

CONCOURS BLANC – 2014

D'APRÈS CONCOURS CENTRALE – SUPELEC 2008

1 Mise en situation

1.1 Objet de l'étude

Le transport ferroviaire, concurrencé par la voiture sur les courtes et moyennes distances et par l'avion sur les longues distances, a dû trouver des solutions adaptées pour continuer à croître. Avec le développement du train à grande vitesse, les caractéristiques du marché du transport ferroviaire de voyageurs se sont rapprochées de celles du transport aérien.



Les performances du TGV (vitesse, confort, proximité des gares) ont conduit à un essor important du trafic de voyageurs. Les opérateurs ferroviaires ont dû par conséquent adapter le cahier des charges de leurs équipements pour faire face à cette demande accrue. Le matériel voyageur a ainsi subi une évolution et une modernisation sans précédent depuis plusieurs années. Nous nous intéresserons dans le cadre de ce travail au système « porte » autorisant la communication entre l'intérieur et l'extérieur du train.

1.2 Orientation de l'étude

Au cours de son cycle de vie, de sa conception à son recyclage, les conditions de fonctionnement du système d'ouverture fermeture évoluent, influençant notablement ses performances. Une observation continue de certains paramètres vitaux est indispensable au bon fonctionnement de ce système. Cette surveillance poursuit un double objectif :

- à court terme, celui de maintenir des performances compatibles avec celles définies par le cahier des charges ;
- à plus long terme, celui de planifier des opérations de maintenance corrective afin de pallier tout risque de défaillance.

On se propose dans cette étude de montrer comment l'observation au cours du cycle de vie de certaines grandeurs caractéristiques du système permet d'atteindre le premier objectif.

Le sujet s'articule selon trois axes ; après avoir présenté l'objet de l'étude puis analysé dans un premier temps le fonctionnement nominal du système considéré, on aborde ensuite l'étude de plusieurs fonctionnalités liées à sa phase courante d'utilisation.

Les exigences liées au système sont données dans le diagramme figure 1.

1.3 Présentation du système

La figure 2 montre l'interface assurant, à partir des informations délivrées par l'unité centrale de commande, la fermeture hermétique et le verrouillage de la porte. L'ordre de fermeture de la porte est donné soit par appui sur le bouton situé sur la porte soit via un ordre fourni par le conducteur depuis son pupitre. L'information est traitée par l'unité centrale qui pilote un moteur électrique permettant, dans un premier temps, de fermer la porte grâce à un mécanisme pignon-crémaillère puis, dans un deuxième temps, lorsque la position de fermeture est détectée, de verrouiller la porte. La détection de la position fermée enclenche également le gonflage des joints assurant l'herméticité de la fermeture. L'information de fin d'opération est transmise au conducteur sur son pupitre.

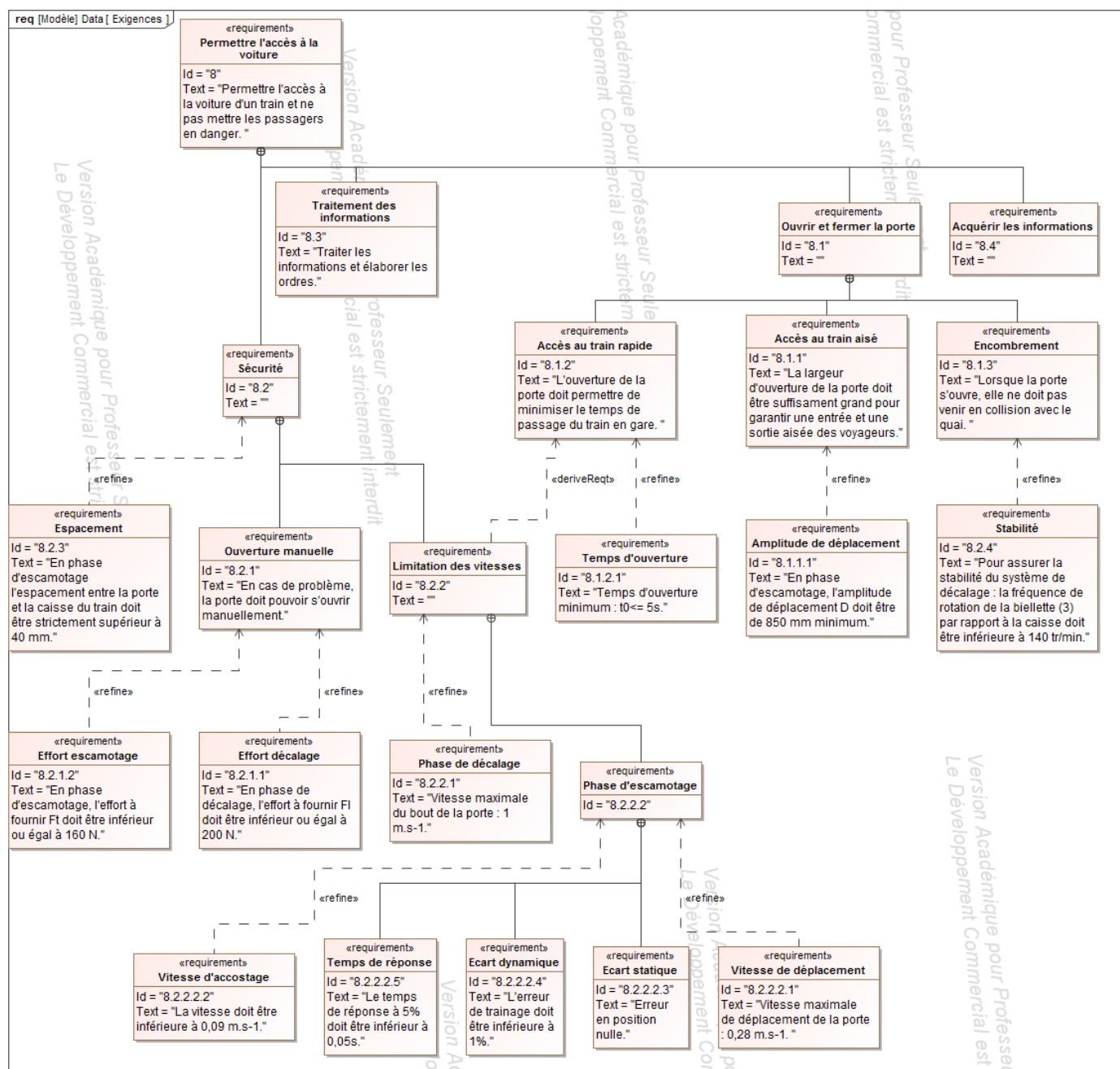


FIGURE 1 – Diagramme des exigences

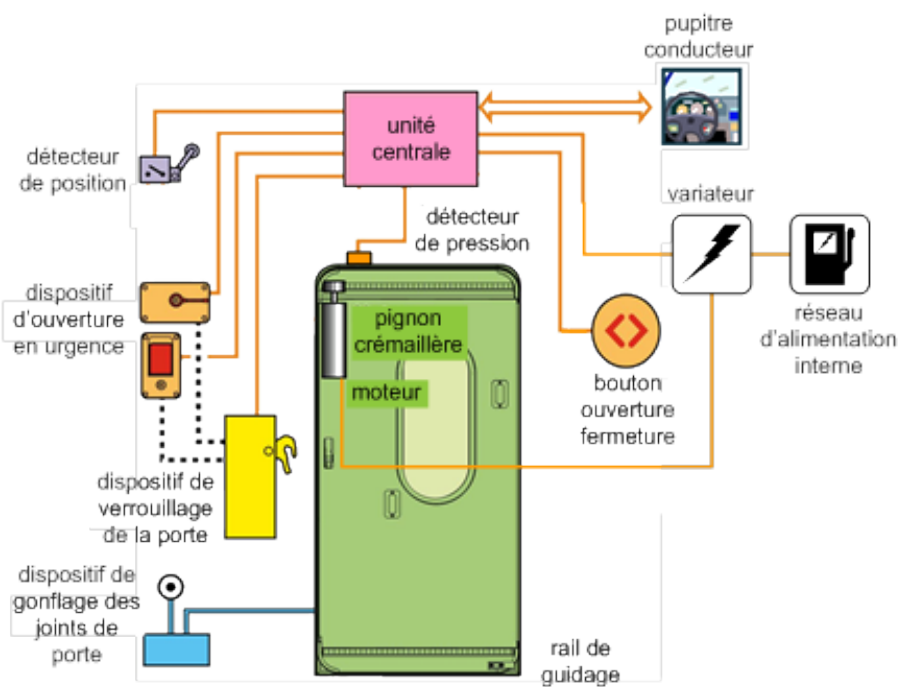
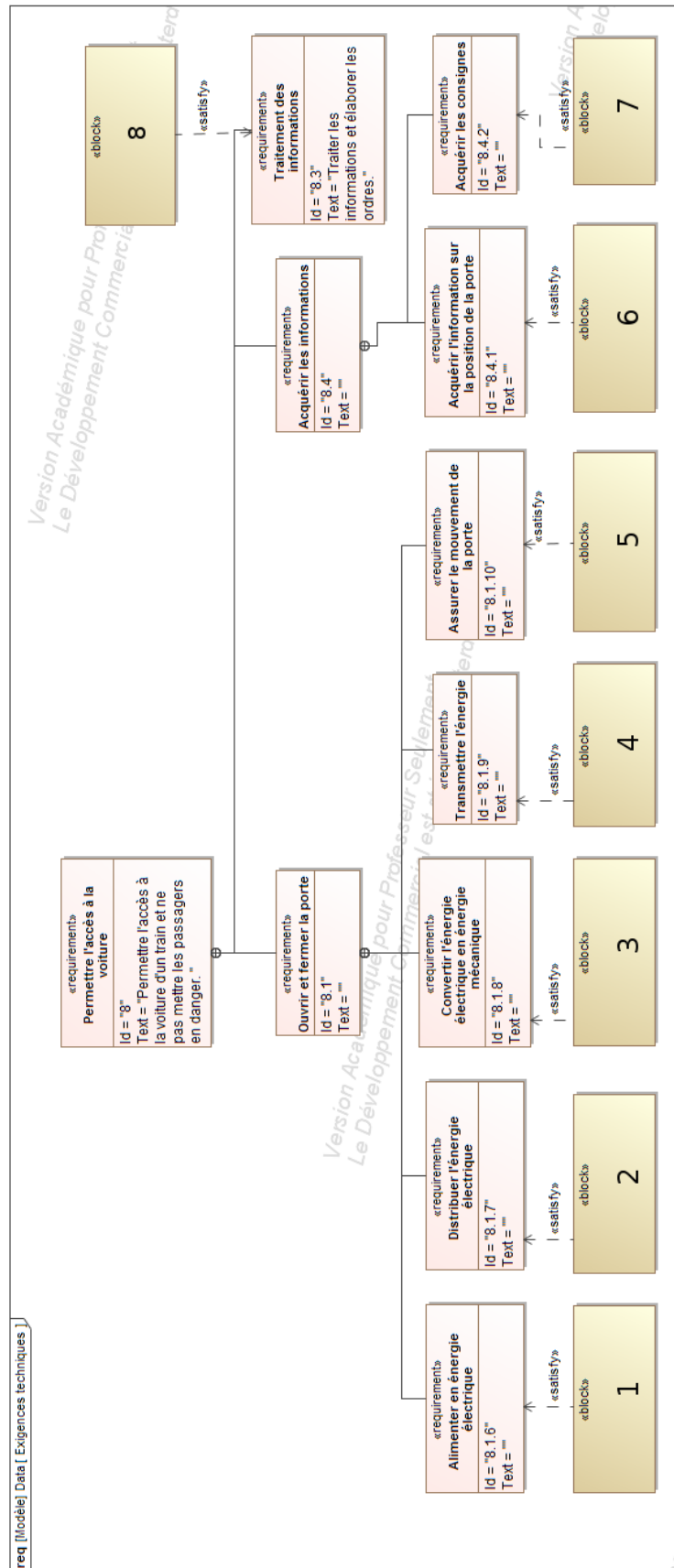


FIGURE 2 – Interface fonctionnelle du système porte

Question 1

À partir de la figure 2, compléter le diagramme de blocs sur le document réponse.



2 Étude du mouvement de la porte en mode nominal

L'objectif de cette étude est de déterminer les performances de la solution technique implantée sur le TGV pour le mécanisme d'ouverture/fermeture de la porte d'accès et de valider leurs conformités avec les exigences formulées (figure 1).

L'architecture et l'implantation de la partie opérative étudiée est précisée sur la figure 2. On y distingue le mécanisme d'ouverture/fermeture (objet de cette étude) dont la fonction est d'assurer l'accès au train en escamotant latéralement le panneau de porte.

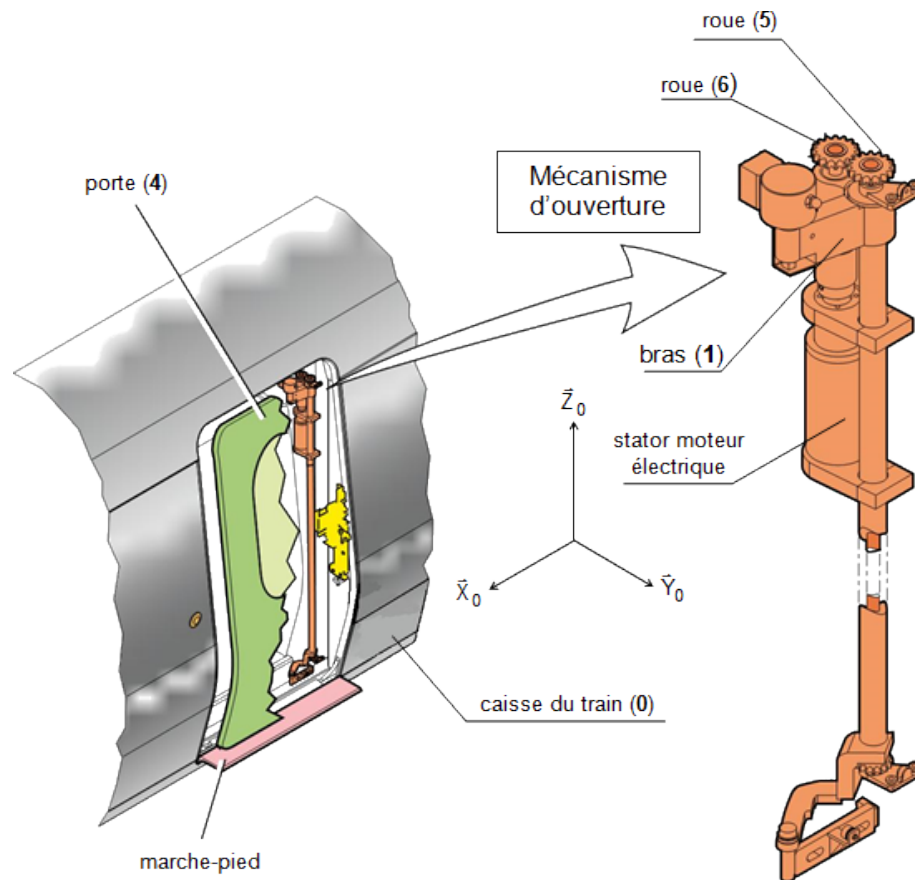
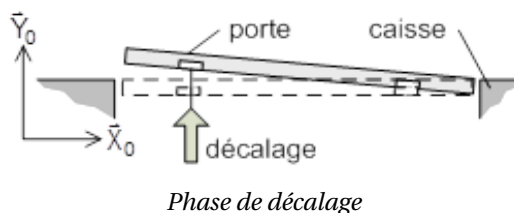
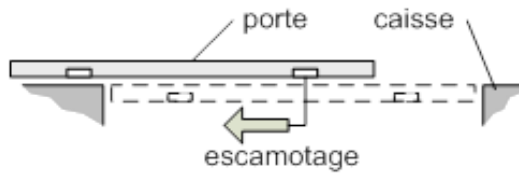


FIGURE 3 – Architecture générale

Afin de satisfaire les contraintes d'encombrement, l'ouverture de la porte s'effectue selon l'enchaînement temporel de trois phases distinctes décrites à partir de la position «porte fermée» pour laquelle la face extérieure de la porte est alignée avec la face extérieure de la caisse; une phase de décalage puis une phase de louvoisement et enfin une phase d'escamotage. La phase primaire (décalage) puis la phase terminale (escamotage) sont définies par les figures suivantes.



Phase de décalage : ce premier mouvement permet de décaler angulairement la porte (4) de la caisse du wagon.



Phase d'escamotage

Phase d'escamotage : la porte (4) coulisse le long de la caisse du wagon, dégageant ainsi complètement l'accès au train.

Question 2

Décrire en quelques lignes la phase intermédiaire de louvoiement en précisant la nature du mouvement de la porte (4) par rapport à la caisse (0).

Question 3

En le reprenant sur votre feuille, compléter le tableau ci-dessous recensant les degrés de mobilité (nombre et nature) de la porte (4) par rapport à la caisse du TGV (0) lors des différentes phases.

	Nombre	Nature
Décalage		
Louvoiement		
Escamotage		

2.1 Étude analytique de la phase de décalage

Vérifier la satisfaction de l'exigence de 8.2.2.1.

Le mécanisme d'ouverture de la porte est mis en mouvement grâce à l'action d'un unique moteur électrique (cf. figure 3 et figure 4). Le rotor de cet actionneur est solidaire de la roue (6) alors que son stator est fixé sur le bras (1). Par commodité, on adopte $\dot{\theta}_{61}(t) = \dot{\theta}_m(t)$. La roue motrice (6) est par construction en liaison pivot d'axe (B, \vec{z}_0) par rapport au bras (1). La roue (6) entraîne en rotation la roue (5) provoquant alors le mouvement de la porte (4). Un système articulé dit de « stabilisation » se composant des biellettes (2) et (3), complète le mécanisme. La biellette (2) est en liaison pivot d'axe (B, \vec{z}_0) par rapport au bras (1).

On réduit le problème à une résolution plane et on suppose que la roue (5) roule sans glisser sur la porte (4) et que de la même façon, la roue (5) roule sans glisser sur la roue (6). On pose $\vec{EI}(t) = \lambda(t) \vec{y}_4$.

Question 4

Comment varie la longueur EI au cours de la phase de décalage ?

Question 5

Dans quel sens (horaire ou trigonométrique) doit tourner la roue (6) par rapport au bras (1) afin de provoquer le décalage angulaire de la porte (4) par rapport à la caisse (0) ?

Hypothèses :

- Les liaisons pivot sont modélisées comme étant parfaites.
- Le repère $\mathcal{R}_0 = (O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ lié au support (0) est considéré comme galiléen, l'axe (O, \vec{z}_0) étant vertical ascendant.
- le repère $\mathcal{R}_1 = (O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_0)$ est lié au bras (1). Ce dernier (qui supporte les deux roues (5) et (6)) est animé d'un mouvement de rotation autour de l'axe (O, \vec{z}_0) . On pose : $\theta_{10}(t) = (\vec{x}_0, \vec{x}_1)$.
- Le repère $\mathcal{R}_2 = (C, \vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_0)$ est lié à la biellette de réaction (2). On pose : $\theta_{20}(t) = (\vec{x}_0, \vec{x}_2)$.
- Le repère $\mathcal{R}_3 = (D, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_0)$ est lié à la biellette (3). Cette dernière est animée d'un mouvement de rotation autour de l'axe (D, \vec{z}_0) . On pose $\theta_{30}(t) = (\vec{x}_0, \vec{x}_3)$.
- Le repère $\mathcal{R}_4 = (E, \vec{x}_4, \vec{y}_4, \vec{z}_0)$ est lié à la porte (4). On pose $\theta_{40}(t) = (\vec{x}_0, \vec{x}_4)$. Porte fermée : $\theta_{40}(t=0) = 90$.
- On note θ_{51} l'angle de rotation de la roue (5) par rapport au bras (1).
- La roue (5) roule sans glisser sur la porte (4) en I et sur la roue (6) en J.

Hypothèse

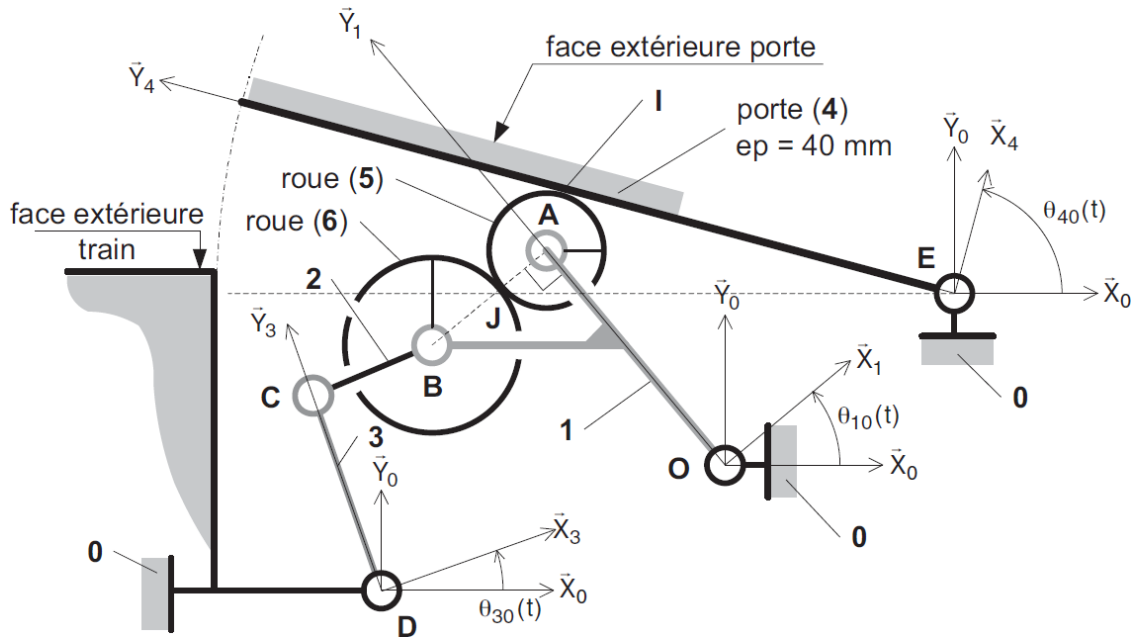


FIGURE 4 – Schéma cinématique plan – « Phase décalage en cours »

Caractéristiques géométriques :

- Bâti (0) :
 - $\vec{DO} = L\vec{x}_0 + H\vec{y}_0$ avec $L = 190 \text{ mm}$ et $H = 60 \text{ mm}$;
 - $\vec{OE} = L_0\vec{x}_0 + H_0\vec{y}_0$ avec $L_0 = 544 \text{ mm}$ et $H_0 = 65,8 \text{ mm}$.
- Bielle (3) : $\vec{DC} = L_3\vec{y}_3$ avec $L_3 = 88 \text{ mm}$.
- Bielle (2) : $\vec{CB} = L_2\vec{x}_2$ avec $L_2 = 62,6 \text{ mm}$.
- Bras support (1) :
 - $\vec{OA} = L_1\vec{y}_1$ avec $L_1 = 149 \text{ mm}$;
 - $\vec{AB} = -(R_5 + R_6)\vec{x}_1$;
 - masse : $m_1 = 13,4 \text{ kg}$.
- Porte (4) :
 - largeur : $L_4 = 850 \text{ mm}$;
 - épaisseur moyenne : 40 mm ;
 - masse : $m_3 = 120 \text{ kg}$.
- Roue (5) :
 - rayon : $R_5 = 29 \text{ mm}$;
 - masse : m_5 .
- Roue (6) + rotor du moteur à courant continu :
 - rayon : $R_6 = 37 \text{ mm}$;
 - masse : m_6 .

Hypothèse

Question 6

Écrire l'équation de fermeture géométrique liée à la boucle fermée constituée de la chaîne de solides 0 – 1 – 5 – 4.

Question 7

Déterminer alors la loi entrée sortie en exprimant θ_{40} en fonction de θ_{10} . Pour cela on mettra l'expression sous la forme $\sin \theta_{40} \cdot f(\theta_{10}) + \cos \theta_{40} \cdot g(\theta_{10}) = 1$ où f et g sont des fonctions à déterminer.

Question 8

Exprimer chacun des torseurs des liaisons entrant en compte dans la chaîne de solides 0 – 1 – 5 – 4 au point I.

Question 9

Réaliser la fermeture de chaîne cinématique au point I. On projettera l'équation des vecteurs vitesse dans la base \mathcal{R}_A .

Question 10

Calculer $\overrightarrow{V(A \in 5/4)}$ par le calcul direct.

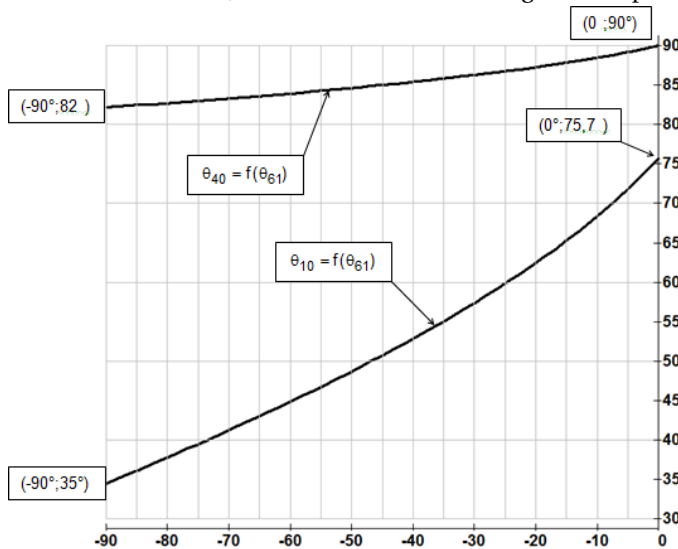
Question 11

À partir de la condition de roulement sans glissement au point I, déterminer une deuxième expression de $\overrightarrow{V(A \in 5/4)}$ à l'aide du champ des vitesses. En déduire une relation scalaire liant λ , R_5 et θ_{54} .

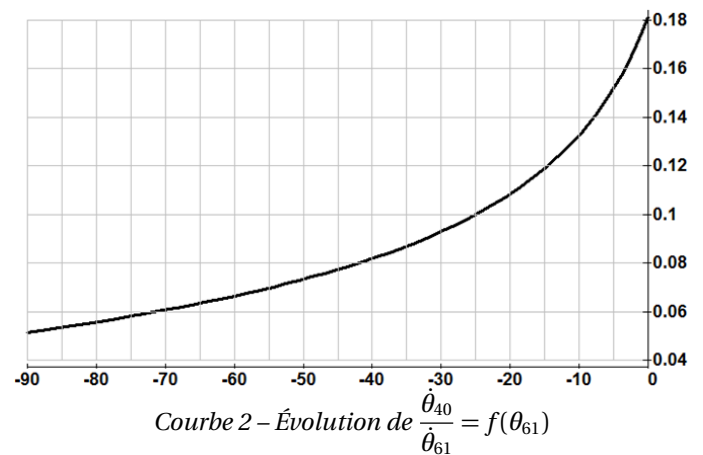
Question 12

Montrer que l'équation vectorielle obtenue par la fermeture cinématique correspond à l'équation vectorielle dérivée issue de la fermeture de géométrie de la question 6.

Les courbes 1 et 2 présentent les évolutions obtenues par simulation numérique de la position angulaire de la porte θ_{40} , de la position angulaire du bras support (1) θ_{10} et du rapport $\frac{\theta_{40}}{\theta_{10}}$ en fonction de l'angle de rotation du moteur θ_{61} . On suppose qu'à l'instant initial $t = 0$, on se trouve dans la configuration «porte fermée» pour laquelle on considère que $\theta_{61} = \theta_{51} = 0$.



Courbe 1 – Évolutions (en °) de $\theta_{40} = f(\theta_{61})$ et $\theta_{10} = f(\theta_{61})$



Courbe 2 – Évolution de $\frac{\theta_{40}}{\theta_{10}} = f(\theta_{61})$

Question 13

À l'aide des équations scalaires obtenues grâce à la fermeture géométrique et de la courbe 1 faire l'application numérique pour la configuration $t = 0$ s afin de déterminer le rayon R_5 ainsi que la valeur de $\lambda(t = 0)$ notée λ_0 . ($\cos 75,7 \simeq 0,25$ et $\sin 75,7 \simeq 0,97$)

Question 14

Déterminer la fréquence de rotation supposée constante du moteur (en tr/min) si la durée de la phase de décalage est limitée à 0,3 s.

Question 15

En utilisant la courbe 2, déterminer alors la plage de variation de la fréquence de rotation de la porte (4) par rapport à la caisse (0) sachant que la porte a une longueur $L_4 = 850$ mm et une épaisseur $e_4 = 40$ mm. Conclure vis-à-vis du cahier des charges fonctionnel.

2.2 Étude graphique de la phase de décalage

Afin de satisfaire des contraintes de stabilité, il est nécessaire de limiter la fréquence de rotation $\dot{\theta}_{30}$ de la biellette (3) lors du tout début de la phase de décalage. On fait l'hypothèse simplificatrice que la fréquence de rotation, imposée par le choix du moteur est égale à $\dot{\theta}_{61} = -50$ tr/min (sens horaire). Pour les questions suivantes, on utilisera le document-réponse fourni. On apportera une attention particulière à la qualité des tracés et au respect de l'échelle donnée. L'utilisation de la couleur est fortement conseillée.

Question 16

Sur le document-réponse fourni, définir géométriquement la position des points (B, C, I, J) dans la configuration «porte fermée». Faire apparaître la roue (6) et les solides (3), (2) et (1).

Pour la question suivante, on précisera les directions des différentes vitesses et/ou la position des centres instantanés de rotation. On respectera l'échelle des vitesses donnée sur le document réponse. Les justifications des tracés seront reportées directement sur le document-réponse.

Question 17

Sur le document-réponse fourni, construire graphiquement la vitesse du point I appartenant à la porte (4) par rapport à (1), soit $\vec{V}(I \in 4/1)$ à partir de la vitesse $\vec{V}(J \in 6/1)$. Justifier vos hypothèses. Construire alors les vitesses $\vec{V}(I \in 4/0)$ et $\vec{V}(I \in 1/0)$.

Question 18

Après avoir construit la vitesse $\vec{V}(B \in 1/0)$, déterminer $\vec{V}(C \in 3/0)$. En déduire la valeur de $\dot{\theta}_{30}$ en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$. Valider le critère du cahier des charges fonctionnel correspondant.

2.3 Étude de la phase d'escamotage

On se place à présent dans la phase d'escamotage (cf. figure 5) au cours de laquelle la position angulaire du bras support (1) par rapport à (0) reste celle atteinte par ce solide en fin de la phase de décalage. On observe le même comportement pour les solides (2) et (3).

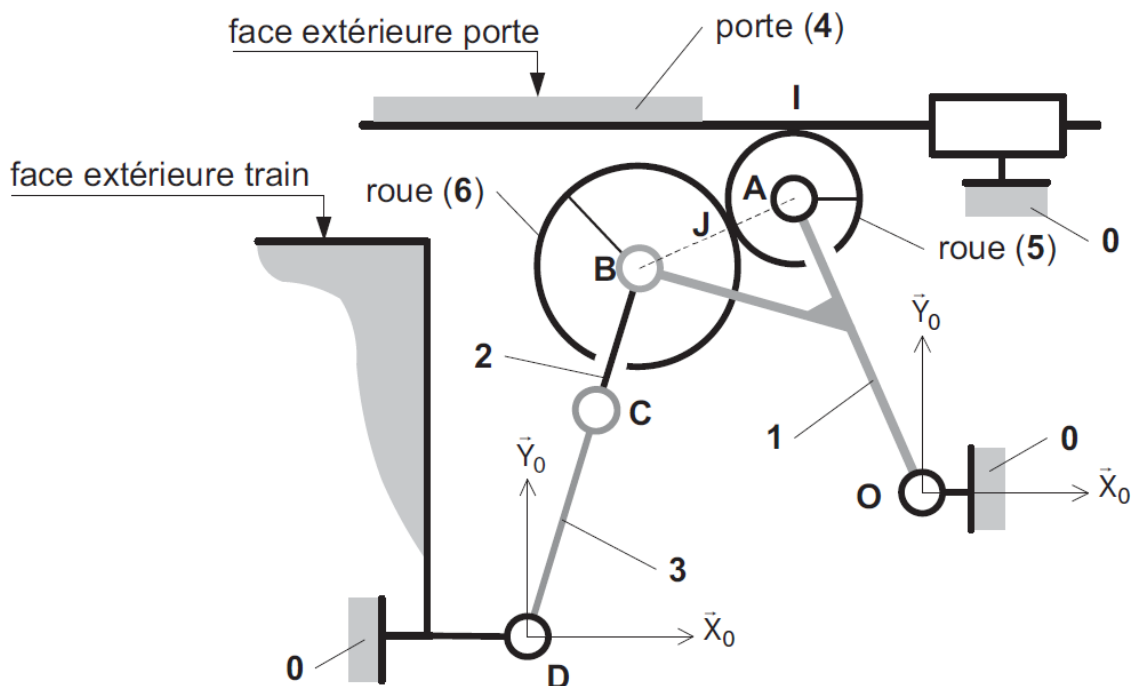


FIGURE 5 – Schéma cinématique plan – « Phase escamotage »

Question 19

Déterminer la valeur constante (en mm) de $\vec{OI} \cdot \vec{y}_0$ lors de la phase d'escamotage. Valider alors la satisfaction de l'exigence 8.2.3.

Afin de s'assurer d'une ouverture complète de la porte, on propose une loi de commande en vitesse du moteur. A l'instant initial, on suppose que $\dot{\theta}_m(t=0) = 0$. Chronologiquement, la mise en rotation de l'actionneur s'effectue à accélération constante $\ddot{\theta}_m$ permettant d'atteindre, à l'instant t_1 , la vitesse d'escamotage de la porte définie par le cahier des charges. Puis, à l'instant $t_2 = 2,8 \text{ s}$, une décélération constante permet d'atteindre à l'instant $t_3 = 3,1 \text{ s}$, une vitesse plus faible dite «d'accostage» définie par le cahier des charges. A l'instant $t_4 = 4 \text{ s}$, la porte arrive en butée à la vitesse d'accostage assurant une ouverture complète.

Afin de garantir le temps d'ouverture, on utilise les valeurs maximales admissibles des vitesses d'escamotage et d'accostage définies par le cahier des charges. On suppose que les valeurs absolues des accélérations et des décélérations sont identiques et

que toutes les liaisons sont parfaites.

Question 20

À partir de la description temporelle, tracer l'allure de la loi de commande en vitesse $\dot{\theta}_m(t)$ du moteur et la loi de commande en accélération $\ddot{\theta}_m(t)$. Indiquer toutes les valeurs caractéristiques.

3 Étude de la commande de la porte en mode nominal

L'objectif est d'analyser le comportement du système piloté en chaîne directe et de valider la conformité avec le cahier des charges fonctionnel.

3.1 Analyse du modèle de commande de la porte

On se place uniquement dans la phase d'escamotage dont la durée moyenne est fixée à 4 s. La translation de la porte (4) le long de la caisse du train est notée $y_4(t)$. On fait l'hypothèse qu'à l'instant initial, correspondant au début de la phase d'escamotage étudiée, la porte est immobile avec $y_4(t=0)=0$ et $\theta_m(t=0)=0$. Grâce à une redéfinition du paramétrage et dans un souci de simplification, on considère qu'au cours de cette phase $\omega_m(t) \geq 0$ et $y_4(t) \geq 0$.

L'étude du moteur à courant continu commandé par l'induit assurant le déplacement de la porte donne les équations suivantes :

$$u_m(t) = K_e \omega_m(t) + R i_m(t) + L \frac{di_m(t)}{dt} \quad \text{et} \quad K_c i_m(t) - C_r(t) = J \frac{d\omega_m(t)}{dt} + f \omega_m(t)$$

Les données du constructeur permettent d'obtenir les valeurs suivantes :

$$K_e = 0,86 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1} \quad K_c = 0,86 \text{ Nm} \cdot \text{A}^{-1} \quad R = 0,5 \Omega \quad L = 1 \text{ mH} \quad u_m \in [-24 \text{ V}; +24 \text{ V}]$$

Le calcul de l'inertie équivalente de l'ensemble mobile en phase d'escamotage ramenée sur l'axe moteur mène au résultat suivant : $J = 0,23 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ et on estime que $f = 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$. On note $\Omega_m(p)$ la transformée de Laplace de $\omega_m(t)$, $Y_4(p)$ la transformée de Laplace de $y_4(t)$, $\Theta_m(p)$ la transformée de Laplace de $\theta_m(t)$, $U_c(p)$ la transformée de Laplace de $u_c(t)$... La commande en chaîne directe de l'actionneur piloté en tension $u_c(t)$ peut être modélisée par le schéma bloc donné sur la figure 6.

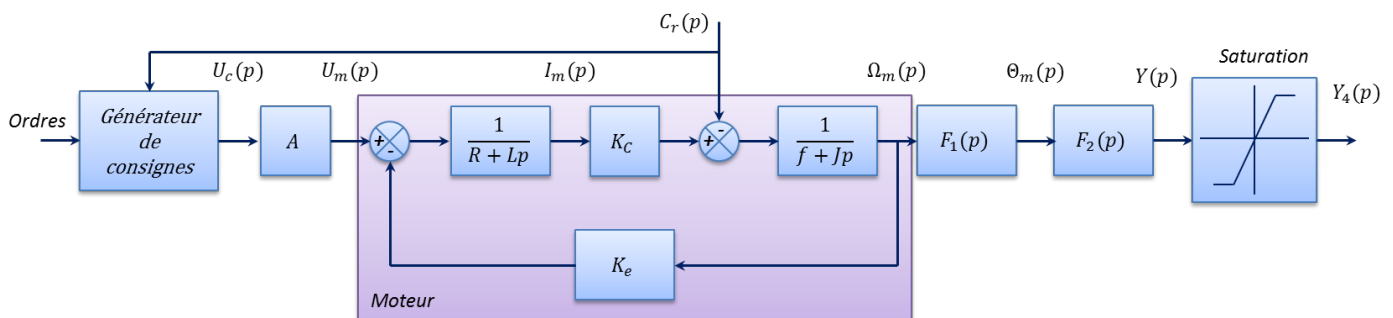


FIGURE 6 – Modèle de commande

La fonction de transfert de l'amplificateur de puissance est modélisée par un gain pur A supposé unitaire.

Question 21

Montrer que la fonction de transfert du moteur non perturbé peut se mettre sous la forme $\frac{\Omega_m(p)}{U_m(p)} = \frac{K_m}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)}$. Déterminer l'expression du gain statique K_m . Déterminer les valeurs numériques (en s) des deux constantes de temps T_1 et T_2 .

On soumet le système (figure 6) non perturbé à une entrée définie par $u_c(t) = u_0 \cdot u(t)$ avec $u(t)$: signal du type échelon unitaire, u_0 : tension en V. La réponse temporelle $y_4(t)$ est tracée sur la figure 7 pour trois valeurs distinctes de u_0 .

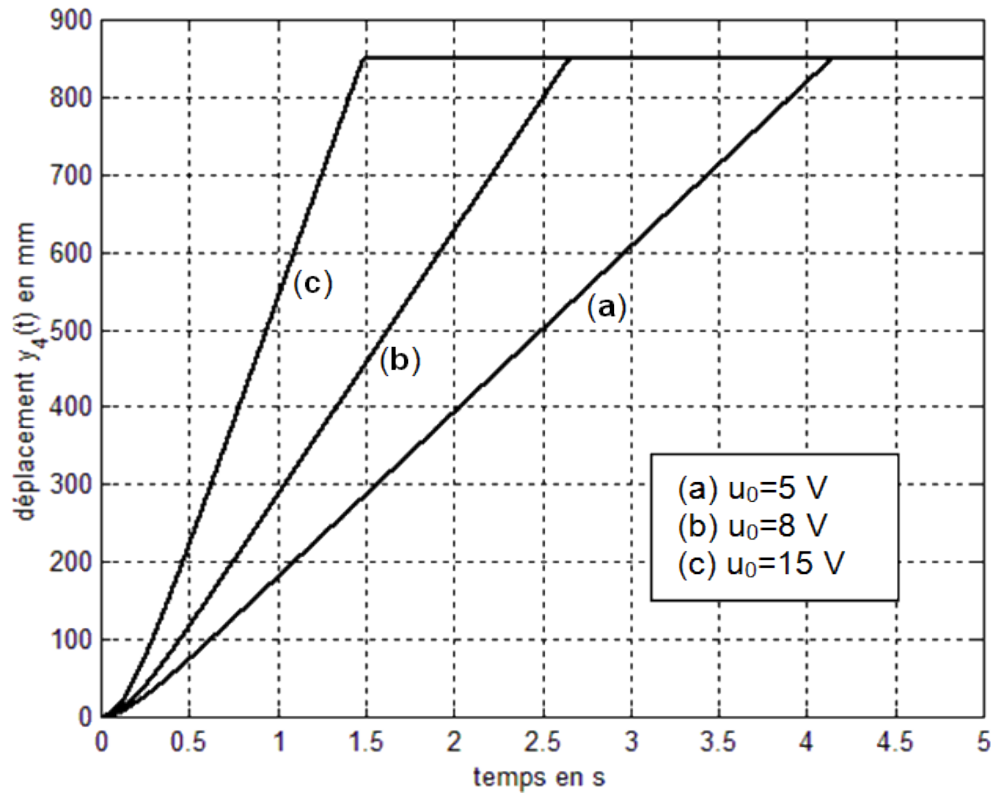


FIGURE 7 – Réponse temporelle $y_4(t)$

Question 22

En observant la figure 7, proposer une description conditionnelle (si ... alors...) du bloc saturateur de la figure 6 en utilisant les variables $y_4(t)$ et $y(t)$. Quelle contrainte mécanique est modélisée par ce bloc ?

Question 23

En vous aidant de la figure 7, justifier le caractère non linéaire du saturateur.

3.2 Estimation du couple résistant

Afin de respecter le cahier des charges, il est nécessaire d'avoir une estimation du couple résistant $C_r(t)$. Or l'évolution de cette grandeur en fonctionnement n'est pas accessible directement par un capteur contrairement au courant de l'induit $i_m(t)$ et de la fréquence de rotation du moteur $\omega_m(t)$.

Il est cependant possible de reconstruire une information (estimation) sur la valeur du couple résistant (notée $\hat{C}_r(t)$) grâce à une chaîne qui utilise des grandeurs issues de mesures effectuées directement sur l'ensemble variateur-moteur ($i_m(t)$ et $\omega_m(t)$). La figure 8 donne l'architecture de cette chaîne.

Une modélisation de cette architecture réelle est cependant indispensable pour concevoir l'estimateur. On suppose que la chaîne décrite précédemment se réduit au schéma bloc suivant (cf. figure 9).

On note $\hat{C}_r(t)$ l'estimation du couple résistant et $F(p)$ la fonction de transfert du correcteur. En toute rigueur $I_m(p)$ et $\Omega_m(p)$ représentent des grandeurs mesurées directement sur le système réel.

L'objectif est de construire un estimateur qui nous permette de nous ramener à un problème d'asservissement où la consigne est la grandeur de perturbation $C_r(p)$ et la sortie sa valeur estimée $\hat{C}_r(p)$.

Pour obtenir une bonne estimation, l'estimateur doit être précis et rapide.

Le cahier des charges est le suivant :

- erreur en position nulle : $\varepsilon_p(\infty) = C_r(\infty) - \hat{C}_r(\infty) = 0$;
- erreur de traînage inférieure à 1% ;
- temps de réponse à 5% inférieure à 0,05 s.

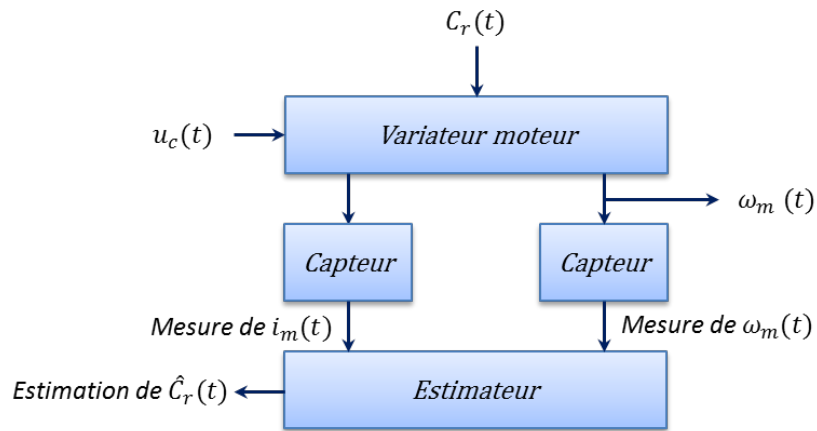


FIGURE 8 – Architecture de la chaîne d'estimation

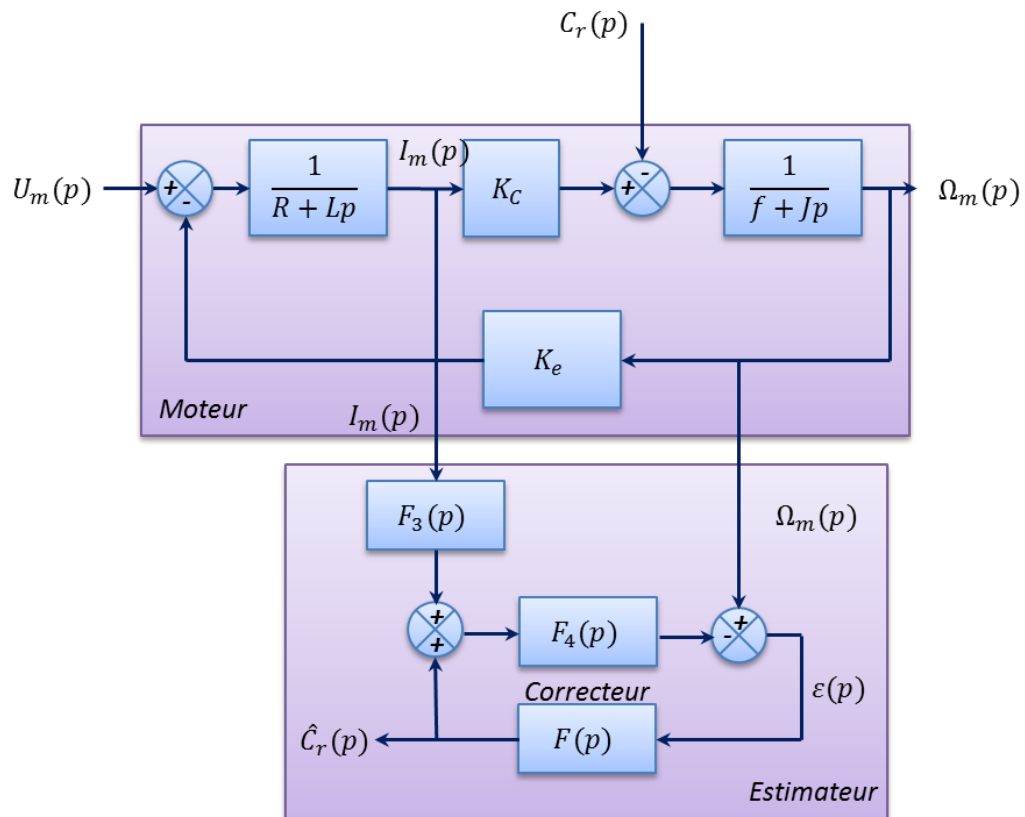


FIGURE 9 – Schéma bloc du moteur et de l'estimateur

Question 24

D'après le schéma bloc du moteur, déterminer $\Omega_m(p)$ en fonction de $C_r(p)$ et $I_m(p)$.

Question 25

D'après le schéma bloc de l'estimateur, déterminer $\varepsilon(p)$ en fonction de $\Omega_m(p)$, $\hat{C}_r(p)$ et $I_m(p)$ et déterminer $\hat{C}_r(p)$ en fonction de $\varepsilon(p)$.

Question 26

En déduire la relation entre $\hat{C}_r(p)$, $C_r(p)$ et $I_m(p)$. Déterminer $F_3(p)$ et $F_4(p)$ afin que l'estimateur puisse se mettre sous la forme du schéma bloc figure 10.

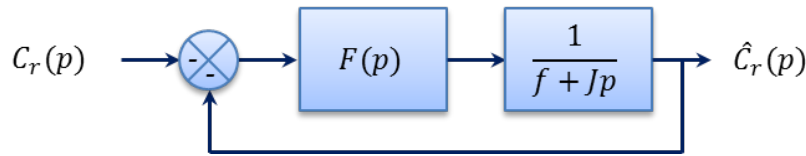


FIGURE 10 – Schéma bloc équivalent

On choisit le correcteur suivant $F(p) = K_{cor} \frac{1 + T_{cor} \cdot p}{T_{cor} p}$.

Question 27

Quel doit être le gain statique en boucle fermée de la fonction de transfert de l'estimateur afin que l'erreur en position soit nulle ? Est-ce le cas ?

On donne $T_{cor} = \frac{J}{f}$ et $K_{cor} = 10$.

Question 28

Tracer en vert les diagrammes de Bode (asymptotiques et réels) de la fonction de transfert en boucle ouverte de l'estimateur sans correcteur. Faire apparaître les points caractéristiques.

Question 29

Tracer en rouge les diagrammes de Bode (asymptotiques et réels) du correcteur. Faire apparaître les points caractéristiques.

On rappelle que $J = 0,23 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ et que $f = 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$.

Question 30

Déterminer K_{cor} pour vérifier l'erreur de traînage imposée par le cahier des charges. Faire l'application numérique.

Question 31

On donne les tracés de la réponse indicielle (entrée unitaire) de la fonction de transfert de en boucle fermée de l'estimateur avec et sans correction. Faire apparaître sur chaque tracé l'erreur de position et le temps de réponse à 5%. Vérifie-t-on tous les critères du cahier des charges de l'estimateur ?

