



**Modélisation des chaînes de solides dans le but de déterminer les contraintes géométriques dans les mécanismes.**

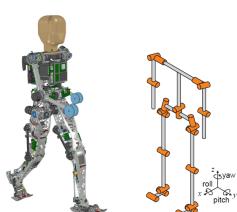
**Sciences  
Industrielles de  
l'Ingénieur**

## Chapitre 2

### Hyperstatisme

*Savoirs et compétences :*

- Mod2.C34 : chaînes de solides;*
- Mod2.C34 : degré de mobilité du modèle;*
- Mod2.C34 : degré d'hyperstatisme du modèle;*
- Mod2.C34.SF1 : déterminer les conditions géométriques associées à l'hyperstatisme;*
- Mod2.C34 : résoudre le système associé à la fermeture cinématique et en déduire le degré de mobilité et d'hyperstatisme.*



*Robot humanoïde Lola*



*Simulateur de vol Lockheed Martin*

1	<b>Degrés de mobilité</b>	2
2	<b>Hyperstatisme</b>	2
2.1	Définition .....	2
2.2	Le système est hyperstatique... et alors? .....	2

## 1 Degrés de mobilité

**Définition Mobilité cinématique** On appelle  $m_c = m_u + m_i$  le **degrés de mobilité cinématique** d'une liaison ou d'un mécanisme, avec :

- $m_u$  : le nombre de mobilités dites **utile**;
- $m_i$  : le nombre de mobilités dites **interne**.

Pour une liaison seule :

- $m_c = 0$  : liaison complète ou rigide;
- $m_c > 0$  : liaison mobile à  $m_c$  degrés de liberté.

(R)

Dans un mécanisme, une mobilité utile est une mobilité **recherchée dans la fonction du mécanisme**. On différenciera **seulement** les mobilités utiles **indépendantes**. Si une relation existe, par exemple, entre un mouvement d'entrée et un mouvement de sortie, alors cela sera considéré comme une seule mobilité.

Les mobilités internes sont des mobilités indépendantes résiduelles à l'intérieur du mécanisme.

**Méthode** Les mobilités utiles et internes peuvent être déterminées intuitivement. Cependant, il est possible de déterminer le nombre de mobilités analytiquement.

### Méthode cinématique

Il faut commencer par écrire la (ou les) fermetures de chaînes cinématiques. Une fermeture de chaîne permet d'écrire un système de 6 équations. On note  $r_c$  le rang du système d'équations cinématiques.

On a alors  $m_c = I_c - r_c$ .

### Méthode statique

Il faut commencer par appliquer le PFS à chacune des pièces du système. Un PFS permet d'écrire un système de 6 équations. On note  $r_s$  le rang du système d'équations statiques.

On a alors  $m_c = E_S - r_s$ .

## 2 Hyperstatisme

### 2.1 Définition

On appelle  $h$  le degré d'hyperstatisme d'un mécanisme. Il traduit l'impossibilité à résoudre un problème de mécanique, par la redondance abusive des liaisons.

**Définition Degrés d'hyperstatisme** On peut définir le degré d'hyperstatisme par :

#### Méthode cinématique

$$h = m_c - I_c + E_c$$

$h = 0$  : liaison ou mécanisme **isostatique**;

- $h > 0$  : liaison ou mécanisme **hyperstatique**.

#### Méthode statique

$$h = m_c - E_s + I_s$$

#### Définition Notations

$I_c$  et  $I_s$  sont respectivement les  **nombres d'inconnues cinématiques et statiques** d'un système et ils dépendent du type de modélisation (2D ou 3D).

#### Méthode cinématique

On rappelle que le **nombre cyclomatique**  $\gamma$  est tel que  $\gamma = L - S + 1$  ( $S$  nombre de classes d'équivalence et  $L$  le nombre de liaisons).

On note  $E_c$  le nombre d'équations cinématique :

- en 3D :  $E_c = 6\gamma$ ;
- en 2D :  $E_c = 3\gamma$ .

#### Méthode statique

$E_s$  est le nombre d'équations statique :

- en 3D :  $E_s = 6(S - 1)$ ;
- en 2D :  $E_s = 3(S - 1)$ .

(R)

- Un système en **chaîne ouverte** est toujours **isostatique**.
- **Une liaison hélicoïdale a 5 inconnues statiques et 1 inconnue cinématique.**

### 2.2 Le système est hyperstatique... et alors ?

Tout d'abord, d'un point de vue calcul mécanique, l'intérêt d'un système isostatique est qu'il est possible de calculer les efforts dans chacune des liaisons. Un système isostatique sera de plus facile à assembler car le positionnement des pièces les unes avec les autres est « unique ».

Pour les systèmes hyperstatiques, il n'est pas possible de connaître chacun des efforts. En revanche, la détermination des lois de mouvement des systèmes reste possible. Les systèmes hyperstatiques sont plus rigides que des systèmes isostatiques mais nécessitent de prendre des précautions au montage ou à la fabrication des pièces :

- les dimensions des pièces fabriquées doivent être maîtrisées;
- du jeu doit être prévu pour garantir l'assemblage;
- des dispositifs de réglage peuvent être proposés.

Un système hyperstatique peut donc être plus cher à réaliser, mais peut être plus rigide et d'une plus grande durée de vie.

Pour calculer les efforts dans un système hyperstatique, plusieurs solutions sont possibles : on peut par exemple faire des hypothèses sur une répartition d'efforts.

**Méthode Conditions de montage** Pour déterminer les conditions de montage, il est possible d'exploiter les équations  $0 = 0$  issues des fermetures de chaînes cinématiques. En effet, le nombre d'équations  $0 = 0$  correspond au degré d'hyperstatisme.

- une équation de type  $0 = 0$  issue de la fermeture des vecteurs taux de rotation impose de spécifier un parallélisme;
- une équation de type  $0 = 0$  issue de la fermeture des vecteurs vitesse impose de spécifier une distance.

Il est parfois demandé de diminuer le degré d'hyperstatisme d'un système. Pour cela, il faut rajouter des degrés de liberté à certaines liaisons, sans pour autant modifier le comportement du système.

## Activation 1

## Activation – Pompe à pistons axiaux

É. Durif

## Savoirs et compétences :

- Mod2.C34 : chaînes de solides.

## Présentation

Nous prendrons comme exemple dans ce cours, la pompe à pistons axiaux. Nous avons retenu une modélisation avec 4 classes d'équivalence y compris le bâti :

- 0 : bâti;
- 1 : barillet;
- 2 : piston;
- 3 : poussoir.

On note  $n$  le nombre de classes d'équivalence hors bâti (ici  $n = 3$ ). Dans cette étude, on se place directement dans la base  $B_1 = (\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$  qui est en rotation par rapport à la base  $B_0 = (\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  autour de l'axe  $\vec{z}_0 = \vec{z}_1$  avec le paramètre de rotation  $\theta$ . Le plateau inclinable est supposé fixe au cours du temps. On lui associe le repère  $R_{0*} = (\vec{x}_{0*}, \vec{y}_{0*}, \vec{z}_{0*})$  qui est en rotation par rapport au repère  $R_0 = (\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  autour de l'axe  $\vec{y}_0$  avec le paramètre angulaire  $\alpha$ . On introduit le repère  $R_{1*} = (\vec{x}_{1*}, \vec{y}_{1*}, \vec{z}_{1*})$  directement obtenu à partir de  $R_{0*}$  par une rotation autour de  $\vec{z}_{0*}$  et d'angle  $\theta$ . On donne également :  $\vec{AB} = L_1 \vec{z}_0$ ,  $\vec{BC} = -R \vec{x}_1$ ,  $\vec{CD} = \lambda \vec{z}_1$ ,  $\vec{DE} = h \vec{z}_{1*}$ .

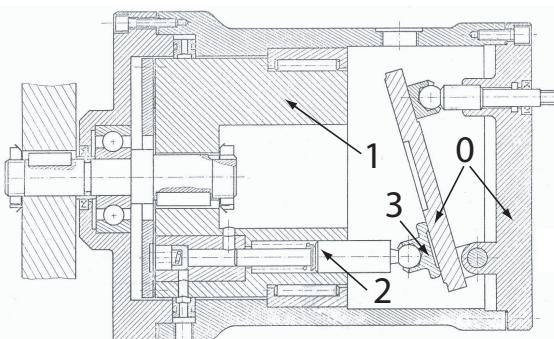


Schéma technologique d'une pompe à pistons axiaux

Les liaisons entre les différentes classes d'équivalence permettent de modéliser le système avec le schéma cinématique ci-après.

- Les liaisons sont parfaites : sans frottements ni jeux.
- Le poids et les effets d'inerties sont négligés.
- On introduit une action de pression s'exerçant sur le piston 2 assimilable à un glisseur d'axe central ( $C, \vec{z}_1$ ) et qui a pour résultante en effort :  $\vec{F}_p = F_p \vec{z}_1$

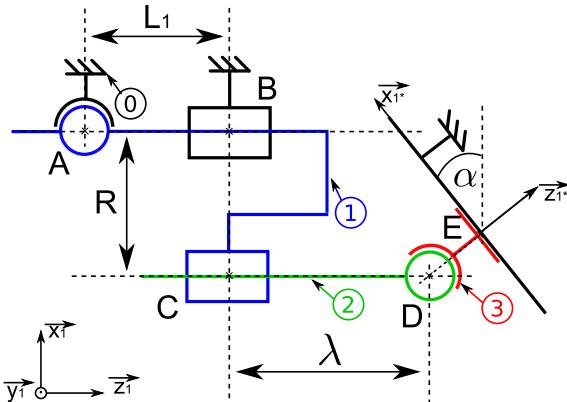


Schéma cinématique d'une pompe à pistons axiaux

## Etude préliminaire

**Question 1** Tracer le graphe de structure du mécanisme.

**Question 2** En utilisant les formules globales de l'hyperstatisme, déterminer le degré d'hyperstatisme en utilisant la méthode statique puis la méthode cinématique.

## Etude statique

**Question 3** Isoler successivement les pièces 1, 2 puis 3 et réaliser le PFS en B, C et D.

**Question 4** Écrire le système d'équations. Conclure sur le rang du système d'équations et sur l'hyperstatisme du système mécanique.

## Etude cinématique

**Question 5** Écrire les fermetures de chaînes associées au mécanisme.

**Question 6** Écrire le système d'équations. Conclure sur le rang du système d'équations et sur l'hyperstatisme du système mécanique.

## Hyperstatisme

**Question 7** Proposer des conditions géométriques permettant d'assurer l'assemblage du système.

**Question 8** Proposer une modèle isostatique cinétiquement équivalent.

## Application 1

## Application 01

## Savoirs et compétences :

- Mod2.C34 : chaînes de solides ;
- Mod2.C34 : degré de mobilité du modèle ;
- Mod2.C34 : degré d'hyperstatisme du modèle ;
- Mod2.C34.SF1 : déterminer les conditions géométriques associées à l'hyperstatisme ;
- Mod2.C34 : résoudre le système associé à la fermeture cinématique et en déduire le degré de mobilité et d'hyperstatisme.

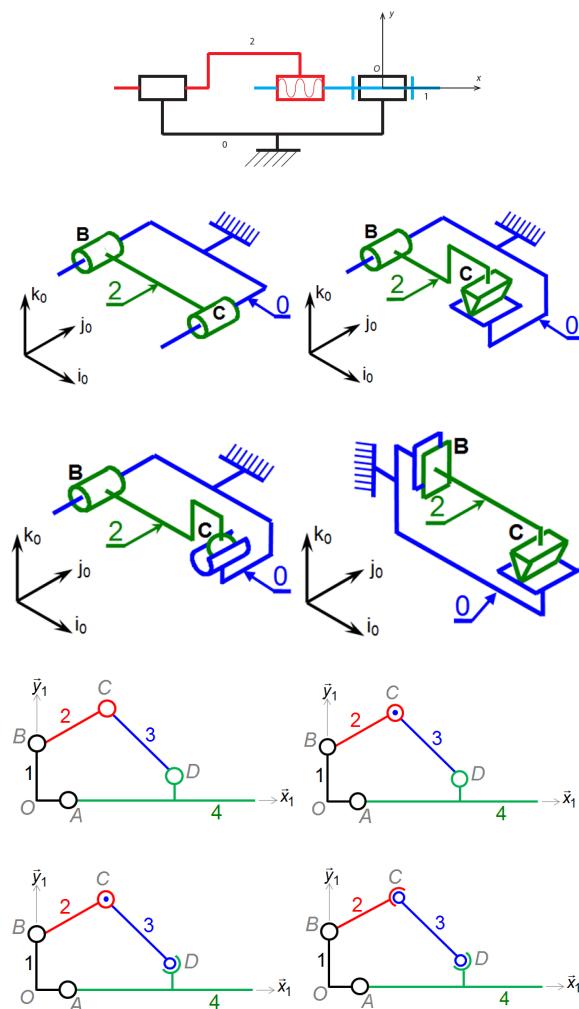
## Exercice 1 – Applications directes

Pôle Chateaubriand – Joliot-Curie.

**Question 1** Pour chacun des mécanismes suivants, déterminer le degré d'hyperstatisme.

**Question 2** Lorsque le modèle est hyperstatique, proposer :

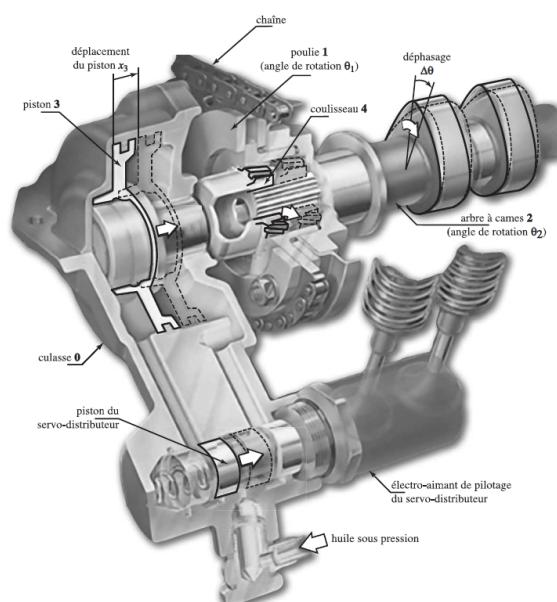
- des conditions d'assemblage (intuitivement) ;
- un modèle isostatique.



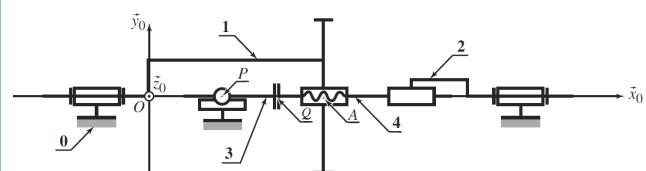
## Exercice 2 – Déphasage d'arbre à cames

Banque PT SIA – 2008.

L'optimisation d'un moteur 4 temps passe (entre autre) par une bonne maîtrise des lois de levée des soupapes. Il est ainsi possible de positionner entre la poulie 1 (entraînée par le vilebrequin via une chaîne) et l'arbre à came 2 un système permettant de créer un déphasage entre ces pièces.



On propose ci-dessous un modèle cinématique du système de déphasage. On retrouve la culasse 0, la poulie d'entraînement 1, l'arbre à cames 2, le piston 3 et le coulisseau 4.



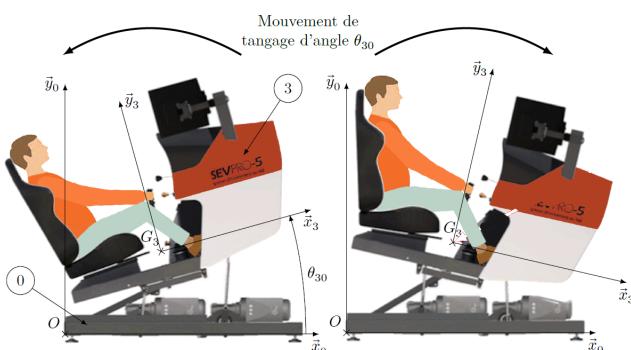
**Question 3** Établir le graphe des liaisons du mécanisme.

**Question 4** Déterminer le degré d'hyperstatisme en précisant la démarche utilisée. (On utilisera la méthode cinématique et la méthode statique).

### Exercice 3 – Simulateur de vol pour la formation de pilotes en aéroclub

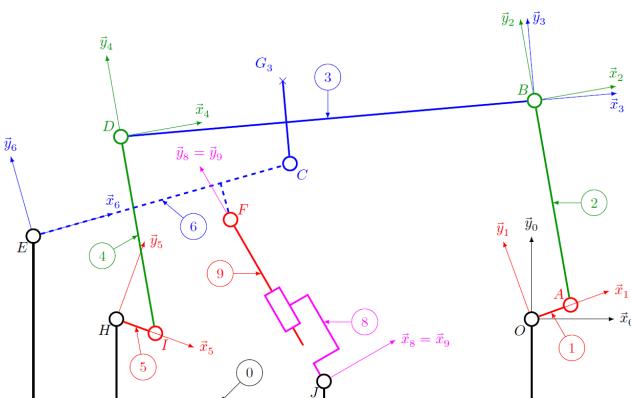
Centrale Supelec 2017 – PSI.

On s'intéresse à un simulateur de vol à plate-forme dynamique. Deux moteurs permettent d'assurer le mouvement de tangage. Ils entraînent respectivement les liaisons pivots de centres  $H$  et  $O$ .



On propose le modèle plan suivant (la pièce 6 est en traits pointillés pour la démarquer des autres pièces).

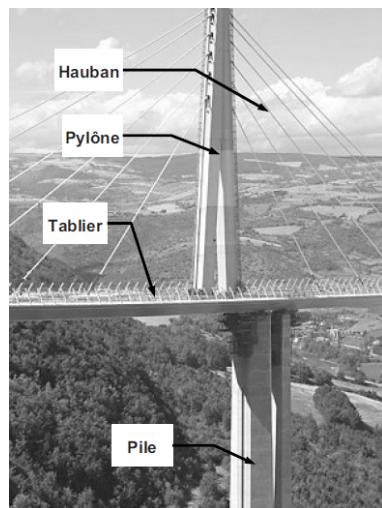
**Question 5** Déterminer le degré d'hyperstatisme du modèle proposé.



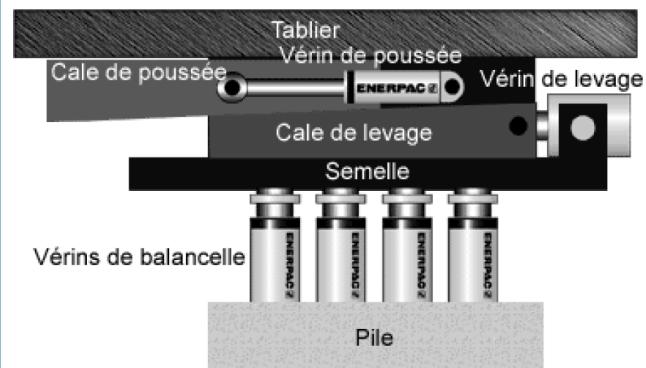
### Exercice 5 – Pousseur de tablier

Banque PT 2008 – SIC.

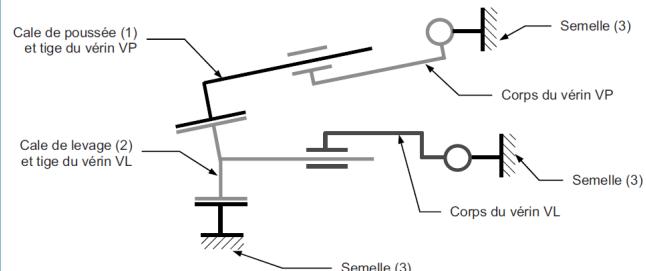
Une technique pour construire un pont et de commencer par ériger les piles définitives en béton et les piles temporaires en acier. On peut alors assembler tronçon par tronçon, les 2 tabliers sur la terre ferme et enfin pousser les deux parties du tablier assemblées sur les piles afin de réaliser la jonction. Cette opération de poussée est réalisée à l'aide de systèmes hydrauliques nommés « pousseurs de tablier ».



Le pousseur de tablier est soutenu par plusieurs vérins de balancelle verticaux (non étudiés) qui assurent le positionnement de la semelle afin que la cale de poussée soit parallèle et à la bonne distance du plan inférieur du tablier.



On suppose dans cette partie, que l'angle que fait le plan supérieur de la cale de levage avec l'horizontale est petit. Ce qui revient à considérer que les contacts dans les liaisons planes sont maintenus durant tout le mouvement. Une première étude conduit à la modélisation suivante.



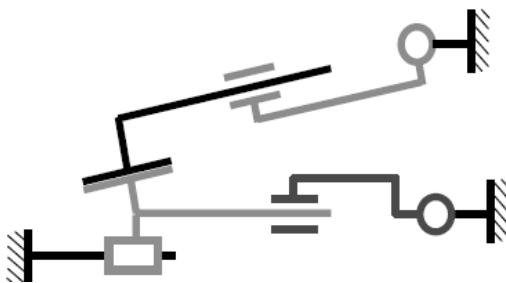
**Question 6** Proposer un modèle pour tenir compte de l'hypothèse des angles « petits ».

**Question 7** Estimer le degré de mobilité du modèle proposé.

**Question 8** Déterminer le degré d'hyperstatisme du modèle proposé.

**Question 9** Proposer des modifications pour rendre le système isostatique. Faire un nouveau schéma cinématique tenant compte de ces modifications.

**Question 10** Le constructeur a fait le choix de mettre une liaison glissière de direction horizontale à la place de la liaison plane entre la cale de levage (2) et la semelle (3) (figure 6). Qu'est-ce qui justifie un tel choix ? Comment peut-on rendre ce modèle isostatique ?

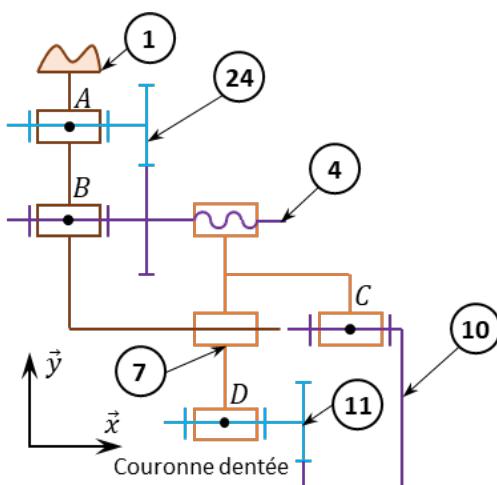
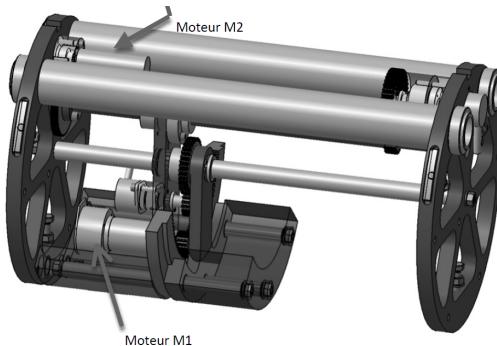


## Exercice 6 – Planeur sous marin

Banque PT 2012 – SIC.

Le planeur sous-marin est un dispositif autonome développé par l'IFREMER dont le but est de réaliser des mesures océanographiques. Il ressemble à un mini sous-marin qui plane en dents de scie vers un point prédefini. Il remonte régulièrement à la surface afin de communiquer avec son opérateur par satellite afin d'envoyer les données acquises pendant sa plongée pour évaluer sa dérive due aux courants.

Dans le but de modifier l'orientation et l'équilibrage du planeur, l'apartie centrale du planeur comporte un dispositif qui permet de positionner le centre de gravité axialement **24** et radialement **11**.



**Question 11** Réaliser le graphe de liaison associé au schéma cinématique minimal proposé. Identifier le nombre de mobilités.

On supposera que la liaison entre deux roues dentées est une liaison ponctuelle.

**Question 12** Déterminer le degré d'hyperstatisme.  
Si celui-ci est non nul, indiquer la ou les contraintes géométriques associées.

## TD 1



## Suspension de l'AddBike

Agrégation Sciences Industrielles de l'Ingénieur – 2018

## Savoirs et compétences :

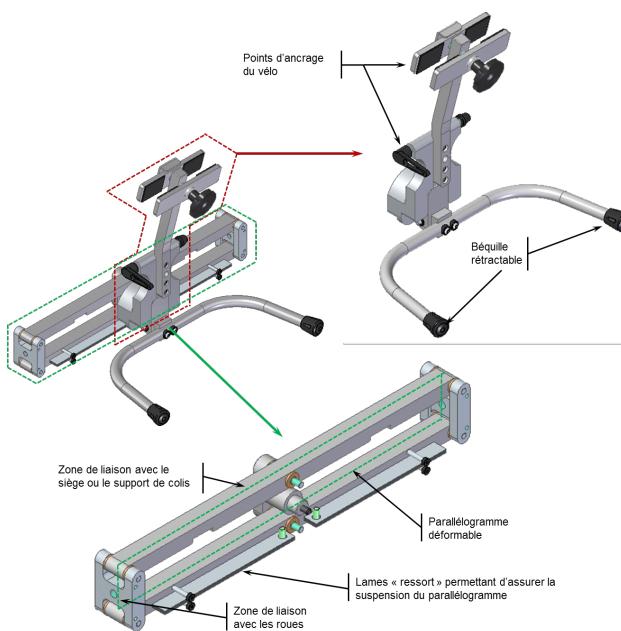
- Mod2.C34 : degré de mobilité du modèle;
- Mod2.C34 : degré d'hyperstatisme du modèle;
- Mod2.C34.SF1 : déterminer les conditions géométriques associées à l'hyperstatisme;
- Mod2.C34 : résoudre le système associé à la fermeture cinématique et en déduire le degré de mobilité et d'hyperstatisme.

## Présentation

L'Add-Bike est un système pouvant s'adapter à tous types de vélo et doit permettre de transporter des marchandises (colis ou courses du quotidien) ou des enfants.

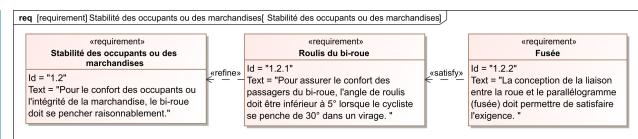


Il est équipé d'un système de suspension permettant de limiter le mouvement de roulis dans les virages.

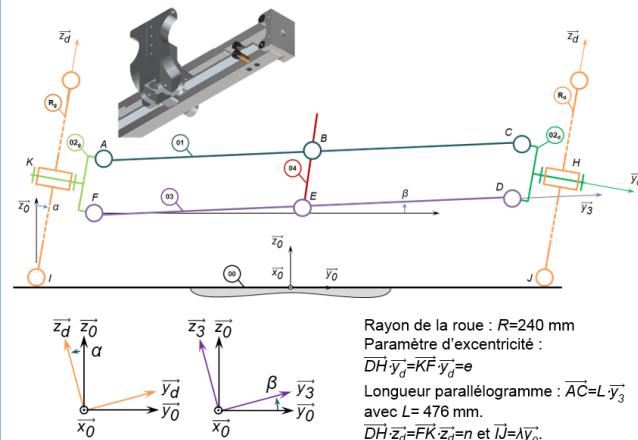


## Exigence 1.2 : Stabilité des occupants et des marchandises

**Objectif** Pour assurer la stabilité des occupants du bi-roue, il est nécessaire de déterminer les conditions géométriques permettant de limiter l'angle de roulis (exigence 1.2.1). Ainsi, cet angle roulis ne doit pas dépasser  $\beta = 5^\circ$  lorsque le cycliste penche le mât vertical de  $\alpha = 30^\circ$ .



Pour pouvoir tourner, le cycliste penche le mât vertical 04 par l'intermédiaire du guidon, ce qui conduit à la déformation du parallélogramme ACDF donné dans la figure suivante et à la rotation des roues autour de l'axe horizontal longitudinal  $\vec{x}_0$ . Lors de la déformation du parallélogramme, les bielles 01 et 03 ne restent pas parfaitement horizontales; le passager assis dans le siège lié à la bielle 03, subit donc du roulis, c'est-à-dire un pivotement autour de l'axe horizontal longitudinal  $\vec{x}_0$ .



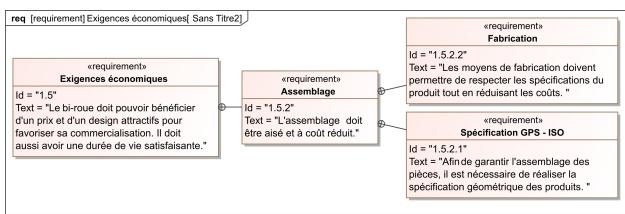
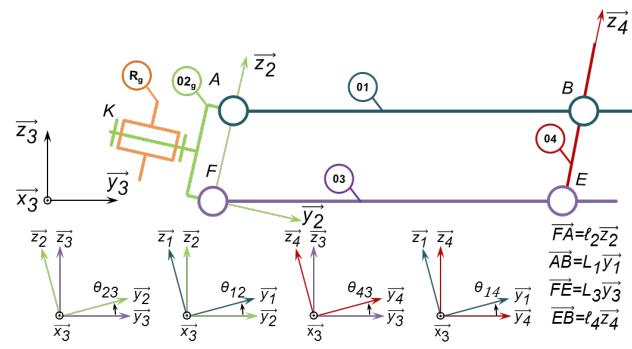
L'angle  $\beta$  correspond à l'angle de roulis des bielles 01 et 03.

**Question 1** En réalisant une fermeture géométrique, déterminer la relation liant l'angle  $\beta$  et l'excentricité  $e$  des fusées 02g et 02d.

**Question 2** En déduire une valeur de l'excentricité  $e$  permettant de valider l'exigence 1.2.1.

## Exigence 1.5 : Exigences économiques – Assemblage

**Objectif** Afin de pouvoir vendre son produit à un prix attractif, la start-up doit pouvoir fabriquer et assembler son produit à un coût satisfaisant. Une maîtrise des coûts passe par la maîtrise des spécifications garantissant l'assemblage du système et par des coûts de fabrication réduits. Les objectifs sont ici de : spécifier des conditions géométriques sur les dimensions de la bielle inférieure (03) à partir des conditions de fonctionnement.



**Question 3** Après avoir fait un graphe de structure et sans tenir compte des roues et de leurs liaisons au sol, donner le degré d'hyperstatisme du modèle cinématique suivant.

**Question 4** Donner les torseurs cinématiques  $\{\mathcal{V}(2/3)\}, \{\mathcal{V}(1/2)\}, \{\mathcal{V}(4/3)\}, \{\mathcal{V}(1/4)\}$ .

**Question 5** En utilisant une fermeture de chaîne cinématique, donner le système d'équations liant les différentes variables.

**Question 6** En déduire les conditions géométriques à imposer sur la bielle (03) afin de satisfaire l'assemblage du mécanisme.

## Synthèse

**Question 7** Conclure sur les méthodes qui ont permis de répondre aux exigences 1.4 et 1.5.

## TD 2

Micromanipulateur compact pour la chirurgie endoscopique (MC<sup>2</sup>E)

Concours Commun Mines Ponts 2016

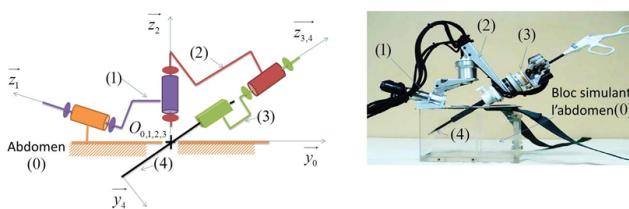
## Savoirs et compétences :

- Mod2.C34 : degré de mobilité du modèle;
- Mod2.C34 : degré d'hyperstatisme du modèle;
- Mod2.C34.SF1 : déterminer les conditions géométriques associées à l'hyperstatisme;
- Mod2.C34 : résoudre le système associé à la fermeture cinématique et en déduire le degré de mobilité et d'hyperstatisme.

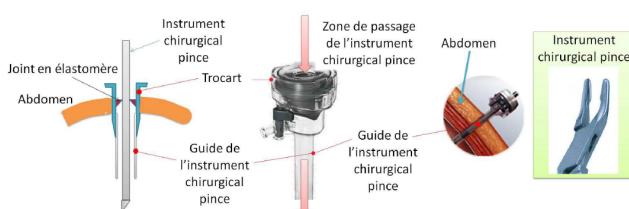
## Mise en situation

Le robot MC<sup>2</sup>E 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.



On appelle trocart la pièce qui fait l'interface avec l'abdomen du patient et qui va guider l'ensemble des instruments.



La figure au verso donne un extrait du cahier des charges.

## Travail demandé

On s'intéresse à la phase de vie pendant laquelle la pince est introduite dans le trocart au travers d'un guide (étanche). Une phase de calibration du robot démarre ensuite.

## Objectif

- Modéliser la liaison entre l'abdomen et la pince (4) en analysant la chaîne ouverte de solides du robot.
- Analyser les conséquences de la fermeture de la chaîne par la liaison peau-trocot.

Dans cette phase, la pince du MC<sup>2</sup>E est dans l'abdomen du patient, via le trocart. On souhaite étudier ici quelques aspects de la géométrie et de la cinématique du robot liés notamment à la nécessité que le point d'incision  $O_0 = O_{0,1,2,3}$  soit un point fixe.

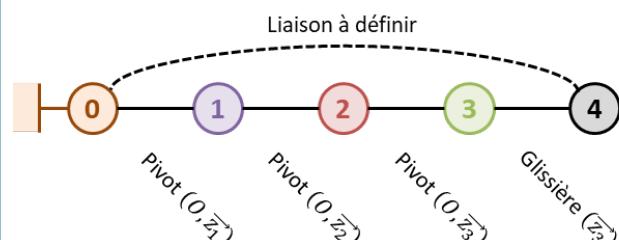
Le torseur cinématique du solide (i) par rapport au solide (j), réduit en  $P$ , sera noté :

$$\{\mathcal{V}(i/j)\} = \left\{ \frac{\overrightarrow{\Omega(i/j)}}{V(P, i/j)} \right\}_P = \left\{ \begin{array}{ll} \omega_{xij} & V_{xij} \\ \omega_{yij} & V_{yij} \\ \omega_{zij} & V_{zij} \end{array} \right\}_{P, \overrightarrow{x_k}, \overrightarrow{y_k}, \overrightarrow{z_k}}.$$

## Hypothèses

- L'abdomen (0) est supposé fixe.
- La pince (4) est déjà introduite dans l'abdomen (0) du patient.
- Il n'y a pas encore de contact avec l'organe.

On donne le graphe des liaisons du mécanisme ainsi modélisé.



La liaison entre la pince (4) et l'abdomen (0) n'est pas définie ici car elle est complexe : elle est notamment imposée par la forme du trocart, que l'on suppose lié à l'abdomen du patient. On va dans un premier temps considérer la chaîne ouverte de solides allant de (0) à (4) par l'intermédiaire des trois liaisons pivot et de la liaison glissière.

**Question 1** On considère la chaîne ouverte de solides (0+1+2+3+4). Par la méthode de votre choix, définir le torseur cinématique de la liaison équivalente 4/0 noté  $\{\mathcal{V}^{eq}(4/0)\}$ . En déduire la mobilité cinématique  $m_c$  de cette chaîne de solides.

On envisage deux modélisations pour la liaison entre la pince (4) et la peau de l'abdomen par l'intermédiaire du trocart :

- modélisation 1 : liaison sphère-cylindre en  $O_0$  d'axe  $(O_0, \overrightarrow{z_3})$ ;

- modélisation 2 : liaison libre : pas de liaison entre le bâti et la pince.

**Question 2** Dans le cadre des deux modélisations retenues, quels sont alors le degré d'hyperstatisme et la mobilité cinématique de la chaîne fermée. Compléter le tableau du document réponse concernant les implications du modèle retenu sur le robot et les interactions patient / robot. Quelle modélisation vous paraît la plus proche de la réalité? Argumenter votre réponse.

	Liaison linéaire annulaire	Liaison libre
$m_c =$		
$h =$		
Efforts au point d'insertion*		
Facilité de montage?*		
Rigidité du robot*		

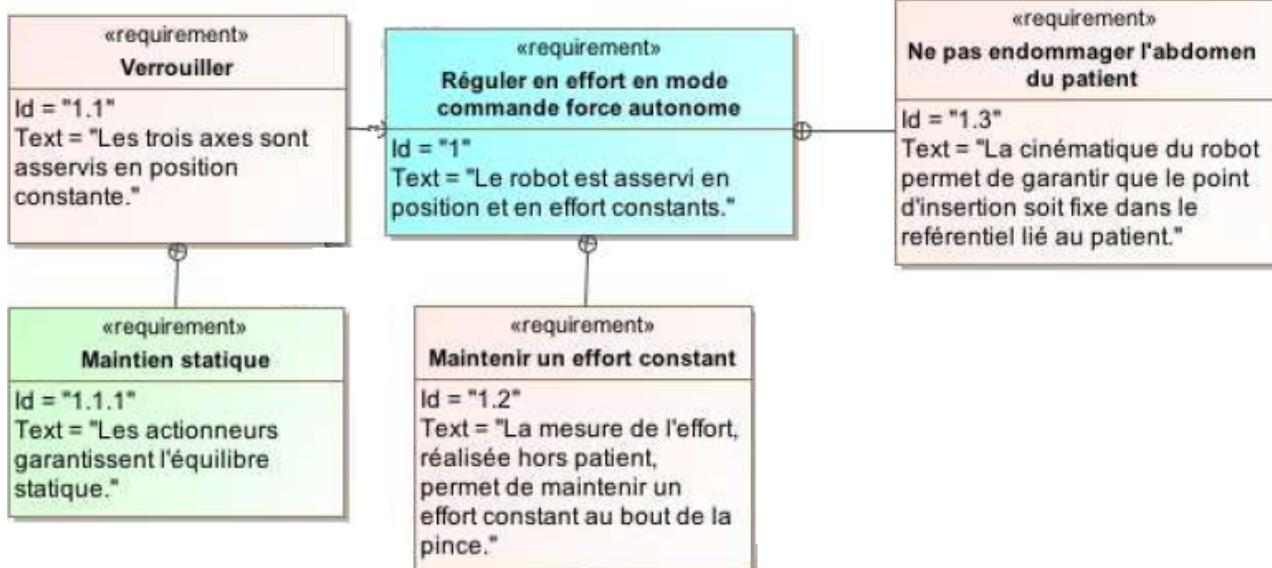
\* : Remplir par oui ou non

## Retour sur le cahier des charges

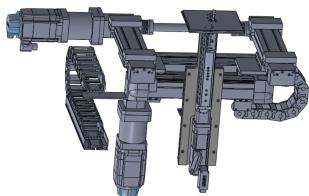
**Question 3** Quelle exigence le mécanisme utilisé permet-il de satisfaire? Expliquer en 2 lignes comment cette exigence est satisfaite.

### Corrigé résumé

- Liaison sphère cylindre d'axe  $(O, \vec{z}_3)$ .
- Cas 1 :  $m_c = 4, h = 2$ . Cas 2 :  $m_c = 4, h = 0$ .
- Exigence 1.3.



## TD 3



## Système de dépose de poudre

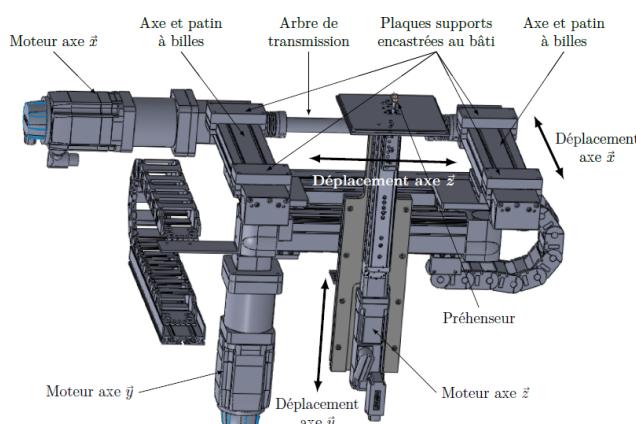
Concours Centrale Supelec – TSI 2016

## Savoirs et compétences :

- Mod2.C34 : degré de mobilité du modèle;
- Mod2.C34 : degré d'hyperstatisme du modèle;
- Mod2.C34.SF1 : déterminer les conditions géométriques associées à l'hyperstatisme;
- Mod2.C34 : résoudre le système associé à la fermeture cinématique et en déduire le degré de mobilité et d'hyperstatisme.

## Mise en situation

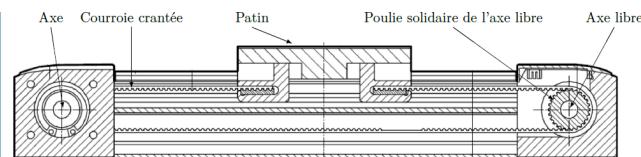
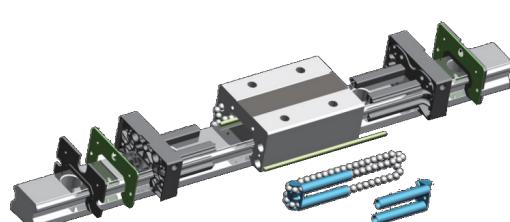
On s'intéresse à un système permettant de créer des motifs sur de la poudre de maquillage compactée. Le poste de pulvérisation est en partie constitué d'un robot cartésien 3 axes permettant de déplacer des godets de poudre compactée (grâce à un préhenseur) en dessous de la buse de pulvérisation.



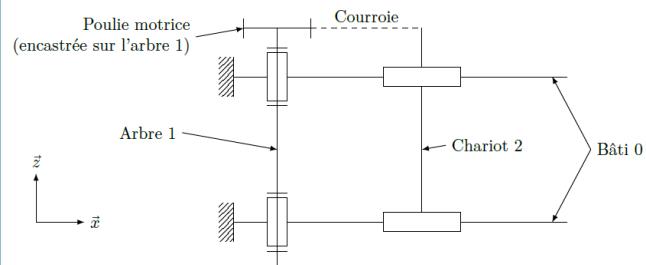
**Objectif** L'objectif de cette partie est de proposer un modèle du mécanisme constituant le déplacement de l'axe  $\vec{x}$  et de justifier certains choix technologiques.

Le préhenseur repose sur des plaques support qui le lient en liaison encastrement au bâti. Les rails guidant le préhenseur suivant l'axe  $\vec{x}$  supportent les autres rails guidant les déplacement du préhenseur suivant les axes  $\vec{y}$  et  $\vec{z}$ .

Le guidage est réalisé par deux axes munis de patins à billes.



Le moteur actionnant l'axe  $\vec{x}$  est lié à un réducteur qui entraîne deux ensembles poulies-courroies. Les poulies motrices sont guidées chacune par deux roulements à billes. Les deux poulies motrices sont liées par un arbre de transmission (Arbre 1). La figure suivante représente le schéma cinématique de l'ensemble.

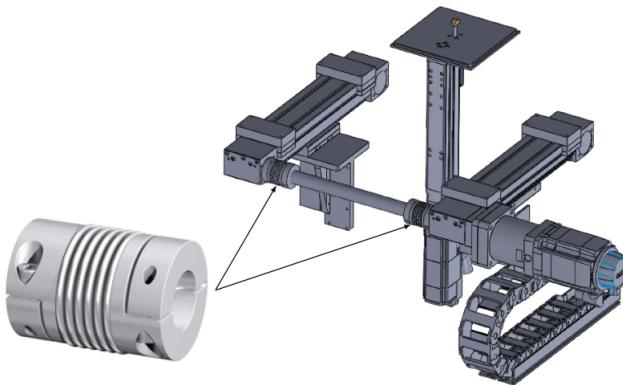


## Travail demandé

La courroie étant un élément déformable, on n'en tiendra pas compte dans l'étude suivante. **Question**

- 1 Déterminer le degré d'hyperstatisme de la liaison entre les solides 0 et 1.

Pour lever l'hyperstatisme de cette liaison, le constructeur a mis en place deux soufflets métalliques en les implantant de part et d'autre de l'arbre de transmission (figure suivante).



Un soufflet métallique est un joint d'accouplement autorisant des défauts d'alignement radiaux, axiaux et angulaires. Ainsi, pour un soufflet liant deux solides  $S_1$  et  $S_2$  positionné en un point  $P$  et dont l'axe du soufflet est  $(P, \vec{u})$  :

- le torseur statique transmissible est de la forme

$$\{\mathcal{T}(S_1 \rightarrow S_2)\} = \begin{Bmatrix} 0 & L_{12} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{P(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})};$$

- le torseur cinématique du mouvement de  $S_1$  par rapport à  $S_2$  est de la forme  $\{\mathcal{V}(S_1/S_2)\} = \begin{Bmatrix} 0 & v_{x12} \\ q_{12} & v_{y12} \\ r_{12} & v_{z12} \end{Bmatrix}_{P(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})}$ .

L'introduction des deux soufflets métalliques impose

de décomposer l'arbre 1 de la question 1 en 3 solides distincts  $1_A$ ,  $1_B$  et  $1_C$ , le solide  $1_B$  étant lié aux deux solides  $1_A$  et  $1_C$  par les deux soufflets métalliques.

**Question 2** *Tracer le nouveau graphe de liaisons en tenant compte de l'introduction des deux soufflets métalliques.*

**Question 3** *Déterminer en le justifiant le degré de mobilité du mécanisme ainsi modélisé en question précédente.*

**Question 4** *En déduire le degré d'hyperstatisme du système avec ses deux soufflets métalliques.*

### Retour sur le cahier des charges

**Question 5** *Conclure en justifiant l'utilisation des soufflets.*

### Corrigé résumé

1.  $h = 5$ .
2. ...
3.  $m = 6$ .
4.  $h = 0$ .
5. ...