

SESSION 2011

---

**CAPET  
CONCOURS EXTERNE  
ET CAFEP**

**Section : TECHNOLOGIE**

**ÉCRIT 1  
ÉPREUVE DE SYNTHÈSE**

Durée : 5 heures

---

*Calculatrice électronique de poche – y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.*

*L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Dans le cas où un(e) candidat(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.*

*De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.**

**Tournez la page S.V.P.**

(A)

## **SÉCURISATION ET MODERNISATION DES « ÉQUIPES À TOILES » DE L'OPÉRA BASTILLE**

**Ce sujet comporte :**

- un dossier de présentation et le travail demandé pages 2 à 28 ;
- des documents annexes pages 29 à 43 ;
- des documents réponses pages 44 à 46.

**Une lecture préalable et complète du sujet est indispensable.**

Le candidat doit rédiger les différentes parties du sujet sur les feuilles réponses et des feuilles de copie.

Il lui est rappelé qu'il doit utiliser les notations propres au sujet, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Il sera tenu compte de la présentation de la copie, de la qualité de la rédaction (orthographe et syntaxe), en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul.

Si le sujet (les questions ou les annexes) conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il est demandé au candidat de la (ou les) mentionner explicitement sur la copie.



## SÉCURISATION ET MODERNISATION DES « ÉQUIPES À TOILES » DE L'OPÉRA BASTILLE

### Mise en situation



Inauguré le 13 juillet 1989, la veille du bicentenaire de la Révolution Française, l'Opéra Bastille peut accueillir 2 700 spectateurs. Il propose une programmation variée, alternant en permanence trois spectacles différents. À chaque nouvelle représentation, bien sûr, les décors changent.



Avec ses équipements de scène uniques, ses ateliers intégrés de décors, costumes et accessoires, ses salles de travail et de répétitions, l'Opéra Bastille constitue un grand théâtre moderne qui a été la première grande salle de spectacle en France à automatiser sa machinerie scénique il y a une vingtaine d'années.

Également créé en 1989, le service Génie Scénique de l'Opéra Bastille s'occupe de la gestion du matériel technique mis en œuvre lors d'un spectacle. Il est chargé de l'étude d'équipements scéniques structurels tels que les ponts de lumière, les tampons d'apparition, les fosses d'orchestre, les éléments de manutention, les cintres sur lesquels sont suspendus les décors, les tentures, etc. Il étudie en étroite collaboration avec les bureaux d'études internes les équipements spécifiques aux spectacles tels que les plates-formes tournantes et l'animation d'éléments de décors. Il assure la maintenance de ces équipements et assiste les opérateurs durant les répétitions et les spectacles.

L'activité du secteur du spectacle vivant, bien que spécifique, entre dans le champ d'application de l'article L231-1 du code du travail qui définit les établissements soumis à la réglementation sur l'hygiène et les conditions de travail.

Le respect des normes de sécurité spécifiques au génie scénique permet de s'assurer que toutes les dispositions ont été prises afin de limiter tout risque d'accident (basculement des charges, chute de charges avec risque de contusion, fracture, décès), notamment dans les situations suivantes :

- chargement des cintres (partie supérieure de la scène d'où l'on fait descendre et où l'on fait remonter des équipements de scène : décors, tentures, rampes d'éclairage) ;
- levage de charges au dessus des personnes ;
- « vol » d'acteur ;
- élévation de personnes à l'aide du cintre pour le réglage de projecteurs ;
- montage et démontage des décors suspendus.

### **Présentation du support**

Le système de déplacement vertical des décors suspendus appelé « équipes à toiles » de l'Opéra Bastille a été récemment rénové afin de :

- se conformer aux directives européennes en matière de normes de sécurité spécifiques au génie scénique (voir document **annexe 1**) ;
- simplifier la complexité des mécanismes de tringlerie, de contrepoids et de câbles de la machinerie scénique afin de minimiser le risque d'abîmer ou de détruire un décor dont le coût peut atteindre quelques centaines de milliers d'euros ;
- réduire les coûts de maintenance (les câbles sont vérifiés tous les six mois et après chaque démontage des décors) ;
- informer l'opérateur du poids des décors suspendus ;
- permettre deux types de pilotage :
  - ✓ un pilotage individuel en mode manuel avec lequel les ordres élémentaires de mouvement permettent de commander directement les équipements de scène concernés ;
  - ✓ un pilotage synchronisé en mode automatique avec lequel un des automates « maîtres » (redondant afin de prévenir un éventuel dysfonctionnement) assure le déplacement de plusieurs équipements ;
- assurer la continuité du spectacle en cas de défaillance partielle de l'automatisme ;
- ne pas générer de bruit perceptible au niveau de la scène.

Le synoptique simplifié d'une « équipe à toile » de l'installation rénovée est donné page suivante :

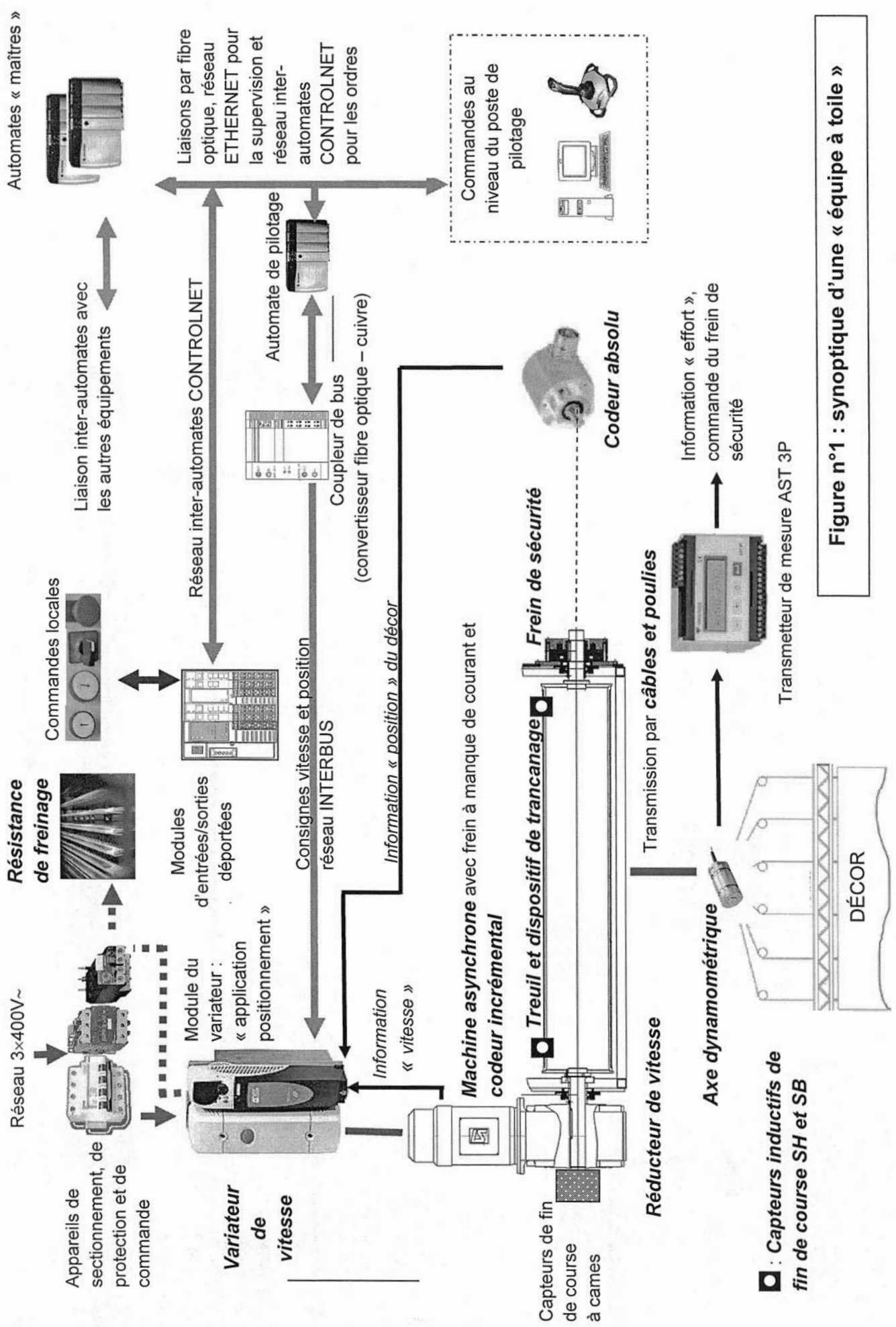
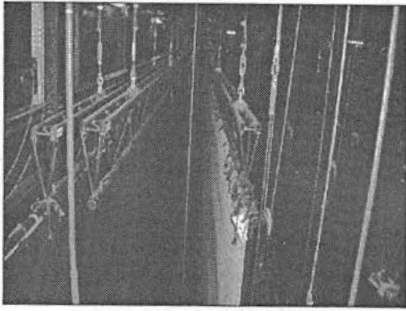
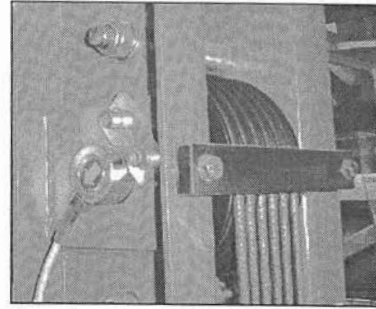


Figure n°1 : synoptique d'une « équipe à toile »

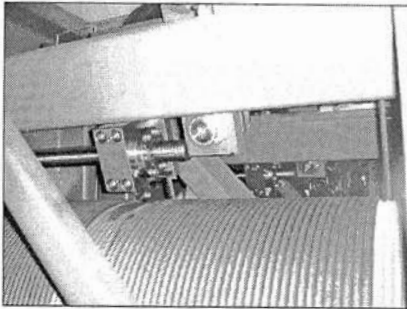
Tournez la page S.V.P.



*Décors*



*Axe dynamométrique sur poulie*



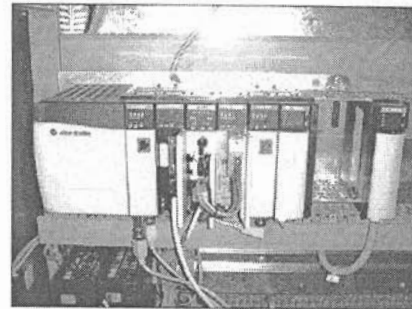
*Treuil avec dispositif de trancanage*



*Capteur inductif de fin de course (treuil)*



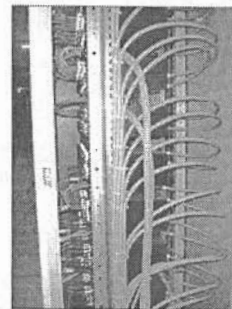
*Machine asynchrone et réducteur*



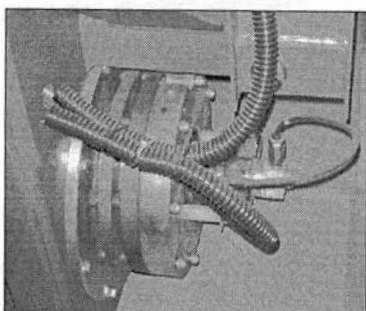
*Automate de pilotage*



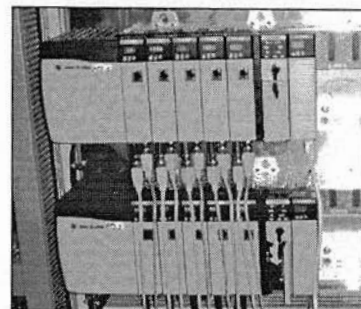
*Variateur de vitesse*



*Liaison fibre optique – cuivre*



*Frein de sécurité et codeur absolu*



*Automates « maîtres »*

## Cahier des charges

- masse maximale du décor :  $M = 1\,580\text{ kg}$  ;
- vitesse maximale du décor :  $V_{max} = 1,23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ;
- course maximale du décor :  $L_{max} = 37\text{ m}$  ;
- précision de positionnement vertical du décor :  $p = 1\text{ mm}$  ;
- distance maximale parcourue par le décor lors d'un arrêt d'urgence à vitesse maximale et à charge maximale :  $d_{dmax} = 2\text{ m}$  ;
- l'accélération du décor dans les conditions de charge et de vitesse maximales doit être conforme au profil trapézoïdal ci-dessous ( $t_a = t_d = 1,5\text{ s}$ ) :

### Vitesse de déplacement du décor $V(t)$

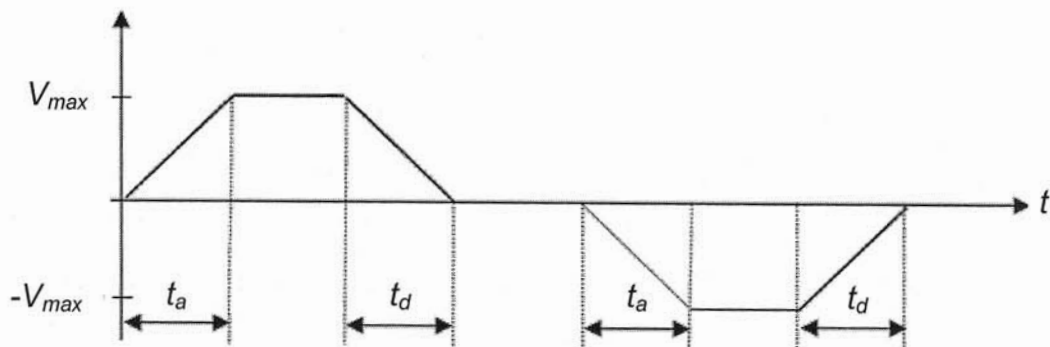


Figure n°2 : profil de vitesse

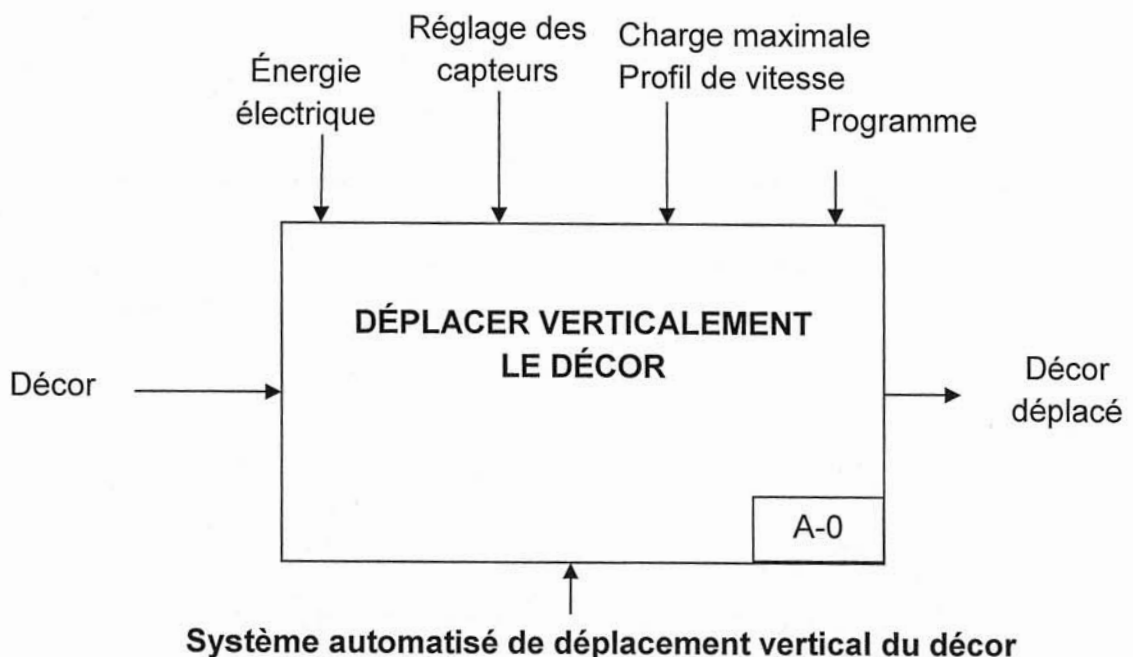


Figure n°3 : actigramme A-0 d'une « équipe à toile »



## **Travail demandé**

On se propose de justifier que les choix faits par les concepteurs, lors de la rénovation du système de déplacement des décors, permettent de respecter scrupuleusement les normes de sécurité spécifiques au génie scénique.

Le travail à réaliser se décompose en cinq parties :

- partie 1 : appropriation du système ;
- partie 2 : choix de la motorisation du système, justification de la configuration avec ou sans contrepoids ;
- partie 3 : choix et paramétrage du variateur électronique de vitesse et sélection de la résistance de freinage ;
- partie 4 : analyse de la commande du frein de sécurité et validation du choix de celui-ci ;
- partie 5 : choix des capteurs assurant la sécurité lors de l'accrochage et du positionnement du décor et synthèse.

# Partie 1

*L'objectif de cette partie est de s'approprier le système.*

**Question 1.1 :** Compléter sur le **document réponse 1** les actigrammes « chaîne d'information – chaîne d'énergie » en indiquant les noms des solutions constructives (repérées **en gras** sur le synoptique d'une « équipe à toile » en page 4).

**Extrait du memento de la sécurité dans le spectacle vivant :**

*« Les déplacements des charges sont programmés et exécutés en automatique.*

**Mesures préventives :**

*Un système de contrôle intégré à l'automatisme vérifiera en continu et en temps réel la concordance entre les déplacements programmés et ceux réalisés. »*

**Question 1.2 :** À l'aide du synoptique (page 4) d'une « équipe à toile » et au vu des normes de sécurité spécifiques au génie scénique :

- **justifier** la redondance de l'automate « maître » ;
- **indiquer** l'avantage principal des modules d'entrées/sorties déportées par rapport à un automatisme à architecture totalement centralisée ;
- **justifier** l'utilisation, pour les ordres de commande, d'un réseau inter-automates déterministe (CONTROLNET) ;
- **indiquer** deux avantages de la fibre optique comme support physique de transmission par rapport à une transmission par « cuivre ».

## Partie 2

### Extrait du memento de la sécurité dans le spectacle vivant :

« Usure des câbles et appareil de levage.

*Risques : Chute de charge entraînant fracture, chute, contusion.*

#### **Mesures préventives :**

*Faire vérifier tous les 6 mois les câbles et après tout démontage du décor. »*

L'installation initiale de déplacement du décor utilisait une machine à courant continu et des contrepoids. Lors de la rénovation, deux études ont été menées simultanément afin de répondre au nouveau cahier des charges, l'une en gardant un système de contrepoids, l'autre en supprimant entièrement celui-ci. Dans les deux cas, il était prévu de remplacer la machine à courant continu par une machine asynchrone.

*L'objectif de cette partie est d'effectuer ces deux études afin de justifier le choix des concepteurs de l'installation au regard des contraintes spécifiques imposées par le cahier des charges.*

**Question 2.1 :** Justifier brièvement, au vu des évolutions technologiques, le remplacement de la machine à courant continu par une machine asynchrone lors de la rénovation.

#### **Vérification de la motorisation pour la configuration avec contrepoids :**

Le tambour du treuil entraîne un contrepoids S2 grâce au câble A, ce qui induit le déplacement vertical du décor S1 à une vitesse maximale de  $1,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  par l'intermédiaire de six câbles ; sur le schéma cinématique proposé page suivante, un seul câble est représenté, noté B.

On fera l'hypothèse que le câble A ne glisse pas sur le tambour.

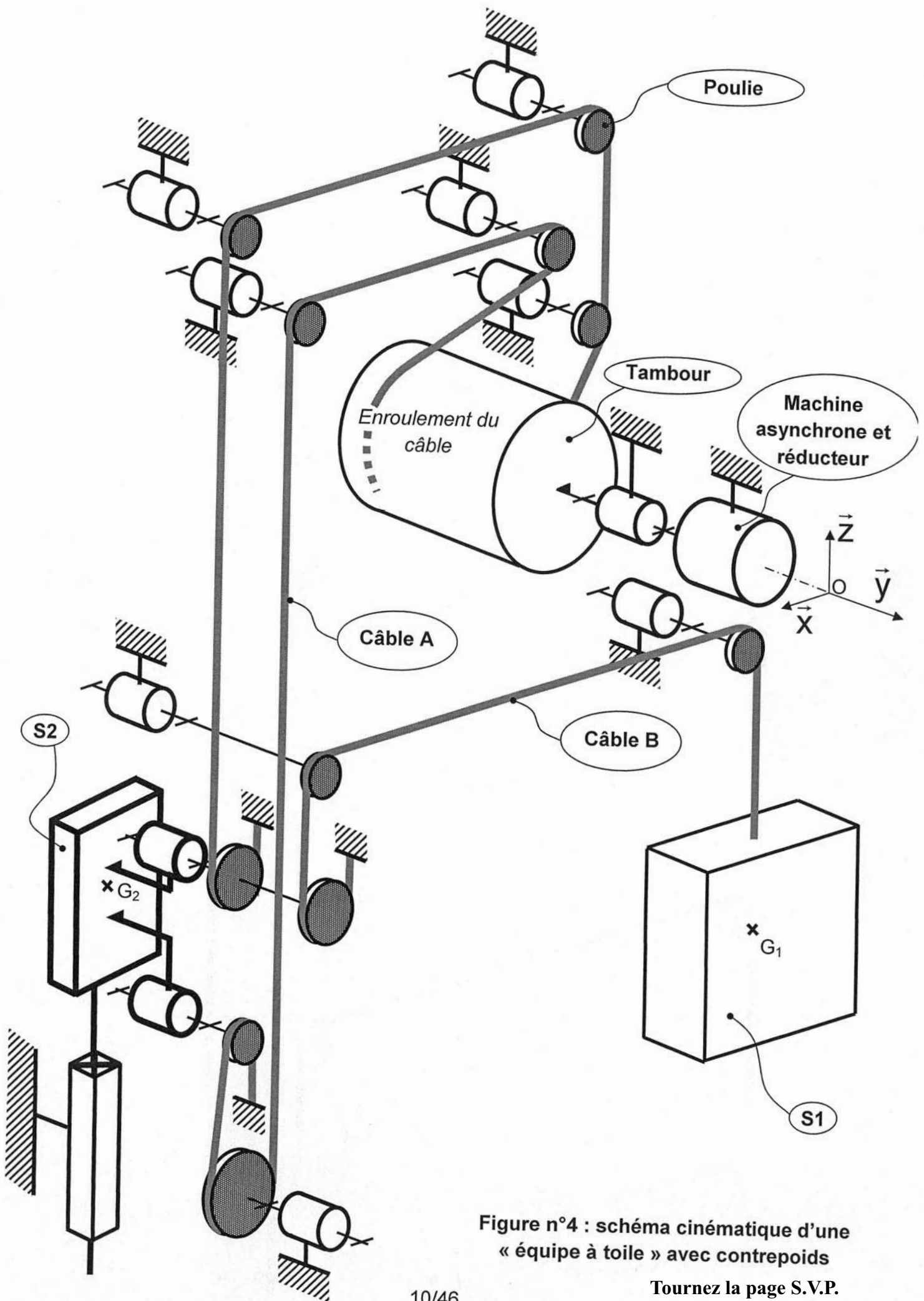


Figure n°4 : schéma cinématique d'une « équipe à toile » avec contrepoids

Tournez la page S.V.P.

**Hypothèses :**

- l'élasticité des câbles est négligée ;
- la masse des câbles est négligée ;
- le moment d'inertie des différentes poulies par rapport à leur axe de rotation est négligé ;
- les liaisons sont supposées parfaites ;
- le rendement des poulies est supposé égal à 1.

**Données :**

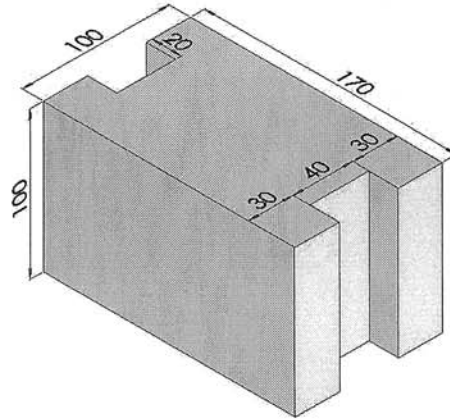
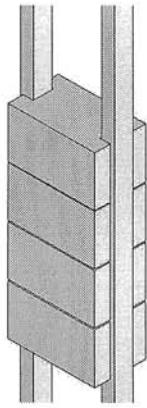
- le repère  $R_g(O, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$  est un repère galiléen lié au bâti 0 ;
- le centre d'inertie du solide S1 est noté  $G_1$ , sa position est définie par :  
$$\overrightarrow{OG_1} = a_1 \cdot \bar{x} + b_1 \cdot \bar{y} + z_1(t) \cdot \bar{z} ;$$
- le mouvement du décor S1 est une translation de direction verticale, on notera  $\vec{V}_{G_1,1/0}$  la vitesse du solide S1 par rapport au bâti 0 ;
- le centre d'inertie du solide S2 est noté  $G_2$ , sa position est définie par :  
$$\overrightarrow{OG_2} = a_2 \cdot \bar{x} + b_2 \cdot \bar{y} + z_2(t) \cdot \bar{z} ;$$
- le mouvement du contrepoids S2 est une translation de direction verticale, on notera  $\vec{V}_{G_2,2/0}$  la vitesse du solide S2 par rapport au bâti 0 ;
- course maximale du décor :  $L_{max} = 37$  m ;
- hauteur des coulisses de la cage de scène : 40 m.

Les questions 2.2 à 2.4 ont pour objectif de vérifier que la hauteur et le déplacement du contrepoids sont compatibles avec les dimensions des coulisses de la cage de scène.

**Question 2.2 :** Donner le sens de rotation nécessaire du tambour pour une montée du décor S1. Dans ce cas, **préciser** le sens de déplacement du contrepoids S2.

**Question 2.3 :** Déterminer la course du contrepoids correspondant à un déplacement du décor de 37 m.

Le contrepoids est constitué d'un empilement de pains en fonte représentés sur la figure ci-après :



Les dimensions sont données en mm.

**Figure n°5 : pains en fonte**

**Question 2.4 :** Sachant que la masse volumique de la fonte est de  $7,8 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$ , **déterminer** la hauteur nécessaire pour obtenir un empilement de 1 320 kg. **Conclure** en indiquant si la hauteur et le déplacement correspondant du contrepoids sont compatibles avec les dimensions des coulisses de la cage de scène.

Les questions 2.5 à 2.10 ont pour objectif de vérifier que la machine asynchrone référencée LSMV 160 LU permet de répondre au cahier des charges correspondant à la configuration avec contrepoids.

**Données :**

- couple exercé par le stator de la machine asynchrone sur le rotor (considéré comme le couple utile) :  $C_m(t) \cdot \vec{y}$  ;
- fréquence de rotation du rotor de la machine asynchrone :  $\omega_m(t)$  en  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$  ;
- fréquence de rotation du tambour du treuil :  $\omega_t(t)$  en  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$  ;
- l'accélération du décor dans les conditions de charge et de vitesse maximales doit être conforme au profil trapézoïdal donné à la **figure 2** en page 6 ;
- diamètre du tambour :  $D = 0,36 \text{ m}$  ;
- masse maximale du décor :  $M = 1\,580 \text{ kg}$  ;
- masse du contrepoids :  $m = 1\,320 \text{ kg}$  ;
- accélération de la pesanteur  $g \approx 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  ;
- rapport de réduction du réducteur :  $r = \frac{\omega_m(t)}{\omega_t(t)} = 19,9$  ;
- moment d'inertie équivalent de l'ensemble « rotor de la machine asynchrone + réducteur + tambour » ramené sur l'arbre moteur  $J_{eq} = 0,122 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ .

### **Hypothèses :**

- l'élasticité des câbles est négligée ;
- la masse des câbles est négligée ;
- le moment d'inertie des différentes poulies par rapport à leur axe de rotation est négligé ;
- les liaisons sont supposées parfaites ;
- le rendement des poulies est supposé égal à 1.

**Question 2.5 :** Exprimer le torseur des actions mécaniques extérieures correspondant à :

- 1 : l'action de la pesanteur sur le décor ;
- 2 : l'action de la pesanteur sur le contrepoids ;
- 3 : l'action du bâti sur le rotor de la machine asynchrone ;
- 4 : l'action du stator sur le rotor de la machine asynchrone.

Pour déterminer le couple moteur maximal  $C_{mmaxi}$ , on propose d'appliquer le Théorème de l'Énergie Cinétique au système isolé (rotor de la machine asynchrone + réducteur + tambour + poulies + contrepoids S2 + décor S1 + câbles) en mouvement par rapport au bâti dont le repère associé est supposé galiléen.

On se placera dans le cas d'une phase de montée du décor de masse maximale.

On supposera que le rendement de la chaîne de transmission est égal à 1.

**Question 2.6 :** Exprimer la puissance développée :

- 1 : par l'action de la pesanteur sur le décor notée  $P_{pes \rightarrow 1/Rg}$  en fonction de  $M$ ,  $g$  et  $\frac{dz_1(t)}{dt}$  puis en fonction de  $M$ ,  $g$ ,  $D$ ,  $r$  et  $\omega_m(t)$  ;
- 2 : par l'action de la pesanteur sur le contrepoids notée  $P_{pes \rightarrow 2/Rg}$  en fonction de  $m$ ,  $g$  et  $\frac{dz_2(t)}{dt}$  puis en fonction de  $m$ ,  $g$ ,  $D$ ,  $r$  et  $\omega_m(t)$  ;
- 3 : par l'action du bâti sur le rotor de la machine asynchrone notée  $P_{0 \rightarrow m/Rg}$  ;
- 4 : par l'action du stator sur le rotor de la machine asynchrone notée  $P_{mot/Rg}$  en fonction de  $C_m(t)$  et  $\omega_m(t)$ .

**Question 2.7 :** Déterminer l'énergie cinétique galiléenne :

-1 : du décor notée  $E_{c1/Rg}$  en fonction de  $M, D, r$  et  $\omega_m(t)$  ;

-2 : du contrepoids notée  $E_{c2/Rg}$  en fonction de  $m, D, r$  et  $\omega_m(t)$  ;

-3 : de l'ensemble « rotor de la machine asynchrone + réducteur + tambour » notée  $E_{c_{m+r+t/Rg}}$ .

**Question 2.8 :** Appliquer le Théorème de l'Énergie Cinétique au système isolé et en déduire l'expression littérale de  $C_m(t)$  uniquement en fonction de  $\omega_m(t)$  et/ou de ses dérivées ainsi que des grandeurs  $D, M, m, g, J_{eq}$  et  $r$ .

**Question 2.9 :** La machine asynchrone choisie a pour référence LSMV 160 LU (voir document **annexe 2**), conclure en indiquant si celle-ci est adaptée afin de soulever le décor à une vitesse constante de  $1,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

**Question 2.10 :** Calculer le couple maximum  $C_{mmaxi}$  qui est nécessaire afin de respecter le profil de vitesse imposé par le cahier des charges. Conclure si la machine asynchrone choisie peut délivrer ce couple sachant que son couple de démarrage est de 2,3 fois son couple nominal.

Les questions 2.11 à 2.17 ont pour objectif de valider le choix de la machine asynchrone pour la configuration sans contrepoids.

**Vérification de la motorisation pour la configuration sans contrepoids :**

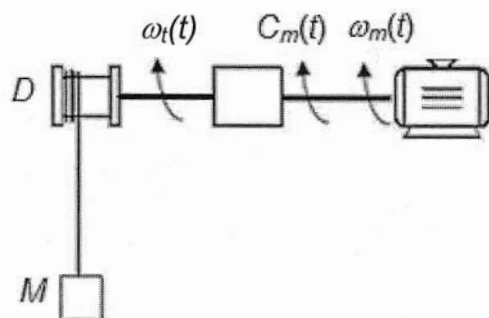


Figure n°6 : schéma d'une « équipe à toile » sans contrepoids



### Données :

- couple exercé par le stator de la machine asynchrone sur le rotor (considéré comme le couple utile) :  $C_m(t)$  en  $\text{N}\cdot\text{m}$  ;
- fréquence de rotation du rotor de la machine asynchrone :  $\omega_m(t)$  en  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$  ;
- fréquence de rotation du tambour du treuil :  $\omega_t(t)$  en  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$  ;
- diamètre du tambour :  $D = 0,36 \text{ m}$  ;
- masse maximale du décor :  $M = 1\,580 \text{ kg}$  ;
- vitesse de déplacement du décor :  $V(t)$  en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  ;
- l'accélération du décor dans les conditions de charge et de vitesse maximales doit être conforme au profil trapézoïdal donné à la **figure 2** page n°6 ;
- accélération de la pesanteur  $g \approx 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  ;
- rapport de réduction du réducteur :  $r = \frac{\omega_m(t)}{\omega_t(t)} = 19,9$  ;
- moment d'inertie du tambour par rapport à son axe de rotation :  $J_t = 10,15 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  ;
- moment d'inertie du rotor de la machine asynchrone par rapport à son axe de rotation noté  $J_m$ , voir document **annexe 2**.

### Hypothèses :

- l'élasticité des câbles est négligée ;
- la masse des câbles est négligée ;
- le moment d'inertie des différentes poulies par rapport à leur axe de rotation est négligé ;
- le couple de pertes de la machine asynchrone est négligé ;
- les liaisons sont supposées parfaites ;
- le rendement des poulies est supposé égal à 1 ;
- l'inertie du réducteur est négligée.

On considère l'ensemble S constitué du rotor de la machine asynchrone, du réducteur, du tambour et du décor en mouvement par rapport à un repère galiléen lié au sol noté  $R_g$ .

**Question 2.11 :** Donner l'expression de la fréquence de rotation du rotor de la machine asynchrone notée  $\omega_m(t)$  en fonction de la vitesse  $V(t)$  de translation du décor. On fera l'hypothèse que le câble ne glisse pas sur le tambour.

**Question 2.12 :** Donner l'expression de l'énergie cinétique galiléenne de S en fonction de  $V(t)$ ,  $J_t$ ,  $J_m$ ,  $M$ ,  $D$  et  $r$ .

**Question 2.13 :** Appliquer le Théorème de l'Énergie Cinétique à S, en déduire une relation liant  $C_m(t)$ ,  $g$ ,  $J_t$ ,  $J_m$ ,  $M$ ,  $D$ ,  $r$  et  $\frac{dV(t)}{dt}$ .

**Question 2.14 :** En **déduire** l'expression du couple moteur  $C_m(t)$  en fonction de  $g, J_t, J_m, M, D, r$  et  $\frac{dV(t)}{dt}$ .

**Question 2.15 :** **Donner** la valeur de la puissance utile fournie par la machine asynchrone lors du déplacement du décor à vitesse constante maximale.

**Question 2.16 :** **Vérifier** à l'aide du document **annexe 2** que la machine référencée LSMV 200 L convient.

**Question 2.17 :** **Relever** sur le document **annexe 2** la valeur du moment d'inertie du rotor de la machine asynchrone choisie ; en **déduire** la valeur maximale de  $C_m(t)$  permettant d'obtenir le profil vitesse imposé par le cahier des charges. **Conclure** si la machine précédemment choisie convient.

### **Comparaison des deux configurations**

*L'objectif des questions 2.18 et 2.19 est de comparer les machines asynchrones pour les deux configurations (avec et sans contrepoids) puis de justifier le choix de la configuration la mieux adaptée au cahier des charges.*

**Question 2.18 :** **Conclure** en comparant pour les deux configurations (avec et sans contrepoids) les caractéristiques des deux machines asynchrones.

**Question 2.19 :** Malgré un coût d'investissement plus élevé, la configuration sans contrepoids a été finalement choisie, **justifier** ce choix au regard du cahier des charges.

<p><b>Dans toute la suite du sujet, on se placera dans le cas de la configuration sans contrepoids (voir figure n°6).</b></p>
---

## Partie 3

### Extrait du mémento de la sécurité dans le spectacle vivant :

« Les déplacements des charges sont programmés et exécutés en automatique.

### Mesures préventives :

Pour les établissements neufs ou rénovés :

- étudier et mettre en place un bloc de treuil, réducteur, moteur, frein, câble, asservissement de vitesse doté d'un système de dialogue avec intelligence intégrée permettant l'autocontrôle des mouvements ou bien limiter la vitesse de déplacement des dispositifs d'accrochage des éléments scéniques à moins de  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . »

L'objectif de cette partie est de choisir le variateur électronique de vitesse et la résistance de freinage puis de valider leurs conditions de mise en œuvre.

La machine utilisée a les caractéristiques nominales suivantes :

- puissance utile  $P_u = 30 \text{ kW}$  ;
- fréquence de rotation du rotor  $N_{nom} = 1\,476 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$  ;
- rendement nominal  $\eta = 93\%$  ;
- $\cos \varphi = 0,83$  ;
- alimentation triphasée 50 Hz, 230 V / 400 V ;
- construction fermée IP 55 ;
- moment d'inertie du rotor  $J_m = 0,24 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  ;
- machine auto-ventilée – Classe d'isolation F – Sondes CTP ;
- fixation pour montage intégré sur réducteur série orthobloc.

Les questions 3.1 à 3.6 ont pour objectif d'effectuer le choix d'un variateur de vitesse puis de proposer son paramétrage afin de répondre au cahier des charges.

Malgré la dynamique peu élevée du cycle montée-descente du décor, la précision de vitesse doit être inférieure à 1 %, la vitesse de déplacement du décor doit être réglable de 0 à 100 % de la vitesse maximale.

**Question 3.1 :** À l'aide des indications précédentes et de l'algorithme du document **annexe 3**, **déterminer** le mode de fonctionnement du variateur électronique de vitesse Unidrive SP.

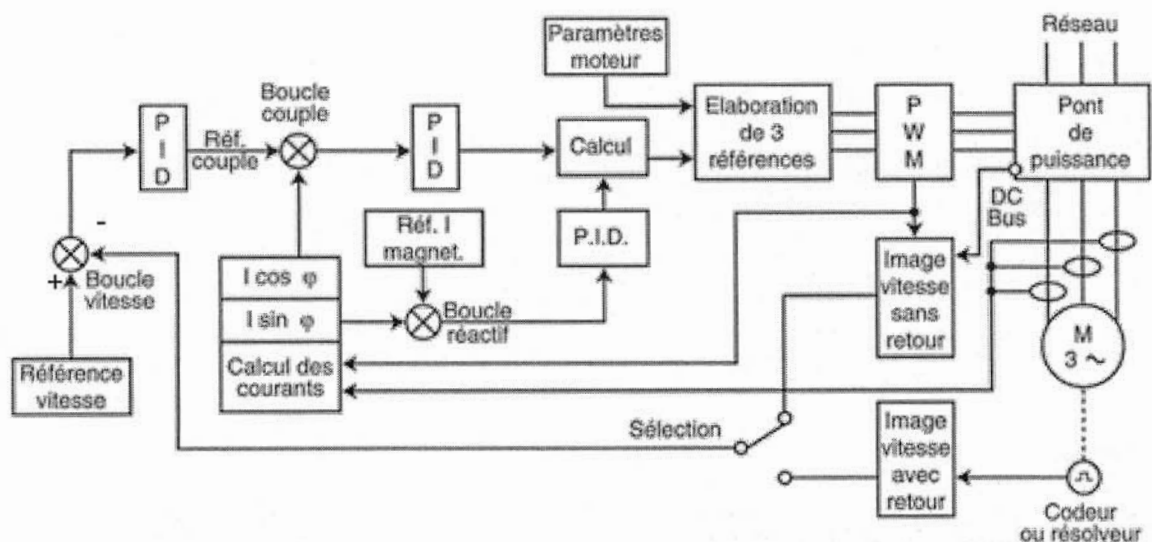
**Question 3.2 :** Donner, à l'aide du document **annexe 4**, sa référence (Taille ...LS....CT....) pour un fonctionnement dans des conditions de température ambiante inférieure à 40°C et une fréquence de découpage de 3 kHz.

**Question 3.3 :** Pour une tension composée de 400 V en sortie du variateur, justifier le couplage de la machine asynchrone puis représenter sa plaque à bornes munie de ses barrettes de couplage (faire apparaître l'alimentation triphasée) puis déterminer le courant nominal absorbé.

**Conclure,** à l'aide des indications du document **annexe 5**, en déterminant les valeurs des paramètres 0,44, 0,45, 0,46, 0,47 à programmer dans le variateur.

**Question 3.4 :** Déterminer à partir du profil vitesse du décor et du document **annexe 5**, les valeurs des paramètres 0,02, 0,03, 0,04 à programmer dans le variateur de vitesse (0,02 correspond à la vitesse la plus élevée, conformément au profil vitesse désiré, avec la consigne au maximum).

Le schéma de principe du variateur de vitesse est donné ci-dessous :



**Figure n°7 : schéma de principe du variateur de vitesse UNIDRIVE SP**

**Question 3.5 :** Désigner, à l'aide du schéma de principe du variateur **figure 7**, à partir de quelles grandeurs est calculée la référence de couple lors d'un fonctionnement avec retour vitesse.

Un codeur incrémental (5 V, 1 024 points, 2 signaux A et B en quadrature) accouplé à l'arbre de rotation de la machine asynchrone permet de réaliser le retour vitesse (**figure n°7**).

**Question 3.6 :** Justifier par calcul qu'une limitation de la vitesse maximale de référence n'est pas nécessaire (voir document **annexe 5**).

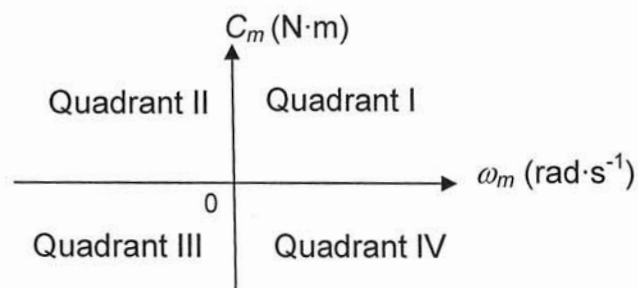
L'objectif des questions 3.7 à 3.19 est d'identifier puis de choisir les constituants qui, associés au variateur, permettent d'assurer la descente du décor.

**Question 3.7 :** Au vu du profil de vitesse imposé dans le cahier des charges, **tracer** sur votre copie la courbe d'évolution de  $\frac{dV(t)}{dt}$  pour les différentes phases lors de la descente du décor.

**Question 3.8 :** En utilisant le résultat de la question 2.14, **tracer** la courbe d'évolution de  $C_m(t)$  pour les différentes phases lors de la descente du décor.

**Question 3.9 :** **En déduire** le tracé de la courbe d'évolution de la puissance instantanée au niveau du rotor de la machine asynchrone pour les différentes phases lors de la descente du décor.

On donne ci-dessous les quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone en convention moteur,  $\omega_m > 0$  correspond à la montée du décor.



**Figure n°8 : quadrants de fonctionnement**

**Question 3.10 :** À l'aide des questions précédentes, **tracer** sur votre copie dans le plan  $C_m = f(\omega_m)$  (voir **figure n°8** ci-dessus) le parcours du point de fonctionnement  $(\omega_m ; C_m)$  lors de la descente du décor.

**Question 3.11 :** **Indiquer** à l'aide de la **figure n°8** le mode et les quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone lors de la montée puis lors de la descente du décor.

**Question 3.12 :** **Déterminer** la valeur de la puissance instantanée maximale (en valeur absolue) au niveau du rotor de la machine asynchrone lors de la descente du décor.

Les principaux constituants du variateur de vitesse associé à la machine asynchrone sont représentés sur la figure ci-après :

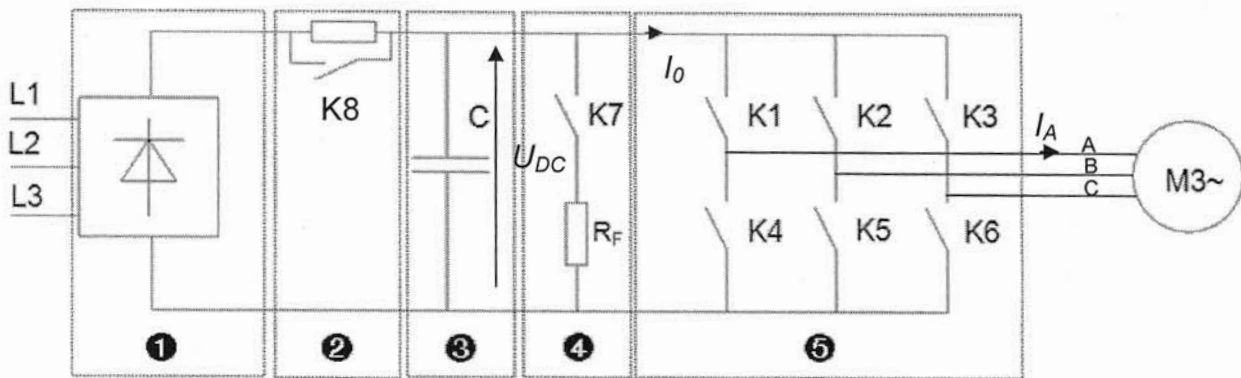


Figure n°9 : schéma structurel de puissance du variateur de vitesse

**Question 3.13 :** Donner le nom et la fonction des éléments repérés 1, 2, 3, 4 et 5 dans le schéma ci dessus.

**Question 3.14 :** Indiquer quel composant ou quelle association de composants permet de réaliser respectivement les interrupteurs statiques K1 à K6 (voir figure n°9).

**Question 3.15 :** Indiquer comment est réalisée l'inversion du sens de rotation de la machine asynchrone afin de permettre la descente du décor.

**Question 3.16 :** Justifier qu'avec la structure du variateur de vitesse, l'énergie électrique ne peut pas être renvoyée au réseau.

**Question 3.17 :** Le contact K8 étant considéré fermé et K7 ouvert, (voir figure n°9), donner l'expression de la puissance instantanée en sortie du redresseur puis justifier que lors de la descente du décor, le courant  $I_0$  est négatif.

**Question 3.18 :** Indiquer quel effet aurait ce courant en l'absence du dispositif constitué de  $R_F$  et K7. Conclure sur le rôle de  $R_F$  et K7.

La machine asynchrone fonctionne en service intermittent temporaire ; il est donc inutile de calculer la puissance thermique équivalente dissipée par la résistance de freinage.

**Question 3.19 :** Conclure à l'aide des résultats précédents en justifiant le choix de la résistance de freinage référencée RF-MD-11000-15 (voir document annexe 6) permettant la descente du décor suivant le profil de vitesse imposé par le cahier des charges. Calculer le courant de réglage du relais thermique assurant la protection thermique de celle-ci (voir document annexe 6).

*L'objectif des questions 3.20 et 3.21 est de vérifier la protection thermique de la machine asynchrone.*

La vitesse de déplacement du décor doit être réglable de **0 à 100 %** de la vitesse maximale.

**Question 3.20 :** La machine asynchrone utilisée étant auto ventilée, **décrire** brièvement quelles seraient les conséquences d'un déplacement prolongé du décor à faible vitesse.

La protection thermique des moteurs est réalisée par les sondes de température PTC DA1 TT 130 intégrées dans le bobinage de la machine asynchrone.

**Question 3.21 :** **Rechercher** dans la documentation du variateur UNIDRIVE SP (document **annexe 7**) la valeur de la résistance de la sonde correspondant au seuil de déclenchement sur défaut thermique puis la valeur correspondant à l'effacement de celui ci.

**Conclure**, en vous justifiant à l'aide du document **annexe 8**, si les sondes CTP DA 1 TT130 associées au variateur UNIDRIVE SP permettent d'assurer la protection thermique de la machine asynchrone (voir document **annexe 9**) lors d'un déplacement prolongé du décor à basse vitesse.

## Partie 4

Extrait du memento de la sécurité dans le spectacle vivant :

« Les déplacements des charges sont programmés et exécutés en automatique.

Mesures préventives :

- chaque poste de commande sera doté d'un **arrêt d'urgence** ;
- le dispositif de commande sera obligatoirement à **action maintenue** ;
- le frein sera à **serrage automatique** en cas de coupure d'énergie et non débrayable ;
- le treuil sera doté d'un réducteur empêchant le dévirage en cas de coupure d'énergie, même en cas de non fermeture des freins. Si cela s'avère impossible par conception, du fait de la vitesse, mettre en service soit **un double frein**, soit un dispositif limitant la vitesse de dévirage (frein glissant). »

L'objectif de cette partie est d'analyser la commande du frein de sécurité (voir synoptique en page 4 et document **annexe 11**) puis de valider son choix.

**Données :**

- masse maximale du décor :  $M = 1\,580$  kg ;
- vitesse du décor : de 0 à  $1,23$  m·s<sup>-1</sup> ;
- distance maximale parcourue par le décor lors d'un arrêt d'urgence à vitesse maximale et à charge maximale :  $d_{d\,max} = 2$  m.

L'objectif des questions 4.1 à 4.8 est de déterminer, en utilisant les schémas des documents **annexes 10 et 11**, les conditions de fonctionnement du frein de sécurité.

On considère que le frein de sécurité est alimenté et que sa partie mobile ne se déplace plus, le tambour du treuil peut alors tourner librement. La conduction au niveau du redresseur à diodes est considérée ininterrompue.

**Question 4.1 :** À l'aide du document **annexe 11**, tracer sur votre copie l'allure de la tension  $V_s(t)$  lorsque le contact temporisé KM3<sub>(28-13)</sub> est fermé puis ouvert, en déduire dans les deux cas l'expression de la valeur moyenne de  $V_s(t)$  en fonction de  $V_{EFF}$ .

**Question 4.2 :** En déduire en fonction de  $V_{EFF}$  et  $R$ , l'expression de la valeur moyenne du courant  $I_s$  lorsque le contact temporisé KM3<sub>(28-13)</sub> est fermé puis ouvert.

**Question 4.3 :** En considérant l'ondulation du courant  $I_s$  négligeable, donner l'expression des pertes par effet Joule dans la bobine de commande du frein en fonction de  $V_{EFF}$  et  $R$  lorsque le contact temporisé KM3<sub>(28-13)</sub> est fermé puis ouvert.



**Question 4.4 :** Indiquer de quoi dépend la force d'attraction de la bobine de commande sur la partie mobile du frein de sécurité puis justifier brièvement la fonction du contact temporisé KM3<sub>(28-13)</sub> associé au module d'alimentation du frein de sécurité.

Afin de permettre l'alimentation du variateur et le déblocage du frein de sécurité, il faut appliquer une tension de + 24 V (« 1 » logique) au niveau des bornes S12 et S52 du relais de sécurité (point S12) (voir le schéma de commande sur le document annexe 10).

**Question 4.5 :** Donner, à l'aide du schéma de commande l'équation logique de S12 en fonction de l'état physique de R1, R2, KA10, BPAU, KA8 et KA9.

**Question 4.6 :** Donner l'équation logique de KA10 en fonction de l'état physique des capteurs de surcourse haut et bas, SH et SB. Dresser la table de vérité correspondante (SH et SB en entrée, KA10 en sortie) et donner le nom de la fonction réalisée.

**Question 4.7 :** Pour KA9 = 1 et BPAU = 0, donner, lorsque KA8 = 0 puis lorsque KA8 = 1, le niveau logique présent au point S12 en cas de surcharge sur les câbles ou de surcourse du décor.

**Question 4.8 :** Conclure en indiquant la fonction de KA8 et citer les ordres entraînant un freinage inconditionnel du tambour du treuil.

*L'objectif des questions 4.9 à 4.15 est de vérifier que la distance maximale parcourue par le décor lors d'un freinage d'urgence à vitesse maximale ( $V_{max} = 1,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) et à charge maximale est inférieure à  $d_{d\ max} = 2 \text{ m}$ .*

**Données :**

- couple de freinage exercé par le frein sur l'axe du tambour du treuil :  $C_f = 3\ 348 \text{ N}\cdot\text{m}$  ;
- masse maximale du décor :  $M = 1\ 580 \text{ kg}$  ;
- diamètre du tambour du treuil :  $D = 0,36 \text{ m}$  ;
- temps de réponse maximum total du relais de sécurité, du contacteur KM3 et du frein : 1,12 s.

**Hypothèses :**

- seule la masse totale à déplacer  $M$  est prise en compte ;
- les moments d'inertie du tambour du treuil, du réducteur et du rotor de la machine asynchrone autour de leurs axes de rotation sont négligés ;
- on se place dans le cas le plus défavorable (en descente).

**Question 4.9 :** **Justifier** brièvement l'intérêt d'une coupure d'alimentation de la bobine de commande du frein en amont et en aval du pont redresseur (voir document **annexe 11**).

**Question 4.10 :** **Calculer** la distance notée  $d_1$  parcourue par le décor durant le temps de réponse.

**Question 4.11 :** Dans le cas d'un freinage d'urgence, **appliquer** le Théorème de la Résultante Dynamique au décor en projection sur l'axe vertical. En **déduire** l'expression de la décélération du décor en fonction de  $C_f$ ,  $D$ ,  $g$  et  $M$ . **Faire** l'application numérique.

**Question 4.12 :** **Donner** l'expression de la durée de la phase de freinage noté  $t_f$  jusqu'à l'arrêt du décor. **Faire** l'application numérique.

**Question 4.13 :** **Calculer** la distance notée  $d_2$  parcourue par le décor pendant le freinage.

**Question 4.14 :** En **déduire** la distance d'arrêt totale notée  $d_{totale}$  parcourue par le décor avant l'arrêt.

**Question 4.15 :** **Conclure** sur le critère fixé en cas d'arrêt d'urgence.