inextensibles et il n'y a pas de glissement entre les galets et les courroies.
- Tous les galets G_i ont même rayon noté R_g et roulent sans glisser sur la pince (4) au niveau des points I_1 à I_6 .
- La poulie réceptrice est liée à un pignon. Ce pignon entraîne un deuxième pignon de même rayon primitif pour assurer la transmission de puissance. Il n'y a pas de glissement en leur point de contact.

Remarque : Dans la suite, toutes les vitesses sont définies par rapport au bâti (0).

Modélisation simplifiée du problème

- La vitesse de rotation du rotor moteur M4 par rapport à son stator fixe (lié au bâti (0)) est notée $\omega_m(t)\vec{x}_0$ où $\omega_m(t) = \frac{d\theta_m(t)}{dt}$ (vitesse de rotation avant réduction de rapport r).
- La poulie motrice a un rayon R_i et tourne à la vitesse $\omega_i(t)$ (vitesse de rotation après réduction de rapport r).
- La poulie réceptrice a un rayon R_e et tourne à la vitesse $\omega_e(t)$.
- Les deux pignons en contact ont même rayon primitif, supposé égal à R_e .
- Le couple du stator sur le rotor moteur M4 est noté $\vec{C}_m = C_m \vec{x}_0$.
- L'action mécanique qu'exerce le ressort sur la pince (4) est modélisable par un glisseur noté $\{\mathcal{T}(\text{ressort} \rightarrow 4)\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}(\text{ressort} \rightarrow 4) = -kz(t)\vec{z}_0 \\ 0 \end{array} \right\}_{O_4}$

où O_4 est le point de contact entre la pince (4) et le ressort, k la raideur du ressort et $z(t)$ la variation de position de l'extrémité de (4) autour de la position d'équilibre.

- On note $\overrightarrow{V}(O_4 \in 4/0) = v(t)\overrightarrow{z_0} = \frac{dz(t)}{dt}\overrightarrow{z_0}$.
- Les masses des courroies sont négligées.

Données

- I_m , moment d'inertie de l'arbre moteur par rapport à son axe de rotation.
- I_r , moment d'inertie du réducteur par rapport à son axe de rotation de sortie.
- I_i , moment d'inertie de la poulie, de rayon R_i , par rapport à son axe de rotation.
- I_e , moment d'inertie de la poulie, de rayon R_e , par rapport à son axe de rotation.
- I_p , moment d'inertie de chaque pignon, de rayon R_e , par rapport à son axe de rotation.
- I_g , moment d'inertie de chaque galet G_i , de rayon R_g , par rapport à son axe de rotation.
- m_4 , masse de la pince (4).
- $r = \frac{\omega_i(t)}{\omega_m(t)}$, rapport de réduction constant du motoréducteur.

L'équation de mouvement est définie par l'équation

différentielle suivante : $J \frac{d^2 \theta_m(t)}{dt^2} = C_m(t) - C_e(t)$ avec :

- J , inertie équivalente à l'ensemble en mouvement, ramenée sur l'arbre moteur;
- $C_e(t)$, couple regroupant l'ensemble des couples

extérieurs ramenés à l'arbre moteur, notamment fonction de la raideur du ressort.

Travail demandé

Question 1 Déterminer la relation entre $v(t)$ et $\omega_m(t)$. Sous hypothèse de conditions initiales nulles, en déduire la relation entre $z(t)$ et $\theta_m(t)$.

Question 2 Réaliser le graphe de structure associé à la translation de la pince.

Question 3 Donner l'expression de l'énergie cinétique de l'ensemble en mouvement par rapport à (0). Définir l'inertie équivalente J ramenée sur l'axe du moteur M4 en fonction, notamment, des moments d'inertie, de m_4 et des données géométriques.

Question 4 Effectuer un bilan des puissances extérieures et intérieures à ce même ensemble. Préciser l'expression analytique de chaque puissance.

Question 5 Par l'application du théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble en mouvement par rapport à (0), déterminer l'expression du terme $C_e(t)$ en fonction des données du problème et de $\theta_m(t)$.

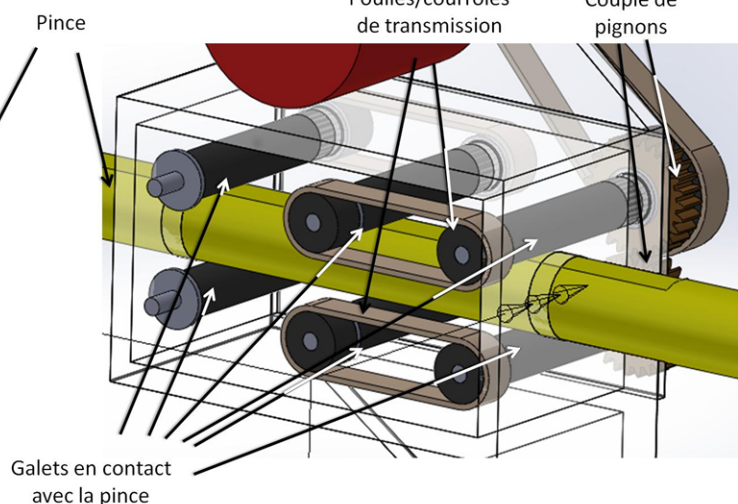
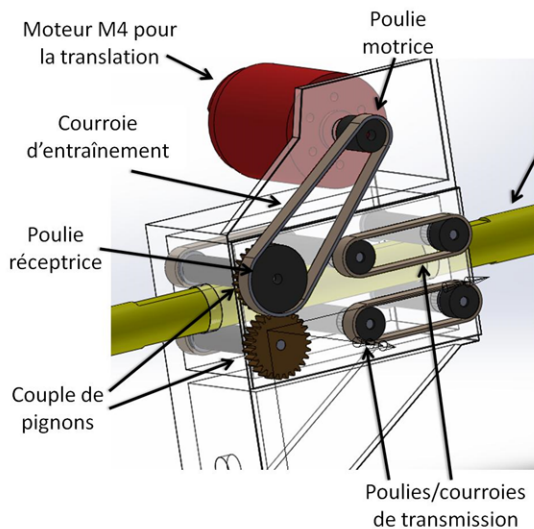


Axe en translation

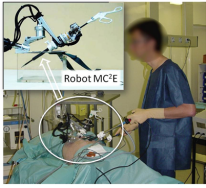
Exemple de géométrie d'un galet

Zone de contact avec la courroie

Zone de contact avec la pince



Application 1 – Corrigé



Micromanipulateur compact pour la chirurgie endoscopique (MC²E)

Concours Commun Mines Ponts 2016

Savoirs et compétences :

- Mod2.C18.SF1 : Déterminer l'énergie cinétique d'un solide, ou d'un ensemble de solides, dans son mouvement par rapport à un autre solide.
- Res1.C1.SF1 : Proposer une démarche permettant la détermination de la loi de mouvement.

Mise en situation

Objectif Modéliser l'équation de mouvement et la caractériser en fonction des actions mécaniques extérieures, du couple moteur et des grandeurs cinétiques appropriées.

Équation de mouvement

Travail demandé

Question 1 Déterminer la relation entre $v(t)$ et $\omega_m(t)$. Sous hypothèse de conditions initiales nulles, en déduire la relation entre $z(t)$ et $\theta_m(t)$.

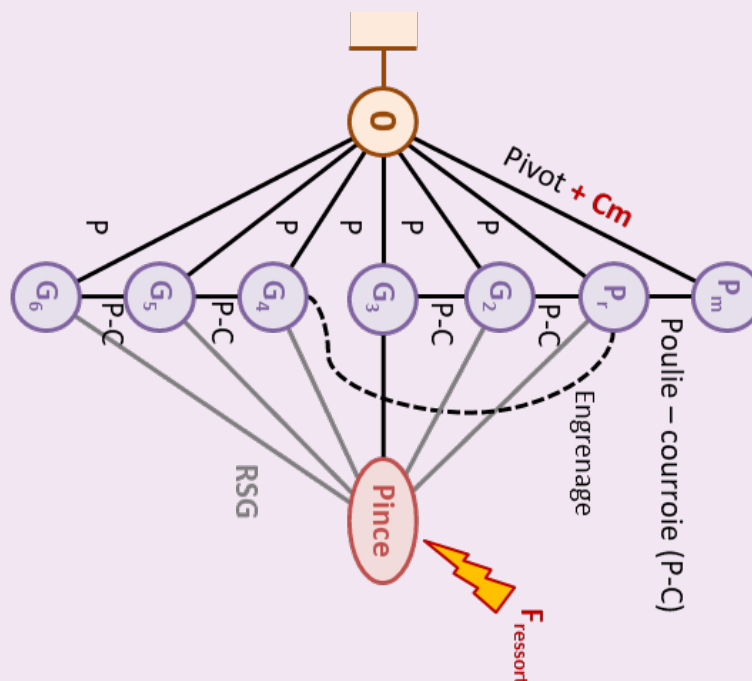
Correction

On a $\omega_i(t) = r \omega_m(t)$. De plus $\frac{\omega_e(t)}{\omega_i(t)} = \frac{R_i}{R_e} \iff \omega_e(t) = \frac{R_i}{R_e} \omega_i(t)$ et donc : $\omega_e(t) = \frac{R_i}{R_e} r \omega_m(t)$.

Enfin, $v(t) = R_g \omega_e(t) = R_g r \frac{R_i}{R_e} \omega_m(t)$. Les conditions initiales étant nulles, $z(t) = R_g r \frac{R_i}{R_e} \theta_m(t)$.

Question 2 Réaliser le graphe de structure associé à la translation de la pince.

Correction



Question 3 Donner l'expression de l'énergie cinétique de l'ensemble en mouvement par rapport à (0). Définir l'inertie équivalente J ramenée sur l'axe du moteur M4 en fonction, notamment, des moments d'inertie, de m_4 et des

données géométriques.

Correction

Tous les solides sont en mouvement « simples » par rapport au référentiel galiléen. On a :

$$\mathcal{E}_c(E/\mathcal{R}_g) = \frac{1}{2} I_m \omega_m(t)^2 + \frac{1}{2} (I_r + I_i) \omega_i(t)^2 + \frac{1}{2} (I_e + 2I_p + 6I_g) \omega_e(t)^2 + \frac{1}{2} m_4 v(t)^2$$

$$\mathcal{E}_c(E/\mathcal{R}_g) = \frac{1}{2} I_m \omega_m(t)^2 + \frac{1}{2} (I_r + I_i) (r \omega_m(t))^2 + \frac{1}{2} (I_e + 2I_p + 6I_g) \left(\frac{R_i}{R_e} r \omega_m(t) \right)^2 + \frac{1}{2} m_4 \left(R_g r \frac{R_i}{R_e} \omega_m(t) \right)^2$$

$$\mathcal{E}_c(E/\mathcal{R}_g) = \frac{1}{2} \left(I_m + (I_r + I_i) r^2 + (I_e + 2I_p + 6I_g) \left(\frac{R_i}{R_e} r \right)^2 + m_4 \left(R_g r \frac{R_i}{R_e} \right)^2 \right) \omega_m(t)^2$$

$$\text{On a donc } J = I_m + (I_r + I_i) r^2 + (I_e + 2I_p + 6I_g) \left(\frac{R_i}{R_e} r \right)^2 + m_4 \left(R_g r \frac{R_i}{R_e} \right)^2.$$

Question 4 Effectuer un bilan des puissances extérieures et intérieures à ce même ensemble. Préciser l'expression analytique de chaque puissance.

Correction

On isole l'ensemble.

Bilan des puissances extérieures

- Action du ressort : $\mathcal{P}(\text{ressort} \rightarrow 4/\mathcal{R}_g) = -kz(t)v(t) = -kz(t)R_g r \frac{R_i}{R_e} \omega_m(t)$.
- Action du moteur : $\mathcal{P}(\text{moteur} \rightarrow 4/\mathcal{R}_g) = C_m \omega_m(t)$.
- Action de la pesanteur : $\mathcal{P}(\text{pesanteur} \rightarrow E/\mathcal{R}_g) = 0$ (La pesanteur est compensée par un système de compensation).

Bilan des puissances intérieures Toutes les liaisons étant supposées parfaites, $\mathcal{P}_{\text{int}}(E) = 0$.

Question 5 Par l'application du théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble en mouvement par rapport à (0), déterminer l'expression du terme $C_e(t)$ en fonction des données du problème et de $\theta_m(t)$.

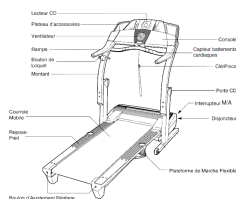
Correction

En appliquant le théorème de l'énergie cinétique on a : $J \dot{\omega}_m(t) \omega_m(t) = -kz(t)R_g r \frac{R_i}{R_e} \omega_m(t) + C_m \omega_m(t) \Rightarrow$

$$J \dot{\omega}_m(t) = -k \left(R_g r \frac{R_i}{R_e} \right)^2 \theta_m(t) + C_m.$$

En utilisant l'équation différentielle du mouvement on a alors : $C_e(t) = k \left(R_g r \frac{R_i}{R_e} \right)^2 \theta_m(t)$.

Application 2



Application 02

Pôle Chateaubriand – Joliot-Curie

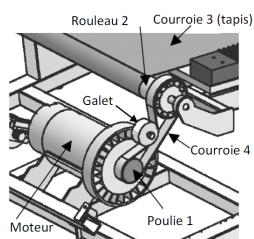
Savoirs et compétences :

- Mod2.C18.SF1 : Déterminer l'énergie cinétique d'un solide, ou d'un ensemble de solides, dans son mouvement par rapport à un autre solide.
- Res1.C1.SF1 : Proposer une démarche permettant la détermination de la loi de mouvement.

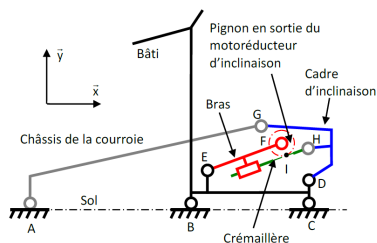
On s'intéresse à un tapis de course dont on donne une description structurale ainsi qu'un extrait de cahier des charges fonctionnel. L'utilisateur court sur une courroie mobile qui est entraînée dans le sens inverse de la course. La vitesse de déplacement de la courroie mobile est réglable pour permettre au coureur de rester sur place. Le système propose un large choix de mode de fonctionnement cependant l'étude sera limitée à l'utilisation du programme de contrôle de la fréquence cardiaque. Avec ce programme, le système ajuste automatiquement la vitesse et l'inclinaison du tapis afin d'obtenir une fréquence cardiaque préétablie.

Le programme de contrôle de la fréquence cardiaque fonctionne de la façon suivante :

- dans un premier temps, le système commence par augmenter la vitesse de déplacement de la courroie mobile via la chaîne fonctionnelle 1 pour atteindre la fréquence cardiaque préétablie ;
- si la vitesse maximale ne suffit pas, le tapis de course s'incline via la chaîne fonctionnelle 2 pour augmenter encore l'effort.



Chaîne fonctionnelle 1



Chaîne fonctionnelle 2

Extrait du cahier des charges :

Exigences	Critères	Niveaux
1.1. Le système doit permettre au coureur de courir avec une fréquence cardiaque prédéfinie	Vitesse de course Pente Masse utilisateur	De 0 à 19 Km/h par incrément de 0,1Km/h De 0% à 14% par incrément de 0,5% 115 Kg maxi

Hypothèses et données :

- on se place dans le cas où le tapis est réglé à l'horizontale ;
- la courroie 3, d'épaisseur négligeable, s'enroule sans glisser sur le rouleau 2. Le rayon d'enroulement de la courroie 3 sur le rouleau 2 est $R_e = 24,5 \text{ mm}$. La poulie 2 est liée au rouleau 2.
- la courroie 4, d'épaisseur négligeable, s'enroule sans glisser sur les poulies 1 et 2, ainsi que sur le

galet. Les rayons primitifs de la poulie motrice 1 et de la poulie 2 sont respectivement $R_{p1} = 27 \text{ mm}$ et $R_{p2} = 44 \text{ mm}$;

- une étude préliminaire a montré que la présence d'un coureur de 115 kg entraîne un effort résistant tangentiel $T_{\text{coureur} \rightarrow 3} = 230 \text{ N}$ sur la courroie 3 ;
- l'inertie équivalente des pièces en mouvement ramenée sur l'arbre moteur est $I_{eq} = 0,1 \text{ kgm}^2$;
- le rendement global du système mécanique est $\eta = 0,9$.

Objectif Valider le choix de la motorisation de la chaîne fonctionnelle 1 vis-à-vis du cahier des charges.

Question 1 Déterminer la vitesse de rotation du moteur ω_m en rad/s en fonction de la vitesse de déplacement V_{30} en m/s de la courroie 3. En déduire la vitesse maximale du moteur $\omega_{m \max}$ lorsque la courroie se déplace à la vitesse maximale indiquée dans le cahier des charges.

Question 2 Déterminer l'expression du couple moteur C_m nécessaire pour mettre en mouvement la courroie 3 en régime permanent.

Question 3 Déterminer la puissance développée par le moteur lorsque le coureur de 115 kg court en régime établi à 19 km/h. Le système possède un moteur courant continu ayant les caractéristiques ci-dessous.

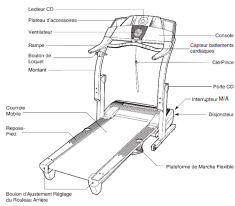
Puissance nominale $P_n = 1840 \text{ W}$	Tension nominale $U_n = 130 \text{ V}$
Vitesse maximale $N_{\max} 4000 \text{ tr/min}$	Constante de vitesse $K_E = 0,33 \text{ V}/(\text{rad.s}^{-1})$
	Courant nominal $I_n = 17,6 \text{ A}$
	Constante de couple $K_T = 0,33 \text{ N.m/A}$
	Résistance d'induit $R = 1,1 \text{ Ohm}$

Question 4 Conclure quant au bon dimensionnement du moteur vis-à-vis des performances attendues.

Éléments de correction

1. $\omega_m = \frac{R_{p2}}{R_{p1}} \frac{V_{30}}{R_e}$ et $\omega_{m \max} = 351 \text{ rad.s}^{-1}$.
2. $C_m = \frac{1}{\eta} \left(T_{\text{coureur} \rightarrow 3} R_e \frac{R_{p1}}{R_{p2}} \right)$.
3. $P(0 \rightarrow 1/0) = \frac{1}{0,9} \left(T R_e \frac{R_{p1}}{R_{p2}} \right) \omega_{\max} = 1349 \text{ W}$.
4. ...

Colle



Application 02

Pôle Chateaubriand – Joliot-Curie

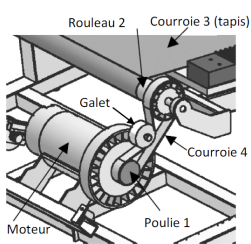
Savoirs et compétences :

- Mod2.C18.SF1 : Déterminer l'énergie cinétique d'un solide, ou d'un ensemble de solides, dans son mouvement par rapport à un autre solide.
- Res1.C1.SF1 : Proposer une démarche permettant la détermination de la loi de mouvement.

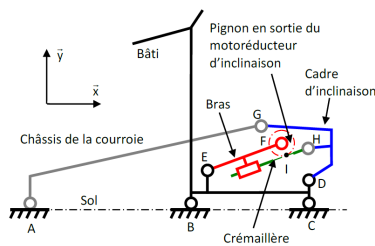
On s'intéresse à un tapis de course dont on donne une description structurale ainsi qu'un extrait de cahier des charges fonctionnel. L'utilisateur court sur une courroie mobile qui est entraînée dans le sens inverse de la course. La vitesse de déplacement de la courroie mobile est réglable pour permettre au coureur de rester sur place. Le système propose un large choix de mode de fonctionnement cependant l'étude sera limitée à l'utilisation du programme de contrôle de la fréquence cardiaque. Avec ce programme, le système ajuste automatiquement la vitesse et l'inclinaison du tapis afin d'obtenir une fréquence cardiaque préétablie.

Le programme de contrôle de la fréquence cardiaque fonctionne de la façon suivante :

- dans un premier temps, le système commence par augmenter la vitesse de déplacement de la courroie mobile via la chaîne fonctionnelle 1 pour atteindre la fréquence cardiaque préétablie ;
- si la vitesse maximale ne suffit pas, le tapis de course s'incline via la chaîne fonctionnelle 2 pour augmenter encore l'effort.



Chaîne fonctionnelle 1



Chaîne fonctionnelle 2

Extrait du cahier des charges :

Exigences	Critères	Niveaux
1.1. Le système doit permettre au coureur de courir avec une fréquence cardiaque prédéfinie	Vitesse de course Pente Masse utilisateur	De 0 à 19 Km/h par incrément de 0,1Km/h De 0% à 14% par incrément de 0,5% 115 Kg maxi

Hypothèses et données :

- on se place dans le cas où le tapis est réglé à l'horizontale ;

- la courroie 3, d'épaisseur négligeable, s'enroule sans glisser sur le rouleau 2. Le rayon d'enroulement de la courroie 3 sur le rouleau 2 est $R_e = 24,5 \text{ mm}$. La poulie 2 est liée au rouleau 2.
- la courroie 4, d'épaisseur négligeable, s'enroule sans glisser sur les poulies 1 et 2, ainsi que sur le galet. Les rayons primitifs de la poulie motrice 1 et de la poulie 2 sont respectivement $R_{p1} = 27 \text{ mm}$ et $R_{p2} = 44 \text{ mm}$;
- une étude préliminaire a montré que la présence d'un coureur de 115 kg entraîne un effort résistant tangentiel $T_{\text{coureur} \rightarrow 3} = 230 \text{ N}$ sur la courroie 3 ;
- l'inertie équivalente des pièces en mouvement ramenée sur l'arbre moteur est $I_{eq} = 0,1 \text{ kgm}^2$;
- le rendement global du système mécanique est $\eta = 0,9$.

Objectif Valider le choix de la motorisation de la chaîne fonctionnelle 1 vis-à-vis du cahier des charges.

Question 1 Déterminer la vitesse de rotation du moteur ω_m en rad/s en fonction de la vitesse de déplacement V_{30} en m/s de la courroie 3. En déduire la vitesse maximale du moteur $\omega_{m \max}$ lorsque la courroie se déplace à la vitesse maximale indiquée dans le cahier des charges.

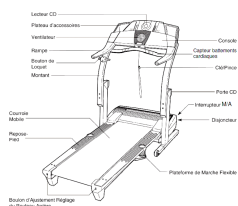
Question 2 Déterminer l'expression du couple moteur C_m nécessaire pour mettre en mouvement la courroie 3 en régime permanent.

Question 3 Déterminer la puissance développée par le moteur lorsque le coureur de 115 kg court en régime établi à 19 km/h. Le système possède un moteur courant continu ayant les caractéristiques ci-dessous.

Puissance nominale $P_n = 1840 \text{ W}$ Vitesse maximale $N_{\max} = 4000 \text{ tr/min}$	Tension nominale $U_n = 130 \text{ V}$ Constante de vitesse $K_E = 0,33 \text{ V/(rad.s}^{-1})$ Courant nominal $I_n = 17,6 \text{ A}$ Constante de couple $K_T = 0,33 \text{ N.m/A}$ Résistance d'induit $R = 1,1 \text{ Ohm}$
--	---

Question 4 Conclure quant au bon dimensionnement du moteur vis-à-vis des performances attendues.

Application 2 – Corrigé



Application 02

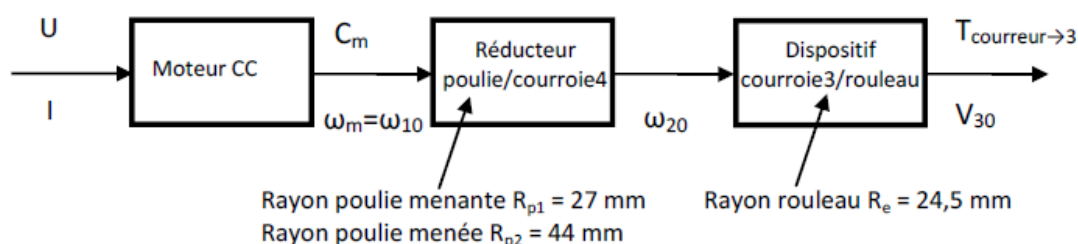
Pôle Chateaubriand – Joliot-Curie

Savoirs et compétences :

- ☐ Mod2.C18.SF1 : Déterminer l'énergie cinétique d'un solide, ou d'un ensemble de solides, dans son mouvement par rapport à un autre solide.
- ☐ Res1.C1.SF1 : Proposer une démarche permettant la détermination de la loi de mouvement.

1. Déterminer la vitesse de rotation du moteur ω_m en rad/s en fonction de la vitesse de déplacement V_{30} en m/s de la courroie 3. En déduire la vitesse maximale du moteur ω_{mmax} lorsque la courroie se déplace à la vitesse maximale indiquée dans le cahier des charges.

La chaîne d'énergie pour le déplacement du tapis peut être représentée de la façon suivante :



S'il y a roulement sans glissement de la courroie 3 sur le rouleau 2 alors $V_{30} = \omega_{20} \cdot R_e$

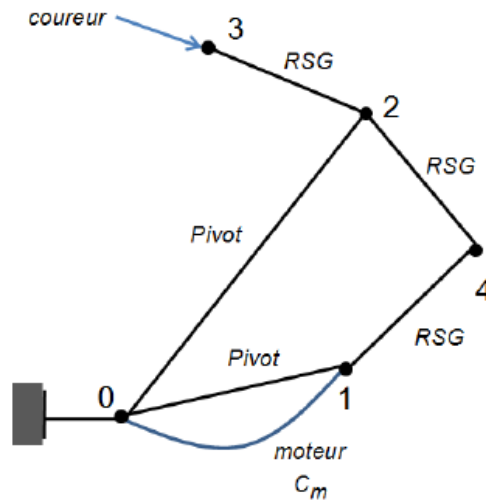
Le rapport de réduction au niveau du réducteur poulie/courroie 4 est $\frac{\omega_m}{\omega_{20}} = \frac{R_{p2}}{R_{p1}}$

Donc
$$\omega_m = \frac{R_{p2}}{R_{p1}} \cdot \frac{V_{30}}{R_e}$$

Le cahier des charges indique que la vitesse maximale de déplacement de la courroie est : $V_{30max} = \frac{19000}{3600} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Cela impose une vitesse angulaire du moteur de : $\omega_{mmax} = \frac{44}{27} \cdot \frac{19000}{24,5 \times 10^{-3} \cdot 3600} \Rightarrow \omega_{mmax} = 351 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

2. Déterminer l'expression du couple moteur C_m nécessaire pour mettre en mouvement la courroie 3 en régime permanent.



Appliquons le théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble $E = 1 + 2 + 3$ dans son mouvement par rapport bâti fixe noté 0.

$$\frac{dE_{cE/0}}{dt} = P_{E \rightarrow 0} + P_{\text{inter-effort}}$$

Calcul de l'énergie cinétique :

$$E_{cE/bâti} = \frac{1}{2} \cdot I_{eq} \cdot \omega_m^2 \quad \text{avec } I_{eq}, \text{ l'inertie équivalente des pièces en mouvement ramenée sur l'arbre moteur}$$

$$\text{Puissance des actions mécaniques extérieures : } P_{E \rightarrow E/0} = P_{0 \rightarrow m \rightarrow 1/0} + P_{0 \rightarrow 1/0} + P_{0 \rightarrow 2/0} + P_{\text{coureur} \rightarrow 3/0}$$

Avec :

$$P_{0 \rightarrow m \rightarrow 1/0} = C \cdot \omega_m$$

$$P_{\text{coureur} \rightarrow 3/0} = \{T_{\text{coureur} \rightarrow 3}\} \otimes \{V_{3/0}\} = \begin{Bmatrix} -T_{\text{coureur} \rightarrow 3} \cdot \vec{u} \\ 0 \end{Bmatrix} \otimes \begin{Bmatrix} \vec{0} \\ V_{30} \cdot \vec{u} \end{Bmatrix} = -T_{\text{coureur} \rightarrow 3} \cdot V_{30} = -T_{\text{coureur} \rightarrow 3} \cdot R_e \cdot \frac{R_{p1}}{R_{p2}} \cdot \omega_m$$

$P_{0 \rightarrow 1/0} \neq 0$ et $P_{0 \rightarrow 2/0} \neq 0$ ces puissances dissipées par frottement dans les liaisons sont intégrés dans la notion de rendement (voir ci-dessous).

$$\text{Puissance des actions mécaniques intérieures : } P_{\text{int}} = \sum_i P_{i \leftarrow \text{liaisons} \rightarrow j}$$

$$P_{i \leftarrow \text{liaisons} \rightarrow j} = 0 \quad \text{car RSG entre les solides } i \text{ et } j$$

$$\text{Ainsi : } P_{\text{int}} = 0$$

$$\text{Puissance dissipée dans les liaisons en régime permanent : } P_d = P_{0 \rightarrow 1/0} + P_{0 \rightarrow 2/0}$$

En tenant compte du rendement global du système mécanique, on peut alors évaluer la puissance dissipée par échauffement dans les liaisons : $P_d = P_{\text{entrée}} \cdot (\eta - 1) = -C \cdot \omega_m \cdot (\eta - 1)$

En régime permanent, on a $\omega_m = cte$, il n'y a donc pas de variation d'énergie cinétique.

On a donc, par application du théorème de l'énergie cinétique en régime permanent :

$$0 = C_m \cdot \omega_m - T_{coureur \rightarrow 3} \cdot R_e \cdot \frac{R_{p1}}{R_{p2}} \cdot \omega_m + C_m \cdot \omega_m \cdot (\eta - 1)$$

Ce qui permet d'exprimer le couple moteur en régime établi :

$$C_m = \frac{1}{\eta} \cdot \left(T_{coureur \rightarrow 3} \cdot R_e \cdot \frac{R_{p1}}{R_{p2}} \right)$$

3. Déterminer la puissance développée par le moteur lorsque le coureur de 115 kg court en régime établi à 19 km/h.

En régime établie à 19 km/h, on a : $P_{0 \rightarrow m \rightarrow 1/0} = C \cdot \omega_{\max}$

Soit : $P_{0 \rightarrow m \rightarrow 1/0} = \frac{1}{0,9} \cdot \left(T \cdot R_e \cdot \frac{R_{p1}}{R_{p2}} \right) \cdot \omega_{\max} = 1349 \text{ W}$

4. Conclure quant au bon dimensionnement du moteur vis-à-vis des performances attendues.

$$P_{\text{moteur}} = 1350 \text{ W} < 1840 \text{ W}$$

$$\omega_{m\max} = 351 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} < 4000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1} = 420 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

D'après la documentation du constructeur, le moteur est capable de fournir la puissance et la vitesse nécessaire pour cette phase de fonctionnement.