

Génie électrique

Durée : 1 h 30 min

Devoir Surveillé : N°5

Dans le cas où un(e) étudiant(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

- L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire est rigoureusement interdit.
 - Il est rappelé aux candidats que la qualité de la rédaction, la clarté et la précision des explications entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies.
-



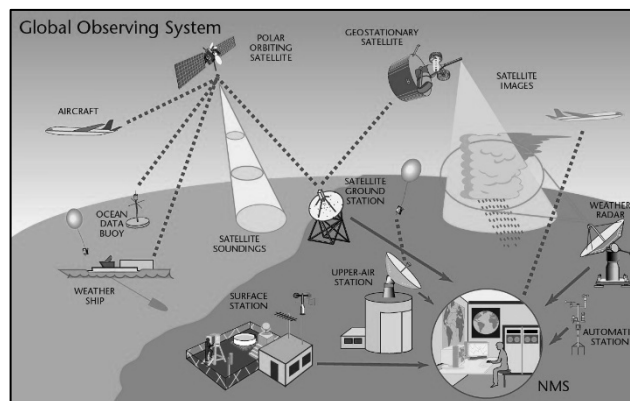
positionnement angulaire d'une antenne parabolique (cas de la ville Nador)

Le sujet se compose de trois parties indépendantes :

- **Partie A** : Modélisation du capteur de position
- **Partie B** : Modélisation de la machine synchrone : moteur d'entraînement
- **Partie C** : Asservissement de position de l'antenne parabolique

A- Présentation

L'antenne parabolique de diffusion joue un rôle clé dans les systèmes de communication par satellite. Elle est utilisée pour transmettre un faisceau électromagnétique concentré vers un satellite géostationnaire, situé à environ 36 000 km au-dessus de l'équateur. Pour assurer une transmission optimale du signal (télévision, internet, données), l'antenne doit être orientée précisément vers le satellite ciblé. Cette orientation dépend de la position géographique de la station au sol et de l'orbite du satellite. Tout écart angulaire entraîne une perte de signal ou une communication perturbée.

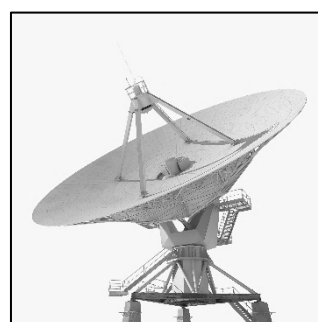


B- Présentation de système

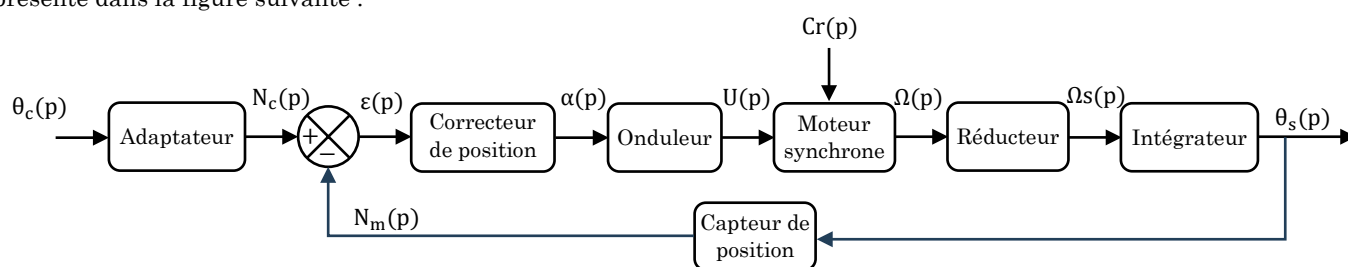
Le téléport de Maroc Telecom à Nador utilise une antenne parabolique orientable de 9 mètres pour assurer les communications satellitaires internationales. Le système comprend deux moteurs synchrones avec réducteurs pour l'orientation en azimut et élévation, des capteurs de position absolus haute résolution (14 bits), un correcteur numérique embarqué, et un automate de commande. L'antenne, montée sur une structure robuste, couvre une rotation de 360° en azimut et 90° en élévation, avec une précision de $\pm 0,05^\circ$.



Élément	Données
Diamètre de la parabole	9 m
Poids total	Environ 2 à 4 tonnes
Axes de rotation	Azimut : 0° à 360°, Élévation : 0° à 90°
Précision de pointage	$\pm 0,05^\circ$ à $\pm 0,1^\circ$
Entrainement du système	Machine synchrone avec réducteur (1/160)
Vitesse max d'orientation	2°/s selon axe
Capteurs	Codeurs absolus 16 bits



Cette épreuve porte sur le contrôle en élévation d'une antenne parabolique, visant à réguler précisément son angle d'inclinaison entre 0° et 90° afin d'assurer un suivi optimal du satellite. Le schéma d'asservissement correspondant est présenté dans la figure suivante :



Avec :

- θ_c : La consigne de position souhaitée en ($^\circ$) de l'antenne parabolique
- θ_s : La position réelle de de l'antenne parabolique
- N_c : La sortie de l'adaptateur est représentée par un mot binaire correspondant à la position de consigne
- N_m : La sortie du capteur numérique fournit un mot binaire représentant la position réelle de sortie.
- ε : L'erreur fournit par le correcteur
- α : Signal de commande appliqué à l'onduleur.
- U : Tension d'alimentation du moteur
- Cr : Couple de résistance représentant la perturbation exercée par le vent sur l'antenne parabolique.
- Ω : Vitesse angulaire à la sortie de l'arbre moteur.
- Ω_s : Vitesse angulaire en sortie du réducteur.

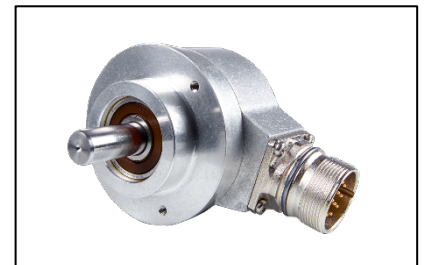
Objectif : L'asservissement du système permet donc de maintenir l'antenne pointée dans la bonne direction, en corrigeant automatiquement toute variation (due au vent, à la dérive du satellite ou au déplacement de la structure), garantissant ainsi une connexion fiable et continue.

Exigence et appréciation	Niveau
Le système doit être stable	La réponse stabilise en une valeur finale V_f
Le système doit nécessairement précis	$\epsilon_s < 0.05^\circ$
Le système doit être rapide	$tr_{5\%} < 20 \text{ s}$
Dynamique du système : Le dépassement indiciel doit être nul.	$D = 0 \%$
Une régulation : le système annule l'effet de perturbation (vent)	$\epsilon_p < 0.05^\circ$

C- Modélisation du capteur de position

L'antenne parabolique est équipée d'un capteur de position de type **codeur absolu 16 bits**, modèle **Heidenhain ROC 425**, qui délivre à chaque position un **mot binaire codé sur 16 bits**, représentant fidèlement la position angulaire. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

Résolution	$n = 16 \text{ bits}$
Tension d'alimentation	4,75 V à 30 V



- Question 1 : Identifier la nature des grandeurs d'entrée et de sortie du capteur, puis déterminer sa plage de mesure **EM** en degrés ($^\circ$).
- Question 2 : Quelles sont les propriétés essentielles qu'un capteur doit posséder dans une chaîne directe afin de ne pas dégrader les performances de l'asservissement ?

Sachant que la précision est définie par la relation : $R(\text{en } ^\circ) = \frac{EM}{2^n}$

- Question 3 : Calculer la précision du capteur, puis la comparer à celle exigée par le cahier des charges (ϵ_s et ϵ_p). Le capteur est-il adapté à cette application ?

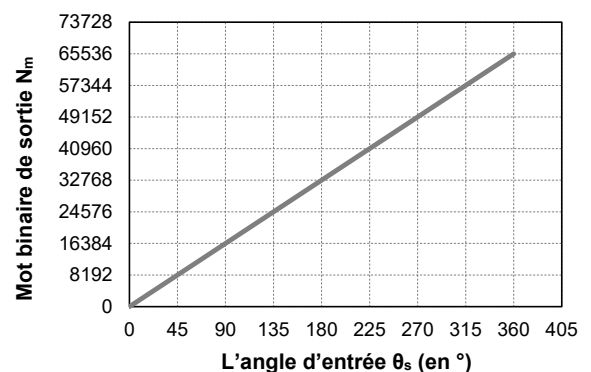


Figure 1 : caractéristique du capteur

La **figure 2**, illustre le schéma bloc pour l'unité d'adaptation et la chaîne d'acquisition (chaîne de retour) de l'asservissement précédent (**page 2**).

- Question 4 : En vous basant sur les **figures 1 et 2**, exprimer $N_m(p)$ en fonction K_{cp} et $\theta_s(p)$. Puis, à partir de la caractéristique fournie, déterminer la valeur du gain K_{cp} ($K_{cp} = \frac{dN_m}{d\theta_s}$).
- Question 5 : Dédurre le gain K_a de manière à assurer une comparaison homogène. Justifiez votre réponse.

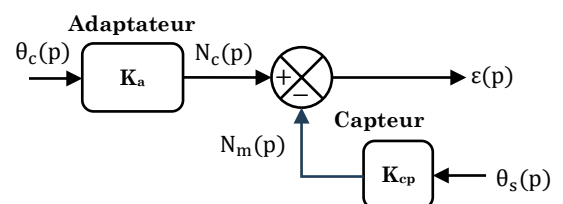


Figure 2 : Adaptation et acquisition

D- Modélisation de la machine synchrone : moteur d'entraînement

L'antenne parabolique est entraînée par une machine synchrone à aimant permanent (PMSM) de marque **Kollmorgen**, modèle **AKM52H**, dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

Tension nominale : $V_n = 220 \text{ V}$	Constante de couple : $K_c = 2.1 \text{ Nm/A}$
Constants f.e.m : $K_e = 0.7 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{rad}$	Moment d'inertie total ramené sur l'arbre moteur : $J = 0.49 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$



Le contrôle d'une machine synchrone est complexe, car il dépend des courants triphasés et de la position du rotor, mesurée par des codeurs. Pour modéliser efficacement cette machine, on utilise la commande vectorielle basée sur la **transformation de Park (repère dq)**. Celle-ci simplifie les équations de la machine synchrone en les rendant similaires à celles d'une machine à courant continu (**MCC**), facilitant ainsi le calcul et la mise en place des correcteurs.

Hypothèse : On considère que l'effet de l'inductance de l'induit est négligé ainsi que le couple de viscosité. Le comportement électromécanique de la MS est modélisé par les équations suivantes :

Équations	Expressions
Équation de la tension de l'induit	$u(t) = R i(t) + e(t)$
Équation de la force électromotrice f.e.m	$e(t) = K_e \cdot \Omega(t)$
Équation du couple mécanique	$C_m(t) = K_c \cdot i(t)$
Équation mécanique (dynamique de rotation)	$J \frac{d\Omega(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t)$

La figure suivante illustre le schéma bloc de la machine à courant continu. L'objectif est de déterminer la fonction de transfert de chaque bloc.

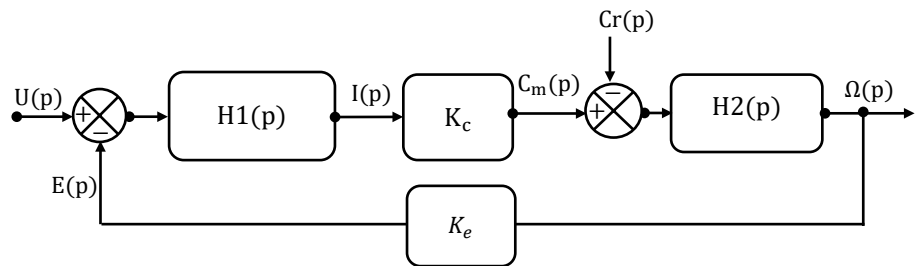


Figure 3 : Modèle équivalent de la machine synchrone

- Question 6 : En supposant des conditions initiales nulles ($C_r = 0$), appliquer les transformées de Laplace aux équations (1), (2), (3) et (4).
- Question 7 : À partir du schéma bloc et des équations de la machine à courant continu (MCC), déterminer les fonctions de transfert $H1(p)$ et $H2(p)$.
- Question 8 : Déterminer la fonction de transfert de la machine synchrone $M(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)}$ et la mettre sous la forme canonique suivant : $M(p) = \frac{K_m}{1 + T_m p}$
Donner ensuite les formules du gain statique **Km** et la constante de temps **Tm**.

Afin de déterminer la résistance de l'enroulement statorique, la machine est excitée par une tension nominale en échelon. La réponse obtenue est représentée sous forme de réponse indicielle dans la figure 4.

- Question 9 : À partir de la réponse indicielle, déterminer les éléments suivants :
 - La valeur finale de la vitesse
 - L'amplitude de l'échelon appliqué en entrée $U(p)$
 - Le temps de réponse du système
- Question 10 : En vous appuyant sur les résultats des questions 8 et 9, estimer les valeurs de **Km** et **Tm** puis en déduire la résistance de l'enroulement statorique **R** du moteur synchrone.

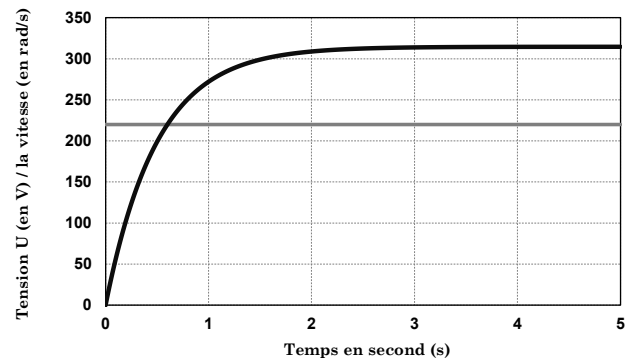


Figure 4 : Réponse indicielle de la machine (MS)

E- Asservissement de position de l'antenne parabolique

Pour optimiser les performances du système d'antenne parabolique, un asservissement de position est implémenté. Ce dernier permet un contrôle précis de l'orientation et est représenté par le schéma-bloc ci-après, servant de base à l'analyse et à la conception du système de régulation.

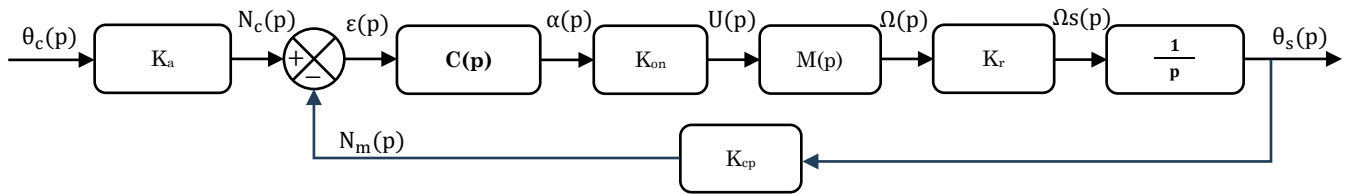


Figure 5 : Schéma fonctionnel de l'asservissement

- Le gain d'adaptation : $K_a = 182.04$
- Le gain du capteur (codeur absolu) : $K_{cp} = 182.04$
- Le gain de l'onduleur : $K_{on} = 1$
- Les ensembles {réducteur + dispositif poulies-courroie} ont un rapport de réduction : $K_r = 1/160$.
- La fonction de transfert du moteur insensible à la perturbation :

$$M(p) = \frac{K_m}{1 + T_m p} \quad \text{Avec} \quad K_m = 1.43 \text{ rad/s.V} \text{ et } T_m = 0.5 \text{ s}$$

Désormais on opte pour un correcteur proportionnel dont la fonction de transfert est : $C(p) = K$.

- **Question 11 :** Simplifier le schéma de la **figure 5** de manière à ce que le comparateur effectue directement la comparaison entre θ_c et θ_s .
- **Question 12 :** Exprimer la fonction de transfert en boucle ouverte $H(p)$ et la mettre sous la forme $H(p) = K \frac{G}{p(1 + T p)}$.
Déduire les expressions et les valeurs de G et T .

Quelles que soient les valeurs obtenues, on considère : $G = 1.6$ et $T = 0.5$.

- **Question 13 :** Exprimer la fonction de transfert en boucle fermée $F(p)$ et la mettre sous la forme canonique :

$$F(p) = \frac{G_F}{1 + \frac{2m}{\omega_n} p + \frac{1}{\omega_n^2} p^2}$$

- **Question 14 :** En déduire les expressions du gain G_F de la pulsation propre ω_n et l'amortissement m en fonction K , G et T .

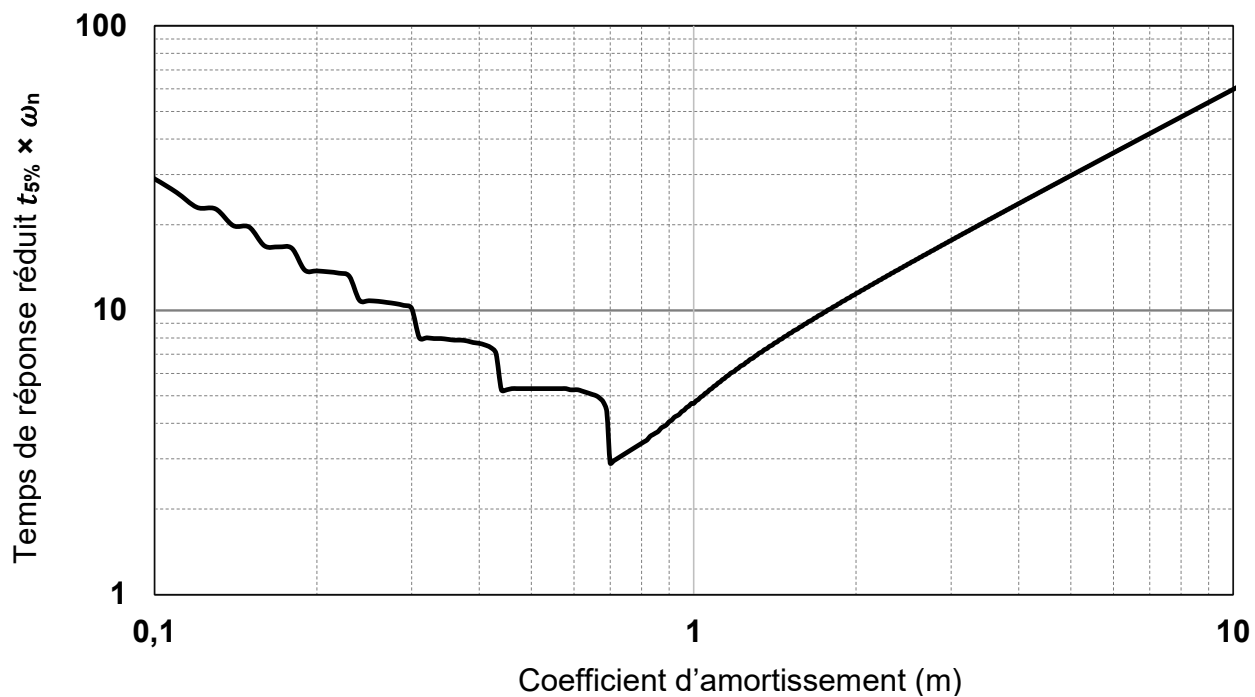
Cahier des charges : On considère pour la suite de problème que la pulsation propre vaut $\omega_n = 0.3 \text{ rad/s}$

- **Question 15 :** Calculer le gain K du correcteur qui respecte le cahier des charges.
- **Question 16 :** Déduire la valeur du **coefficient d'amortissement** m . le système respecte l'exigence sur le dépassement ?
- **Question 17 :** En utilisant les abaques. Déterminer le temps de réponse à 5%, et respect-il le cahier des charges ?

* * * Fin d'épreuve * * *

Annexe : Abaques d'un système de 2^{ème} ordre

❖ Temps de réponse réduit à 5%



❖ Dépassement indiciel

