

## **Bras AIA (Articulated Inspection Arm) pour le Tore Supra**

Durée : 4 heures

*Le travail doit être reporté sur le cahier de réponses distribué avec le sujet. Un seul cahier de réponses est fourni au candidat, dont toutes les feuilles seront obligatoirement rendues à la fin de l'épreuve. Le renouvellement de ce document en cours d'épreuve est interdit.*

*Pour valider ce cahier réponses, chaque candidat doit obligatoirement y inscrire à l'encre, à l'intérieur du rectangle d'anonymat situé en haut de chaque copie [...] son nom et son prénom [...].*

*Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.*

**Les questions 1 à 17 puis 28 et 29 comptent pour un devoir de SI.**

**Les questions 18 à 27 puis 30 à 33 comptent pour un devoir d'informatique.**

# 1 Présentation générale du bras AIA

## 1.1 Le contexte de l'étude

La consommation énergétique mondiale pourrait atteindre, en 2050, deux à trois fois la consommation actuelle. L'épuisement des combustibles fossiles et l'adaptation difficile des énergies dites « renouvelables » aux besoins croissants des pays à forte densité de population rendent indispensable le développement de nouvelles sources énergies. L'énergie obtenue par la fusion contrôlée est une piste envisagée : les projets Tore Supra et ITER ont été pensés dans cette optique. Il existe principalement deux procédés permettant d'arriver, en théorie, à confiner un milieu de réaction afin de produire des réactions de fusion nucléaire : la fusion par confinement magnétique et la fusion par confinement inertiel.

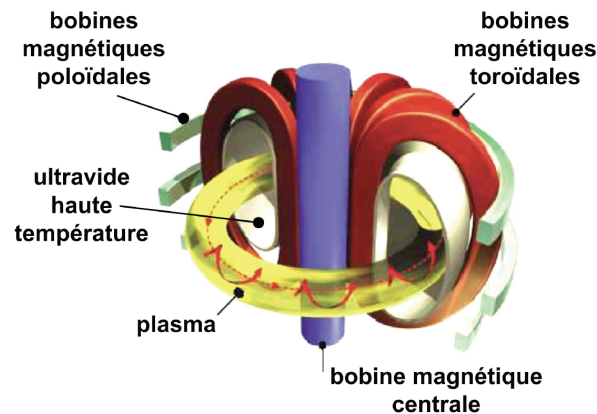


Figure 1: Principe d'un tokamak

Le Tore Supra appartient à la première catégorie dite des « tokamaks » et est implanté sur le site du CEA de Cadarache (13) depuis 1988.

Le Tore Supra dispose d'une double armature de bobines (aimants) supraconductrices, permettant de générer un champ magnétique important. Le plasma créé est ainsi confiné immatériellement dans cette enceinte torique. L'objectif est de convertir l'énergie calorifique du plasma stabilisé au sein de la chambre du réacteur en énergie électrique. Dans ITER, le volume du plasma devrait être plus de trente fois supérieur à celui du Tore Supra (cf. tableau 1).

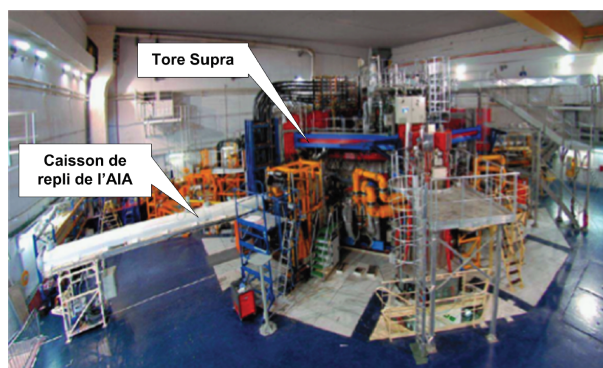


Figure 2: Vue générale de Tore Supra

| Grandeurs                               | Tore Supra        | ITER               |
|-----------------------------------------|-------------------|--------------------|
| Grand rayon du plasma (cf.figure 4)     | 2.42 m            | 6.2 m              |
| Petit rayon du plasma (cf.figure 4)     | 0.72 m            | 2 m                |
| Volume du plasma                        | 25 m <sup>3</sup> | 840 m <sup>3</sup> |
| Champ magnétique totoïdal               | 4.5 T             | 5.3 T              |
| Courant dans le plasma                  | 1.7 MA            | 15 MA              |
| Puissance thermique                     | –                 | 500 MW             |
| Facteur d'amplification de la puissance | ≈ 0               | ≥ 10               |

Tableau 1: Vue générale de Tore Supra

## 1.2 Pourquoi concevoir un bras d'inspection ?

La création et la circulation du plasma au sein de réacteur pose des problèmes d'usure des parois de l'enceinte. Les parois refroidies réalisant le confinement magnétique du plasma sont soumises à d'importants flux de neutrons, à des flux thermiques, à des rayonnements ainsi qu'à des contraintes thermo-mécaniques. Ces sollicitations induisent des phénomènes d'érosion ou d'altération des parois de l'enceinte (cf. figure 3) et imposent une inspection régulière de leur état.

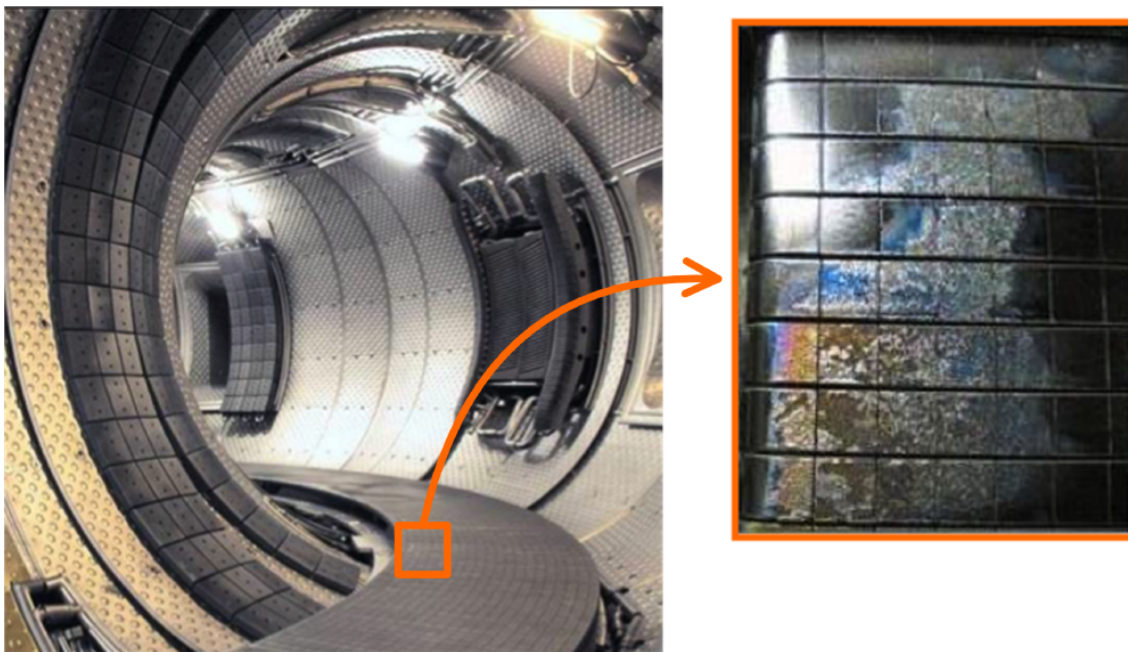


Figure 3: Dépôt de carbone sur le limiteur du Tore Supra

Toutefois, lors de cette opération, les conditions extrêmes d'ultravide (pression d'environ  $10^{-6}$  Pa) réalisées dans l'enceinte et indispensables à la création et à la stabilisation du plasma, ne sauraient être rompues par l'introduction d'un organe d'inspection exogène. C'est principalement pour cette raison que la solution technique retenue pour inspecter l'enceinte se compose d'un bras articulé en chaîne ouverte attelé à un chariot pouvant se déployer dans le Tore Supra à partir d'un caisson et d'un sas solidaire de la structure du réacteur (cf. figure 4).

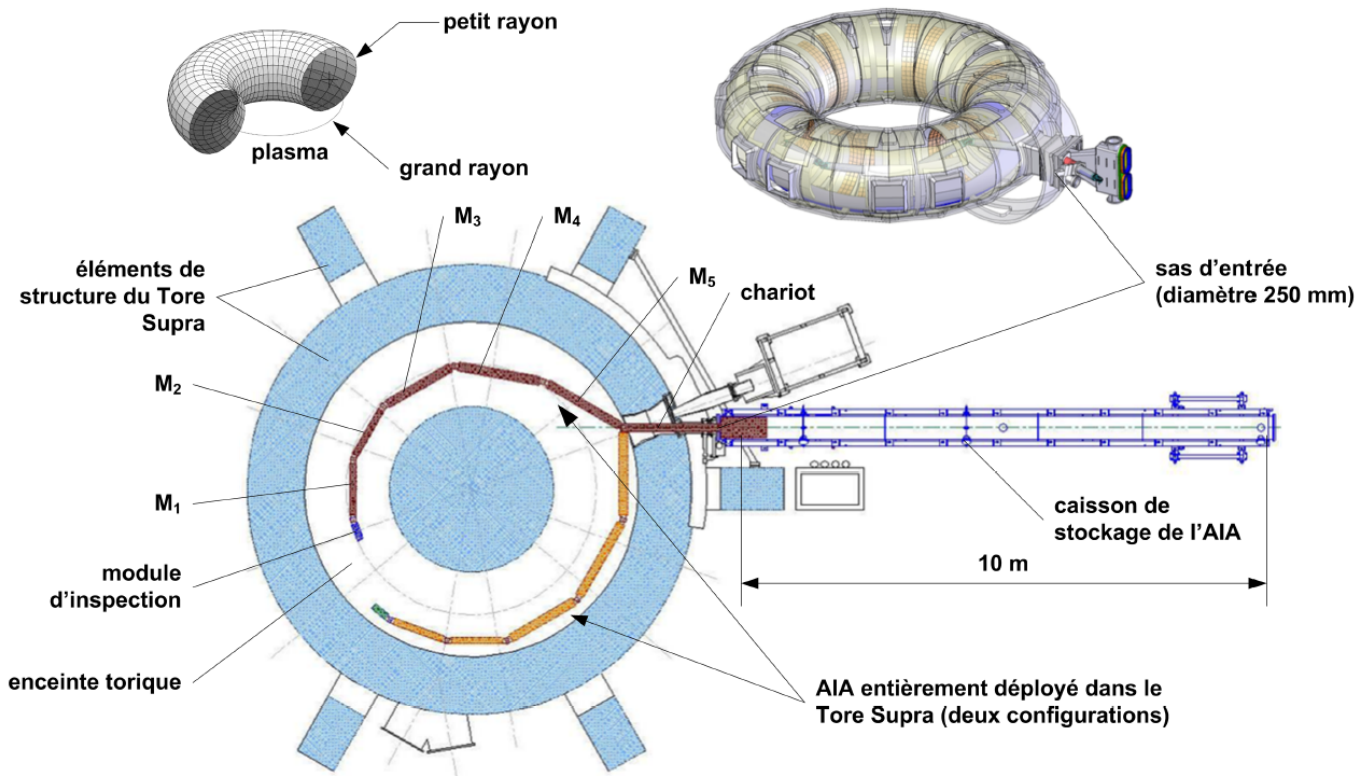


Figure 4: Déploiement du bras AIA dans l'enceinte du Tore Supra

Quelques heures après l'arrêt préventif du réacteur, le bras AIA doit pouvoir se déployer afin d'effectuer une opération d'inspection (cf. figure 7a) tout en supportant les conditions de pression et de température régnant à l'intérieur de l'enceinte du Tore Supra.

### 1.3 Analyse fonctionnelle externe partielle du système étudié

L'environnement immédiat du bras AIA est décrit par le diagramme des inter-acteurs proposé sous une forme partielle (cf. figure 5).

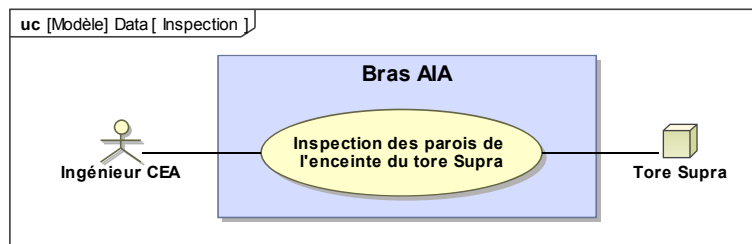


Figure 5: Diagramme des cas d'utilisation

Un extrait du cahier des charges est donné en annexe. Il s'agit ici d'un diagramme des exigences qui regroupe un résumé des critères attendus pour le bras AIA. Certaines valeurs sont absentes du diagramme et feront l'objet d'une interrogation.

## 1.4 Structure générale du bras AIA

### 1.4.1 Structure modulaire

Afin d'inspecter les zones peu accessibles des installations sensibles, une série de bras élançés qualifiés de « serpents » a été développée. Tous ces bras robotiques sont conçus autour d'une même idée : des modules porteurs articulés et assemblés en série munis d'un module d'inspection à leur extrémité.

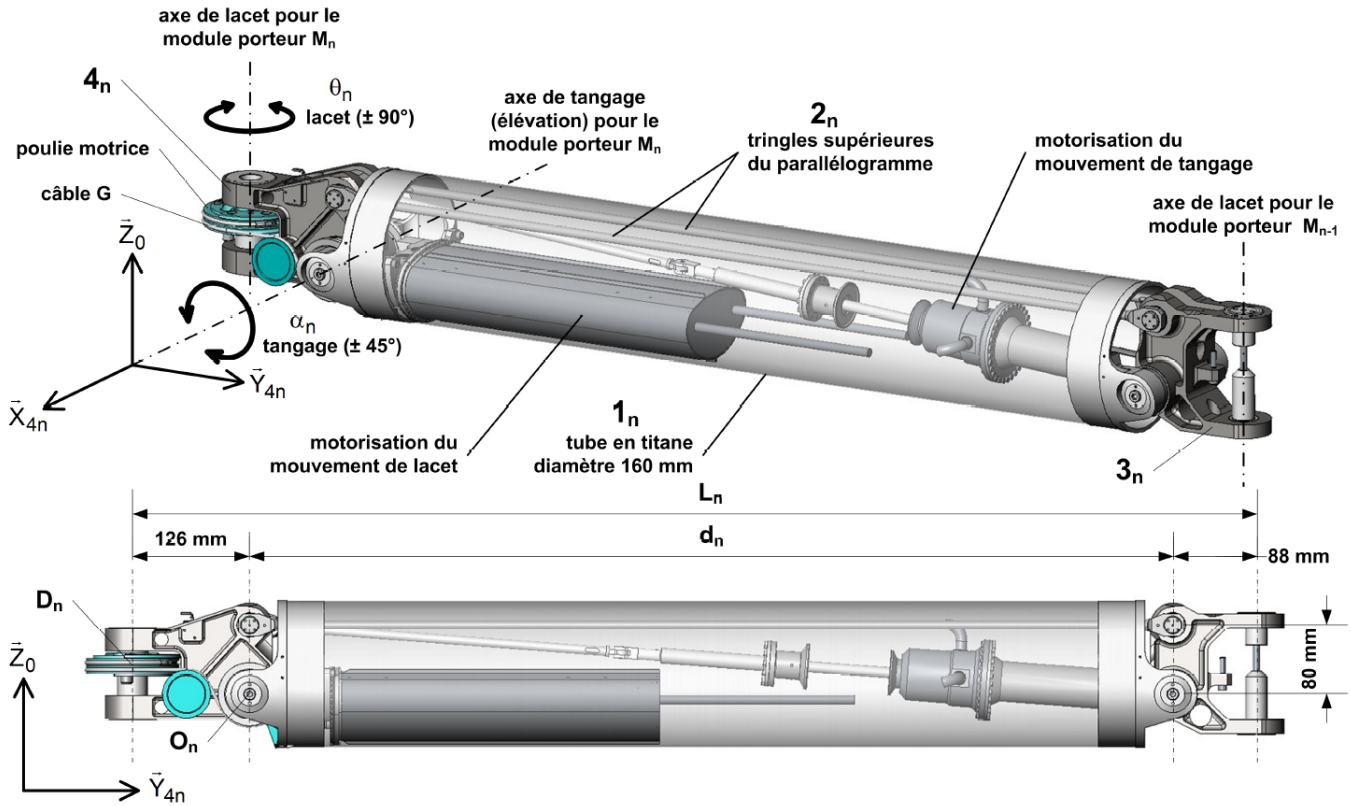


Figure 6: Constituants principaux et dimensions d'un module porteur  $M_n$

| Module                  | Longueur       |
|-------------------------|----------------|
| Module porteur "type 1" | $L_n = 1,66$ m |
| Module porteur "type 2" | $L_n = 1,56$ m |
| Module porteur "type 3" | $L_n = 1,21$ m |

L'amplitude des mouvements de lacet est telle que  $\theta \in [\theta_{min}; \theta_{max}] = [-90^\circ; +90^\circ]$ .

L'amplitude des mouvements de tangage est telle que  $\alpha \in [\alpha_{min}; \alpha_{max}] = [-45^\circ; +45^\circ]$ .

Tableau 2: Caractéristiques des modules standards

Le corps d'un module porteur standard  $M_n$  est constitué d'un tube en titane d'un diamètre de 160 mm (cf. figure 6) à l'intérieur duquel viennent se loger les deux blocs étanches de motorisation des deux axes. Tous les modules porteurs  $M_n$  sont de conception mécanique strictement identique et ont vocation à être assemblés en chaîne ouverte. Ils sont articulés entre eux grâce à un joint mécanique d'articulation possédant deux degrés de mobilité :

une rotation  $\theta_n$  caractérisant un mouvement dit de « lacet » et une élévation  $\alpha_n$  caractérisant un mouvement dit de « tangage ». Ces deux rotations s'effectuent selon deux axes perpendiculaires respectivement  $(D_n, \vec{Z}_0)$  et  $(O_n, \vec{X}_{4n})$ . Afin de couvrir la plus large gamme possible d'utilisation, trois longueurs de module porteur sont proposées. La longueur  $L_n$  du module porteur  $M_n$  est définie comme la distance entre les axes de lacet de  $M_n$  et de  $M_{n-1}$  pour un tangage nul ( $\alpha_n = 0$ ).

#### 1.4.2 Configuration de l'AIA pour le Tore Supra

Dans sa déclinaison spécifique au Tore Supra, la structure du bras d'inspection conçu fait apparaître deux entités distinctes : un chariot (nécessaire au déploiement dans Tore Supra) et le bras AIA proprement dit. La dénomination « bras AIA » correspond à l'ensemble constitué des  $n$  modules porteurs et du module d'inspection placé à son extrémité (cf. figure 7). Par convention, « module porteur » (repéré  $M_n$ ) désigne l'association des quatre solides :  $M_n = \{1_n \cup 2_n \cup 3_n \cup 4_n\}$ ,  $n = 1, \dots, 5$ .

Un repérage des éléments constitutifs du bras AIA est donné sur la figure 8 où sont indiquées les rotations des modules les uns par rapport aux autres. Un modèle cinématique plus détaillé des joints mécaniques d'articulation complète la figure.

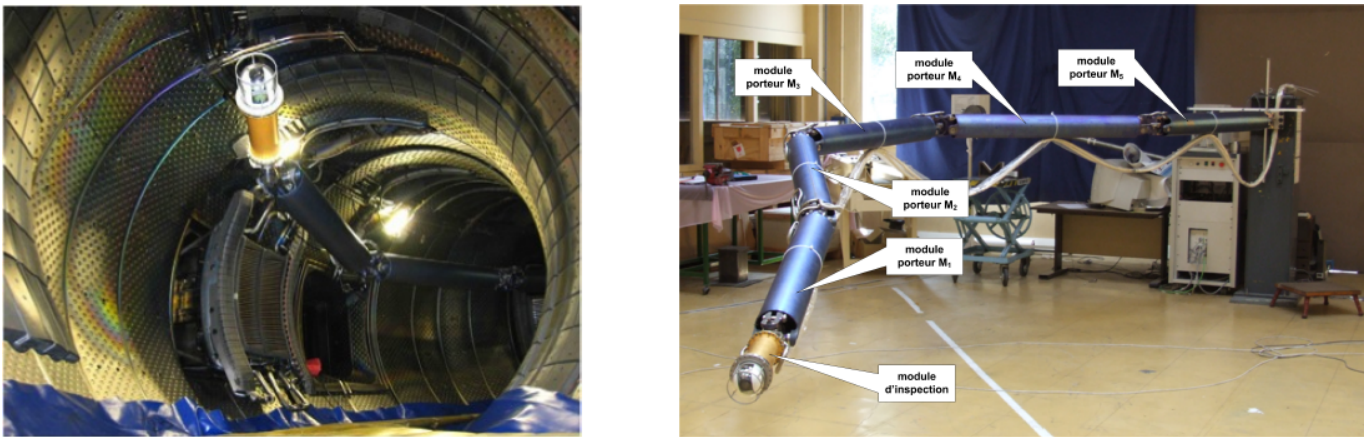


Figure 7: Vues du bras AIA (à gauche : en phase d'inspection du Tore Supra ; à droite : en laboratoire)

| Module                                                  | Type   | Longueur                                    | Masse                                                          |
|---------------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Module d'inspection<br>embarquant le processus<br>vidéo | –      | $L_c = \ \vec{D_c D_f}\  = 0,511 \text{ m}$ | $m = 10 \text{ kg}$                                            |
| Module porteurs $M_4$ et $M_5$                          | type 1 | $L_4 = L_5 = 1,66 \text{ m}$                | Masse totale des 5<br>modules porteurs<br>$M = 150 \text{ kg}$ |
| Module porteurs $M_3$                                   | type 2 | $L_3 = 1,56 \text{ m}$                      |                                                                |
| Module porteurs $M_1$ et $M_2$                          | type 3 | $L_1 = L_2 = 1,21 \text{ m}$                |                                                                |

Tableau 3: Caractéristiques des modules utilisés pour le bras AIA

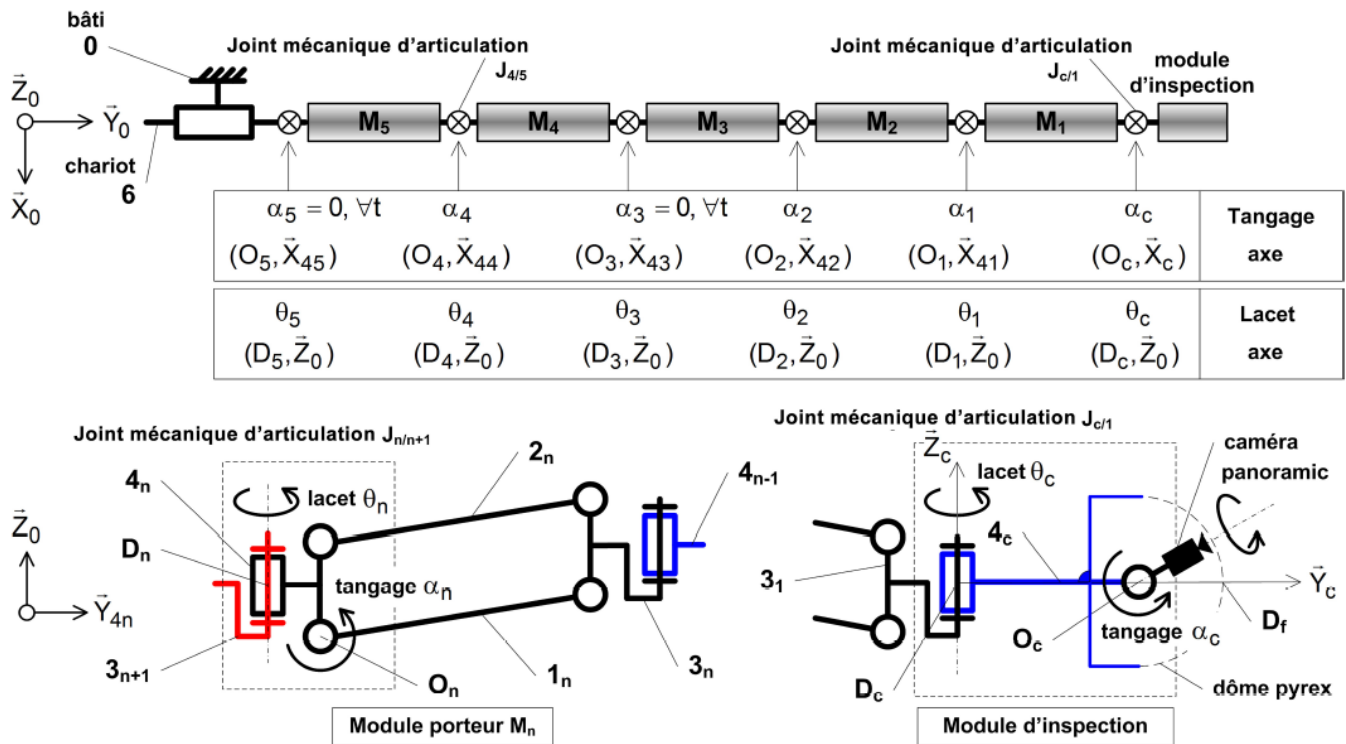


Figure 8: Numérotation des modules porteurs, du module d'inspection et des axes de mouvement

## 2 Étude des exigences liées au positionnement du bras dans le Tore Supra (id = "BR-15.1.1")

### 2.1 Validation des longueurs et des amplitudes des mouvements des modules porteurs

#### Objectif

Évaluer la compatibilité entre la géométrie du bras AIA et celle de l'enceinte dans laquelle il doit être introduit.

Avant le positionnement du module d'inspection près d'une zone à inspecter, le bras AIA doit être inséré (phase progressive d'introduction réalisée grâce au chariot) puis orienté dans l'enceinte (le tangage des modules n'intervient pas lors de cette phase).

Les uns après les autres, les modules porteurs sont insérés dans l'enceinte torique. Chaque module porteur est :

1. **d'abord** inséré grâce au seul mouvement de translation du chariot,
2. **puis** orienté.

Au cours de cette deuxième étape le chariot est fixe et les modules porteurs déjà insérés peuvent être orientés.

Une fois l'insertion totale effectuée, la géométrie du bras peut être adaptée : c'est la phase de déploiement. Les mouvements de lacet et/ou de tangage deviennent possibles permettant in fine de positionner le module d'inspection vidéo dans le tore. L'insertion et le déploiement s'effectuent dans le plan médian horizontal de l'enceinte d'un côté ou de l'autre du centre de celle-ci (zone de déploiement à droite ou à gauche, voir figure 4 et annexe 1).

Dans un premier temps, l'étude sera basée sur la structure à **5 modules porteurs** assemblés en série et sans se soucier du module d'inspection. On cherche ainsi uniquement à s'assurer de la capacité du bras à positionner correctement le point particulier  $D_c$  (cf. figure 8) dans l'enceinte torique.

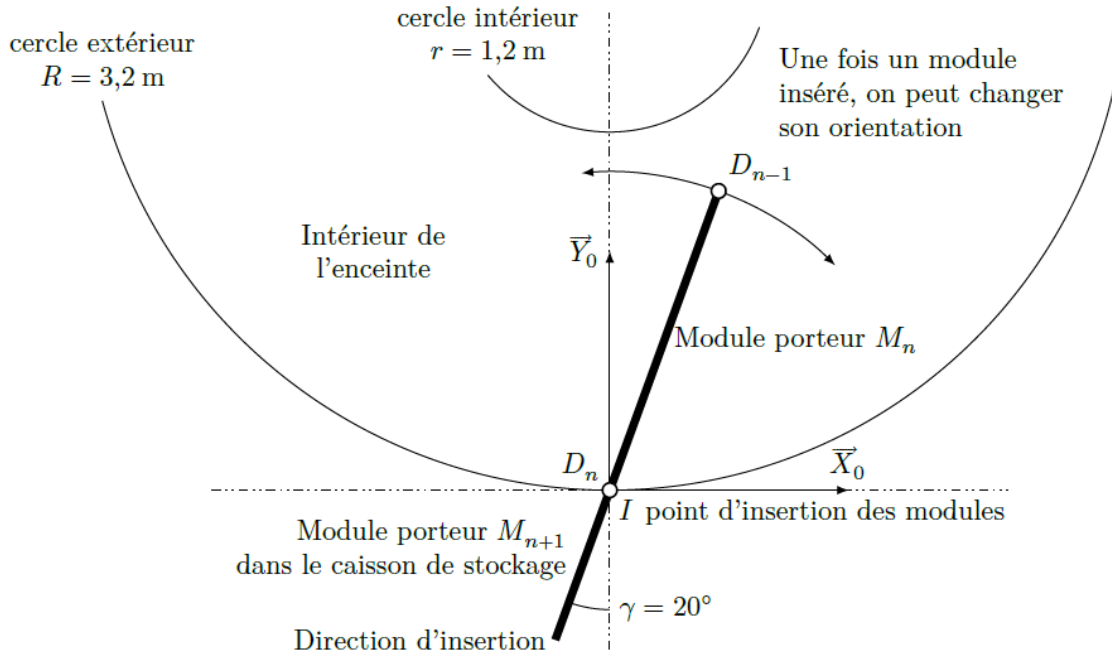


Figure 9: Module porteur  $M_n$  en fin d'insertion

Dans le plan médian, l'enceinte est délimitée par deux cercles de rayons respectifs  $r = 1,20$  m et  $R = 3,20$  m. La direction d'insertion des modules porteurs demeure fixe et, une fois inséré entièrement, le module porteur  $M_n$  est orientable vers la droite ou la gauche du centre de l'enceinte par rotation autour de l'axe  $(I, \vec{Z}_0)$  (cf. figures 4 et 9). Ce mouvement doit se faire sans collision avec les parois de l'enceinte torique.

**Question 1.** Déterminer la longueur maximale d'un module porteur pouvant être inséré et orienté dans l'enceinte torique. On rappelle que le cahier des charges impose une distance de sécurité de 10 cm avec la paroi. Comparer cette valeur à celles des modules standards et conclure quant à la possibilité d'insertion sans risque de contact avec les parois.

La structure choisie (nombre de modules ainsi que leur longueur) doit permettre au bras AIA de positionner le module d'inspection dans la zone de l'enceinte diamétralement opposée au sas d'entrée (zone la plus éloignée). Sur la vue du dessus de l'enceinte (annexe 1) est représenté le bras AIA (sans le module d'inspection) déployé le long du cercle médian  $C_m$  de l'enceinte.

L'angle d'enroulement du bras AIA (sans le module d'inspection) est noté  $\beta_d$  et est défini comme la somme des angles  $\beta_n$  représentés sur l'annexe 1. Pour un déploiement le long du cercle  $C_m$  il faut donc  $\beta_d = \sum_{n=1}^5 \beta_n \geq 180^\circ$  (voir exigences du cahier des charges) afin d'être certain que les zones les plus éloignées du sas d'entrée puissent être inspectées.

**Question 2.** Pour un module porteur  $M_n$  déployé ( $n \neq 5$ ) donner l'expression de l'angle  $\beta_n$  en fonction de  $R_m$  (rayon de  $C_m$ ) et  $L_n$  (longueur du module porteur  $M_n$ ). Donner la valeur numérique en degrés de chaque angle  $\beta_n$  ( $n \neq 5$ ) et en déduire la valeur de l'angle d'enroulement  $\beta_d$  en faisant l'hypothèse que  $\beta_5 \approx \beta_4$ . Conclure vis-à-vis du cahier des charges.

La capacité de déploiement complet du bras est à présent démontrée. La présence ou non du module d'inspection en bout de bras ne change rien puisque sa longueur se révèle inférieure à la longueur du plus petit des modules porteurs insérés dans le Tore Supra.

Afin que la structure géométrique du bras soit entièrement validée, sa capacité à déplacer la caméra selon la verticale doit être quantifiée. Le bras AIA étant entièrement déployé dans le Tore Supra sur le cercle médian  $C_m$ , l'élévation complète du module d'inspection doit pouvoir être réalisée par le tangage d'un seul des modules porteurs  $M_n$ .

**Question 3.** Dans ces conditions, quelle est l'élévation verticale minimale du module d'inspection ? Faire l'application numérique. Conclure quant au respect du cahier des charges.

**Question 4. Conclusion :** dans le contexte de l'étude et en reprenant les réponses apportées aux questions précédentes, quel critère détermine principalement la longueur du module porteur le plus court et quel critère détermine la longueur du module porteur le plus long ?

## 2.2 Validation de la tenue sous charge de l'articulation la plus sollicitée



### Objectif

L'action de la gravité engendre sur l'architecture très élancée du bras AIA des efforts importants dans les articulations de lacet reliant les différents modules entre eux. L'étude précédente du déploiement complet dans l'enceinte a permis de justifier l'utilisation de 5 modules porteurs. Il convient dorénavant d'évaluer la compatibilité de cette configuration avec le critère de charge maximale admissible par articulation.

Les mouvements du bras étant très lents, une étude statique est privilégiée. Le bras AIA est donc considéré comme immobile et placé en laboratoire (cf. figure 7) dans la configuration la plus défavorable (configuration rectiligne). Pour la même raison, tous les modules porteurs  $M_n$  sont supposés de longueur maximale ( $L = 1,66$  m) et de masse identique ( $m_m = 30$  kg). On suppose que le centre de gravité  $G_n$  d'un module porteur  $M_n$  se situe en son milieu. C'est également le cas pour  $G_c$ , centre de gravité du module d'inspection.

**Question 5.** Par un isolement adéquat, déterminer les éléments de réduction au point  $D_1$  du torseur d'action mécanique exercé par le module porteur  $M_2$  sur le module porteur  $M_1$  noté  $\{T(M_2 \rightarrow M_1)\}$  au point  $D_1$ , en fonction de  $m$ ,  $m_m$ ,  $L$ ,  $L_c$  et  $g$ .

**Question 6.** En généralisant les relations pour  $n$  modules porteurs, établir l'expression de la norme de la résultante  $\|\vec{R}_{(M_{n+1} \rightarrow M_n)}\|$  et du moment en  $D_n$ ,  $\|\vec{M}_{D_n}(M_{n+1} \rightarrow M_n)\|$  des actions mécaniques exercées par le module porteur  $M_{n+1}$  sur le module porteur  $M_n$  en fonction de  $n$  et de  $m$ ,  $m_m$ ,  $L$ ,  $L_c$  et  $g$ .

Un calcul de détermination des contraintes et des déformations dans le matériau, réalisé sur un logiciel adapté (méthode dite des « éléments finis ») sur une articulation « de lacet » dimensionnée a été effectué. Pour ce type de sollicitation mécanique, cette simulation numérique a permis d'établir le critère de résistance suivant : la charge

statique maximale admissible est de l'ordre de 1800 N pour la résultante et de 7200 N.m pour le moment.

**Question 7.** Le nombre de modules porteurs nécessaires à une inspection dans le Tore Supra est-il compatible avec le critère de charge admissible énoncé précédemment ?

La standardisation des modules porteurs implique l'invariance des actionneurs (puissance identique) utilisés pour les mouvements de lacet et de tangage. De fait, un dispositif particulier est indispensable afin de compenser largement les effets de la gravité sur cette structure. Un ressort d'équilibrage est donc inséré entre le solide ( $4_n$ ) et le solide ( $1_n$ ). La figure 10 précise le paramétrage du module porteur  $M_n$  (de longueur  $L$ ) pour un tangage nul. On considère les hypothèses suivantes :

- Seul ( $1_n$ ) est considéré comme pesant avec :

$$\{T(\text{grav} \rightarrow 1_n)\}_{G_n} = \begin{cases} -m_m g \vec{Z}_0 \\ \vec{0} \end{cases}$$

$G_n$  étant situé au milieu du segment  $[O_n B_n]$ .

- Les hypothèses de la statique plane sont adoptées. On pose :  $\vec{B_n D_{n-1}} = \frac{1}{2} H \vec{Z}_0 + b \vec{Y}_{4n}$ .
- Le ressort d'équilibrage exerce une force définie par le torseur :

$$\{T(\text{ress} \rightarrow 1_n)\}_{B_n} = \begin{cases} \vec{R}_{\text{ress} \rightarrow 1_n} = R \cdot \left( \frac{H}{\sqrt{H^2 + d^2}} \vec{Z}_0 - \frac{d}{\sqrt{H^2 + d^2}} \vec{Y}_{4n} \right) \\ \vec{0} \end{cases}$$

- Le module  $M_{n-1}$  exerce sur  $3_n$  une force dont la résultante vérifie  $\vec{R}_{M_{n-1} \rightarrow 3_n} = (m_m \cdot (n-1) + m) \cdot g \cdot \vec{Z}_0$

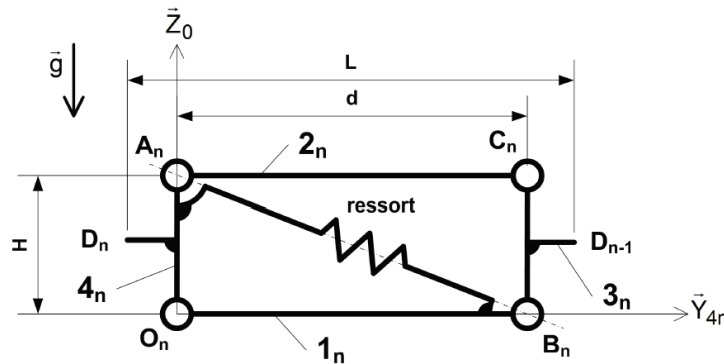


Figure 10: Paramétrage pour le module porteur  $M_n$  (en équilibre pour un tangage nul)

On se place dans la position particulière définie sur la figure 10 pour les deux questions suivantes.

**Question 8.** Montrer que la résultante de l'action mécanique exercée par ( $2_n$ ) sur ( $3_n$ ) est dirigée par  $\vec{Y}_{4n}$ .

**Question 9.** Exposer la méthode permettant de déterminer l'expression de la résultante d'action mécanique qu'exerce le ressort sur le solide ( $1_n$ ) assurant de fait l'équilibre du module porteur  $M_n$  en fonction de  $m_m$ ,  $m$ ,  $H$ ,  $g$ ,  $d$  et  $n$ . Pour cela, indiquer avec rigueur :

- les hypothèses nécessaires à ce calcul ;
- le ou les solides isolés, les inventaires des actions mécaniques extérieures ainsi que le ou les théorèmes utilisés pour la résolution.

Après calcul l'expression de la résultante de l'action du ressort sur  $(1_n)$  est :

$$R_{(\text{ressort} \rightarrow 1_n)} = \frac{\sqrt{d^2 + H^2}}{H} \left( \frac{m_m}{2}(2n - 1) + m \right) g$$

**Question 10. Conclusion :** expliquer en quoi la relation précédemment établie permet d'affirmer que la condition d'équilibre du module porteur  $M_n$ , dans la position de la figure 10, ne dépend pas de la position relative de l'ensemble des modules porteurs  $M_{n-1}$  à  $M_1$  et du module d'inspection par rapport au module porteur  $M_n$ .

Cette première phase a permis de valider la configuration matérielle du bras d'inspection AIA, soit 5 modules porteurs associés à un module d'inspection. Cependant, l'association de tous ces modules porteurs en série crée une structure hautement sensible aux effets vibratoires. La commande d'une telle structure flexible nécessite l'élaboration d'un modèle de comportement dynamique du bras.

### 3 Étude partielle des exigences liées à la réalisation d'une image d'une anomalie de l'enceinte du Tore Supra (id = "BR-15.1.2")

La structure flexible et très élancée du bras est extrêmement sollicitée par les actions de la gravité. Elle l'est également par les perturbations induites par les mouvements relatifs des modules entre eux, ce qui influence fortement la qualité des images prises lors d'une inspection. Afin de limiter au maximum ces effets de couplage dynamique entre modules, les mouvements de lacet et de tangage s'effectuent très lentement (0,5 rad/min). Toutefois, cette mesure conservatoire s'avère insuffisante et elle doit être complétée par un processus efficace et calibré de génération des commandes en mouvement et en position de chaque joint mécanique d'articulation.

#### 3.1 Analyse structurelle de la chaîne de transmission du mouvement de lacet

|                                                                                    |                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p><b>Objectif</b></p> <p>Mettre en évidence le mouvement perturbateur de tangage sur le mouvement de lacet du module porteur <math>M_n</math> par rapport au module porteur <math>M_{n+1}</math>.</p> |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Un schéma cinématique minimal du module porteur  $M_n$  est présenté sur la figure 11. Les différents solides définis sur la figure 8 sont représentés ainsi que les mécanismes de transformation de mouvement censés créer les mouvements de lacet et de tangage. Les motoréducteurs ne sont pas représentés.





### 3.2 Étude de la commande en lacet du bras AIA



#### Objectif

I Valider l'architecture de la commande en lacet vis-à-vis des performances attendues.

Quelle que soit l'inspection programmée, le mouvement de lacet intervient dans le positionnement du module d'inspection et, au vu du nombre de mobilités en lacet et des caractéristiques du bras, il est essentiel de s'assurer de la qualité de la commande en position du mouvement de lacet. Le cahier des charges impose les performances données tableau 4 pour la commande en position en lacet. Ces performances ont été établies afin de

- favoriser la stabilisation de la prise de vue (limiter le traitement des images réalisées) ;
- et limiter les risques de collision en phase d'approche des parois.

En raison des temps très importants nécessaires à la maintenance du réacteur Tore Supra, aucun critère de rapidité pour les commandes en mouvement n'est spécifié.

| Critères                                                                                                          | Valeur associée         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Amortissement en lacet                                                                                            | Aucun dépassement admis |
| Erreur de position en régime stationnaire pour une entrée de type échelon                                         | Nulle                   |
| Erreur de position relative aux perturbations en régime stationnaire pour une consigne de tangage du type échelon | Nulle                   |

Tableau 4: Récapitulatif du cahier des charges

La figure 15 représente l'architecture complète de commande en position en mouvement de lacet.

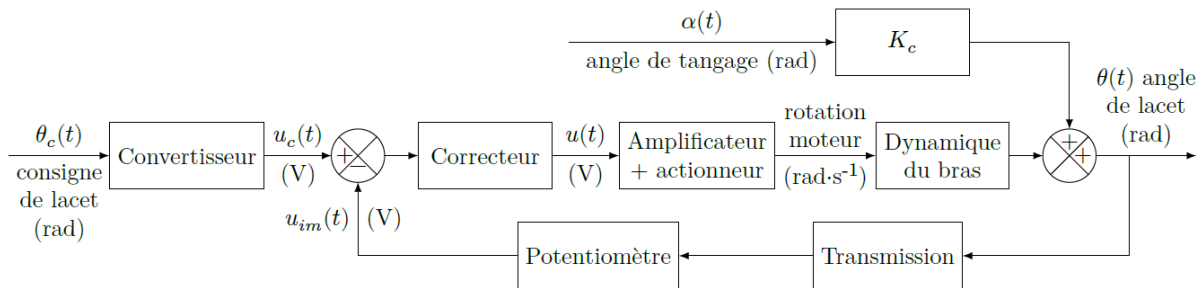


Figure 15: Détail de la commande en position

Tous les joints mécaniques d'articulation étant identiques, l'étude suivante porte sur les performances de la commande de lacet du joint  $J_{6/5}$  autour de l'axe  $(D_5, \vec{Z}_0)$  et ce pour le bras AIA en configuration rectiligne (inertie maximale) avec tous les modules immobiles les uns par rapport aux autres (voir figure 16). Soit  $R_1(D_5, \vec{X}_1, \vec{Y}_1, \vec{Z}_0)$  le repère lié au bras AIA, l'angle de lacet de l'ensemble est noté  $(\vec{X}_0, \vec{X}_1) = (\vec{Y}_0, \vec{Y}_1) = \theta(t)$ .

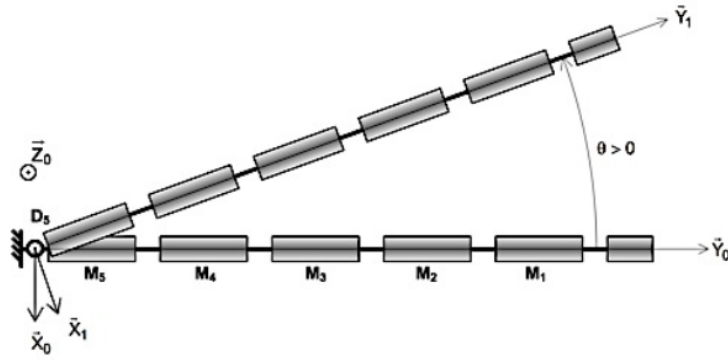


Figure 16: Paramétrage du mouvement de lacet

Un moteur à courant continu entraîne deux dispositifs vis-écrou fonctionnant en opposition. Cela signifie donc qu'une des vis a un pas à droite et que l'autre a un pas à gauche. Chaque dispositif vis-écrou agit sur un câble ( $G$  et  $D_r$ ) enroulé autour d'une poulie fixe (cf. figure 17). C'est le sens de rotation du moteur qui impose le sens de transmission des actions mécaniques des vis sur les câbles. Le bras AIA est en liaison pivot d'axe  $(D_5, \vec{Z}_0)$  alors que la poulie motrice 0 est fixe.

Afin de réaliser l'asservissement en position, la chaîne fonctionnelle de lacet est équipée d'un potentiomètre rotatif fournissant une tension image de l'angle de lacet. Le potentiomètre est entraîné en rotation grâce à une transmission par engrenage avec la poulie motrice fixe 0. Le rapport de transmission Potentiomètre/Poulie 0 est noté  $K_T$  et le gain du potentiomètre est noté  $K_p$ . Un convertisseur convertit l'angle de lacet de consigne  $\theta_c(t)$  en une tension image  $u_c(t)$  en volt (figure 15). Le convertisseur est modélisé par un gain  $K_{co} = K_p K_T$ .

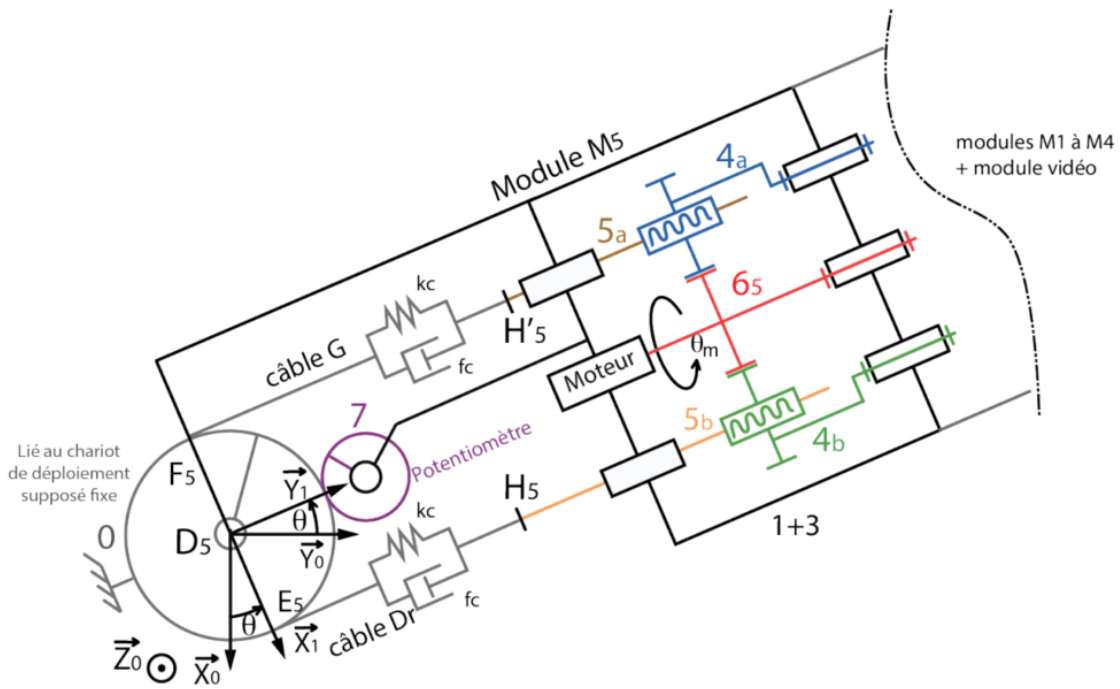


Figure 17: Schéma cinématique de la chaîne fonctionnelle de lacet

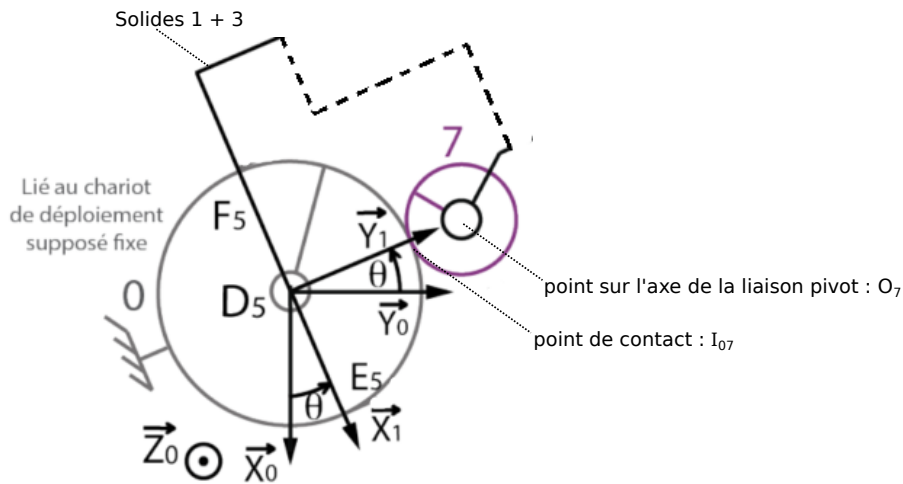
On donne les paramètres suivants relatifs au mécanisme :

- $R_0 = 3 \text{ cm}$  : rayon de la poulie 0

- $R_7 = 2,2 \text{ cm}$  : rayon de la roue dentée associée au curseur du potentiomètre
- $p_1 = 1$  : pas des dispositifs vis-écrou en mm/tr
- $J_{TOT}$  : moment d'inertie autour de l'axe  $(O, \vec{Z}_0)$  de l'ensemble des 5 modules porteurs et du module d'inspection dans la configuration donnée figure 16
- $m = 10 \text{ kg}$  : masse du module d'inspection
- $m_m = 15 \text{ kg}$  : masse d'un des modules porteurs
- $L_c = 0,511 \text{ m}$  : longueur du module d'inspection
- $L_m = 1,66 \text{ m}$  : longueur d'un module porteur

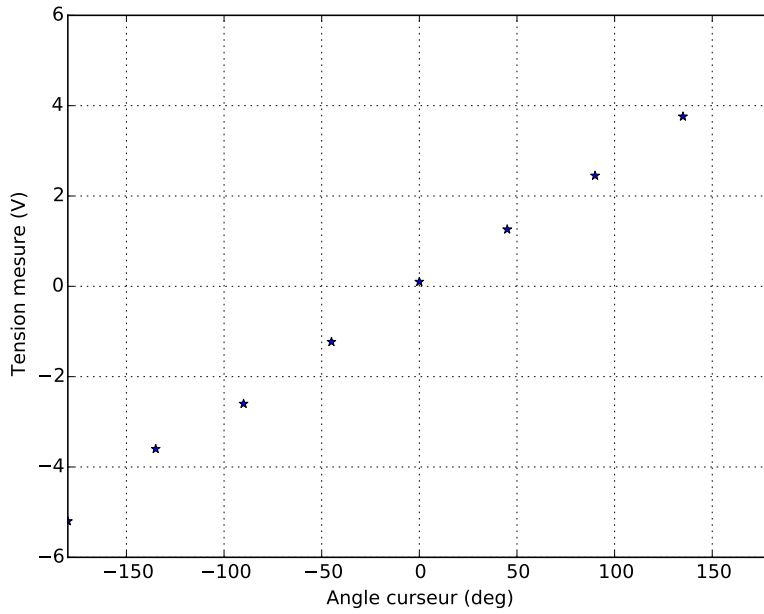
### 3.2.1 Étude de la chaîne de mesure

On cherche ici à évaluer les gains  $K_p$  et  $K_T$ . Le gain  $K_T$  est défini par  $K_T = \left| \frac{\omega_{7/(1+3)}}{\omega_{(1+3)/0}} \right|$ . Avec  $\vec{\Omega}_{7/(1+3)} = \omega_{7/(1+3)} \cdot \vec{Z}_0$  et  $\vec{\Omega}_{(1+3)/0} = \omega_{(1+3)/0} \cdot \vec{Z}_0$ . Une portion du mécanisme de la figure 17 est représenté ci-dessous.



**Question 12.** En utilisant la condition de roulement sans glissement entre les roues 0 et 7, montrer, avec rigueur, que  $K_T = \frac{R_0}{R_7}$ . Faire l'application numérique.

Concernant le potentiomètre, un étalonnage du capteur à été réalisé. Lors de cette phase de conception, l'opérateur a donc imposé un angle donné au curseur du potentiomètre et a mesuré la tension en sortie du capteur. Les différents points de mesures suivants ont ainsi été obtenus :



**Question 13.** Évaluer le gain du potentiomètre  $K_p = \frac{u}{\theta_{7/(1+3)}}$  où  $\theta_{7/(1+3)}$  est l'angle de rotation du curseur du potentiomètre et  $u$  la tension mesurée. On donnera le résultat en V/rad.

Avant mise en route du système, il est nécessaire de vérifier par une autre méthode que la boucle de mesure a été identifiée correctement. L'ensemble des modules porteurs est donc placé dans des positions angulaires particulières et le signal issu du potentiomètre est ensuite mesuré. Les données mesurées sont récapitulées ci-dessous :

|                                              |       |       |      |   |      |      |      |
|----------------------------------------------|-------|-------|------|---|------|------|------|
| Position angulaire bras : $\theta$ (degrés)  | -45   | -30   | -15  | 0 | 15   | 30   | 45   |
| Tension potentiomètre mesurée : $U_{im}$ (V) | -1.71 | -1.15 | -0.6 | 0 | 0.55 | 1.13 | 1.72 |

**Question 14.** Ces mesures permettent-elles de valider l'identification de la boucle de mesure ?

### 3.2.2 Étude dynamique

#### A - Évaluation du moment d'inertie de l'ensemble du bras

On cherche, afin de mettre en place le modèle de l'étude dynamique à déterminer le moment d'inertie autour de l'axe  $(D_5, \vec{Z}_0)$  de l'ensemble  $\Sigma$  des 5 modules porteurs et du module d'inspection dans la configuration donnée figure 16. Ce moment d'inertie est noté  $J_{TOT}$  de telle sorte que le moment dynamique de l'ensemble s'écrive :

$$\vec{\delta}_{D_5, \Sigma/0} \cdot \vec{Z}_0 = J_{TOT} \cdot \ddot{\theta}$$

Chacun des modules, porteurs et inspection, est considéré comme une masse ponctuelle dont le centre d'inertie est situé à mi-longueur du module.

On rappelle que, pour un point matériel de masse  $m_p$ , son moment d'inertie autour d'un axe  $\Delta$  s'écrit  $J = m_p \cdot \ell^2$  où  $\ell$  est la distance du point à l'axe.

On rappelle également que chaque module porteur a une longueur  $L = 1,66$  m et une masse  $m_m$  et que le module d'inspection a une longueur  $L_c = 0,511$  m et une masse  $m$ .

**Question 15.** Déterminer l'expression du moment d'inertie  $J_{TOT}$  de l'ensemble autour de l'axe  $(D_5, \vec{Z}_0)$ .

## B - Modélisation des câbles

Le comportement dynamique des câbles multicouches est modélisé par un dispositif ressort/amortisseur en parallèle (voir figure 17) de raideur  $k_c$  et de viscosité  $f_c$ . La déformation viscoélastique du câble lors du mouvement du bras est ainsi prise en compte. Les torseurs d'actions mécaniques des câbles sur 5a et 5b sont de la forme :

$$\{T(G \rightarrow 5a)\}_{H'_5} = \begin{Bmatrix} \vec{F}_{(G \rightarrow 5a)} = F_{(ressort \rightarrow 5a)} \vec{Y}_1 + F_{(amortisseur \rightarrow 5a)} \vec{Y}_1 \\ \vec{0} \end{Bmatrix}$$

$$\{T(D_r \rightarrow 5b)\}_{H_5} = \begin{Bmatrix} \vec{F}_{(D_r \rightarrow 5b)} = F_{(ressort \rightarrow 5b)} \vec{Y}_1 + F_{(amortisseur \rightarrow 5b)} \vec{Y}_1 \\ \vec{0} \end{Bmatrix}$$

Avec  $F_{(ressort \rightarrow 5a)} = -k_c \lambda(t) = -F_{(ressort \rightarrow 5b)}$  et  $F_{(amortisseur \rightarrow 5a)} = -f_c \dot{\lambda}(t) = -F_{(amortisseur \rightarrow 5b)}$  où  $\lambda(t)$  représente l'élongation des brins du câble à l'instant  $t$  et est de la forme  $A_\lambda \theta_m - B_\lambda \theta$  où  $A_\lambda$  et  $B_\lambda$  sont des constantes positives.

Le torseur d'action mécanique dû au frottement visqueux au sein de la liaison pivot entre  $\{1+3\}$  et 0 est :

$$\{T(visq \rightarrow \{1+3\})\}_{D_5} = \begin{Bmatrix} \vec{0} \\ -f_0 \dot{\theta}(t) \vec{Z}_0 \end{Bmatrix} \text{ avec } f_0 \text{ en N.m.s/rad.}$$

On note  $k$  le rapport de réduction pour la transmission de puissance :  $k = \left| \frac{\omega_{4a}/(1+3)}{\omega_{6_5}/(1+3)} \right| = \left| \frac{\omega_{4b}/(1+3)}{\omega_{6_5}/(1+3)} \right|$ .

Et on rappelle que  $\theta_m$  représente la position angulaire de l'axe moteur autour de l'axe  $(D_5, \vec{Y}_1)$  et  $\theta$  représente la position angulaire du bras autour de l'axe  $(D_5, \vec{Z}_0)$ .

**Question 16.** Déterminer les expressions de  $A_\lambda$  et de  $B_\lambda$  en fonction de  $k$ ,  $p_1$  et  $R_0$ . On pourra remarquer que  $\lambda = u_1 - u_2$  où  $u_1$  est l'avancement du câble créé par la translation de 5i par rapport à 4i (i = a ou b) et  $u_2$  la longueur de câble s'étant enroulée sur la poulie fixe.

## C - Obtention de l'équation de mouvement

**Question 17.** En précisant le théorème utilisé, déterminer l'équation du mouvement du bras liant  $\ddot{\theta}$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $\theta$ ,  $\dot{\theta}_m$  et  $\theta_m$ . Mettre cette relation sous la forme :  $A\ddot{\theta}(t) + B\dot{\theta} + C\theta = D\dot{\theta}_m(t) + E\theta_m(t)$  où  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  et  $E$  sont des constantes à exprimer obligatoirement en fonction de  $A_\lambda$ ,  $B_\lambda$  et des différents paramètres géométriques et mécaniques du système.

Le modèle dynamique du bras (voir figure 15) est donc maintenant connu mais celui de l'actionneur reste inconnu. Un essai en boucle ouverte permettrait alors une identification approchée.

## D - Exploitation d'un essai

Pour l'essai, le moteur a été équipé d'un "bloc codeur" comprenant :

- un codeur incrémental avec 256 fentes et 2 voies de mesures permettant de mesurer les fronts montants et descendants,
- d'une voie d'initialisation permettant de détecter la position pour laquelle l'angle  $\theta_m$  vaut 0 rad.

**Question 18.** Déterminer  $\Delta\theta_m$  la résolution du codeur incrémental.

On souhaite aussi utiliser ce codeur pour confirmer la mesure de l'angle  $\theta$  du potentiomètre évoqué précédemment. On note  $\Delta\theta$  le plus petit angle  $\theta$  mesurable avec ce codeur lorsque  $\dot{\theta} = 0$  et  $\dot{\theta}_m = 0$ .

**Question 19.** Déterminer alors  $\Delta\theta$  en fonction notamment des paramètres  $C$  et  $E$  de la question 17.

Ce capteur est relié à une interface d'acquisition qui permet, moyennant l'utilisation de bibliothèques Python, d'obtenir la variable  $x$  qui est une chaîne de caractères contenant le message à transmettre à l'ordinateur ayant le format suivant : bruitdeb + initialisation + donnees + conclusion + verification + bruitfin.

On considère ici que :

- $+$  est le symbole de la concaténation.
- bruitdeb est une chaîne de caractères aléatoires composée de "0" et de "1" qui précède le message à transmettre.
- initialisation est une chaîne de caractères d'un octet composée de "0" et de "1" qui annonce le début des données à collecter.
- donnees est une chaîne de caractères de longueur inconnue de "0" et de "1". Chaque "1" ou "0" correspond à une mesure du codeur qui a lieu toutes les 0,01 secondes. Un "1" signifie que la mesure du codeur est à l'état haut alors qu'un "0" signifie que celle-ci est à l'état bas. Un front montant ou descendant sera donc le passage de "0" vers "1" ou l'inverse.
- conclusion est une chaîne de caractères d'un octet composée de "0" et de "1" qui annonce la fin des données à collecter.
- verification est un bit de parité. Cela signifie qu'un "0" est ajouté à la fin du message s'il y a un nombre pair de "1" dans donnees et "1" sinon.
- bruitfin est une chaîne de caractères aléatoires composée de "0" et de "1" qui suit le message à transmettre.

Le temps d'échantillonnage est noté  $dt$  ( $\approx 0.01$  s). Cela signifie qu'entre chaque caractère de  $x$ , un temps  $dt$  s'est écoulé.

On suppose qu'avant l'apparition du message initialisation, un temps de 1 seconde s'est écoulé.

**Question 20.** Déterminer la probabilité que le message initialisation apparaisse accidentellement dans le bruit et qu'alors les caractères suivants - qui ne correspondent pas à donnees - aient été lus au mauvais moment ?

On supposera pour la suite que ce cas n'apparaît pas.

Il est également possible que des caractères erreurs apparaissent dans le message.

**Question 21.** Compléter la fonction nettoyage( $c$ ) qui prend en argument une chaîne de caractère  $c$  et qui renvoie cette chaîne de caractère "nettoyée", c'est-à-dire sans tous les caractères autres que des "0" ou des "1". Exemple : nettoyage("0101a1 120") renverra "0101110".

**Question 22.** Compléter la fonction parite( $c$ ) qui prend en argument une chaîne de caractère composée de "0" et de "1" et qui l'entier correspondant au bit de parité.

**Question 23.** Compléter la fonction extrait( $s, init, conc$ ) qui prend en argument, une chaîne de caractère  $s$  correspondant à la description de  $x$  précédente, une chaîne de caractère d'initialisation  $init$  et une chaîne de

caractères de conclusion conc, et qui renvoie les données donnees si le code de vérification est correct et False sinon.

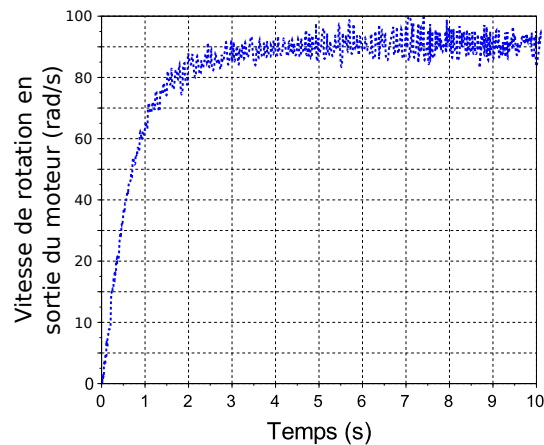
**Question 24.** Compléter la fonction `temps(X,dt)` qui prend en argument, une chaîne de caractère `x` au format préalablement mentionné et le temps d'échantillonnage `dt`, et qui renvoie une liste de flottant correspondant au temps associé à chaque front montant ou descendant.

**Question 25.** Compléter la fonction `angle(T,D)` qui prend en argument, une liste de flottant correspondant au temps associé à chaque front montant ou descendant et un flottant `D` qui correspond la résolution, et qui renvoie une liste de flottant correspondant à l'angle associé à chaque mesure.

**Question 26.** Compléter le document-réponse afin d'importer les modules `numpy` avec l'alias `N` et `matplotlib.pyplot` avec l'alias `MP`.

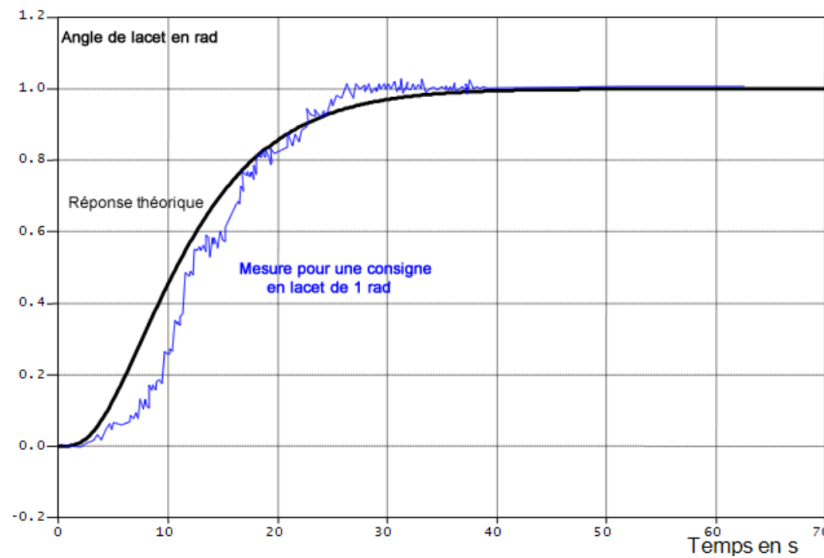
**Question 27.** Compléter le document-réponse afin que les instructions renvoient un graphique représentant l'angle  $\theta_m$  (en radians) en fonction du temps (en secondes).

L'essai a été réalisé en boucle ouverte et pour une tension d'alimentation en échelon avec  $u(t) = 12 \text{ V}$  pour  $t > 0 \text{ s}$ . La mesure de la vitesse de rotation en fonction du temps suivante a alors été obtenue :



**Question 28.** Proposer un modèle de comportement pour la fonction de transfert  $\frac{\Omega_m(p)}{U(p)}$  où  $\Omega_m(p)$  est la vitesse de rotation du moteur dans le domaine de Laplace et  $U(p)$  la tension d'alimentation du moteur.

On considère qu'un correcteur a été judicieusement dimensionné et implanté dans la commande du bras. Il devrait permettre de satisfaire les critères définis par le cahier des charges. La figure ci-dessous représente la réponse indicielle réelle du bras suite à un essai en présence de perturbations. Cette figure fait également apparaître la réponse théorique.



**Question 29.** La commande en lacet du bras vérifie-t-elle les exigences attendues d'un point de vue théorique et d'un point de vue expérimental ? Justifier brièvement votre réponse et indiquer l'effet sur les prises de photographies.

## 4 Sélection des photographies dans une base de données

On suppose que les photographies d'inspection du Tore sont stockées dans une base de données dont le modèle physique est présenté figure 18, dans laquelle les clés primaires sont notées en italique.

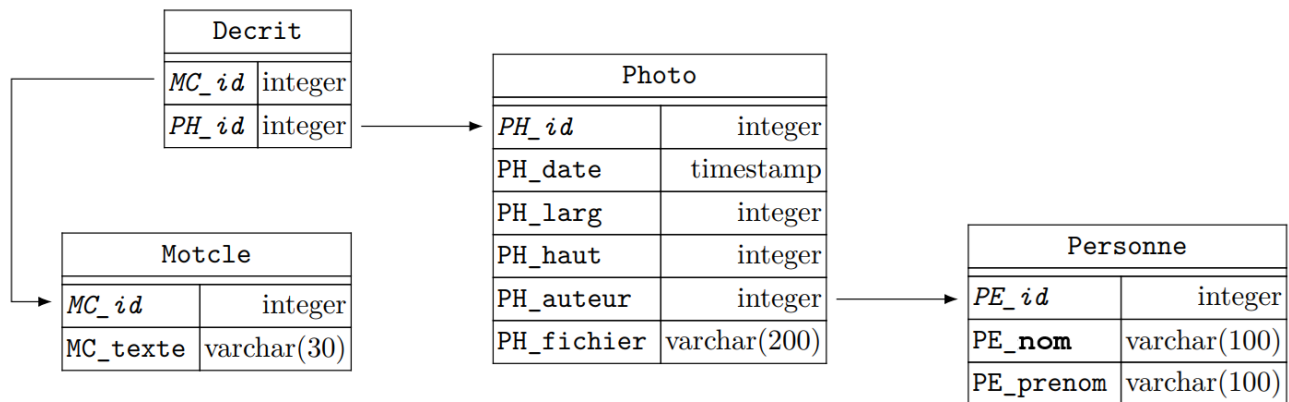


Figure 18: Structure physique de la base de données de photographies

Cette base comporte les quatre tables listées ci-dessous avec la description de leurs colonnes :

- la table Photo répertorie les photographies
  - PH\_id* identifiant (entier arbitraire) de la photographie (clé primaire)
  - PH\_date date et heure de la prise de vue
  - PH\_larg, PH\_haut largeur et hauteur de la photographie en pixels
  - PH\_auteur identifiant de l'auteur de la photographie
  - PH\_fichier nom du fichier contenant la photographie
- la table Personne des utilisateurs du bras d'inspection

- *PE\_id* identifiant (entier arbitraire) de la personne (clé primaire)
- *PE\_nom* nom de la personne
- *PE\_prenom* prénom de la personne
- la table *Motcle* des mots-clés utilisés pour décrire une photographie
  - *MC\_id* identifiant (entier arbitraire) du mot-clé (clé primaire)
  - *MC\_texte* le mot-clé lui-même
- la table *Decrit* fait le lien entre les photographies et les mots-clés qui les décrivent, ses deux colonnes constituent sa clé primaire
  - *MC\_id* identifiant du mot-clé (décrivant la photographie)
  - *PH\_id* identifiant de la photographie (décrite par le mot-clé)

**Question 30.** Écrire une requête SQL donnant les identifiants de toutes les photographies au ratio 4:3, c'est-à-dire dont le rapport largeur sur hauteur vaut exactement 4/3.

**Question 31.** Écrire une requête qui compte le nombre de photos prises par « Alice Dupont » ou « Bob Dupond ».

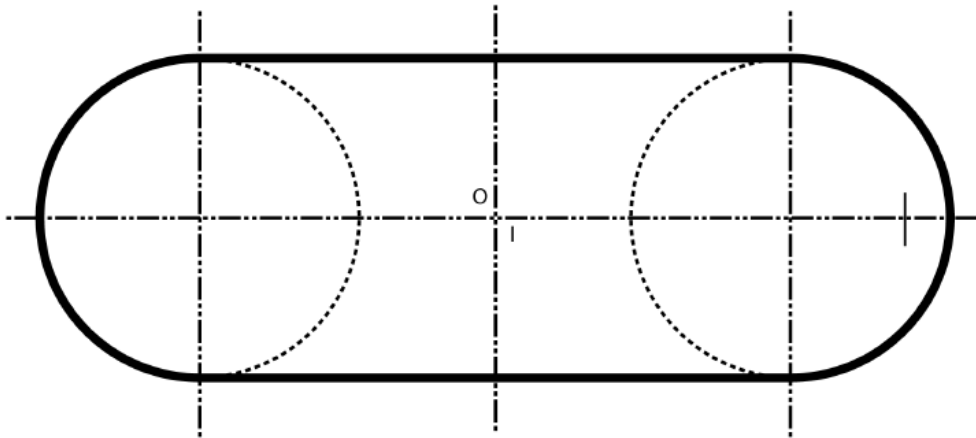
**Question 32.** Écrire une requête qui fournit l'identifiant et la date des photographies prises avant 2006 et associées au mot-clé « corrosion ».

On cherche à supprimer les images en doublon dans la base de données.

**Question 33.** Écrire une requête qui donne les identifiants des photographies ayant été prises le même jour qui ont la même largeur et la même hauteur.

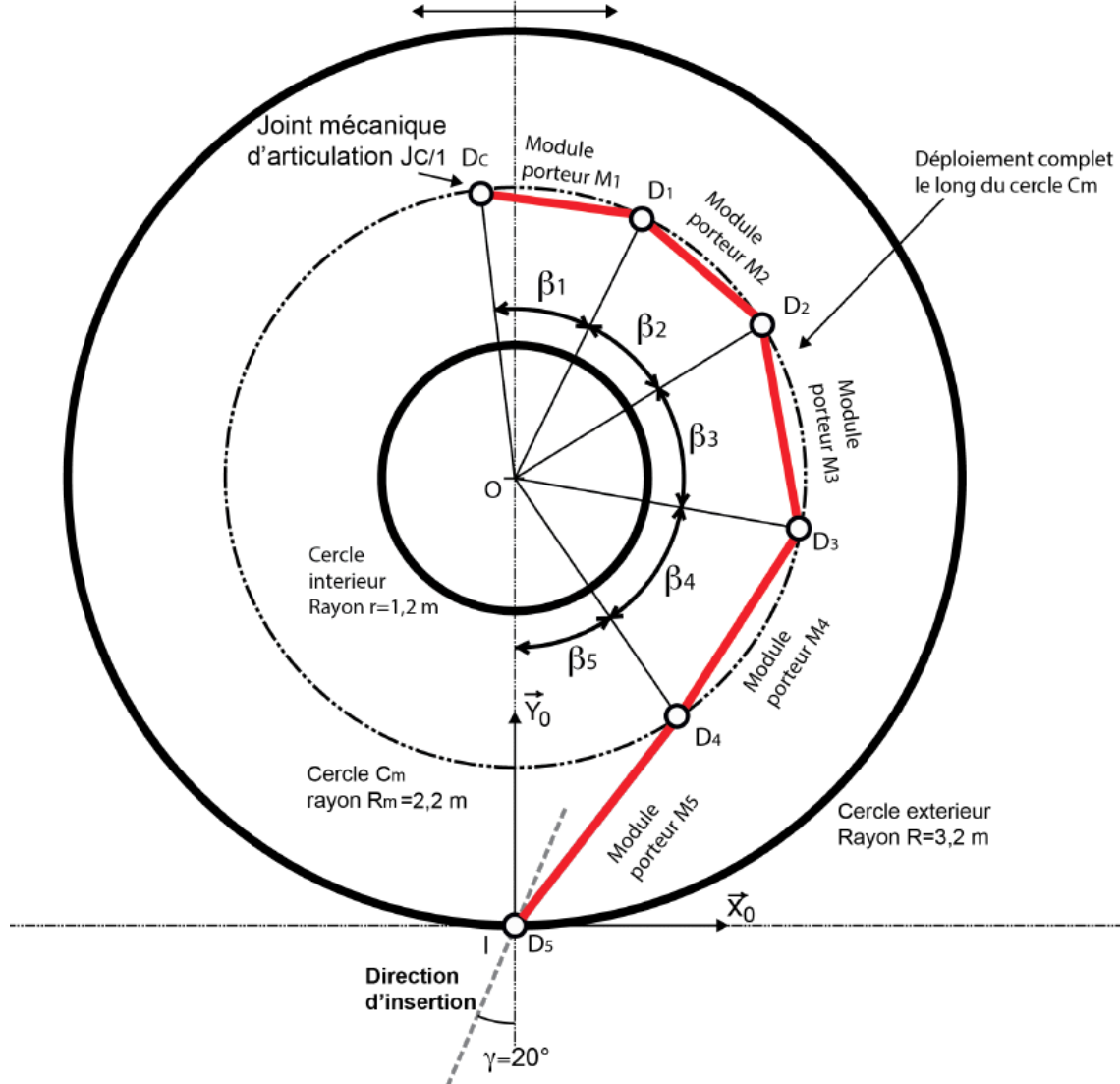
# Annexe 1 - Géométrie du Tore Supra

Vue de face de l'enceinte (selon  $\vec{Y}_0$ )



Vue de dessus de l'enceinte

Zone de déploiement à gauche      Zone de déploiement à droite



## Annexe 2 - Diagramme des exigences

