

## 1 Bras d'inspection du tokamak de Cadarache

### I. Présentation générale du bras AIA

#### I.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.

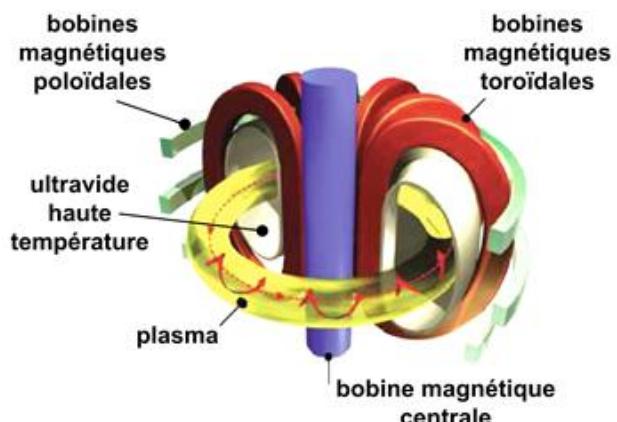


Figure 1 : Principe d'un TOKAMAK

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.

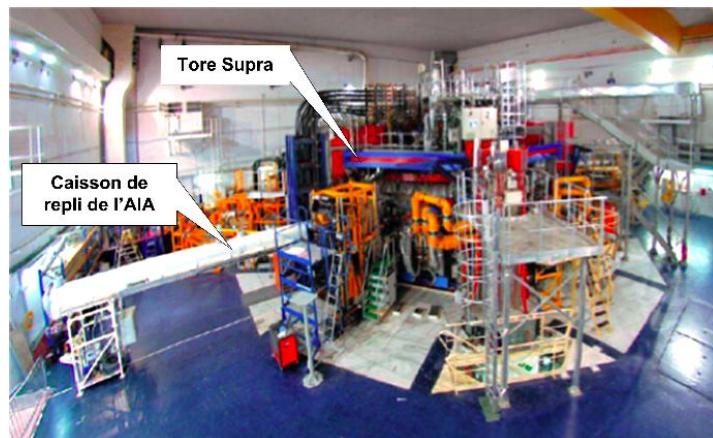


Figure 2 : vue générale du Tore Supra

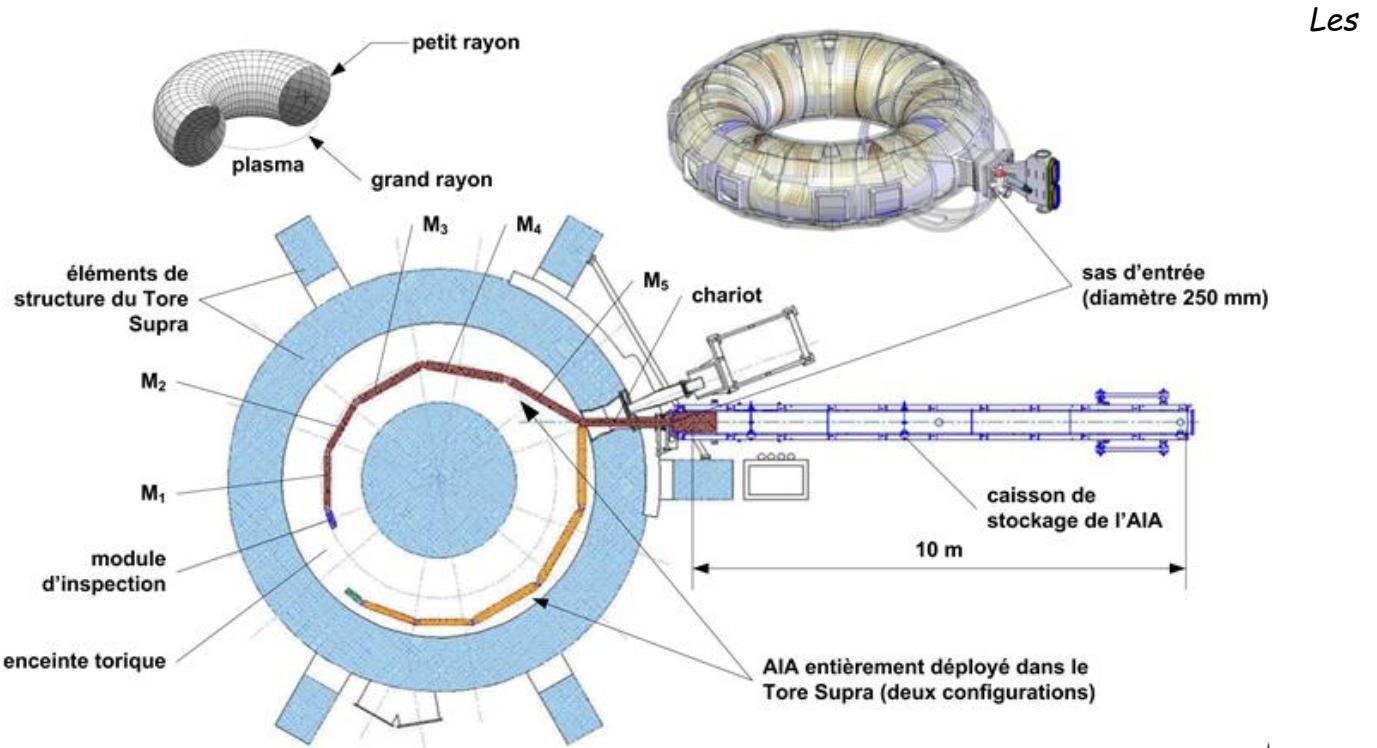
Le Tore Supra appartient à la première catégorie dite des « tokamaks » et est implanté sur le site du CEA de Cadarache (13) depuis 1988.

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.

## I.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 thermomécaniques. 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 4 :** Déploiement du bras AIA dans l'enceinte du Tore

contraintes sévères du contexte impliquent que la solution technique retenue pour inspecter l'enceinte se compose d'un bras articulé en chaîne ouverte (cf. figure 4).

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

## I.4- Structure générale du bras AIA

### I.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.

Le corps d'un module porteur standard  $M_n$  est constitué d'un tube en titane d'un diamètre (cf. figure 6) à l'intérieur duquel viennent se loger les deux blocs étanches de motorisation des deux axes.

Tous les modules porteurs  $M_n$  sont de conception mécanique strictement identique et ont vocation à être assemblés en chaîne ouverte. Ils sont articulés entre eux grâce à un joint mécanique d'articulation possédant deux degrés de mobilité : une rotation  $\theta_n$  caractérisant un mouvement dit de « lacet » et une élévation  $\alpha_n$  caractérisant un mouvement dit de « tangage ». Ces deux rotations s'effectuent selon deux axes perpendiculaires respectivement  $(D_n, \vec{Z}_0)$  et  $(O_n, \vec{X}_{4n})$ .

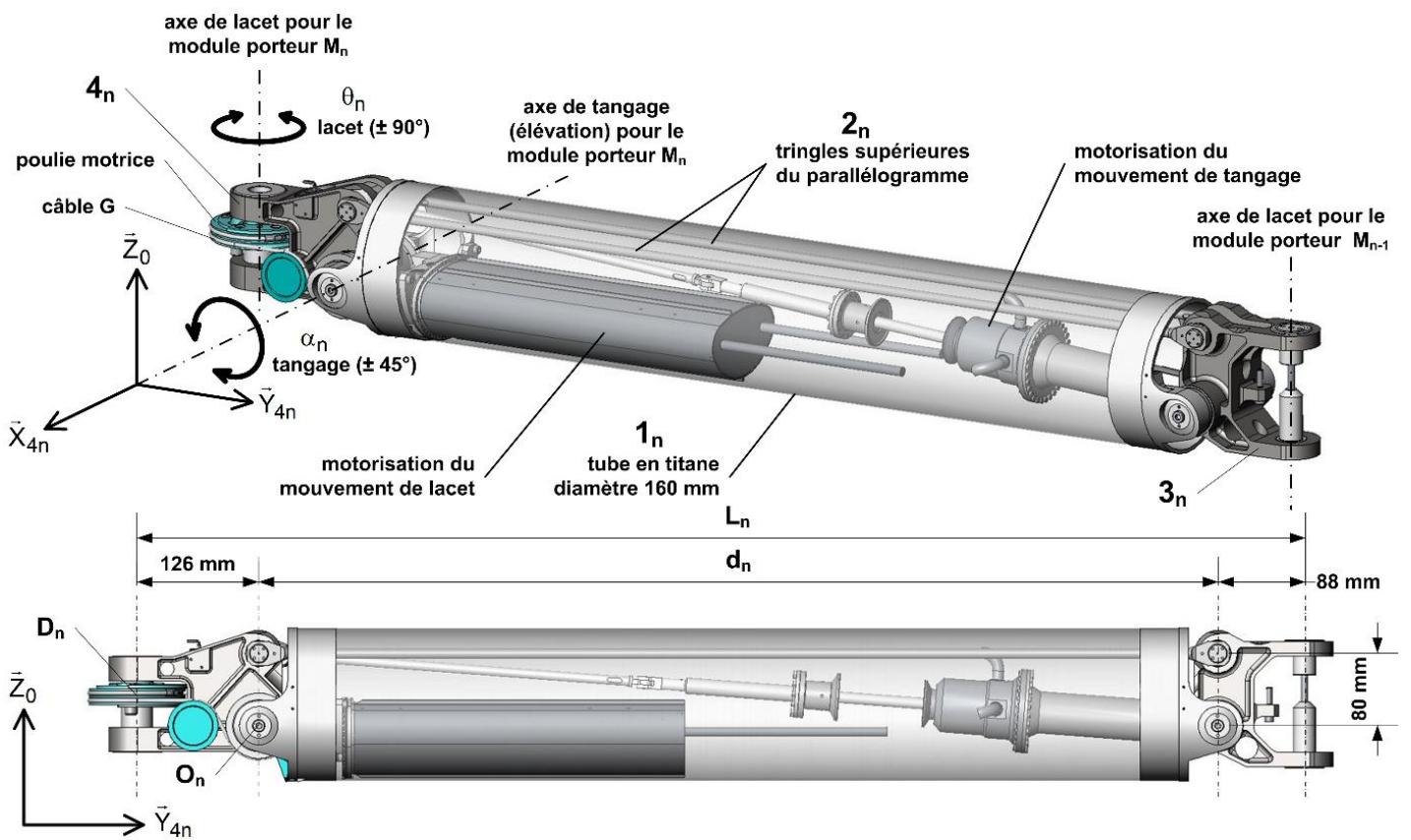


Figure 6 : constituants principaux et dimensions d'un module porteur  $M_n$

#### I.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. figures 7a et 7b). Par convention, « module porteur » (repéré  $M_n$ ) désigne l'association des quatre solides :  $M_n = \{1_n \sqsupseteq 2_n \sqsupseteq 3_n \sqsupseteq 4_n\}$ ,  $n=1\dots 5$ .



Figure 7a, vue du bras AIA en phase d'inspection à l'intérieur du Tore Supra



Figure 7b, vue générale du bras AIA en laboratoire

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.

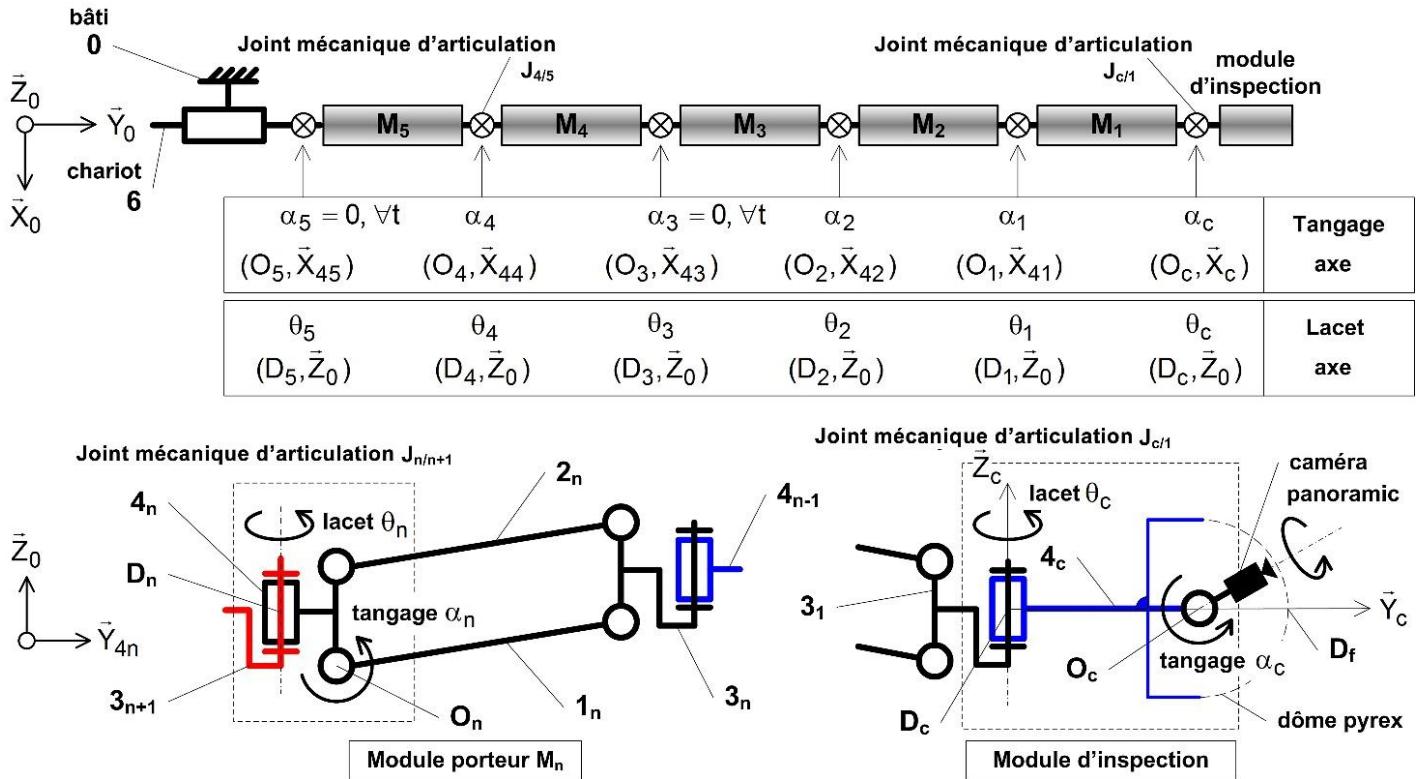


Figure 8 : numérotation des modules porteurs, du module d'inspection et des axes de mouvement

⚠ Les composants  $1_i$  et  $2_i$  ont même longueur, il en est de même pour  $3_i$  et  $4_i$ . ⚠

## II. Etude des mobilités de l'AIA

### II.1 - Etude d'un unique module

La figure 8 représente le schéma cinématique du n-ième module porteur.

**Question 1.** Sur votre copie, reproduisez le schéma cinématique décrivant le module porteur  $M_n$ , en utilisant une couleur différente pour chaque classe d'équivalence. Proposer un paramétrage permettant de décrire l'angle de tangage (axes + représentation de l'angle)

**Question 2.** Proposer le schéma cinématique (en couleur) faisant apparaître les composants  $3_{n+1}$ ,  $4_n$ , et  $2_n$ , mais dans le plan  $(\bar{X}_{4n}; \bar{Y}_{4n})$ , en vue de dessus. Proposer un paramétrage permettant de décrire l'angle de lacet (axes + représentation de l'angle).

**Question 3.** Après avoir bien observé la structure mécanique, indiquez le mouvement possible de  $3_n$  par rapport à  $4_n$ .

**Question 4.** Quel est le mouvement entre  $3_{n+1}$  et  $4_n$ ? En déduire la mobilité apportée par un module  $M_n$  : proposez une forme du torseur  $\{V_{3n/3n+1}\}$  (on ne détaillera pas l'intensité des vecteurs, on ne veut que la forme du torseur : pas de calcul utilisant Varignon !...).

**Question 5.** Sur votre feuille, réaliser le graphe des liaisons correspondant au module  $M_n$

## II.2- Mobilité de l'extrémité de l'AIA

**Question 6.** L'AIA est composé de plusieurs modules. Décrivez le mouvement qu'il est alors possible de produire au niveau du module d'inspection. Sans calculs, on pourra indiquer la forme du torseur cinématique du module d'inspection par rapport au bâti. Ce mouvement est-il compatible avec le contexte d'utilisation ?

## III. Etude de l'angle de tangage

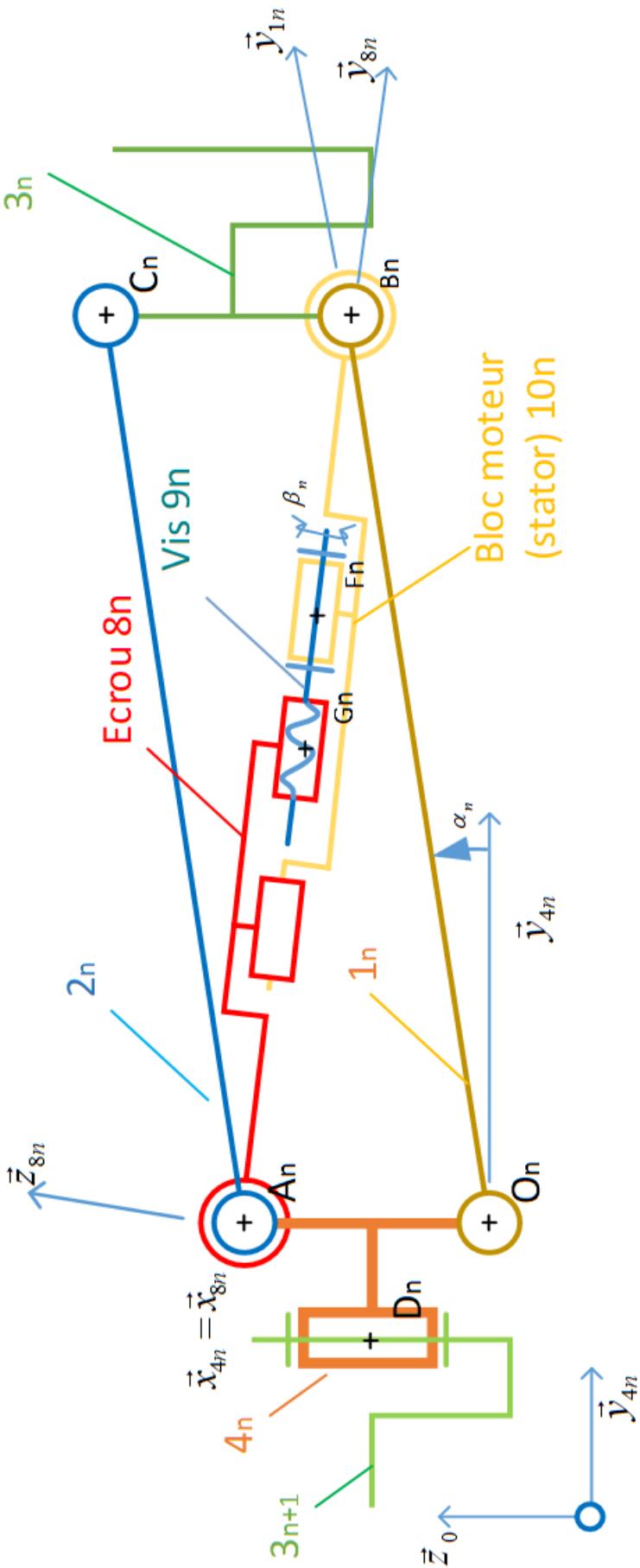
### III.1 - Mécanisme de transmission pour le tangage

Le mouvement de paramètre  $\alpha_n$  est provoqué indirectement par un moto-réducteur, dont le mouvement est transmis et transformé par la structure mécanique décrite en Figure 12.

Le motoréducteur provoque l'évolution du paramètre pilote  $\beta_n(t) = (\vec{x}_{8n}; \vec{x}_{9n})$

On pose pour cette étude :

- Repère  $R_{4n}(D_n; \vec{x}_{4n}; \vec{y}_{4n}; \vec{z}_{4n})$  le repère lié au solide (4n)
- Repère  $R_{1n}(O_n; \vec{x}_{1n,4n}; \vec{y}_{1n}; \vec{z}_{1n})$  le repère lié au solide (1n) tels que  $\alpha_n(t) = (\vec{y}_{4n}; \vec{y}_{1n})$  angle de tangage et  $\overrightarrow{D_n O_n} = a \cdot \vec{y}_{4n} - b \cdot \vec{z}_{4n,0}$  et  $\overrightarrow{O_n B_n} = L_0 \cdot \vec{y}_{1n}$
- Repère  $R_{8n}(A_n; \vec{x}_{8n,4n}; \vec{y}_{8n}; \vec{z}_{8n})$  le repère lié au solide (8n) tels que  $\psi_n(t) = (\vec{y}_{4n}; \vec{y}_{8n})$  et  $\overrightarrow{O_n A_n} = c \cdot \vec{z}_{4n,0}$ .
- $\overrightarrow{A_n B_n} = y(t) \cdot \vec{y}_{8n}$ . On suppose que lorsque le solide (1n) est à l'horizontale cette distance est égale à  $y_0$  et que le moteur n'est pas alimenté (position initiale).
- Le moteur étant accouplé à un réducteur de rapport  $r_1$  et tels que l'angle de sortie de ce réducteur. On lie le repère  $R_{9n}(F_n; \vec{x}_{9n}; \vec{y}_{8n,9n}; \vec{z}_{9n})$  le repère lié au solide (9n) tels que  $\beta_n(t) = (\vec{x}_{8n}; \vec{x}_{9n})$  soit l'angle de pilotage (sortie du réducteur) et  $\overrightarrow{O_n A_n} = c \cdot \vec{z}_{4n,0}$ .



**Figure 12 :** schéma cinématique minimal partiel d'un module porteur  $M_n$  du bras en se limitant à la réalisation de l'angle de tangage

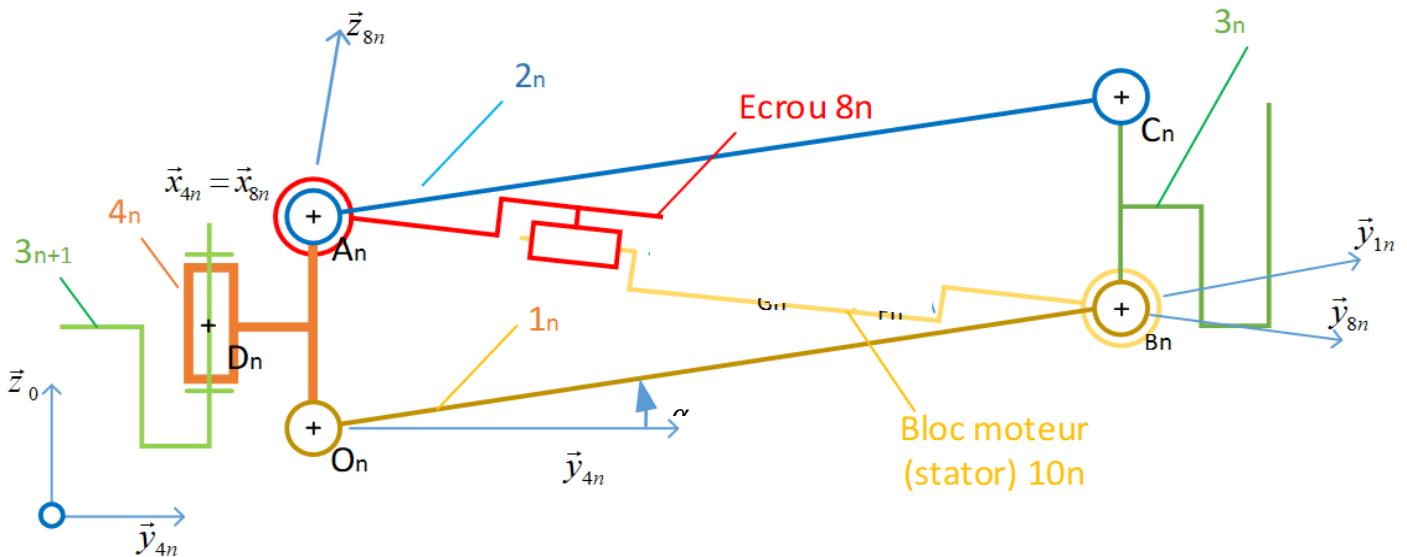
Le mouvement étant asservi au moyen d'un capteur situé sur le moto-réducteur, le schéma bloc correspondant nécessite un bloc adaptateur permettant de traduire la consigne d'angle de tangage en consigne d'angle  $\beta_n$ . Pour cela nous souhaitons mener l'étude géométrique/cinématique de la structure de transmission/transformation de mouvement.

### III.2- Etude géométrique

**Question 7.** Dans le cas d'une liaison hélicoïdale (pas à droite  $p_2$  donc valeur positive), rappeler la formule liant la vitesse de translation à la vitesse de rotation. En déduire dans notre cas la relation entre :  $\dot{y}(t)$  et  $\dot{\beta}_n(t)$ .

Intégrer cette relation pour en déduire  $y(t)$  en fonction de  $\beta_n(t)$ ,  $p_2$ ,  $y_0$ .

On s'intéresse maintenant au lien entre l'angle de tangage  $\alpha_n$  et la distance  $y(t)$ . On peut alors travailler avec le schéma simplifié ci-dessous



**Question 8.** En écrivant une fermeture géométrique dans le triangle  $O_n A_n B_n$ , déterminer une relation liant l'angle de tangage  $\alpha_n$  et la distance  $y(t)$ .

En déduire alors une relation liant l'angle de tangage et l'angle de pilotage  $\beta_n(t)$  du motoreducteur.

Vous poserez bien votre étude et vos relations.

### III.3- Etude cinématique

On souhaite obtenir la loi entrée sortie (loi e/s) cinématique, liant  $\dot{\alpha}_n$  à  $\dot{y}$ .

**Question 9.** Indiquez comment on peut obtenir cette loi cinématique à partir de la relation obtenue à la question précédente.

On se propose de déterminer la loi e/s non pas à l'aide de la méthode décrite à la question précédente, mais à l'aide du bouclage cinématique.

**Question 10.** Appliquez la méthode du bouclage cinématique à la boucle 4n-8n-10n-1n-4n pour obtenir la loi cinématique liant  $\dot{\alpha}_n$  à  $\dot{y}$ . On choisira le point  $A_n$  pour effectuer les calculs. Si vous en avez besoin, vous pouvez poser les inconnues cinématiques nécessaires. On ne cherchera pas à éliminer l'inconnue géométrique indésirable, mais on indiquera la méthode permettant d'y parvenir.

## 2 Laveuse autoportée

L'étude porte sur une évolution envisagée qui conduirait à remplacer la motorisation avant par deux moteurs à l'arrière non orientables mais commandés en vitesse.

Une représentation possible de cet asservissement est présentée à la figure 16.

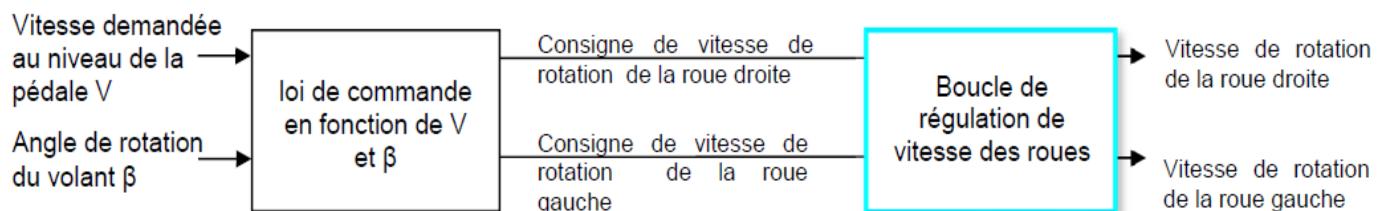
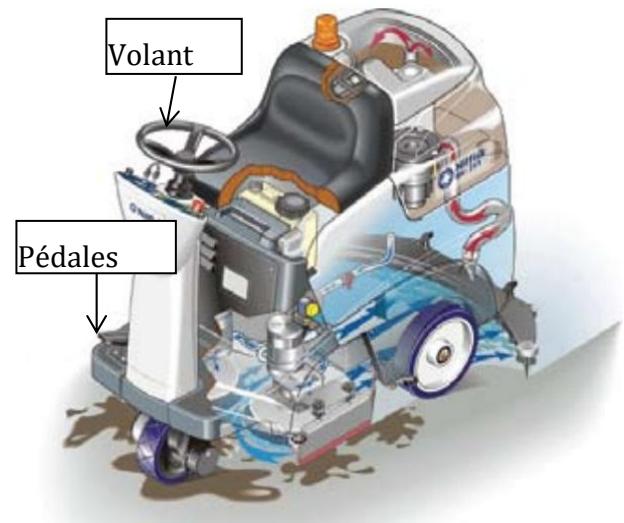


Figure 16 : Schéma bloc de l'asservissement

### Détermination des lois de commande des moteurs asservis

Dans cette partie, on s'intéresse à la détermination des lois de commande des asservissements des moteurs, décrites et figure 16.

La vitesse du véhicule sera caractérisée par la grandeur  $V(t) = \|\overrightarrow{V_{O_L, R_L/R_0}}\|$  et l'orientation de la laveuse sera caractérisée par le rayon de courbure  $\rho(t)$  de la laveuse en virage (voir figure 7).

Ce rayon de courbure est directement lié à la rotation  $\beta(t)$  du volant.

Les consignes en vitesse de rotation des deux moteurs seront reliées aux deux consignes de pilotage  $V(t)$  et  $\beta(t)$ .

Les hypothèses de déplacement sont les suivantes (figure 7) :

- la cinématique du mouvement de la laveuse par rapport au référentiel  $R_0$  peut être considérée comme plane dans le plan  $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$  ;
- le point O est centre du virage de la laveuse ;
- la roue arrière gauche est en liaison pivot d'axe  $(O_g, \vec{x}_L)$  par rapport au châssis du véhicule ;
- la roue avant est en liaison pivot d'axe  $(O_a, \vec{x}_R)$  par rapport à la direction du véhicule ;
- la roue arrière droite est en liaison pivot d'axe  $(O_d, \vec{x}_L)$  par rapport au châssis du véhicule ;
- les deux roues arrière roulent sans glisser sur le sol.

### Notations :

- les référentiels :

$$\begin{aligned}
 R_0 &= (O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0) \text{ est fixe et lié au sol} ; \\
 R_L &= (O_L, \vec{x}_L, \vec{y}_L, \vec{z}_L) \text{ avec } \vec{z}_0 = \vec{z}_L ; \\
 R_g &= (O_g, \vec{x}_g, \vec{y}_g, \vec{z}_g) \text{ avec } \vec{x}_g = \vec{x}_L ; \\
 R_d &= (O_d, \vec{x}_d, \vec{y}_d, \vec{z}_d) \text{ avec } \vec{x}_d = \vec{x}_L ;
 \end{aligned}$$

- les vecteurs rotation :

de la laveuse par rapport au sol  $\overrightarrow{\Omega_{R_L/R_0}} = \dot{\alpha} \overrightarrow{z_0}$  ;

de la roue gauche par rapport au châssis  $\overrightarrow{\Omega_{R_g/R_L}} = \dot{\theta}_g \overrightarrow{x_L}$  avec  $\dot{\theta}_g = \omega_g$  ;

de la roue droite par rapport au châssis  $\overrightarrow{\Omega_{R_d/R_L}} = \dot{\theta}_d \overrightarrow{x_L}$  avec  $\dot{\theta}_d = \omega_d$  ;

-  $\overrightarrow{O_0 O_L} = \rho \overrightarrow{x_L}$  ;

-  $\overrightarrow{O_g O_L} = \overrightarrow{O_L O_d} = \frac{e}{2} \overrightarrow{x_L}$  avec  $e = 0,6 \text{ m}$  la largeur de la laveuse ;

- le point de contact entre la roue gauche (droite) et le sol est noté  $I_g$  ( $I_d$ )

avec  $\overrightarrow{I_g O_g} = \overrightarrow{I_d O_d} = r \cdot \overrightarrow{z_0}$ ,  $r = 0,150 \text{ m}$  le rayon des roues ;

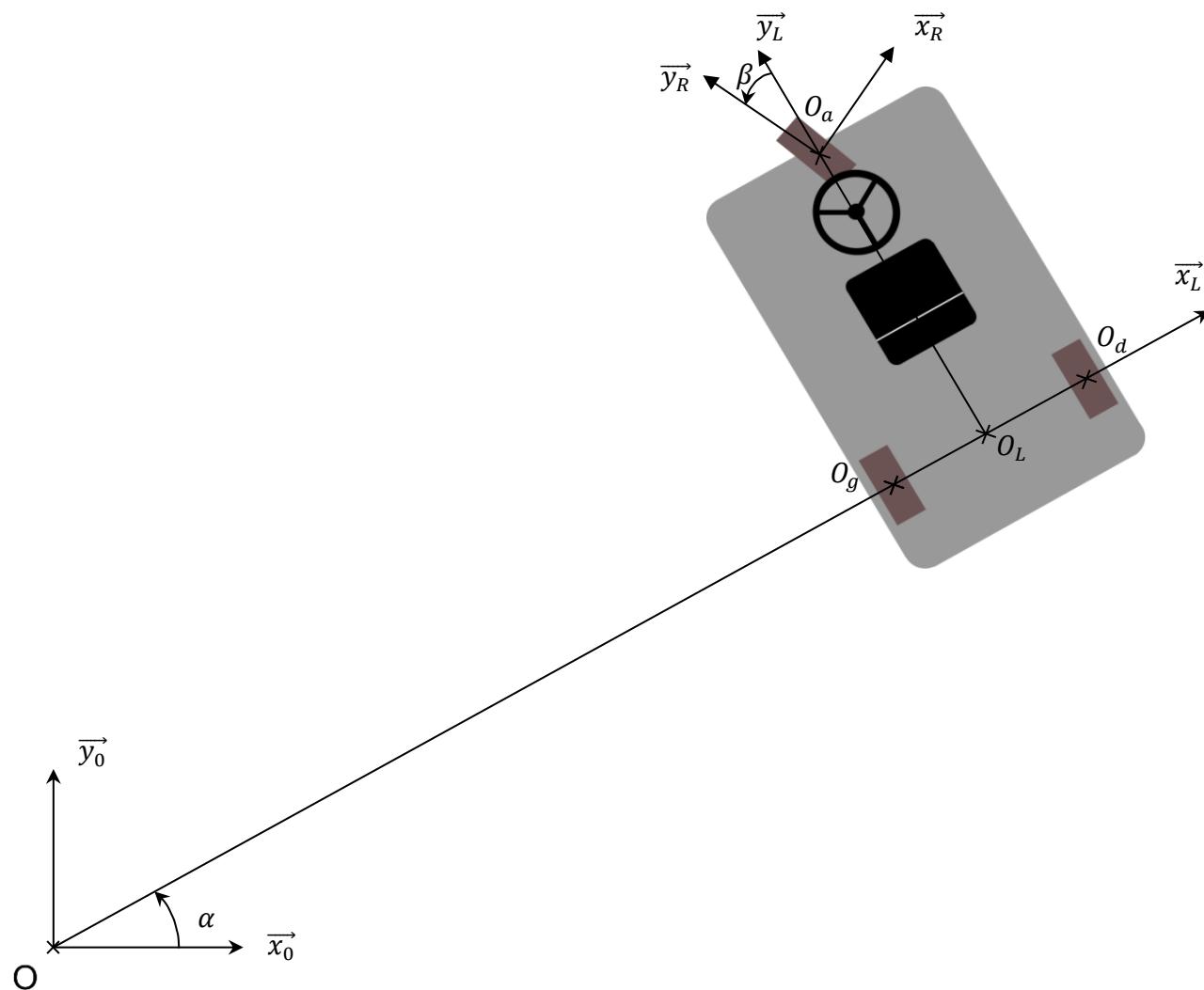


Figure 7 : laveuse en vue de dessus dans un virage

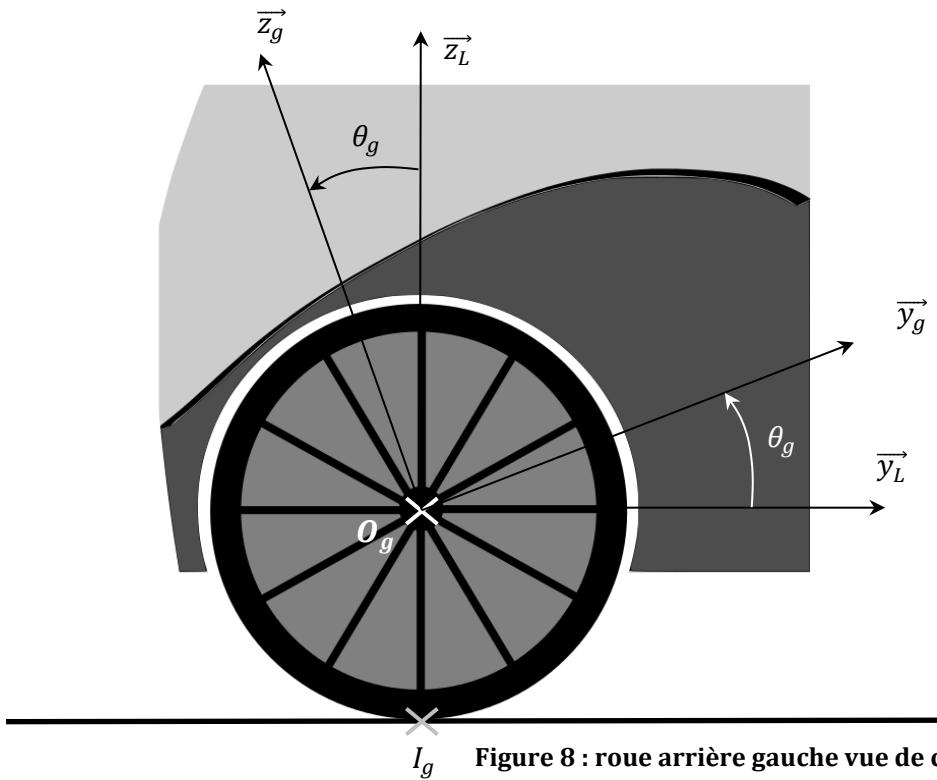


Figure 8 : roue arrière gauche vue de côté

**Q1. Exprimer** la vitesse de la laveuse  $\overrightarrow{V_{O_L, R_L/R_0}} = \vec{V}$  :

- en fonction de  $\rho$ ,  $e$ ,  $\omega_g$  et  $\dot{\alpha}$  : écrire la relation entre  $\overrightarrow{V_{O_L, R_L/R_0}}$  et  $\overrightarrow{V_{O_g, R_L/R_0}}$ , puis décomposer  $\overrightarrow{V_{O_g, R_L/R_0}}$ . On pourra ensuite utiliser le roulement sans glissement en  $I_g$  pour poursuivre le calcul ;
- en fonction de  $\rho$ ,  $e$ ,  $\omega_d$  et  $\dot{\alpha}$  : de façon similaire, écrire la relation entre  $\overrightarrow{V_{O_L, R_L/R_0}}$  et  $\overrightarrow{V_{O_d, R_L/R_0}}$ , puis décomposer  $\overrightarrow{V_{O_d, R_L/R_0}}$ . On pourra ensuite utiliser le roulement sans glissement en  $I_d$  pour poursuivre le calcul ;
- en fonction de  $\rho$ , et  $\dot{\alpha}$  écrivant la relation entre  $\overrightarrow{V_{O_L, R_L/R_0}}$  et  $\overrightarrow{V_{O_d, R_L/R_0}}$

**Q2. Exprimer** à partir des résultats précédents les expressions de  $\omega_g$  et  $\omega_d$  en fonction de  $\vec{V}$  et de  $\rho$  et des caractéristiques géométriques du système.

Une étude géométrique non traitée ici établit la relation entre le rayon  $\rho$  du virage et l'orientation  $\beta$  du volant :  $\tan \beta = \frac{a+b}{\rho}$

Cette relation et les deux relations de la question précédente servent à commander chaque moteur en fonction de l'angle du volant et de l'enfoncement de la pédale de vitesse.