

**SESSION DE 2005**

---

**concours externe  
de recrutement de professeurs agrégés**

---

**section : génie mécanique**

**Composition d'automatique – Informatique Industrielle**

**durée : 4 heures**

*L'usage des instruments de calcul, en particulier calculatrice électronique de poche – y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique, à fonctionnement autonome, non imprimante - est autorisé conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.*

*Tout document ou autre matériel électronique sont interdits*

Le candidat doit obligatoirement traiter les **quatre** parties sur des copies **distinctes**, en précisant bien sur chaque copie, le titre, le repère et la partie de l'épreuve traitée.

## Présentation générale

La société Pechiney-Rhénalu installée à Issoire (Puy de Dôme) est spécialisée dans la fabrication de tôles d'aluminium de différentes épaisseurs à hautes caractéristiques mécaniques. Schématiquement, le processus de fabrication débute par la coulée de lingots d'aluminium et de métaux d'addition qui sont ensuite laminés (série de trains de laminoirs situés dans le hall A) et conditionnés en bobines de grandes dimensions afin de pouvoir être aisément manutentionnées.

Après avoir été transférées (grâce à la ligne LG36, objet de cette étude), ces bobines sont ensuite déroulées et débitées en tôles de différentes dimensions sur une ligne de fabrication à haut rendement (repérée LG37 située dans le hall B).

La figure 1 représente schématiquement le processus de fabrication décrit précédemment.

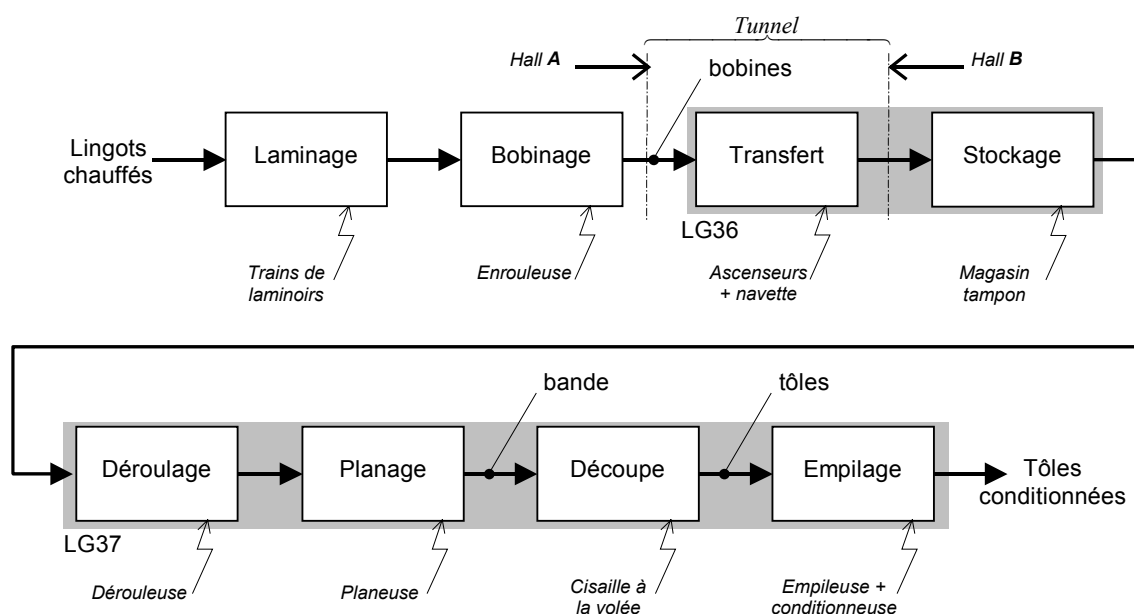


Fig. 1 - Processus de fabrication

## Présentation de la ligne de transfert LG36

Devant la taille des lignes de fabrication (plusieurs centaines de mètres), l'architecture de l'unité de production "Tolerie" ne peut se concevoir qu'en plusieurs halls parallèles entre eux. Il est donc nécessaire de transférer les bobines en cours de processus perpendiculairement à l'axe principal de la ligne.

La fonction principale de l'installation étudiée ici, est d'assurer la manutention automatique de bobines d'alliage d'aluminium à partir du hall A (laminage à chaud) jusqu'au hall B (parachèvement).

L'opération de transfert des bobines comprend les 3 zones et fonctionnalités suivantes :

|        | Fonctions   | Installations            |
|--------|---|--------------------------|
| ZONE 1 | réception, stockage de 4 bobines et transfert une à une sous le descendeur            | pas de pèlerin d'entrée  |
|        | prise et dépose une à une des bobines sur la navette de transfert                     | descendeur               |
| ZONE 2 | transfert des bobines à travers une galerie (Hall A → Hall B)                         | navette                  |
| ZONE 3 | prise des bobines acheminées par la navette et dépose sur le poste de sortie          | ascenseur                |
|        | transfert des bobines une à une sur la zone d'évacuation et de stockage intermédiaire | pas de pèlerin de sortie |

Tab. 1 - Découpage de l'installation

Compte tenu des cadences attendues, le cycle de transfert des bobines du hall A vers le hall B se déroule de manière à optimiser au maximum l'exécution des autres tâches qui peuvent se dérouler en temps masqué.

Une étude fonctionnelle de la ligne LG36 a permis d'en dégager la fonction principale et les fonctions de contrainte regroupées dans la figure 2 ainsi que dans le tableau 2.

### Diagramme des interactions fonctionnelles

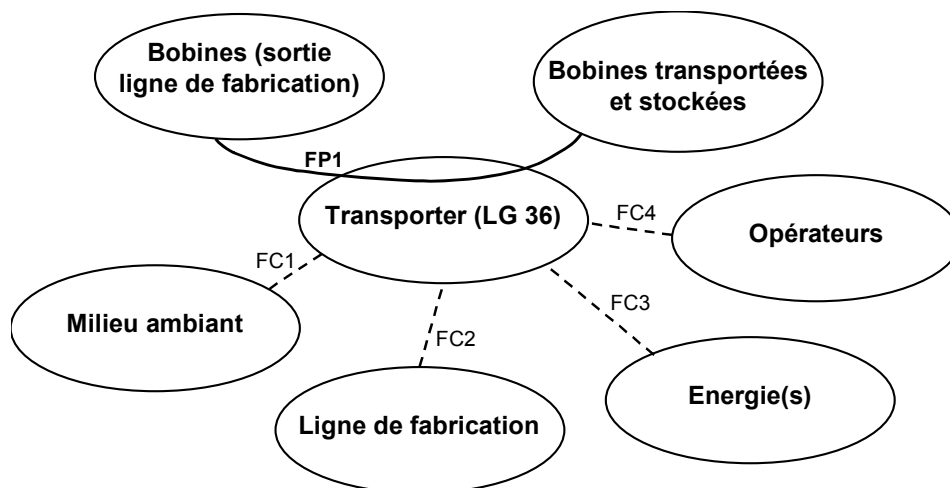


Fig. 2 - Diagramme partiel des interactions fonctionnelles de la LG36

|            |  |
|------------|--|
| <b>FP1</b> | Transférer les bobines                 |
| <b>FC1</b> | Résister à l'environnement             |
| <b>FC2</b> | S'insérer dans la ligne de fabrication |
| <b>FC3</b> | Utiliser l'énergie disponible          |
| <b>FC4</b> | Intervention des opérateurs            |

Tab. 2 - Fonction principale et fonctions de contrainte

## Ordre de grandeur des caractéristiques de la ligne de transfert

|                              |  |
|------------------------------|--|
| Matière                      | bobines en alliages d'aluminium enroulées à chaud ou à froid sur trou ou viroles de diamètre 600 mm, |
| Masse max d'une bobine       | 25 tonnes,   |
| Dimensions bobine            | diamètre ext. mini 900 mm, diamètre ext. maxi 2500 mm, diamètre int. 600 mm,                         |
| Largeur bobine               | de 900 à 2600 mm,  |
| Température maxi             | 380°C,   |
| Temps de transfert (navette) | environ 3 mn   |
| Cadences                     | 60 bobines/8h  |

## Principe de fonctionnement global

On fait référence au synoptique de l'installation (cf **Fig. DR1**). Les bobines formées en sortie du train de laminoirs à chaud (situé dans le hall A) sont transférées vers le poste d'entrée. Implanté au niveau du sol de l'atelier, c'est une zone tampon possédant une capacité de stockage de 4 bobines et qui comprend :

- un système escamotable de margeage permettant de centrer la 1<sup>ère</sup> bobine suivant l'axe du système,
- trois autres positions de stockage (2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup>, et 4<sup>ème</sup> positions) équipées chacune d'un châssis fixe en forme de vé afin de recevoir la bobine (cf **photo1**),
- un système de pas de pèlerin à supports indépendants qui assure le déplacement pas à pas des bobines déposées sur le 1<sup>er</sup> poste vers les 3 autres et ce jusqu'au point de descente dans la galerie.

Après le centrage d'une 4<sup>ème</sup> bobine sur le 1<sup>er</sup> poste, le système est prêt à transférer en série les bobines vers le poste de sortie situé dans le hall B. Ainsi, un descendeur d'entrée assure la prise de la bobine située sur le 4<sup>ème</sup> poste du pas de pèlerin, le levage et la descente de la pince dans l'axe de la navette réceptrice située au niveau inférieur à l'entrée de la galerie puis la dépose de la bobine sur la navette.

La navette (cf **photo2**) transporte une bobine à la fois (avec axe parallèle à la translation) depuis le descendeur d'entrée jusqu'à l'ascenseur de sortie sur une distance de 100 mètres. Sommairement, la navette se compose :

- d'un châssis métallique très robuste constitué de tôles soudées sur des profilés. Ce châssis maintient la bobine à transporter dans un vé de centrage suffisamment profond afin d'en assurer le maintien durant la phase de translation (cf **Fig. DR3** et **DR4**),
- de 2 essieux porteurs (dont un motorisé),
- d'un groupe de propulsion qui comprend un moto-réducteur (cf **Fig. DR2**) équipé d'un variateur de fréquence et d'un frein fonctionnant par manque de courant. Le variateur alimente le moteur via la gaine d'alimentation comprenant 5 étages.

Chacune des extrémités de la galerie est équipée d'un fin de course et de butée munie d'un amortisseur hydraulique. L'extrémité de la galerie côté descendeur est équipée d'un contrôle de gabarit (cellule photoélectrique) visant à l'extérieur du diamètre maximum admissible de la bobine déposée (cf **Fig. DR4**). Une passerelle est située le long de la trajectoire de la navette de transfert en galerie. Un arrêt d'urgence à câble est disponible le long du chemin de roulement à l'intérieur de l'enceinte de sécurité.

Un télémètre type "SickDME laser" permet de mesurer la position instantanée du chariot qui est visible en permanence sur les pupitres de commande (entrée et sortie).

Arrivée à l'extrémité de la galerie côté ascenseur, la bobine est saisie par une pince (mue par un treuil), soulevée et déposée sur le poste N°5 du pas de pèlerin de sortie. Le poste de sortie implanté au niveau du sol de l'atelier dans le hall B comprend une zone tampon de stockage (4 bobines). On retrouve comme pour le poste d'entrée, un système de pas de pèlerin permettant de transférer les bobines déposées par l'ascenseur jusqu'au poste d'évacuation (8<sup>ème</sup> position).

## PARTIE A – Analyse fonctionnelle

Dans cette partie, on centre notre étude sur l'analyse globale du système de transbordement des bobines du hall A vers le hall B. Dans un premier temps, les fonctions des différents systèmes mis en mouvement pour le transbordement sont décrits à l'aide d'un outil approprié. On s'intéresse dans un deuxième temps au profil théorique de la loi de commande en vitesse de la navette.

### A1. Etude globale

**QA1.1 Expliquer** en quelques lignes, le principe de fonctionnement du pas de pèlerin.

- Donner ses avantages et ses inconvénients.
- Quelles autres solutions permettant de réaliser cette fonction auraient pu être mises en œuvre ?

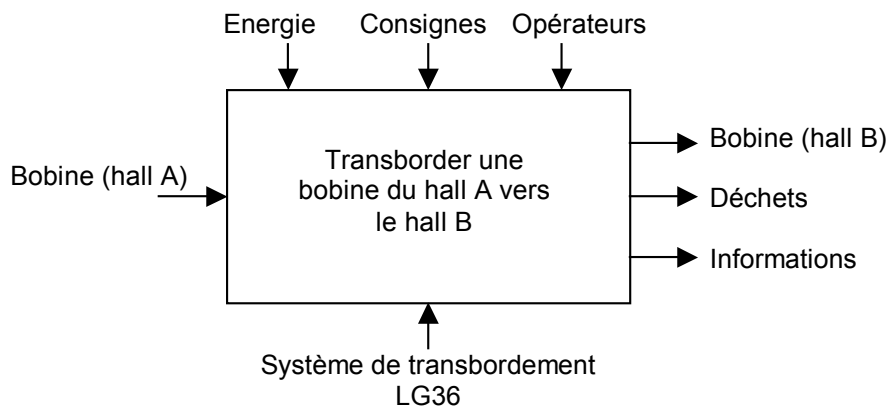


Fig. A1 – Diagramme SADT A-0

**QA1.2** A partir du SADT de niveau A-0 (cf Fig. A1), proposer une description SADT de niveau A0 en mettant particulièrement en évidence les différentes fonctions assurées par la ligne LG36.

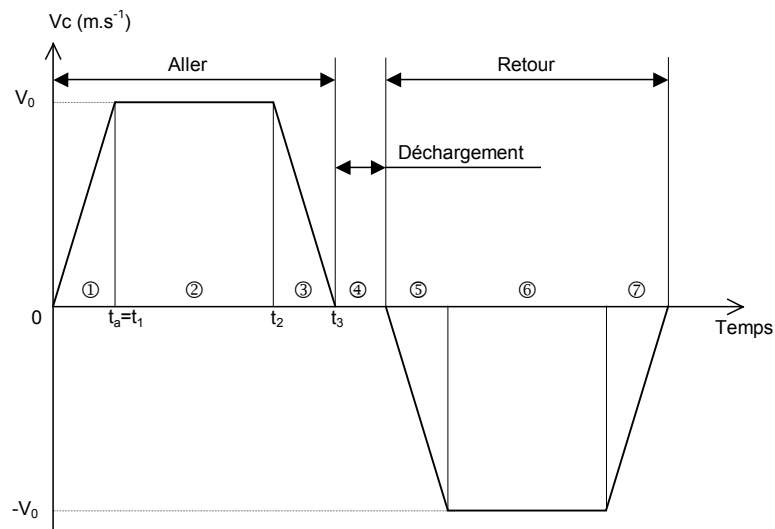
### A2. Etude du profil de la loi de commande en vitesse de la navette

L'accélération de la pesanteur  $\vec{g}$  est telle que  $\vec{g} = -g \vec{Z}_o$ .  $R_o(\vec{X}_o, \vec{Y}_o, \vec{Z}_o)$  sera considérée comme un repère galiléen. La navette chargée d'une bobine d'aluminium de masse volumique  $2.6 \text{ Kg} \cdot \text{dm}^{-3}$  ( $\Phi_{ext} = 2200$ ,  $\Phi_{int} = 600$ ,  $L_b = 2000$ ) se déplace du poste d'entrée vers celui de sortie (cf Fig. DR1). Elle est composée :

- d'un ensemble comprenant un châssis de masse  $M_v$  supportant une bobine de masse  $M_b$ , en translation par rapport au repère galiléen  $R_o$ ,
- d'un essieu moteur arrière dont les 2 galets moteurs sont en contact ponctuel avec frottement avec le rail. On note  $f$  le coefficient de frottement rail/galet,
- d'un essieu avant dont les 2 galets porteurs sont supposés en contact ponctuel parfait avec le rail,

- d'un moto réducteur dont le corps est solidaire du châssis et qui exerce sur l'essieu moteur un couple noté  $C_m(t)$ .

Compte-tenu des masses importantes mises en mouvement, on impose à la navette une loi de consigne en vitesse (cf **Fig. A2**). Les différentes phases de cette loi sont repérées de 1 à 7.



**Fig. A2** - Loi de consigne en vitesse de la navette

- QA2.1 Justifier** en quelques lignes l'allure de la loi de consigne en vitesse (cf **Fig. A2**) imposée à la navette.
- QA2.2 Exprimer** le bilan des actions mécaniques extérieures à l'ensemble isolé  $\Sigma = \{\text{navette} + \text{bobine}\}$ .
- QA2.3 Déterminer** l'accélération maximale de la navette  $\gamma_o$  en fonction du coefficient de frottement au contact galet/rail  $f$  et des dimensions de la navette. On considère que le centre de gravité de l'ensemble  $\Sigma$  est confondu avec celui de la bobine.
- QA2.4 Déterminer** numériquement  $\gamma_o$  si  $f = 0.1$ .

## PARTIE B – Etude de la motorisation de la navette

Dans cette partie, on s'intéresse au groupe de propulsion de la navette de transfert. Dans un premier temps, on cherche à estimer la puissance du moteur équipant la navette. Dans un deuxième temps, en tenant compte des masses importantes mises en mouvement, on évalue la rigidité de la transmission.

### B1- Détermination de la puissance du moteur

Compte-tenu des résidus de lubrifiants contenus entre les spires des bobines et qui sont projetés sur les rails et afin de limiter la puissance du moteur installé, on impose que  $\gamma_o = 0.127 \text{ m.s}^{-2}$ . La fréquence de rotation nominale du moteur est limitée à  $\omega_m = 151 \text{ rd.s}^{-1}$ .

**QB1.1 Déterminer** la puissance du moteur nécessaire afin de satisfaire la loi de vitesse imposée (cf **Fig. A2**). Les calculs seront détaillés, les hypothèses justifiées. Faire l'application numérique.

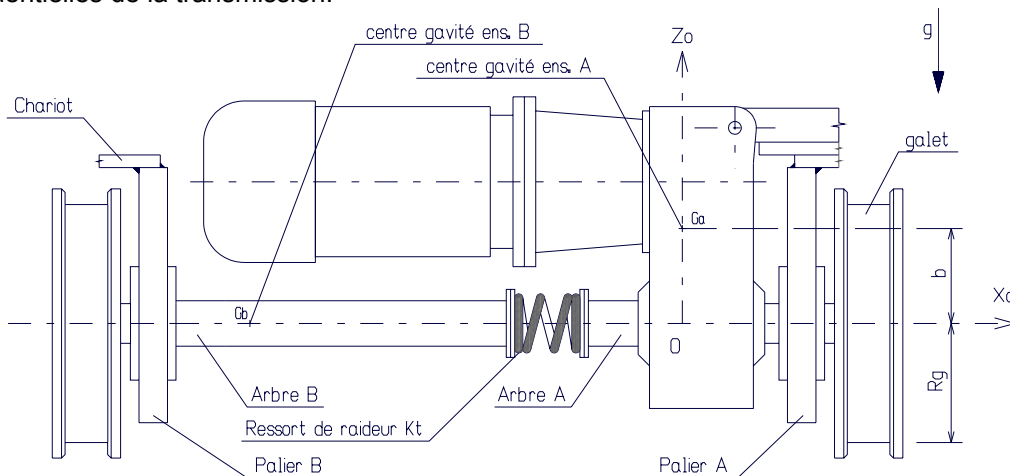
**QB1.2 Déterminer** alors les caractéristiques de la loi de consigne (cf **Fig. A2**) en complétant sur votre feuille, un tableau de la forme :

| Phase | Durée (en s) | Vitesse chariot/sol (en $\text{m.s}^{-1}$ ) | Accélération arbre moteur (en $\text{rd.s}^{-2}$ ) | Fréquence rotation arbre moteur (en $\text{rd.s}^{-1}$ ) | Couple moteur (en N.m) |
|-------|--------------|---|--|--|------------------------|
| 1     |              |   |  |  |                        |
| 2     |              |   |  |  |                        |

**QB1.3** Le temps maximal de 3 mn d'un aller-retour imposé par le cahier des charges est-il respecté ?

### B2- Etude dynamique de la transmission

Le couple transmis en sortie du réducteur est important et la chaîne de transmission (arbre de transmission + double joint de Cardan) ne peut être considérée comme infiniment rigide. Il en résulte un désynchronisme possible des deux fréquences de rotation de galets moteurs de la navette. On propose de modéliser dynamiquement la transmission en introduisant une barre de torsion de raideur  $K_t$  comme le montre la figure **B1** et de déterminer les caractéristiques fréquentielles de la transmission.



**Fig. B1 - Modélisation dynamique de l'arbre de transmission**

La transmission modélisée comprend donc un arbre A infiniment rigide, sur lequel s'applique un couple noté  $C_a(t)$  et qui tourne à une fréquence de rotation  $\omega_a(t)$ . Cet arbre est relié à l'arbre B par l'intermédiaire d'un ressort de torsion. Les paliers A et B supportant les deux demi arbres A et B sont le siège de frottement de type visqueux (notés  $f_a$  et  $f_b$ ). On note  $\gamma(t)$  l'accélération de la navette. Le moment d'inertie du moteur est noté  $I_m$ , celui du réducteur  $I_r$ .

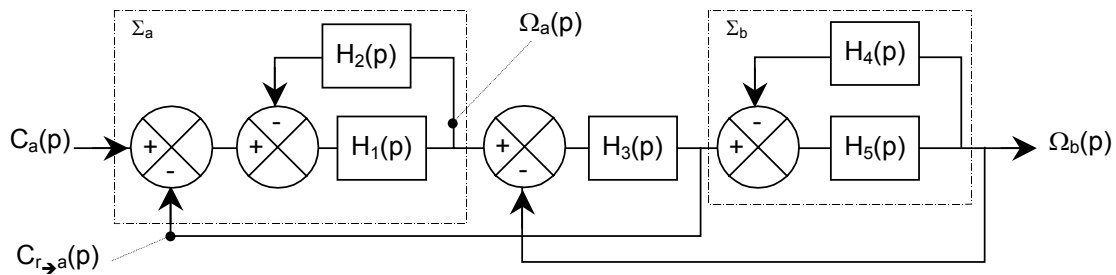
**QB2.1** En utilisant un principe de conservation appliqué à l'ensemble  $\Sigma_A$ , **montrer** que l'équation différentielle liant  $C_a(t)$ ,  $C_{r \rightarrow a}(t)$ ,  $\gamma(t)$  et  $\omega_a(t)$  peut s'exprimer sous la forme :

$$(\varepsilon R_g M_t + M_a b) \gamma(t) + C_a(t) + C_{r \rightarrow a}(t) = I_a \dot{\omega}_a(t) + \omega_a(t) f_a$$

On adopte les notations suivantes entre le domaine temporel et celui de Laplace. Ainsi, si la fonction  $f(t)$  possède une transformée de Laplace, elle sera notée  $F(p) = L[f(t)]$ .

**QB2.2** A partir de l'ébauche donnée (cf **Fig. B2**), **compléter** partiellement le schéma-bloc modélisant le comportement dynamique de l'élément  $\Sigma_A$ . L'ébauche partielle sera reproduite et complétée sur votre feuille.

- **Donner** les expressions des blocs  $H_1(p)$  et  $H_2(p)$ ,
- **Préciser** la nature des liens informationnels entre les blocs.



**Fig. B2** - Schéma bloc du modèle dynamique

**QB2.3** D'une manière symétrique à l'étude de l'ensemble  $\Sigma_A$ , **donner** l'expression de l'équation différentielle du mouvement en rotation de l'arbre B liant  $C_{r \rightarrow b}(t)$ ,  $\gamma(t)$  et  $\omega_b(t)$ .

**QB2.4** A partir de l'ébauche donnée (cf **Fig. B2**), **compléter** partiellement le schéma-bloc ébauché précédemment, modélisant le comportement dynamique de cet élément.

- **Donner** les expressions des blocs  $H_4(p)$  et  $H_5(p)$ ,
- **Préciser** la nature des liens informationnels entre les blocs.

**QB2.5** **Compléter** alors sur le **document réponse DRP1**, le schéma bloc complet en précisant les expressions des  $H_i(p)$ .

**QB2.6- Déterminer** la fonction de transfert en boucle ouverte  $FTBO(p)$  et l'exprimer sous forme canonique.

**QB2.7- Déterminer** la fonction de transfert en boucle fermée  $FTBF(p) = \frac{\Omega_b(p)}{C_a(p)}$  et

montrer qu'elle peut s'exprimer sous la forme : 
$$\frac{K_{bf}}{1 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3}.$$

- **Donner** les expressions analytiques de  $\{K_{bf}, a_i\}$ .



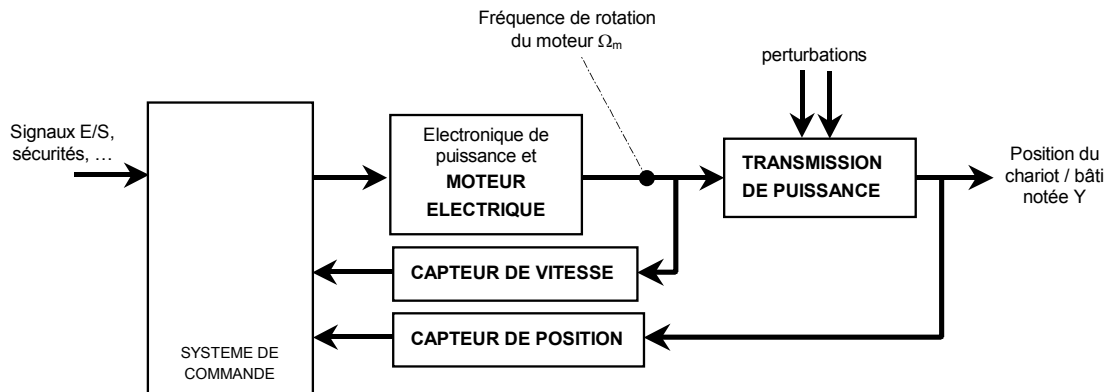
- QB2.8** En utilisant les courbes données en annexe (cf **Fig. DA1**), **factoriser** le dénominateur de la  $FTBF(p)$ .
- **Donner** une signification phénoménologique à cette factorisation. Indiquer le mode dominant.
  - Entre les courbes (C1) et (C2) de la figure **DA1**, **préciser** en couleur sur le **document réponse DRP2**, laquelle correspond à la réponse fréquentielle de la navette à vide et en charge. Justifier votre réponse.
- QB2.9** **Exprimer** littéralement toutes les échelles caractéristiques du modèle dynamique (constante de temps  $\tau$ , pulsation propre  $\omega_o$ , coefficient d'amortissement  $\xi$ ).
- **Examiner** le cas limite d'une transmission infiniment rigide.
  - Dans ce cas, **déterminer** l'expression temporelle de la réponse indicielle.
  - **Tracer** avec soin, cette réponse. Faire apparaître sur la courbe, les points remarquables ainsi que les échelles.
- QB2.10** Quelles caractéristiques mécaniques "modifiables" de la transmission **influencent** significativement la pulsation propre  $\omega_o$  et le coefficient d'amortissement  $\xi$  ?

On précise que le ressort possède un raideur de  $K_t = 78.10^3 \text{ N.m.rd}^{-1}$ .

- QB2.11** **Déterminer** la fonction de transfert  $\frac{\Omega_b(p)}{\Omega_a(p)}$  et l'exprimer sous sa forme canonique.
- **Déterminer** numériquement les échelles caractéristiques. Conclure sur la qualité du modèle proposé.
- QB2.12** **Déterminer** numériquement (en Hz) la borne supérieure de la bande passante à  $-3\text{dB}$  du système dynamique  $\frac{\Omega_b(p)}{C_a(p)}$ .
- Quel est "l'intérêt" de déterminer cette quantité ?
- QB2.13** **Discuter** de la stabilité en boucle fermée de ce modèle dynamique. On pourra illustrer les marges de stabilité (dont on déterminera les valeurs) dans le plan de Black.

## PARTIE C - Etude des lois de commande de la navette

La phase de transfert en galerie utilise une navette motorisée sur laquelle vient prendre place la bobine. L'allure de la loi de vitesse imposée à la navette a été précisée précédemment (cf Fig. A2). Dans cette partie, on suppose que la vitesse d'échantillonnage du système de commande (calculateur) est suffisamment grande pour que les variables analysées puissent être considérées comme étant continues.



**Fig. C1** - Schéma-bloc simplifié de la commande de déplacement du chariot

La figure **C1** illustre le modèle de commande en position de la navette. D'une manière très schématique, le moteur synchrone auto piloté fait tourner l'arbre moteur à la vitesse angulaire  $\Omega_m(t)$ . Celle-ci entraîne l'essieu moteur par l'intermédiaire d'un système de transmission de puissance composé d'un réducteur hélicoïdal à arbre parallèles (de rapport de réduction  $\Lambda$ ). Le moteur est équipé d'un codeur incrémental qui permet de connaître notamment la fréquence de rotation de l'arbre moteur (cf Fig. C1).

### C1- Performances de la boucle de vitesse

**QC1.1** On envisage de faire fonctionner le moteur dans les 4 quadrants. **Expliquer** en quelques lignes le principe de ce type de fonctionnement.

- **Indiquer** dans le plan  $(C, \Omega)$ , le signe du couple moteur et de la vitesse du rotor lors d'une translation de la navette.
- **Tracer** alors l'enchaînement temporel de passage entre les 4 quadrants pour une translation aller-retour. Préciser si l'actionneur fonctionne en 'moteur' ou en 'frein'.

**QC1.2** La motorisation de la navette est assurée par un moteur synchrone auto piloté.

**Indiquer** succinctement (10 lignes maximum) :

- la constitution générale d'un moteur de ce type,
- son principe de fonctionnement,
- ses principales caractéristiques (on pourra établir une comparaison avec un moteur à courant continu).

La boucle interne (cf Fig. C1) dite de vitesse du moteur synchrone auto piloté est présentée en détail sur la figure **C2**. On y distingue clairement les composants du variateur qui intègre notamment :

- un correcteur de fonction de transfert  $C(p)$ ,
- une boucle interne de régulation de l'intensité par phase du moteur,
- un algorithme de calcul de la vitesse de l'arbre moteur à partir des informations du codeur à impulsions.

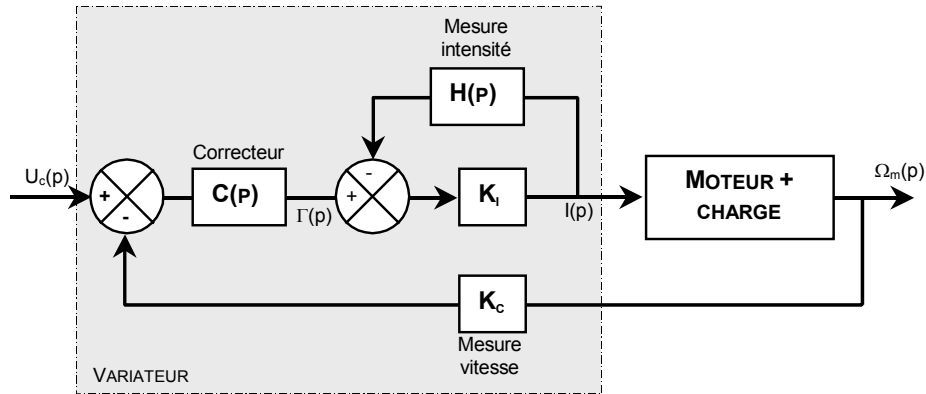


Fig. C2 - Schéma-bloc simplifié de la boucle de vitesse

- QC1.3 Définir** la forme canonique de la fonction  $H(p)$  si on considère que la transmittance  $\frac{I(p)}{\Gamma(p)}$  est un premier ordre généralisé. Les échelles de  $H(p)$  seront indicées  $H$ , soit  $(K_H, \tau_H)$ .
- QC1.4** En utilisant la réponse indicielle donnée par la figure **DA2**, **déterminer** numériquement les trois échelles de la transmittance  $\frac{I(p)}{\Gamma(p)}$ , soit  $(K_i, K_H, \tau_H)$ .
- QC1.5 Tracer** sur le **document réponse DRP3**, la représentation des diagrammes asymptotiques de Bode de la réponse fréquentielle  $FT(j\omega) = \frac{I(j\omega)}{\Gamma(j\omega)}$ .
- QC1.6 Déterminer** numériquement le déphasage maximal  $\varphi_{\max}$  induit par ce réseau de régulation.

On admet que la fonction de transfert du moteur en charge se comporte comme un premier ordre de gain statique noté  $K_m$  et de constante de temps notée  $\tau_m$ . Dans un premier temps, le correcteur est du type proportionnel, soit  $C(p) = K_{co} = 5$  et on suppose  $K_c$  unitaire.

- QC1.7 Déterminer** la fonction de transfert en boucle fermée  $\frac{\Omega_m(p)}{U_c(p)}$  et l'exprimer sous la forme canonique. **Montrer** alors que l'erreur statique ne peut être nulle quelque soit la valeur finie du réglage du correcteur.
- QC1.8 Tracer** l'allure la réponse temporelle  $\omega_m(t)$  pour une entrée indicielle unitaire. Placer les points remarquables. On précise que  $K_m = 3rd.A^{-1}s^{-1}$  et  $\tau_m = 1.5s$
- QC1.9 Discuter** de la stabilité en boucle fermée de ce modèle dynamique. On pourra illustrer cette discussion en faisant apparaître les marges de stabilité dans le plan de Black.

On choisit de remplacer le correcteur proportionnel **P** par un correcteur **PI** (Proportionnel Intégral) dont on donne la nouvelle fonction de transfert  $C(p) = K_{co}(1 + \frac{K_r}{a.p})$  avec  $(K_{co}, K_r, a) \in R^3$ .

- QC1.10** Quelle amélioration majeure **est apportée** par ce nouveau correcteur ?
- QC1.11** Pour chaque coefficient  $(K_{co}, K_r, a)$ , **indiquer** leurs influences sur les performances globales du système (respectivement précision, stabilité, rapidité)

et dépassement), comme l'ébauche le tableau suivant (à reprendre sur votre feuille).

| Variation         | Précision | Stabilité | Rapidité | Dépassement |
|-------------------|-----------|-----------|----------|-------------|
| $K_{co} \nearrow$ |           |           |          |             |
| $K_r \nearrow$    |           |           |          |             |
| $a \nearrow$      |           |           |          |             |

## C2- Etude des performances globales

Pour des considérations évidentes de sécurité, le cahier des charges impose que lors de la phase de transfert, la position de la navette dans le tunnel soit parfaitement contrôlée et qu'à son arrivée en gare, elle soit positionnée avec précision et sans dépassement. Le schéma bloc de ce système où figure la valeur de consigne  $Y_c$  élaborée par le calculateur, est donnée sur la figure C3. La mesure de la position de la navette est assurée par un télémètre type "SickDME laser" associé à un dispositif électronique. L'ensemble possède une transmittance notée  $L(p)$ .

Quelque soit les réponses apportées par le candidat précédemment, on adoptera le schéma bloc fonctionnel simplifié (cf Fig. C3) pour la suite de la partie C.

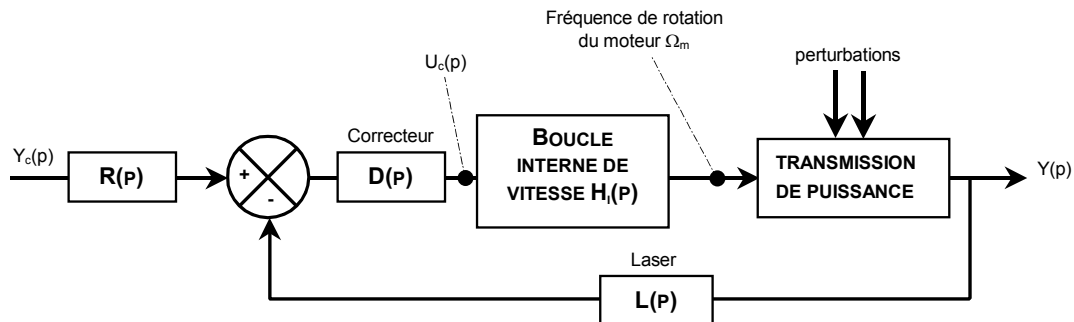


Fig. C3 - Schéma-bloc simplifié de la boucle de position

QC2.1 Quelle est la fonction du bloc de transmittance  $R(p)$  ? Justifier rapidement que l'on impose que  $R(p) = L(p)$ .

QC2.2 Déterminer l'expression de la fonction de transfert du bloc "transmission de puissance".

En tenant compte des différentes phases de modélisation des boucles de régulation de courant et de vitesse, on propose pour la suite de l'étude, le schéma-bloc simplifié suivant (cf Fig. C4).

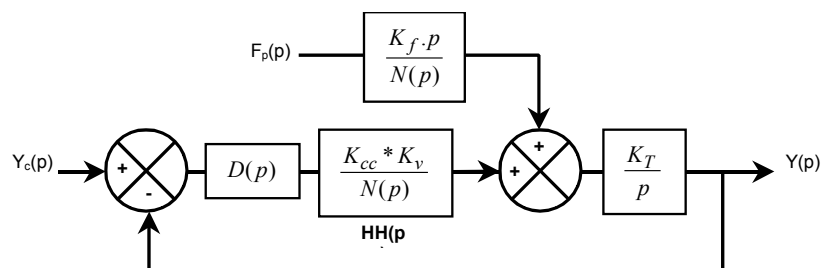


Fig. C4 - Schéma-bloc simplifié

Le schéma bloc de la figure **C4** fait apparaître une entrée de perturbation notée  $F_p(p)$ . Le terme  $N(p)$  représente un polynôme "en p" dont l'ordre est précisé asymptotiquement (cf **Fig. DA4**). Le bloc de transmittance  $D(p)$  modélise le correcteur dans un premier temps du type "proportionnel" d'une valeur de 100 (USI).

**QC2.3 Déterminer** analytiquement l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée et la mettre sous la forme canonique suivante :

$$Y(p) = H_m(p).Y_c(p) + H_p(p).F_p(p)$$

**QC2.4 Déterminer** la classe en boucle ouverte du système non perturbé. En déduire l'erreur statique en position.

La figure **DA4** représente la fonction de transfert  $HH(p)$  dans le plan de Bode (module et phase).

**QC2.5 Discuter** de la stabilité du modèle de commande en boucle fermée.

**QC2.6** A partir de la figure **DA4**, **déterminer** la valeur du gain du correcteur  $D(p)$  permettant d'assurer une marge de phase de  $30^\circ$ . Préciser alors la marge de gain (en dB).

Des actions mécaniques extérieures générées par la mise en mouvement de la navette perturbent sensiblement la vitesse de rotation du moteur (cf **Fig. C4**). En concédant de nombreuses hypothèses simplificatrices, cette perturbation permanente, de type périodique, peut être modélisée en moyenne par l'expression suivante :

$$f_p(t) = f_p \sin(\omega t).u(t) \text{ avec } f_p = 10^4 \text{ N}$$

La fréquence de rotation du groupe de propulsion (arbre moteur) est notée  $\omega$  en  $\text{rd.s}^{-1}$ . L'intensité  $f_p$  est en rapport avec le déplacement de la navette défini par la figure **C4**.

**QC2.7** Les conditions de stabilité en boucle fermée établies précédemment **sont-elles modifiées** par l'apparition de la perturbation ?

**QC2.8** Dans le cas où la perturbation  $f_p(t)$  est appliquée, **donner** la forme générale de la réponse harmonique en régime stationnaire  $y(t)$ .

**QC2.9** En justifiant vos hypothèses, **déterminer** à l'aide de la figure **DA3** :

- l'amplitude maximale des oscillations générées sur le déplacement de la navette,
- l'amplitude des oscillations lorsque la navette est en phase de translation à vitesse constante.

**QC2.10** Une variation de la valeur de réglage du correcteur proportionnel **permet-elle** de réduire l'amplitude des oscillations ?

- **Justifier** rapidement votre réponse pour différents régimes de pulsation,
- **Préciser** le sens de variation.

Afin de prévenir toute défaillance du système de commande en position, il est nécessaire de soumettre brutalement ce système à une perturbation de type échelon, soit :

$$f_p(t) = f_p.u(t) \text{ avec } f_p = 10^4 \text{ N}$$

Dans ces conditions de sollicitations extrêmes, l'intégrité de la chaîne de commande ainsi que ses performances doivent être conservées.

**QC2.11 Montrer** que l'erreur statique en position du système de commande soumis uniquement à la perturbation en effort  $f_p(p)$  ne peut être nulle.

## PARTIE D - Modèles séquentiels de commande

La synchronisation des différents systèmes composant la ligne LG36 représente une contrainte importante du cahier des charges. Il en est de même de la gestion de la sécurité lors des interventions de maintenance dans le tunnel de transfert. On se propose ici d'en analyser quelques aspects.

### D1. Etude partielle du temps de cycle

Le tableau (cf **Tab. 3**) dresse une estimation des différents temps d'opérations présents lors d'une phase complète de transbordement.

| Systèmes                          | Opérations  | Durée (en s) |
|-----------------------------------|---|--------------|
| <b>Pas de pélerin</b>             | Centrage  | 15           |
|                                   | Levage pas de pélerin   | 20           |
|                                   | Avance pas de pélerin   | 25           |
|                                   | Descente + déverrouillage   | 20           |
|                                   | Recul pas de pélerin  | 20           |
| <b>Descendeur /<br/>Ascenseur</b> | Descente position haute → attente navette                               | 37           |
|                                   | Descente attente navette → navette                                      | 30           |
|                                   | Montée navette → attente navette  | 30           |
|                                   | Montée attente → position haute   | 37           |
|                                   | Serrage pince   | 8            |
|                                   | Ouverture pince   | 8            |
|                                   | Descente/Montée position haute ↔ prise/dépose bobine sur pas de pélerin | 7            |

**Tab. 3** – Estimations des temps d'opérations

**QD1.1** Le cahier des charges impose une cadence nominale de transbordement de 60 bobines par poste de 8h. **Expliquer** comment on peut atteindre cet objectif et **valider** la cadence obtenue.

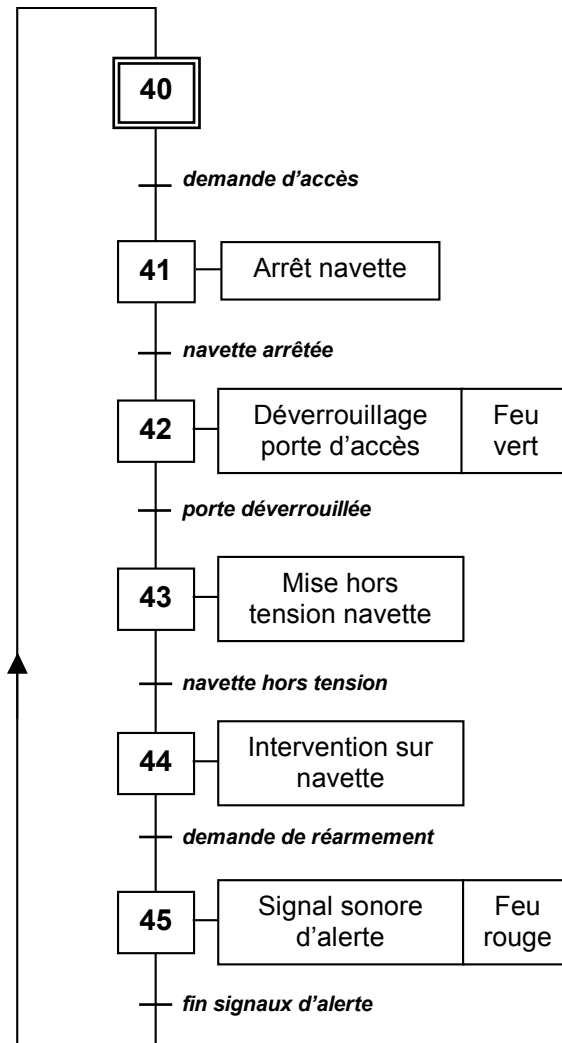
**QD1.2** A l'aide d'un outil approprié, **décrire** le fonctionnement temporel de la solution proposée précédemment.

### D2. Gestion de la sécurité dans la galerie de transfert

La navette de transfert se situe en galerie et assure le transfert des bobines du hall A vers le hall B. La section de la galerie est partagée en deux espaces séparées par un grillage et une porte d'accès située coté hall A (cf **DR 4**), l'un occupé par le chemin de roulement de la navette, l'autre par une passerelle. Compte-tenu des dimensions de la galeries, les bobines de grandes dimensions occupent toute la section du chemin de roulement. Il n'y a donc aucun échappatoire latéral lors d'une intervention de maintenance.

L'accès maintenance a pour objet de permettre au personnel de réaliser les opérations d'entretien, de dépannages (zone navette hors tension) et d'essais en conditions de sécurité (zone navette sous tension).

Le graficet (cf **Fig. D1**) représente une demande d'accès à la zone navette pour une intervention 'hors tension' de type entretien ou dépannage.



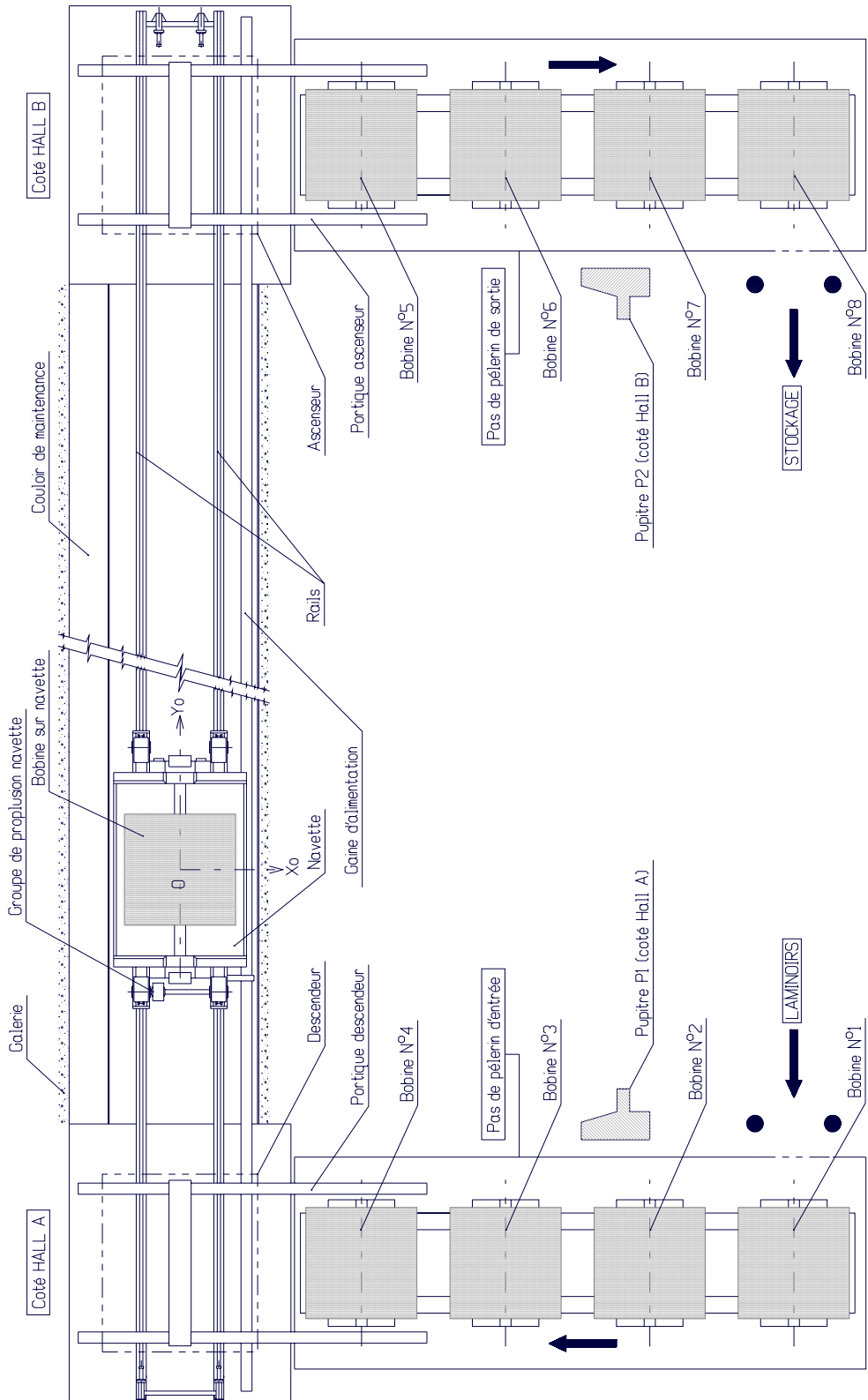
**Fig. D1** – Grafcet de demande d'accès

- QD2.1** Le grafcet fourni (cf **Fig. D1**) décrit le cycle d'intervention dans la zone navette. **Mettre en évidence** les carences sécuritaires lors d'une intervention de type maintenance.
- QD2.2** Sur le **document réponse DRP4**, **proposer** alors une modification du grafcet (cf **Fig. D1**) palliant les carences mises en évidence à la question précédente.
- QD2.3** **Donner** les contraintes de gestion de la demande d'accès (situation, autorisation, mode opératoire, matériel,...).

Un arrêt d'urgence à câble est disponible le long du chemin de roulement à l'intérieur de l'enceinte de sécurité et une télécommande radio, équipée d'une commande maintenue de type "homme mort" permet à l'agent de maintenance d'avoir la maîtrise totale des mouvements de la navette et ainsi d'effectuer des essais 'sous tension'.

- QD2.4** Sur le modèle du grafcet de la **figure D1**, **proposer** un grafcet de demande d'accès avec prise en main possible de la navette par l'agent de maintenance.

# DOCUMENT RESSOURCE



**Fig. DR1 - Synoptique de l'installation**

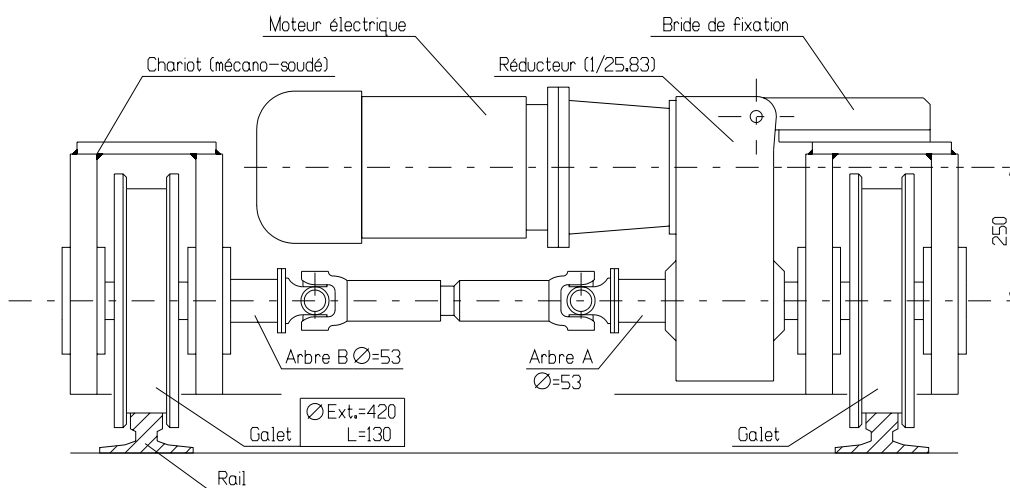




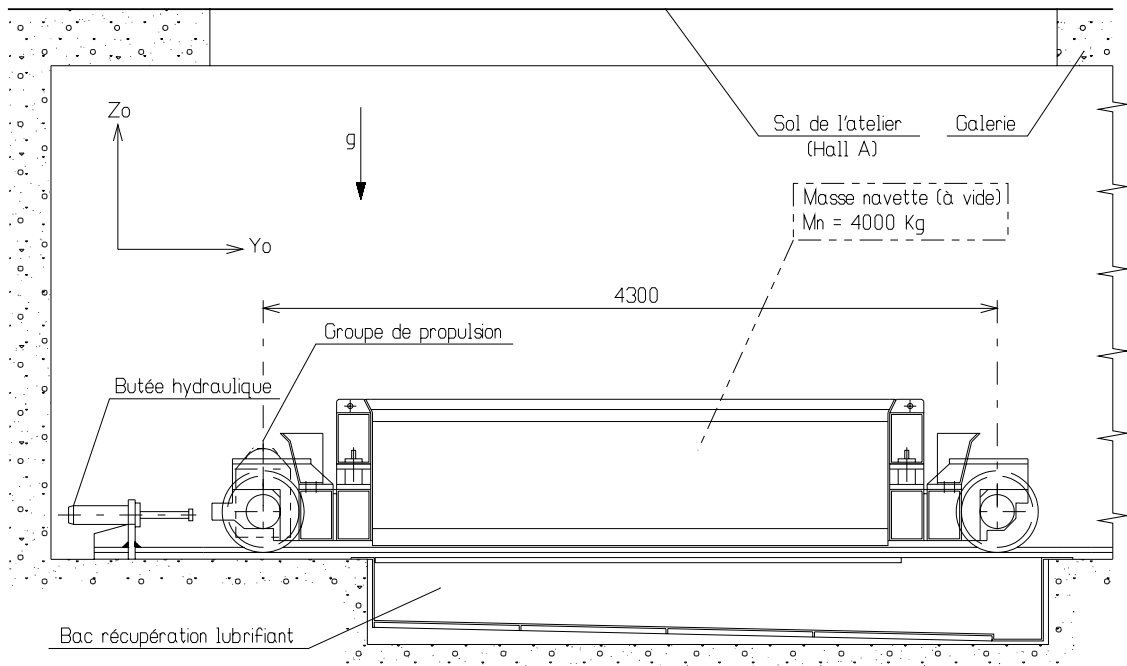
**Photo 1** - Vue des bobines en attente sur le pas de pèlerin d'entrée



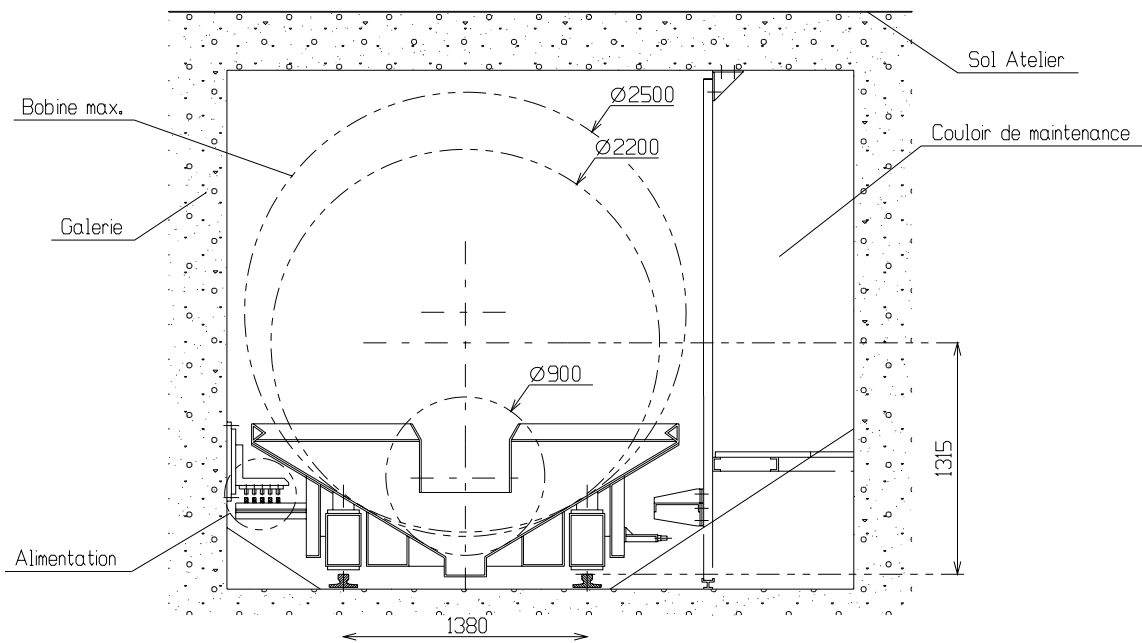
**Photo 2** - Vue d'une bobine chargée sur la navette de transfert



**Fig. DR2** - Vue extérieure du groupe de propulsion



**Fig. DR3 - Vue de la navette au poste d'entrée (coté descendeur)**



**Fig. DR4 - Encombrement de la navette dans la galerie**

# DOCUMENT ANNEXE

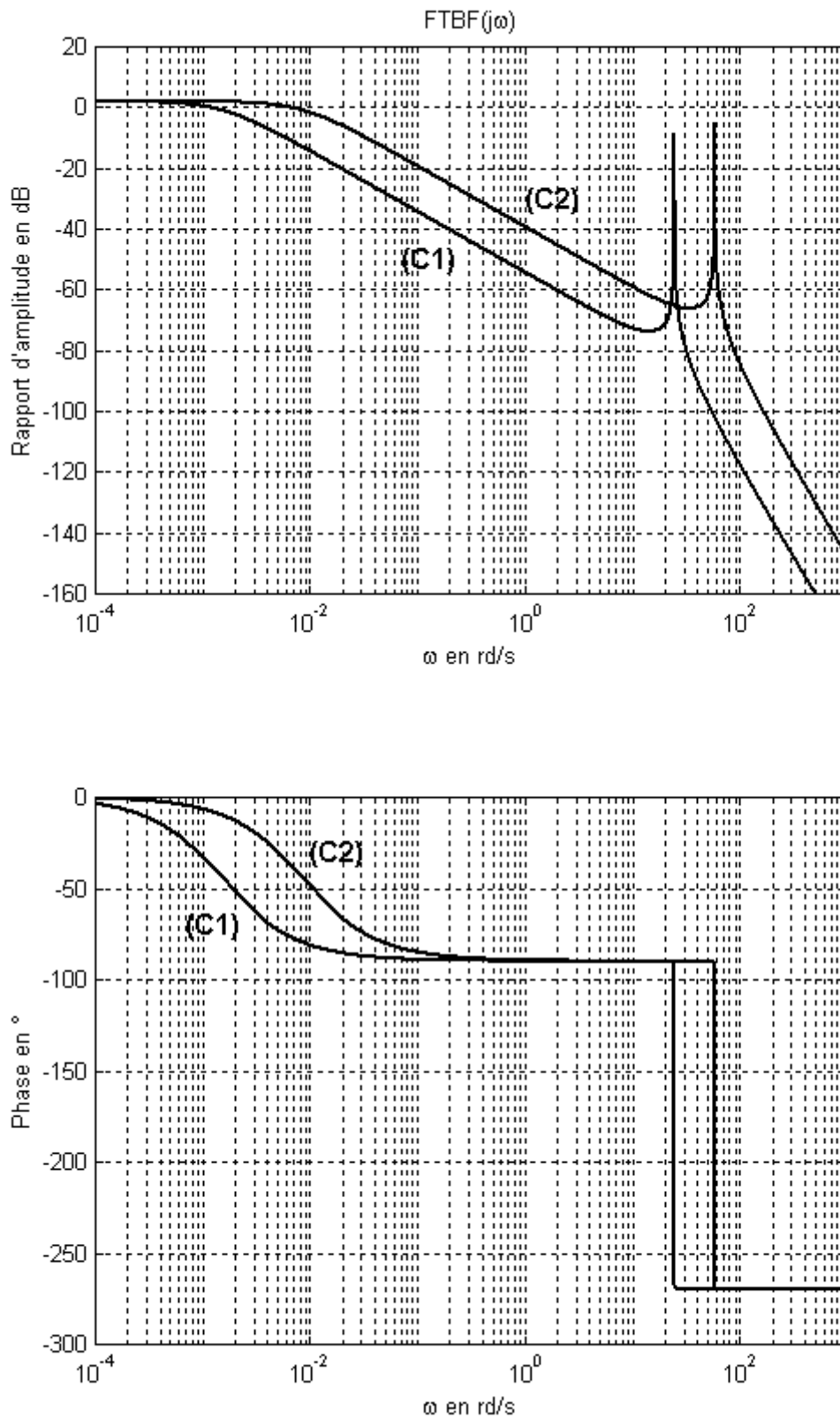
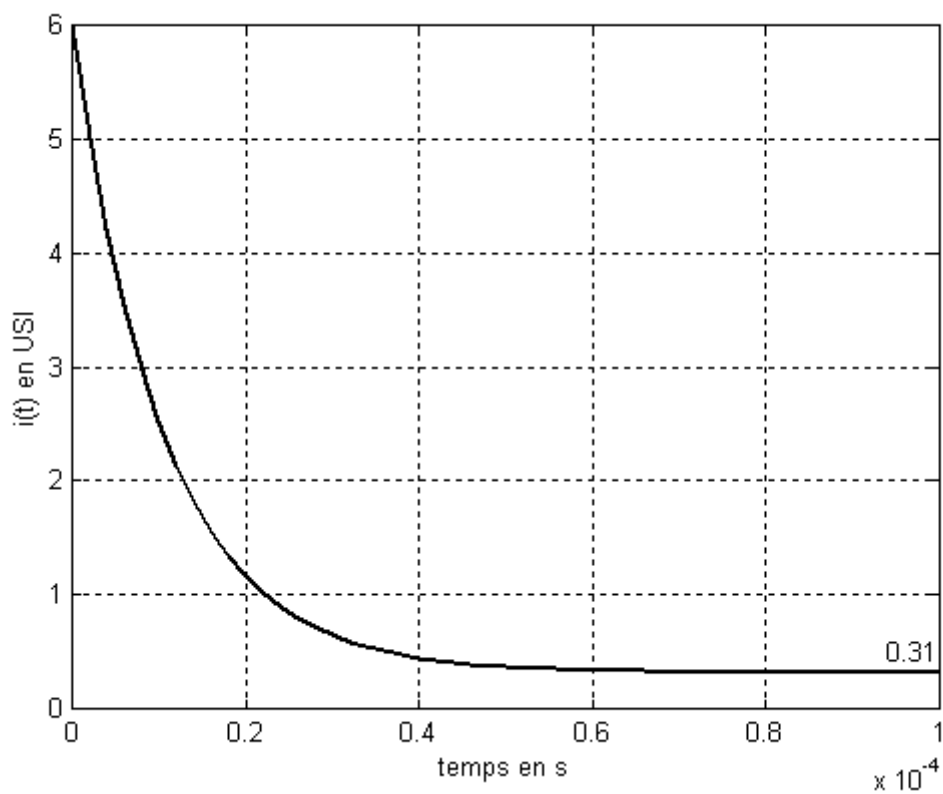
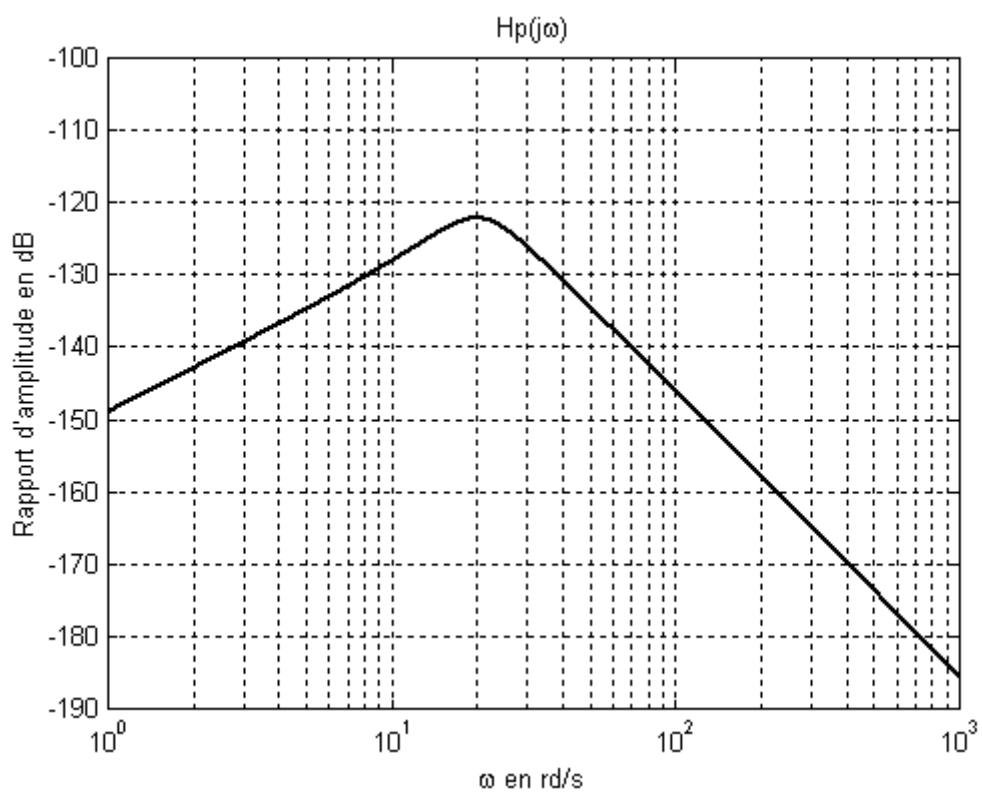


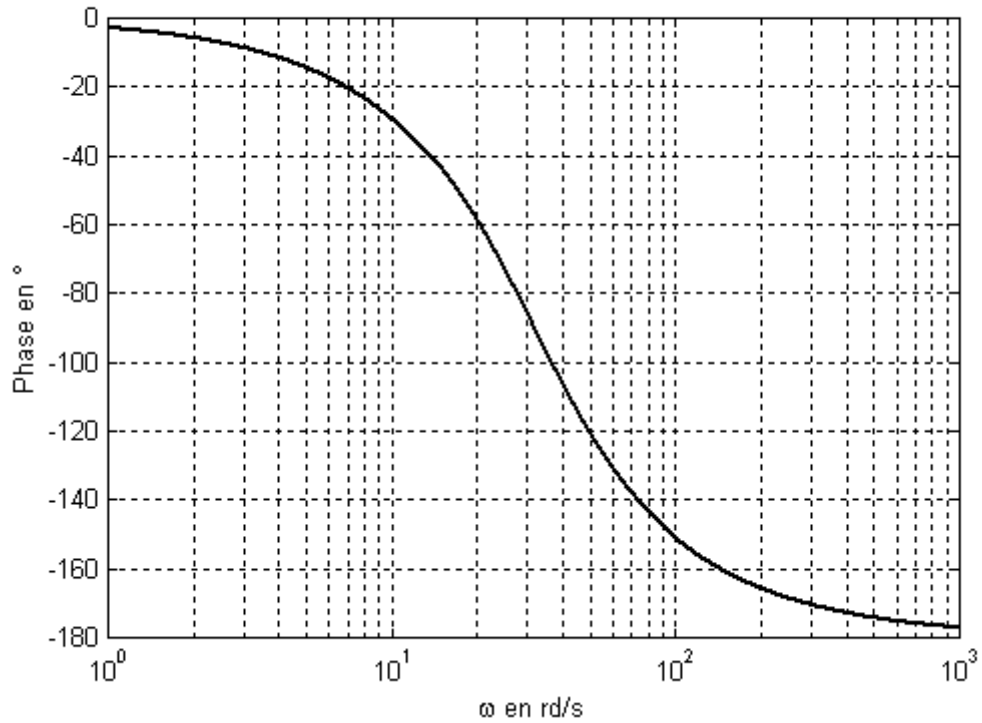
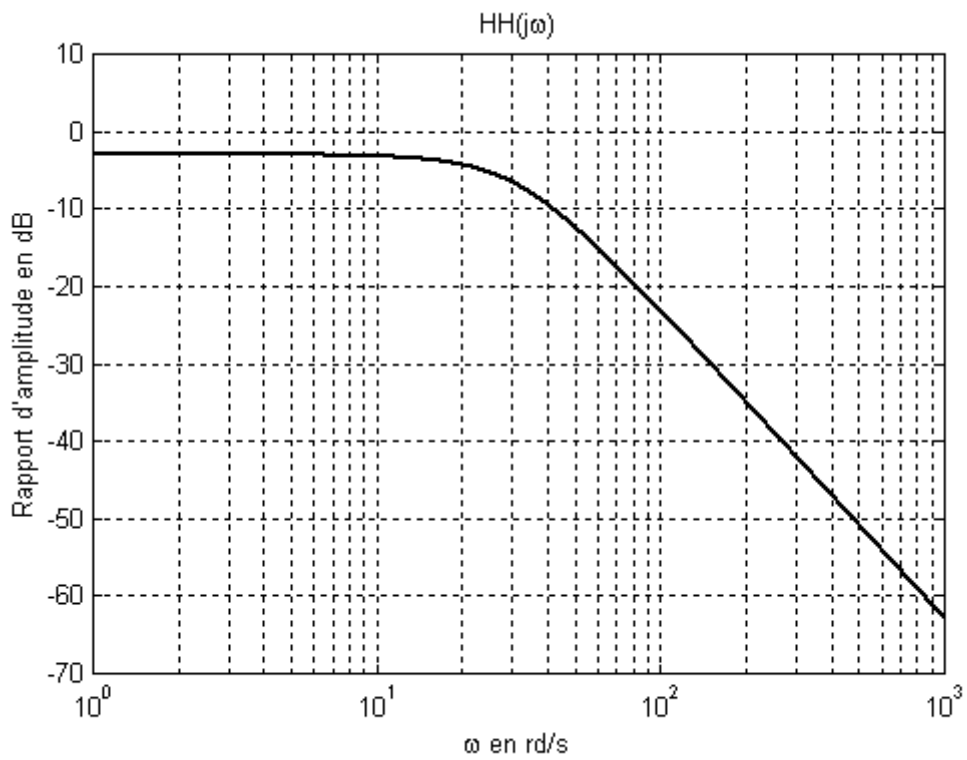
Fig. DA1 - Diagramme fréquentiel en boucle fermée du processus mécanique



**Fig. DA2** – Réponse indicielle de la boucle de courant

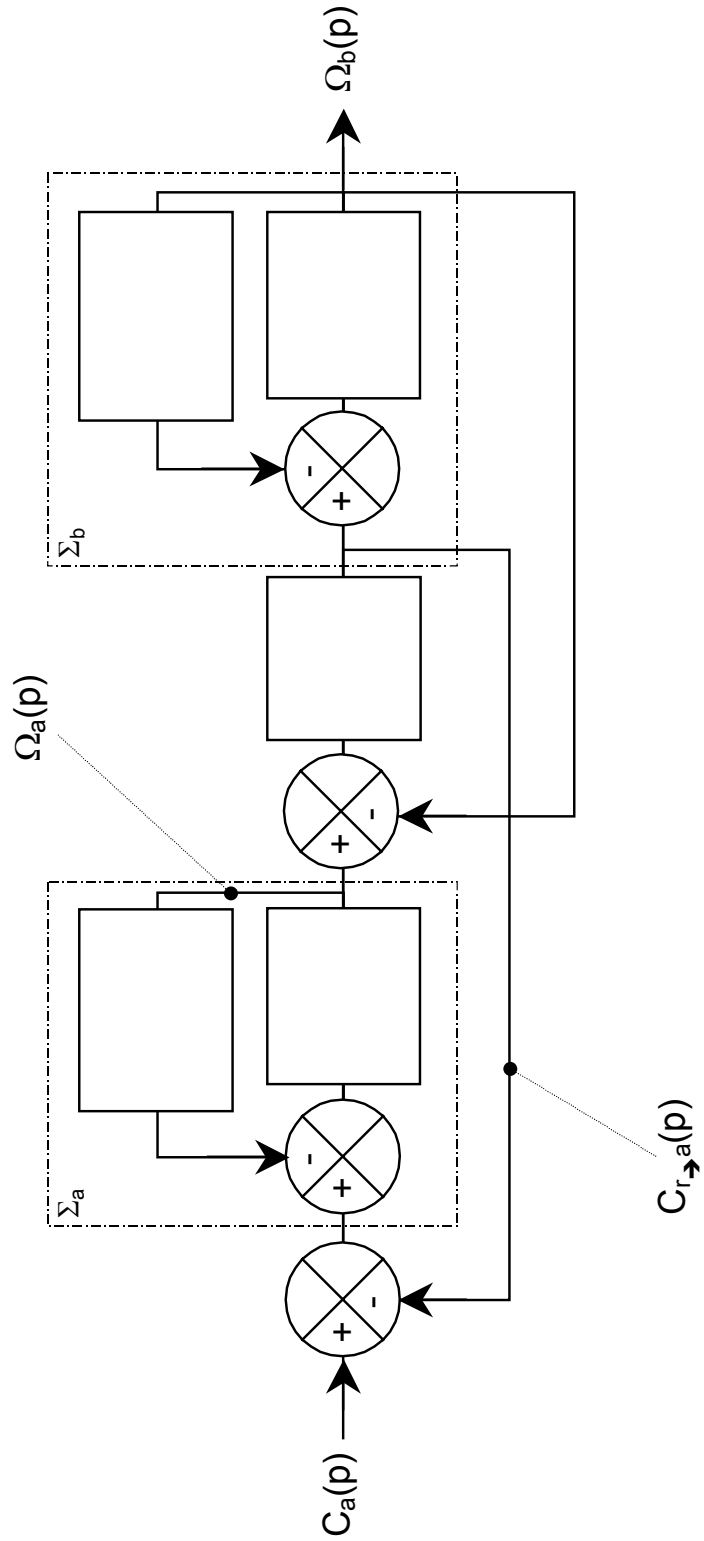


**Fig. DA3** – Lieu de transfert (amplitude) de  $H_p(j\omega)$

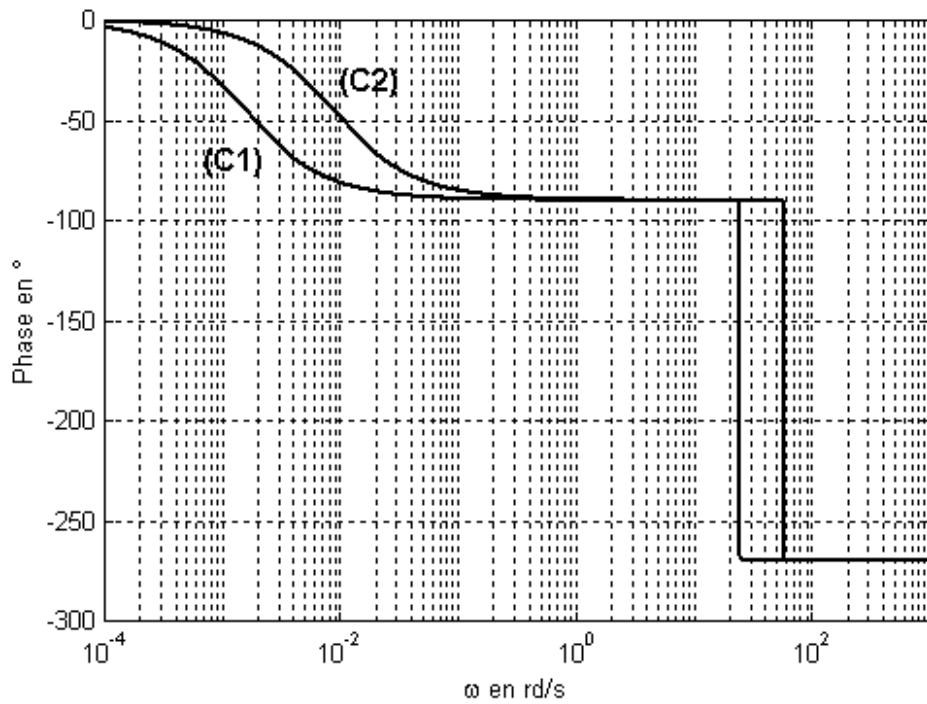
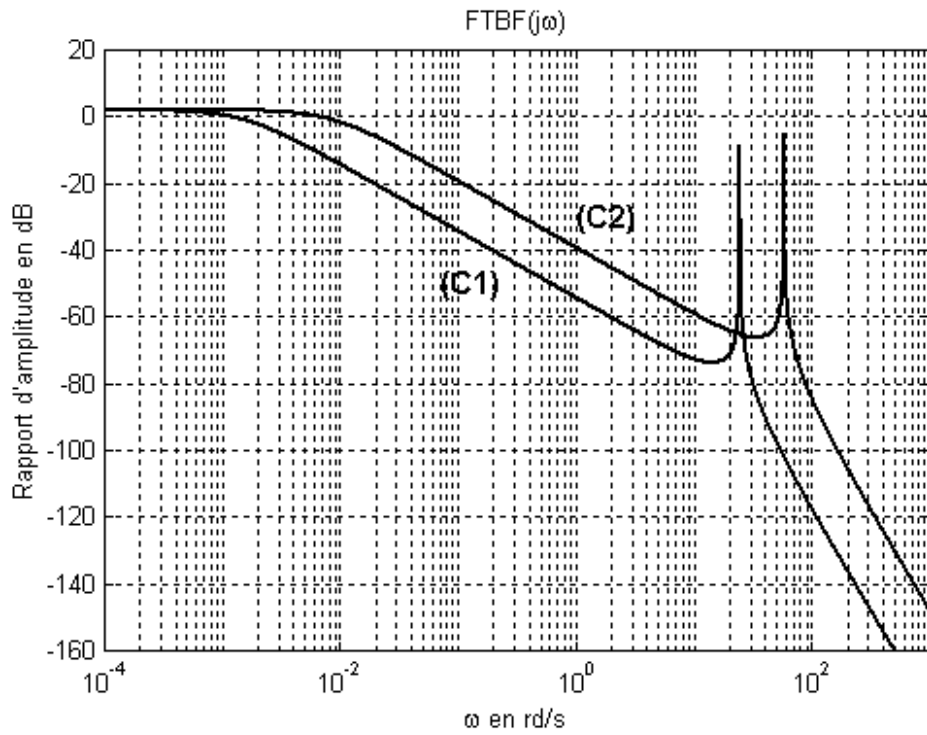


**Fig. DA4** – Représentation dans le plan de Bode de  $HH(j\omega)$

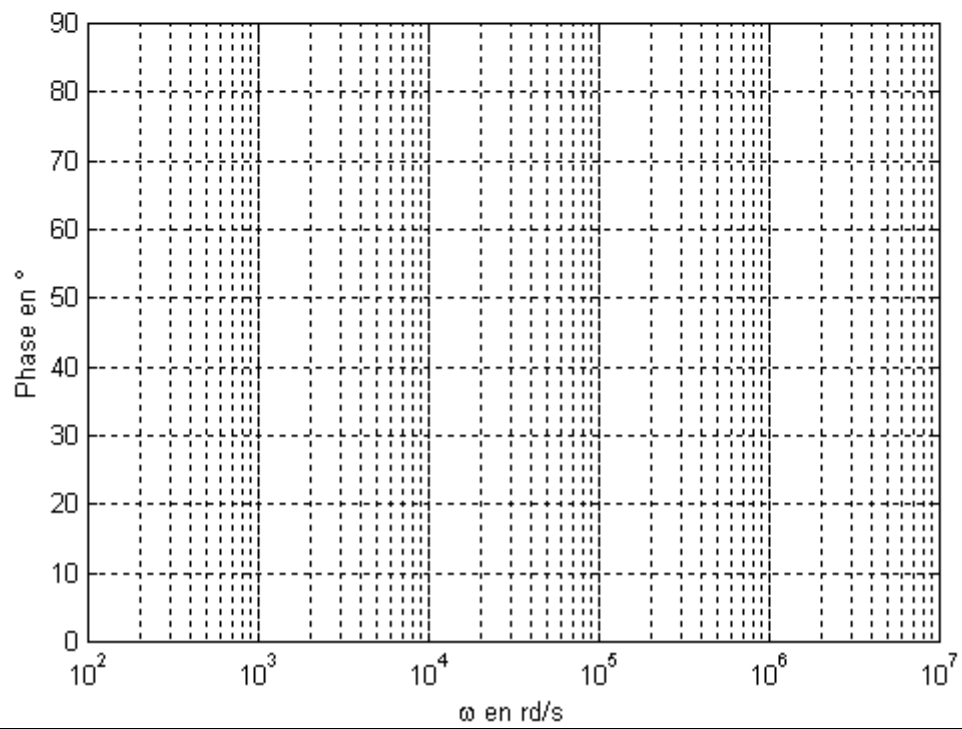
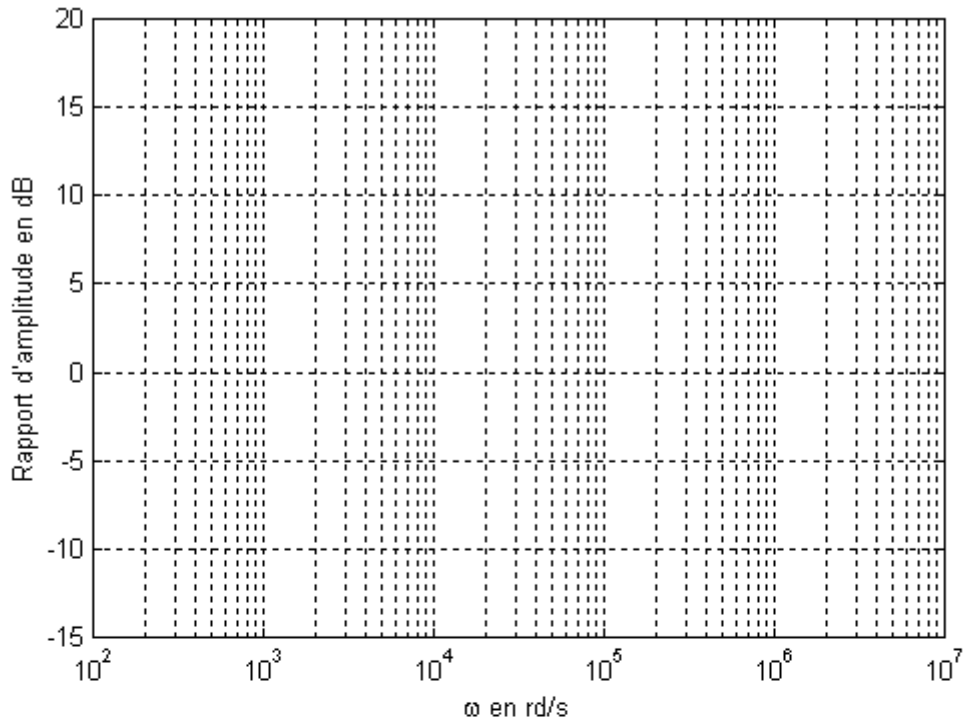
# DOCUMENT REPOSE DRP1



# DOCUMENT REPOSE DRP2



# DOCUMENT REPOSE DRP3





## DOCUMENT REPOSE DRP4

