

FINAL AUTOMNE 2016

2 H

**Etude du positionnement des propulseurs
« Vulcain » d'Ariane 5**

Une feuille A4 autorisée

Les documents réponses 1, 2, 3 et 4 sont à rendre en fin d'épreuve

La fusée Ariane 5

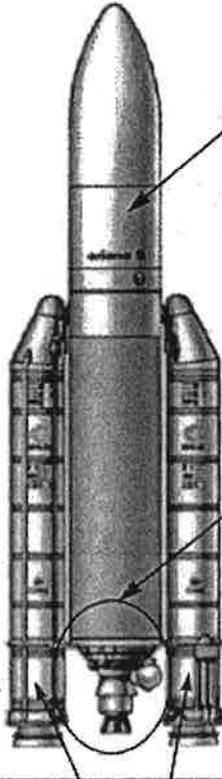
Avec une technologie à corps central à deux étages et deux propulseurs latéraux, Ariane 5 a marqué une évolution notable dans la famille des lanceurs européens. Ce choix permet d'obtenir une grande source de puissance au décollage et une meilleure gestion de la position et de la répartition des masses. En revanche, il induit des problèmes de couplage importants qui nécessitent une orientation de l'axe des tuyères situées en extrémité du corps central et des deux propulseurs latéraux.

La fusée Ariane 5 est globalement composée d'un corps central **CC** à deux étages et deux propulseurs latéraux **PG** et **PD** (voir photographie 1) :

- Le 1^{er} étage, commun à tous les types de lancement, est appelé **EPC** comme **Étage Principal Cryogénique**, car il transporte de l'oxygène et de l'hydrogène liquides refroidis à des très basses températures. Ces fluides permettent d'alimenter le moteur cryogénique Vulcain situé en extrémité basse de cet étage. La tuyère de ce moteur est orientable selon deux directions orthogonales et elle est refroidie en permanence par la circulation de l'oxygène et de l'hydrogène liquide.
- La configuration du 2^{ème} étage, appelé **EPS** comme **Étage Propulsif Stockable**, peut varier selon la mission. Il contient le satellite ou les éléments à propulser.
- De chaque côté du corps central **CC** à deux étages sont fixés les propulseurs **PG** et **PD** ou **EAP** comme **Étages Accélérateurs à Poudre**. Les tuyères **TG** et **TD** placées respectivement aux extrémités de ces deux **EAP** sont aussi orientables selon deux directions orthogonales. Allumés peu après le décollage, les deux **EAP** fonctionnent à pleine puissance pendant une durée de 130 secondes puis, lorsque leurs réservoirs sont vides, ils se détachent du

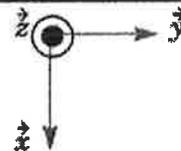
corps central **CC** et retombent dans la mer où leurs carcasses sont ensuite récupérées.

Photographie 1 : fusée Ariane 5



Corps central CC à deux étages
 Le 1^{er} étage, ou EPC (Étage Principal Cryogénique), est situé dans la partie basse de ce corps central ; la tuyère de cet étage est allumée avant le décollage et le reste jusqu'à séparation des deux étages.
 Le 2^{ème} étage, ou EPS (Ensemble Propulsif Stockable), est situé dans la partie haute de ce corps central ; la tuyère de cet étage est allumée au moment de la séparation des deux étages.

Moteur Vulcain et sa tuyère centrale TC
 La tuyère centrale TC du moteur Vulcain du 1^{er} étage du corps central CC est situé en extrémité basse de ce corps. Elle est orientable autour des directions \vec{y} et \vec{z} de $\pm 7^\circ$.



Propulseurs latéraux PG et PD
 Les deux EAP (Étage Accélérateurs à Poudre) latéraux sont utilisés au décollage pour apporter de la puissance et sont ensuite largués. En extrémité du propulseur gauche ($y < 0$) noté PG, se trouve la tuyère gauche TG, orientable autour des directions \vec{y} et \vec{z} de $\pm 6^\circ$. En extrémité du propulseur droit ($y > 0$), noté PD, se trouve la tuyère droite TD, orientable autour des directions \vec{y} et \vec{z} de $\pm 6^\circ$.

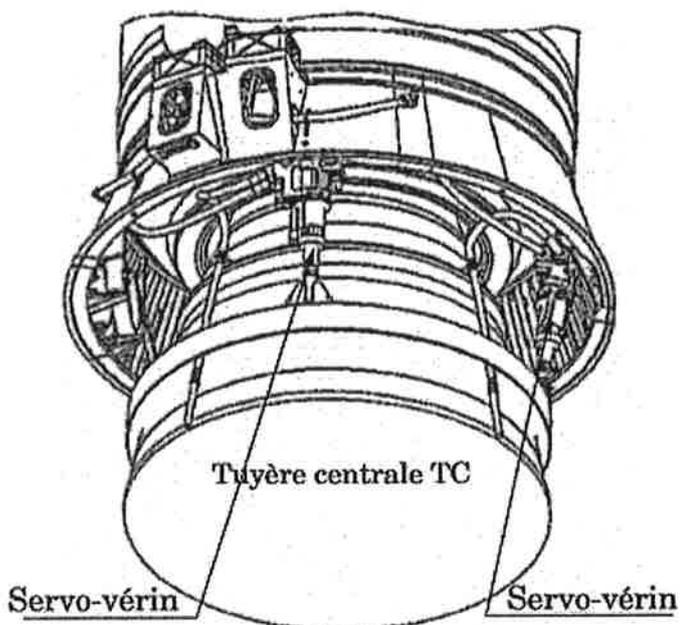
Lors d'un décollage et d'un vol de la fusée Ariane 5, de très nombreuses contraintes définies par un cahier des charges doivent être respectées. Toutes, bien évidemment, ne seront pas étudiées dans ce sujet, mais nous nous intéresserons au dispositif d'orientation de la fusée nécessaire à la poursuite de trajectoires imposées, et à la limitation de certaines fréquences de résonance pour limiter les couplages vibratoires.

Pour diriger la fusée on doit orienter la force propulsive. La solution retenue consiste à orienter les tuyères plutôt qu'à dévier les jets des moteurs.

Pour orienter une tuyère, deux vérins hydrauliques ont été choisis pour délivrer la puissance élevée nécessaire. Ce système hydraulique convertit la pression interne en énergie mécanique d'orientation des tuyères.

Comme il faut contrôler constamment le braquage des deux vérins asservis en position, deux servo-vérins hydrauliques ont donc été adoptés (voir figure 1.1. qui représente les deux servo-vérins qui s'appliquent sur la tuyère centrale TC).

Figure 1.1 : tuyère centrale TC et les deux servo-vérins



Pour orienter les tuyères autour des directions \vec{y} (axe de tangage) et \vec{z} (axe de lacet) on utilise l'élongation de servo-vérins placés dans des plans bissecteurs aux plans (\vec{x}, \vec{z}) et (\vec{x}, \vec{y}) . La figure 1.2. définit les axes de tangage et de lacet, la figure 1.3. définit les plans bissecteurs aux plans (\vec{x}, \vec{z}) et (\vec{x}, \vec{y}) , la figure 1.4. montre l'implantation des servo-vérins pour la tuyère centrale TC.

Figure 1.3 : position relative des servo-vérins par rapport à la tuyère centrale TC

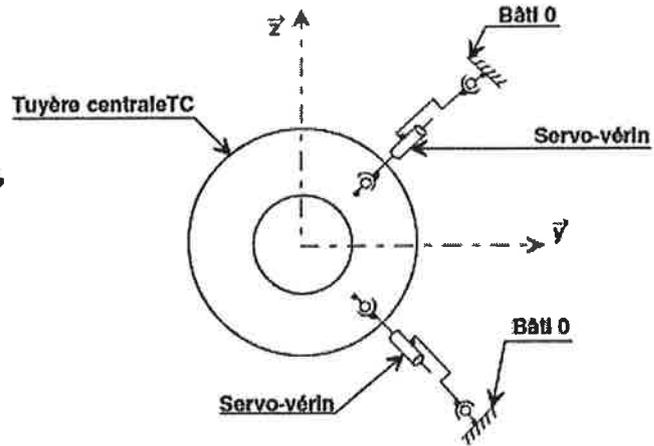


Figure 1.2 : axes de tangage, de lacet et de roulis

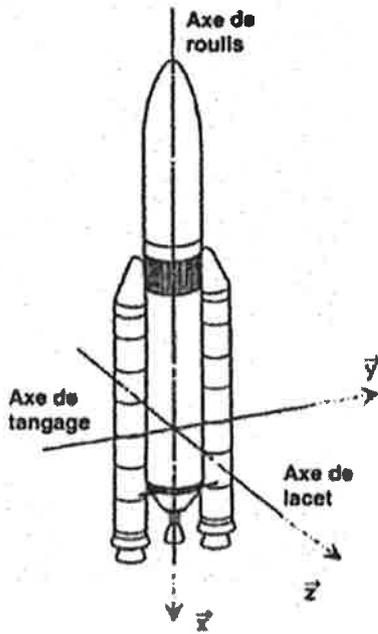
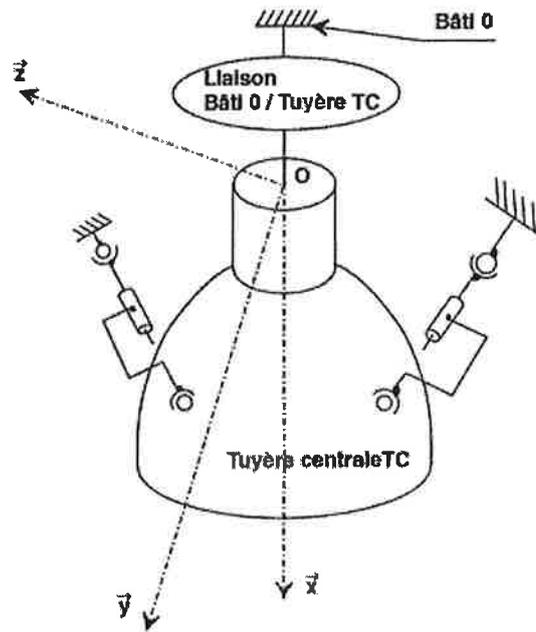
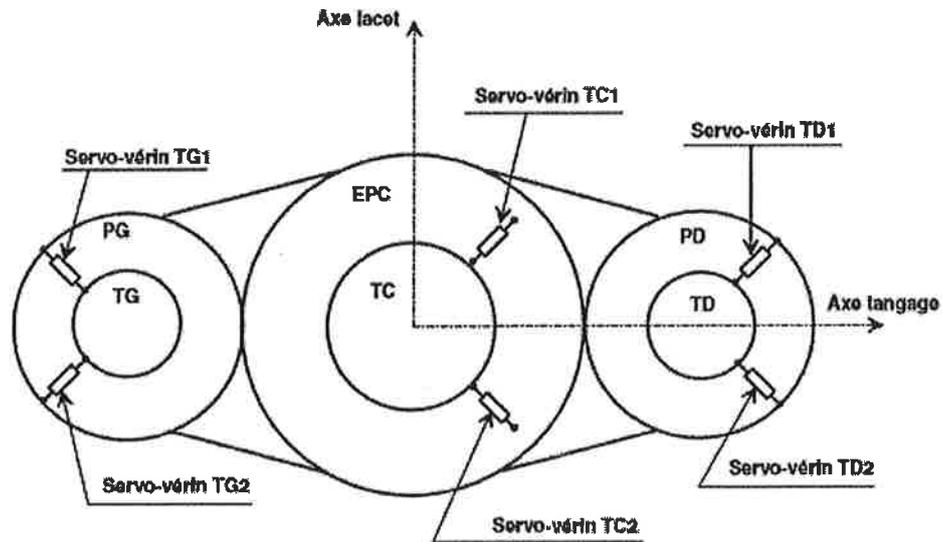


Figure 1.4 : schématisation de l'implantation des servo-vérins



La figure 1.5. ci-dessous est une représentation synoptique de la position des tuyères et des servo-vérins. Le pilotage de la fusée est réalisé en orientant les tuyères **TC**, **TD** et **TG**.

Figure 1.5 : représentation synoptique des servo-vérins et des tuyères



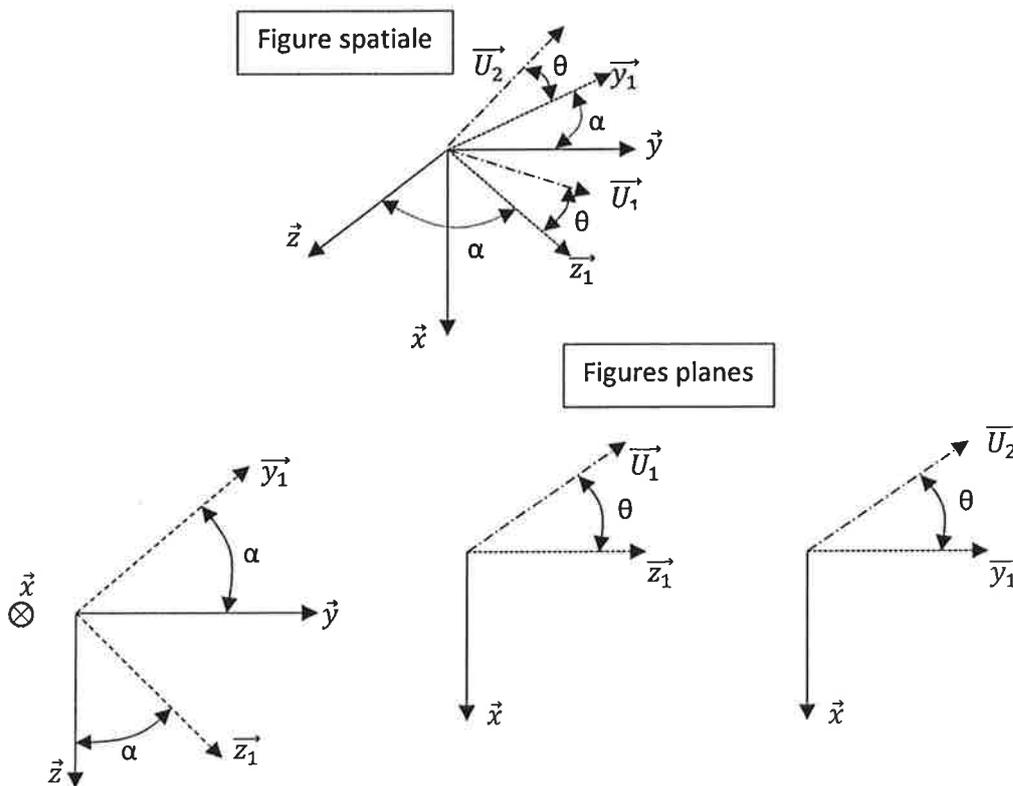
Pour obtenir un braquage de la fusée suivant l'axe de lacet, l'axe de tangage ou l'axe de roulis, il est nécessaire de piloter les servo-vérins TC1, TC2, TD1, TD2, TG1 et TG2.

Analyse du positionnement des servo-vérins TC1 et TC2.

Le cahier des charges impose pour l'ensemble tuyère centrale TC - tiges de vérins - corps de vérins - bâti 0, représenté figure 1.4, deux critères :

- Le premier est que la tuyère centrale TC doit être bloquée pour une élévation des servo-vérins imposée (servo-vérins bloqués)
- Le deuxième est que l'ensemble soit isostatique

Avant toute étude, mettons en place un paramétrage utile à notre problématique. Positionnons les vecteurs unitaires \vec{U}_1 et \vec{U}_2 représentant les axes des servo-vérins TC1 et TC2.



Ce qui donne l'expression de ces vecteurs unitaires dans la base $(\vec{x}\vec{y}\vec{z})$: (eh oui, Noël n'est pas si loin !!)

$$\vec{U}_1 = -\sin\theta \vec{x} + \cos\theta \sin\alpha \vec{y} + \cos\theta \cos\alpha \vec{z}$$

$$\vec{U}_2 = -\sin\theta \vec{x} + \cos\theta \cos\alpha \vec{y} - \cos\theta \sin\alpha \vec{z}$$

Le centre de la liaison Bâti/Tuyère TC est le point 0. L'intersection des axes \vec{U}_1 et \vec{U}_2 des servo-vérins TC1 et TC2 avec l'axe $(0, \vec{x})$ est le point O_1 . Nous avons donc : $\vec{OO}_1 = L\vec{x}$ avec $L = \text{constante}$.

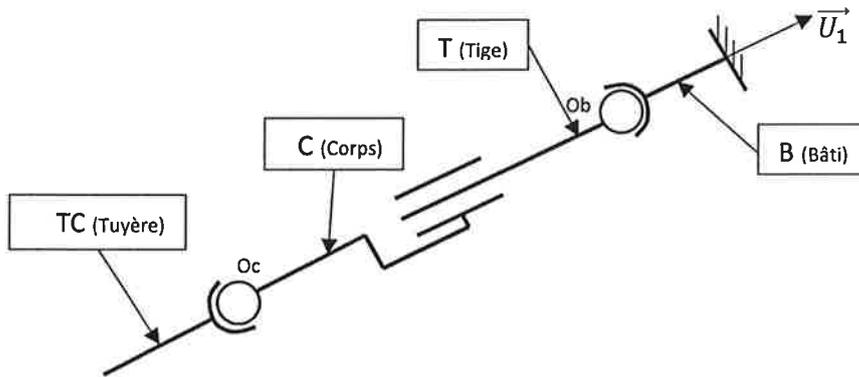
De plus concernant chaque servo-vérin, nous avons : $\vec{O_c O_b} = d\vec{u}_i$ avec $i = 1$ ou 2

MQ 21 – Transmission des efforts en mécanique

Travail à effectuer :

1°) Analyse d'un servo-vérin

Compléter le graphe des liaisons, du document réponses 1, correspondant au schéma cinématique du servo-vérin TC1 ci-dessous.



2°) **Compléter** les torseurs cinématiques de ces liaisons sur DR1.

3°) **Déterminer** par une étude cinématique la liaison équivalente notée L_{TC1} entre la tuyère TC et le bâti par l'intermédiaire du corps C et de la tige T. **Nommer** la liaison obtenue. **Citer** l'intérêt d'une telle liaison. **Répondre** sur DR1

4°) **Déterminer** la mobilité m , puis la mobilité utile m_u et en déduire la mobilité interne m_i . **Citer** à quoi correspondent ces mobilités internes. **Répondre** sur DR1.

5°) si l'on bloque la translation du servo-vérin, soit $U_2 = 0$, quelle nouvelle liaison équivalente obtient-on ? **Compléter** alors les torseurs cinématique et statique de cette nouvelle liaison équivalente du DR2.

Dans un premier temps, deux solutions ont été retenues pour réaliser la liaison tuyère centrale TC - bâti 0. Elles sont représentées sur les figures 1.7. et 1.8. ci-dessous. Sur la figure 1.7., la solution retenue est une liaison sphérique de centre O. Sur la figure 1.8., la solution retenue est une liaison type cardan de centre O.

Figure 1.7 : solution avec une liaison rotule

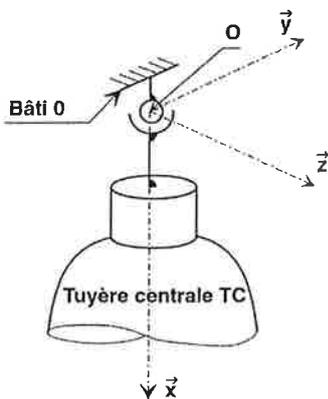
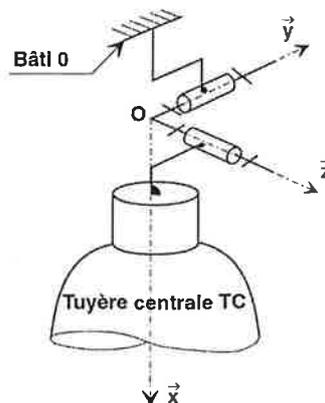


Figure 1.8 : solution avec une liaison type Cardan



MQ 21 –Transmission des efforts en mécanique

6°) Nous allons analyser le cas où *l'on bloque les deux servo-vérins en translation* ($U_i=0$).

Pour cela **compléter** le graphe des liaisons du DR2 correspondant à cette configuration ainsi que les torseurs statiques associés à ces liaisons, dans la base idéale puis dans la base $(\vec{x}\vec{y}\vec{z})$ en utilisant les expressions des vecteurs unitaires \vec{U}_1 et \vec{U}_2 qui vous ont été si gracieusement offertes.

7°) Par une étude statique, **déterminer** la liaison équivalente notée L_{TC-B} . **Nommez la** et **compléter** son torseur statique et son torseur cinématique du DR3.

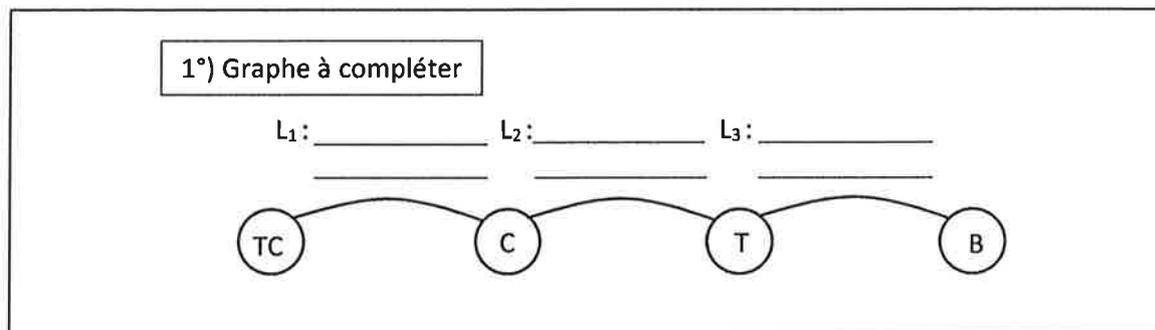
8°) **Calculer** son degré d'hyperstatisme **h** et sa mobilité **m**, sur DR3. **Commenter** par rapport aux *deux critères* du cahier des charges.

9°) Comme l'un des critères n'est pas respecté, on se propose de remplacer la liaison rotule de centre O, figure 1.7, par une liaison de centre O, type cardan, figure 1.8. **Vérifier** alors que les deux critères du cahier des charges sont vérifiés. Pour cela, après avoir complété sur DR3 le nouveau torseur statique de la liaison L_{13} , par une étude statique, **déterminer** la nouvelle liaison équivalente notée L_{NTC-B} . **Nommez la** et **compléter** son torseur statique et son torseur cinématique du DR4. **Calculer** son degré d'hyperstatisme **h** et sa mobilité **m**, sur DR4. **Commenter** de nouveau par rapport aux *deux critères* du cahier des charges. **Conclure** sur l'intérêt de cette liaison type cardan sur DR4.

Fin

Bon intersemestre !

MQ 21 – Transmission des efforts en mécanique



2°) Torseurs cinématiques à compléter :

$$\{\vartheta_{L_1}\}_{(0_c, \vec{u}_1, \vec{v}_1, \vec{w}_1)} = \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\}$$

$$\{\vartheta_{L_2}\}_{(0_c, \vec{u}_1, \vec{v}_1, \vec{w}_1)} = \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\}$$

$$\{\vartheta_{L_3}\}_{(0_b, \vec{u}_1, \vec{v}_1, \vec{w}_1)} = \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \longrightarrow \{\vartheta_{L_3}\}_{(0_c, \vec{u}_1, \vec{v}_1, \vec{w}_1)} = \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\}$$

3°) Equations cinématiques et torseur cinématique de la liaison équivalente L_{TC1} à compléter :

$$\{\vartheta_{L_{TC1}}\}_{(0_c, \vec{u}_1, \vec{v}_1, \vec{w}_1)} = \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\}$$

Nom de la liaison : _____

Intérêt de cette liaison : _____

NOM :

DR1

MQ 21 –Transmission des efforts en mécanique

4°) Détermination des différentes mobilités :

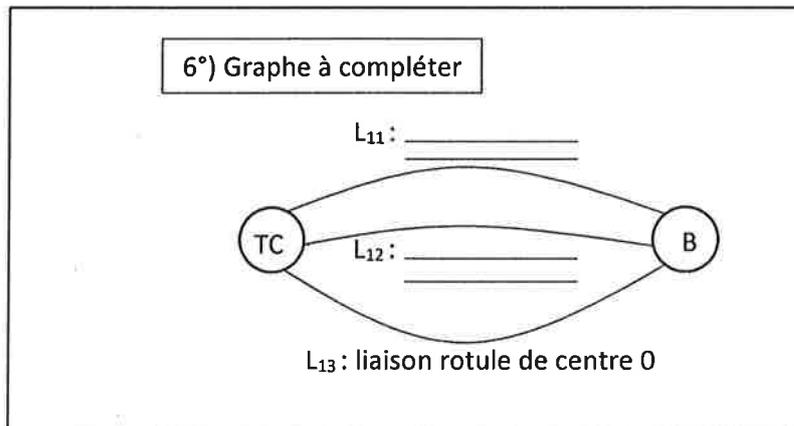
$$\mathbf{m} = \underline{\hspace{2cm}} \quad \mathbf{m}_u = \underline{\hspace{2cm}} \quad \mathbf{m}_i = \underline{\hspace{2cm}}$$

Mouvements dus aux mobilités internes :

5°) Nom de la nouvelle liaison équivalente L_{TC1} : _____

Expression de ses torseurs cinématique et statique :

$$\{\vartheta_{L_{TC1}}\}_{(0_c, \vec{u}_1, \vec{v}_1, \vec{w}_1)} = \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \quad \text{et} \quad \{T_{L_{TC1}}\}_{(0_c, \vec{u}_1, \vec{v}_1, \vec{w}_1)} = \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\}$$



Torseurs à compléter :

$$\{T_{L_{11}}\}_{(0_1, \vec{u}_1, \vec{v}_1, \vec{w}_1)} = \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \longrightarrow \{T_{L_{11}}\}_{(0_1, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})} = \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\}$$

$$\{T_{L_{12}}\}_{(0_1, \vec{u}_2, \vec{v}_2, \vec{w}_2)} = \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \longrightarrow \{T_{L_{12}}\}_{(0_1, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})} = \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\}$$

et avec $\{T_{L_{13}}\}_{(0, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})} = \begin{pmatrix} X_{13} & 0 \\ Y_{13} & 0 \\ Z_{13} & 0 \end{pmatrix}$

NOM :

DR2

MQ 21 –Transmission des efforts en mécanique

7°) Equations statiques :

Nom de la liaison L_{TC-B} :

$$\{T_{L_{TC-B}}\}_{(0_1, \vec{x}\vec{y}\vec{z})} = \left\{ \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \text{ et } \{\vartheta_{L_{TC-B}}\}_{(0_1, \vec{x}\vec{y}\vec{z})} = \left\{ \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right\}$$

8°) Détermination du degré d'hyperstatisme $h =$ _____

Détermination de la mobilité $m =$ _____

Commentaires par rapport aux critères du cahier des charges :

1^{er} critère : _____

2^{ème} critère : _____

9°) Liaison L_{13} type cardan

$$\{T_{L_{13}}\}_{(0, \vec{x}\vec{y}\vec{z})} = \left\{ \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right\}$$

Nouvelles équations statiques :

NOM :

DR3

MQ 21 –Transmission des efforts en mécanique

Nom de la liaison L_{NTC-B} : _____

Torseurs à compléter :

$$\{T_{L_{NTC-B}}\}_{(O_1, \vec{x}\vec{y}\vec{z})} = \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{ et}$$

$$\{\vartheta_{L_{NTC-B}}\}_{(O_1, \vec{x}\vec{y}\vec{z})} = \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\}$$

Détermination du degré d'hyperstatisme \mathbf{h} = _____

Détermination de la mobilité \mathbf{m} = _____

Commentaires par rapport aux critères du cahier des charges :

1^{er} critère : _____

2^{ème} critère : _____

NOM :

DR4