

Bras AIA (Articulated Inspection Arm) pour le Tore Supra

Durée : 4 heures

*Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre. Les résultats des questions seront mis en valeur. **Tout résultat non encadré/souligné sera sanctionné.***

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.

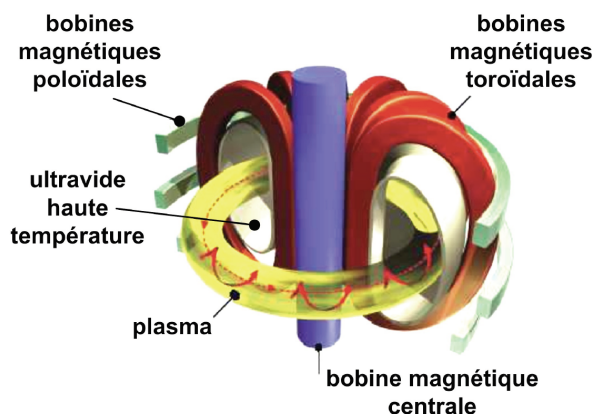


FIGURE 1 – Principe d'un tokamak

Le Tore Supra appartient à la première catégorie dite des « tokamaks » et est implanté sur le site du CEA de Cadarache (13) depuis 1988. Il est le prototype d'un projet à plus grande échelle qui devrait se poursuivre avec le réacteur ITER (dont la construction vient de débiter à Cadarache) et s'achever avec sa version industrielle (le réacteur DEMO) qui permettra de produire en continu de l'énergie électrique issue de fusion.

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).

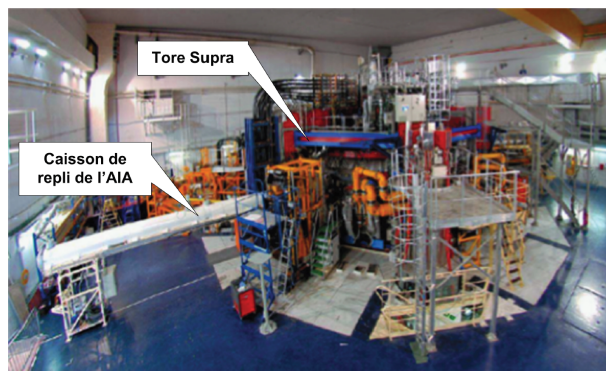


FIGURE 2 – Vue générale de Tore Supra

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 ³	840 m ³
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

TABLE 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.

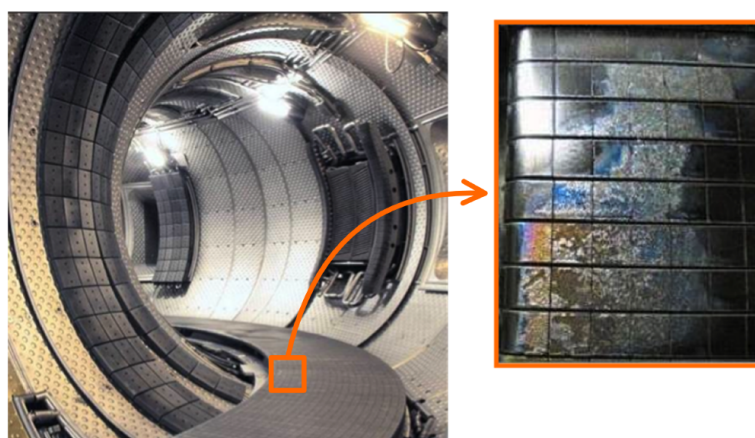


FIGURE 3 – Dépôt de carbone sur le limiteur du Tore Supra

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).

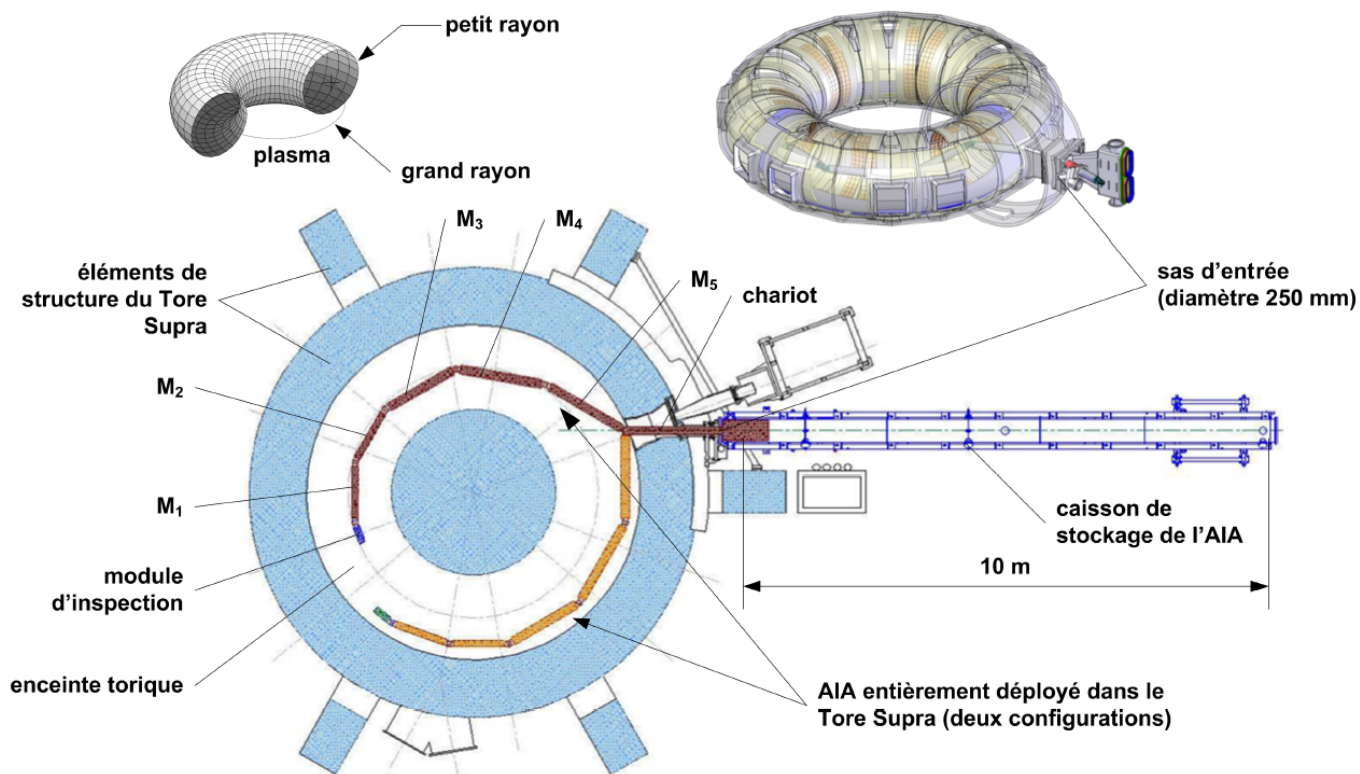


FIGURE 4 – Déploiement du bras AIA dans l'enceinte du Tore Supra

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).

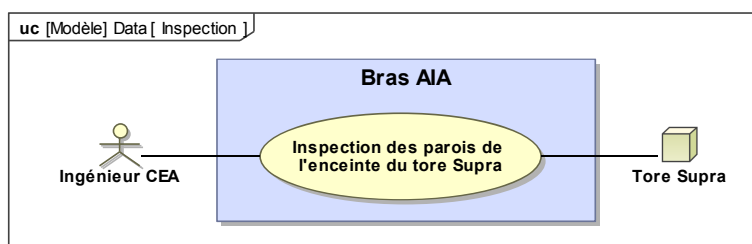
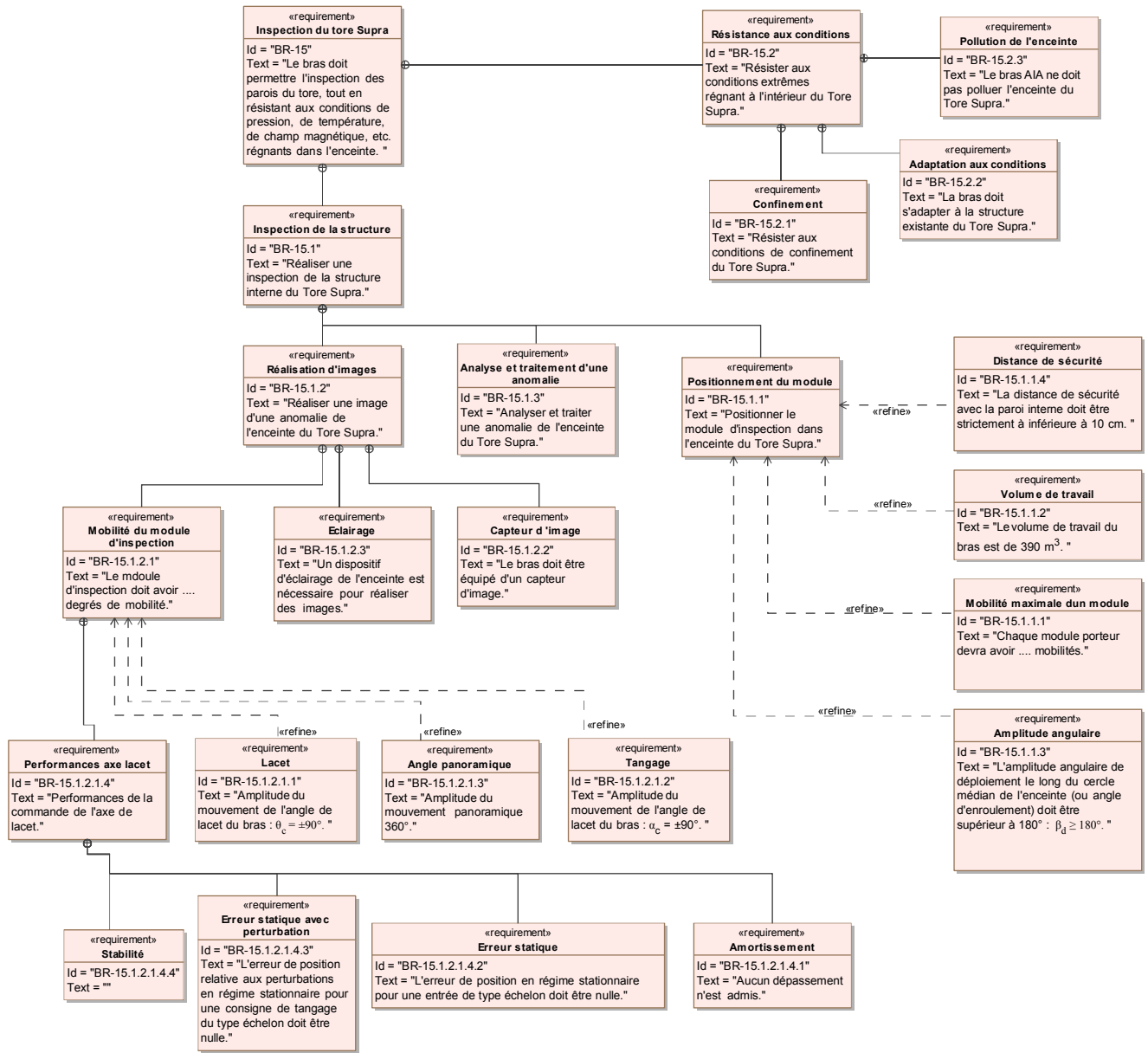


FIGURE 5 – Diagramme des cas d'utilisation

Un extrait du cahier des charges est donné en page suivante. 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 dangereuses, polluées et peu accessibles des installations sensibles, le Commissariat à l'Énergie Atomique développe une série de bras élancés qualifiés de « serpents ». 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. Les contraintes imposées par les conditions extrêmes de fonctionnement de ces robots (pression, température, radiation, etc.) ont conduit les ingénieurs à standardiser la structure mécanique des modules porteurs. En conséquence, 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 θ_n caractérisant un mouvement dit de « lacet » et une élévation α_n caractérisant un mouvement dit de « tangage ». Ces deux rotations s'effectuent selon deux axes perpendiculaires respectivement $(D_n, \vec{Z}_0)$ et $(O_n, \vec{X}_{4n})$.

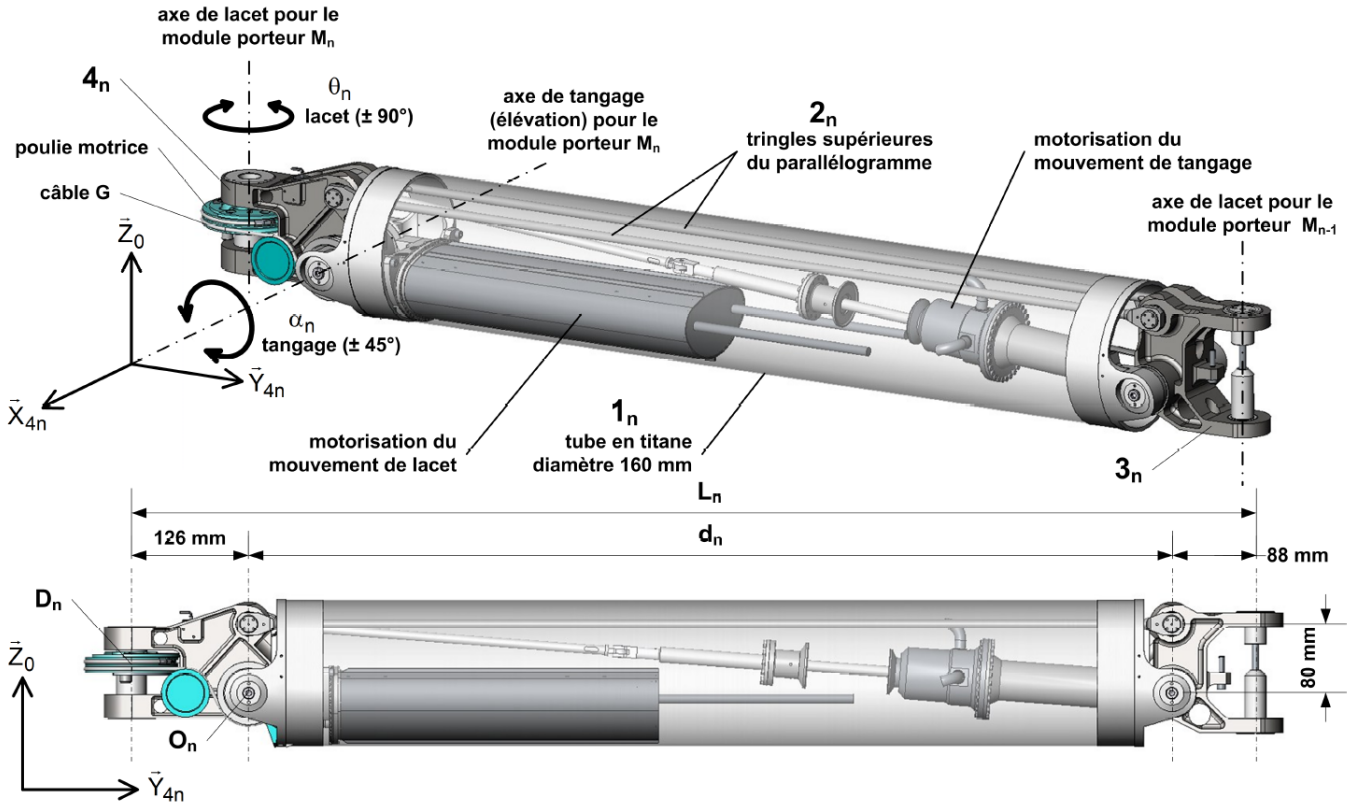


FIGURE 6 – Constituants principaux et dimensions d'un module porteur M_n

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 ($\alpha_n = 0$).

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 $\alpha \in [\alpha_{min}; \alpha_{max}] = [-45^\circ; +45^\circ]$.

TABLE 2 – Caractéristiques des modules standards

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.

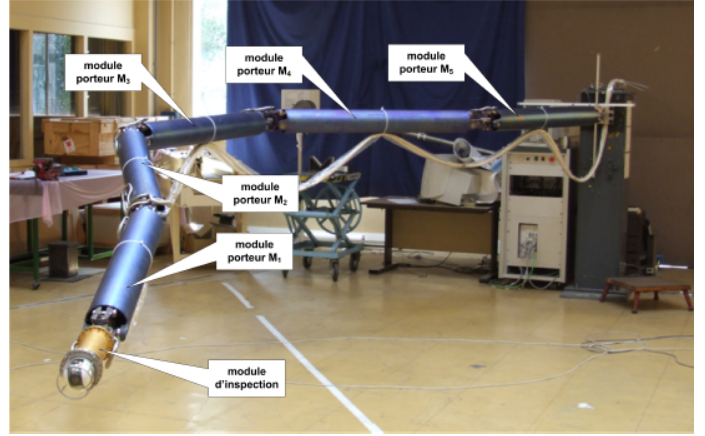
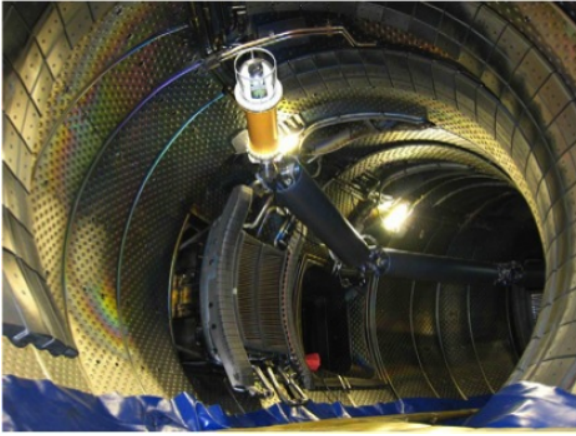


FIGURE 7 – Vues du bras AIA (à gauche : en phase d’inspection du Tore Supra ; à droite : en laboratoire)

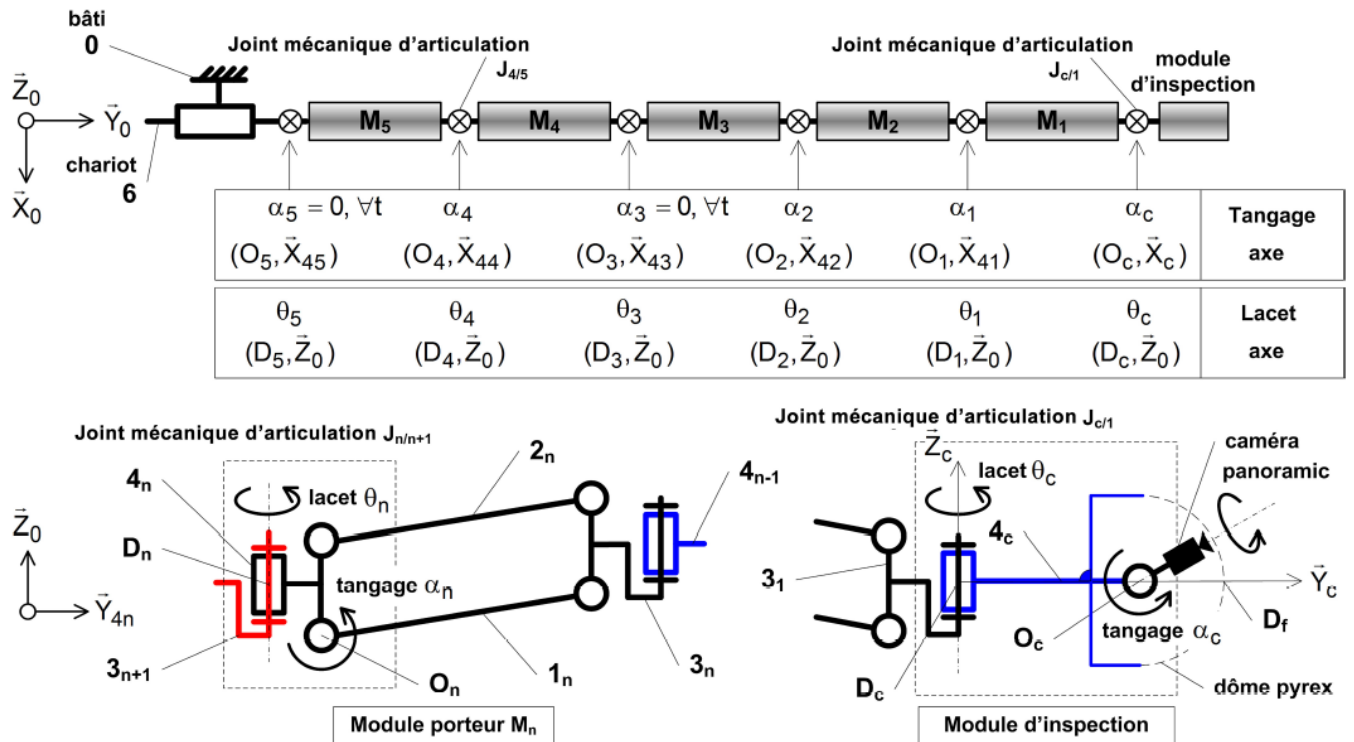


FIGURE 8 – Numérotation des modules porteurs, du module d’inspection et des axes de mouvement

Module	Type	Longueur	Masse
Module d’inspection embarquant le processus 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 modules porteurs $M = 150 \text{ kg}$
Module porteurs M_3	type 2	$L_3 = 1,56 \text{ m}$	
Module porteurs M_1 et M_2	type 3	$L_1 = L_2 = 1,21 \text{ m}$	

TABLE 3 – Caractéristiques des modules utilisés pour le bras AIA

1.5 Les enjeux liés au bras AIA

Depuis sa conception et jusque dans sa forme actuelle, l’AIA est en constante évolution. Malgré un premier déploiement in situ réussi, il est encore considéré comme un outil en phase de développement et sa qualification en tant qu’outil fiable d’inspection et de contrôle d’une installation nucléaire hautement sensible est encore en cours de validation. L’étude présentée ici poursuit un double objectif :

- il s'agit de démontrer la viabilité d'un outil d'inspection de l'enceinte du réacteur expérimental Tore Supra. Ce qui nécessite d'analyser et de valider l'adaptabilité des solutions techniques retenues pour le bras d'inspection AIA;
- cette étude liminaire est considérée comme une étape fondamentale dans la poursuite d'un objectif beaucoup plus ambitieux, la conception d'un nouveau type de bras d'inspection et de maintenance devant équiper le réacteur de seconde génération ITER.

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



Objectif

Justifier et valider la configuration du bras imposée par l'environnement très contraignant du Tore Supra.

La forme et la voie d'accès étroite à l'enceinte du Tore Supra ainsi que l'impossibilité de prendre appui sur les éléments internes ont imposé une structure élancée en porte-à-faux pour le bras d'inspection (figure 7). La phase primaire de conception d'un tel bras se limite à l'assemblage en série de modules porteurs standards permettant de placer correctement le module d'inspection dans l'espace de travail considéré. Dans le cas particulier du Tore Supra, la standardisation des modules porteurs est un atout majeur. Elle permet de satisfaire aux contraintes d'étanchéité liées à l'ultravide (les moteurs embarqués sont protégés de l'ultravide par des boîtiers hermétiques et des systèmes de transmission spécifiques ont été conçus). Le choix du nombre de modules porteurs n'est pas anodin et induit des conséquences en termes de capacité de déploiement, de maniabilité, de charge admissible par articulation ou encore d'équilibrage.

La qualification du bras AIA se fait tout d'abord en vérifiant que la configuration composée de 5 modules porteurs est un compromis acceptable permettant une compatibilité avec les niveaux imposés par le cahier des charges fonctionnel.

2.1 Validation du nombre de modules porteurs pour le bras AIA



Objectif

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

D'un point de vue géométrique, la fonction du bras AIA est de placer la caméra dans une position quelconque par rapport à un repère lié à l'enceinte du Tore Supra. Dans cette partie, le chariot 6 (voir figure 8) est considéré fixe par rapport à un repère lié à l'enceinte du Tore Supra.

On considère que le mouvement panoramique interne de la caméra est équivalent à une rotation de celle-ci.

Question 1. Donner le nombre de translations et le nombre de rotations nécessaires pour positionner et orienter librement un solide dans l'espace. Compte-tenu du mouvement panoramique de la caméra, quel est alors le nombre de translations et le nombre de rotations nécessaires de la caméra par rapport à un repère lié à l'enceinte du Tore Supra ?

L'« attitude de la caméra » désigne la position angulaire de celle-ci par rapport à un repère lié à l'enceinte du Tore Supra. Pour des raisons de maniabilité, l'attitude de la caméra est réglée par le module d'inspection. Les modules porteurs ont donc pour fonction de placer le point D_c dans une position quelconque par rapport à un repère lié à l'enceinte du Tore Supra.

Question 2. Quel le nombre de translations nécessaires au solide 3_1 par rapport à un repère lié à l'enceinte du Tore Supra ? À l'aide de la figure 8 (et en tenant compte du fait que $\alpha_5 = \alpha_3 = 0$), déterminer le nombre de paramètres angulaires qui peuvent varier. Quelle conséquence présente un nombre élevé de paramètres de commande sur le pilotage

du bras AIA ?

Question 3. Pour le module porteur M_n , exprimer $\vec{\Omega}(3_n/4_n)$. Justifier brièvement. Exprimer alors $\vec{\Omega}(3_n/3_{n+1})$. En déduire que $\vec{Z}_c$ est toujours confondu avec $\vec{Z}_0$. L'attitude de la caméra est-elle modifiée par les mouvements des modules porteurs ? Si oui, préciser quel(s) mouvement(s) modifie(nt) l'attitude de la caméra.

Question 4. Conclusion : en reprenant les réponses apportées aux questions précédentes, quel doit être le nombre minimal de modules porteurs ? Pour quelle(s) raison(s) ce choix ne peut-il être retenu ?

2.1.1 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 d'abord inséré grâce au seul mouvement de translation du chariot 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 figures 21 et 4).

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.

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.

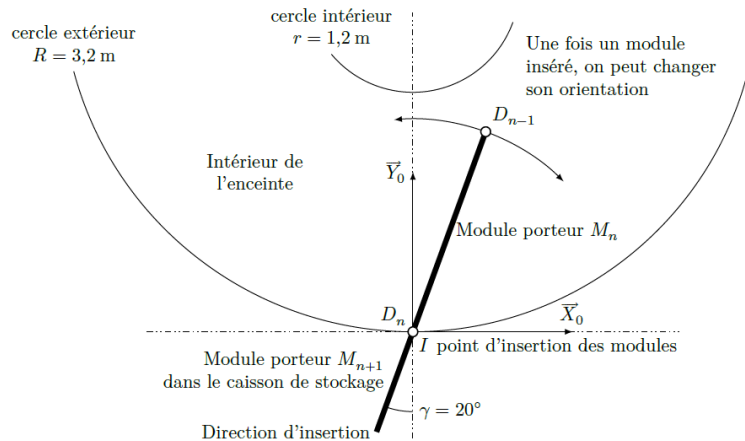


FIGURE 9 – Module porteur M_n en fin d'insertion

Question 5. 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 (figure 21) 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 β_d et est défini comme la somme des angles β_n représentés figure 21. 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 6. Pour un module porteur M_n déployé ($n \neq 5$) donner l'expression de l'angle β_n en fonction de R_m (rayon de C_m) et L_n (longueur du module porteur M_n). Donner la valeur numérique de chaque angle β_n ($n \neq 5$) et en déduire la valeur de l'angle d'enroulement β_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 7. 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 8. 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 9. 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 10. 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 11. 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. Seul (1_n) est considéré comme pesant avec : $\{T(grav \rightarrow 1_n)\} =_{G_n} \{-m_m g \vec{Z}_0; \vec{0}\}$, G_n étant situé au milieu du segment $[O_n B_n]$. Les hypothèses de la statique plane sont adoptées. On pose : $B_n D_{n-1} = \frac{1}{2} H \vec{Z}_0 + b \vec{Y}_{4n}$.

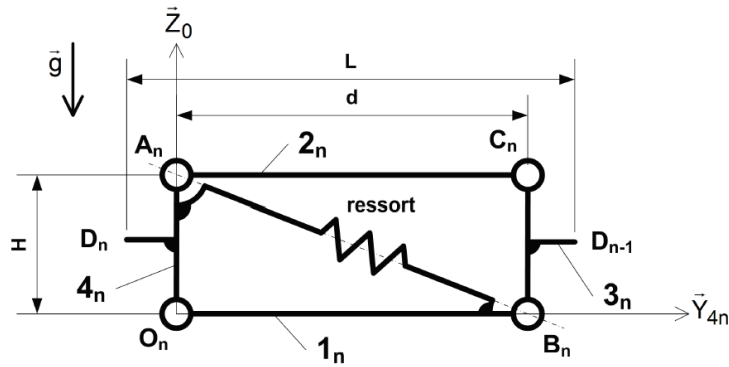


FIGURE 10 – Paramétrage pour le module porteur M_n (en équilibre pour un tangage nul)

Pour répondre à la question suivante, il est conseillé de commencer par isoler le solide (2_n) puis de montrer que la résultante de l'action mécanique exercée par (2_n) sur (3_n) possède une composante nulle selon $\vec{Z}_0$.

Question 12. Pour la position particulière définie sur la figure 10, 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 13. 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")



Objectif

Vérifier la capacité du bras à assurer un positionnement satisfaisant afin de réaliser une inspection visuelle de l'enceinte. Cette capacité dépend principalement de la maîtrise du comportement dynamique du bras AIA, principalement en lacet, attitude la plus sollicitée lors d'une phase d'inspection.

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.

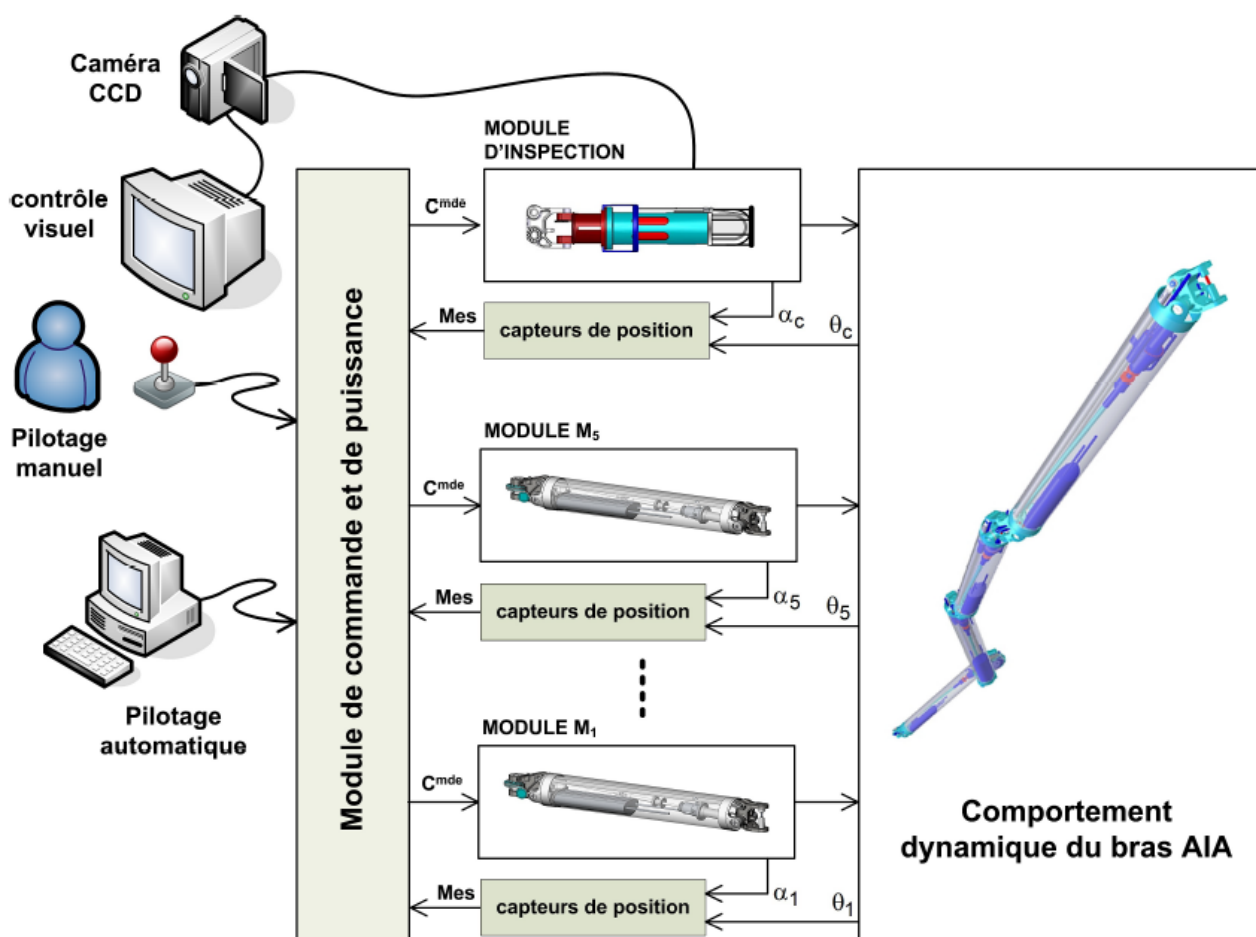


FIGURE 11 – Architecture générale de la commande du bras AIA

Comme le montre la figure 11, l'opérateur pilote le bras AIA à l'aide d'un joystick tout en contrôlant visuellement le déplacement effectué dans l'enceinte grâce à la caméra embarquée sur le module d'inspection. Le module principal génère une commande optimale en position des différents modules, ceux-ci étant tous asservis. Le bloc « comportement dynamique » modélise le couplage des différents modules constitutifs du bras.

La précision du positionnement du module d'inspection dans le Tore Supra requiert l'élaboration d'un modèle dynamique « flexible ». L'écriture de ce modèle très complexe ne peut s'opérer que par étape. La première concerne le

mouvement de lacet et tout ce qui peut le perturber. Ce choix est principalement dicté par la présence du système de transmission par câble utilisé pour la motorisation du mouvement de lacet et dont on peut supposer qu'il est le principal responsable de la souplesse du bras dans le plan médian du tore.

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



Objectif

Mettre en évidence le mouvement perturbateur de tangage sur le mouvement de lacet du module porteur M_n par rapport au module porteur M_{n+1} .

Un schéma cinématique minimal du module porteur M_n est présenté sur la figure 12. 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.

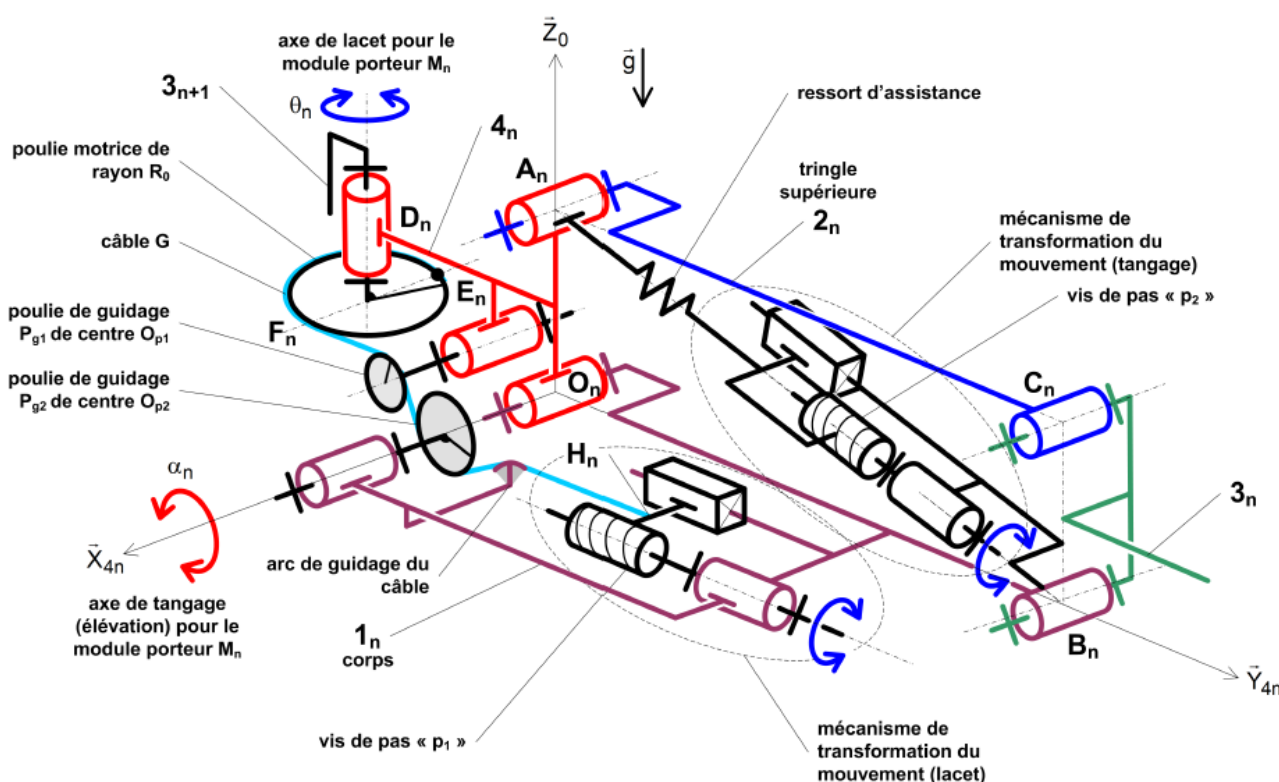


FIGURE 12 – Schéma cinématique minimal partiel d'un module porteur M_n du bras

La figure 13 synthétise un modèle de commande du module porteur M_n isolé avec les deux mouvements motorisés de lacet et de tangage.

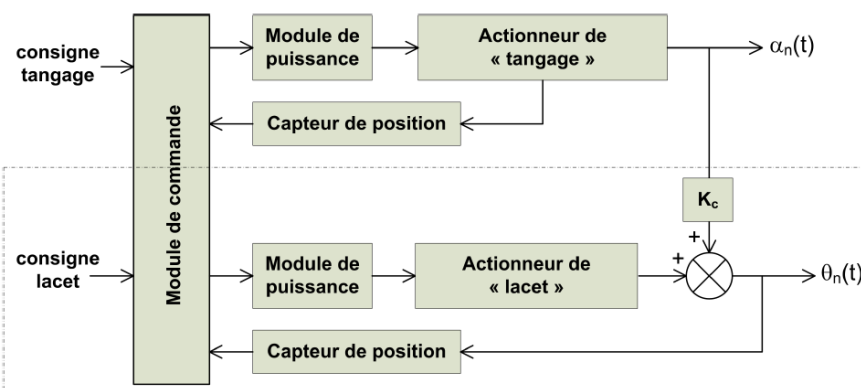
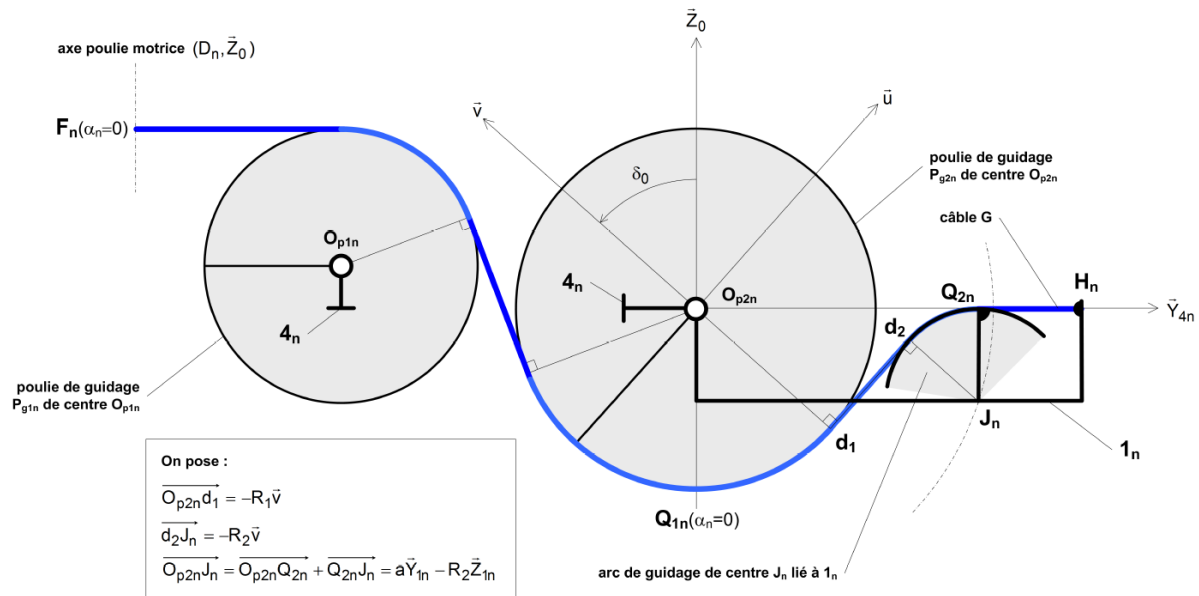
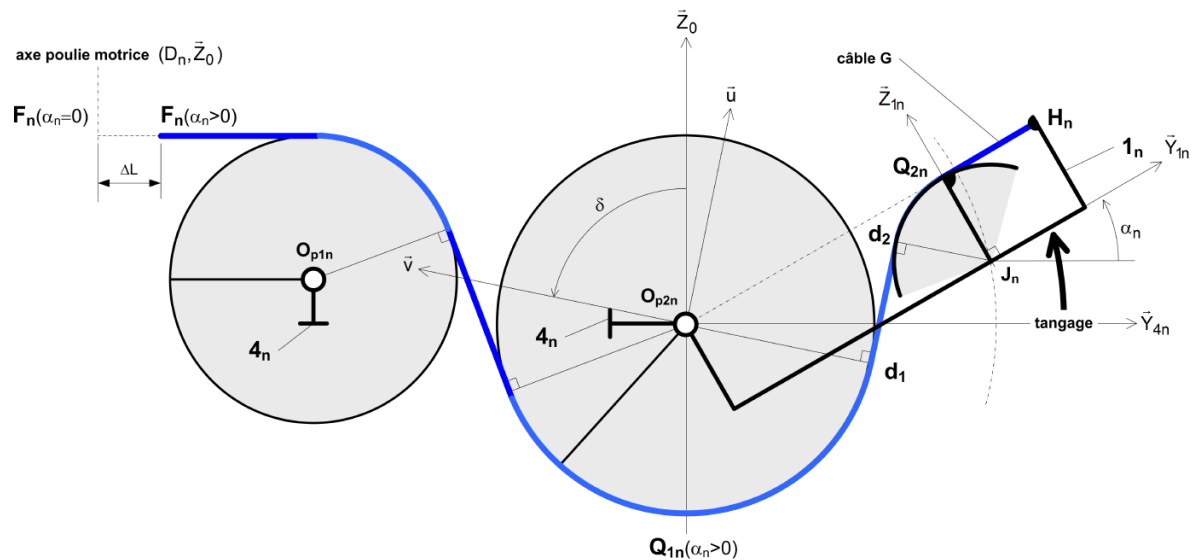


FIGURE 13 – Détail de la commande du module porteur M_n

Pour la commande du mouvement de lacet étudié, la structure est celle d'un asservissement en position. La présence du gain K_c (figure 13) est la conséquence d'un couplage mécanique inhérent au système de transmission par câble installé. La figure 14 représente la configuration du câble G dans le cas où le tangage α_n est nul. La figure 15 représente la configuration du câble G dans le cas où le tangage α_n est non nul. Pour des raisons de clarté, tous les solides ne sont pas représentés sur les figures 14 et 15. Le paramétrage utile est précisé directement sur la figure 14. Lors du tangage, le rotor du moteur de lacet est supposé immobile par rapport au corps (1_n) ce qui permet de lier le câble G directement au solide (1_n). Dans cette situation particulière $\theta_n = K_c \alpha_n$.

FIGURE 14 – Configuration du câble G pour le module porteur M_n horizontal ($\alpha_n = 0$)FIGURE 15 – Configuration du câble G pour le module porteur M_n en élévation ($\alpha_n > 0$)

Question 14. Sachant que $\delta = \delta_0 + \alpha_n$, déterminer, à l'aide des figures 14 et 15, la variation de position du point F_n appartenant au câble, notée ΔL , provoquée par la variation de l'angle de tangage α_n . Déterminer ensuite la variation de l'angle de lacet θ_n provoquée par la variation ΔL . Dédurre l'expression de K_c des résultats précédents.

Conclusion : le système de transmission par câble, imposé par des contraintes d'étanchéité, induit un couplage entre les mouvements de tangage et de lacet qu'il est indispensable de prendre en compte dans la commande en lacet. De

plus la souplesse du câble amplifie la sensibilité naturelle de cette structure élancée aux vibrations. L'élaboration d'un modèle de comportement dynamique en lacet est nécessaire.

3.2 Étude de la commande en lacet du bras AIA


Objectif

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

TABLE 4 – Récapitulatif du cahier des charges

La figure 16 représente l'architecture complète de commande en position en mouvement de lacet.

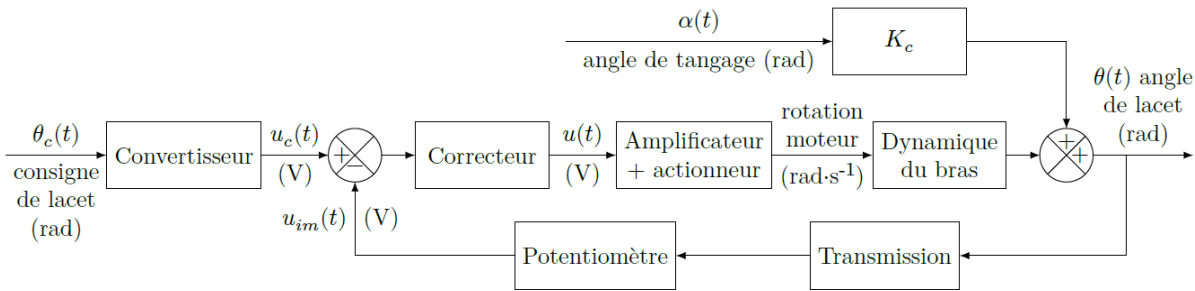


FIGURE 16 – Détail de la commande en position

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 17). 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 $(\vec{X}_0, \vec{X}_1) = (\vec{Y}_0, \vec{Y}_1) = \theta(t)$.

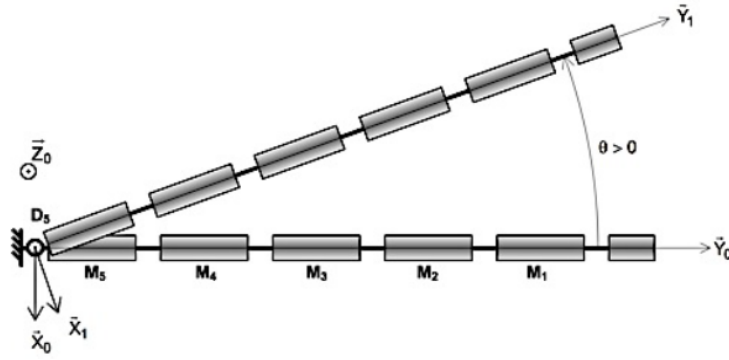


FIGURE 17 – Paramétrage du mouvement de lacet

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 18). 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 16). Le convertisseur est modélisé par un gain $K_{co} = K_p K_T$.

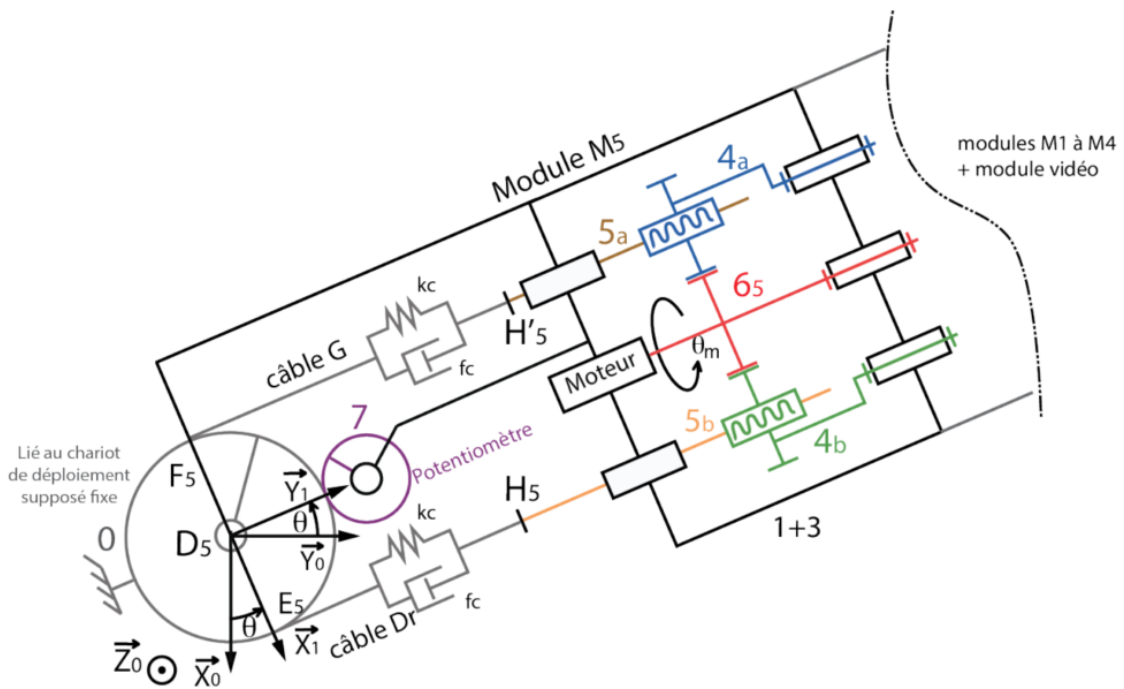


FIGURE 18 – Schéma cinématique de la chaîne fonctionnelle de lacet

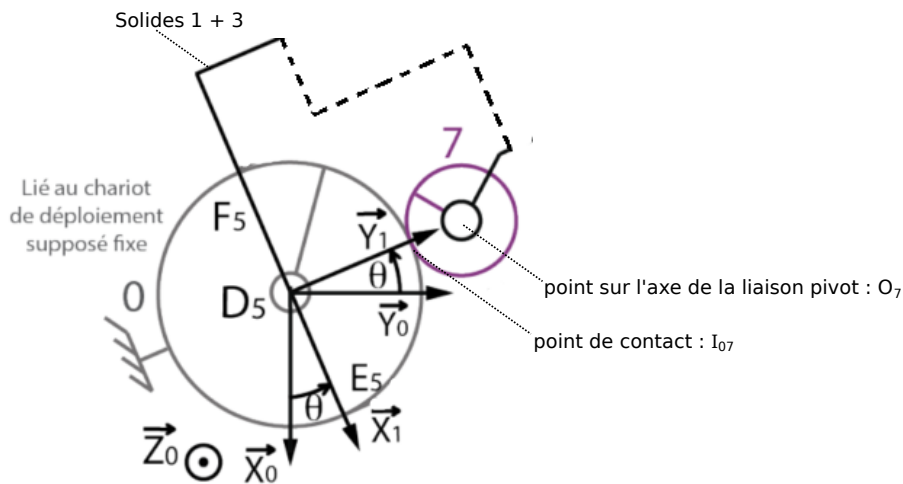
Afin de mettre en place l'asservissement du système, il est nécessaire de déterminer l'ensemble des blocs de la figure 16. Afin de mettre en place le modèle, on donne les paramètres suivants relatifs au mécanisme :

- $R_0 = 3 \text{ cm}$: 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 17
- $m = 10$ kg : masse du module d'inspection
- $m_m = 15$ kg : masse d'un des modules porteurs
- $L_c = 0,511$ m : longueur du module d'inspection
- $L_m = 1,66$ m : longueur d'un module porteur

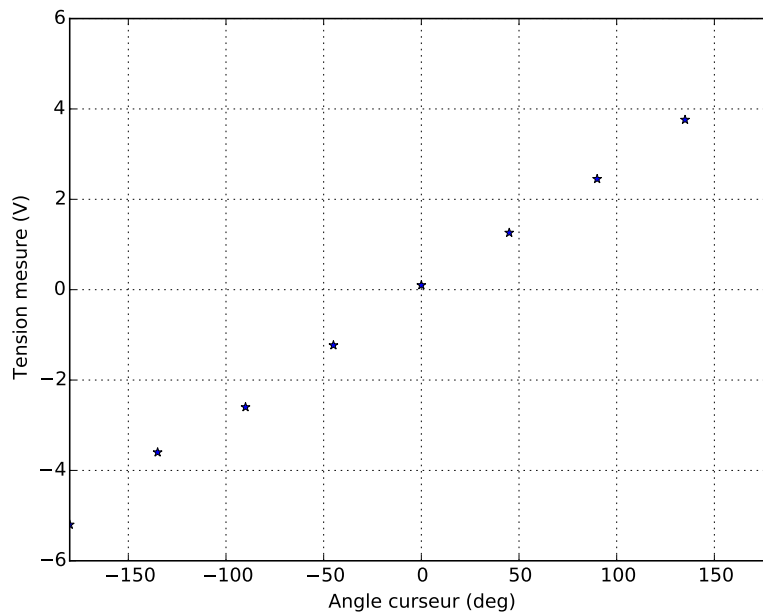
3.2.1 Étude de la chaîne de mesure

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 18 est représenté ci-dessous.



Question 15. 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 16. Évaluer le gain K_p du potentiomètre. 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 : θ (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 17. 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 des 5 modules porteurs et du module d'inspection dans la configuration donnée figure 17. Ce moment d'inertie est noté J_{TOT} . On considère que chaque module porteur a une longueur $L = 1,66$ m.

Chacun des modules, porteurs et inspection, est considéré comme une tige (cylindre dont le rayon r_{tige} de la base est très faible devant sa longueur L_{tige}). En fonction du module considéré (module porteur ou module d'inspection), la longueur L_{tige} pourra prendre la valeur L ou L_c . De même, la masse m_{tige} pourra prendre la valeur m_m ou m .

Pour une tige de direction $\vec{Y}_1$, le moment d'inertie autour d'un axe orienté par un vecteur perpendiculaire à $\vec{Y}_1$ ($\vec{Z}_1$ par exemple) et passant par le centre d'inertie de la tige est noté $J_{G_{tige}, tige}$. Bien entendu, le centre d'inertie se situe au milieu de la tige.

On donne :

$$J_{G_{tige}, tige} = \frac{m_{tige}}{12} L_{tige}^2 \text{ avec } m_{tige}, \text{ la masse de la tige et } L_{tige} \text{ la longueur de la tige considérée.}$$

Si maintenant, la rotation s'effectue autour d'un axe $(P, \vec{Z}_1)$, où P est un point quelconque pour lequel $\vec{PG}_{tige} = x.\vec{X}_1 + y.\vec{Y}_1 + z.\vec{Z}_1$, alors le moment d'inertie autour de cet axe sera $J_{P, tige}$ où :

$$J_{P, tige} = J_{G_{tige}, tige} + m_{tige} \cdot (x^2 + y^2)$$

Question 18. Déterminer l'expression du moment d'inertie du module porteur 1 autour de l'axe $(D_5, \vec{Z}_0)$.

Question 19. 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 18) 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 :

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

$$\{T(D_r \rightarrow 5b)\} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}_{(D_r \rightarrow 5b)} = F_{(ressort \rightarrow 5b)} \vec{Y}_1 + F_{(amortisseur \rightarrow 5b)} \vec{Y}_1 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{H'_5}$$

Avec $F_{(\text{ressort} \rightarrow 5a)} = -k_c \lambda(t) = -F_{(\text{ressort} \rightarrow 5b)}$ et $F_{(\text{amortisseur} \rightarrow 5a)} = -f_c \dot{\lambda}(t) = -F_{(\text{amortisseur} \rightarrow 5b)}$ 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_λ et B_λ 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 :

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

Question 20. Déterminer les expressions de A_λ et de B_λ 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 21. En précisant le théorème utilisé, déterminer l'équation du mouvement du bras liant $\ddot{\theta}$, $\dot{\theta}$, θ , $\dot{\theta}_m$ et θ_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_λ , B_λ et des différents paramètres géométriques et mécaniques du système.

Le modèle dynamique est donc maintenant connu. La suite de l'étude sera réalisée dans le domaine de Laplace afin de synthétiser les performances de la commande en lacet du bras AIA. Les notations pour les variables temporelles et leurs transformées de Laplace sont les suivantes : $\Theta_m(p) = L(\theta_m(t))$; $\Omega_m(p) = L(\dot{\theta}_m(t))$; $\Theta_c(p) = L(\theta_c(t))$; $\Theta(p) = L(\theta(t))$

Les conditions initiales sont supposées nulles.

3.3 Commande de lacet du bras sans correction $C(p) = 1$

Les performances de la commande en lacet non corrigée du bras AIA doivent être évaluées. Quelque soit le résultat trouvé précédemment, le modèle à utiliser est celui proposé ci-dessous :

- la fonction de transfert du correcteur est notée $C(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)}$;
- la fonction de transfert de l'ensemble {amplificateur + actionneur} est $H_m(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U(p)} = \frac{K}{1 + \tau.p}$ avec $K = 26,5 \text{ rad.s}^{-1}.\text{V}^{-1}$ et $\tau = 0,7 \text{ s}$;
- le gain du convertisseur est noté K_{co} avec $K_{co} = K_p.K_T = 2,18 \text{ V/rad}$ de sorte que $U_{im}(p) = K_p.K_T.\Theta(p)$ et $U_c(p) = K_p.K_T.\Theta_c(p)$;
 - le rapport de transmission Potentiomètre/Poulie 0 est noté K_T ;
 - le gain du potentiomètre est noté K_p ;
- un essai de traction réalisé sur les câbles a permis de mettre en évidence la prépondérance de la raideur du câble ($k_c \approx 8.10^5 \text{ N/m}$) sur les frottements visqueux au sein de ce dernier et de faire l'hypothèse que $\frac{f_c}{k_c} \ll \omega_0$.

L'expression de la fonction de transfert $\frac{\Theta(p)}{\Theta_m(p)}$ notée $H_1(p)$ est dans ce cas :

$$H_1(p) = \frac{\Theta(p)}{\Theta_m(p)} = \frac{K_1}{\frac{p^2}{\omega_0^2} + 2\xi \frac{p}{\omega_0} + 1} \quad \text{avec } K_1 = 0,002 \quad ; \quad \omega_0 = 1,1 \text{ rad.s}^{-1} \quad ; \quad \xi = 0,055$$

Question 22. Compléter le schéma-bloc fourni sur le document réponse.

La mise en place du modèle dynamique complet permet maintenant de simuler l'ensemble du mécanisme. Les performances de la commande en lacet non corrigée du bras AIA peuvent ainsi être évaluées.

Une première simulation, sans correction, a permis d'obtenir la figure 19. Cette simulation présente l'évolution de l'angle de lacet du bras en réponse à un échelon de position angulaire. L'amplitude de l'échelon d'entrée est unitaire de telle sorte que $\theta_{c0} = 1 \text{ rad}$.

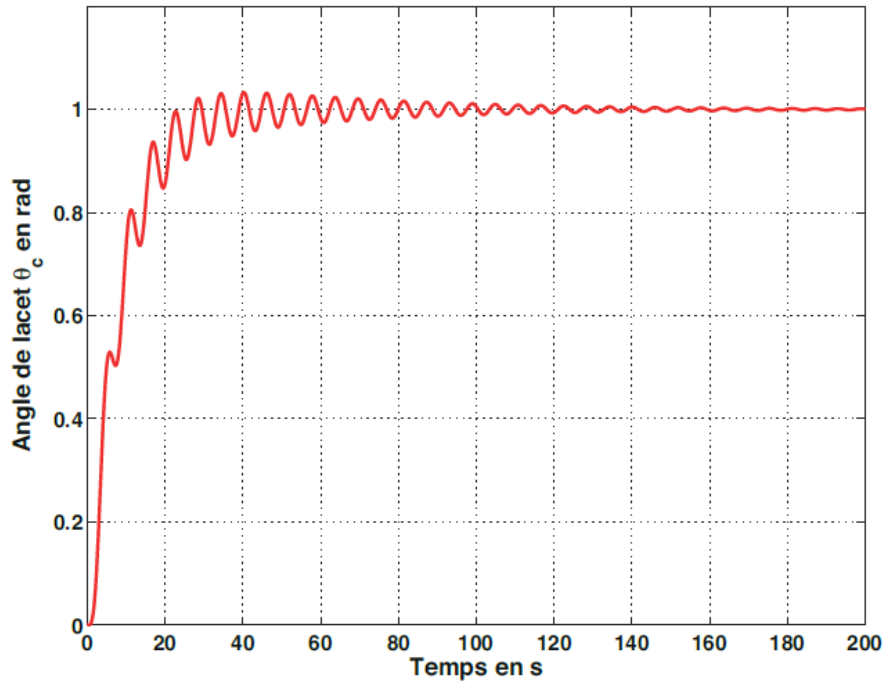


FIGURE 19 – Évolution de l'angle de lacet du bras en réponse à un échelon de position angulaire $\theta_{c0} = 1$ rad

Question 23. Le comportement du modèle, sans correction, respecte-t-il le cahier des charges ? Justifier la réponse et énoncer les inconvénients d'un tel comportement lors d'une phase d'inspection des parois de l'enceinte.

3.4 Commande de lacet du bras avec correction

L'optimisation des performances de la commande en lacet nécessite de synthétiser les paramètres caractéristiques d'un correcteur. Une fois ce dernier implanté, il permettra de satisfaire les critères définis par le cahier des charges.

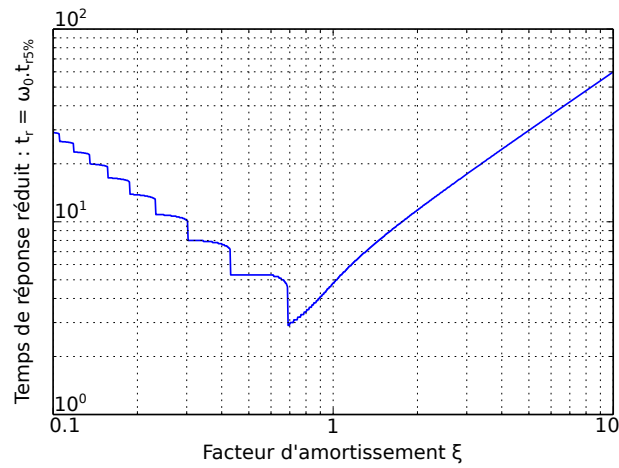
Le correcteur choisi correspond à un filtre anti-résonance et passe-bas d'ordre 2 :

$$C(p) = K' \cdot \left(\frac{p^2}{\omega_0^2} + 2\xi \frac{p}{\omega_0} + 1 \right) \quad \text{où } \xi \text{ et } \omega_0 \text{ sont les mêmes paramètres que ceux donnés pour } H_1(p)$$

Question 24. Calculer la fonction de transfert en boucle fermée $FTBF(p) = \frac{\Theta(p)}{\Theta_c(p)}$ et la mettre sous forme canonique.

Question 25. Déterminer la valeur de K' qui permet d'obtenir le système asservi le plus rapide possible en respectant l'exigence liée à l'amortissement et référencée "BR-15.1.2.1.4.1".

Question 26. En utilisant l'abaque ci-dessous, et pour la valeur de K' déterminée précédemment, donner le temps de réponse à 5% de l'asservissement ?



Question 27. L'asservissement sera-t-il précis pour une entrée en échelon ?

On considère un correcteur de ce type implanté dans la commande du bras. Il devrait permettre de satisfaire les critères définis par le cahier des charges. La figure 20 ci-dessous représente la réponse indicielle réelle du bras suite à un essai dans les mêmes conditions que celles qui ont permis d'établir le modèle. Cette figure fait également apparaître la réponse théorique obtenue après mise en place de la correction.

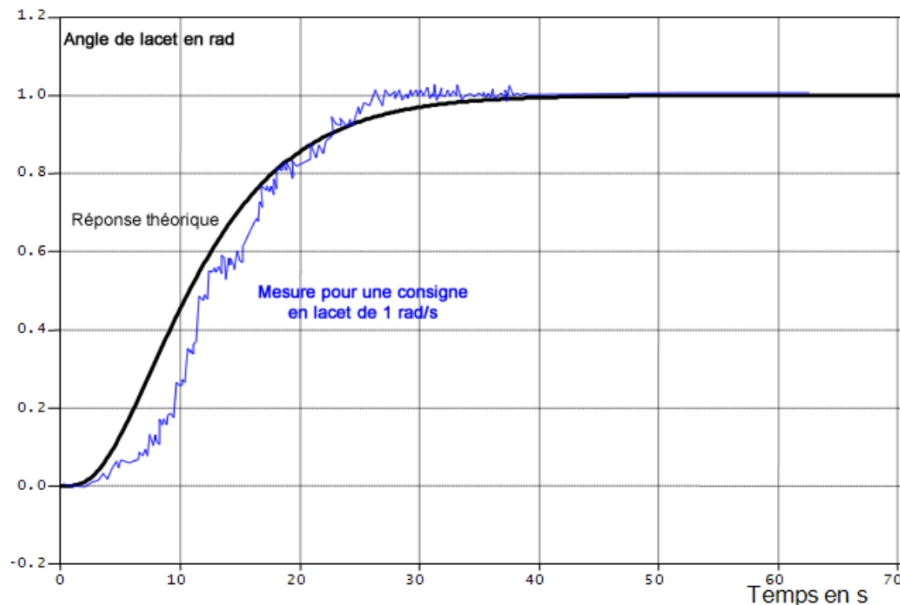


FIGURE 20 – Réponse indicielle théorique et réelle

Question 28. La commande en lacet du bras vérifie-t-elle les exigences attendues ? Justifier brièvement votre réponse.

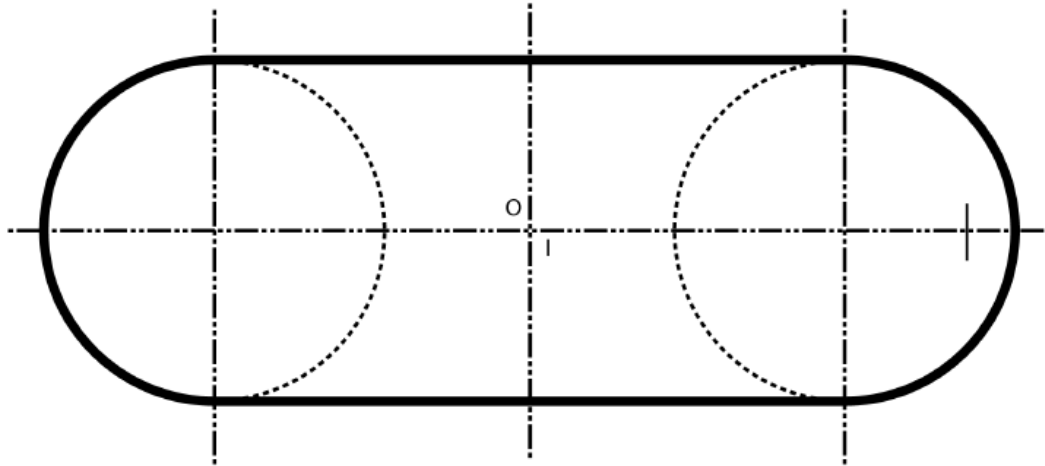
Conclusion : l'étude de la commande en lacet a été menée sans tenir compte de l'influence du tangage et des incertitudes auxquelles les paramètres physiques peuvent être assujettis. Afin de compléter la qualification du bras, une étude de la robustesse de la commande synthétisée à partir du modèle établi précédemment serait nécessaire.

4 Conclusions sur la qualification du bras AIA et perspectives pour ITER

Question 29. Recenser les caractéristiques et les performances évaluées dans les études précédentes qui permettent de conclure positivement sur la qualification du bras AIA en tant qu'outil d'inspection dans le Tore Supra.

Perspective pour ITER : comme le propos introductif le laissait envisager, la transposition directe du bras AIA dans ITER constitue la seconde phase du projet. Le volume à inspecter dans ITER étant beaucoup plus important que celui du Tore Supra, plusieurs points d'insertion du bras dans l'enceinte seront nécessaires.

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



Vue de dessus de l'enceinte

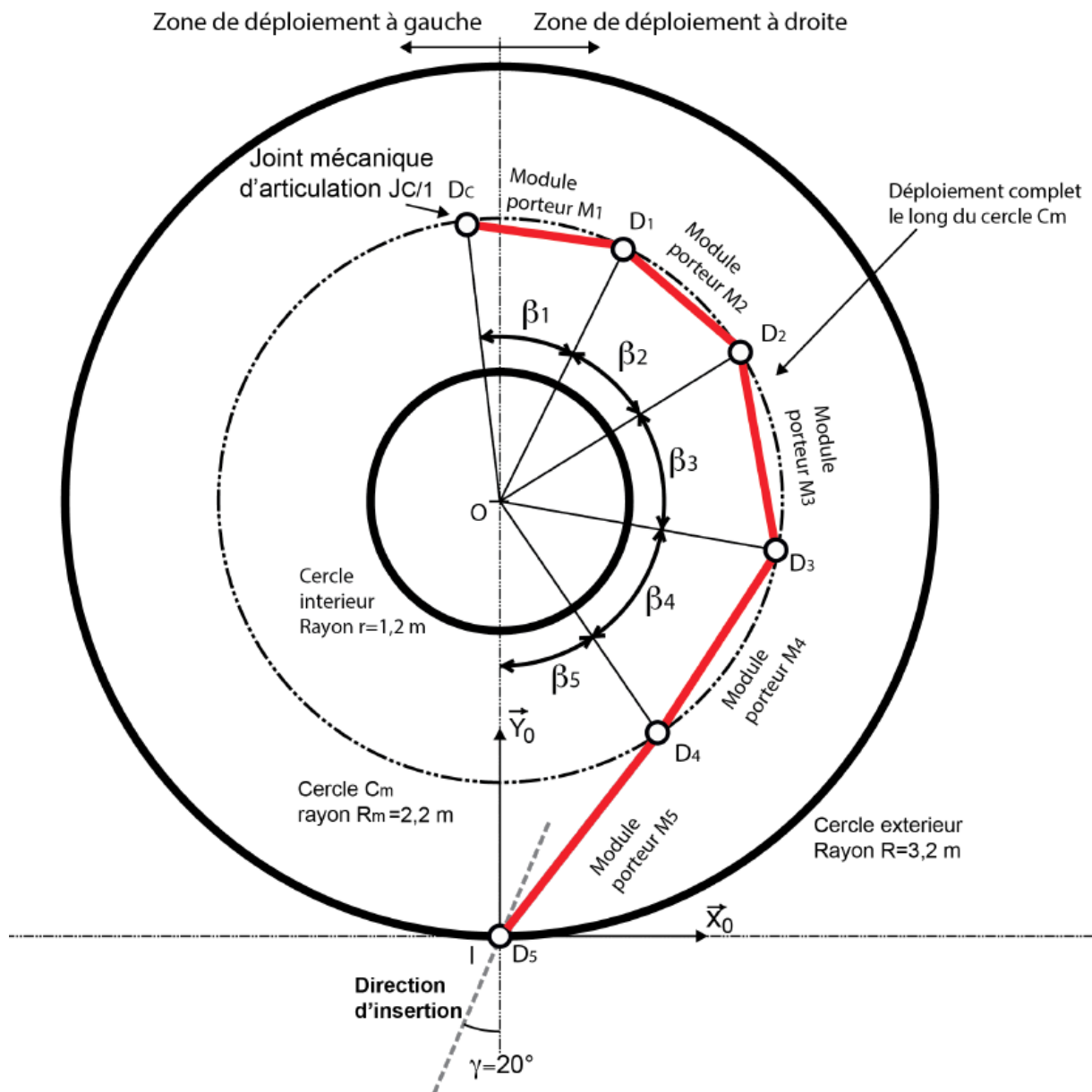


FIGURE 21 – Géométrie du Tore Supra

Schéma-blocs à compléter

