

# DS 08- Fauteuil dynamique de cinéma

Avec Correction

PTSI

Mardi 3 juin

## Table des matières

I	Présentation du système	2
II	Exigence fonctionnelle « amplifier la sensation d'accélération »	4
III	Exigence fonctionnelle : « Incliner le spectateur suivant l'axe de tangage et de roulis »	15
IV	Conception du montage d'une roue de charriot	21

# Fauteuil dynamique de cinéma

## I Présentation du système

### I.1 Contexte

Ce concept a été inventé au Canada en 2008, et s'est étendu à toute l'Amérique du Nord avant de traverser l'Atlantique pour proposer un cinéma dynamique avec une quantité d'effets spéciaux et spatiaux. Le fauteuil dynamique de cinéma est principalement destiné à l'industrie du divertissement et de la simulation.

Pour ressentir au mieux ces sensations, la technologie permet désormais de ressentir dans son fauteuil les différents mouvements, par de fortes vibrations et accélérations. Ce système repose sur la post-synchronisation des films. Comme pour un doublage ou un sous-titrage, les mouvements du film sont transmis au fauteuil.

Si la plate-forme à six degrés de liberté s'est imposée dans le cas des simulateurs de vols, elle ne répond pas aux exigences plus étendues des fauteuils dynamiques. Des solutions spécifiques à un environnement de simulation aussi réaliste que possible nécessitent le recours à un système de restitution des mouvements. Le système étudié est une évolution en cours d'étude des fauteuils dynamiques actuellement commercialisés, qui s'inspire des sièges dynamiques utilisés pour l'entraînement des pilotes d'avion de chasse (voir figure 1).



FIGURE 1 – Modèles de sièges

## I.2 Mise en situation

Le siège dynamique est constitué :

- du dossier (voir figure 2) qui permet d'agir directement sur la tête du spectateur afin d'amplifier la sensation d'accélération (via l'oreille interne). Le point de contact entre le dossier et la tête du spectateur est matérialisé par le point D,
- de l'assise du siège (voir figure 3) qui permet d'obtenir un mouvement de tangage et un mouvement de roulis du spectateur.

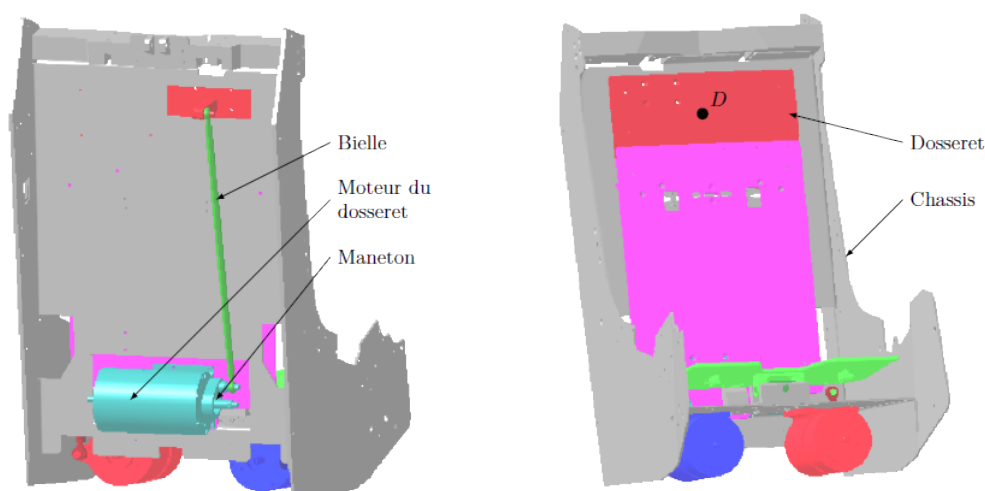


FIGURE 2 – Dossieret

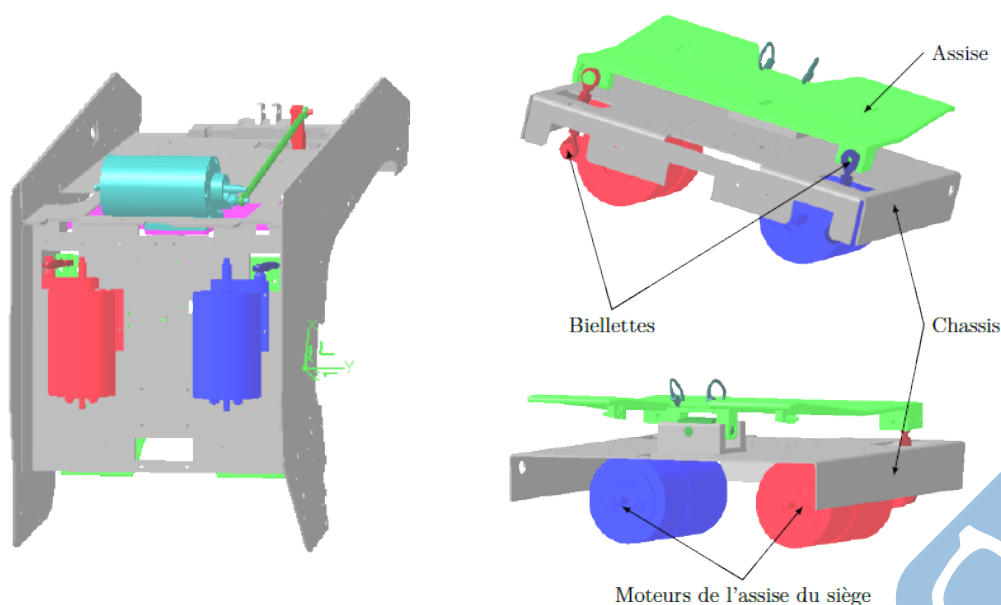


FIGURE 3 – Assise du siège

Les trois motorisations (une pour le dossier et deux pour l'assise) sont composées chacune d'un moteur à courant continu à aimants permanents et d'un réducteur de vitesse. Chaque moteur est alimenté par un variateur de vitesse dont la structure de puissance est un hacheur. Un capteur de courant interne au variateur est utilisé par ce accouplée à l'axe de chaque moteur est utilisée par le variateur correspondant pour réaliser un asservissement de vitesse. Un codeur incrémental accouplé aussi sur l'axe de chaque moteur est utilisé par une carte à base de microcontrôleur pour réaliser un asservissement de position, une sortie analogique de cette carte étant reliée à l'entrée de consigne du variateur de vitesse.

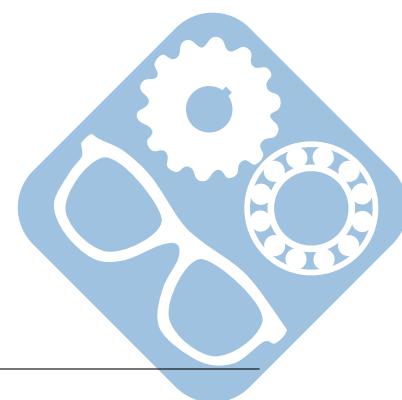
### I.3 Étude proposée

Les accélérations procurées aux spectateurs sont un élément fondamental qui conditionne la conception et la réalisation de ce fauteuil dynamique de cinéma. Les solutions technologiques retenues répondent à cet objectif. Elles ne sont pas toutes abordées dans ce sujet. Quelques unes de celles retenues pour le fauteuil dynamique de cinéma sont étudiées pour valider les solutions choisies par les concepteurs vis-à-vis des performances attendues listées par le cahier des charges. Dans cette optique, il est proposé au candidat les trois études suivantes :

- modélisation, validation et optimisation de certains constituants associés à l'exigence fonctionnelle « amplifier la sensation d'accélération »,
- validation de l'architecture de la chaîne fonctionnelle réalisant l'exigence fonctionnelle « incliner le spectateur suivant l'axe de tangage et de roulis »,
- synthèse globale de l'étude proposée.

## II Exigence fonctionnelle « amplifier la sensation d'accélération »

**Objectif** Proposer un modèle de comportement des éléments réalisant l'exigence fonctionnelle « amplifier la sensation d'accélération » puis valider les performances attendues listées par le cahier des charges (figure 4).



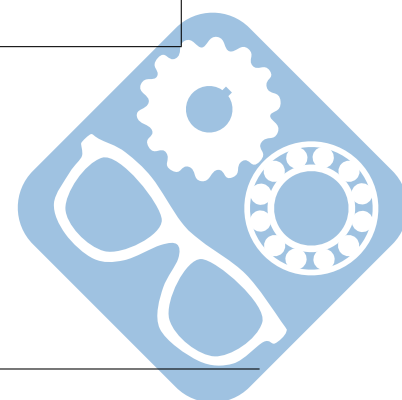
Exigence	Critères d'appréciation	Niveau
Amplifier la sensation d'accélération	Précision statique de la boucle d'asservissement de position : <ul style="list-style-type: none"> <li>— Erreur statique de position,</li> <li>— Erreur statique de trainage,</li> <li>— Erreur statique d'accélération.</li> </ul>	$<1\%$ $<1\%$ $<1\%$
	Rapidité pour un échelon de consigne d'accélération : <ul style="list-style-type: none"> <li>— Temps de montée de 0 à 100% de la consigne</li> <li>— Dépassement</li> </ul>	$<5\text{ms}$ $<20\%$
	Accélération maximale du point D de la tête du spectateur situé à 85 mm au-dessus de l'axe de rotation du dossier	$6\text{m.s}^{-2} < a_{\text{max}} < 7\text{m.s}^{-2}$

FIGURE 4 – Extrait du cahier des charges associé à l'exigence fonctionnelle « Amplifier la sensation d'accélération » réalisée par le dossier

## II.1 Notations et hypothèses

Le schéma multi physique modélisant l'asservissement de position du dossier est fourni (figure 5). Le schéma-bloc retenu pour la modélisation de l'asservissement de position du dossier est fourni (figure 6).

	Description	Variable temporelle	Unité
$\theta_{Cd}(p)$	consigne de position du dossier	$\theta_{Cd}(t)$	rad
$\theta_C(p)$	consigne de position de l'axe moteur	$\theta_C(t)$	rad
$\theta(p)$	position de l'axe moteur	$\theta(t)$	rad
$\theta_r(p)$	position de l'axe de sortie du réducteur	$\theta_r(t)$	rad
$\theta_d(p)$	position du dossier	$\theta_d(t)$	rad
$N_{\text{Codeur}}(p)$	valeur numérique issue du comptage incrémental	$N_{\text{Codeur}}(t)$	
$r$	rapport de transmission du réducteur		
$K_c$	gain du mécanisme de la transformation de mouvement du dossier		



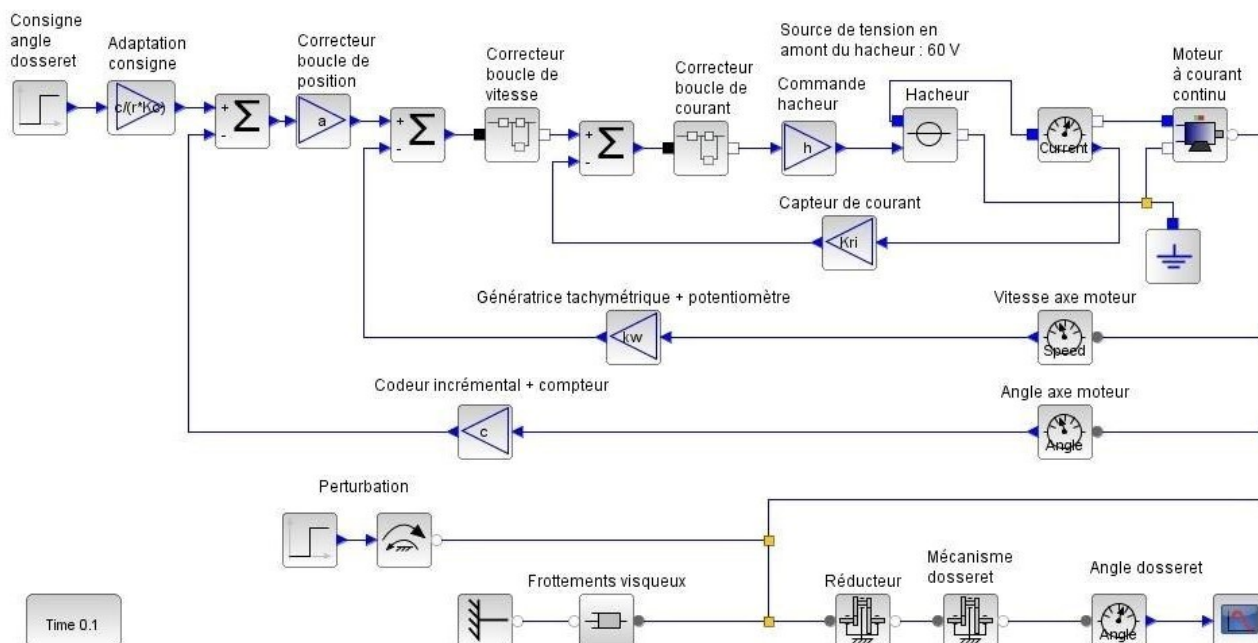


FIGURE 5 – Schéma multi-physique de l'asservissement du dossieret

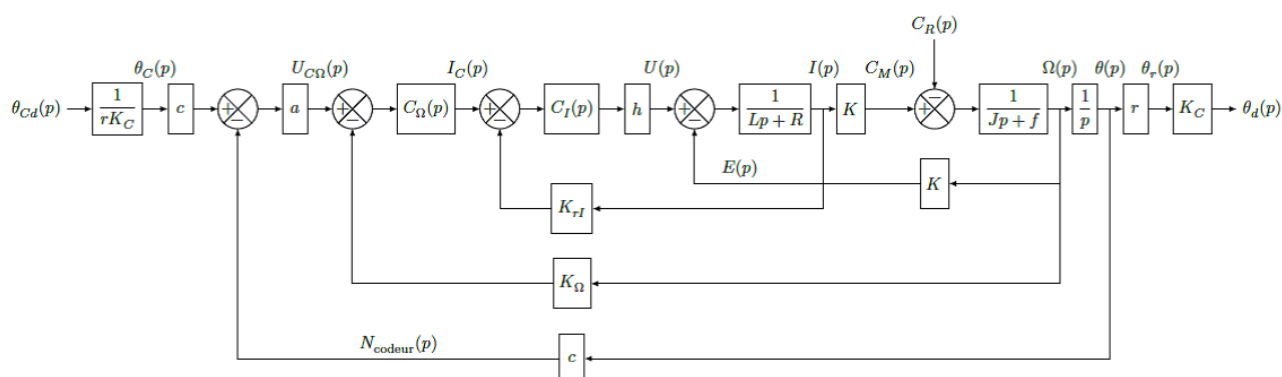
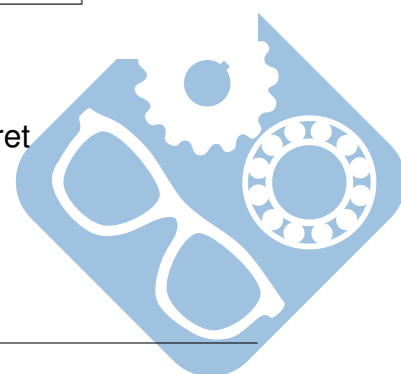


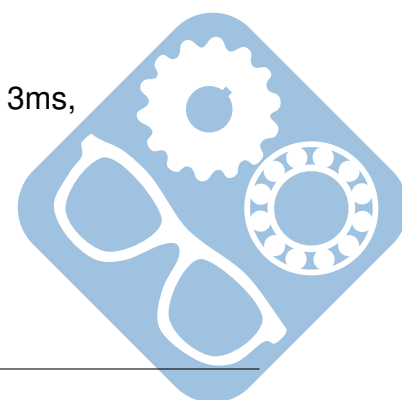
FIGURE 6 – Schéma-bloc de l'asservissement du dossieret



	Description	Variable temporelle	Unité
c	gain du codeur incrémental		rad <sup>-1</sup>
a	gain proportionnel du correcteur de l'asservissement de position		V
$U_{C\Omega}(p)$	image de la consigne de vitesse de l'axe moteur	$u_{C\Omega}(t)$	V
$\Omega(p)$	vitesse de l'axe moteur	$\Omega(t)$	rad.s <sup>-1</sup>
$C_{\Omega}(p)$	correcteur de l'asservissement de vitesse		
$I_C(p)$	image de la consigne de courant	$i_C(t)$	V
$C_I(p)$	correcteur de l'asservissement de courant		
h	gain du hacheur		
$K_{rI}$	gain du capteur de courant		
$U(p)$	tension d'alimentation du moteur	$u(t)$	V
$E(p)$	force électromotrice du moteur	$e(t)$	V
$I(p)$	courant dans l'induit du moteur	$i(t)$	A
$C_M(p)$	couple moteur	$c_M(t)$	N.m
$C_R(p)$	couple résistant perturbateur	$c_R(t)$	N.m
L	inductance du circuit d'induit du moteur		
R	résistance du circuit d'induit du moteur		
$K_{\Omega}$	gain de la génératrice tachymétrique		V.s.rad <sup>-1</sup>
K	gain de la constante de couple ou de la constante de force électromotrice		
J	moment d'inertie de l'ensemble en mouvement, ramené au niveau de l'axe moteur		
f	coefficient de frottements visqueux équivalent pour l'ensemble en mouvement		

Données :

- $K = 0,115 \text{ N.m.A}^{-1} (\text{V.s.rad}^{-1})$
- $R = 1 \Omega$
- $L = 1,1 \text{ mH}$
- $k_{rI} = 0,5 \text{ V.A}^{-1}$
- $h = 6$
- $r = 1/50$
- $f = 4.10^{-4} \text{ N.m.s.rad}^{-1}$
- $J = 0,16.10^{-3} \text{ kg.m}^2$
- Correcteur de courant  $C_I(p) = k_2 \cdot \left(1 + \frac{1}{T_2 \cdot p}\right)$ , avec  $k_2 = 5$  et  $T_2 = 0,3 \text{ ms}$ ,
- Correcteur de vitesse  $C_{\Omega}(p) = k_1 \cdot \left(1 + \frac{1}{T_1 \cdot p}\right)$ , avec  $k_1 = 20$ .



Hypothèses :

- La période d'échantillonnage est suffisamment faible pour être négligeable devant la dynamique globale du système et les différentes variables sont donc toutes considérées comme des fonctions continues du temps,
- Le temps de réponse du hacheur est considéré négligeable dans l'étude,
- Les conditions de Heaviside sont vérifiées.

## II.2 Comportement cinématique du mécanisme de transformation de mouvement du dossieret

**Objectif** Valider la linéarité du comportement du mécanisme de transformation de mouvement du dossieret (figure 7) en établissant la loi de comportement cinématique.

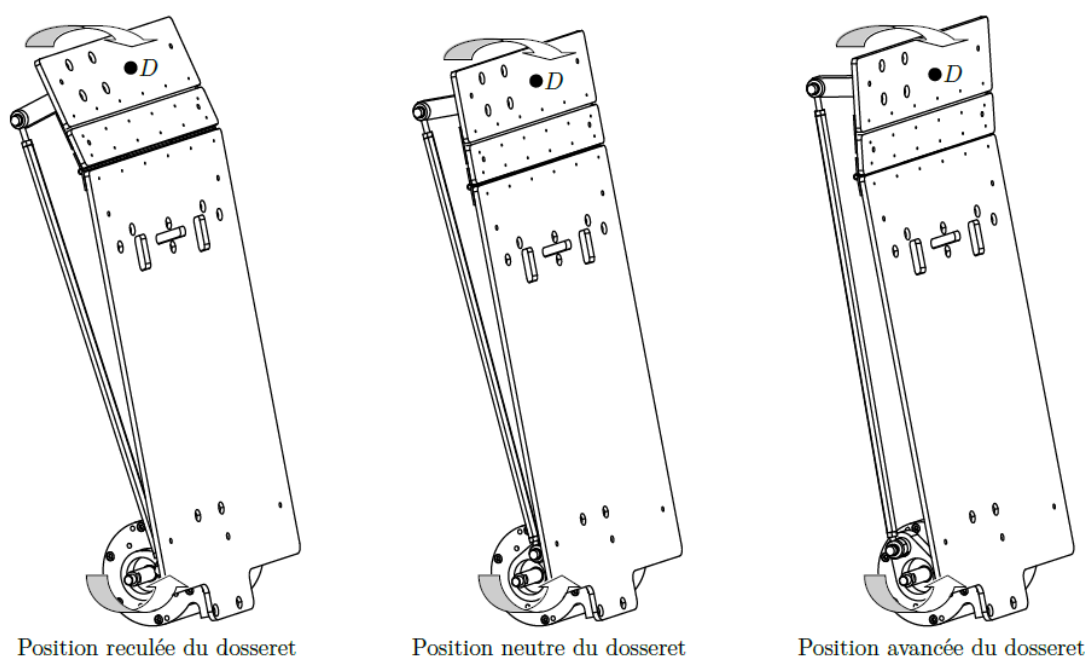
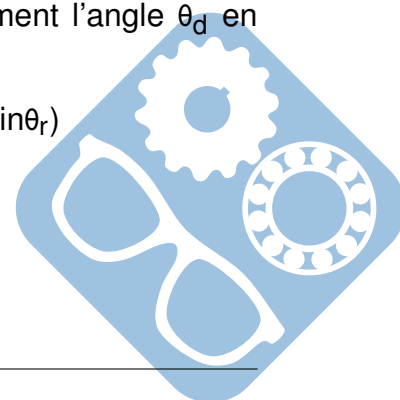


FIGURE 7 – Mécanisme de transformation de mouvement du dossieret

Le modèle cinématique de la transformation de mouvement du dossieret est fourni figure 8.

**Question 1 :** À l'aide d'une fermeture géométrique, exprimer littéralement l'angle  $\theta_d$  en fonction de l'angle  $\theta_r$ . Mettre l'expression sous la forme :

$$\cos\theta_d \cdot (E + F \cdot \cos\theta_r) + \sin\theta_d \cdot (G + F \cdot \sin\theta_r) = H + (I \cdot \cos\theta_r + J \cdot \sin\theta_r)$$





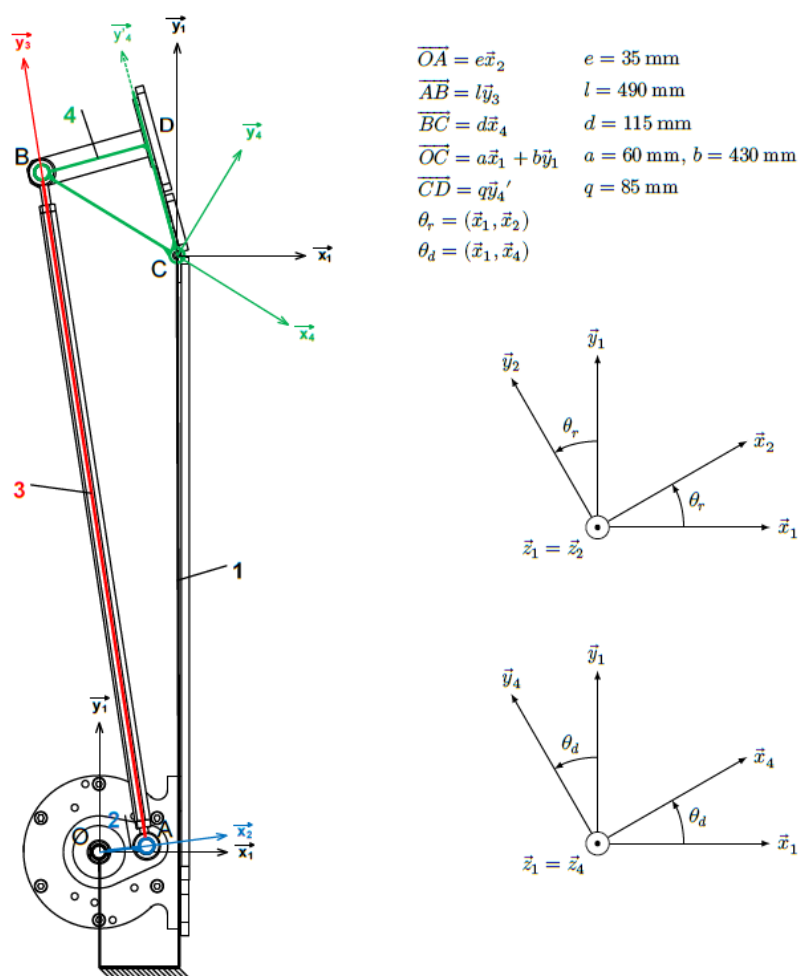


FIGURE 8 – Modèle cinématique de la transformation de mouvement du dossieret

Une simulation numérique a permis d'obtenir le tracé représenté sur la figure 9. Afin d'obtenir un modèle linéaire de la caractéristique  $\theta_d = f(\theta_r)$ , l'étude se fait autour de son point de fonctionnement statique pour de petites variations.

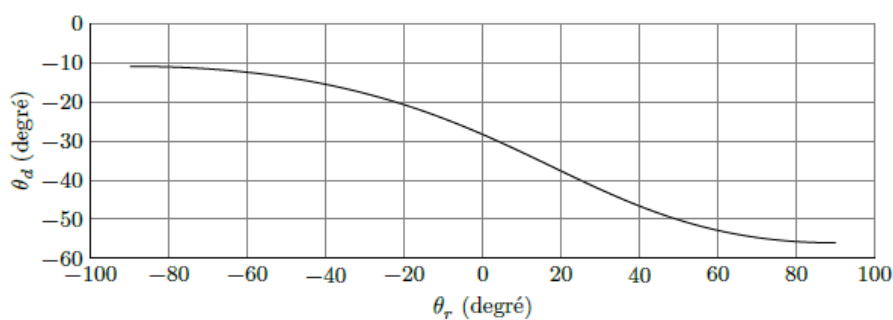


FIGURE 9 – Représentation de l'équation de fermeture géométrique

**Question 2 :** Déterminer par linéarisation autour du point de fonctionnement  $\theta_r = 0^\circ$ , la valeur numérique du gain dynamique  $K_C$  de la transformation de mouvement du dossieret.

## II.3 Comportement du codeur incrémental et de la génératrice tachymétrique

**Objectif** Établir un modèle de comportement du codeur incrémental et de la génératrice tachymétrique.

Le moteur AXEM a pour référence F12M4. Il est alimenté par une carte variateur de vitesse RTS 10-20-60 (PARVEX) alimentée sous 60VDC et pouvant délivrer 20A pendant 2s, avec un courant nominal de 10A.

Ce dernier comprend les boucles d'asservissement de vitesse et de courant. Sur l'arbre moteur sont montés une génératrice tachymétrique et un codeur incrémental 250points.tour<sup>-1</sup>. Le comptage incrémental est effectué sur le front montant d'une des deux voies. La génératrice tachymétrique est raccordée à l'entrée de retour vitesse du variateur. Un réglage par potentiomètre présent dans le variateur est effectué pour obtenir une tension de 5V au niveau du comparateur de l'asservissement de vitesse lorsque la fréquence de rotation du moteur est égale à 3000tr.min<sup>-1</sup>.

**Question 3 :** En tenant compte des informations précédentes, calculer la valeur numérique de  $c$  et de  $K_{\Omega}$  (figure 6).

*Commentaire :* Vous ferez attention aux unités données dans le tableau 4.

## II.4 Comportement de l'ensemble variateur et moteur du dossieret

**Objectif** Valider un modèle simplifié de l'asservissement de position de l'axe moteur afin d'analyser les paramètres influant sur la précision et proposer une amélioration du système.

Pour cela, il faut :

- établir un modèle simplifié de l'asservissement de courant,
- établir un modèle simplifié de l'asservissement de vitesse,
- analyser la précision de l'asservissement de position.

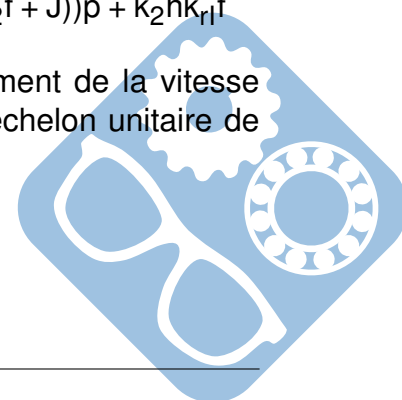
### II.4.1 Modélisation de l'asservissement du courant

L'étude suivante consiste à vérifier la validité de la simplification du modèle de la boucle d'asservissement du courant de la figure 10 par le modèle de la figure 11.

Pour le modèle de la figure 10 lorsque  $C_R(p) = 0$ , la fonction de transfert s'écrit :

$$\frac{\Omega(p)}{I_C(p)} = \frac{Kk_2hT_2p + Kk_2h}{T_2LJp^3 + (T_2(Lf + RJ) + k_2hk_{r1}T_2J)p^2 + (T_2(Rf + K^2) + k_2hk_{r1}(T_2f + J))p + k_2hk_{r1}f}$$

À l'aide d'un logiciel de simulation, une comparaison du comportement de la vitesse en sortie des deux modèles a été effectuée (figure 12) et ce pour un échelon unitaire de consigne de courant appliqué en entrée.



**Question 4 :** Pour chacun des deux modèles (initial et simplifié), quelle est la valeur finale de  $\Omega(t)$  lorsque  $i_c(t)$  est un échelon unitaire ? À l'aide de ces résultats et des relevés issus de la simulation dans le régime transitoire, conclure quant à la validité de la simplification du modèle sachant que chaque sollicitation du dossieret a une durée d'environ 30ms.

*Commentaire : Attention, on ne demande que la valeur finale*

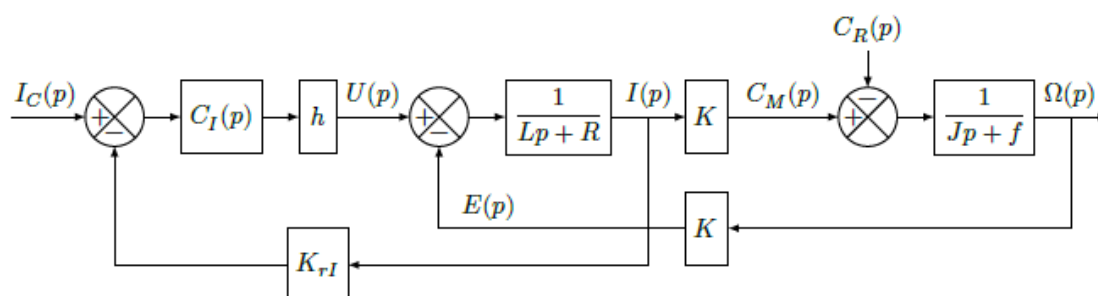


FIGURE 10 – Modèle initial de la boucle d'asservissement de courant

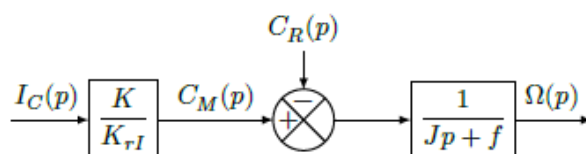


FIGURE 11 – Modèle simplifié de la boucle d'asservissement de courant

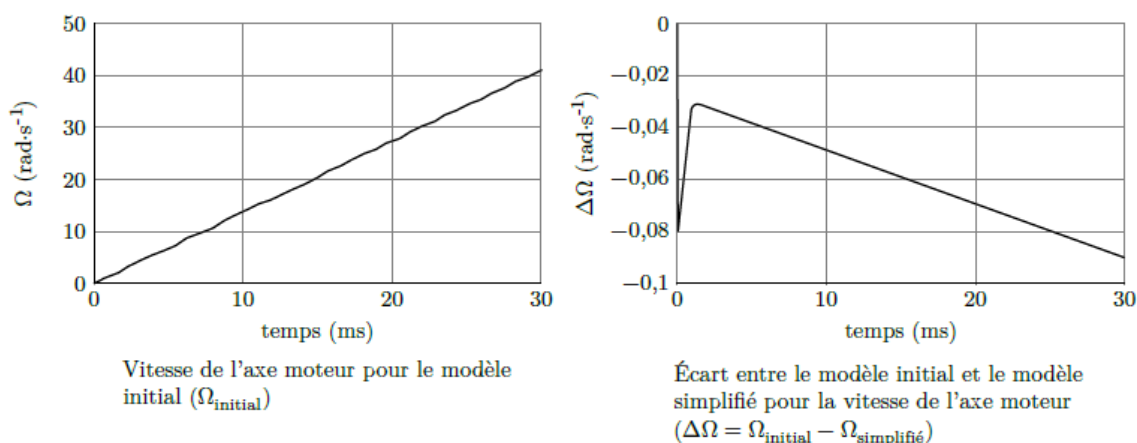


FIGURE 12 – Tracés

## II.4.2 Modélisation de l'asservissement de vitesse

L'étude suivante consiste à obtenir un modèle simplifié de la boucle d'asservissement de vitesse (figure 13) au regard des réglages effectués et de l'influence d'une perturbation de

type échelon sur le dossier. En effet, vu la courte durée des sollicitations, la perturbation sur le dossier, dont l'origine peut être une action du spectateur sur ses muscles cervicaux, peut être modélisée par un échelon.

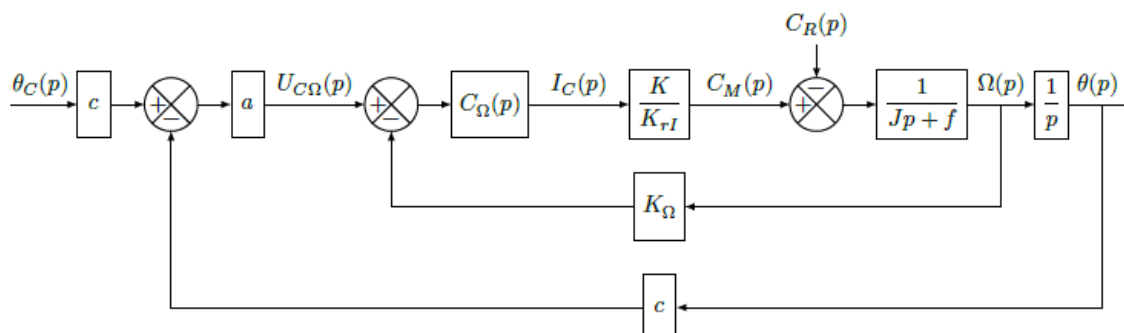


FIGURE 13 – Modèle de la boucle d'asservissement de vitesse

**Question 5 :** Exprimer la fonction de transfert de la boucle de vitesse  $H_{\Omega}(p) = \frac{\Omega(p)}{U_{C\Omega}(p)}$ , lorsque  $C_R(p) = 0$ . Rappel :  $C_{\Omega}(p) = k_1 \cdot \left(1 + \frac{1}{T_1 \cdot p}\right)$

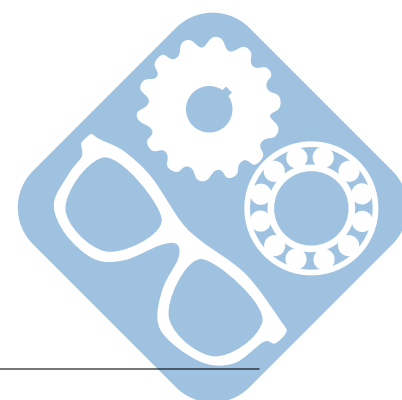
**Question 6 :**  $T_1$  étant égal à  $\frac{J}{f}$ , montrer alors que la fonction de transfert en boucle fermée peut se mettre sous la forme  $\frac{b}{\tau \cdot p + 1}$ . Calculer les valeurs numériques des termes  $b$  et  $\tau$ .

**Question 7 :** En déduire, à l'aide de la figure 13,  $\frac{\theta(p)}{C_R(p)}$  lorsque  $\theta_C(p) = 0$ . Calculer ensuite la valeur finale de  $\theta(t)$  lorsque  $c_R(t)$  est un échelon unitaire. Conclure quant à l'action, en régime permanent, du correcteur proportionnel et intégral sur les effets d'une perturbation  $c_R(t)$  de type échelon.

*Commentaire :* Il faudra pour cela déplacer le sommateur de  $C_R(p)$ , si vous avez oublié la méthode il est possible de la retrouver en transformant un extrait du schéma bloc en équations.

### II.4.3 Modélisation de la boucle d'asservissement de position

Après toutes les simplifications précédentes, est obtenu le modèle de la figure 14 où seul le comportement en réponse à la consigne  $\theta_C$  est abordé.



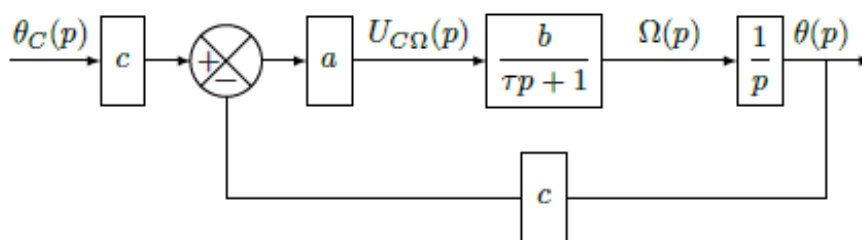


FIGURE 14 – Modèle simplifié de la boucle d'asservissement de position

**Question 8 :** Exprimer la fonction de transfert  $\frac{\theta(p)}{\theta_C(p)}$ . Déterminer ensuite la valeur numérique de  $a$  pour avoir un facteur d'amortissement égal à 0,7. Justifier le choix de ce facteur d'amortissement. (Pour ce calcul et les calculs suivants prendre  $b = 63 \text{ rad.s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ ,  $\tau = 2,2 \text{ ms}$ ,  $c = 40 \text{ rad}^{-1}$ ).

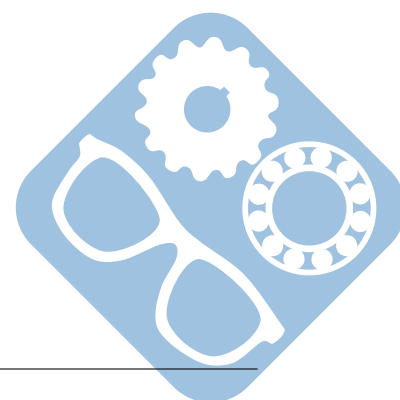
#### II.4.4 Analyse de la précision du système

Un aspect important pour la simulation sensorielle du siège dynamique est la capacité du système à reproduire fidèlement la consigne de position issue du programme de simulation sensorielle du siège dynamique. Dans un premier temps, l'étude se limite à la précision statique en utilisant le modèle défini à la figure 14. L'erreur représente la différence entre l'entrée  $\theta_C(t)$  et la sortie  $\theta(t)$  et est définie par la variable  $\mu(t) = \theta_C(t) - \theta(t)$ .

La précision statique du système est définie par les trois paramètres suivants :

- $\mu_p = \lim_{t \rightarrow +\infty} \mu(t)$ , suite à une entrée de type échelon unité ( $\theta_C(t) = u(t)$ ,  $\theta_C(p) = \frac{1}{p}$ ) appelé **erreur de position**,
- $\mu_v = \lim_{t \rightarrow +\infty} \mu(t)$ , suite à une entrée de type rampe ( $\theta_C(t) = t \cdot u(t)$ ,  $\theta_C(p) = \frac{1}{p^2}$ ) appelé **erreur de traînage** ;
- $\mu_a = \lim_{t \rightarrow +\infty} \mu(t)$ , suite à une entrée de type accélération ( $\theta_C(t) = \frac{t^2 \cdot u(t)}{2}$ ,  $\theta_C(p) = \frac{1}{p^3}$ ) appelé **erreur en accélération**.

**Question 9 :** Exprimer dans un premier temps  $\mu(p)$  en fonction de  $\theta_C(p)$ , puis déterminer de façon littérale et numérique l'erreur de position  $\mu_p$ , l'erreur de traînage  $\mu_v$  et l'erreur en accélération  $\mu_a$ . Conclure quant à la précision statique du système suite aux différentes consignes  $\theta_C(p)$  de type échelon, rampe et accélération.



## II.5 Validation de la performance simulée en accélération du dossier

**Objectif** Valider la performance simulée en accélération au regard du cahier des charges fonctionnel.

Grâce à la modélisation de la chaîne fonctionnelle réalisée précédemment, un logiciel de simulation permet d'obtenir la courbe de la vitesse angulaire maximale  $\dot{\theta}_d$  (figure 15) ainsi que celle de l'accélération angulaire maximale  $\ddot{\theta}_d$  (figure 15) du dossier. Ces deux courbes sont tracées sur une durée de 30ms lors du démarrage du moteur (au-delà de ce temps le moteur atteint sa vitesse nominale).

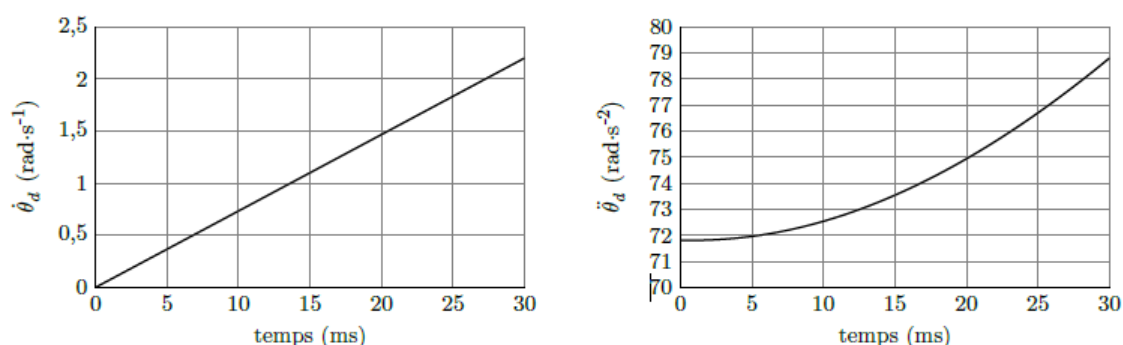


FIGURE 15 – Vitesse et accélération angulaires en fonction du temps

**Question 10 :** Déterminer, à partir du paramétrage donné figure 8, l'expression littérale au point D (représentant le point de contact avec la tête du spectateur) du vecteur accélération  $\vec{\Gamma}_{D \in \text{dossieret/chassis}}$ . Calculer numériquement la norme de ce vecteur accélération au point D correspondant à la valeur maximale de  $\ddot{\theta}_d$ .

**Question 11 :** Conclure quant au respect du nombre de g du cahier des charges (figure 4) vis-à-vis des accélérations simulées produites par le dossier du siège dynamique de cinéma.

### II.5.1 Optimisation des performances du dossier

La figure 16 représente la structure d'une correction par anticipation qui permet d'améliorer la précision statique du système

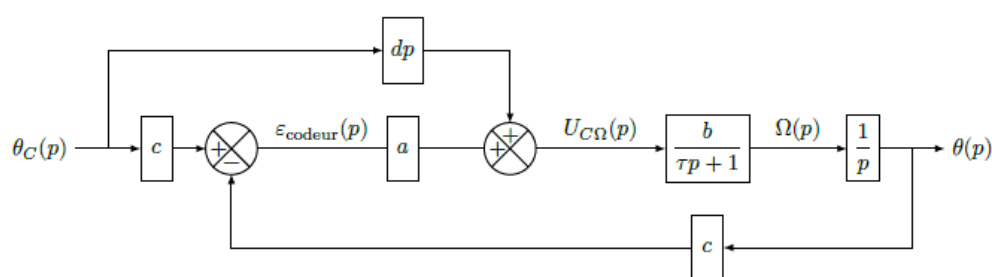


FIGURE 16 – Structure avec anticipation

**Question 12 :** Déterminer l'erreur de position  $\mu_p$  puis l'erreur de traînage  $\mu_v$ . Conclure sur l'erreur de position au regard du cahier des charges.

**Question 13 :** D'après l'erreur de traînage  $\mu_v$  déterminée à la question précédente, calculer la valeur numérique de  $d$  qui permet d'annuler cette erreur de traînage. En prenant en compte la valeur numérique de  $d$  et de  $b$ , déterminer l'expression de l'erreur en accélération  $\mu_a$ . Calculer ensuite sa valeur numérique et conclure au regard du cahier des charges.

Un aspect important pour la simulation sensorielle du siège dynamique est la capacité du système à reproduire rapidement les consignes d'accélération. À l'aide d'une simulation, la variable accélération  $\ddot{\theta}_d$  possède les deux comportements donnés figure 17 pour la période transitoire, et ce lorsque la consigne vaut  $\theta_{Cd}(t) = \frac{t^2}{2} \cdot u(t)$ .

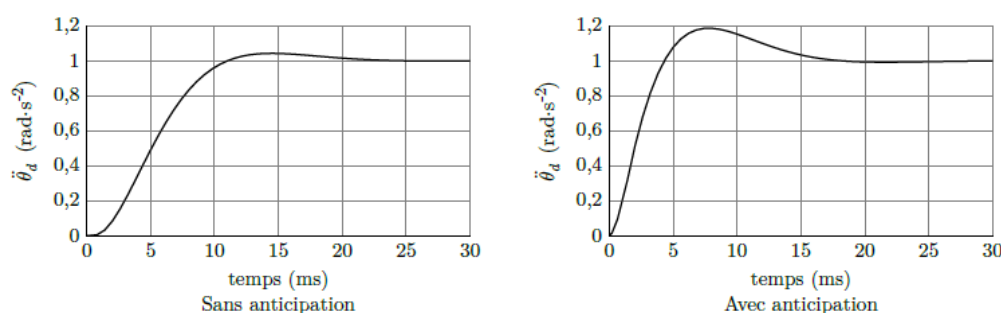


FIGURE 17 – Accélération du dossier avec et sans anticipation

**Question 14 :** Conclure quant au respect du cahier des charges vis-à-vis des accélérations produites par le dossier du siège dynamique de cinéma.

### III Exigence fonctionnelle : « Incliner le spectateur suivant l'axe de tangage et de roulis »

**Objectif** Valider le choix de conception permettant de transmettre l'énergie mécanique à l'assise du siège.

#### III.1 Commande en simultanée des deux moteurs de l'assise du siège

**Objectif** Valider le choix de conception pour la réalisation de la commande simultanée des deux moteurs de l'assise du siège.

En mode simultané (figure 18), les consignes de vitesse de chaque variateur sont issues d'un calculateur numérique :  $a$ ,  $d$  et  $c$  sont identiques. En revanche, le réglage du retour vitesse des cartes variateur est effectué à l'aide d'un potentiomètre et celui-ci peut ne pas avoir été réglé avec précision.

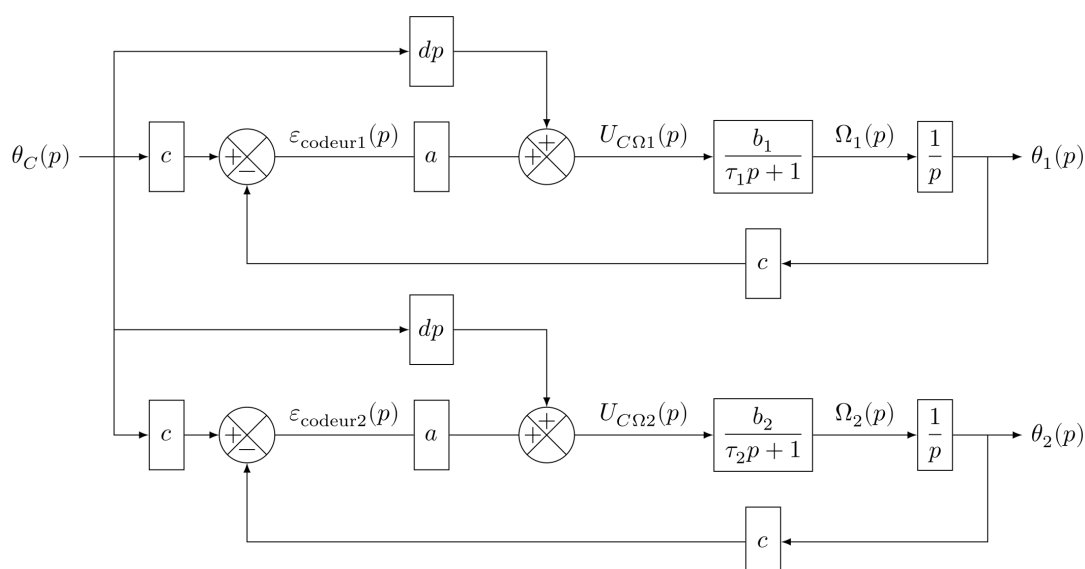


FIGURE 18 – Commande simultanée des deux moteurs

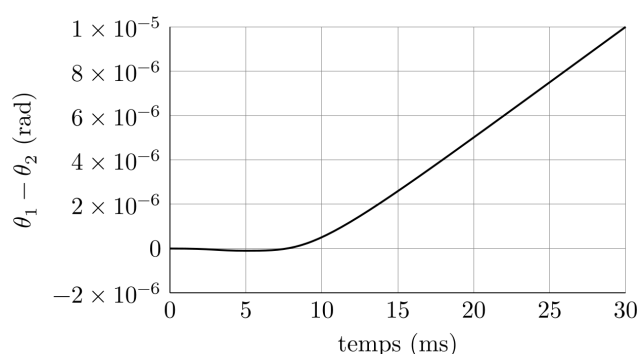
En imposant le réglage du retour vitesse de la motorisation 1 à 5 V pour  $3000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$  et celui de la motorisation 2 à 5,5 V pour  $3000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ , les calculs donnent  $b_1 = 62,8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$  et  $b_2 = 57,1 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ .

Les inerties au niveau de chaque moteur, supérieures à celle au niveau du moteur de dossier, peuvent fluctuer en fonction de la position du spectateur. En tenant compte d'une variation d'inertie de 10%, les calculs donnent  $\tau_1 = \frac{1}{366} \text{ s}$  et  $\tau_2 = \frac{1}{447} \text{ s}$ .

On prendra  $a = 0,09 \text{ V}$ ,  $c = 40 \text{ rad}^{-1}$  et  $d = 0,016 \text{ V} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}$ .

**Question 15 :** En réutilisant les calculs effectués aux questions 12 et 13 et en tenant compte des différences de réglage de retour vitesse et des différences d'inertie entre les deux motorisations, exprimer la valeur finale de  $\theta_1(t) - \theta_2(t)$  lorsque la consigne  $\theta_C(t)$  est respectivement égale à  $u(t)$ ,  $t \cdot u(t)$  puis  $\frac{t^2}{2} \cdot u(t)$ ,  $u(t)$  étant la fonction échelon unité.

La figure 19 représente le résultat d'une simulation de  $\theta_1(t) - \theta_2(t)$  pour une consigne  $\theta_C(t) = \frac{t^2}{2} \cdot u(t)$ .

FIGURE 19 –  $\theta_1 - \theta_2$  en fonction du temps

**Question 16 :** Conclure quant à l'erreur en accélération lors de la commande simultanée.





### III.2 Association variateur de vitesse – moteur de l'assise du siège

**Objectif** Valider le choix du moteur au regard des formes d'ondes issues du variateur de vitesse. Pour cela, une analyse des formes d'ondes du variateur permet de quantifier le facteur de forme, paramètre influant sur l'échauffement du moteur.

Le schéma structurel du variateur de vitesse est représenté figure 20 :

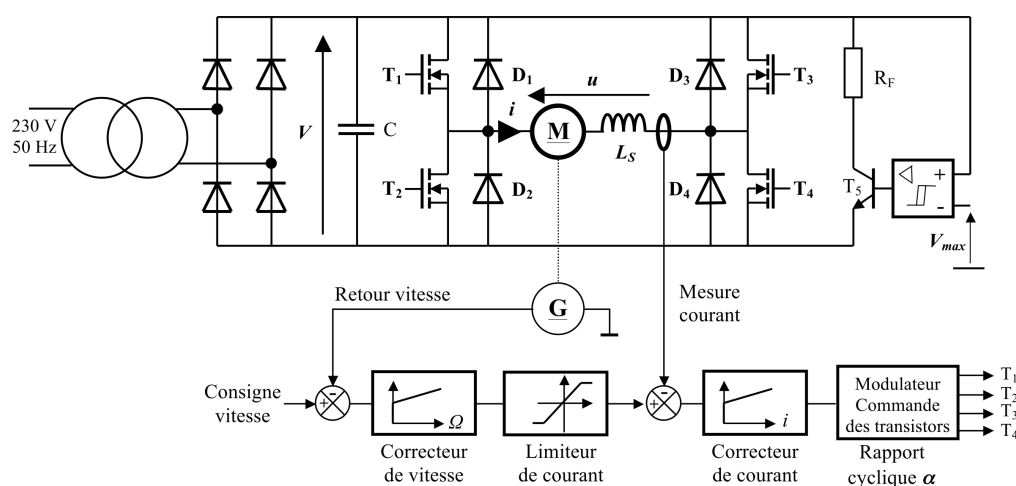


FIGURE 20 – Schéma structurel du variateur de vitesse

Lors du fonctionnement dans le quadrant 1 du plan vitesse en fonction du couple, la commande des transistors est faite selon la séquence donnée figure 21 où  $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{17000}$  s est la période de découpage et  $\alpha \in [0, 1]$  le rapport cyclique.

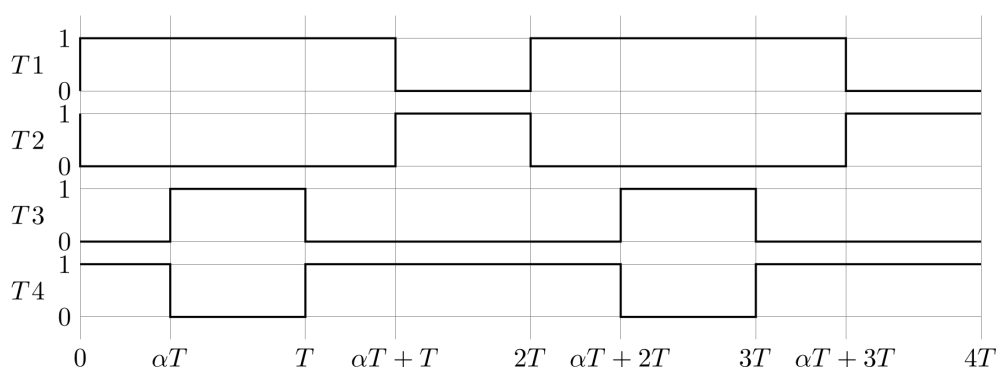
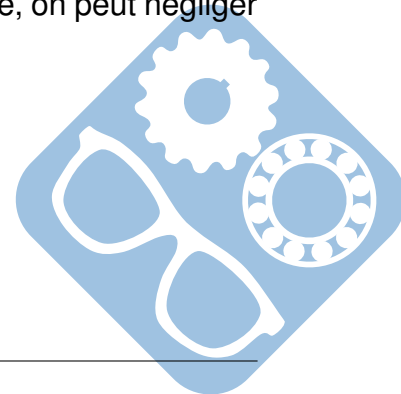


FIGURE 21 – Commande des transistors

La constante de temps du circuit d'induit du moteur ((inductance du moteur +  $L_s$ ) / résistance du circuit d'induit) étant élevée devant la période de découpage, on peut négliger  $Ri(t)$  devant  $L \frac{di}{dt}$ .



Le schéma équivalent en sortie du hacheur est représenté figure 22 où  $E$  est la force électromotrice du moteur, considérée constante pour les trois questions suivantes,  $L$  est la somme de l'inductance du moteur et de l'inductance de lissage  $L_S$ .

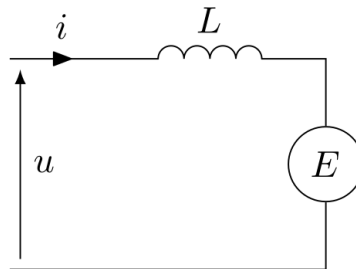


FIGURE 22 – Schéma équivalent

**Question 17 :** Représenter les chronogrammes de  $u(t)$  et de  $i(t)$  en supposant  $0 < I_m \leq i(t) \leq I_M$  et en prenant  $\alpha = 0,5$ . Indiquer sur le chronogramme les composants par lesquels passe effectivement le courant.

L'ondulation de courant est définie par  $\Delta i = (I_M - I_m)/2$ .

**Question 18 :** Exprimer  $\Delta i_{\max}$ , la valeur maximale de l'ondulation du courant. Pour cela, exprimer successivement :

- $i(t)$  pour  $0 \leq t < \alpha T$  en fonction de  $V$ ,  $L$ ,  $I_m$ ,  $E$  et  $t$  ;
- $\Delta i$  en fonction de  $V$ ,  $E$ ,  $L$ ,  $\alpha$  et  $T$  ;
- $E$  en fonction de  $\alpha$  et  $V$  sachant que  $i(t)$  est périodique ;
- $\Delta i$  en fonction de  $V$ ,  $L$ ,  $\alpha$  et  $f$  ;
- $\Delta i_{\max}$  en fonction de  $V$ ,  $L$  et  $f$ .

Le calcul précédent montre que cette ondulation est maximale pour  $\alpha = 0,5$ . Le constructeur du variateur recommande la mise en série d'une inductance de 1 mH, ce qui conduit à une ondulation de courant  $\Delta i_{\max}$  de 0,4 A. Celui du moteur recommande d'avoir un facteur de forme  $F$  (valeur efficace / valeur moyenne) inférieur à 1,02 pour éviter de déclasser le moteur.

**Question 19 :** Exprimer  $I_{\text{eff}}$ , la valeur efficace de  $i(t)$ , en fonction de  $I$ , la valeur moyenne du courant  $i(t)$  et de l'ondulation de courant  $\Delta i_{\max}$ . Calculer ensuite  $F$  pour  $I = 7,7$  A. Conclure quant à la nécessité éventuelle de déclassement du moteur.

### III.3 Commande des variateurs de vitesse de l'assise du siège

**Objectif** Établir l'interface entre les consignes d'accélération issues du logiciel de simulation sensorielle du siège dynamique et les variateurs de vitesse.

Pour chaque axe, la consigne venant du logiciel de simulation du siège dynamique n'est pas une consigne de position comme cela est représenté dans le schéma-bloc de la chaîne fonctionnelle de la figure 6. La consigne est une accélération  $\gamma_{uc}$ , le logiciel effectuant les opérations mathématiques nécessaires pour tenir compte de la non linéarité des chaînes cinématiques.

Un système à base de microcontrôleur récupère cette consigne à travers une liaison série et élabore, sur une de ses sorties analogiques, une tension  $V_{out}$ , image de la consigne de vitesse adéquate pour le variateur de vitesse.

Le convertisseur numérique analogique (CNA) 12 bits du microcontrôleur délivre une tension :

$$V_{out} = \frac{V_{ref} \cdot N_{uc\Omega}}{4096} \text{ avec } V_{ref} = 3V$$

L'entrée consigne du variateur de vitesse doit être comprise entre  $-10 V$  et  $+10 V$  et doit être égale à  $0 V$  pour  $N_{uc\Omega} = 2^{11}$ . Une carte électronique interface est réalisée figure 23.

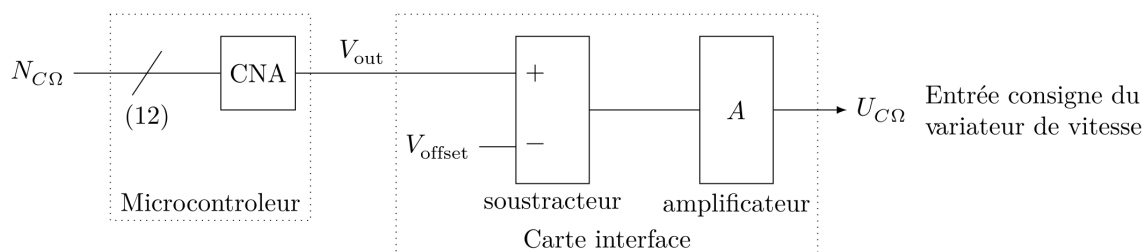


FIGURE 23 – Commande en accélération

**Question 20 :** Déterminer les valeurs numériques de  $V_{offset}$  et de  $A$ .

À l'accélération maximale  $\gamma_{max}$  correspond une accélération  $\left(\frac{d^2\theta}{dt^2}\right)_{max}$  du moteur. La commande est réalisée figure 24 avec :

$$e = \frac{\left(\frac{d^2\theta}{dt^2}\right)_{max}}{\gamma_{max}}$$

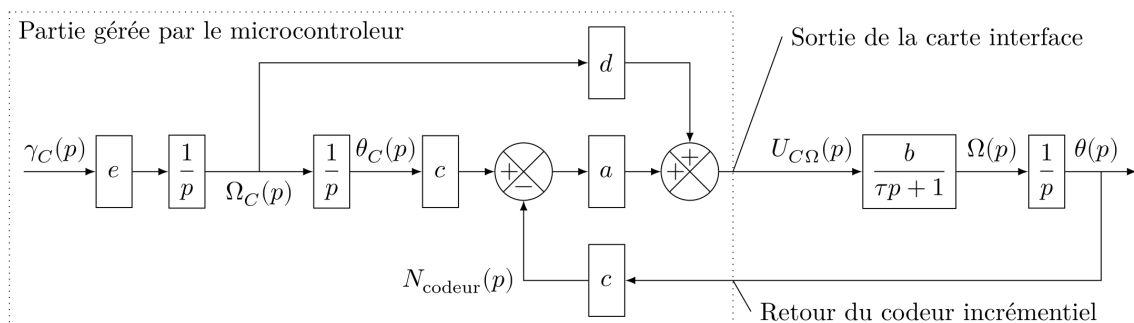


FIGURE 24 – Commande en accélération

Une fonction `Acquérir_consigne()` récupère la consigne  $\gamma_C$  par le biais d'une liaison série du microcontrôleur. Une fonction `Acquérir_codeur()` délivre la variable de type entier  $N_{codeur}$ . Les variables  $\gamma_C$ ,  $\Omega_C$ ,  $\theta_C$  et  $U_{C\Omega}$  ainsi que les constantes  $a$ ,  $c$ ,  $d$  et  $e$  sont de type réel.

$T_e$  est définie comme la période d'échantillonnage qui est aussi la période du pas de calcul. La variable  $U_{C\Omega}$  devra être bornée à  $[-10 \text{ V}, +10 \text{ V}]$ . Pour les calculs,  $N_{\text{codeur}}$  sera convertie en variable de type réel  $N_{\text{codeur reel}}$ , ainsi que  $T_e$  qui sera convertie en variable de type réel  $T_{e \text{ reel}}$ .

Les calculs utilisent aussi une variable de type réel  $N_{C\Omega \text{ reel}}$  qui est convertie à la fin en variable de type entier  $N_{C\Omega}$ .

**Question 21 :** Quel lien y-a-t-il entre  $N_{C\Omega \text{ reel}}$  et  $U_{C\Omega}$  ?

Une fonction dédiée du microcontrôleur permet d'acquérir la durée de fonctionnement en  $\mu\text{s}$  de ce dernier depuis sa mise en service : `Acquérir_temps_courant()`. Deux variables sont définies : `temps_courant` et `temps_précédent`.

Pour obtenir une période d'échantillonnage  $T_e$  fixe, indépendante du nombre d'instructions, on commence par une boucle d'attente tant que  $(\text{temps\_courant} - \text{temps\_precedent}) < T_{e \text{ reel}}$ .

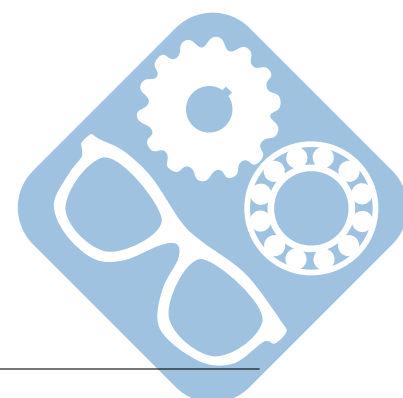
**Question 22 :** Compléter sur le document réponse, à l'aide notamment de la figure 24, l'algorithme `COMMANDE_VARIATEUR` correspondant à la commande du variateur de vitesse d'un moteur.

La variable `temps_courant` repasse par 0, quand le compteur interne de temps écoulé du microcontrôleur atteint sa valeur maximale `max_tc`, ce qui conduit au blocage de la boucle, d'où du système.

**Question 23 :** Compléter l'algorithme donné sur le document réponse qui permet de remédier au problème précédemment évoqué. À cet effet une nouvelle variable `duree` est définie.

### III.4 Synthèse globale de l'étude

**Question 24 :** Identifier dans les calculs effectués, l'élément qui apparaît le plus déterminant dans la performance en terme d'accélération. Identifier ensuite le bloc du schéma multi physique de la figure 5 dans lequel la valeur de cet élément doit être renseignée.






## IV Conception du montage d'une roue de charriot

### IV.1 Fabrication de l'arbre

Des spécifications ont été mises en place sur le mécanisme afin de garantir le bon fonctionnement du système.

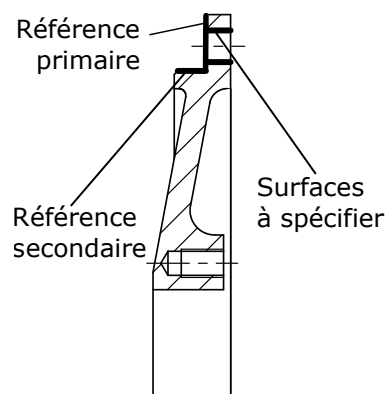
**Question 25 :** Donner la signification des spécifications suivantes en complétant les tableaux GPS donnés en document réponse.

	to	B
	tp	C

	$\phi$	tf	CZ
---	--------	----	----

### IV.2 Fabrication du chapeau

Le chapeau suivant permet de bloquer les roulements à bille.



**Question 26 :** Comment est réalisée la mise en position du chapeau sur le système ? (centrage court, centrage long, nature des surfaces : point, droite, plan, cercle, cone, sphère,...).

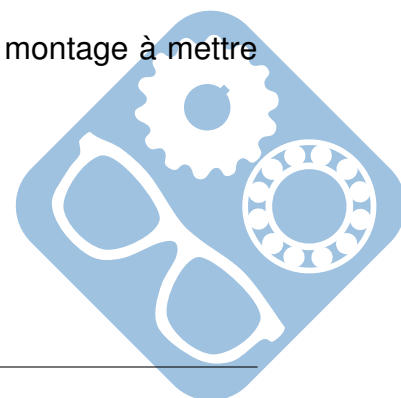
**Question 27 :** Proposer une solution de spécification des surfaces indiquées « Surfaces à spécifier » à partir des références. Cette spécification doit être réalisée sur le document réponse.

### IV.3 Montage de roulements

Le montage d'une roue de charriot est à concevoir dans la suite. Le montage à mettre en place est un montage en X.

Contraintes :

- Le serrage axial doit être réglable,
- Le système doit être démontable,
- Des roulements à rouleaux doivent être utilisés.



**Question 28 :** Compléter les zones 1a et 1b, en intégrant les deux roulements à mettre en place.

Dans la zone 1a, le roulement est placé entre les pièces 9 et 2, il faut prévoir une étanchéité dynamique de ce côté, pour empêcher le lubrifiant présent à l'intérieur de la pièce 2 de s'échapper par la gauche.

Dans la zone 1b, le roulement est placé entre les pièces 9 et 6, la fermeture par un chapeau permet de conserver le lubrifiant à l'intérieur de la pièce 2 de ce côté.

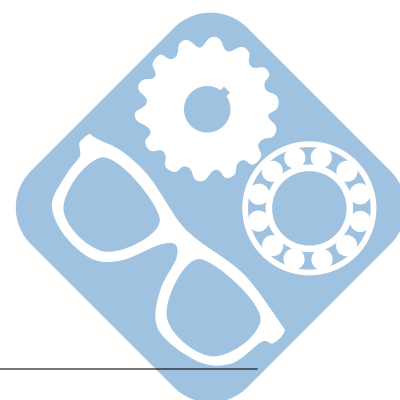
Vous mettrez en place les ajustements nécessaires au montage.

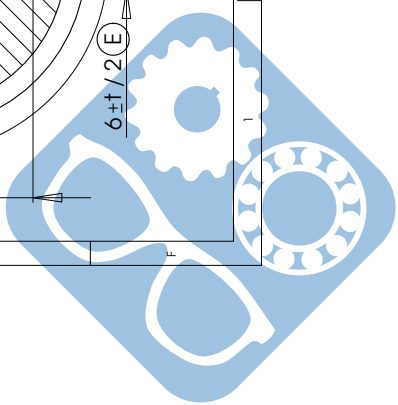
#### IV.4 Fixation de la roue

La fixation de la roue s'effectue par la mise en place d'un écrou à encoches.

**Question 29 :** Mettre en place l'écrou et la rondelle à encoches dans la zone 2 du dessin.

FIN









## Correction

**Question 1 :**

La fermeture géométrique de la boucle OABC conduit à :

$$\overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BC} + \overrightarrow{CO} = \vec{0}$$

$$e \cdot \vec{x}_2 + l \cdot \vec{y}_3 + d \cdot \vec{x}_4 - a \cdot \vec{x}_1 - b \cdot \vec{y}_1 = \vec{0}$$

En posant  $\theta_3 = (\vec{y}_1, \vec{y}_3)$ , on obtient en projection dans la base 1 les deux équations scalaires :

$$l \cdot \sin \theta_3 = e \cos \theta_r + d \cos \theta_d - a \quad (1)$$

$$-l \cdot \cos \theta_3 = e \sin \theta_r + d \sin \theta_d - b \quad (2)$$

En effectuant  $(1)^2 + (2)^2$  pour éliminer  $\theta_3$  on obtient :

$$l^2 = (e \cos \theta_r + d \cos \theta_d - a)^2 + (e \sin \theta_r + d \sin \theta_d - b)^2$$

Après développement et regroupement des termes, on obtient :

$$\cos \theta_d \cdot (2 \cdot a \cdot d + 2 \cdot e \cdot d \cdot \cos \theta_r) + \sin \theta_d \cdot (2 \cdot b \cdot d - 2 \cdot e \cdot d \cdot \sin \theta_r) = a^2 + b^2 + e^2 + d^2 - l^2 - 2 \cdot a \cdot e \cdot \cos \theta_r - 2 \cdot e \cdot b \cdot \sin \theta_r$$

**Question 2 :**

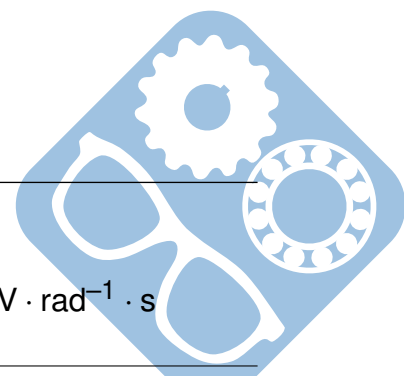
Le coefficient directeur donne la valeur de :

$$K_c = \frac{-20}{50} = -0.4$$

**Question 3 :**

**Codeur :** 250 points par tour  $\Rightarrow c = \frac{N_{\text{codeur}}}{\theta} = \frac{250}{2\pi} = 39.8 \text{ rad}^{-1}$

**Tachy :** 5V pour 3000tr/min  $\Rightarrow K_\Omega = \frac{U_\Omega}{\Omega} = \frac{5}{3000 \times \frac{2\pi}{60}} = \frac{5}{314.16} = 1.6 \times 10^{-2} \text{ V} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}$



**Question 4 :**

**Modèle initial :**  $H_I(p) = \frac{\Omega(p)}{I_C(p)}$  avec  $I_C(p) = \frac{1}{p}$

Théorème de la valeur finale :

$$\Omega(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \Omega(p) = \frac{K \cdot k_2 \cdot h}{k_2 \cdot h \cdot k_{ri} \cdot f} = \frac{K}{k_{ri} \cdot f} = \frac{0.115}{0.5 \cdot 4 \cdot 10^{-4}} = \frac{1150}{2} = 575 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

**Modèle simplifié :**  $H_I(p) = \frac{\Omega(p)}{I_C(p)} = \frac{K}{k_{ri}} \cdot \frac{1}{J \cdot p + f}$  avec  $I_C(p) = \frac{1}{p}$

Théorème de la valeur finale :

$$\Omega(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \Omega(p) = \frac{K}{k_{ri} \cdot f}$$

Sur la figure 12, on voit que l'écart relatif est de :

- $\frac{0.03}{3} = 1\%$  à  $t=1\text{ms}$ ,
- $\frac{0.09}{40} = 0.2\%$  à  $t=30\text{ms}$

L'écart maximal est donc de 1%.

**Question 5 :**

$$H_{\Omega}(p) = \frac{C_{\Omega}(p) \cdot \frac{K}{k_{ri}} \cdot \frac{1}{Jp+f}}{1 + K_{\Omega} \cdot C_{\Omega}(p) \cdot \frac{K}{k_{ri}} \cdot \frac{1}{Jp+f}}$$

En remplaçant  $C_{\Omega}(p)$  par son expression, il vient après calculs :

$$H_{\Omega}(p) = \frac{\frac{1}{K_{\Omega}}}{1 + \frac{K_{ri} \cdot f}{k_1 \cdot K \cdot K_{\Omega}} \cdot T_1 \cdot p \cdot \frac{Jp+1}{T_1 \cdot p+1}} = \frac{\frac{1}{K_{\Omega}} (1 + T_1 \cdot p)}{1 + \left(1 + \frac{K_{ri} \cdot f}{k_1 \cdot K \cdot K_{\Omega}}\right) \cdot T_1 \cdot p + \frac{K_{ri} \cdot J \cdot T_1}{k_1 \cdot K \cdot K_{\Omega}} \cdot p^2}$$

**Question 6 :**

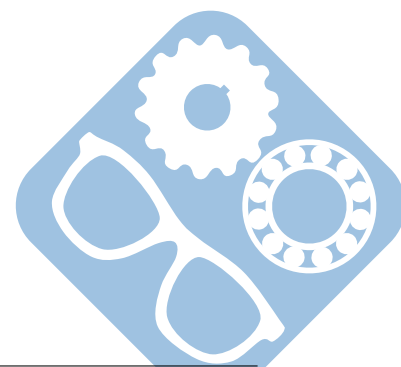
On donne  $T_1 = \frac{J}{f}$ , en remplaçant dans l'expression trouvée précédemment on obtient :

$$H_{\Omega}(p) = \frac{\frac{1}{K_{\Omega}}}{1 + \frac{K_{ri}}{k_1 \cdot K \cdot K_{\Omega}} \cdot J \cdot p}$$

Donc par identification on trouve :

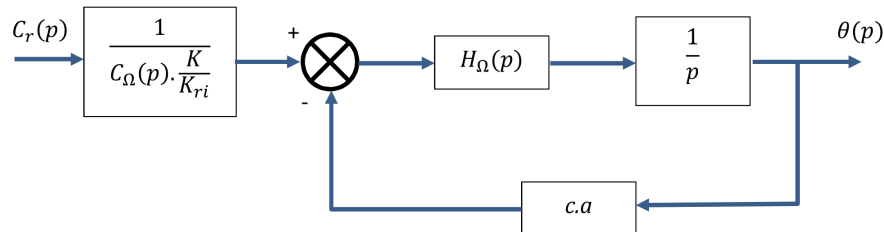
$$b = \frac{1}{K_{\Omega}} = 20\pi = 62.8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$$

$$\tau = \frac{K_{ri}}{k_1 \cdot K \cdot K_{\Omega}} \cdot J = 2.17 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$



**Question 7 :**

On effectue une transformation de schéma en déplaçant le comparateur de  $C_r(p)$ .



D'où la nouvelle structure de schéma bloc :

$$\frac{\theta(p)}{C_R(p)} = \frac{1}{C_{\Omega}(p) \cdot \frac{K}{K_{ri}}} \cdot \frac{H_{\Omega}(p) \cdot \frac{1}{p}}{1 + c \cdot a \cdot H_{\Omega}(p) \cdot \frac{1}{p}} = \frac{K_{ri} \cdot T_1 \cdot p}{K \cdot k_1 \cdot (1 + T_1 \cdot p)} \cdot \frac{\frac{b}{1+\tau p} \cdot \frac{1}{p}}{1 + \frac{b}{1+\tau p} \cdot \frac{1}{p}}$$

L'application du théorème de la valeur finale pour une entrée de type échelon donne :

$$\theta(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \theta(p) = 0$$

Ce résultat était prévisible car le correcteur PI est placé avant la perturbation.

**Question 8 :**

Calcul de la fonction de transfert  $\frac{\theta(p)}{\theta_c(p)}$  :

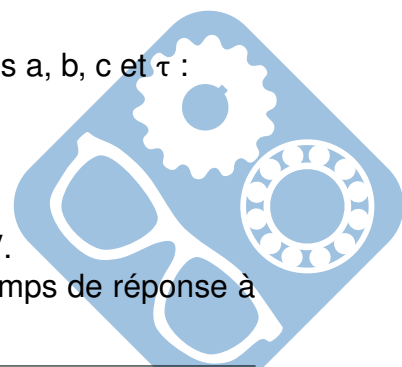
$$\frac{\theta(p)}{\theta_c(p)} = c \cdot \frac{\frac{a \cdot b}{1+\tau \cdot p} \cdot \frac{1}{p}}{1 + \frac{a \cdot b \cdot c}{1+\tau p} \cdot \frac{1}{p}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{a \cdot b \cdot c} \cdot p + \frac{\tau}{a \cdot b \cdot c} \cdot p^2}$$

On peut exprimer le coefficient d'amortissement  $\xi$  à partir des paramètres  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $\tau$  :

$$\xi = \frac{1}{2\sqrt{\tau \cdot a \cdot b \cdot c}} = 0.7$$

Compte tenu des valeurs numériques fournies, on obtient  $a = 9.2 \cdot 10^{-2} \text{V}$ .

Cette valeur du coefficient d'amortissement permet d'avoir le meilleur temps de réponse à 5% si on accepte le dépassement transitoire.



**Question 9 :**

$$\mu(p) = \theta_C(p) - \theta(p) = (1 - H_\theta(p)) \cdot \theta_C(p)$$

En posant  $H_\theta(p) = \frac{H_{BO}(p)}{1+H_{BO}(p)}$  avec  $H_{BO}(p) = \frac{a \cdot b \cdot c}{p(1+\tau p)}$  :

**Écart pour une consigne de type échelon :**

$$\mu_p(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \mu(p) = 0$$

**Écart pour une consigne de type rampe :**

$$\mu_v(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \mu(p) = \frac{1}{a \cdot b \cdot c} = 4.31 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

**Écart pour une consigne de type accélération :**

$$\mu_a(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \mu(p) = \infty$$

**Question 10 :**

On suppose que le solide 4 est le dossier.

Calcul de  $\vec{V}_{D \in 4/1}$  :

$$\vec{V}_{D \in 4/1} = -q \cdot \dot{\theta}'_d \cdot \vec{x}'_4 = -q \cdot \dot{\theta}_d \cdot \vec{x}'_4$$

En posant  $\theta'_d = \theta_d + \alpha$ , avec  $\alpha = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{q}{d}\right)$

Calcul de  $\vec{\Gamma}_{D \in 4/1}$  :

$$\vec{\Gamma}_{D \in 4/1} = -q \cdot \ddot{\theta}_d \cdot \vec{x}'_4 - q \cdot \dot{\theta}_d^2 \cdot \vec{y}'_4$$

En utilisant les graphiques, on peut déterminer la norme du vecteur accélération :

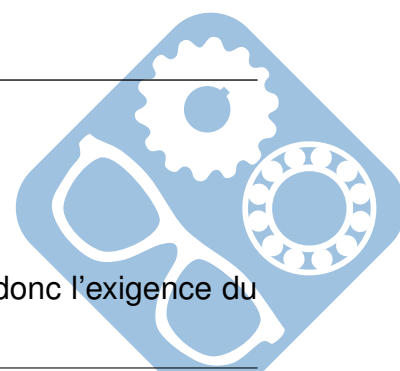
$$\|\vec{\Gamma}_{D \in 4/1}\| = \sqrt{(q \cdot \ddot{\theta}_d)^2 + (q \cdot \dot{\theta}_d^2)^2} = 6.73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

**Question 11 :**

Le cahier des charges impose une exigence maximale en accélération :

$$0.6g < a_{\max} < 0.7g$$

L'accélération maximale déterminée à la question précédente respecte donc l'exigence du cahier des charges.



**Question 12 :**

On note l'erreur en position  $\varepsilon(t) = \theta_C(t) - \theta(t)$ .

D'où en intégrant le bloc c dans la chaîne directe :

$$\mu(p) = \theta_C(p) - \theta(p) = \theta_C(p) - \left( c \cdot a \cdot \frac{b}{\tau \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{p} \cdot \mu(p) + d \cdot p \cdot \frac{b}{\tau p + 1} \cdot \frac{1}{p} \cdot \theta_C(p) \right)$$

$$\mu(p) = \frac{(\tau p + 1 - db) \cdot p}{(\tau p + 1) \cdot p + abc} \cdot \theta_C(p)$$

On en déduit les erreurs de position et de vitesse :

**Erreur pour une consigne de type échelon :**  $\theta_c(p) = \frac{1}{p}$

$$\mu_p(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \mu(p) = 0$$

**Erreur pour une consigne de type rampe :**  $\theta_c(p) = \frac{1}{p^2}$

$$\mu_v(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \mu(p) = \frac{1 - db}{abc}$$

L'erreur de position est donc compatible avec le cahier des charges car inférieure à 1%.

**Question 13 :**

On veut :

$$\mu_v(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \mu(p) = \frac{1 - db}{abc} = 0$$

D'où :  $d = \frac{1}{b} = 0.016$

**Calcul de l'erreur en accélération**

**Erreur pour une consigne de type accélération :**  $\theta_c(p) = \frac{1}{p^3}$

$$\mu_a(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \mu(p) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \frac{(\tau p + 1 - db) \cdot p}{(\tau p + 1) \cdot p + abc} \cdot \frac{1}{p^3}$$

En prenant le résultat issu de la question précédente, on a  $1 - db = 0$ , donc :

$$\mu_a(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \tau p \cdot p(\tau p + 1) \cdot p + abc \cdot \frac{1}{p^3} = \frac{\tau}{abc} = 9.5 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$$

**Question 14 :**

Si on place les gabarits de la réponse attendue à partir des données du cahier des charges, on remarque que seule la réponse avec anticipation est conforme aux exigences. L'autre ne respecte pas les <5ms.



## Correction

**Question 15 :**

D'après les résultats de la question 12, on a pour un axe :

$$\mu(p) = \frac{(\tau p + 1 - db) \cdot p}{(\tau p + 1) \cdot p + abc} \cdot \theta_C(p)$$

— Pour une entrée de type échelon, l'erreur en position est nulle donc :

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta_c$$

d'où

$$\theta_1(\infty) - \theta_2(\infty) = 0 \text{ rad}$$

— Pour une entrée de type rampe, l'erreur est donnée par :

$$\mu_v(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \mu(p) = c1 - dab = \theta_c(\infty) - \theta(\infty)$$

$$\mu_{v1}(\infty) = \theta_c(\infty) - \theta(\infty)$$

$$\mu_{v2}(\infty) = \theta_c(\infty) - \theta(\infty)$$

On en déduit donc que :

$$\theta_1(\infty) - \theta_2(\infty) = \frac{1 - db_2}{ab_2c} - \frac{1 - db_1}{ab_1c} = \frac{b_1 - b_2}{ab_1b_2c} = 4.4 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

— Pour une entrée de type accélération :

$$\frac{\theta_i(p)}{\theta_C(p)} = (dp + ac) \cdot \frac{b_i}{(T_i p + 1) \cdot p + ab_i c}$$

D'où :

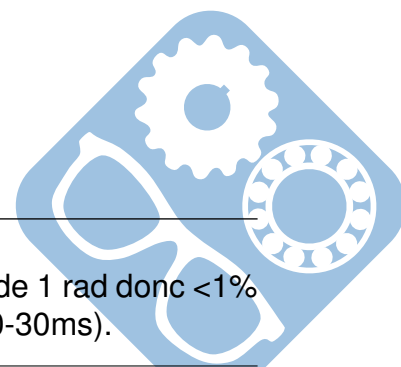
$$\theta_1(p) - \theta_2(p) = (dp + ac) \cdot \left( \frac{b_1}{(T_1 p + 1) \cdot p + ab_1 c} - \frac{b_2}{(T_2 p + 1) \cdot p + ab_2 c} \right) \cdot \theta_C(p)$$

L'application du théorème de la valeur finale donne :

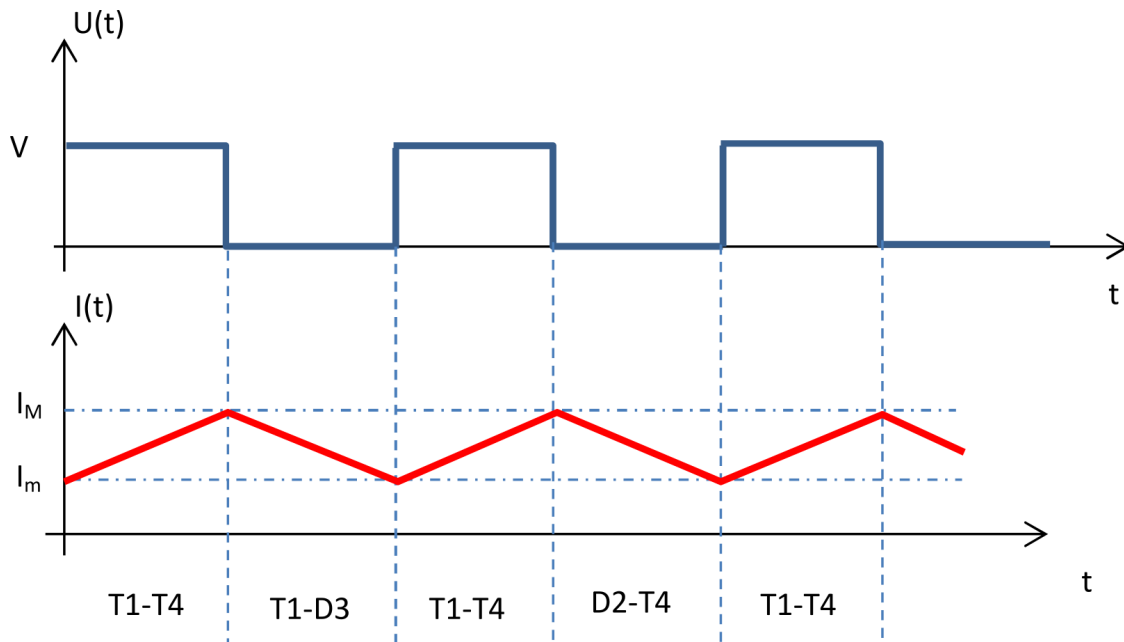
$$\theta_1(\infty) - \theta_2(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot (dp + ac) \cdot \left( \frac{b_1}{(T_1 p + 1) \cdot p + ab_1 c} - \frac{b_2}{(T_2 p + 1) \cdot p + ab_2 c} \right) \cdot \frac{1}{p^3} = +\infty$$

**Question 16 :**

L'écart statique en accélération vaut au plus  $10^{-3}$  rad pour une consigne de 1 rad donc  $<1\%$  de l'exigence du cahier des charges sur la plage de temps d'utilisation (0-30ms).



**Question 17 :**



**Question 18 :**

De 0 à  $\alpha T$  :  $V = E + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \rightarrow i(t) = \frac{V-E}{L} \cdot t + I_m$

De  $\alpha T$  à  $T$  :  $0 = E + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \rightarrow i(t) = -\frac{E}{L} \cdot (t - \alpha T) + I_M$

Pour  $t = \alpha T$ , on tire  $I_M = i(\alpha T) = \frac{V-E}{L} \cdot \alpha T + I_m$  donc  $\Delta I = \frac{V-E}{2 \cdot L} \alpha T$

**Expression de la Fem :**  $\langle u \rangle = \langle L \cdot \frac{di(t)}{dt} \rangle + E$  or  $\langle L \cdot \frac{di(t)}{dt} \rangle = 0$  car  $i(t)$  est périodique.

Donc  $\langle u \rangle = E = \alpha \cdot V$

**Expression de  $\Delta i_{\max}$  :**  $\Delta i = \frac{V-E}{2 \cdot L} \cdot \alpha T = \frac{V(1-\alpha)\alpha}{2 \cdot L \cdot f}$  or  $\alpha(1-\alpha)$  est maxi pour  $\alpha = 0.5$

Donc :  $\Delta i_{\max} = \frac{V}{8 \cdot L \cdot f}$

**Question 19 :**

Pour  $\alpha = 0.5$ , la pente est la même au signe près de 0 à  $\alpha T$  et de  $\alpha T$  à  $T$  :

$$I_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i^2(t) dt \text{ or de } 0 \text{ à } \alpha T, i(t) = I_m + \frac{I_M - I_m}{\frac{T}{2}} \cdot t$$

$$\text{Donc : } I_{\text{eff}}^2 = \frac{2}{T} \left[ I_m^2 \cdot t + 2I_m \cdot \frac{I_M - I_m}{\frac{T}{2}} \cdot \frac{t^2}{2} + \left( \frac{I_M - I_m}{\frac{T}{2}} \right)^2 \cdot \frac{t^3}{3} \right]_0^{T/2} = I_m^2 + I_m(I_M - I_m) + \frac{(I_M - I_m)^2}{3}$$

Or  $I_m = I + \frac{\Delta i_{\max}}{2}$  et  $I_M = I + \Delta i_{\max}$

Après simplification, il reste :  $I_{\text{eff}} = \sqrt{I^2 + \frac{(\Delta i_{\max})^2}{3}}$

Le facteur de forme vaut :  $F = \frac{I_{\text{eff}}}{I} = \frac{\sqrt{7.7^2 + \frac{0.4^2}{3}}}{7.7} \approx 1 < 1.02$

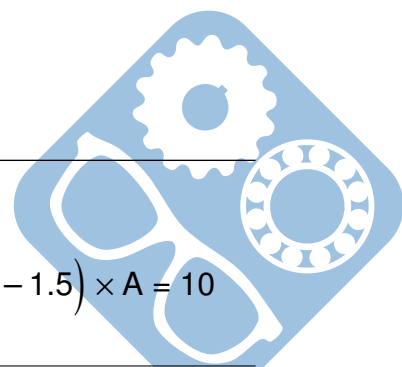
Le moteur ne sera donc pas déclassé.

**Question 20 :**

Pour  $N_{C\Omega} = 2^{11}$ ,  $V_{\text{out}} = \frac{3 \cdot 2^{11}}{4096} = 1.5V$ . Il faut donc un  $V_{\text{offset}} = 1.5V$

On veut que lorsque  $N_{C\Omega} = 2^{12} - 1 = 4095$  alors  $V_{C\Omega} = 10V$  soit  $\left( \frac{4095 \cdot 3}{4096} - 1.5 \right) \times A = 10$

On en déduit  $A = 6.67$



**Question 21 :**

On a  $N_{C\Omega\text{réel}} = \left( \frac{U_{C\Omega}}{A} + 1.5 \right) \cdot \frac{4096}{3}$

**Question 22 :****Algorithme COMMANDE\_VARIATEUR**

```

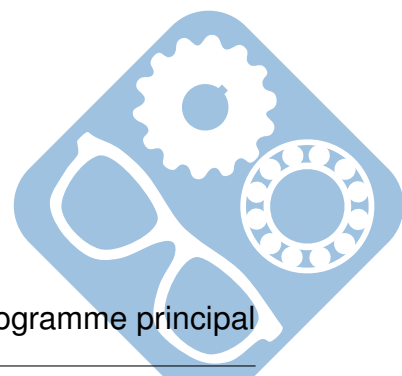
NCΩ, Ncodeur : entier
γC, ΩC, θC, Ncodeur reel, UCΩ, NCΩ reel, TC reel : reel
temps_courant ← 0 : entier long
temps_precedent ← 0 : entier long
a ← 0.09 : reel
c ← 40 : reel
d ← 0.016 : reel
e ← 1667 : reel
Te ← 100 : entierlong
ΩC ← 0
θC ← 0
γC ← Acquerir_consigne()
while True do
    temps_courant ← Acquerir_temps_courant()
    while temps_courant – temps_precedent < Te do
        temps_courant ← Acquerir_temps_courant()
    end while
    temps_precedent ← temps_courant
    Ncodeur ← Acquerir_codeur()
    Te reel ← convertir_en_reel(Te)
    Ncodeur reel ← convertir_en_reel(Ncodeur)
    ΩC ← ΩC + (γC * e * Te reel * 10-6)
    θC ← θC + (ΩC * Te reel * 10-6)
    UCΩ ← a * ((c * θC) – Ncodeur reel + ΩC * d)
    NCΩ reel ← (4096/3) * (1.5 + UCΩ/6.67)
    NCΩ ← convertir_en_entier(NCΩ reel)
    if NCΩ > 4095 then
        NCΩ ← 4095
    end if
    if NCΩ < 0 then
        NCΩ ← 0
    end if
    CNA ← NCΩ
end while

```

▸ Déclarations des variables

▸ Début programme principal

▸ Fin programme principal



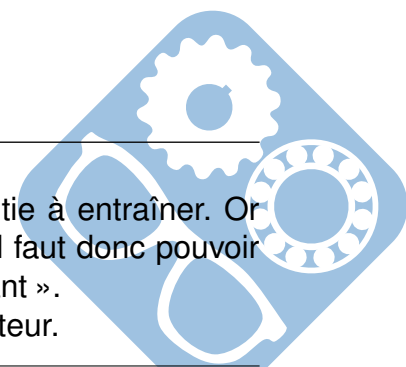


**Question 23 :**

```
temps_courant ← Acquerir_temps_courant()
duree ← (temps_courant – temps_precedent)
while duree < Te do
    temps_courant ← Acquerir_temps_courant()
    duree ← (temps_courant – temps_precedent)
    if duree < 0 then
        duree ← max_tc – temps_precedent + temps_courant
    end if
end while
temps_precedent ← temps_courant()
```

**Question 24 :**

L'accélération dépend du couple que le moteur peut fournir et de l'inertie à entraîner. Or le couple d'une MCC est proportionnel au courant tel que  $C_{em} = K \cdot I$ . Il faut donc pouvoir asservir le courant. Le bloc concerné est « le correcteur boucle de courant ». Pour l'inertie, elle pourra être fixée dans les propriétés de l'inertie du moteur.



## Question 25 :

TOLERANCEMENT NORMALISE		Analyse d'une spécification par zone de tolérance			
Symbole de la spécification	Eléments non Idéaux	Eléments Idéaux			
Type de spécification -Forme- -Position- -Orientation- -Battement-	Elément(s) tolérancé(s)	Elément(s) de référence	Référence(s) spécifiée(s)	Zone de tolérance	
<b>Condition de conformité :</b> L'élément tolérancé doit se situer tout entier dans la zone de tolérance.	unique <del>-groupe-</del>	unique <del>multiples</del>	simple <del>-commune-</del> <del>système</del>	simple <del>-composée</del>	<b>Contraintes</b> orientation et/ou position par rapport à la référence spécifiée
<b>Schéma</b> extrait du dessin de définition	Surface nominale plane	Axe nominale rectiligne	Axe du plus petit cylindre circonsrit	2 plans parallèles distants de to	Les 2 plans sont perpendiculaires à la référence spécifiée

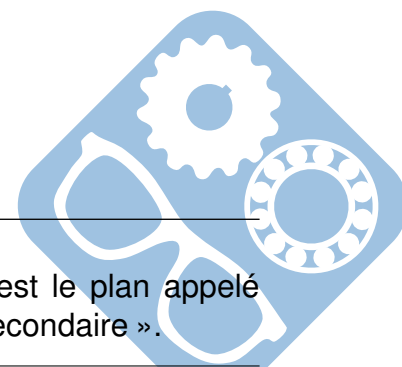
TOLERANCEMENT NORMALISE		Analyse d'une spécification par zone de tolérance			
Symbole de la spécification	Eléments non Idéaux	Eléments Idéaux			
Type de spécification -Forme- -Position- -Orientation- -Battement-	Elément(s) tolérancé(s)	Elément(s) de référence	Référence(s) spécifiée(s)	Zone de tolérance	
<b>Condition de conformité :</b> L'élément tolérancé doit se situer tout entier dans la zone de tolérance.	unique <del>-groupe-</del>	unique <del>multiples</del>	simple <del>-commune-</del> <del>système</del>	simple <del>-composée</del>	<b>Contraintes</b> orientation et/ou position par rapport à la référence spécifiée
<b>Schéma</b> extrait du dessin de définition	Surface nominale plane	Surface nominale plane	Plan tangent extérieur matière minimisant l'écart maxi	2 plans parallèles distants de tp	Le plan médian aux 2 plans est situé à 79mm de la référence spécifiée

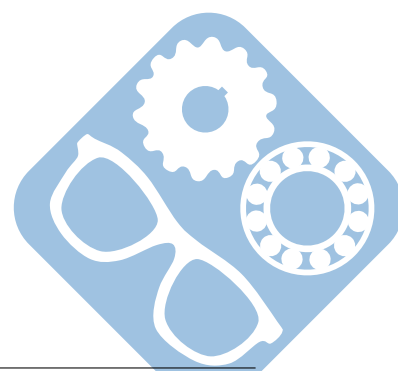
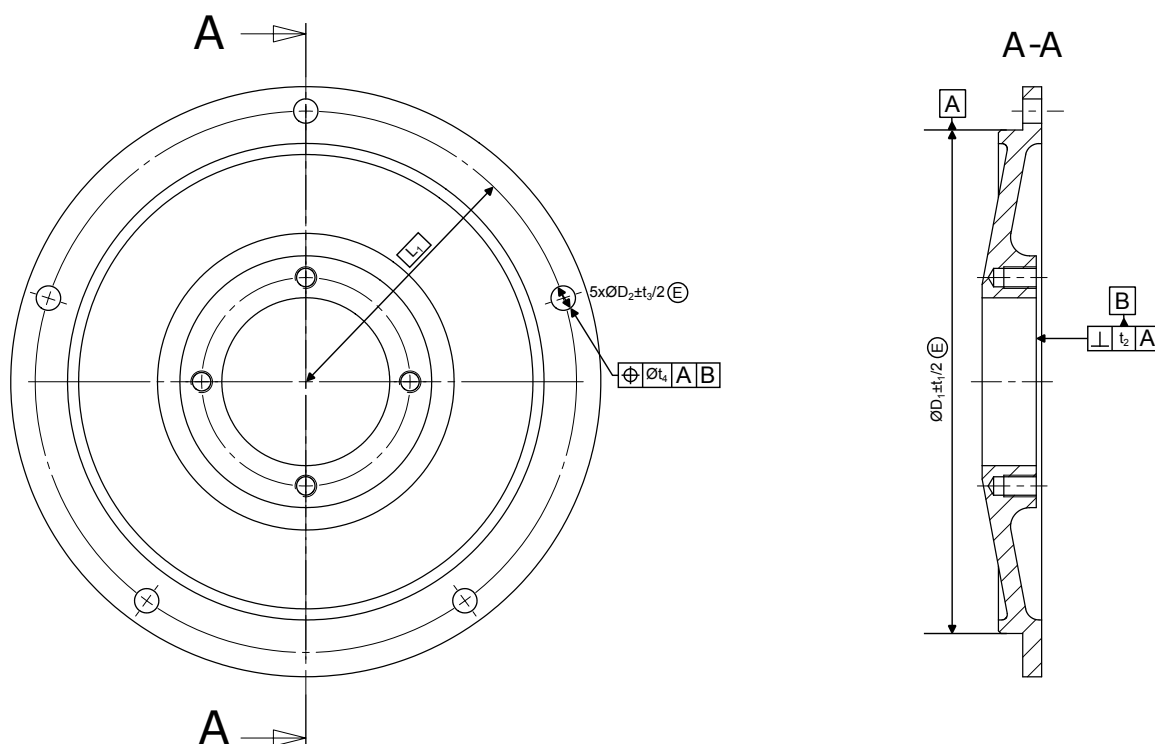
TOLERANCEMENT NORMALISE		Analyse d'une spécification par zone de tolérance			
Symbole de la spécification	Eléments non Idéaux	Eléments Idéaux			
Type de spécification -Forme- -Position- -Orientation- -Battement-	Elément(s) tolérancé(s)	Elément(s) de référence	Référence(s) spécifiée(s)	Zone de tolérance	
<b>Condition de conformité :</b> L'élément tolérancé doit se situer tout entier dans la zone de tolérance.	unique <del>-groupe-</del>	unique <del>multiples</del>	simple <del>-commune-</del> <del>système</del>	simple <del>-composée</del>	<b>Contraintes</b> orientation et/ou position par rapport à la référence spécifiée
<b>Schéma</b> extrait du dessin de définition	Axe nominale rectiligne des deux cylindres en zone commune			Cylindre de diamètre tf	

## Question 26 :

La mise en position est un centrage court, la surface prépondérante est le plan appelé « Référence primaire », la seconde est le cylindre appelé « Référence secondaire ».



Question 27 :



Questions 28 29 :

