Concours Centrale-Supélec, France

Session 2014, filière MP

Option sciences industrielles de l'ingénieur

Durée : 4 heures

Ce que traite le sujet

- Partie I : présentation générale du bras AIA
- Partie II : positionner le module d'inspection et s'adapter à l'enceinte
- Partie III.A : chaîne de transmission du mouvement de lacet
- Partie III.B et IV : commande en lacet et conclusions

Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années :
prepahelp.com/annales/centrale/mp/2014/si

Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

CONCOURS CENTRALE•SUPÉLEC

S2I

MP

2014

4 heures

Calculatrices autorisées

Bras AIA (Articulated Inspection Arm) pour le Tore Supra

I Présentation générale du bras AIA

I.A – 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.

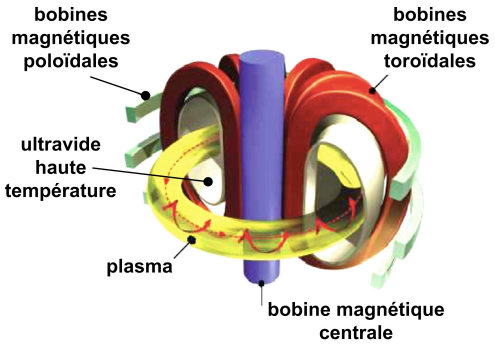


Figure 1 Principe d'un tokamak

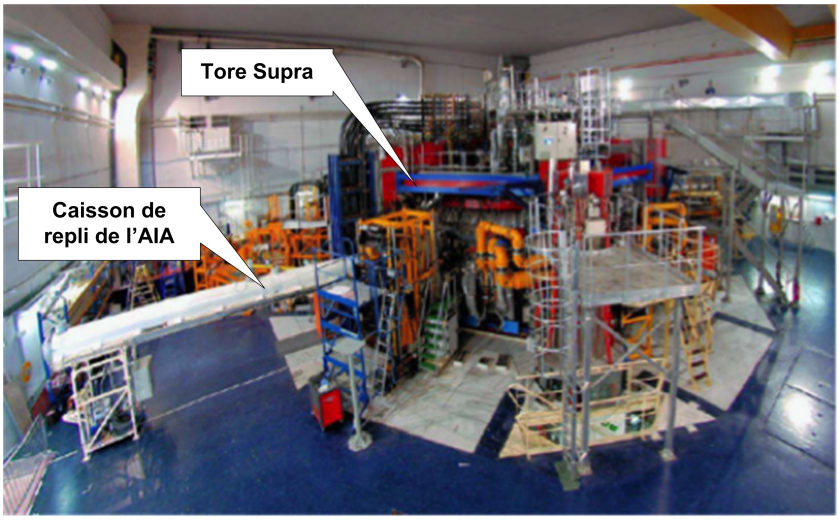


Figure 2 Vue générale de Tore Supra

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 débuter 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).

BY-NC-SA

	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 toroïdal (centre du plasma)	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	$\geqslant 10$

Tableau 1 Ordres de grandeurs

I.B – 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.

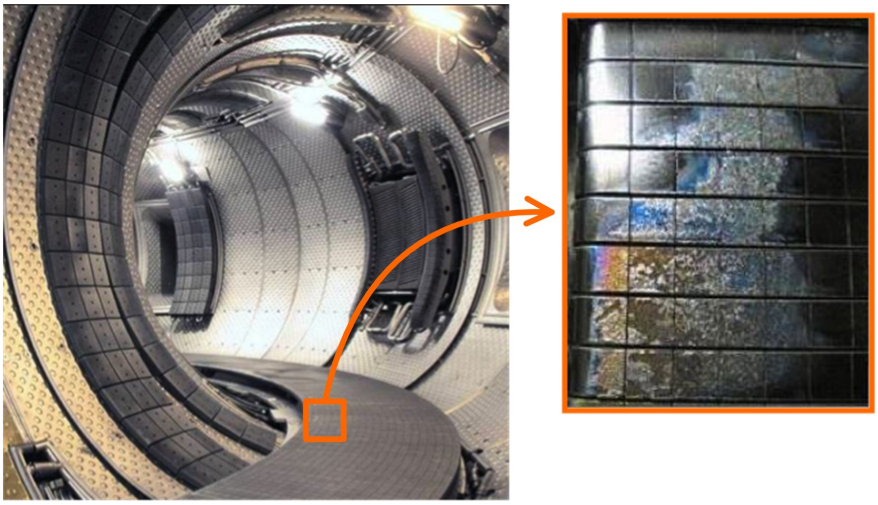


Figure 3 Dépôt de carbone sur le limiteur du Tore Supra

Toutefois, lors de cette opération, les conditions extrêmes d'ultravide (pression d'environ $1{\times}10^{-6}$ 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).

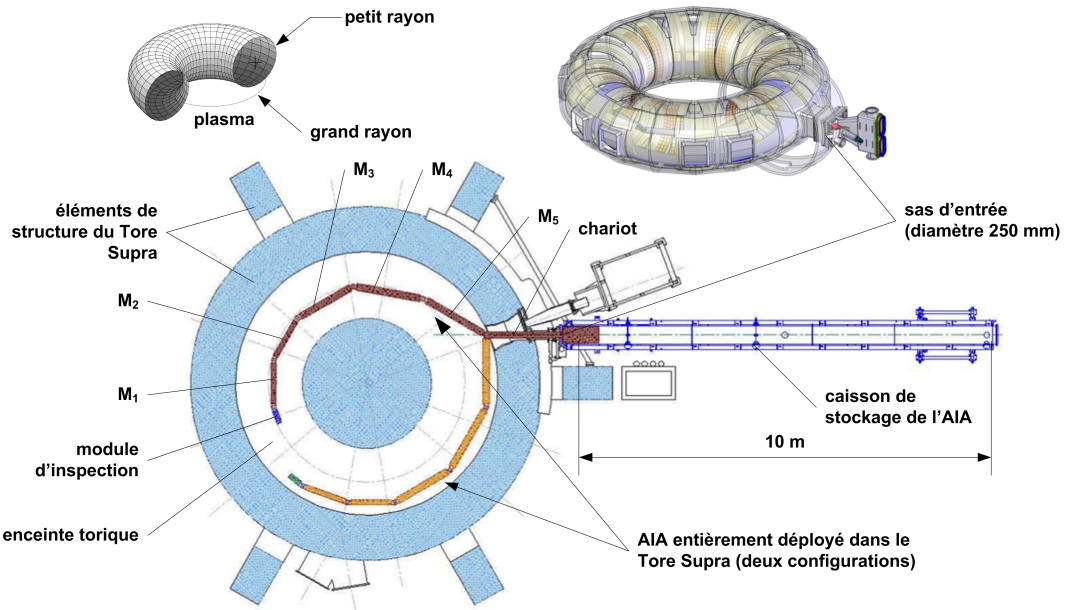


Figure 4 Déploiement du bras AIA dans l'enceinte du Tore Supra

BY-NC-SA

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.

I.C – 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).

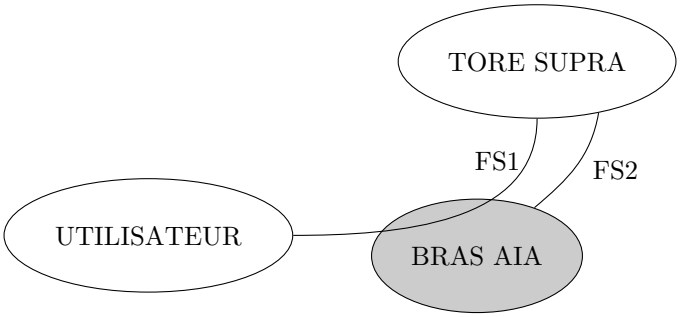


Figure 5 Diagramme partiel des inter-acteurs de l'AIA

Les énoncés des fonctions de service identifiées sont les suivantes :

FSi	**Énoncé de la fonction de service**
FS1	Réaliser une inspection de la structure interne du Tore Supra
FS2	Résister aux conditions extrêmes régnant à l'intérieur du Tore Supra

Un extrait du cahier des charges fonctionnel est donné tableau 2.

FSi		**Description**	**Critère**	**Niveau**
FS1	FS1.1	Positionner le module d'inspection dans l'enceinte du Tore Supra	mobilité maximale par module porteur	2
			espace de travail du bras	390 m^3
			amplitude angulaire de déploiement le long du cercle médian de l'enceinte (ou angle d'enroulement)	$\beta_d \geqslant 180°$
			distance de sécurité avec la paroi interne	< 10 cm
	FS1.2	Réaliser une image d'une anomalie de l'enceinte du Tore Supra	mobilité du module d'inspection	3
			amplitude du mouvement de lacet θ_c du bras	$\pm 90°$
			amplitude du mouvement de tangage α_c du bras	$\pm 90°$
			amplitude du mouvement panoramique	360°
			capteur d'image	CCD couleur
			éclairage de l'enceinte	LED
			refroidissement du module d'inspection	gaz N_2
	FS1.3	Analyser et traiter une anomalie de l'enceinte du Tore Supra	analyse de la surface interne du Tore Supra	spectrographe
			traitement de la surface endommagée	laser
FS2	FS2.1	Résister aux conditions de confinement du Tore Supra	pression ultravide	$P = 1 \times 10^{-6}$ Pa
			température de l'enceinte (phase d'inspection)	120 °C $< T <$ 200 °C
	FS2.2	S'adapter à la structure existante du Tore Supra	sas d'entrée	ϕ 250 mm
			angle d'introduction du bras dans Tore Supra	$\gamma = 20°$
			encombrement du caisson de repli AIA	$L < 15$ m
			temps de raccordement au Tore Supra	$<$ 1 jour
	FS2.3	Ne pas polluer l'enceinte du Tore Supra	lubrifiant articulation	téflon
			étanchéité des blocs moteurs	—
			pression de vapeur saturante	—

Tableau 2 Extrait du cahier des charges fonctionnel

BY-NC-SA

I.D – Structure générale du bras AIA

I.D.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 $(O_n, \vec{X}_{4n})$.

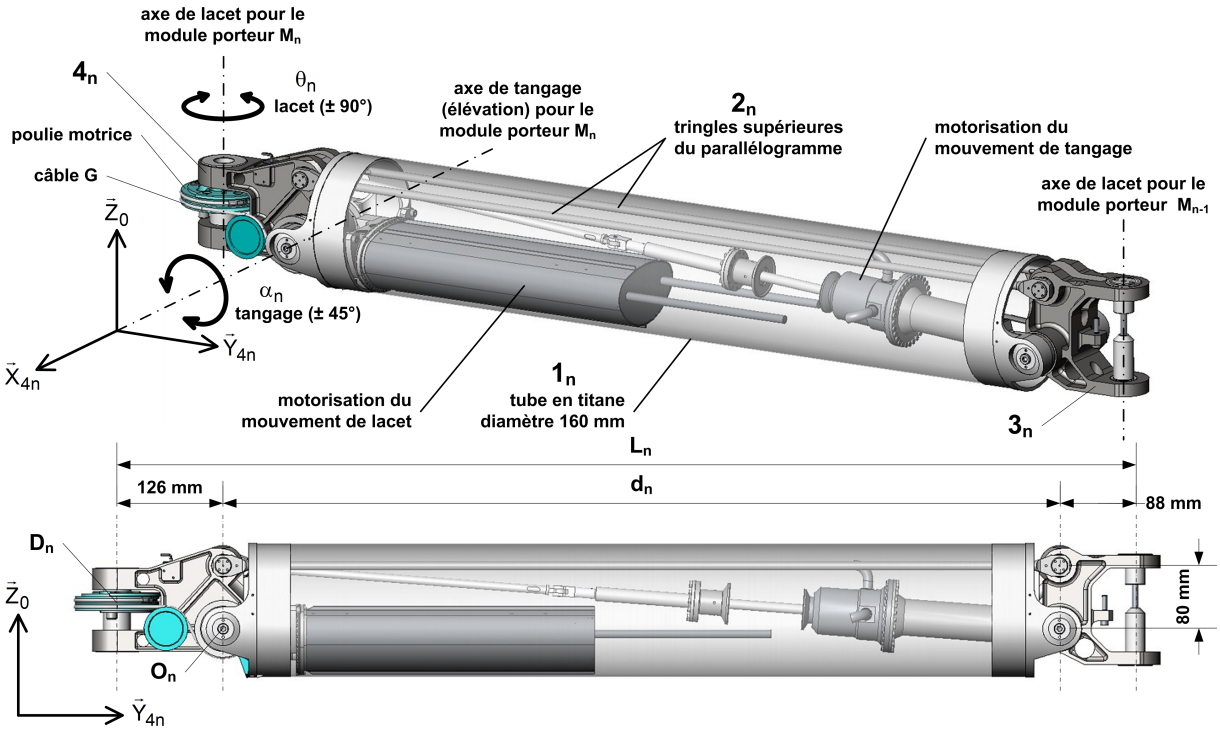


Figure 6 Constituants principaux et dimensions d'un module porteur M_n

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	Amplitude des mouvements
Module porteur « type 1 »	$L_n = 1{,}66$ m	Amplitude des mouvements de lacet $\theta_{\max} - \theta_{\min} = \pm 90°$
Module porteur « type 2 »	$L_n = 1{,}56$ m	Amplitude des mouvements de tangage $\alpha_{\max} - \alpha_{\min} = \pm 45°$
Module porteur « type 3 »	$L_n = 1{,}21$ m	

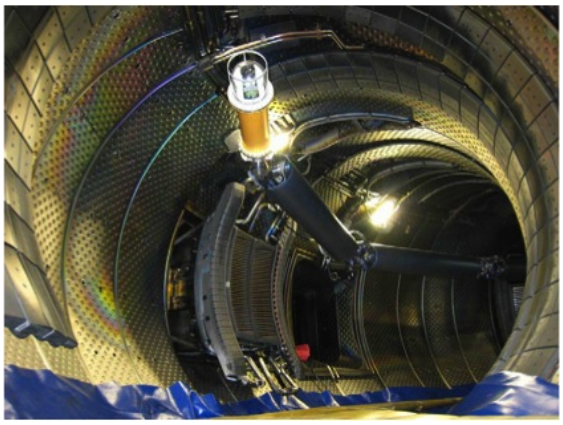
Tableau 3 Caractéristiques des modules standards

I.D.2) Configuration de l'AIA pour le Tore Supra

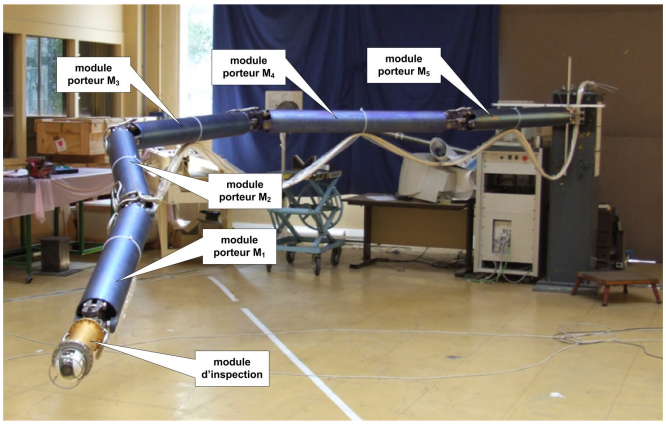
Dans sa déclinaison spécifique au Tore Supra, la structure du bras d'inspection conçu fait apparaître deux entités distinctes : un chariot (nécessaire au déploiement dans Tore Supra) et le bras AIA proprement dit. La dénomination « bras AIA » correspond à l'ensemble constitué des n modules porteurs et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

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.

BY-NC-SA



(a) Vue du bras AIA en phase d'inspection à l'intérieur du Tore Supra



(b) Vue générale du bras AIA en laboratoire

Figure 7 Vues du bras AIA

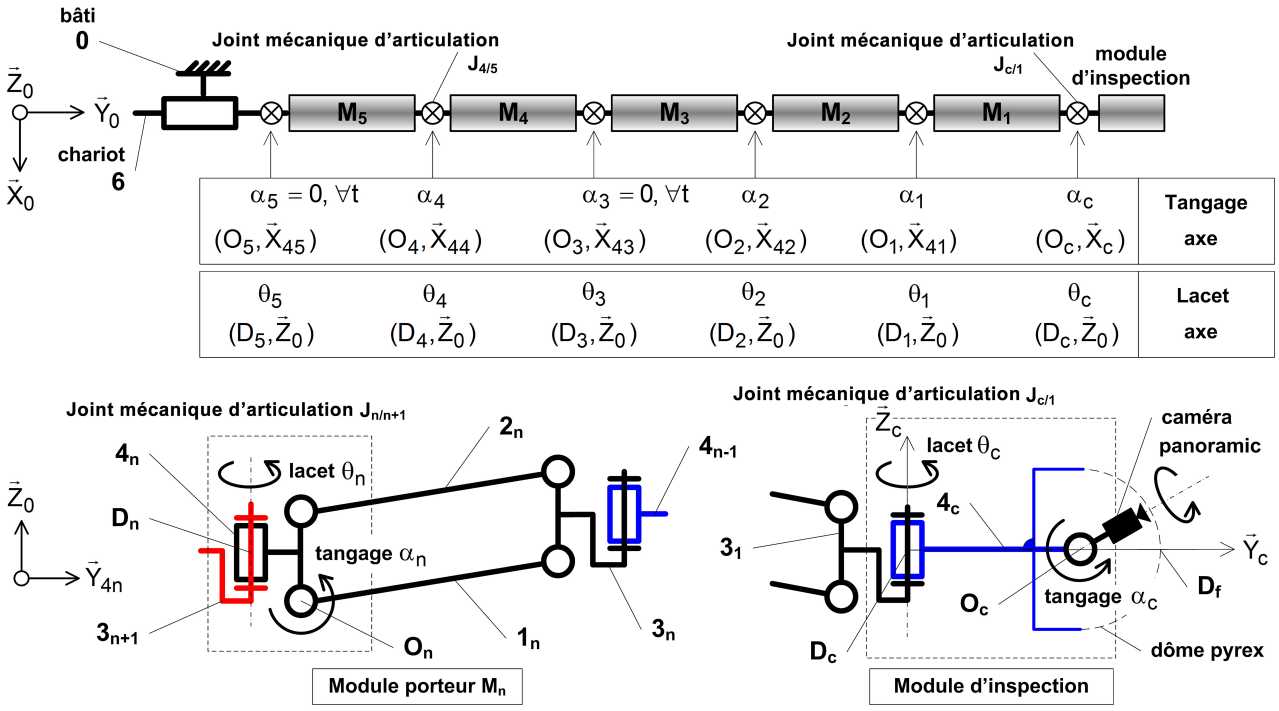


Figure 8 Numérotation des modules porteurs, du module d'inspection et des axes de mouvement

Module	Type	Longueur	Masse
Module d'inspection embarquant le processus vidéo	—	$L_c = \left\|\overrightarrow{D_c D_f}\right\| = 0{,}511$ m	$m = 10$ kg
Modules porteurs M_4 et M_5	type 1	$L_4 = L_5 = 1{,}66$ m	Masse totale des 5 modules porteurs $M = 150$ kg
Module porteur M_3	type 2	$L_3 = 1{,}56$ m	
Modules porteurs M_1 et M_2	type 3	$L_1 = L_2 = 1{,}21$ m	

Tableau 4 Caractéristiques des modules utilisés pour le bras AIA

I.E – 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.

BY-NC-SA

II Étude des fonctions FS1.1 « Positionner le module d'inspection » et FS2.2 « S'adapter à la structure existante du Tore Supra »

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.

II.A – 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.

Q 1. Sans considérer le mouvement panoramique propre à la caméra, quel doit être le nombre de degrés de liberté du corps de la caméra par rapport à un repère lié à l'enceinte du Tore Supra ? Argumenter en précisant le type de degré de liberté.

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 Dc dans une position quelconque par rapport à un repère lié à l'enceinte du Tore Supra.

Q 2. Quel doit être le nombre de degré de liberté du solide 3_1 par rapport à un repère lié à l'enceinte du Tore Supra ? À l'aide de la figure 8, déterminer le degré de mobilité total de l'ensemble des modules porteurs du bras AIA. En déduire le degré de mobilité interne. Quelle conséquence présente un degré de mobilité interne élevé sur la commande du bras AIA ?

Q 3. Pour le module porteur M_n, exprimer $\overrightarrow{\Omega}(3_n/4_n)$. Justifier brièvement. Exprimer alors $\overrightarrow{\Omega}(3_n/3_{n+1})$. En déduire que $\overrightarrow{Z}_c$ est toujours confondu avec $\overrightarrow{Z}_0$. 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.

Q 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 ?

II.B – 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.

BY-NC-SA

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 20 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 $(I, \overrightarrow{Z_0})$ (cf. figures 4 et 9). Ce mouvement doit se faire sans collision avec les parois de l'enceinte torique.

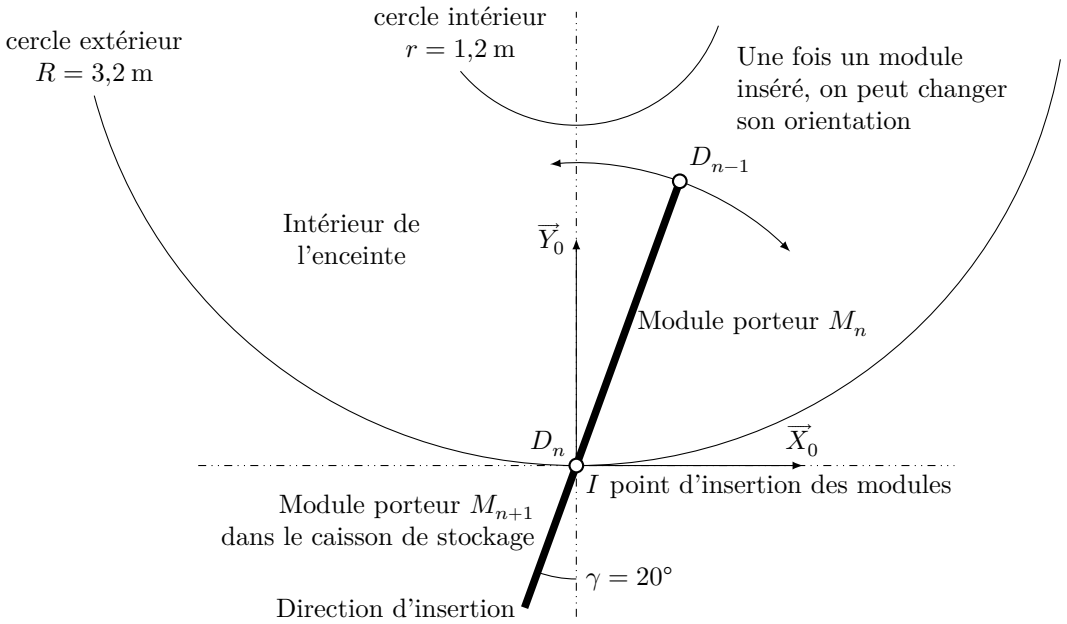


Figure 9 Module porteur M_n en fin d'insertion

Q 5. Déterminer la longueur maximale d'un module porteur pouvant être inséré et orienté dans l'enceinte torique. 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 20) 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 20. Pour un déploiement le long du cercle C_m il faut donc $\beta_d = \sum_{n=1}^{5} \beta_n \geqslant 180°$ (voir tableau 2) afin d'être certain que les zones les plus éloignées du sas d'entrée puissent être inspectées.

Q 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.

Q 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.

Q 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 ?

BY-NC-SA

II.C – 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 7b) dans la configuration la plus défavorable (configuration rectiligne). Pour la même raison, tous les modules porteurs M_n sont supposés de longueur maximale ($L = 1{,}66\text{m}$) et de masse identique ($m_m = 30\,\text{kg}$). 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.

Q 9. Isoler le module M_1 et 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 $\{T(M_2 \to M_1)\}$ au point D_1, en fonction de m, m_m, L, L_c et g.

Q 10. En généralisant les relations pour n modules porteurs, établir l'expression de la norme de la résultante $\left\|\overrightarrow{R}_{(M_{n+1}\to M_n)}\right\|$ et du moment en D_n, $\left\|\overrightarrow{M}_{D_n(M_{n+1}\to M_n)}\right\|$ 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.

Q 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 : $\{T(\text{grav} \to 1_n)\} = {}_{G_n}\left\{-m_m g\overrightarrow{Z_0}; \vec{0}\right\}$, G_n étant situé au milieu de (O_nB_n). Les hypothèses de la statique plane sont adoptées. On pose : $\overrightarrow{B_nD_{n-1}} = \frac{1}{2}H\overrightarrow{Z_0} + b\overrightarrow{Y}_{4n}$.

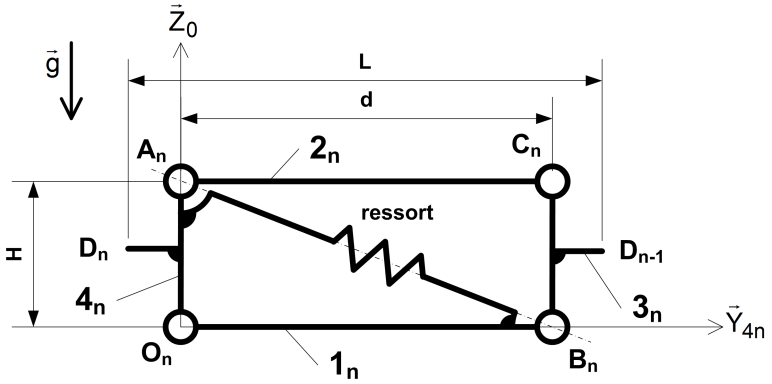


Figure 10 Paramétrage pour le module porteur M_n (en équilibre pour un tangage nul)

Q 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.

Pour répondre à cette question il est demandé 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 $\overrightarrow{Z_0}$.

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

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

BY-NC-SA

Q 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.

III Étude partielle de la fonction FS1.3 « Réaliser une image d'une anomalie de l'enceinte du Tore Supra »

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 ($0{,}5\,\text{rad}\cdot\text{min}^{-1}$). 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.

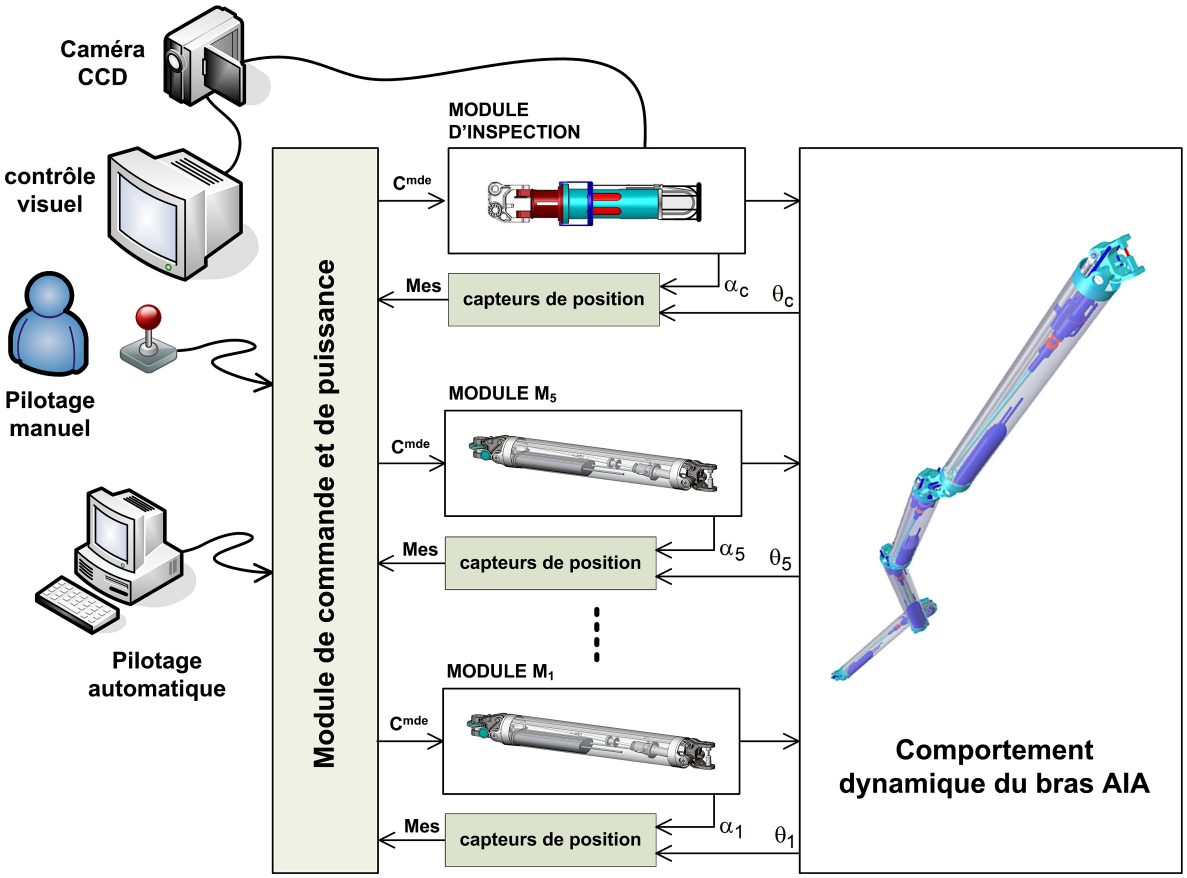


Figure 11 Architecture générale de la commande du bras AIA

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.

BY-NC-SA

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.

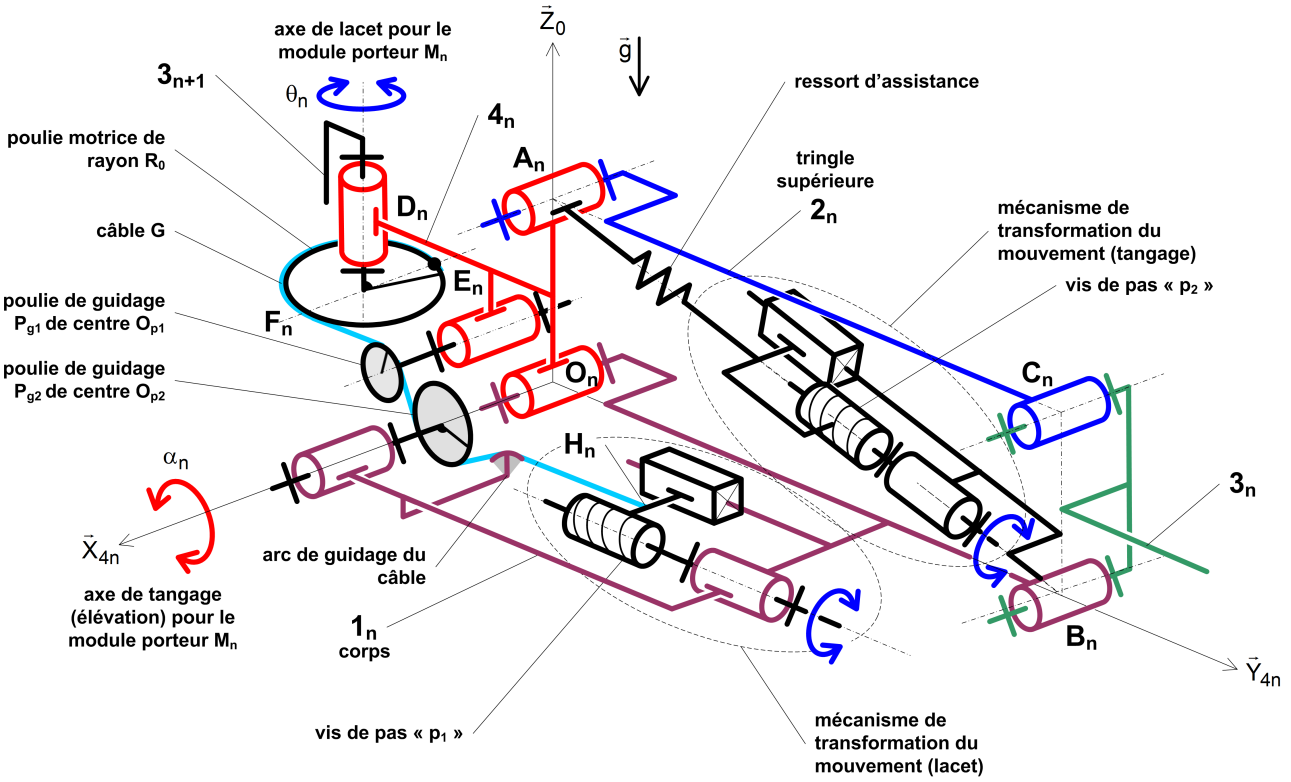


Figure 12 Schéma cinématique minimal partiel d'un module porteur M_n du bras

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

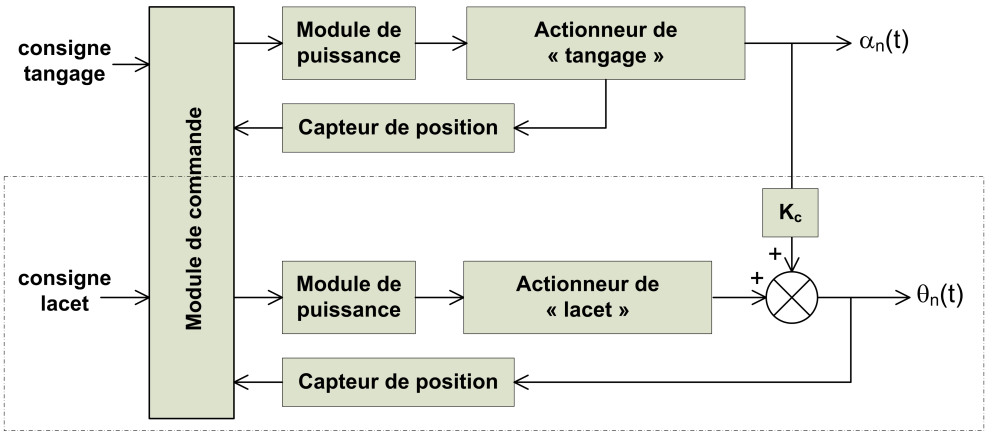


Figure 13 Détail de la commande du module porteur M_n

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 $\theta_n = K_c\alpha_n$.

BY-NC-SA

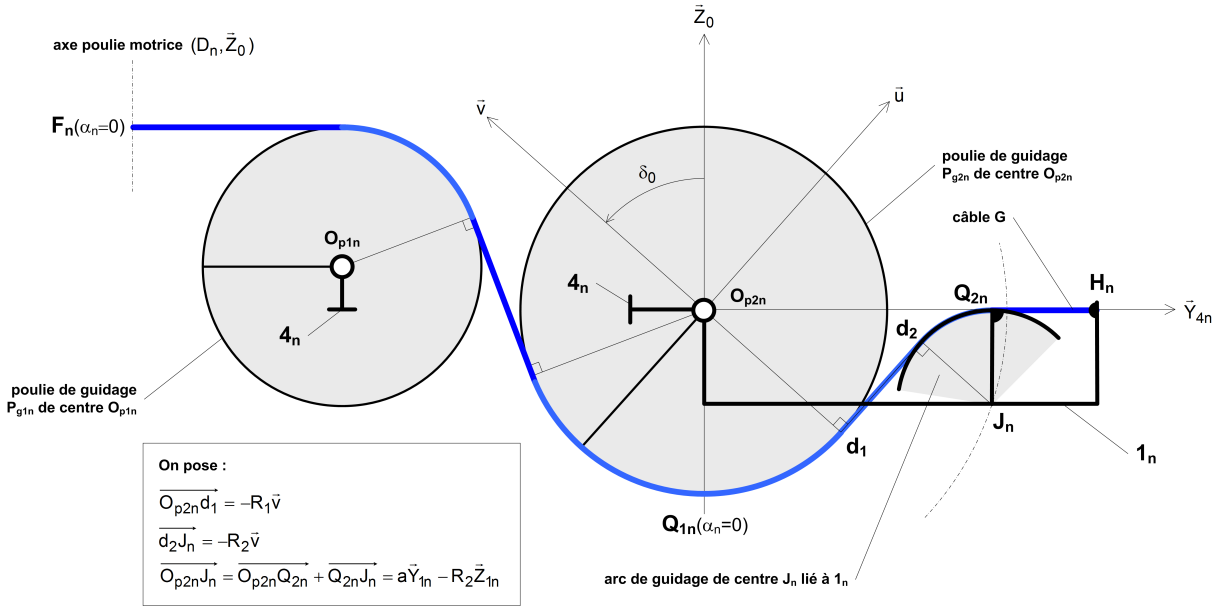


Figure 14 Configuration du câble G pour le module porteur M_n horizontal ($\alpha_n = 0$)

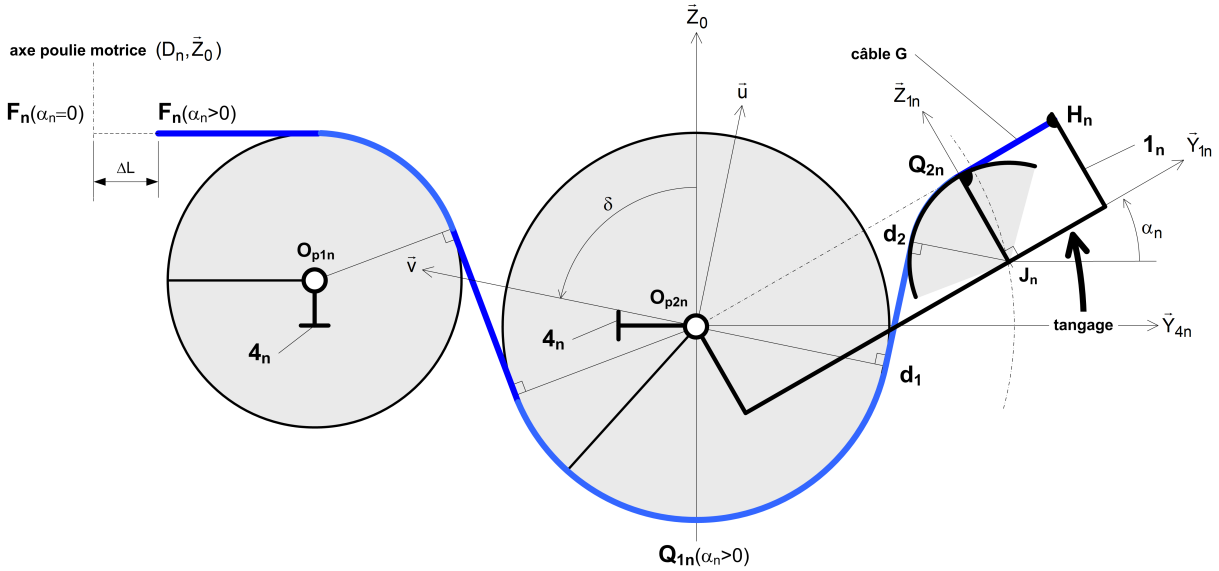


Figure 15 Configuration du câble G pour le module porteur M_n en élévation ($\alpha_n > 0$)

Q 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. Déduire 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.

BY-NC-SA

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 5 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.

Critères	**Niveau**
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
Stabilité	Marge de gain $M_G \geqslant 19$ dB Marge de phase $M_\phi \geqslant 45°$

Tableau 5 Cahier des charges pour la commande en lacet

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.

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

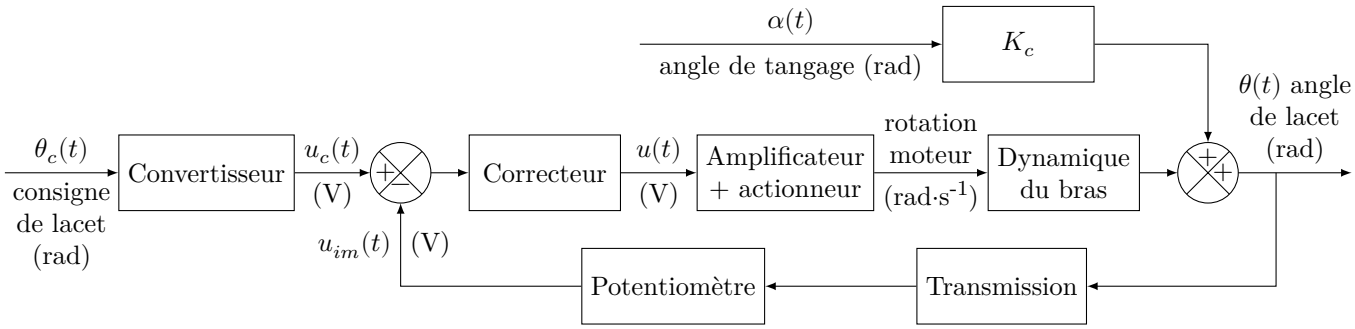


Figure 16 Détail de la commande en position

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

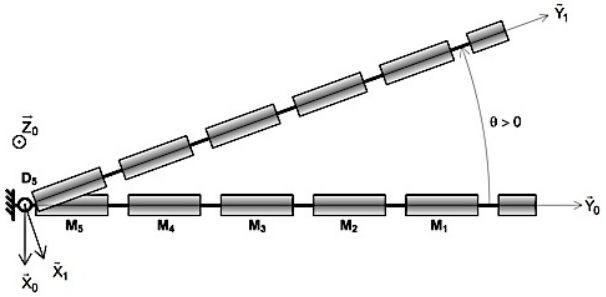


Figure 17 Paramétrage du mouvement de lacet

Un moteur à courant continu entraîne deux dispositifs vis-écrou fonctionnant en opposition. 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

BY-NC-SA

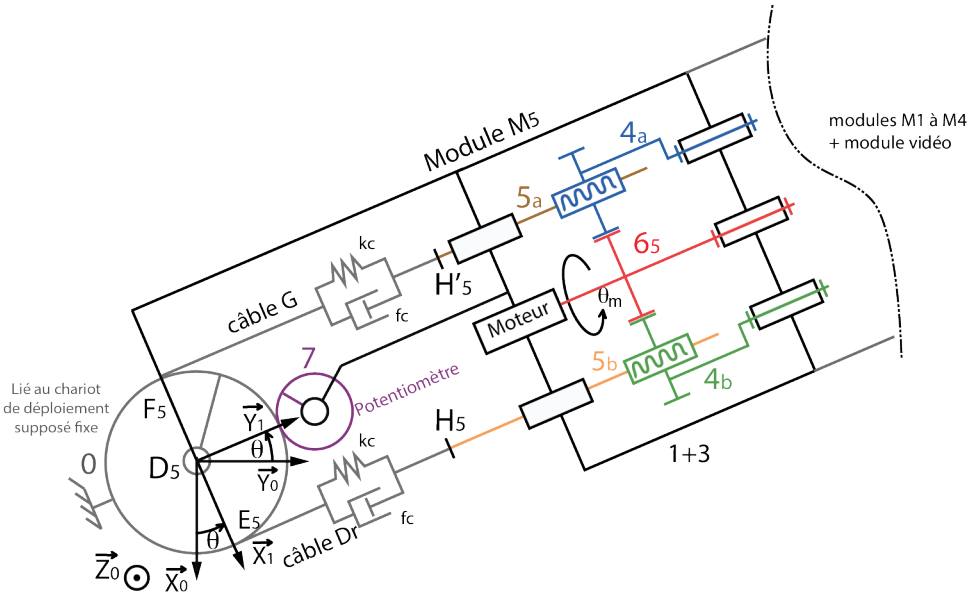


Figure 18 Schéma cinématique de la chaîne fonctionnelle de lacet

Hypothèses	Paramètres
– Le système étudié est équivalent à un module unique de longueur égale à celle du bras au complet (module d'inspection compris) et de masse égale à la masse totale du bras. – L'ensemble matériel {1+3} est constitué de tous les solides 1_n et 3_n des modules n et est de masse M (masse totale du bras sans le module d'inspection). – La masse des solides autres que celle de l'ensemble {1+3+module d'inspection} est négligée. – Les liaisons sont supposées parfaites. – L'étude sera réalisée dans le plan $(D_5, \vec{X}_0, \vec{Y}_0)$. – Le comportement élastique des éléments constituant le bras AIA ne sera pas pris en compte excepté pour les câbles. – Les actions mécaniques transmissibles entre la poulie motrice (0) et le capteur (7) sont négligeables.	– R_0 rayon de la poulie (0). – k rapport de réduction pour la transmission de puissance $k = \left\lvert \frac{\omega_{4_a/(1+3)}}{\omega_{6_5/(1+3)}} \right\rvert = \left\lvert \frac{\omega_{4_b/(1+3)}}{\omega_{6_5/(1+3)}} \right\rvert$. – p_1 pas des dispositifs vis-écrou en mm·tr^{-1}. – M masse totale du bras. – m masse du module d'inspection. – L_t longueur totale du bras. – J_{eq} moment d'inertie équivalent de l'ensemble du bras complet ramené à l'axe $(D_5, \vec{Z}_0)$. – θ_m position angulaire de l'axe moteur autour de l'axe $(D_5, \vec{Y}_1)$. – θ position angulaire du bras autour de l'axe $(D_5, \vec{Z}_0)$.

Tableau 6

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}.

III.B.1) Modélisation dynamique de l'ensemble bras au complet

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 :

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

$$\{T(D_r \to 5a)\} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}_{(D_r\to 5a)} = F_{(\text{ressort}\to 5b)}\vec{Y}_1 + F_{(\text{amortisseur}\to 5b)}\vec{Y}_1 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{H_5}$$

Avec $F_{(\text{ressort}\to 5a)} = -k_c\lambda(t) = -F_{(\text{ressort}\to 5b)}$, $F_{(\text{amortiseur}\to 5a)} = -f_c\dot{\lambda}(t) = -F_{(\text{amortisseur}\to 5b)}$, 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 $\{T(\text{visq} \to \{1+3\}\}_{D_5} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{0} \\ -f_0\dot{\theta}(t)\vec{Z}_0 \end{array} \right\}$ avec f_0 en N·m·s·rad^{-1}.

BY-NC-SA

Q 15. Déterminer les expressions de A_λ et de B_λ en fonction de k, p_1 et R_0.

Q 16. En précisant le théorème ou le principe 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 : $A\ddot{\theta}(t) + B\dot{\theta}(t) + C\theta(t) = D\dot{\theta}_m(t) + E\theta_m(t)$ où A, B, C, D et E sont des constantes à exprimer obligatoirement en fonction des différents paramètres géométriques et mécaniques du système.

Le modèle dynamique du bras étant déterminé, 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 $\Theta_m(p) = L(\theta_m(t))$, $\Omega(p) = L(\dot{\theta}_m(t))$, $\Theta_c(p) = L(\theta_c(t))$ et $\Theta(p) = L(\theta(t))$. Les conditions initiales sont supposées nulles.

III.B.2) 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. Quel que soit le résultat trouvé précédemment, le modèle à utiliser est celui proposé ci-dessous :

- la fonction de transfert du correcteur est notée $C(p)$;
- la fonction de transfert de l'ensemble {amplificateur + actionneur} est $H_m(p) = \dfrac{\Omega_m(p)}{U(p)} = \dfrac{K}{1+\tau p}$ avec $K = 26{,}5\ \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{V}^{-1}$ et $\tau = 0{,}7\ \text{s}$;
- le gain du convertisseur est noté K_{co} avec $K_{co} = K_p K_T = 2{,}18\ \text{V}\cdot\text{rad}^{-1}$;
- 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 ($k_c \approx 8 \times 10^5\ \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$) sur les frottements visqueux au sein de ce dernier et de faire l'hypothèse que $\dfrac{f_c}{k_c} \ll \omega_0$. L'expression de la fonction de transfert $\dfrac{\Theta(p)}{\Theta_m(p)}$ notée $H_1(p)$ est dans ce cas :

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

Q 17. Compléter le schéma-bloc fourni sur le document réponse.

Les figures et du document réponse représentent respectivement la réponse fréquentielle dans le plan de Bode (amplitude et phase) de la fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) ainsi que la réponse indicielle en boucle fermée du modèle construit, pour $C(p) = 1$.

Q 18. En observant les figures et , le comportement du modèle 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.

III.B.3) Optimisation et commande de lacet corrigée

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 principe de la correction utilisé poursuit deux objectifs :

- compenser l'influence de $H_1(p)$ sur le comportement de la commande ;
- assurer des performances conformes aux critères définis par le cahier des charges.

Le correcteur choisi correspond à un filtre coupe-bande et est de la forme

$$C(p) = K' \frac{N(p)}{D(p)} = K' \frac{p^2/\omega_N^2 + 2\xi_N p/\omega_N + 1}{p^2/\omega_D^2 + 2\xi_D p/\omega_D + 1}$$

Ce correcteur a les caractéristiques suivantes :

- les zéros de $C(p)$ doivent permettre de compenser les pôles de $H_1(p)$;
- $D(p)$ correspond au dénominateur d'un deuxième ordre avec $\xi_D = 1$ et un temps de réponse $t_{5\%}$ de 8 s (voir figure 19).

Q 19. Donner l'expression numérique de $\dfrac{N(p)}{D(p)}$.

La figure du document réponse présente la réponse fréquentielle dans le plan de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) corrigée pour des pulsations comprises entre $0{,}3\ \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ et $0{,}5\ \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ mais avec $K' = 1$.

Q 20. Déterminer la valeur de K' permettant d'avoir une marge de gain de 19 dB. Le critère de marge de phase est-il respectée pour la valeur de K' trouvée ?

La phase de modélisation précédemment menée ayant permis d'aboutir à la synthèse d'un correcteur, ce dernier est implanté dans le système réel. La figure du document réponse représente la réponse indicielle réelle du bras suite à un essai dans les mêmes conditions que celles qui ont permis d'établir le modèle.

Q 21. La commande en lacet du bras vérifie-t-elle les exigences attendues ? Justifier brièvement votre réponse.

BY-NC-SA

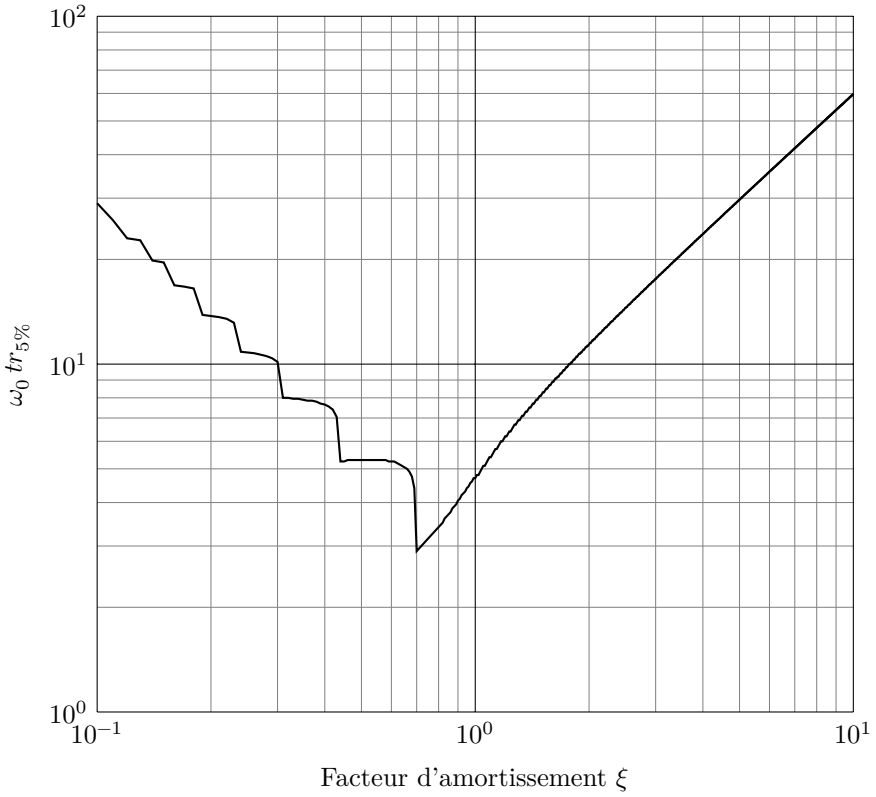


Figure 19

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.

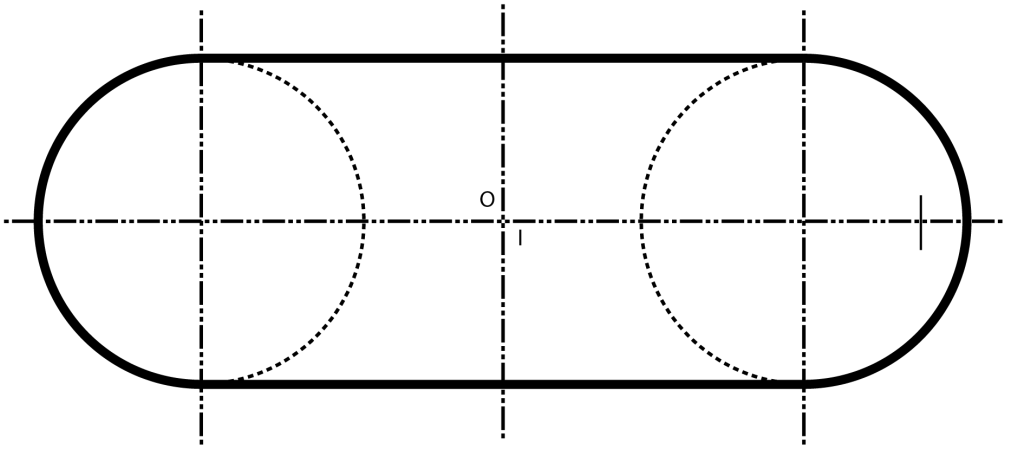
IV Conclusions sur la qualification du bras AIA et perspectives pour ITER

Q 22. 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.

BY-NC-SA

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



Vue de dessus de l'enceinte

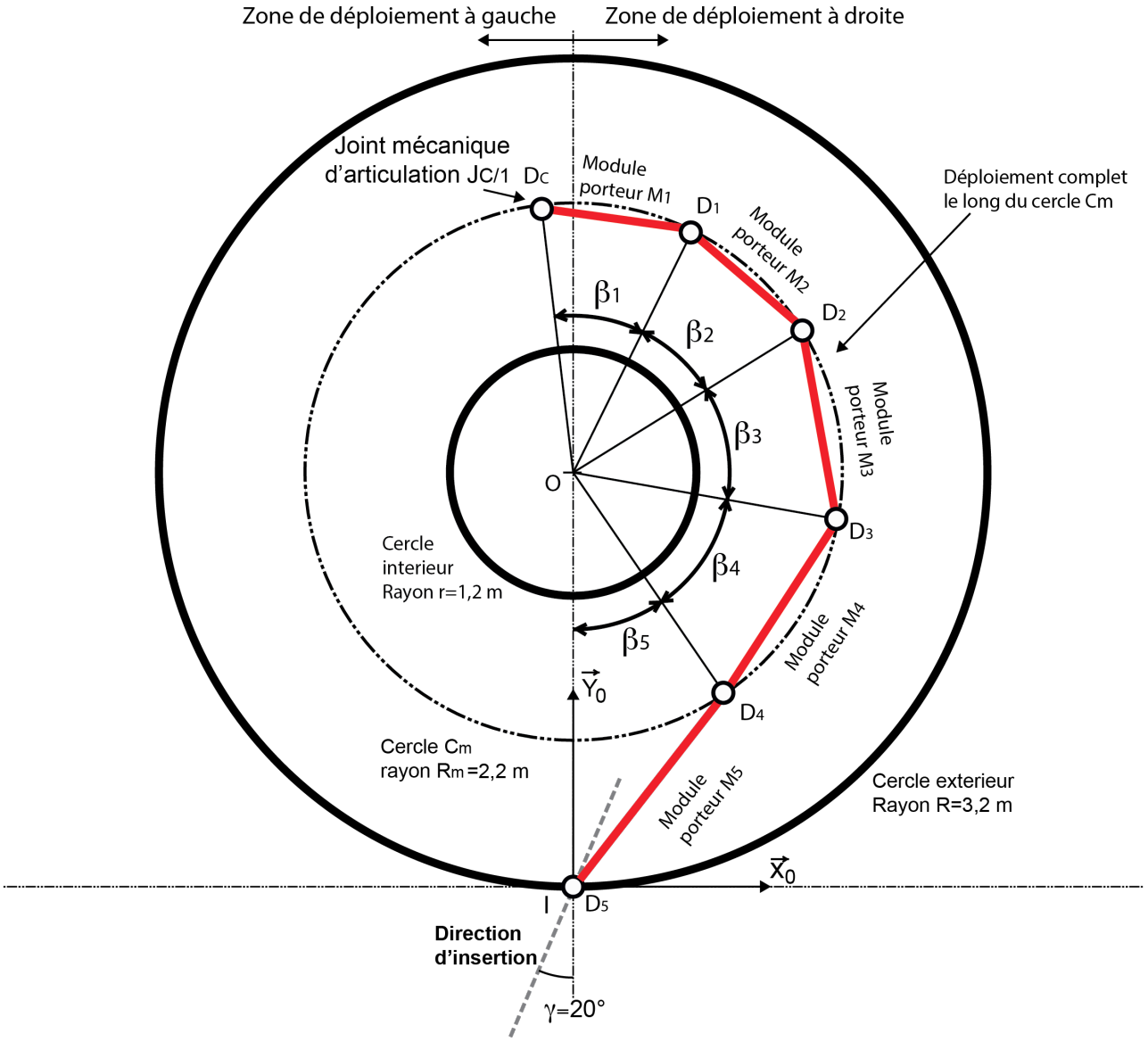


Figure 20

• • • FIN • • •

BY-NC-SA

CONCOURS CENTRALE•SUPÉLEC

NOM : .....

Prénom : .....

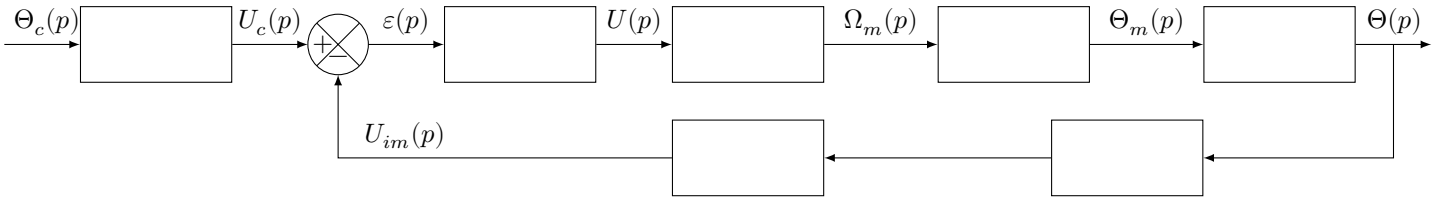
Signature :

Épreuve de **S2I** Filière **MP**

NUMÉRO DE PLACE

Ne rien porter sur cette feuille avant d'avoir rempli complètement l'en-tête

Question 17



Question 18

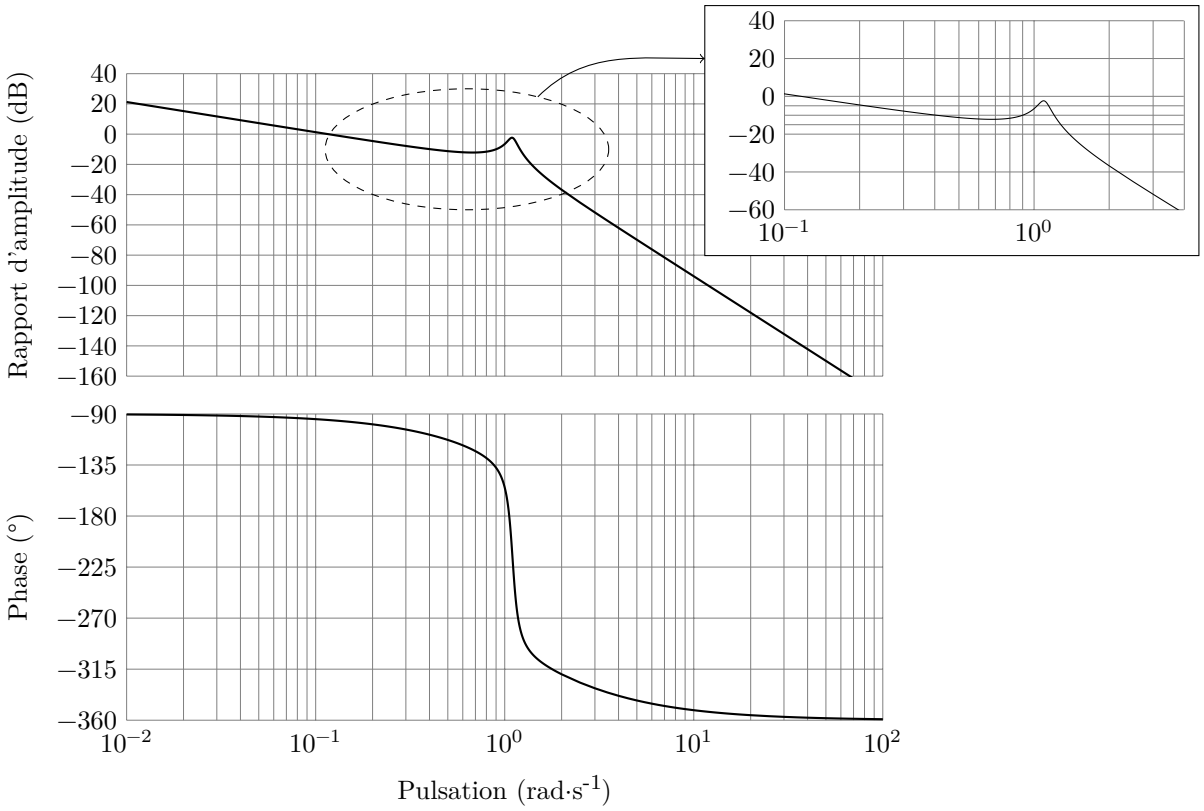


Figure A Diagrammes de Bode de la FTBO

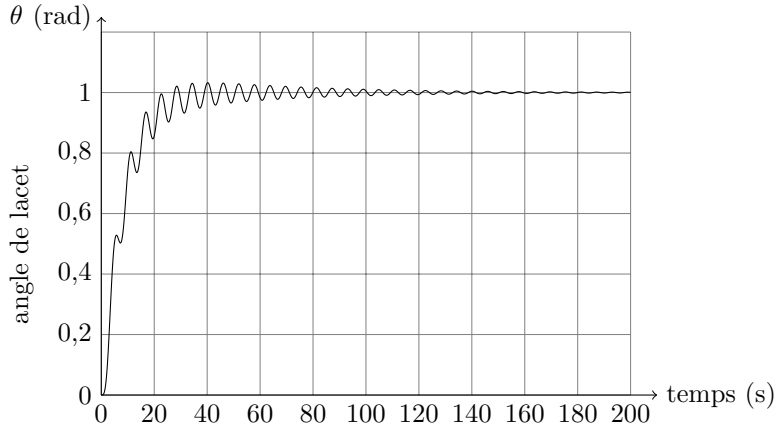


Figure B Réponse indicielle de la FTBF pour une correction $C(p) = 1$

Question 20

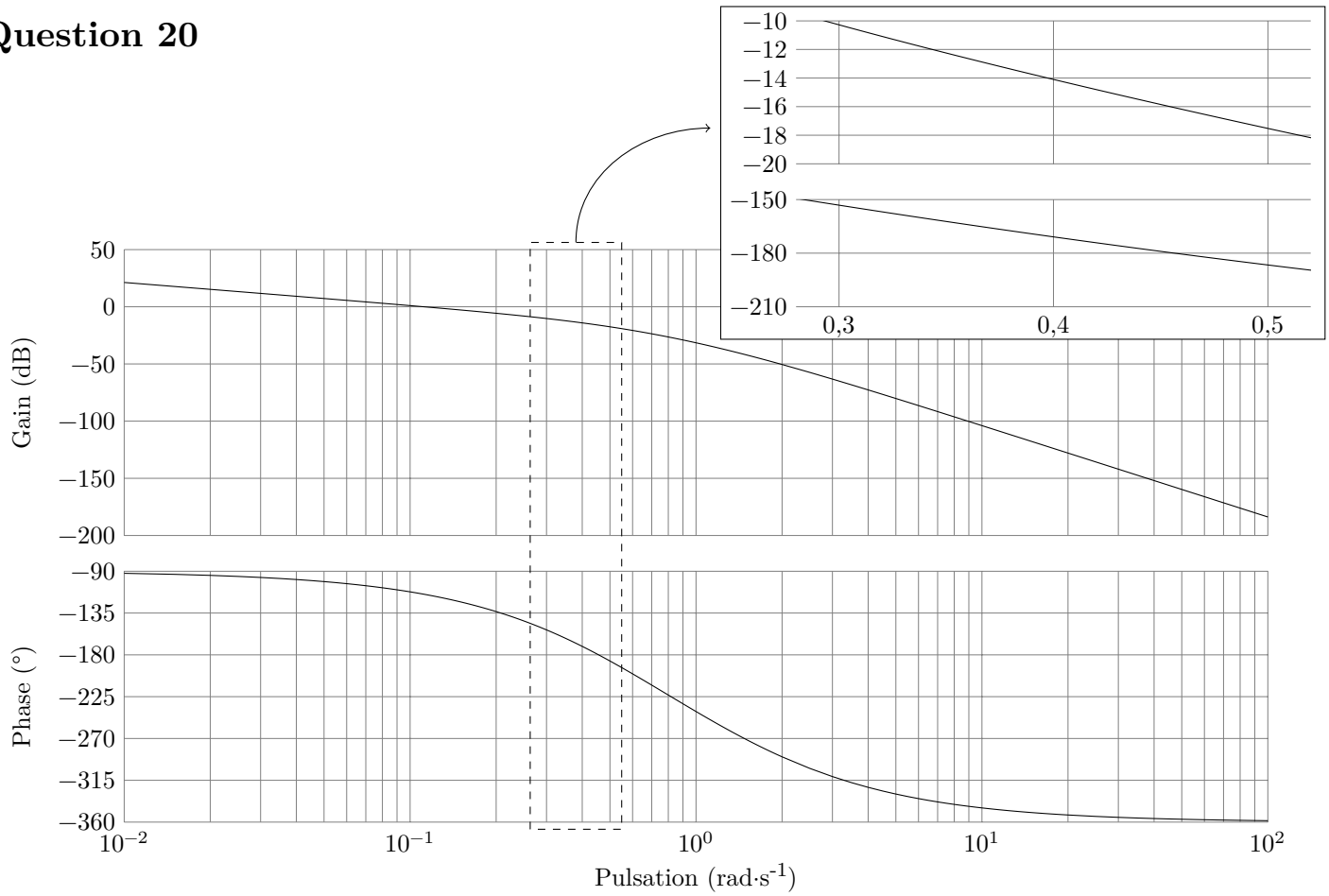


Figure C Tracé avec $K' = 1$

Question 21

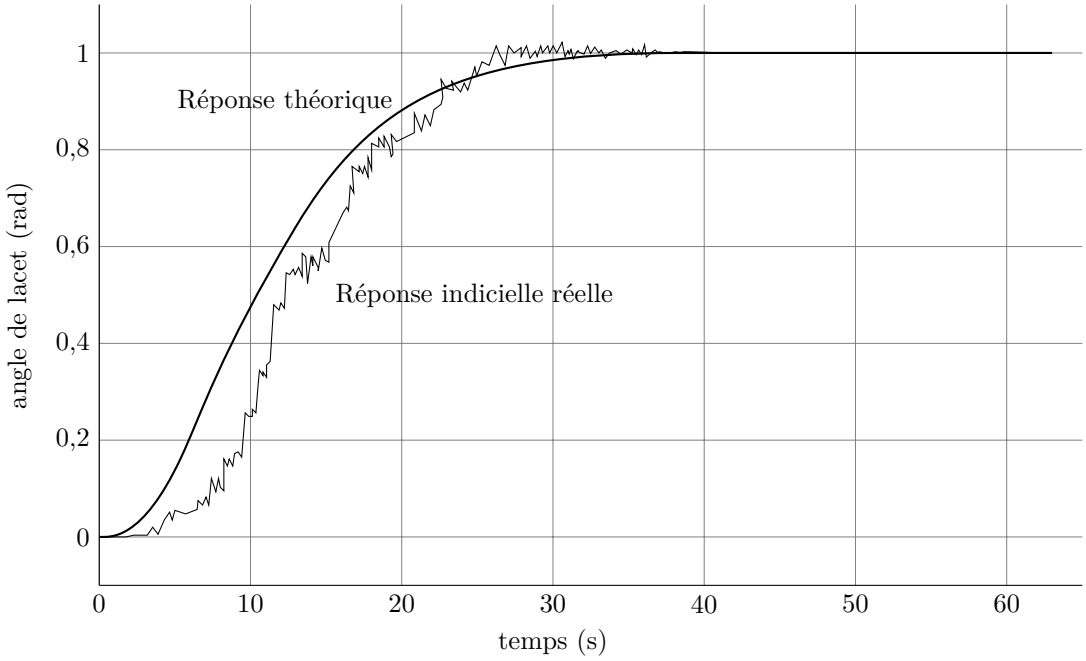


Figure D Réponse indicielle théorique et réelle

Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de MP chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

Chapitres liés à ce sujet

- Ingénierie système : besoin, exigences et diagrammes SysML
- Statique des solides : principe fondamental et stratégie d'isolement
- Cinématique du solide : paramétrage, vitesse, taux de rotation et torseur cinématique
- Modélisation des liaisons, graphe des liaisons et schéma cinématique
- Cinématique des mécanismes : composition des mouvements, contact ponctuel, lois entrée-sortie et fermetures
- Transmetteurs de puissance et trains d'engrenages
- Dynamique des systèmes de solides : principe fondamental, stratégie d'isolement, équilibrage
- Modélisation des systèmes asservis : structure, SLCI, transformée de Laplace, schéma-blocs

Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

prepahelp.com/#essai

Une question sur le concours ou sur ta filière :
écrire sur WhatsApp

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/centrale/mp