

Sujet : Déplacement de la Scène de l'Opéra Bastille

Ce sujet est organisé en trois parties

- 1/ **Présentation du support d'étude**
- 2/ Texte du problème
- 3/ Annexes

Recommandations au candidat

- Il est conseillé de prendre connaissance du support d'étude **AVANT** de répondre aux questions.
- Il est préconisé de lire l'intégralité d'un bloc de questions avant de commencer à répondre.
- Les différentes parties du problème sont indépendantes. Toutefois il est recommandé de traiter la partie A en premier.
- Les différentes parties du problème seront rédigées sur des **COPIES SEPARÉES**.
- Les candidats s'astreindront à utiliser les notations introduites.
- Pour chaque réponse, on indiquera **AVEC SOIN** le **NUMERO** de la question traitée.
- Les réponses seront **JUSTIFIÉES**.
- Les résultats seront **ENCADRÉS**.
- Il sera tenu compte de la présentation des copies.

SOMMAIRE de la DESCRIPTION DU SUPPORT D'ETUDE

1. Description du contexte.....	3
1.1 Podium.....	3
1.2 Câble équivalent	4
1.3 Mécanisme d'élévation.....	5
2. Contraintes imposées.....	5
3. Décomposition fonctionnelle du système	5
3.1 Conversion électromécanique.....	6
3.2 Instrumentation	7
3.2.1 Position angulaire des moteurs	7
3.2.2 Position de chaque coin Ci	7
3.3 Commande du variateur, exploitation des données et supervision du fonctionnement..	8
4. Cycle de fonctionnement standard.....	9
5. Principales notations utilisées et éléments du cahier des charges	11
6. Liste des figures	12

1. Description du contexte

Traditionnellement, les décors des théâtres et opéras sont manœuvrés par l'intermédiaire de palans (constitués de poulies, de câbles, de contrepoids) qui peuvent être actionnés par l'intermédiaire de moteurs électriques.

Afin de respecter cette tradition, ce choix a été retenu pour la scène de l'Opéra Bastille à Paris. Le déplacement de la scène (et par là des décors installés sur la scène) du « niveau rue » (appelé niveau bas) au « niveau scène » (appelé niveau haut) s'effectue par l'intermédiaire de trois podiums indépendants (cf. Figure 1).

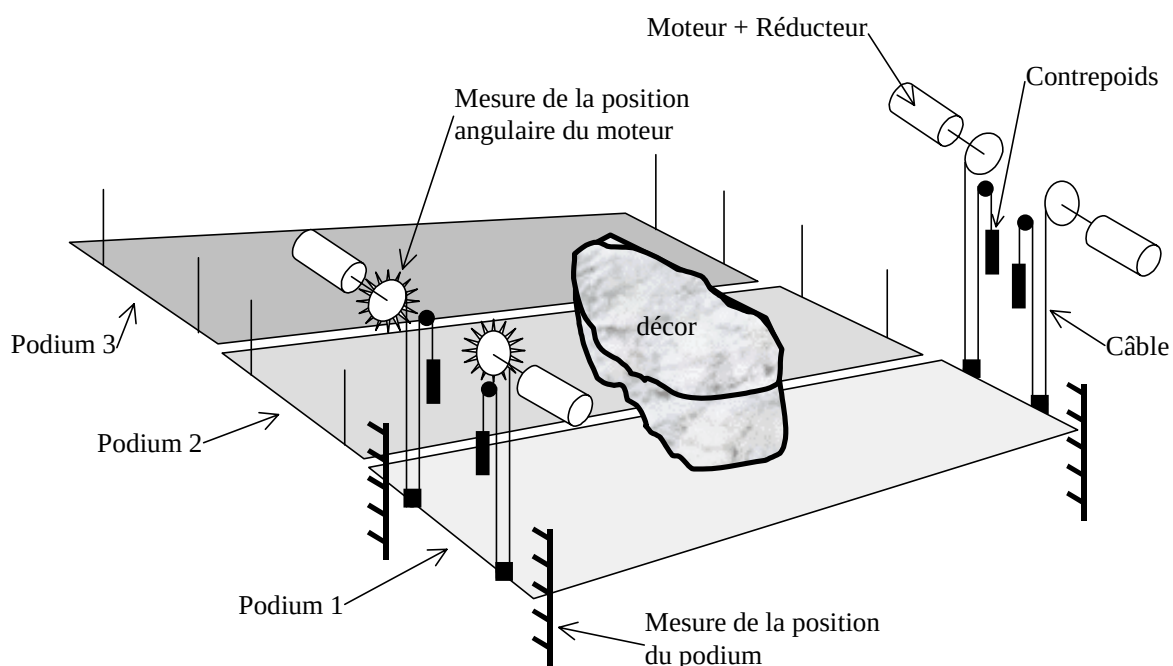


Figure 1 : Mise en situation

La hauteur de déplacement est de 20 m, soit l'équivalent de 7 étages. La dimension maximale de la scène est de 18 m × 18 m × 12 m (correspondant à « *Longueur × largeur × hauteur maximale du décor* ») : cette dimension maximale était par exemple celle du décor d'Othello.

1.1 Podium

On se reportera à la Figure 2 page 4.

Chaque podium a une dimension de 20 m × 6m et pèse à vide $M_{Pmin} = 160$ tonnes. En pleine charge, sa masse peut atteindre $M_{PMax} = 220$ tonnes. En exploitation, la masse exacte d'un podium est a priori inconnue.

La vitesse maximale de déplacement d'un podium est $V_{pMax} = 15 \text{ cm/s}$.

Chaque podium est considéré comme une structure mécanique élastique. Les efforts de torsion supportés sont non négligeables. En conséquence, les altitudes des quatre **coins** (C_1, C_2, C_3, C_4) du podium sont couplées. Cet aspect sera négligé dans le problème.

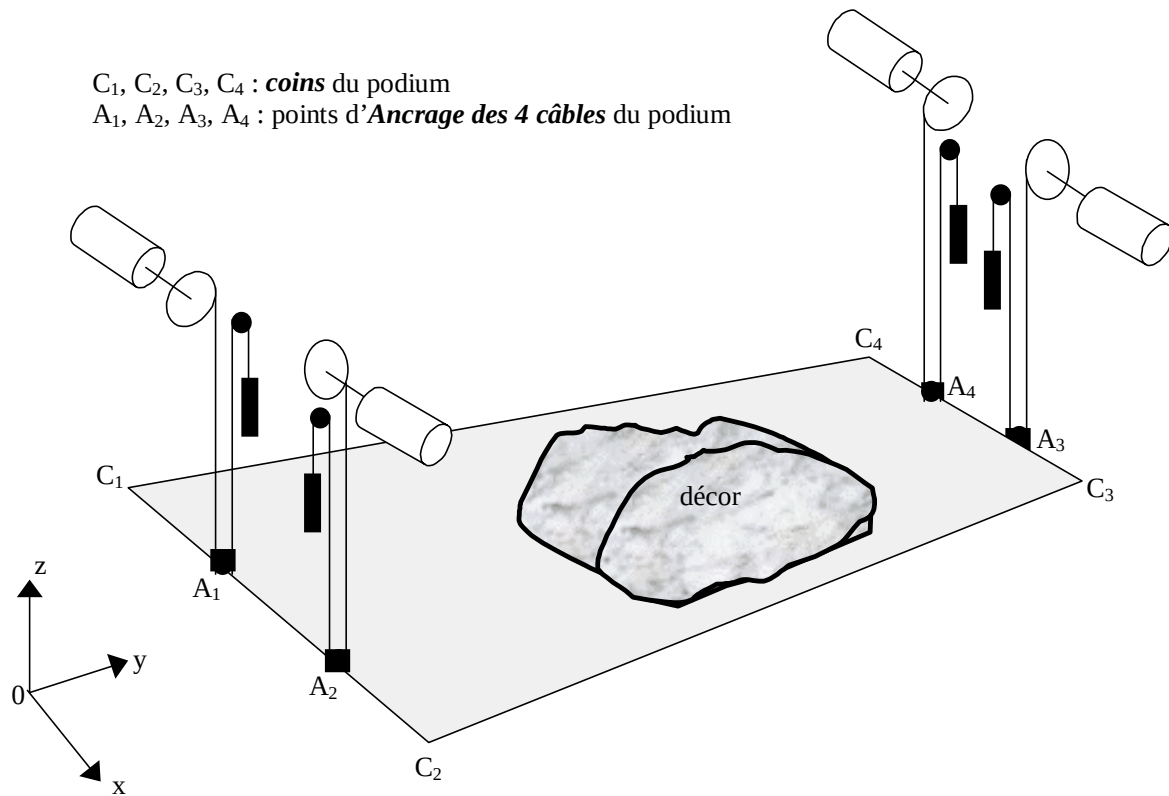


Figure 2 : Podium

1.2 Câble équivalent

Pendant un déplacement de la scène, donc du décor, constituée suivant les besoins d'un, deux ou trois podiums, chaque podium est suspendu par un ensemble de câbles.

Dans un souci de simplification, on supposera que chaque point d'ancrage est relié à un seul et unique câble équivalent de diamètre $d_c = 4 \text{ cm}$. La hauteur totale H entre l'axe de la poulie sur laquelle le câble s'enroule et la position $z = 0$ (niveau bas de la scène) est de 50 m.

Le câble équivalent lié à chacun des quatre points d'ancrage (A_1, A_2, A_3, A_4) d'un podium est élastique. Son allongement est de 5 cm entre les situations à vide ($M_{pmin} = 160 \text{ tonnes}$) et en

charge maximale ($M_{pMax} = 220$ tonnes). Le module de Young du câble équivalent vaut $E = 1.5 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$.

Le câble s'enroule sur une poulie de diamètre moyen D_2 égal à 500 mm. On négligera dans tout le problème la variation du rayon due à l'enroulement du câble sur la poulie ; le rayon d'enroulement $D_2/2$ est donc supposé constant, quelle que soit la position du podium.

1.3 Mécanisme d'élévation

Le mouvement de chaque podium est assuré par quatre ensembles de « câbles – poulies – contrepoids – moteur à courant continu – réducteur » associés à chacun des quatre **points d'ancrage** (repérés A_1, A_2, A_3, A_4) du podium (cf. Figure 2). On appelle « mécanisme d'élévation d'un podium le système constitué des 4 ensembles de « câbles – poulies – contrepoids – moteur à courant continu – réducteur ». Les quatre moteurs associés à un podium sont indépendants.

Les trois mécanismes d'élévation des trois podiums sont également indépendants. Néanmoins, ils doivent permettre un déplacement synchrone de deux ou trois podiums, au choix de l'utilisateur.

2. Contraintes imposées

Les performances énumérées ci-après résument en fait une partie du cahier des charges de la commande à mettre en œuvre. On rappelle que cette scène est constituée d'un, deux ou trois podiums (suivant les besoins).

1. A tout instant, chaque podium doit présenter un défaut d'horizontalité d'au plus 5 mm. Ce défaut est défini comme étant la différence maximale d'altitude des quatre coins du podium considéré.
2. La différence de niveau entre deux podiums est au maximum de 5 mm.
3. Les podiums doivent pouvoir fonctionner en synchronisme.
4. Sauf cas particulier, la masse n'est pas uniformément répartie sur un podium.
5. La vitesse maximale de déplacement d'un podium est de 15 cm/s.

3. Décomposition fonctionnelle du système

Cette décomposition fonctionnelle est également reportée en annexe à une échelle plus grande.

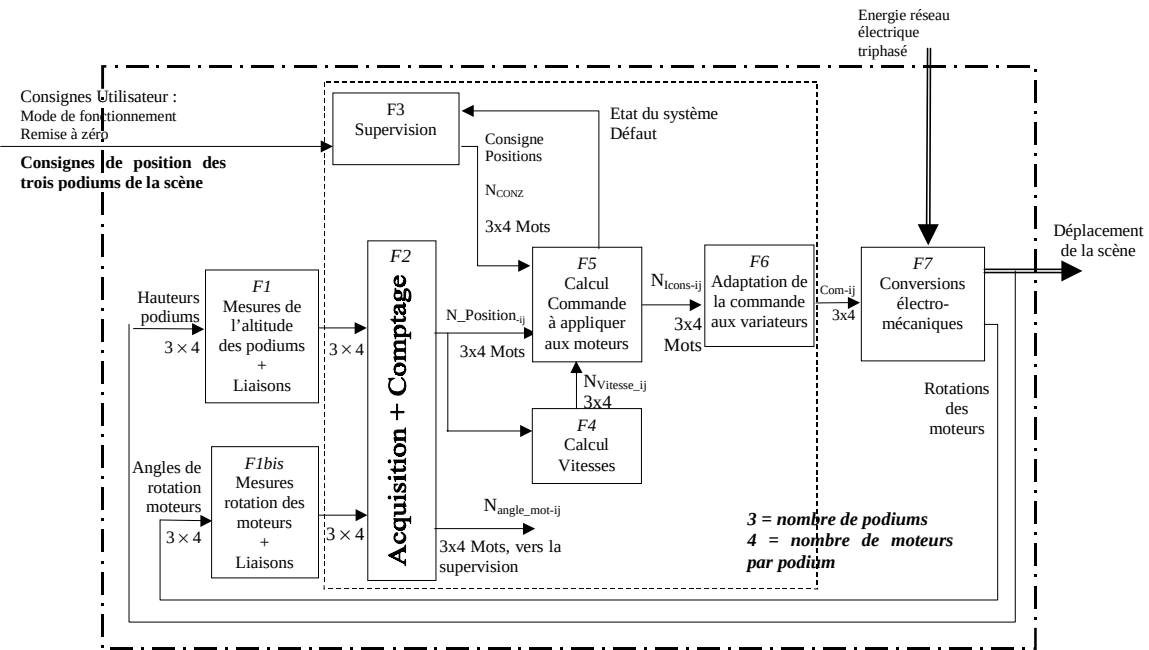


Figure 3 : Schéma fonctionnel du système de positionnement de la scène de l'Opéra Bastille

3.1 Conversion électromécanique

Cette fonction est réalisée par les mécanismes d'élévation (moteur, réducteur, câbles, poulies etc.) décrits ci-avant et les variateurs associés à chaque moteur.

Chaque moteur est commandé par un variateur électronique pour moteur à courant continu de la famille DMV 2322-DMV 2342 de Leroy-Somer. Un extrait de la documentation technique est donné en annexe. En entrée, le variateur admet différents modes de transmission (par exemple 4/20 mA).

Le mode de fonctionnement du variateur utilisé est ici une régulation de type couple. Le variateur n'assure pas de régulation de vitesse. Le variateur détermine la valeur du courant de l'induit à partir de la mesure des courants de lignes en amont du pont de thyristors.

En première approximation, on considère que chaque moteur « voit » un quart de la masse totale du podium. Les frottements dans l'ensemble du mécanisme d'élévation associé à chaque moteur seront pris en considération.

La force équivalente exercée par le podium sur le câble est appelée « effort utile » : on la note F_u . En pleine charge, l'effort utile est noté $F_{u_{max}}$. **Dans ce cas**, les pertes par frottements représentent 15 % de l'effort utile.

Le réseau électrique disponible est un réseau triphasé 460 V, 50 Hz.

3.2 Instrumentation

3.2.1 Position angulaire des moteurs

La mesure de la position angulaire de chacun des moteurs, est assurée à l'aide d'un codeur incrémental Télémécanique/Schneider Electric 500 points (appelé « codeur moteur ») XCC-HF4A30 fixé sur l'axe du moteur à courant continu. Il est utilisé en mode « X par 1 », c'est à dire que seuls les fronts montants de la voie A du codeur sont utilisés pour le comptage. La documentation technique du XCC-HF4A30 est donnée en annexe.

La résolution ramenée suivant l'axe vertical Oz doit être inférieure à 2 mm.

Compte tenu des conditions d'exploitation, les codeurs incrémentaux doivent être protégés contre les projections d'eau. De plus, les charges maximales (axiale et radiale) sont inférieures ou égales à 35 N.

Le signal issu de chaque codeur est transmis à un ordinateur compatible PC via une carte d'acquisition insérée dans l'ordinateur. La carte assure également le comptage des impulsions en provenance du codeur. L'information de déplacement angulaire issue des compteurs est acquise toutes les $T_{ep} = 20$ ms par l'unité centrale du PC. **Cette information est principalement destinée à la surveillance du fonctionnement des moteurs.**

3.2.2 Position de chaque coin C_i

La mesure de la position de chaque coin C_i , $i = 1$ à 4, d'un podium j est assurée par un ensemble électromécanique constitué d'une courroie crantée et de deux roues dentées RD1 et RD2. Un codeur incrémental est lié à l'axe de la roue dentée RD1. Ce codeur sera appelé dans la suite du problème « codeur position ». Compte tenu de la contrainte sur l'horizontalité d'un podium et de la précision nécessaire pour l'atterrissage, l'erreur de mesure, due à la précision du codeur, ramenée suivant l'axe vertical Oz doit être inférieure à $\pm 0,2$ mm. On a schématisé sur la Figure 4 ci-après l'ensemble mécanique mis en œuvre.

La courroie crantée est une lame d'acier, supposée non élastique. La tension appliquée à la courroie est de 700 kN. La largeur de la courroie est de 2 cm, sa denture $d_{cou} = 2$ mm.

On suppose que l'ensemble « roues dentées – courroie » est sans jeu et que la liaison entre la courroie et les roues dentées du type roulement sans glissement. La liaison entre un coin du podium et la courroie crantée est supposée rigide et indéformable.

Le diamètre moyen de la roue dentée RD1 est $D_1 = 30$ cm.

Compte tenu des conditions d'exploitation les codeurs incrémentaux devront être protégés contre les projections d'eau. De plus, les charges maximales (axiale et radiale) seront inférieures à 35 N.

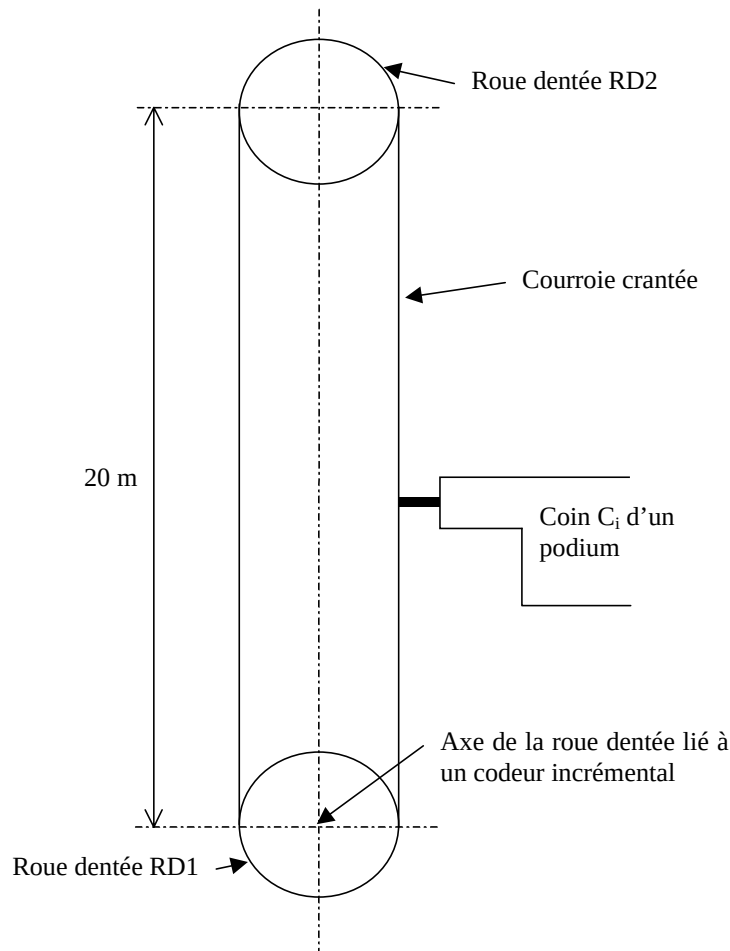


Figure 4 : Position de chaque coin

Le signal issu de chaque codeur est aussi transmis à l'ordinateur compatible PC via une carte d'acquisition insérée dans l'ordinateur. La carte d'acquisition assure également le comptage des impulsions en provenance du codeur. Seuls les fronts montants de la voie A des codeurs sont utilisés pour le comptage. L'information de position issue des compteurs est acquise toutes les $T_{eP} = 20$ ms par l'unité centrale du PC. Le zéro de position est réinitialisé lorsque le podium est au « niveau bas » ou au « niveau haut » à partir d'un ordre donné par l'utilisateur.

3.3 Commande du variateur, exploitation des données et supervision du fonctionnement

La fonction d'acquisition et de comptage F2 est réalisée à l'aide d'un ensemble de cartes d'acquisition sur bus ISA insérées dans un ordinateur de type PC386, 33 MHz et de structures

logicielles exécutées par le PC permettant de communiquer avec les cartes. Cet ordinateur est placé derrière la scène au niveau bas.

L'ordinateur exploite les données provenant des différents capteurs, calcule la commande à appliquer aux moteurs suivant le mode de fonctionnement souhaité et génère grâce à une carte spécifique, les signaux adaptés aux variateurs utilisés.

L'ordinateur effectue également la supervision. Ce superviseur permet de gérer les différents modes de fonctionnement du système constitué des trois podiums. En particulier, il gère les modes de fonctionnement standard et dégradé ainsi que le passage de l'un à l'autre en toute sécurité.

Dans cette étude, on ne s'intéresse pas aux modes de fonctionnement dégradé.

4. Cycle de fonctionnement standard

En position basse (correspondant au niveau bas) ou haute (correspondant au niveau haut), chaque podium est posé sur 4 taquets.

Lors d'un arrêt en position intermédiaire (entre les positions basse et haute), pour des raisons de sécurité, des freins sont actionnés et l'alimentation des moteurs est coupée.

Le cycle de fonctionnement standard correspond à une séquence de déplacement de la position basse à la position haute et inversement. Ce cycle est décrit ci-après dans le cas d'un déplacement du niveau bas vers le niveau haut. Lorsque la scène est constituée de plusieurs podiums, cette séquence doit s'effectuer en synchronisme, pour les podiums concernés en respectant, en particulier, la contrainte d'horizontalité pour chaque podium ainsi que la différence de niveau maximale admissible entre deux podiums.

Cycle de fonctionnement standard :

1. Soulever de la position de repos basse.
2. Stopper à 20 mm au-dessus de cette position de repos.
3. a/Mettre les freins en action et couper l'alimentation électrique des moteurs à courant continu.
b/Retirer les taquets bas.
c/Remettre en fonctionnement (alimentation des moteurs, suppression des freins...).
4. Accélérer, puis déplacer à vitesse constante le podium.
5. Décélérer et stopper à 20 mm au-dessus de la position haute.
6. a/Mettre les freins en action et couper l'alimentation électrique des moteurs à courant continu.

- b/ Mettre en place les taquets hauts.
 - c/ Remettre en fonctionnement (alimentation des moteurs, suppression des freins...).
7. a/ Descendre le podium à vitesse constante jusqu'à 4 mm au-dessus des taquets.
- b/ Mettre en œuvre la stratégie d'atterrissage permettant de poser le podium à vitesse nulle (ou aussi faible que possible).

Pour les étapes 1 et 2, on applique une consigne de position en échelon.

La vitesse maximale (en valeur absolue) du podium pendant la phase d'atterrissage (7) est $|V_{aMax}| = 5 \text{ cm/s}$ tandis que l'accélération maximale (toujours en valeur absolue) pendant la phase d'atterrissage) est $|A_{aMax}| = 0,2 \text{ cm/s}^2$. On impose de ne pas avoir de discontinuité de vitesse.

L'erreur sur la position de l'arrêt doit être comprise entre 0 et + 0,6 mm. Pour cette position d'arrêt, la vitesse doit être inférieure à 0,1 cm/s.

Le schéma de principe de l'implantation est donné Figure 5. Il va de soi que les différents éléments (taquet, coin du podium) ne sont pas à l'échelle !

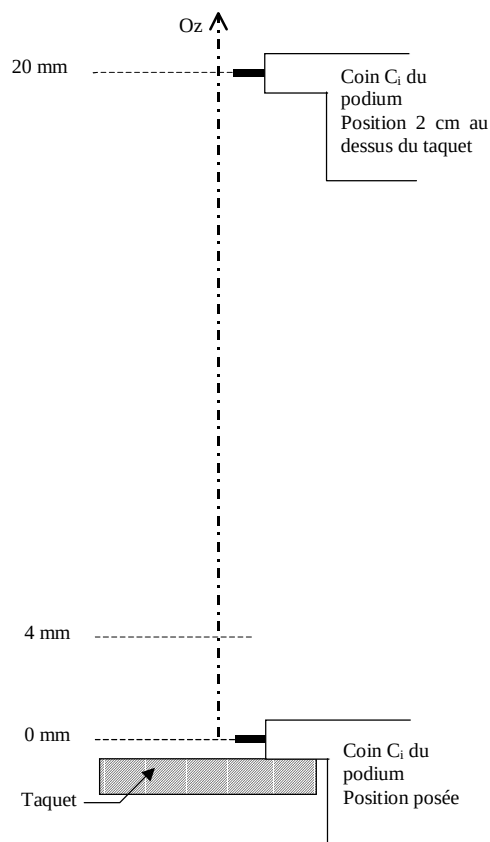


Figure 5 : Schéma de principe, position de repos

5. Principales notations utilisées et éléments du cahier des charges

Notations

Dimension maximale de la scène	$18 \times 18 \times 12$ m
Hauteur de déplacement maximum	20 m
Dimension d'un podium	20×6 m
M_p : masse d'un podium	
M_e : masse équivalente pour $\frac{1}{4}$ du podium	
M_{pmin} : masse minimale d'un podium	160 T
M_{pMax} : masse maximale d'un podium	220 T
A1, A2, A3, A4 : points d'ancrage des quatre câbles d'un podium	
Coins C_1, C_2, C_3, C_4 : points de mesure de la position des quatre coins d'un podium	
z : position instantanée d'un coin d'un podium	
$v = \frac{dz}{dt}$: vitesse instantanée d'un coin	
$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2z}{dt^2}$: accélération instantanée d'un coin	
$v(C_{ij}, t)$: vitesse instantanée du coin i du podium j	
D_2 : diamètre moyen d'enroulement d'un câble autour de la poulie	$D_2 = 500$ mm
H : hauteur totale entre l'axe de la poulie d'enroulement et la position $z = 0$	$H = 50$ m
d_c : diamètre du câble équivalent	4 cm
E : module de Young du câble	$1.5 \cdot 10^5$ N/mm ²
RD1 et RD2 : roues dentées associées au codeur position	
D_1 : diamètre moyen des roues dentées associées au codeur position	$D_1 = 30$ cm
d_{cou} : denture de la courroie crantée associée au codeur position	2 mm
k_M : constante de couple du moteur	
f : coefficient de frottement visqueux ramené sur l'axe de la poulie	
LSB(vitesse) : bit de poids faible vitesse	
LSB _{moy} (vitesse) : bit de poids faible vitesse avec moyennage	
LSB(N_Position) : bit de poids faible du nombre en sortie d'un compteur	
N_{Max} : vitesse maximale de rotation du moteur à courant continu en tr/mn	
Ω_{Max} : vitesse maximale de rotation du moteur à courant continu en rd/s	
F_u : effort utile ; force exercée par le podium sur le câble	
F_{uMax} : effort utile maximum = effort utile en pleine charge	

r_t : rapport de réduction total entre le moteur et la poulie	$r_t = \frac{\Omega_{\text{Moteur}}}{\Omega_{\text{Poulie}}}$
P_n : puissance nominale du moteur à courant continu	
J : moment d'inertie ramené sur l'axe de la poulie	
C_m : couple moteur exercé sur l'axe de la poulie	
C_M : couple sur l'arbre moteur	
$\vec{g}$: accélération de la pesanteur	$\ \vec{g}\ = 10 \text{ m/s}^2$

Éléments du cahier des charges

V_{PMax} : vitesse maximale de déplacement (vertical) d'un podium	15 cm/s
$ V_{\text{aMax}} $: vitesse maximale lors de la stratégie d'atterrissage	5 cm/s (valeur absolue)
$ A_{\text{aMax}} $: accélération maximale lors de la stratégie d'atterrissage	0,2 cm/s ² (valeur absolue)
Erreur sur la position de l'arrêt pour la stratégie d'atterrissage	$0 \leq \text{erreur} \leq +0,6\text{mm}$
Vitesse maximale pour la position d'arrêt	< 0,1cm/s
Défaut d'horizontalité d'un podium	< 5mm
Erreur sur la différence de niveau entre deux podiums	< 5mm
Résolution des codeurs « moteurs » ramenée sur l'axe Oz	< 2 mm
Erreur liée à la précision des codeurs « position », ramenée sur l'axe Oz	au maximum $\pm 0,2 \text{ mm}$
Charge maximale (axiale et radiale) des codeurs	35 N
Protection des matériels contre les projections d'eau	indice IP
T_{ep} : période d'échantillonnage des positions angulaires des moteurs et des positions des coins d'un podium	20 ms
Réseau de puissance EDF	Triphasé 460V, 50 Hz

6. Liste des figures

Figure 1 : Mise en situation	3
Figure 2 : Podium	4
Figure 3 : Schéma fonctionnel du système de positionnement de la scène de l'Opéra Bastille.	6
Figure 4 : Position de chaque coin.....	8
Figure 5 : Schéma de principe, position de repos.....	10

Sujet : Déplacement de la Scène de l'Opéra Bastille

Ce sujet est organisé en trois parties

- 1/ Présentation du support d'étude
- 2/ **Texte du problème**
- 3/ Annexes

Recommandations au candidat

- Il est conseillé de prendre connaissance du support d'étude **AVANT** de répondre aux questions.
- Il est préconisé de lire l'intégralité d'un bloc de questions avant de commencer à répondre.
- Les différentes parties du problème sont indépendantes. Toutefois il est recommandé de traiter la partie A en premier.
- Les différentes parties du problème seront rédigées sur des **COPIES SEPARÉES**.
- Les candidats s'astreindront à utiliser les notations introduites.
- Pour chaque réponse, on indiquera **AVEC SOIN** le **NUMERO** de la question traitée.
- Les réponses seront **JUSTIFIÉES**.
- Les résultats seront **ENCADRÉS**.
- Il sera tenu compte de la présentation des copies.

Texte du problème

Ce texte comporte **5 parties indépendantes**. Il est toutefois fortement recommandé d'analyser la **partie A en premier**

Les remarques, consignes, rappels et exemples sont donnés en italique.

- Partie A : Analyse de l'ensemble du système et instrumentation.
- Partie B : Traitement des informations et recherche d'une loi de commande.
- Partie C : Modélisation du comportement d'un « coin » d'un podium.
- Partie D : Analyse de l'asservissement avec un modèle à temps continu.
- Partie E : Analyse de l'asservissement avec un modèle à temps discret.

Table des figures

Figure 1 : Schéma fonctionnel question Q.8/ (à compléter).....	6
Figure 2 : Schéma d'interconnexion question Q.14/ (à compléter).....	9
Figure 3 : Schéma-bloc prédéterminations question Q.29/ (à expliciter).....	14
Figure 4 : Asservissement de position à temps continu d'un « coin ».....	16
Figure 5 : Asservissement de position à temps discret question Q.50/ (à compléter).....	19

SOMMAIRE des QUESTIONS

1. PARTIE A	4
1.1 Vue d'ensemble du système : liens avec la description fonctionnelle	4
1.2 Instrumentation du moteur : choix du codeur (Fonctions F1bis)	4
1.3 Analyse du moteur à courant continu et de son variateur associé	5
1.4 Codeur incrémental « position »	7
1.5 Analyse des liaisons entre les capteurs, les variateurs et l'unité de traitement	8
2. PARTIE B	11
2.1 Traitement de l'information issue du codeur incrémental « position »	11
2.2 Calcul de la vitesse d'un coin	11
2.3 Consignes de position et de vitesse des coins d'un podium	12
3. PARTIE C	13
3.1 Prédéterminations	13
3.2 Étude statique	14
3.3 Étude dynamique	14
3.4 Modèle avec commande du moteur en tension	15
4. PARTIE D	16
4.1 Analyse des besoins pour le correcteur C(p)	17
4.2 Commande à temps continu : étude de différents réglages du correcteur	17
5. PARTIE E	18
5.1 Préliminaires	19
5.2 Correcteur P, stabilité et précision	20
5.3 Correcteur de type RST	20
5.4 Question subsidiaire	22

1. PARTIE A

Dans cette partie, on s'intéresse à la topologie d'ensemble du système puis au choix des codeurs incrémentaux « moteur » et « position ». Le dimensionnement du moteur à courant continu est ensuite abordé, ainsi que le comportement du variateur associé.

1.1 Vue d'ensemble du système : liens avec la description fonctionnelle

Q.1/ Lister les éléments matériels réalisant chacune des fonctions suivantes :

- la fonction F1 « Mesures de l'altitude des podiums » ;
- la fonction F1bis « Mesures de la rotation des moteurs » ;
- la fonction F7 « Conversions électromécaniques » .

Lister les fonctions apparaissant sur le schéma fonctionnel « *Décomposition fonctionnelle du système* » (donné en annexe) qui sont **uniquement logicielles** et réalisées à l'aide du microprocesseur de l'ordinateur compatible PC.

Consignes :

Par élément matériel ou objet, on entend par exemple « courroie crantée, roue dentée, carte d'acquisition, moteur, codeur incrémental, variateur de vitesse, etc. » ainsi que tous les câbles ou ensemble de câbles électriques dont la longueur dépasse 4 m.

Pour chaque fonction (F1, F1bis, F7), le nombre exact d'éléments matériels nécessaires devra être précisé.

Pour les câbles électriques, une estimation de leurs longueurs minimale et maximale sera effectuée. Le nombre de fils constituant un câble n'est pas à détailler.

Les câbles participant au raccordement au réseau électrique ne seront pas pris en compte.

1.2 Instrumentation du moteur : choix du codeur (Fonction F1bis)

Q.2/ Exprimer la relation littérale reliant R_{oz} la résolution linéaire suivant l'axe Oz, R_{cod} la résolution du codeur (exprimée en points/tour), r_t le rapport de réduction total entre le moteur et la poulie. Préciser si nécessaire les autres grandeurs mécaniques intervenant dans l'expression établie.

Q.3/ On souhaite utiliser un codeur 500 points. Justifier le choix du rapport de réduction $r_t = 32$.

Compte tenu du cahier des charges de l'application et du réducteur choisi, donner en tour/mn (noté tr/mn) la valeur de N_{Max} , la vitesse maximale de rotation du moteur à courant continu.

Q.4/ Définir ce qu'est une liaison électrique de type différentiel et expliciter ses avantages.

- Q.5/** Justifier le choix du codeur incrémental XCC-HF4A30. On mettra en regard d'une manière explicite, les contraintes du cahier des charges et de l'environnement du système d'une part, et les caractéristiques du codeur XCC-HF4A30 d'autre part. Chaque élément du sigle devra être analysé.

1.3 Analyse du moteur à courant continu et de son variateur associé

Rappels

En première approximation, on considère que chaque moteur « voit » un quart de la masse totale du podium. La force équivalente exercée par le podium sur le câble est appelée « effort utile » : on la note F_u . En pleine charge, l'effort utile est noté $F_{u\max}$. Dans ce cas, les pertes représentent 15 % de l'effort utile.

*Le variateur est utilisé en mode régulation de couple. Il **n'est pas** utilisé en mode régulation de vitesse.*

Le réseau EDF de puissance disponible est un réseau triphasé 460V, 50 Hz.

On souhaite qu'en pleine charge le moteur soit aux trois quarts de sa puissance nominale P_n .

- Q.6/** Déterminer la valeur de la puissance nominale d'un moteur.

Choisir un variateur parmi les familles DMV 2322 ou DMV 2242 dont la documentation est fournie en annexe. Donner la référence du variateur retenu. Préciser les caractéristiques nominales en tension et en courant (U_N , I_N) du moteur.

- Q.7/** Choisir pour la grandeur de consigne du variateur, le mode de liaison « PC/Variateur » qui vous paraît le plus judicieux parmi ceux proposés par le constructeur du variateur. La réponse devra être justifiée.

Donner le repérage du connecteur et/ou des broches du variateur utilisées pour l'entrée de consigne choisie.

Remarque :

*Il est recommandé de **lire l'ensemble de la question ci-après avant de commencer** à répondre et de consulter à la fois la description du support d'étude et la documentation technique du variateur donnée en annexe.*

- Q.8/** Le courant d'induit I_{Moteur} est reconstruit à partir de la mesure des courants de ligne I_{Ligne} (cf. schéma fonctionnel du variateur dans la documentation technique). Adapter et compléter le schéma fonctionnel (cf. *document réponse DR1*) de la Figure 1 ci-après en faisant apparaître la ou les boucles de régulation réalisées par le variateur choisi dans l'application étudiée, ainsi que les fonctions **essentiels** intervenant dans ces boucles de régulation. La nature exacte de la grandeur d'entrée dépendra du choix du mode de liaison de la question précédente.

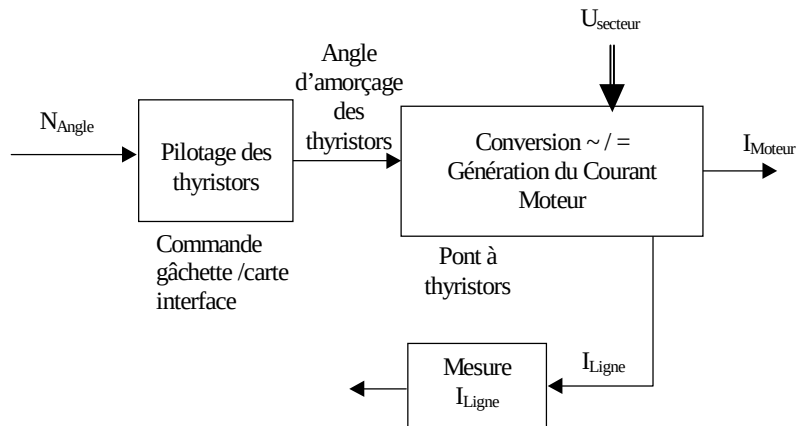


Figure 1 : Schéma fonctionnel question Q.8/ (à compléter)

Consignes :

On s'intéresse ici **uniquement** au variateur DMV23** et au moteur. On ne fera pas apparaître les boucles de régulation associées à l'ordinateur compatible PC.

La dénomination de la fonction permettra de **caractériser** le traitement effectué au sein de la boucle de régulation. Les différentes fonctions de transfert intervenant dans les blocs du schéma ne seront pas explicitées.

Le candidat veillera à NE PAS OMETTRE les fonctions de conversion analogique/numérique ou numérique/analogique ainsi que les fonctions servant à la « correction de l'asservissement ».

Les fonctions de limitation ou d'écèlement VOLONTAIRES intervenant dans la chaîne directe seront également mentionnées.

Néanmoins, **on ne tiendra pas compte**

- des fonctions liées à des défauts de comportement (non-linéarité, saturation,...) ;
- des blocs associés à la régulation de l'excitation du moteur ;
- des blocs servant à la mesure des grandeurs permettant de protéger l'appareil ou de sécuriser le fonctionnement.

Q.8bis/ Compléter le schéma précédent en repérant les grandeurs d'entrée et de sortie de chaque bloc par un nom explicite et en précisant à la fois la nature de la grandeur et celle de l'information transportée.

Consignes :

Les grandeurs seront repérées par U_{indice} pour les tensions, I_{indice} pour les courants, N_{indice} pour les grandeurs numériques. « Indice » sera caractéristique de l'information véhiculée par le signal. Par exemple :

- I_{Moteur} : courant dans l'induit du moteur ;
- U_{A1A2} : tension aux bornes de l'induit du moteur ;
- N_{angle} : variable logicielle interne au microprocesseur, proportionnelle à l'angle d'amorçage des thyristors.

Q.8ter/ Indiquer pour chaque bloc fonctionnel les structures matérielles associées et préciser quels sont les blocs qui seront réalisés par des structures logicielles exécutées à l'aide du microprocesseur de la carte « régulation MDA1 ».

Exemples :

- *conversion $\sim/\neq$: pont de thyristors placé sur la carte « puissance » du variateur DMV23** ;*
- *pilotage des thyristors : bloc commande gâchette des thyristors placé sur la carte « interface » du variateur DMV23**.*

La variable logicielle $N_{I_{cons}}$ qui définit la consigne du variateur au niveau du PC est supposée de type entier signé, codée sur 10 bits. La consigne du courant I_{cons} dans le moteur doit pouvoir varier entre -150% et $+150\%$ du courant nominal I_N déterminé à la question Q.6/.

Q.9/ La documentation constructeur du variateur indique que la bande passante de la régulation de courant est de 80 Hz. Proposer une expression de la fonction de transfert reliant le courant dans un moteur I_{Moteur} et la variable logicielle $N_{I_{cons}}$ correspondante. On supposera que le réglage de la boucle réalisée par le variateur permet d'obtenir une marge de phase supérieure à 90° .

Les valeurs numériques des coefficients de la fonction de transfert devront être estimées.

Q.10/ Quelle approximation serait-il, a priori, judicieux de faire lors de l'étude de l'asservissement de position d'un coin du podium ? Préciser les conditions de validité de cette approximation.

1.4 Codeur incrémental « position »

Rappel :

Le système de traitement n'utilise pour le comptage que les fronts montants de la voie A du codeur.

Q.11/ Définir les termes techniques « résolution » et « précision ».

On suppose qu'un algorithme d'estimation de la position est implanté dans l'unité de traitement pour les faibles vitesses. Cet algorithme tient compte de la vitesse et permet d'accroître la résolution de mesure de la position par rapport à la résolution disponible en sortie des compteurs. Le bit de poids faible du nombre en sortie d'un compteur $LSB(N_Position)$ vaut **dans cette question** $LSB(N_Position) = 64 \times LSB(position_estimée)$.

La précision des codeurs disponibles est supposée égale à $\pm 45^\circ$ de la période électrique (cf. document constructeur). On ne tiendra pas compte de l'incertitude sur la position zéro (référence de position).

Q.12/ Déterminer la valeur maximale de la résolution à adopter pour le codeur incrémental « position » permettant de remplir le cahier des charges. Sélectionner dans la documentation technique proposée le codeur incrémental adéquat en donnant (et en justifiant) sa référence complète. Vérifier que les contraintes imposées en phase d'atterrissage et celles concernant les différences de niveau pourront, a priori, être satisfaites.

Q.13/ Calculer le nombre minimum de bits du compteur à utiliser. Est-il nécessaire de détecter le sens de rotation du codeur ? Justifier.

1.5 Analyse des liaisons entre les capteurs, les variateurs et l'unité de traitement

Dans la première question, les interconnexions existant entre les capteurs, les actionneurs et les cartes insérées dans l'ordinateur PC sont abordées. On s'intéresse ensuite à une réorganisation des liaisons entre les éléments de la chaîne de régulation, les capteurs, l'ordinateur et les variateurs associés aux moteurs.

Rappels et remarques :

La période d'échantillonnage des informations « position des coins » et « position moteur » est de 20 ms.

La documentation fournie en annexe précise certaines propriétés des standards RS232c, RS422, RS485.

Elle donne également des informations sur les réseaux de terrain CAN, Profibus, Modbus/Jbus.

*De même, une documentation technique sur les cartes CIO** est reportée en annexe.*

Solution initiale

Q.14/ On dispose de cartes CIO-CTR10 et CIO-CTR20, de cartes CIO-DIO48 et CIO-DIO96, de cartes série CIO-COM485 et CIO-COM 422/550. La commande des freins et des taquets (positions Haute et Basse) se fait à partir d'une commande logique dont les niveaux électriques sont au standard RS422. Les signaux provenant des 24 capteurs de fin de course sont des signaux logiques dont les niveaux électriques sont également au standard RS422.

Compléter (cf. *document réponse DR2*) le schéma d'architecture Figure 2 donné page 9 en faisant apparaître :

- les cartes CIO* implantées dans le PC (avec leur dénomination) choisies dans la liste ci-avant ;
- les équipements complémentaires pour lesquels le candidat définira la fonctionnalité ;
- les liaisons entre les équipements.

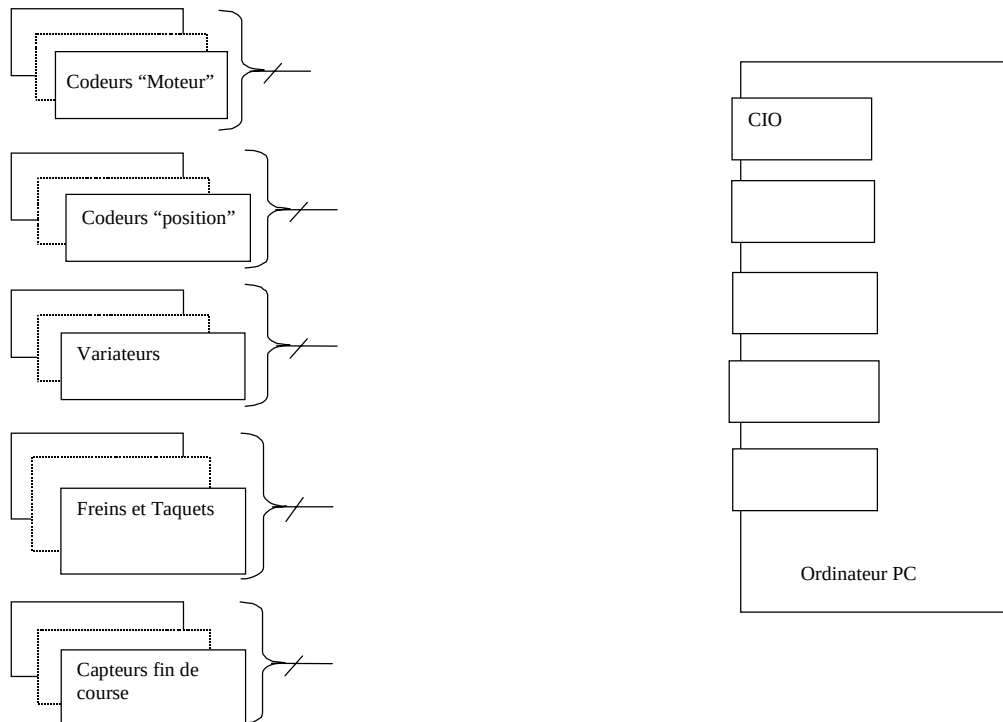


Figure 2 : Schéma d'interconnexion question Q.14/ (à compléter)

Réorganisation des liaisons

Q.15/ On souhaite utiliser un câblage de type réseau de terrain entre l'ordinateur PC et les codeurs incrémentaux « moteur ».

Indiquer pour chacune des options de communication suivantes RS232, RS422, RS485, si elle est utilisable. Justifier dans chaque cas la réponse. Dans le cas où on implanterait une solution dont la couche physique est basée sur le standard RS485, pourrait-on relier directement sur le réseau les codeurs incrémentaux de la série XCC dont la documentation technique est donnée en annexe ? Justifier la réponse.

On se place dans la configuration suivante :

- chaque capteur « position » et « moteur » est constitué d'un codeur associé à une carte électronique assurant le comptage des impulsions avec repérage du sens de rotation et

présentant une interface adaptée à la communication avec le réseau de terrain considéré ;

- les variateurs sont également équipés d'une interface complète (matérielle et protocole) gérant l'accès au réseau de terrain.

Le réseau de terrain doit véhiculer les informations transitant entre les éléments de la chaîne de régulation. On se limitera au transfert des informations suivantes :

- informations issues des capteurs « position » des coins vers l'ordinateur PC ;
- informations issues des capteurs « moteur » vers l'ordinateur PC ;
- informations de commande de l'ordinateur PC vers les variateurs (1 mot de 16 bits par variateur) ;
- informations d'état fournies par le variateur vers l'ordinateur PC (une information d'état sera estimée à 4 mots de 16 bits, elle doit être transmise toutes les 500 ms environ).

La commande des freins et des taquets d'une part, et la gestion des capteurs de fin de course d'autre part, ne seront pas prises en considération.

Q.16/ La mise en place d'un réseau de terrain CAN est envisagée. Citer au moins 2 avantages liés à l'emploi de ce réseau de terrain par rapport à la solution initiale (traitée à la question Q.14/). Seuls des avantages directement associés à l'application étudiée seront considérés.

Les codeurs disposent d'une interface CAN. La documentation des capteurs « position » **Absolute Encoder CVM10 Multi turn** est fournie en annexe. L'interface CAN est la même pour les capteurs « moteur » et les capteurs « position ». La donnée (« moteur » ou « position ») est codée sur 25 bits dans les deux cas. On suppose que le variateur dispose d'une interface adaptée au Réseau CAN High Speed (norme ISO 11898) et qu'il y a 10 types de messages associés à un variateur.

Q.17/ Estimer le débit brut maximal (en bits/s) qui pourrait être utilisé sur le réseau sachant que l'on n'utilise pas de répéteur, si on choisit le Réseau CAN High Speed.

Faut-il prendre une trame de type standard (identificateur sur 11 bits) ou étendu (identificateur sur 29 bits) ?

Q.18/ On dispose d'une carte PC type CANPCa de la Société NSI (cf. annexe). La solution proposée avec le réseau de terrain CAN est-elle applicable ? Justifier la réponse.

Une solution à base du réseau de terrain Profibus DP est maintenant examinée. On utilise une carte PC type PC1500PFB (cf. annexe). On suppose que les variateurs disposent d'une interface adaptée au réseau Profibus DP. Les codeurs sont associés à une carte électronique assurant le comptage des impulsions avec repérage du sens de rotation et présentant une interface adaptée à Profibus DP (les grandeurs « position » et « moteur » sont codées chacune sur 25 bits). Les variateurs et les capteurs sont en mode esclave.

Q.19/ Choisir la configuration adaptée en terme de topologie (longueur des segments, présence de répéteurs, etc.) et de vitesse de transmission.

2. PARTIE B

Les fonctions F_2 et F_4 du schéma fonctionnel sont maintenant abordées. Un profil d'accélération, de vitesse et de position permettant de poser le podium avec une vitesse nulle, est ensuite étudié. L'exploitation des données « position » et « vitesse » des coins est assurée par l'intermédiaire d'un ordinateur industriel de type PC386, 33 MHz. Les programmes sont écrits en langage C. La vitesse $v(C_{ij})$ d'un coin est calculée par différence finie.

La résolution des codeurs « position » est supposée égale à 0,5 mm.

La fonction d'acquisition et de comptage F_2 est réalisée à l'aide de cartes d'acquisition.

2.1 *Traitement de l'information issue du codeur incrémental « position »*

Q.20/ Choisir un nom et un format de donnée correspondant aux informations « position » directement issues des compteurs.

Remarque :

Le format d'une donnée doit préciser sa nature (ou son organisation), son type (entier signé, réel, virgule flottante...) et le nombre de bits associés.

Q.21/ Proposer un algorithme pour la fonction logicielle Lireposition(). Cette fonction doit réaliser l'acquisition des positions des coins C_{ij} des 3 podiums.

Définir en particulier les arguments d'entrée et de sortie de la fonction et le type des variables locales éventuellement utilisées.

2.2 *Calcul de la vitesse d'un coin*

Q.22/ De la même façon, donner un algorithme pour la fonction logicielle Calculvitesse(). Cette fonction calcule la vitesse des 4 coins C_{ij} d'un podium à partir de la donnée correspondant à l'ensemble des positions, définie dans la question Q.20/.

Préciser également les arguments d'entrée et de sortie de la fonction ainsi que le type des variables locales éventuellement utilisées.

Q.23/ Déterminer la valeur numérique associée au bit de poids faible de vitesse noté LSB(vitesse). Conclure.

Q.24/ On calcule en fait la vitesse de manière à obtenir la valeur moyenne sur 64 échantillons. Modifier l'algorithme précédent en conséquence.

Donner la valeur du bit de poids faible de vitesse ainsi obtenu, noté $LSB_{moy}(vitesse)$.

Donner la fonction de transfert en z reliant la vitesse moyenne $V_{moy}(C_{ij})$ obtenue par l'algorithme proposé et la position $z(C_{ij})$.

Q.25/ Compte tenu des variables utilisées, quelle est la vitesse moyenne maximale représentable ? Conclure (1 ligne au maximum).

2.3 Consignes de position et de vitesse des coins d'un podium

On aborde maintenant la stratégie d'atterrissage du podium décrite à l'étape (7) du cycle de fonctionnement standard tel que défini dans la présentation du sujet, à savoir :

- a/ Descendre le podium à vitesse constante jusqu'à 4 mm au-dessus des taquets ;
- b/ Mettre en œuvre la stratégie d'atterrissage permettant de poser le podium à vitesse nulle (ou aussi faible que possible).

L'origine des temps est prise à l'instant $t_0 = 0$ pour lequel la position est $z = 2$ cm. Dans cette partie, les position, vitesse et accélération d'un seul coin C_i d'un podium sont considérées. Les grandeurs « position instantanée », « vitesse instantanée » et « accélération instantanée » sont respectivement notées :

$$z, \quad v = \frac{dz}{dt}, \quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2z}{dt^2}$$

L'accélération a sera choisie constante par morceaux.

Rappel :

*Les éléments du cahier des charges sont dans la **présentation du support d'étude**.*

Remarque :

On ne tiendra pas compte pour la question Q.26/ :

- **des résolutions de mesure ;**
- **de l'influence de la période d'échantillonnage.**

Q.26/ Proposer un **profil** pour a , v , z permettant de remplir le cahier des charges en un minimum de temps. Indiquer en particulier :

- les valeurs des accélérations choisies ;
- la valeur du palier de vitesse notée v_3 ;
- l'expression en fonction de v_3 de l'accélération durant la phase (7.b) ;
- la durée de la phase (7.b) ;
- la durée totale de la phase (7).

Q.27/ Donner la valeur du bit de poids faible « position » noté LSB(N_Position) de la variable **directement issue** des compteurs. Compte tenu de cette quantification sur z , quel est le principal défaut des profils retenus dans la question précédente (1 phrase au maximum) ?

3. PARTIE C

Les points d'ancrage des câbles A_i sont supposés confondus avec les coins C_i (dont on mesure l'altitude $z_i(t)$). Les câbles sont élastiques. Le module de l'accélération de la pesanteur, notée g , est pris égal à 10 m/s^2 . Le couple de frottement ramené sur l'axe de la poulie est modélisé par un frottement de type « visqueux » de coefficient f . Le moment d'inertie ramené sur l'axe de la poulie est noté J . Le couple moteur exercé sur l'axe de la poulie est noté C_m . **Les conventions de signe sont celles imposées sur la figure « Modélisation 1 coin » donnée en annexe.** On suppose que :

- les forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ ont le même module hormis lorsque l'allongement du câble varie ;
- la partie de câble enroulée sur la poulie ne subit aucune variation de son allongement (frottements trop importants) ;
- la répartition des masses sur le podium est supposée uniforme. La masse équivalente pour un coin est $M_e = \frac{1}{4} M_p$.

3.1 Prédéterminations

Q.28/ On isole le sous-système 1 (constitué de la poulie et de la partie de câble enroulée sur la poulie). Exprimer l'équation différentielle reliant l'angle de rotation de l'axe de la poulie θ , le couple moteur C_m et les forces exercées par le câble F_1 et F_C , en respectant les conventions de signe imposées sur la figure « Modélisation 1 coin ».

Q.29/ La position $z = 0$ correspond à $\theta = 0$. On note Al l'allongement du câble. **EXPLICITER** le schéma-bloc de la Figure 3 page 14 (cf. *document réponse DR3*) reliant C_m , F_1 , F_C , Al et Z .

Consignes :

Les différentes fonctions de transfert seront explicitées.

On fera apparaître la variable θ .

Q.30/ A partir des rappels donnés en annexe concernant le comportement élastique d'un câble, donner l'expression de l'allongement Al du câble en fonction de F_1 et de la longueur du câble à vide l_0 .

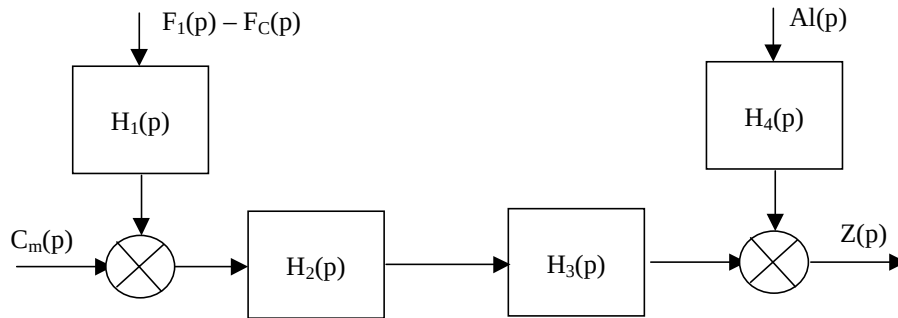


Figure 3 : Schéma-bloc prédéterminations question Q.29/ (à expliciter)

3.2 Étude statique

Q.31/ Initialement, le podium est en position $z = 0$. Il n'est pas chargé, sa masse est minimale (masse du podium = M_{Pmin}) et les câbles sont tendus. Autrement dit, ils soutiennent le podium. Le système de sécurité est alors mis en service. Le décor est placé sur le podium. La charge est maximale (M_{Pmax}). Le moteur est mis en fonctionnement et la poulie effectue 5 tours.

Déterminer la valeur de la position finale z_f .

Q.32/ Justifier l'emploi des capteurs de position « codeurs position » au lieu des capteurs de position angulaire « codeurs moteur » pour déterminer l'altitude des coins. On demande une justification **quantitative** s'appuyant sur les exigences du cahier des charges.

3.3 Étude dynamique

Q.33/ La variation de l'allongement du câble due à une variation de l'effort F_2 doit rester négligeable. Déterminer la valeur maximale admissible pour l'accélération linéaire

$a = \frac{d^2 z}{dt^2}$ telle que la variation de l'allongement reste inférieure à 0,1 mm dans le cas le plus défavorable.

Q.34/ Compte tenu du cahier des charges et des questions précédentes, proposer un **modèle dynamique** sous forme de schéma-bloc reliant le couple moteur C_m ramené sur l'axe de la poulie et la position z . Préciser les expressions de l'entrée ΔC_m et de la sortie Δz .

On notera $G_1(p) = \frac{\Delta Z(p)}{\Delta C_m(p)}$.

3.4 *Modèle avec commande du moteur en tension*

Un convertisseur autorisant une commande en tension du moteur est maintenant utilisé. Le variateur de la série **DMV23** n'est donc pas mis en œuvre pour ces questions**. On suppose que le **couple sur l'arbre moteur** C_M est **intégralement transmis** à la poulie. Le rapport de réduction total r_t entre le moteur et la poulie est choisi égal à 32. La constante de couple du moteur est notée k_M .

Q.35/ Compléter le schéma-bloc donné à la question Q.34/ afin de faire apparaître les blocs modélisant la relation entre la tension d'induit U_M , le courant d'induit I_M , le couple moteur sur l'arbre moteur C_M et éventuellement d'autres grandeurs électriques ou mécaniques à préciser.

Les conditions de validité du modèle proposé ainsi que l'expression exacte des différentes grandeurs d'entrée et de sortie de chaque bloc considéré doivent être précisées. Les expressions littérales des différentes fonctions de transfert intervenant dans ce schéma-bloc seront données.

Q.36/ Pour un courant d'induit $I_M = 200$ A, on a $C_M = 5300$ Nm. En déduire la valeur numérique de la constante de couple k_M .

Donner la valeur numérique du couple **ramené sur l'axe de la poulie** C_m .

Q.37/ Le podium est à vide et se déplace dans le sens de la montée. Sa vitesse est constante, égale à $V_{PM_{\max}}$. Le courant dans le moteur est $I_M = 135$ A. Estimer la valeur du coefficient de frottement f sans tenir compte de l'effet du contrepoids.

Q.38/ On prend un coefficient de frottement f égal à $40 \cdot 10^3$ N.m.s. Le moment d'inertie ramené sur l'axe de la poulie vaut $J = 660 \cdot 10^3$ kg.m². Les documents constructeurs donnent pour la résistance d'induit du moteur $R_M = 9,9$ mΩ et pour l'inductance $L_M = 0,155$ mH.

Donner l'expression de $G_2(p) = \frac{\Delta Z(p)}{\Delta U_M(p)}$. Représenter le diagramme de Bode asymptotique de $G_2(p)$.

Montrer que la fonction de transfert $G_2(p)$ peut se mettre sous la forme :

$$G_2(p) = \frac{G_0}{p \left(1 + 2\xi \frac{p}{\omega_n} + \left(\frac{p}{\omega_n} \right)^2 \right)} = \frac{\Delta Z(p)}{\Delta U_M(p)}$$

Donner les valeurs numériques de G_0 , ξ , et ω_n .

Quel est le comportement du système aux basses fréquences ?

Q.39/ Compte tenu de l'application, expliquer pourquoi une commande en tension n'a pas été retenue.

Consigne :

On pourra par exemple, dans le cadre de l'application étudiée, donner les inconvénients de la commande en tension et les avantages de la commande en couple.

4. PARTIE D

Différentes stratégies de **correction** sont abordées.

Le variateur de la série DMV23** est utilisé en mode « **régulation de couple** ». Le moteur est donc ici commandé en courant. Il n'y a pas de boucle de vitesse.

On considère une commande à temps continu. Le **modèle** utilisé pour la partie commande est donc **à temps continu**. Autrement dit, toute influence de l'échantillonnage, du blocage ou de la quantification des grandeurs est négligée. De même, les limitations ou écrêtements éventuels des différentes grandeurs ne sont pas prises en considération.

Le schéma-bloc complet de la Figure 4 ci-après est utilisé. Il tient compte des perturbations T sur le couple C_m et Al sur l'altitude z .

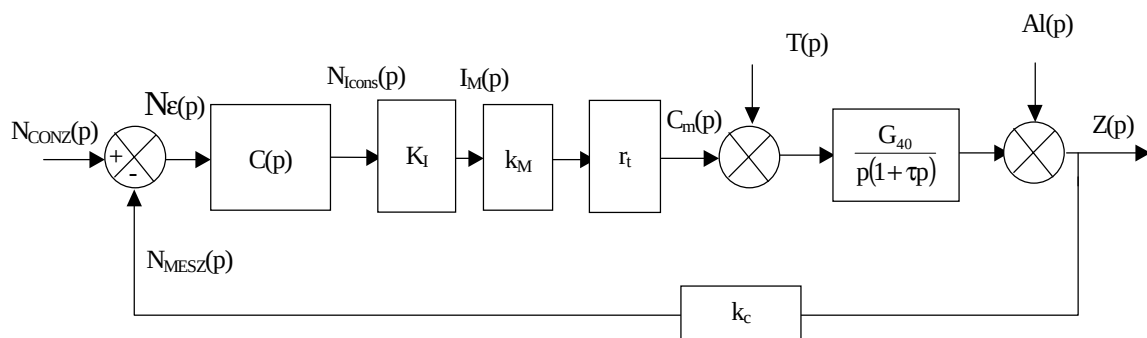


Figure 4 : Asservissement de position à temps continu d'un « coin »

On prend : $\tau = 10 \text{ s}$

$$G_{40} = 6,25 \cdot 10^{-6} \text{ m/Nm}$$

$$K_I \times k_M \times r_t = 130$$

$$k_c = 0,45 \text{ V/m}$$

4.1 Analyse des besoins pour le correcteur $C(p)$

Q.40/ On choisit d'implanter un correcteur proportionnel $C(p) = K$. Les perturbations T et Al sont supposées nulles. Donner l'expression des erreurs statiques (en %) du premier et du second ordre notées respectivement ε_{01} et ε_{02} .

Conclure quant aux performances du correcteur proportionnel envisagé.

Q.41/ La perturbation de couple peut être modélisée par un échelon de couple tandis que Al est représentée par une rampe. Définir les besoins du correcteur $C(p)$ vis-à-vis des perturbations T et Al respectivement permettant d'obtenir un rejet de la perturbation considérée.

4.2 Commande à temps continu : étude de différents réglages du correcteur

On suppose que le modèle donné sur la Figure 4 est identique pour les quatre coins du podium. On implante un correcteur PI tel que $C(p) = K \left(\frac{1 + \tau_i p}{p} \right)$.

Q.42/ Montrer que le réglage du correcteur $C(p)$ par compensation de la constante de temps τ du système ne peut pas être un « bon choix » pour le procédé considéré.

Q.43/ Donner l'expression de la fonction de transfert du système en boucle fermée $W_1(p)$.

Remarque : on mettra $W_1(p)$ sous la forme

$$W_1(p) = \frac{1}{k_c} \cdot \frac{b_1 p + b_0}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}.$$

Q.44/ On utilise pour effectuer le réglage du correcteur les polynômes de Graham et Lathrop rappelés en annexe. Exprimer les formes littérales de ω_n , τ_i et K en fonction des données du procédé. Faire l'application numérique.

Q.45/ Le podium étant initialement suspendu et $z = 0$, déterminer la valeur de l'échelon ΔN_{CONZ} à appliquer au procédé pour obtenir une position finale du podium $z_{\text{fin}} = 2 \text{ cm}$.

On donne en annexe « Réponse indicielle commande continue » la réponse indicielle pour l'échelon déterminé ci-avant. Le système ainsi corrigé vérifie-t-il le cahier des charges (en particulier les contraintes liées à la vitesse maximale du podium) ? Déterminer la valeur maximale de ΔN_{CONZ} (notée $\Delta N_{\text{CONZMax}}$) permettant d'être en limite de contrainte de vitesse.

Q.46/ Compte tenu de l'allure de la sortie donnée en annexe (« Réponse indicielle commande continue »), en première approximation, à quel type de fonction de transfert « simple » $W_2(p)$ peut-on identifier le système en boucle fermée ? Donner l'expression et la

valeur numérique des coefficients intervenant dans $W_2(p) = \frac{\Delta Z(p)}{\Delta N_{\text{CONZ}}(p)}$.

Q.47/ On souhaite réaliser maintenant une détermination du correcteur par la méthode du placement de pôles. Peut-on placer arbitrairement les trois pôles du système bouclé à l'aide du correcteur PI envisagé ? La réponse devra être justifiée !

On veut obtenir pour fonction de transfert en boucle fermée

$$W_1(p) = \frac{\alpha p + \beta}{(p - p_1)(p - p_2)(p - p_3)}$$

avec $p_1 = -0,048 + j 0,1$, $p_2 = -0,048 - j 0,1$, $p_3 = -0,004$

Déterminer les valeurs numériques de K et τ_i permettant de réaliser ce correcteur PI.

Préciser les valeurs de α et β .

Q.48/ Montrer que la fonction de transfert obtenue à la question Q.47/ peut être approchée par une fonction de transfert du second ordre $W_3(p)$. Donner l'expression de $W_3(p)$, ainsi que la valeur numérique des différents coefficients intervenant dans $W_3(p)$.

Q.49/ Comparer les caractéristiques de la réponse indicielle de $W_3(p)$ avec celles obtenues pour $W_2(p)$ et conclure (on considérera les éléments intervenant dans le cahier des charges).

5. PARTIE E

Dans cette partie, l'étude de l'asservissement de position est reprise à partir du schéma de la Figure 4 page 16. On introduit l'effet de l'échantillonnage, du blocage, et éventuellement de la quantification des grandeurs. Les performances du système en boucle fermée seront analysées lorsqu'on implante différents correcteurs numériques.

On suppose qu'on a utilisé un bloqueur d'ordre 0 noté $B_0(p)$ pour la restitution d'une grandeur analogique. La fonction de transfert du correcteur est notée $C(z)$. On rappelle que la période d'échantillonnage T_{ep} vaut 20 ms. On se reportera à la Figure 4 page 16 pour l'expression du modèle du procédé, la notation et la valeur des différents paramètres. On considère qu'aucune opération particulière n'est réalisée sur les signaux provenant des compteurs associés au codeur de position et que le signal de retour de l'asservissement vérifie

$$N_{\text{MESZ}}(nTe) = N_{\text{Position}}(nTe) = k_c \times z(nTe).$$

La régulation de courant associée au variateur de vitesse sera considérée comme parfaite et ses défauts ne seront pas pris en compte. La consigne de position N_{CONZ} est issue de la supervision (cf. « *Décomposition fonctionnelle du système* » en annexe). Les perturbations T et Al sont supposées nulles.

5.1 Préliminaires

Q.50/ Compléter le schéma-bloc de la Figure 5 (cf. *document réponse DR4*) en faisant apparaître les différentes fonctions et conversions réalisées, les variables et leur nature (à savoir, à temps continu ou à temps discret). On reprendra le même type de notations que celles utilisées dans la Figure 4.

Donner le modèle équivalent faisant apparaître les fonctions de transfert adéquates en z ou en p .

Consignes :

Une opération d'échantillonnage sera représentée par le symbole $\frac{T_e}{\text{—}} \text{—}$



Figure 5 : Asservissement de position à temps discret question Q.50/ (à compléter)

Q.51/ Analyser l'effet d'un sur - échantillonnage sur la position dans le plan complexe du pôle z_1 issu d'un pôle $p_1 = -1/\tau$ du système continu. Conclure quant à la sensibilité numérique de la transmittance obtenue lorsque le système est sur - échantillonné.

Compte tenu des caractéristiques du procédé à asservir, peut-on envisager une identification paramétrique de $T(z)$ en boucle ouverte ? Justifier la réponse.

Q.52/ On note $H(z)$ la transmittance du procédé en présence du bloqueur d'ordre 0. Donner l'expression littérale de $H(z)$ et la mettre sous la forme

$$H(z) = K_0 \frac{b_m z^m + b_{m-1} z^{m-1} + \dots + b_0}{z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0} \quad \text{où } K_0 = f(K_I, k_M, G_{40}, r_t)$$

Donner la valeur numérique des différents coefficients apparaissant dans $H(z)$.

Donner l'expression littérale et la valeur numériques des pôles de $H(z)$, ainsi que la valeur numérique des zéros z_{ej} de $H(z)$.

Q.53/ Définir les expressions « stabilité » et « stabilité asymptotique ». Au regard de ces propriétés, caractériser le système de fonction de transfert $H(z)$.

Définir les expressions « système propre » et « système strictement propre ». Au regard de ces propriétés, caractériser ici aussi le système.

Q.54/ On considère un échelon sur la consigne de courant $N_{I\text{cons}}$. Montrer que le choix du bloqueur d'ordre 0, $B_0(p)$ permet d'obtenir la coïncidence aux instants d'échantillonnage des réponses indicielles $z(t)$ du procédé continu seul et $z(kT_{ep})$ du procédé échantillonné.

5.2 Correcteur P, stabilité et précision

On choisit d'implanter un correcteur numérique $C(z) = K_p$. Les perturbations T et AI sont supposées nulles.

Q.55/ Donner en fonction des (a_i, b_j) , K_0 , K_p , l'expression littérale de la fonction de transfert en boucle fermée $W_4(z) = K_0 \frac{\beta_m z^m + \beta_{m-1} z^{m-1} + \dots + \beta_0}{z^n + \alpha_{n-1} z^{n-1} + \dots + \alpha_1 z + \alpha_0}$ de l'asservissement de position échantillonné.

Donner les conditions sur K_p permettant d'assurer la stabilité du système en boucle fermée.

Q.56/ Donner les expressions littérales des erreurs statiques (en %) du premier et du second ordre notées respectivement ε_{01} et ε_{02} .

On admet une erreur statique du second ordre d'au plus 5 %. En déduire les nouvelles conditions sur la valeur numérique de K_p .

5.3 Correcteur de type RST

On s'intéresse maintenant à une synthèse du correcteur par placement de pôles robuste. La structure de ce correcteur est rappelée en annexe (« Schéma bloc avec correcteur RST »).

Le procédé à asservir admet pour modèle $H(z)$ défini à la question Q.52/.

On souhaite annuler l'erreur statique du second ordre. De plus, en régime permanent, le transfert en régulation doit être nul, ce qui impose $S(1) = 0$.

Q.57/ Soit $H_1(z) = \frac{B_1(z)}{A_1(z)} = \frac{7,309 \cdot 10^{-9} z + 7,301 \cdot 10^{-9}}{z^2 - 1,998z + 0,998}$ l'expression de $k_c \times H(z)$.

Donner en fonction des polynômes A_1 , B_1 , R , S , T l'expression des fonctions de transfert en poursuite $H_p(z)$ et en régulation $H_r(z)$.

Q.58/ Donner les conditions de réalisabilité (appelées également conditions de causalité) du correcteur RST.

En déduire le degré $\deg(A_m)$ du polynôme A_m en fonction des degrés des autres polynômes intervenant dans l'équation diophantine.

Donner la condition sur les degrés des polynômes R , S , A_m , A_1 , permettant de résoudre le problème.

Q.59/ Une solution unique du problème impose $\deg(R) = \deg(A_1)$. De plus, on choisit de mettre en œuvre un régulateur R/S strictement propre, avec une différence de degré minimale. En déduire le degré des polynômes R , S et A_m .

Compte tenu des réponses aux questions précédentes, donner la forme des polynômes R , S et A_m .

Consignes :

Les polynômes seront mis sous la forme $X(z) = x_0 + x_1 z + K$

On tiendra compte de la structure particulière du polynôme S due aux conditions énoncées dans le cahier des charges du paragraphe 5.3.

Q.60/ A partir de l'équation diophantine, donner le système d'équations linéaires S

$$[M] \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ M \\ r_0 \\ r_1 \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{m0} \\ a_{m1} \\ M \\ M \end{bmatrix}$$

Expliciter la matrice M en fonction des (a_{1i}, b_{1j}) .

Q.61/ On choisit $A_m(z) = z^3 \left(e^{-T_{ep}/\tau_1} - z \right)^2$, avec $\tau_1 = 10s$. Résoudre numériquement le système d'équations linéaires S . En déduire la valeur numérique des coefficients des polynômes R et S .

On prend $T(z) = R(1)$. Donner l'allure de la réponse indicielle.

Remarque :

Dans cette étude, on n'a pas tenu compte des limitations et saturations internes au procédé. Il va de soi que la détermination des lois de commande devra tenir compte de ces limitations.

5.4 Question subsidiaire

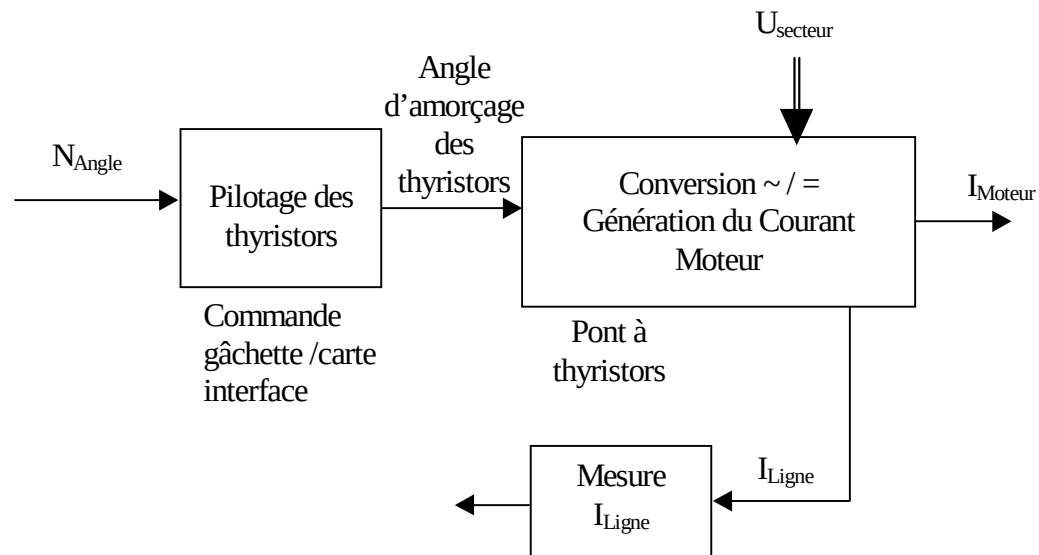
Lors d'un fonctionnement normal, le poids du podium est initialement inconnu. De plus, il existe des couplages entre les différents coins C_i , couplages dont on n'a pas tenu compte lors de cette étude. Enfin, la masse n'est pas uniformément répartie sur le podium.

Q.62/ Quelle incidence cela a-t-il sur le modèle du procédé utilisé pour la détermination de correcteurs ?

Quel type de commande faut-il envisager afin de tenir compte des couplages ?

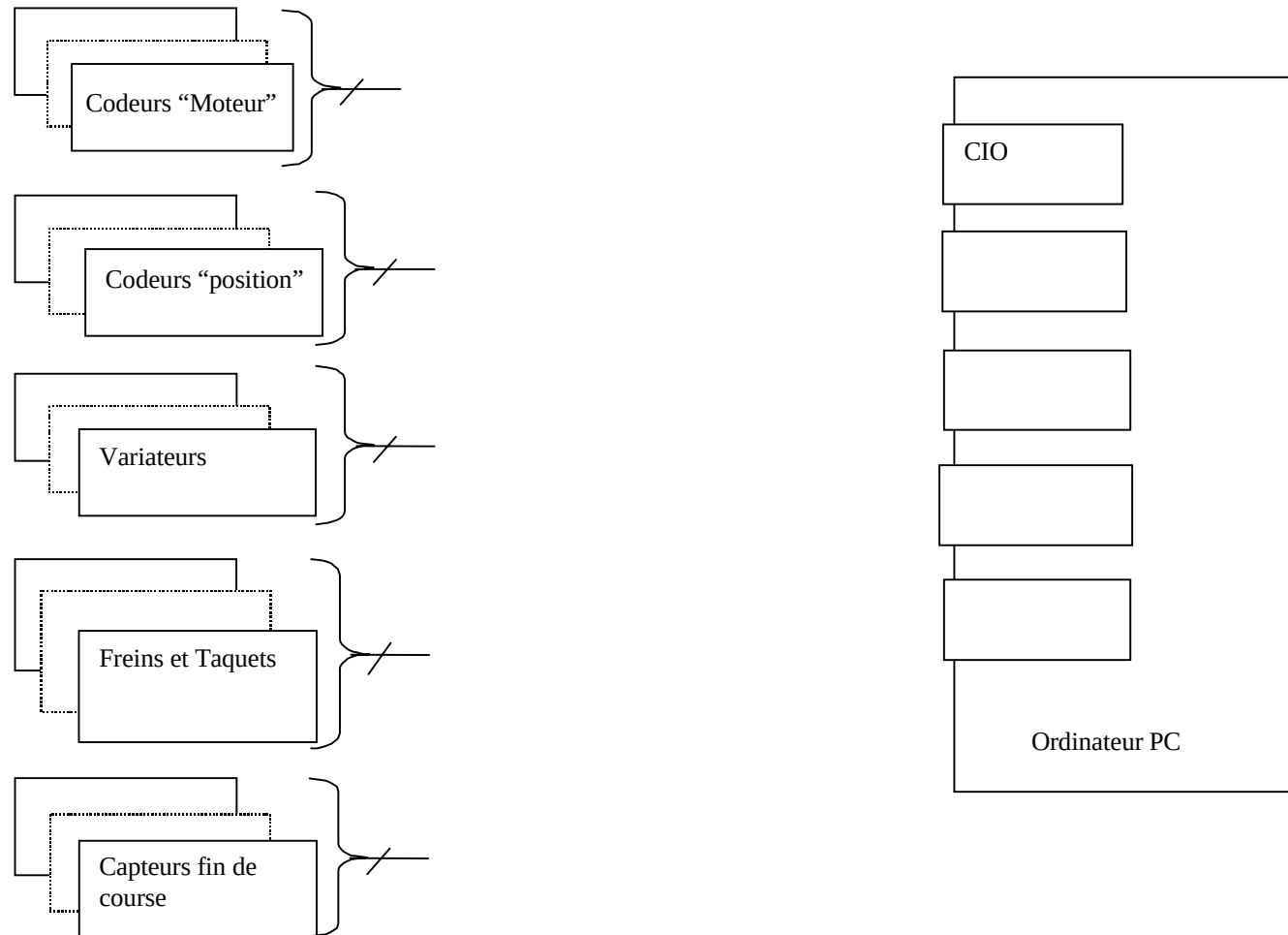
DR1 (à joindre à la copie)

Figure 1 : Schéma fonctionnel question Q.8/ (à compléter)



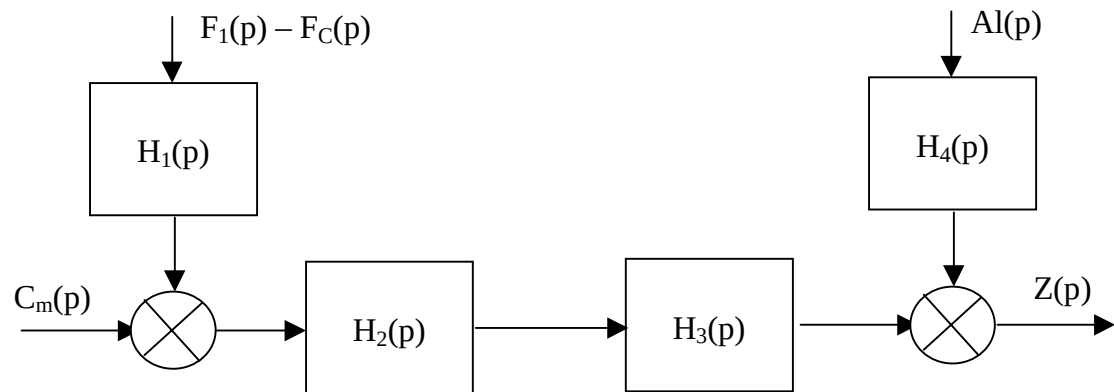
DR2 (à joindre à la copie)

Figure 2 : Schéma d'interconnexion question Q.14/ (à compléter)



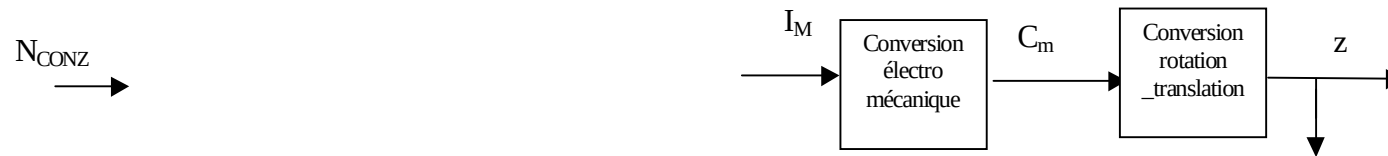
DR3 (à joindre à la copie)

Figure 3 : Schéma-bloc prédéterminations question Q.29/ (à expliciter)



DR4 (à joindre à la copie)

Figure 5 : Asservissement de position à temps discret question Q.50/ (à compléter)



1. PARTIE A

Q.1/ Lister les éléments matériels... 3 podiums, 4 coins / podium

Fonction F1 : 12 courroies crantées
24 roues dentées
12 câbles liaisonTopologie $\Rightarrow$ longueur câbles = 5-10 m à 25-30 mFonction F1bis : 12 codeurs (sur arbre moteur)
12 câbles liaisonTopologie $\Rightarrow$ longueur câbles mini 50 m, maxi 100-150 mFonction F7 : 12 variateurs
12 machines à courant continu
12 réducteurs
12 ensembles poulie / contre-poids / câble de suspension.Lister ... fonctions logicielles : calcul vitesse F4
calcul commande F5
Supervision F3Q.2/ Relation littérale reliant R_{oz} , R_{cod} , r_t $\Delta g = R_{poulie} \times \Delta \theta_{poulie}$

$$R_{og} = \frac{D_2}{2} \times \frac{1}{r_t} \times \frac{2\pi}{R_{cod}} = \frac{\pi D_2}{r_t R_{cod}}$$

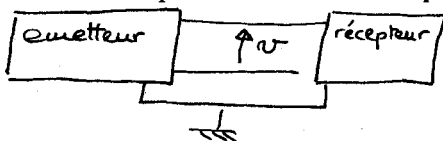
Q.3/ On souhaite utiliser un codeur 500 points. Justifier le choix du rapport de réduction $r_t = 32$.

$$R_{cod} = \frac{2\pi}{500} \Rightarrow R_{og} \neq 0, 1 \text{ mm} < 2 \text{ mm} \text{ cahier des charges vérifié.}$$

 N_{Max} : vitesse maximale de rotation du moteur à courant continu

$$V_{pmax} \Rightarrow \Omega_{moteur max} = V_{pmax} \times \frac{2}{D_2} = 19,2 \text{ rad/s} \rightarrow N_{max} = 183 \text{ tr/min}$$

Q.4/ Définir ce qu'est une liaison électrique de type différentiel et expliciter ses avantages.

* pas de lien entre l'information et la masse
* bonne immunité aux bruits.

Q.5/ Justifier le choix du codeur incrémental XCC-HF4A30. On mettra en regard ... Chaque élément du sigle devra être analysé.

	spécifications	cahier des charges
XCC HF	charge max axiale 40N, radiale 60N	Charges axiales/radiales $< 35 \text{ N}$
4	IP 64	Protection projection d'eau dans toutes les directions
	raccordement embase arrière	choix filaire de la longueur de câble, pas de raccord
A	étage sortie, émetteur ligne, Alim 5V $I = 220 \text{ mA}$, sortie RS422	pas de spécifications sortie différentielle avec câble $\leq 1,2 \text{ km}$ ou ici bonne immunité aux bruits demandée et câble $\leq 150 \text{ m}$, cf Q3
30	500 pts	

Q.6/ Déterminer la valeur de la puissance nominale d'un moteur.

$$\text{Puissance} = (F_u)_{max} \cdot V_{pmax} + P_{artes} \cdot V_{pmax} \quad \text{et} \quad P_N = \frac{4}{3} \text{ Puissance}$$

$$\text{avec } F_{u max} = \frac{M_{pmax} - M_{cpoids}}{4} \cdot g \quad \text{Rq: la masse du contre-poids n'étant pas donnée on peut choisir } M_{cpoids} = M_{min}$$

Choisir un variateur ... référence, caractéristiques nominales en tension et en courant (U_N , I_N) du moteur.tension réseau = 460V $\rightarrow U_M = 510 \text{ V}$ si $M_{cpoids} = 0 \rightarrow P_N = 126,5 \text{ kW}$ $I_M \# 250 \text{ A}$ et D11V 2342 - 350 A ; $I_N = 350 \text{ A}$ $M_{cpoids} = M_{min} \rightarrow P_N = 34,5 \text{ kW}$ $I_M \# 67 \text{ A}$ et D11V 2342 - 75 A ; $I_N = 75 \text{ A}$ $M_{cpoids} = \frac{M_{min} + M_{pmax}}{2} \rightarrow P_N = 17,25 \text{ kW}$ $I_M \# 34 \text{ A}$ et D11V 2342 - 45 A ; $I_N = 45 \text{ A}$