

# REPUBLIQUE TUNISIENNE

Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la  
Recherche Scientifique et de la Technologie

Concours nationaux d'entrée aux cycles  
de formation d'ingénieurs  
Session 2007



الجمهورية التونسية  
وزارة التعليم العالي  
والبحوث العلمية والتكنولوجيا

المناظرات الوطنية للدخول  
إلى مراحل تكوين المهندسين  
لورة 2007

## Concours Technologie

Epreuve de Sciences et Techniques de l'Ingénieur



Date : Vendredi 08 Juin 2007 Heure : 8 H Durée : 5 H

Barème : Partie A : 8 points, Partie B : 4 points, Partie C : 4 points, Partie D : 4 points.

- L'épreuve comporte quatre parties : A-Technologie de Conception, B- Technologie de Production, C- Mécanique et D- Automatique.
- Documents remis au candidat:
  - ✓ Deux dossiers : « **Présentation et travail demandé** » et « **document réponse** ».
  - ✓ Deux documents techniques : **Dessin d'ensemble** et **Dessin de définition** (3 formats A3).
- Aucun document n'est autorisé.
- L'utilisation des calculatrices de poche non programmable est autorisée.
- Les différentes parties sont indépendantes et doivent être traitées sur le dossier document réponse.
- Un seul dossier document réponse est fourni au candidat et doit être rendu en totalité, même sans réponses, à la fin de l'épreuve. Le renouvellement de ce dossier est interdit.

## DOSSIER

### PRESENTATION ET TRAVAIL DEMANDE

Ce dossier comporte 10 pages numérotées de 1 à 10

➤ Présentation

page 1

➤ Texte du sujet

pages 2 à 10

## ANTENNE POUR SATELLITES

### PRESENTATION :

L'observation météorologique, le trafic intercontinental de radiocommunication et la recherche interplanétaire au moyen de satellites nécessitent des antennes puissantes permettant de diffuser et de recevoir des ondes électromagnétiques en utilisant des réflecteurs paraboliques gigantesques.

Pour suivre les trajectoires des satellites, les réflecteurs sont entraînés en rotation autour de deux axes : l'un vertical appelé **axe azimutal** et l'autre horizontal appelé **axe d'élévation**. Ces deux mouvements de rotation doivent être contrôlés avec une grande précision par l'intermédiaire des **actionneurs asservis**.

Le sujet de cette épreuve porte sur l'étude d'une antenne pour satellites dont l'infrastructure générale est représentée par la figure 1. Cette antenne est constituée principalement :

- D'une nacelle, supportée par un pylône, mobile en rotation autour de l'axe vertical (axe azimutal) par rapport à un bâti fixe.
- D'un support, sur lequel est fixé le réflecteur, mobile en rotation autour de l'axe horizontal (axe d'élévation) par rapport à la nacelle.

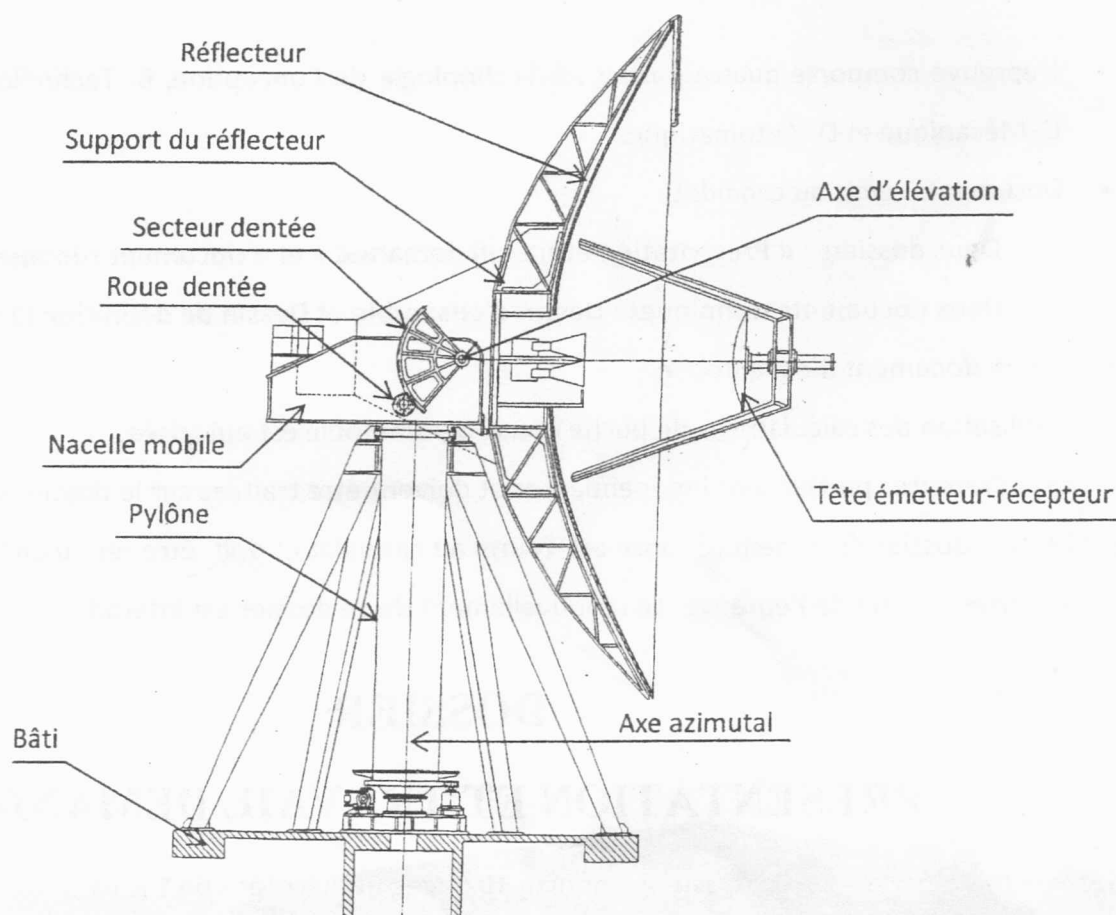
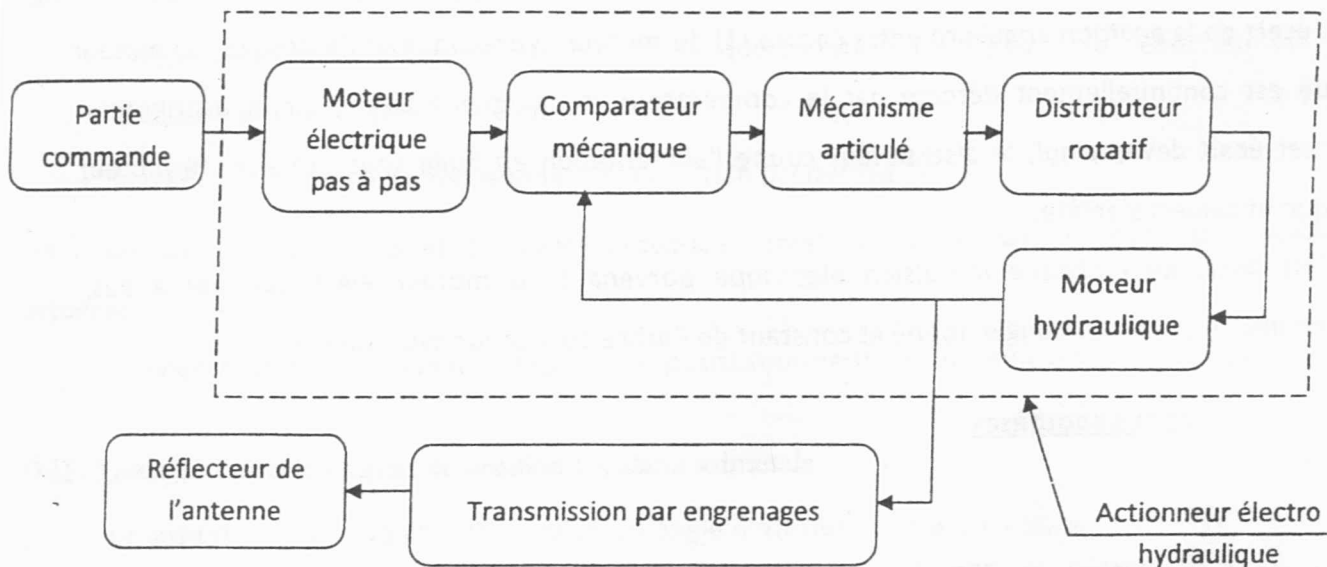


Figure 1: Infrastructure de l'antenne pour satellites à étudier.

## A - TECHNOLOGIE DE CONCEPTION

Dans cette partie, on s'intéresse au système de commande du mouvement d'élévation autour de l'axe horizontal du réflecteur de l'antenne. Le système de commande est représenté par le diagramme suivant :



L'actionneur électro hydraulique (Document 1), fournissant l'énergie mécanique nécessaire pour assurer le mouvement d'élévation du réflecteur, est constitué des éléments suivants :

- Un **moteur hydraulique** qui permet de produire la puissance mécanique pour entraîner le réflecteur à travers une transmission par engrenages (non représentés dans le document 1).
- Un **distributeur rotatif**, composé principalement des pièces (31, 32), qui assure la circulation d'huile alimentant le moteur hydraulique.
- Un **moteur électrique pas à pas** qui permet, à partir d'impulsions électriques, de générer un mouvement de rotation discontinue de la vis (14) par l'intermédiaire de l'engrenage cylindrique à denture droite (15, 25).
- Un **comparateur mécanique** constituant un système vis-écrou composé principalement des pièces (6, 7, 9) pour l'écrou et (14) pour la vis. Il permet de détecter l'écart angulaire entre les positions de l'arbre (1) du moteur hydraulique et de la roue dentée (15).
- Un **mécanisme articulé**, formé des pièces (21, 10, 41, 42, 43, 44), qui assure, sous l'action du comparateur mécanique, l'ouverture et la fermeture du distributeur rotatif.

### Description sommaire du fonctionnement de l'actionneur électrohydraulique

Sous l'effet d'une impulsion électrique, l'arbre (23) effectue une rotation d'un angle donné constant. Cette rotation provoque, par l'intermédiaire du comparateur mécanique du système d'asservissement, l'ouverture du distributeur rotatif gérant l'alimentation en huile sous pression du moteur hydraulique ; l'arbre (1) de celui-ci se met à tourner.

L'écart de la position angulaire entre l'arbre (1) du moteur hydraulique et l'arbre (23) du moteur électrique est continuellement détecté par le comparateur mécanique agissant sur le distributeur. Lorsque cet écart devient nul, le distributeur coupe l'alimentation en huile sous pression du moteur hydraulique et celui-ci s'arrête.

C'est ainsi, qu'à chaque impulsion électrique parvenant au moteur électrique pas à pas, correspond une rotation d'un angle donné et constant de l'arbre du moteur hydraulique.

### Données numériques et hypothèses

#### Moteur Hydraulique

- Fréquence de rotation :  $N_1 = 750 \text{ tr/mn}$
- Puissance nominale :  $P_1 = 12 \text{ KW}$

#### Transmission par engrenages :

- Réducteur épicycloïdal : Rapport de réduction :  $k_1 = 1/86$  Rendement :  $\eta_1 = 0,95$
- Renvoi d'angle : Rapport de réduction :  $k_2 = 1$  Rendement :  $\eta_2 = 0,98$
- Réducteur à secteur angulaire : Rapport de réduction :  $k_3 = 1/7$  Rendement :  $\eta_3 = 0,98$

Au cours de la transmission de mouvement et de puissance, on ne tient compte que des rendements  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  et  $\eta_3$  au niveau des engrenages. Toutes les autres liaisons mécaniques sont supposées parfaites.

Les questions relatives à cette partie sont portées sur le dossier document réponse (pages 1 à 9).

## **B - TECHNOLOGIES DE PRODUCTION**

Les questions relatives à cette partie sont portées sur le dossier document réponse (pages 10 à 18).

## C - MECANIQUE

Le mécanisme d'antenne pour satellites, schématisé par la figure C.1, est composé :

- D'un bâti (0) fixé au sol auquel on associe le repère  $R_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  supposé galiléen.
- D'un pylône (1), en liaison pivot d'axe  $(O, \vec{z}_0)$  avec le bâti (0), auquel on associe le repère  $R_1(O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$  tel que  $\alpha = (\vec{x}_0, \vec{x}_1) = (\vec{y}_0, \vec{y}_1)$  ;
- D'un réflecteur (3), en liaison pivot d'axe  $(A, \vec{x}_1)$  avec le pylône (1), auquel on associe le repère  $R(A, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$  tel que  $\beta = (\vec{y}_1, \vec{y}) = (\vec{z}_0, \vec{z})$ . Cette liaison est assurée à travers un support (2) encastré au réflecteur (3) au point C. En plus, à ce réflecteur (3) on a attaché des bras (4) pour maintenir la tête émetteur-récepteur (5).

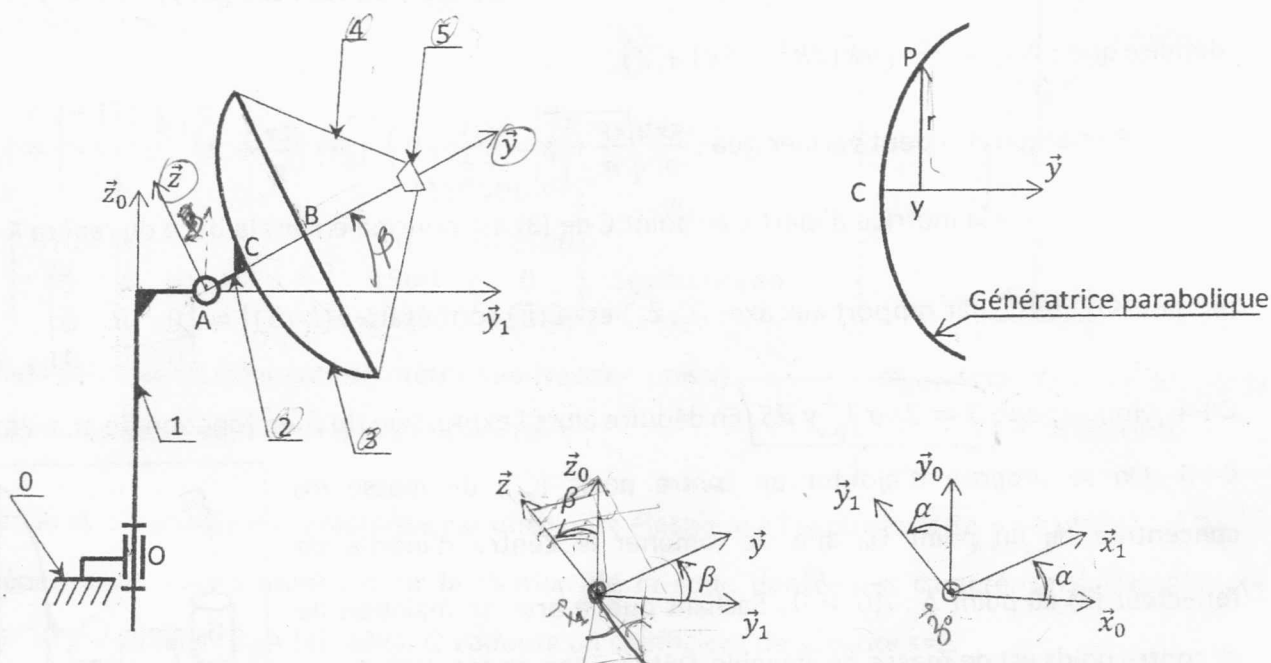


Figure C.1 : schéma simplifié du mécanisme d'antenne pour satellites.

On donne les vecteurs positions suivants :  $\overrightarrow{OA} = h \vec{z}_0 + a \vec{y}_1$ ,  $\overrightarrow{AC} = b \vec{y}$ ,  $\overrightarrow{CB} = c \vec{y}$ .

$h, a, b$  et  $c$  sont des constantes positives.  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres variables en fonction du temps.

Le réflecteur (3) est de forme de révolution d'axe  $(C, \vec{y})$  dont l'équation est exprimée dans  $(C, \vec{x}_1, \vec{y}, \vec{z})$  par  $r^2 = 2 \cdot p \cdot y$  où  $p$  est une constante positive. Il est constitué d'une plaque mince homogène de masse  $m$  et de densité surfacique  $\sigma$ .

Le réflecteur (3) est entraîné en rotation par rapport au pylône (1) autour de l'axe  $(A, \vec{x}_1)$  par un couple moteur  $\vec{C} = C_m \vec{x}_1$ . L'action du vent sur le réflecteur est représentée, au point C, par le torseur :

$$\{T(\text{Vent} \rightarrow 3)\} = \begin{Bmatrix} F \vec{y} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_C$$

Le champ de pesanteur est défini par :  $\vec{g} = -g \vec{z}_0$ . Le support (2), les bras (4) et la tête (5) sont de masses négligeables. Toutes les liaisons sont supposées parfaites.

**C-I- Géométrie de masses :**

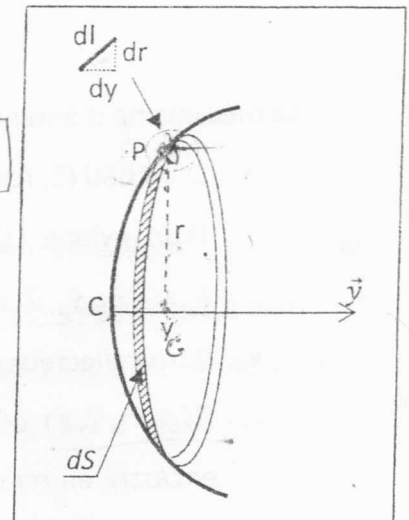
**C-I-1-** Montrer qu'un élément de surface ( $dS$ ) associé à un point ( $P$ ) de la surface du réflecteur (3) est exprimé par  $dS = 2\pi r \sqrt{1 + \lambda^2} dy$  où  $\lambda = \frac{dr}{dy}$

et que  $r\sqrt{1 + \lambda^2} = p \sqrt{\frac{2y}{p} + 1}$ .

En déduire que la surface de (3) est :

$$S = \frac{2}{3} \pi p^2 [k^{3/2} - 1] \text{ où } k = \left(\frac{2c}{p} + 1\right).$$

**Remarque :** on peut vérifier que  $\frac{dr}{dy} = \frac{p}{r}$ .



**C-I-2-** Montrer que le centre d'inertie ( $G$ ) du réflecteur (3) est situé sur l'axe ( $C, \vec{y}$ ) :  $\vec{CG} = y_G \vec{y}$ . En

déduire que :  $S y_G = \frac{\pi p^3}{15} (\sqrt{k}(3k^2 - 5k) + 2)$ .

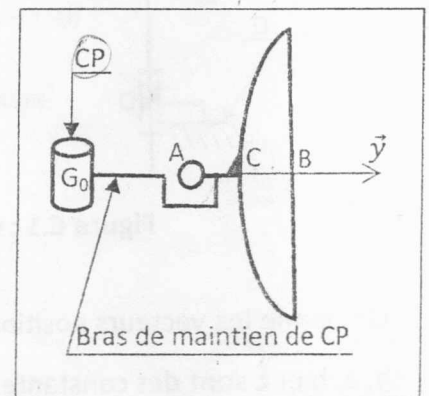
**Remarque :** on peut vérifier que :  $\frac{2y}{p} \sqrt{\frac{2y}{p} + 1} = \left(\frac{2y}{p} + 1\right)^{3/2} - \left(\frac{2y}{p} + 1\right)^{1/2}$ .

**C-I-3-** Justifier que la matrice d'inertie au point C de (3) est principale dans la base du repère R et que les

moments d'inertie par rapport aux axes ( $C, \vec{x}_1$ ) et ( $C, \vec{z}$ ) sont égaux :  $[I_C(3)] = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & A \end{bmatrix}_{(\vec{x}_1, \vec{y}, \vec{z})}$ .

**C-I-4-** Montrer que  $B = 2p\sigma \int_0^a y dS$ . En déduire alors l'expression de B en fonction de  $m, p$  et  $y_G$ .

**C-I-5-** On se propose d'ajouter un contre poids (CP) de masse  $m_0$  concentrée en un point  $G_0$  afin de ramener le centre d'inertie de réflecteur (3) au point A :  $\vec{AG} = \vec{0}$ . Sachant que le bras de maintien de ce contre poids est de masse négligeable, Déterminer, en fonction de  $y_G, m$  et  $m_0$  la position de  $G_0$  :  $\vec{AG}_0$ .

**C-II- Etude Energétique :**

On considère le système (S) formé par le réflecteur (3), le contre poids (CP), le support (2), le bras (4) et la tête (5) :  $S = \{2, 3, 4, 5, CP\}$ . Le système (S) est de masse M, de centre d'inertie A et de matrice d'inertie au

point A :  $[I_A(S)] = \begin{bmatrix} J & 0 & 0 \\ 0 & K & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix}_{(\vec{x}_1, \vec{y}, \vec{z})}$ .

**C-II-1-** Exprimer, dans la base de R, le torseur cinématique du mouvement de (S) par rapport à  $R_0$  au point A.

**C-II-2-** Exprimer, dans la base de R, le torseur cinétique au point A de (S) par rapport à  $R_0$ .

**C-II-3-** Exprimer, dans la base de R, le moment dynamique au point A de (S) par rapport à  $R_0$ .

**C-II-4-** Faire le bilan des actions mécaniques extérieures exercées sur (S). Chaque action doit être représentée par un torseur réduit au point A et de composantes projetées dans  $R_1$ .

**C-II-5-** Appliquer le théorème du moment dynamique, en projection sur  $\vec{x}_1$ , au système (S) dans son mouvement par rapport à  $R_0$ . En déduire le couple moteur  $C_m$ .

### C-III- Résistance Des Matériaux :

Le pylône (1) guidé en rotation par rapport au bâti (0) est schématisé par la figure C-2. On donne les torseurs des actions mécaniques extérieures exercées sur ce pylône modélisé par une poutre droite (OABC) :

$$\{T_1\} = \begin{Bmatrix} -4700 & 0 \\ -1710 & 0 \\ 0 & 2350 \end{Bmatrix}_O ; \{T_2\} = \begin{Bmatrix} 5222 & 0 \\ 2234 & 0 \\ 150000 & 0 \end{Bmatrix}_A ;$$

$$\{T_3\} = \begin{Bmatrix} -522 & 0 \\ -2024 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_B ; \{T_4\} = \begin{Bmatrix} 0 & -1500 \\ 1500 & 0 \\ -150000 & -2350 \end{Bmatrix}_C$$

Les forces en

Kilo-Newton (KN) et les moments en mètre-Kilo-Newton (mKN).

$OI=R=0,5\text{ m}$ ,  $OA=a=1\text{ m}$ ,  $AB=b=9\text{ m}$  et  $BC=c=1\text{ m}$ .

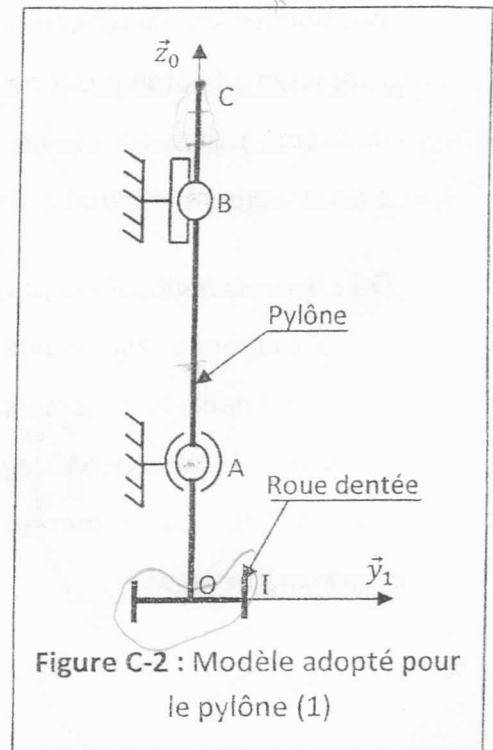


Figure C-2 : Modèle adopté pour le pylône (1)

Le matériau du pylône (1) est caractérisé par une limite élastique à l'extension :  $R_e = 480\text{ MPa}$ .

Le matériau des boulons utilisés pour la fixation de la roue dentée est caractérisé par une limite élastique au glissement :  $R_g = 560\text{ MPa}$ . On adopte un coefficient de sécurité  $s=2$ .

**C-III-1-** Déterminer le torseur des efforts de cohésion tout au long de cette poutre.

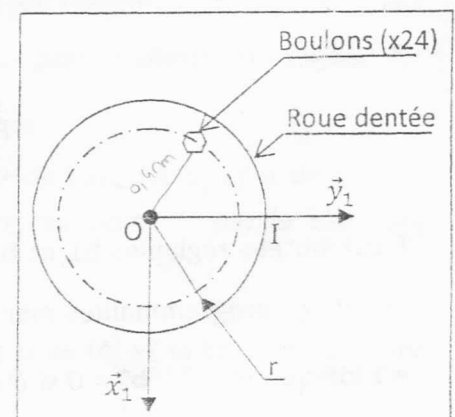
**C-III-2-** Tracer le diagramme de moment fléchissant  $M_{fx_1}$ . En déduire la valeur maximale  $M_{fx_1-\text{Max}}$ .

**C-III-3-** Le pylône est un tube de diamètre intérieur ( $d$ ) et de diamètre extérieur  $D$ ; établir la relation à respecter entre ces deux diamètres pour que le pylône résiste à la contrainte normale engendrée par le moment fléchissant maximal  $M_{fx_1-\text{Max}}$ .

**C-III-4-** La roue dentée est fixée au pylône par 24 boulons placés sur une circonférence de rayon  $r = 0,45\text{ m}$  par rapport au centre O. Si on considère que le couple transmis par cette roue est distribué uniformément sur tous les boulons.

a. Déterminer la valeur de la force tangentielle (effort de cisaillement) exercée sur chacun de ces boulons.

b. Déterminer le diamètre minimal de ces boulons pour qu'ils résistent à cet effort de cisaillement.



## D - AUTOMATIQUE

N.B. : Les parties D-I et D-II sont indépendantes.

### Description du système :

On s'intéresse dans cette étude aux moteurs pas à pas électro-hydraulique. positionnement du réflecteur de l'antenne selon les axes azimutal et d'élévation. La première partie, consacrée à l'automatisation du positionnement du réflecteur à une position pré-programmée deuxième partie, on étudie l'asservissement de position angulaire de l'arbre du moteur positionnement azimutal.

### D-I : Automatisation du positionnement du réflecteur à une position préprogrammée

L'antenne est munie de deux moteurs électro-hydrauliques **M1** et **M2** pour le positionnement du réflecteur sur une position donnée, définie par l'angle d'élévation  $\alpha$  et l'angle azimutal  $\theta$ . Le moteur **M1**, agissant sur l'angle d'élévation, peut être commandé dans les deux sens de rotation tandis que le moteur **M2** agissant sur l'angle azimutal, lorsqu'il est actionné, tourne toujours dans le même sens.

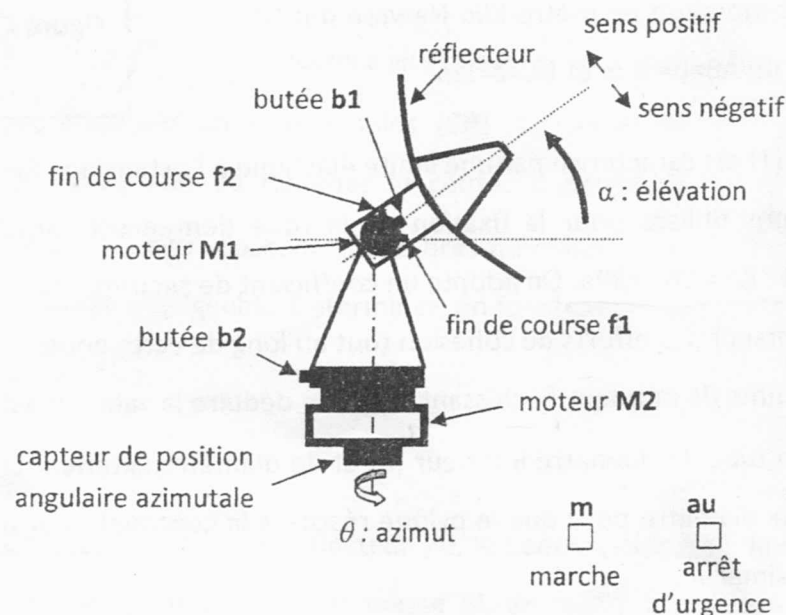


Figure D-1 : Représentation de l'antenne.

Les butées réglables **b1** et **b2** permettent d'identifier une position particulière définie par les angles  $\alpha_0$  et  $\theta_0$ , programmables manuellement par l'utilisateur (**b1** = 1 lorsque  $\alpha = \alpha_0$ , **b1** = 0 si  $\alpha \neq \alpha_0$  et **b2** = 1 lorsque  $\theta = \theta_0$ , **b2** = 0 si  $\theta \neq \theta_0$ ).

La course angulaire de l'arbre du moteur **M1** étant limitée à  $90^\circ$ , deux capteurs de fin de course **f1** et **f2** sont activés, respectivement, lorsque  $\alpha = 0^\circ$  et  $\alpha = 90^\circ$ .

Le système d'orientation de l'antenne est, en outre, muni d'un bouton de mise en marche **m** et d'un bouton d'arrêt d'urgence **au**.

Lors d'un appui sur le bouton de mise en marche, le fonctionnement souhaité est le suivant :

- l'angle d'élévation initial  $\alpha$  étant supposé quelconque ( $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ ), le réflecteur est tout d'abord ramené à l'angle d'élévation  $\alpha = 0$  ;
- le réflecteur est ensuite positionné sur la position prédéfinie  $(\alpha_0, \theta_0)$ .

Un appui sur le bouton d'arrêt d'urgence provoque l'arrêt des deux moteurs dans leurs positions actuelles.

Donner le Grafcet de niveau 2 décrivant le positionnement de l'antenne à la position prédéfinie.

## D-II : Etude de l'asservissement de position angulaire azimutale

Le positionnement de l'antenne selon un angle d'azimut  $\theta(t)$  à un instant  $t$  est effectué par un moteur électro-hydraulique alimenté par une servovalve associée à une pompe.

La servovalve est commandée par une tension continue  $u(t)$  et permet de faire varier le débit de fluide  $q(t)$  injecté dans le moteur. La relation entre la tension  $u(t)$  et le débit  $q(t)$  est la suivante :

$$q(t) + \tau \frac{dq}{dt} = K_1 u$$

où  $\tau = 0.005 \text{ s}$  est une constante de temps et  $K_1 = 0.8 \text{ m}^3/\text{s/V}$  un coefficient caractéristique de la servovalve.

La vitesse de rotation  $\Omega(t) = \frac{d\theta}{dt}$  du moteur est proportionnelle au débit de fluide  $q$  :

$$\Omega(t) = K_2 q(t)$$

où  $K_2 = 2.5 \text{ rad/m}^3$  est un coefficient dépendant du moteur.

Un capteur de position angulaire est monté sur l'arbre du moteur et fournit une tension continue  $v(t)$  proportionnelle à l'angle azimutal  $\theta$  :

$$v(t) = K_3 \theta(t)$$

où  $K_3$  est la sensibilité du capteur de position.

En outre, la position angulaire  $\theta(t)$  de l'antenne peut être soumise à une perturbation  $p(t)$  provoquée par les intempéries (vent, pluie, ...).

Ainsi, le schéma-blocs du système en boucle ouverte est donné par la figure D-2 :

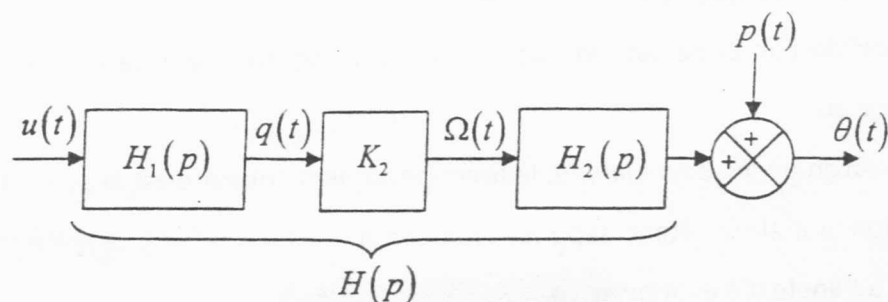


Figure D-2

Les transformées de Laplace utiles sont données dans le tableau suivant :

$F(p)$	$f(t)$ pour $t > 0$
$\frac{1}{p}$	1
$\frac{1}{p^2}$	$t$
$\frac{1}{(p+a)}$	$e^{-at}$
$\frac{1}{(p+a)(p+b)}$	$\frac{1}{b-a}(e^{-at} - e^{-bt})$
$\frac{K\omega_0^2}{p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2}$	$\frac{K\omega_0}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_0 t} \sin(\omega_0 \sqrt{1-\xi^2} t)$

D-II-1. Dans cette partie, on considère que la perturbation  $p(t)$  est nulle.

D-II-1-1. Déterminer les fonctions de transfert  $H_1(p)$  et  $H_2(p)$ . En déduire la transmittance globale  $H(p)$  du système en boucle ouverte.

D-II-1-2. Calculer et tracer la réponse impulsionnelle  $\theta(t)$  du système de fonction de transfert  $H(p)$ .

D-II-1-3. Tracer les lieux de Bode asymptotiques de  $H(p)$ .

D-II-2. On considère à présent l'asservissement de position angulaire de la figure D-3 dans lequel  $\theta_c(t)$  est une tension, image de la position angulaire de consigne, et  $R(p)$  un régulateur.

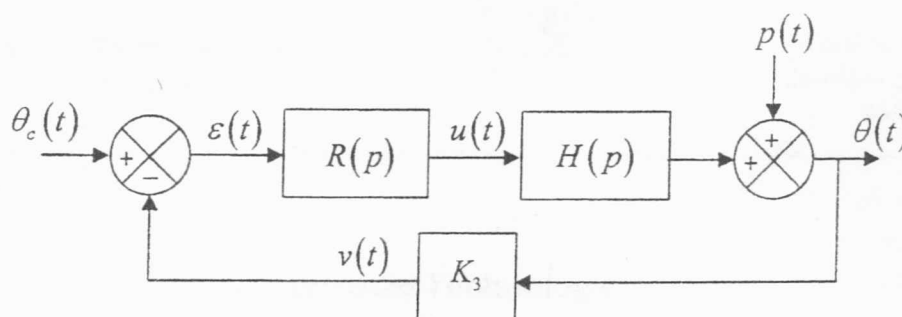


Figure D-3

**D-II-2-1.** Sachant que le capteur de position angulaire produit une variation de tension de 10 V pour une variation angulaire de  $360^\circ$ , calculer le coefficient  $K_3$  (en V/rad).

**D-II-2-2.** On considère, dans cette question, un régulateur proportionnel  $R(p) = K$ .

**D-II-2-2-a.** Déterminer la fonction de transfert en boucle fermée  $F(p) = \frac{\theta(p)}{\theta_c(p)}$  en supposant la perturbation  $p(t)$  nulle.

**D-II-2-2-b.** Calculer la valeur de  $K$  permettant d'obtenir une marge de phase de  $45^\circ$ .

**D-II-2-2-c.** On prend à présent  $\theta_c(t) = 0$ . Déterminer et tracer la réponse du système en boucle fermée à une perturbation  $p(t)$  en échelon de position unitaire.

**D-II-2-2-d.** Calculer, en régime permanent, la valeur de l'erreur  $\varepsilon(t)$  pour une perturbation  $p(t) = t$ .

**D-II-2-3.** On considère à présent un correcteur proportionnel-intégral  $R(p) = K_p + \frac{K_i}{p}$ .

**D-II-2-3-a.** Etudier, en fonction de  $K_p$  et  $K_i$ , la stabilité du système en boucle fermée.

**D-II-2-3-b.** Quel est l'intérêt d'un tel régulateur par rapport au régulateur proportionnel ?