

Proposition de corrigé

Concours : Concours Commun Polytechniques

Année : 2015

Filière : TSI

Épreuve : Sciences Industrielles pour l'Ingénieur

Ceci est une proposition de corrigé des concours de CPGE, réalisée bénévolement par des enseignants de Sciences Industrielles de l'Ingénieur et d'Informatique, membres de l'[UPSTI](http://www.upsti.fr) (Union des Professeurs de Sciences et Techniques Industrielles), et publiée sur le site de l'association :

<https://www.upsti.fr/espace-etudiants/annales-de-concours>

A l'attention des étudiants

Ce document vous apportera des éléments de corrections pour le sujet traité, mais n'est ni un corrigé officiel du concours, ni un corrigé détaillé ou exhaustif de l'épreuve en question.

L'UPSTI ne répondra pas directement aux questions que peuvent soulever ces corrigés : nous vous invitons à vous rapprocher de vos enseignants si vous souhaitez des compléments d'information, et à vous adresser à eux pour nous faire remonter vos éventuelles remarques.

Licence et Copyright

Toute représentation ou reproduction (même partielle) de ce document faite sans l'accord de l'UPSTI est **interdite**. Seuls le téléchargement et la copie privée à usage personnel sont autorisés (protection au titre des [droits d'auteur](#)).

En cas de doute, n'hésitez pas à nous contacter à : corrigesconcours@upsti.fr.

Informez-vous !

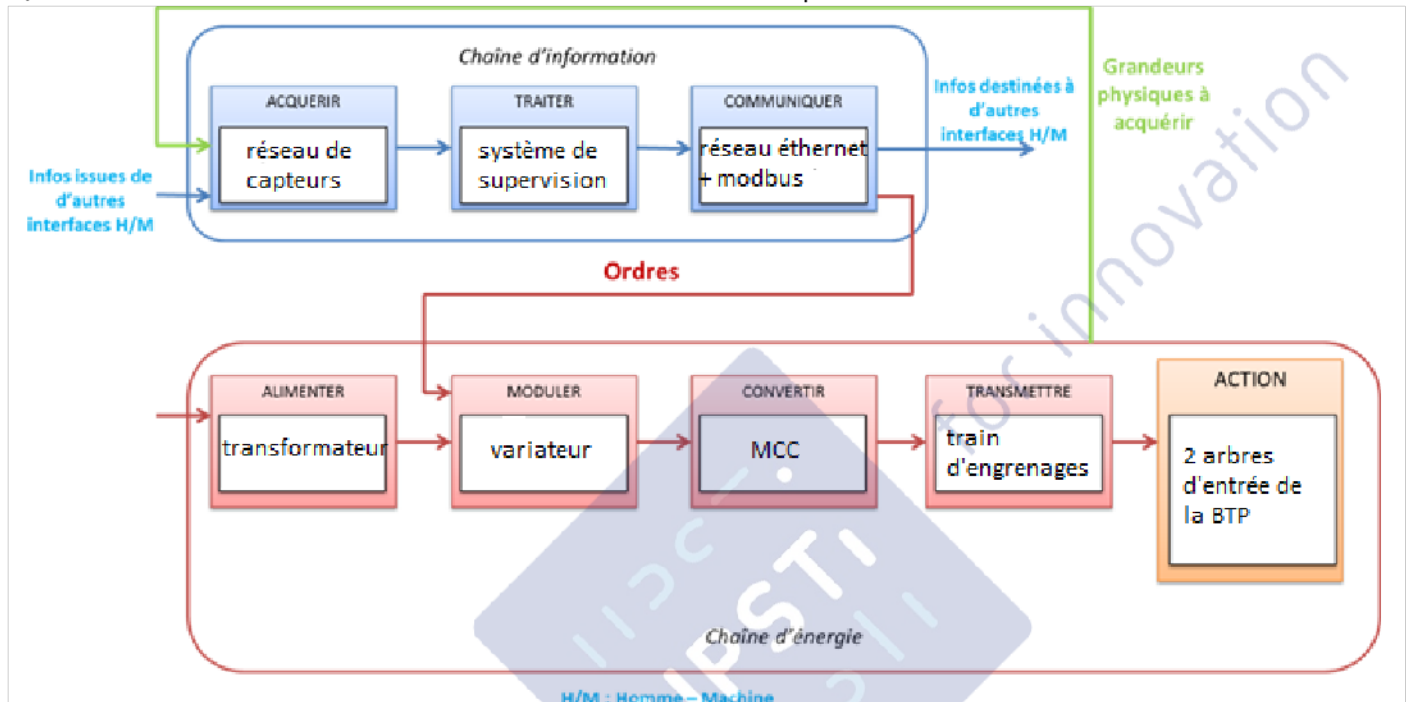
Retrouvez plus d'information sur les [Sciences de l'Ingénieur](#), l'[orientation](#), les [Grandes Ecoles](#) ainsi que sur les [Olympiades de Sciences de l'Ingénieur](#) et sur les [Sciences de l'Ingénieur au Féminin](#) sur notre site : www.upsti.fr

L'équipe UPSTI

CCP TSI 2015 : corrigé UPSTI de l'épreuve SII

Étude d'un banc d'essai de boîte de transmission principale d'hélicoptère

Question 1. Chaîne fonctionnelle associée au banc de mesures permettant la mise en rotation de la BTP :



Question 2. Le rendement η de la BTP étant donné, on a :

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} = \frac{C_1 \cdot \omega(1/0)}{C_2 \cdot \omega(2/0)} = \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{1}{k_{BTP}} \quad \text{soit :} \quad C_2 = \frac{C_1}{k_{BTP} \cdot \eta}$$

Application numérique : $C_2 = \frac{4100}{25 \cdot 0,98} = 167 \text{ N} \cdot \text{m}$

Question 3. Calcul du rapport de transmission :

$$k_T = \frac{N(2/0)}{N(7/0)} = \frac{Z_7 \cdot Z_6 \cdot Z_5 \cdot Z_{41} \cdot Z_{31}}{Z_6 \cdot Z_5 \cdot Z_{42} \cdot Z_{32} \cdot Z_2} = \frac{Z_7 \cdot Z_{41} \cdot Z_{31}}{Z_{42} \cdot Z_{32} \cdot Z_2}$$

Application numérique : $k_T = \frac{62 \cdot 45 \cdot 73}{51 \cdot 22 \cdot 40} = 4,54$

On en déduit la fréquence de rotation du moteur électrique :

$$N(7/0) = \frac{N(2/0)}{k_T}$$

Application numérique : $N(7/0) = \frac{8750}{4,54} = 1930 \text{ min}^{-1}$

Question 4. Bilan de puissance à chacun des étages de réduction et en tenant compte du rendement des transmissions par engrenages :

$$\frac{P_2}{P_7} = \frac{C_2 \cdot \omega(2/0)}{C_7 \cdot \omega(7/0)} = \frac{k_T \cdot C_2}{C_7} = \eta^5 \quad \text{soit :} \quad C_7 = \frac{k_T \cdot C_2}{\eta^5}$$

Application numérique : $C_7 = \frac{4,54 \cdot 167}{0,98^5} = 839 \text{ N} \cdot \text{m}$

La puissance mécanique utile est de :
$$\mathcal{P}_7 = C_7 \cdot \omega(7/0) = C_7 \cdot N(7/0) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}$$

Application numérique :
$$\mathcal{P}_7 = 839 \cdot 1928 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} = 170 \text{ kW}$$

Question 5. Choix du moteur électrique nécessaire :

On a un réseau triphasé 380 V, donc une tension d'induit maxi de 440 V.

On veut une fréquence de rotation $N = 1920 \text{ tr/min}$ et un couple mécanique nécessaire $C = 1315 \text{ N} \cdot \text{m}$.

La puissance mécanique associée est :
$$\mathcal{P} = C \cdot \omega = C \cdot N \cdot \frac{2\pi}{60} = 1315 \cdot 1920 \cdot \frac{2\pi}{60} = 264,4 \text{ kW}$$

D'après l'abaque, $N = 1920 \text{ min}^{-1}$ et $\mathcal{P} = 264,4 \text{ kW}$ donc la taille est 2254 L.

Dans le tableau, la puissance la plus proche est $\mathcal{P} = 269 \text{ kW}$, qui correspond pour $U_{\text{induit}} = 440 \text{ V}$ à une fréquence nominale de 2050 min^{-1} . Ce moteur a comme fréquence maximale : $N_{\text{maxi}} = 2600 \text{ min}^{-1} > 2500 \text{ min}^{-1}$.

La référence du moteur choisi est donc : **LSK 2254 L14 440V 2050 269 IC06 IP235**

Question 6. Choix du convertisseur :

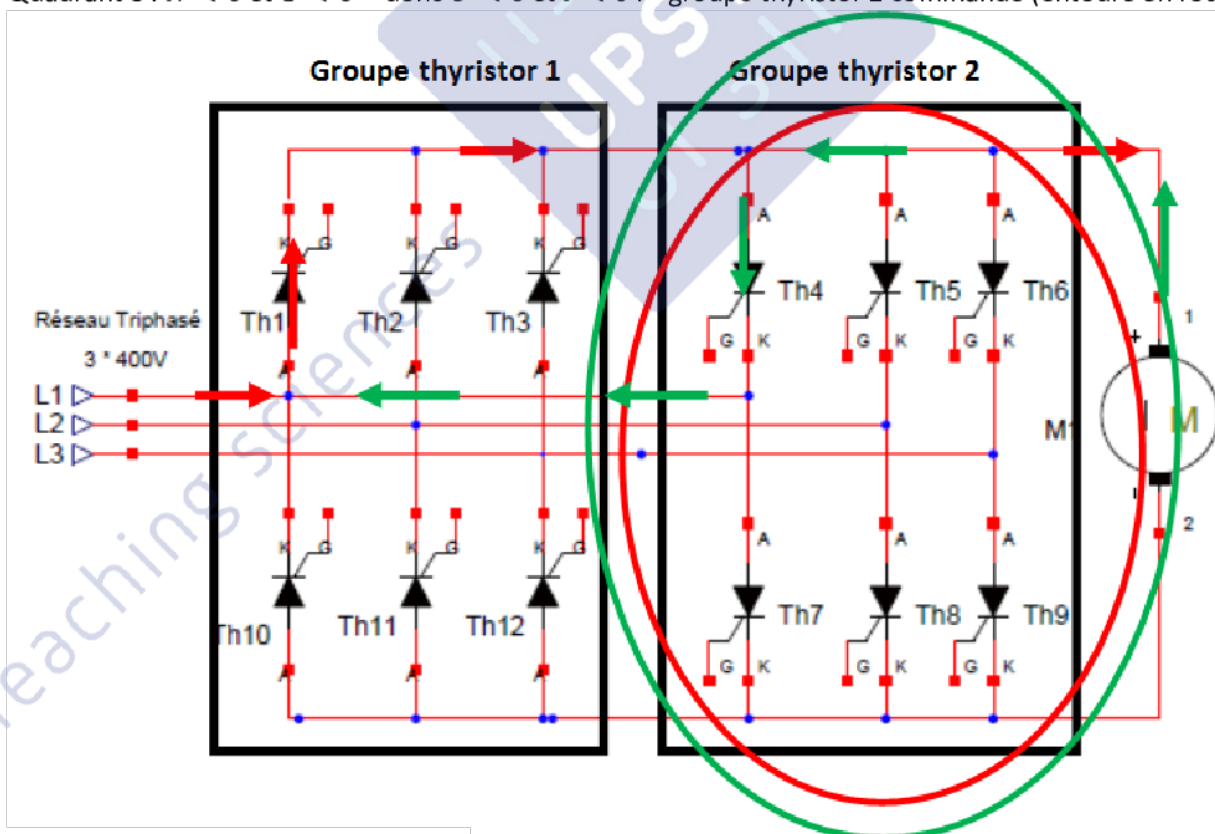
On souhaite que pendant les phases de freinage, l'énergie dissipée soit récupérée sur le réseau : il faut donc un convertisseur 4 quadrants : DMV 2342.

Dans tableau moteur $I'_{\text{induit maxi}} = 650 \text{ A}$: il faut donc un calibre de 700 A.

La référence du convertisseur choisi est donc : **DMV 2342 700A**

Question 7. Le banc doit permettre d'inverser le sens de rotation du moteur (de quadrant 1 à quadrant 3) : on doit donc **inverser la tension et le courant**.

- Quadrant 1 : $N > 0$ et $C > 0$ donc $U > 0$ et $I > 0$: groupe thyristor 1 commandé ;
- Quadrant 3 : $N < 0$ et $C < 0$ donc $U < 0$ et $I < 0$: groupe thyristor 2 commandé (entouré en rouge).



Question 8. L'inversion du moteur en génératrice peut se faire par **inversion du courant d'induit**.

Le parcours du courant est représenté sur le schéma précédent en rouge pour la phase moteur. Il est représenté en vert pour la phase génératrice : dans ce cas, c'est le groupe thyristor 2 qui est commandé (entouré en vert).

Question 9. La puissance d'excitation du moteur LSK 2254 est $\mathcal{P}_{\text{excitation moteur}} = 3200 \text{ W}$.

Le convertisseur permet pour une tension réseau de 400 V une tension d'excitation maximum $U_{\text{excit maxi}} = 360 \text{ V}$. Pour un calibre de 700 A, le courant d'excitation maxi est $I_{\text{excit maxi}} = 10 \text{ A}$.

On en déduit la puissance d'excitation que peut fournir le convertisseur :

$$P_{excitation\ convertisseur} = U_{excit\ maxi} \cdot I_{excit\ maxi} = 360 \cdot 10 = 3600\ W > 3200\ W.$$

Le convertisseur permet donc fournir la puissance d'excitation nécessaire.

Question 10. Rendement global de la machine à courant continu :

$$\text{La puissance consommée est : } P_{elec} = U_{induit} \cdot I_{induit} + P_{excitation\ moteur} = 440 \cdot 650 + 3200 = 289,2\ kW.$$

La puissance utile du moteur est $P_u = 269\ kW$.

Le rendement global de la MCC est de :

$$\eta_{MCC} = \frac{P_u}{P_{elec}}$$

Application numérique :

$$\eta_{MCC} = \frac{269}{289,2} = 93\ \%$$

Question 11. Modèle de la machine à courant continu :

D'après la loi des mailles, on a :

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e(t)$$

Question 12. Détermination de l'inertie équivalente aux solides 6 et 7 ramenée sur l'arbre 7 :

On détermine l'énergie cinétique de l'ensemble 7 par rapport à 0 :

$$E_c(7/0) = \frac{1}{2} \cdot I_7 \cdot \omega(7/0)^2$$

De même pour l'énergie cinétique de l'ensemble 6 par rapport à 0 :

$$E_c(6/0) = \frac{1}{2} \cdot I_6 \cdot \omega(6/0)^2$$

Or : $\frac{\omega(6/0)}{\omega(7/0)} = \frac{Z_7}{Z_6}$ donc $E_c(6/0) = \frac{1}{2} \cdot I_6 \cdot \omega(6/0)^2 = \frac{1}{2} \cdot I_6 \cdot \frac{Z_7^2}{Z_6^2} \cdot \omega(7/0)^2$

On calcule l'énergie cinétique de l'ensemble {6+7} par rapport à 0 :

$$E_c(6 + 7/0) = E_c(6/0) + E_c(7/0) = \frac{1}{2} \cdot \left(I_6 \cdot \frac{Z_7^2}{Z_6^2} + I_7 \right) \cdot \omega(7/0)^2$$

Cette énergie cinétique peut s'écrire, en utilisant l'inertie

équivalente aux solides 6 et 7 (notée I_{67}) ramenée sur l'arbre 7 : $E_c(6 + 7/0) = \frac{1}{2} \cdot I_{67} \cdot \omega(7/0)^2$

Par identification, l'inertie équivalente aux solides 6 et 7 ramenée sur l'arbre 7 s'écrit :

$$I_{67} = I_6 \cdot \frac{Z_7^2}{Z_6^2} + I_7$$

Question 13. En utilisant le théorème du moment dynamique appliqué à l'arbre en rotation en un point de l'axe et en projection sur l'axe moteur :

$$c_m(t) - c_r(t) - f \cdot \omega_m(t) = I_{eq} \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt}$$

Question 14. Les conditions de Heaviside étant considérées comme vérifiées, les équations s'écrivent dans le domaine de Laplace :

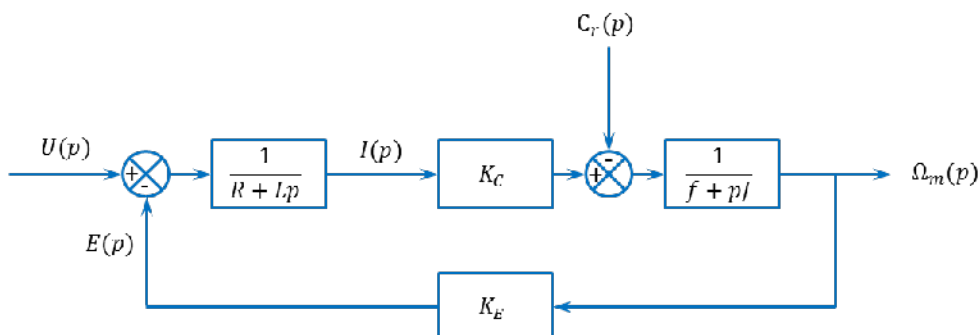
$$U(p) = R \cdot I(p) + L \cdot p \cdot I(p) + E(p)$$

$$C_m(p) = K_c \cdot I(p)$$

$$C_m(p) - C_r(p) - f \cdot \Omega_m(p) = I_{eq} \cdot p \cdot \Omega_m(p)$$

$$E(p) = K_e \cdot \Omega_m(p)$$

Le schéma bloc associé au moteur à courant continu se complète ainsi :



Question 15. On peut-on utiliser en boucle de retour une génératrice tachymétrique pour mesurer la vitesse. Pour avoir la sortie qui tend vers la consigne en régime établi, on doit prendre $K_{Adapt} = K_{Capt}$.

Question 16. On considère que $C_r(p) = 0$ et $\Omega_c(p) \neq 0$:

$$H_m(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U(p)} = \frac{\frac{K}{R \cdot I_{eq} \cdot p}}{1 + \frac{K^2}{R \cdot I_{eq} \cdot p}} = \frac{K}{R \cdot I_{eq} \cdot p + K^2} = \frac{\frac{1}{K}}{1 + \frac{R \cdot I_{eq}}{K^2} \cdot p}$$

$$H_1(p) = \frac{\Omega_m(p)}{\Omega_c(p)} = K_{Adapt} \cdot \frac{\frac{K}{R \cdot I_{eq} \cdot p + K^2} \cdot C(p)}{1 + \frac{K}{R \cdot I_{eq} \cdot p + K^2} \cdot C(p) \cdot K_{Capt}} = \frac{K_{Adapt} \cdot K \cdot C(p)}{R \cdot I_{eq} \cdot p + K^2 + K \cdot C(p) \cdot K_{Capt}}$$

$$H_1(p) = \frac{K_{Adapt} \cdot K \cdot K_P}{R \cdot I_{eq} \cdot p + K^2 + K \cdot K_P \cdot K_{Capt}} = \frac{\frac{K_{Adapt} \cdot K_P}{K + K_P \cdot K_{Capt}}}{\frac{R \cdot I_{eq}}{K^2 + K \cdot K_P \cdot K_{Capt}} \cdot p + 1} = \frac{K_1}{1 + \tau_1 \cdot p}$$

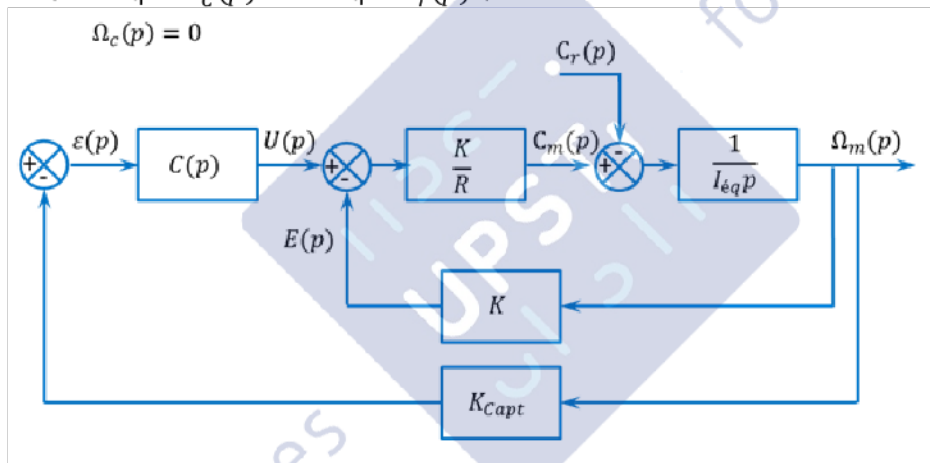
Soit par identification :

$$K_1 = \frac{K_{Adapt} \cdot K_P}{K + K_P \cdot K_{Capt}}$$

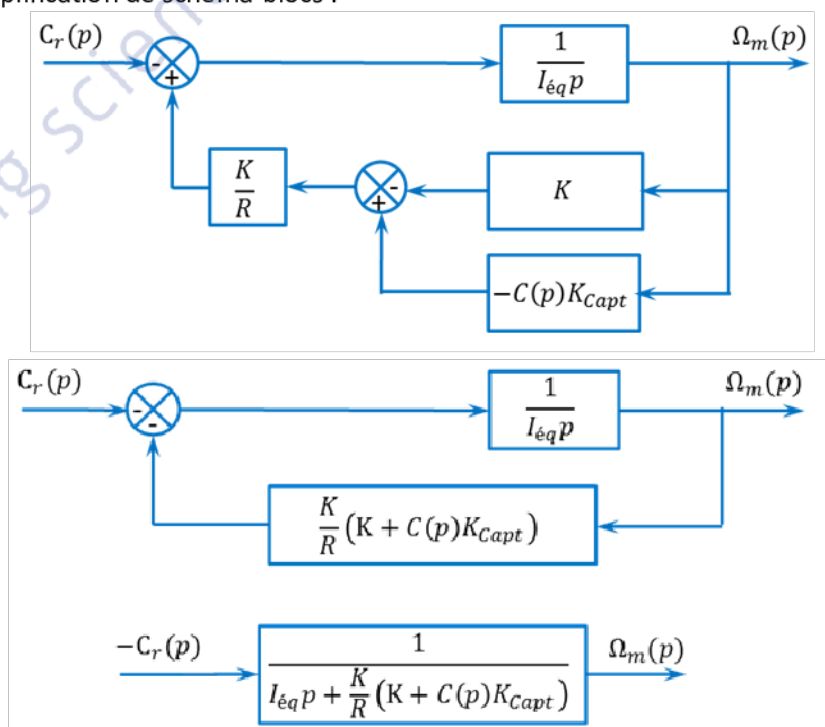
et

$$\tau_1 = \frac{R \cdot I_{eq}}{K^2 + K \cdot K_P \cdot K_{Capt}}$$

Question 17. On considère que $\Omega_c(p) = 0$ et que $C_r(p) \neq 0$:



Question 18. Par simplification de schéma-blocs :



$$\text{On a donc : } H_2(p) = \frac{\Omega_m(p)}{C_r(p)} = -\frac{1}{\frac{K}{R} \cdot (K + K_P \cdot K_{Capt}) + I_{eq} \cdot p} = -\frac{\frac{R}{K \cdot (K + K_P \cdot K_{Capt})}}{1 + \frac{R \cdot I_{eq}}{K \cdot (K + K_P \cdot K_{Capt})} \cdot p} = -\frac{K_2}{1 + \tau_2 \cdot p}$$

$$\text{Soit par identification : } K_2 = \frac{R}{K \cdot (K + K_P \cdot K_{Capt})} \quad \text{et} \quad \tau_2 = \tau_1 = \frac{R \cdot I_{eq}}{K \cdot (K + K_P \cdot K_{Capt})}$$

Question 19. On considère que $\Omega_c(p) \neq 0$ et que $C_r(p) \neq 0$:

Par superposition on a : $\Omega_m(p) = H_1(p) \cdot \Omega_c(p) + H_2(p) \cdot C_r(p)$.

Question 20. On a, pour des échelons de consignes :

$$\Omega_c(p) = \frac{\Omega_{c0}}{p} \quad \text{avec } \Omega_{c0} = 202 \text{ rad/s} \quad \text{et} \quad C_r(p) = \frac{C_{r0}}{p} \quad \text{avec } C_{r0} = 990 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

L'écart statique ε_S s'écrit en sortie du comparateur :

$$\varepsilon_S = \lim_{t \rightarrow +\infty} \varepsilon(t) = \lim_{p \rightarrow 0} [p \cdot \varepsilon(p)] = \lim_{p \rightarrow 0} [p \cdot (K_{Adapt} \cdot \Omega_c(p) - K_{Capt} \cdot \Omega_m(p))]$$

$$\varepsilon_S = \lim_{p \rightarrow 0} [p \cdot (K_{Adapt} \cdot \Omega_c(p) - K_{Capt} \cdot H_1(p) \cdot \Omega_c(p) - K_{Capt} \cdot H_2(p) \cdot C_r(p))]$$

$$\varepsilon_S = \lim_{p \rightarrow 0} \left[p \cdot \left(K_{Adapt} \cdot \frac{\Omega_{c0}}{p} - K_{Capt} \cdot K_1 \cdot \frac{\Omega_{c0}}{p} + K_{Capt} \cdot K_2 \cdot \frac{C_{r0}}{p} \right) \right]$$

$$\varepsilon_S = (K_{Adapt} - K_{Capt} \cdot K_1) \cdot \Omega_{c0} + K_{Capt} \cdot K_2 \cdot C_{r0}$$

L'écart statique ne pourra pas être nul (exigence 1.1.1 du cahier des charges non vérifiée).

En choisissant $K_{Adapt} = K_{Capt}$, l'écart statique pourra être réduit à condition d'avoir un gain K_P important ($K_1 \rightarrow 1$ et $K_2 \rightarrow 0$), mais pas trop pour ne pas rendre le système instable.

Question 21. Avec un correcteur intégral, le système devient de classe C1 et l'écart statique est annulé.

Question 22. En reprenant le raisonnement de la question 20, et en remplaçant $C(p)$ par K_I/p dans les expressions de $H_1(p)$ et $H_2(p)$:

$$\lim_{p \rightarrow 0} H_1(p) = \lim_{p \rightarrow 0} \left(K_{Adapt} \cdot \frac{\frac{K}{R \cdot I_{eq} \cdot p + K^2} \cdot \frac{K_I}{p}}{1 + \frac{K}{R \cdot I_{eq} \cdot p + K^2} \cdot \frac{K_I}{p} \cdot K_{Capt}} \right) = \frac{K_{Adapt}}{K_{Capt}}$$

$$\lim_{p \rightarrow 0} H_2(p) = \lim_{p \rightarrow 0} \left(-\frac{1}{\frac{K}{R} \cdot \left(K + \frac{K_I}{p} \cdot K_{Capt} \right) + I_{eq} \cdot p} \right) = 0$$

$$\varepsilon_S = \lim_{p \rightarrow 0} [p \cdot (K_{Adapt} \cdot \Omega_c(p) - K_{Capt} \cdot H_1(p) \cdot \Omega_c(p) - K_{Capt} \cdot H_2(p) \cdot C_r(p))]$$

$$\varepsilon_S = \lim_{p \rightarrow 0} \left(K_{Adapt} \cdot \Omega_{c0} - K_{Capt} \cdot \frac{K_{Adapt}}{K_{Capt}} \cdot \Omega_{c0} - K_{Capt} \cdot 0 \cdot C_{r0} \right) = 0$$

Dans ce cas, l'application d'un couple perturbateur n'a donc pas d'influence sur l'écart statique. La fréquence de rotation du rotor peut être temporairement impactée, mais au bout d'un laps de temps, l'écart statique tend vers 0. L'exigence 1.1.1 est donc vérifiée.

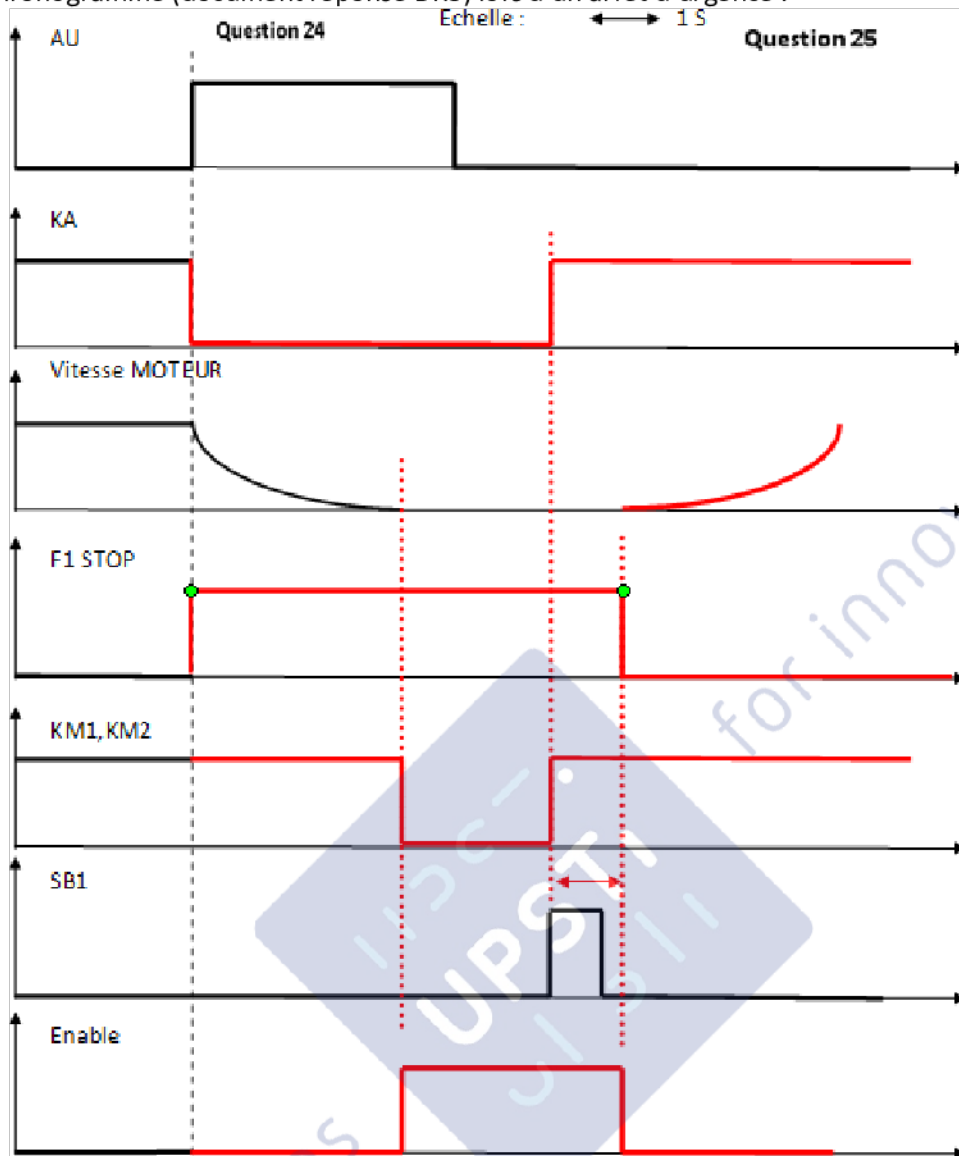
Question 23. Fonctions remplies par les composants QS, QF, QM, KM1 et KM2 :

- QS : PROTÉGER l'ensemble Machine électrique ;
- QF : PROTÉGER l'excitation de Machine électrique ;
- QM : PROTÉGER Ventilation forcée ;
- KM1 : COMMANDER Machine électrique ;
- KM2 : COMMANDER Ventilation forcée.

Rôle que pourraient avoir les options filtre et self :

- Filtre : filtre les émissions des tensions de commutation des thyristors pouvant perturber les émissions Radio Fréquence ;
- Self : permet de lisser le courant (courant non sinusoïdal du à la commande des thyristors).

Question 24. Chronogramme (document réponse DR3) lors d'un arrêt d'urgence :



Question 25. Suite du chronogramme (document réponse DR3) lors de la remise en route par le bouton SB1.

Question 26. Torseur de cohésion $\{T_{coh}(z)\}$ dans la poutre au point $G(z)$ dans la base $(\vec{x}', \vec{y}', \vec{z})$:
En comptant positivement les efforts extérieurs appliqués sur la partie droite de la poutre :

$$\{T_{coh}(z)\} = \{T_{AM \rightarrow S+}\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ F_v & C_1 \end{Bmatrix}_{G, (\vec{x}', \vec{y}', \vec{z})}$$

L'arbre est soumis à de la traction suivant \vec{z} et à de la torsion autour de (C, \vec{z}) .

Question 27. Diamètre minimum de l'arbre :

$$\tau_{Max} < \frac{K \cdot R_e}{s} \Leftrightarrow \frac{C_1 \cdot d}{I_0 \cdot 2} < \frac{K \cdot R_e}{s} \Leftrightarrow \frac{1}{d^3} < \frac{2 \cdot K \cdot \pi \cdot R_e}{32 \cdot C_1 \cdot s} \Leftrightarrow d^3 > \frac{16 \cdot C_1 \cdot s}{K \cdot \pi \cdot R_e}$$

$$d > \sqrt[3]{\frac{16 \cdot C_1 \cdot s}{K \cdot \pi \cdot R_e}}$$

Question 28. Choix de matériaux présentant le meilleur compromis prix-résistance élastique :

- Aciers faiblement alliés : $R_e = 1000 \text{ MPa}$;
- Aciers à haute teneur en carbone : $R_e = 1050 \text{ MPa}$.

On choisira du forgeage pour la mise en forme du brut puis des opérations d'usinage (tournage) comme procédé de finition.

Question 29. Pour un acier dont la teneur en carbone est comprise entre 0,32 % et 0,45 % : $K = 0,7$.

Application numérique avec $R_e = 1000 \text{ MPa}$:

$$d > \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 4100 \cdot 1000 \cdot 1,2}{0,7 \cdot \pi \cdot 1000}} > 33 \text{ mm}$$

Question 30. Détermination des efforts dans les liaisons en A et en B :

Le problème est considéré comme plan (plan (\vec{y}, \vec{z})).

On isole le support S et on effectue le bilan des actions mécaniques extérieures :

- Action de la liaison sphère-cylindre en A d'axe \vec{z} : $\{\mathcal{T}(1A \rightarrow S)\} = \begin{pmatrix} - & 0 \\ Y_{1A \rightarrow S} & - \\ 0 & - \end{pmatrix}_{A,(\vec{x},\vec{y},\vec{z})} = \begin{pmatrix} - & l \cdot Y_{1A \rightarrow S} \\ Y_{1A \rightarrow S} & - \\ 0 & - \end{pmatrix}_{B,(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$
- Action de la liaison sphérique en B : $\{\mathcal{T}(1B \rightarrow S)\} = \begin{pmatrix} - & 0 \\ Y_{1B \rightarrow S} & - \\ Z_{1B \rightarrow S} & - \end{pmatrix}_{B,(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$
- Action du vérin V_1 en D : $\{\mathcal{T}(\text{vérin} \rightarrow S)\} = \begin{pmatrix} - & 0 \\ 0 & - \\ F_v & - \end{pmatrix}_{D,(\vec{x},\vec{y},\vec{z})} = \begin{pmatrix} - & L \cdot F_v \\ 0 & - \\ F_v & - \end{pmatrix}_{B,(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$
- Action du vérin V_2 en E nulle.

On applique le PFS au support S en B :

$$\begin{cases} Y_{1A \rightarrow S} + Y_{1B \rightarrow S} = 0 \\ Z_{1B \rightarrow S} + F_v = 0 \\ l \cdot Y_{1A \rightarrow S} + L \cdot F_v = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} Y_{1A \rightarrow S} = -\frac{L}{l} \cdot F_v \\ Y_{1B \rightarrow S} = \frac{L}{l} \cdot F_v \\ Z_{1B \rightarrow S} = -F_v \end{cases}$$

Les efforts dans les liaisons en A et en B s'écrivent donc :

$$\{\mathcal{T}(1A \rightarrow S)\} = \begin{pmatrix} - & 0 \\ -\frac{L}{l} \cdot F_v & - \\ 0 & - \end{pmatrix}_{A,(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$$

et

$$\{\mathcal{T}(1B \rightarrow S)\} = \begin{pmatrix} - & 0 \\ \frac{L}{l} \cdot F_v & - \\ -F_v & - \end{pmatrix}_{B,(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$$

Applications numériques :

$$\begin{cases} Y_{1A \rightarrow S} = -\frac{300}{200} \cdot 80\,000 = -120\,000 \text{ N} \\ Y_{1B \rightarrow S} = \frac{300}{200} \cdot 80\,000 = 120\,000 \text{ N} \\ Z_{1B \rightarrow S} = -80\,000 \text{ N} \end{cases}$$

Soit (en N) :

$$\{\mathcal{T}(1A \rightarrow S)\} = \begin{pmatrix} - & 0 \\ -120\,000 & - \\ 0 & - \end{pmatrix}_{A,(\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \quad \text{et} \quad \{\mathcal{T}(1B \rightarrow S)\} = \begin{pmatrix} - & 0 \\ 120\,000 & - \\ -80\,000 & - \end{pmatrix}_{B,(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$$

Question 31. Composantes radiales et axiales :

- Sur le roulement en A : $F_{Aa} = |Z_{1A \rightarrow S}| = 0 \text{ N}$ et $F_{Ar} = |Y_{1A \rightarrow S}| = 120\,000 \text{ N}$.
- Sur le roulement en B : $F_{Ba} = |Z_{1B \rightarrow S}| = 80\,000 \text{ N}$ et $F_{Br} = |Y_{1B \rightarrow S}| = 120\,000 \text{ N}$.

Question 32. Durée de vie du roulement en B :

Pour le roulement référence 6 230 : $d = 150 \text{ mm}$, $D = 270 \text{ mm}$, $B = 45 \text{ mm}$, $C = 176\,000 \text{ N}$, $C_0 = 168\,000 \text{ N}$.

Avec un chargement $F_a = F_{Ba} = 80\,000 \text{ N}$ et $F_r = F_{Br} = 120\,000 \text{ N}$:

$$\frac{F_a}{C_0} = \frac{80\,000}{168\,000} = 0,476 \quad \text{On en déduit } e = 0,42. \quad \frac{F_a}{F_r} = \frac{80\,000}{120\,000} = 0,667 > 0,42$$

La charge dynamique équivalente s'écrit donc : $P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$ avec $X = 0,56$ et $Y = 1,04$.

$$P = 0,56 \cdot 120\,000 + 1,04 \cdot 80\,000 = 150\,400 \text{ N}$$

La durée de vie se calcule en Millions de tours :

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^3 = \left(\frac{176\,000}{150\,400}\right)^3 = 1,60 \text{ Millions de tours}$$

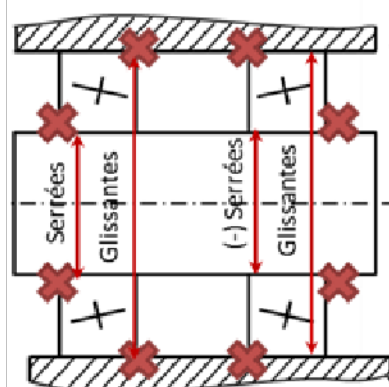
A une fréquence de rotation $N(1/0) = 350 \text{ min}^{-1}$, cela correspond à $\frac{1,60 \cdot 10^6}{350} = 4580 \text{ min} = 76,3 \text{ h}$ de fonctionnement. La durée de vie est très éloignée de ce qui est demandé par le cahier des charges (8760 h).

Le roulement en B n'est donc pas compatible avec le cahier des charges.

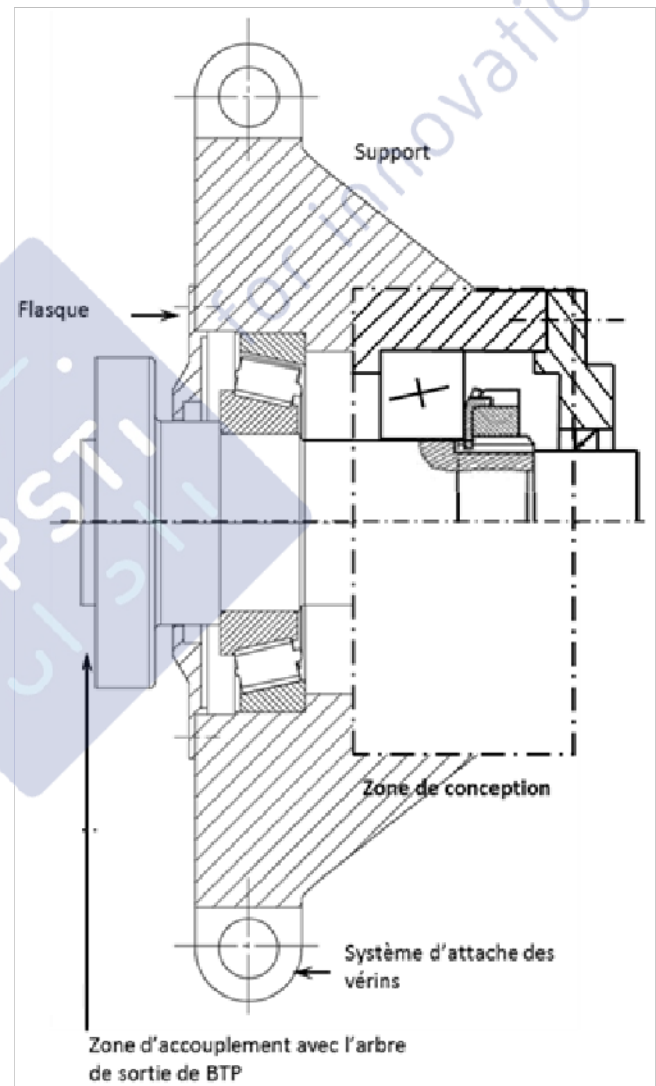
Les roulements à billes à une rangée de billes n'étant pas adaptés, on doit prendre des roulements à deux rangées de billes ou bien des roulements à rouleaux coniques (pour encaisser les efforts radiaux et axiaux) dont la capacité dynamique de charge est plus élevée.

Question 33.

- Le montage en « O » permet d'éloigner les centres de poussée et de diminuer le rotulage de la liaison.
- La charge s'exerce par l'intermédiaire du vérin et l'arbre tourne : ce sont donc les bagues intérieures, tournant par rapport à la charge, qui doivent être montées serrées.
- Arrêts axiaux indiqués par des croix :



- Pour la liaison entre le roulement à rouleaux coniques, l'arbre et le support :
 - l'arrêt axial de la bague extérieure se fait par un épaulement dans le support ;
 - l'arrêt axial de la bague intérieure se fait par un écrou à encoches vissé sur une portion d'arbre fileté.
- Pour le flasque permettant d'assurer l'étanchéité entre l'intérieur du support et le milieu extérieur :
 - la mise en position sur le support est réalisée par appui-plan et centrage court ;
 - le maintien en position sur le support est réalisé par des vis d'assemblage ;
 - l'étanchéité est réalisée par un joint à lèvres.



Question 34. Montage en quart de pont figure 15 :

On utilise un pont diviseur de tension pour calculer U_A :

$$U_A = \frac{R}{R + R_a} \cdot E_{pw}$$

On procède de même pour calculer U_B :

$$U_B = \frac{R}{R + R} \cdot E_{pw} = \frac{E_{pw}}{2}$$

On en déduit :

$$V_{mes} = U_A - U_B = \left(\frac{R}{R + R_a} - \frac{1}{2} \right) \cdot E_{pw}$$

Pour équilibrer le pont ($V_{mes} = 0$), il faut $R_a = R$.

Valeur numérique de V_{mes} pour $R_a = 356 \Omega$:

$$V_{mes} = \left(\frac{350}{350 + 356} - \frac{1}{2} \right) \cdot 10 = -0,0425 \text{ V}$$

Question 35. Résistance R_f d'un fil : $R_f = \frac{\rho \cdot l}{S}$

Application numérique : $R_f = \frac{1,72 \cdot 10^{-8} \cdot 50}{0,14 \cdot 10^{-6}} = 6,14 \Omega$

La nouvelle expression de V_{mes} s'écrit :

$$V_{mes} = U_A - U_B = \frac{R}{R + R_a + 2 \cdot R_f} \cdot E_{pww} - \frac{R}{R + R} \cdot E_{pww} = \left(\frac{R}{R + R_a + 2 \cdot R_f} - \frac{1}{2} \right) \cdot E_{pww}$$

Valeur numérique de V_{mes} pour $R_a = 356 \Omega$:

$$V_{mes} = \left(\frac{350}{350 + 356 + 2 \cdot 6,14} - \frac{1}{2} \right) \cdot 10 = -0,127 \text{ V}$$

L'erreur de mesure est donc de :

$$\varepsilon_{mes} = \left(\frac{-0,127 + 0,0425}{0,127} \right) = 66 \%$$

Cette erreur due aux câbles est bien supérieure à la précision intrinsèque du capteur.

Question 36. Avec un montage 3 fils (pas de courant dans la branche du haut) :

$$V_{mes} = U_A - U_B = \frac{R + R_f}{R + R_a + 2 \cdot R_f} \cdot E_{pww} - \frac{R}{R + R} \cdot E_{pww} = \left(\frac{R + R_f}{R + R_a + 2 \cdot R_f} - \frac{1}{2} \right) \cdot E_{pww}$$

Avec $R_a = R$: $V_{mes} = \left(\frac{R + R_f}{R + R + 2 \cdot R_f} - \frac{1}{2} \right) \cdot E_{pww} = \left(\frac{R + R_f}{2 \cdot R + 2 \cdot R_f} - \frac{1}{2} \right) \cdot E_{pww} = 0$

On retrouve bien l'équilibre du pont avec le montage 3 fils quand la jauge est au repos.

Question 37. Les amplificateurs opérationnels sont en fonctionnement linéaire (contre-réaction négative). Ils sont aussi idéaux, donc $V_+ = V_-$ et les courants d'entrée sont nuls.

On en déduit que V_{mes} se retrouve aux bornes de R_1 .

A l'aide d'un pont diviseur de tension on a :

$$V_{mes} = \frac{R_1}{R_2 + R_1 + R_2} \cdot V_{CD} = \frac{R_1}{R_1 + 2 \cdot R_2} \cdot V_{CD}$$

On en déduit :

$$V_C - V_D = V_{CD} = \frac{R_1 + 2 \cdot R_2}{R_1} \cdot V_{mes} = \left(1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot (V_A - V_B)$$

A l'entrée de l'AOP A_3 (théorème de Millman) :

$$V_+ = V_- = \frac{\frac{V_C}{R_2} + \frac{V_E}{R_2}}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2}} = \frac{\frac{V_D}{R_2}}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2}}$$

Soit $V_C + V_E = V_D$, et donc :

$$V_E = V_D - V_C = -V_{CD} = - \left(1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot V_{mes}$$

Remarque : on retrouve pour l'AOP A_3 un montage soustracteur.

Question 38. A partir de la documentation technique en annexe 6 :

$$V_{OUT} = \frac{V_{REF} \cdot D_N}{2^n}$$

On a pour MCP4922 une résolution $n = 12$.

Pour la sortie A, la tension de référence en entrée est V_{out} :

$$V_{OUTA} = \frac{V_{out} \cdot D_{NA}}{2^{12}}$$

Pour la sortie B, la tension de référence en entrée est V_{alim} :

$$V_{OUTB} = \frac{V_{alim} \cdot D_{NB}}{2^{12}}$$

Question 39. On a, avec $R_{11} = R_{12} = R_{13} = R_{14}$, un montage soustracteur :

$$V_{AIN1} = V_{OUTB} - V_{OUTA} = \frac{V_{alim} \cdot D_{NA}}{2^{12}} - \frac{V_{out} \cdot D_{NB}}{2^{12}} = \frac{V_{alim} \cdot D_{NA}}{2^{12}} + \frac{\left(1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot V_{mes} \cdot D_{NB}}{2^{12}}$$

Cette expression peut s'écrire : $V_{AIN1} = A + B \cdot V_{mes}$, avec A (offset) et B (gain).

Soit par identification :

Offset : $A = \frac{V_{alim} \cdot D_{NA}}{2^{12}}$

Gain : $B = \left(1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \frac{D_{NB}}{2^{12}}$

Question 40. Réglage du gain et de l'offset : $V_{AIN1} = A + B \cdot V_{mes}$

Pour $V_{mes} = -2 \text{ mV}$, on veut $V_{AIN1} = 0 \text{ V}$, et pour $V_{mes} = +2 \text{ mV}$, on veut $V_{AIN1} = 3,3 \text{ V}$.

$$\begin{cases} 0 = A - B \cdot 2 \cdot 10^{-3} \\ 3,3 = A + B \cdot 2 \cdot 10^{-3} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 3,3 = 2 \cdot A \\ 3,3 = 2 \cdot B \cdot 2 \cdot 10^{-3} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} A = 1,65 \text{ V} \\ B = \frac{3,3}{4 \cdot 10^{-3}} = 825 \end{cases}$$

On prendra donc un gain de 825 et un offset de 1,65 V.

Question 41. Algorithme DR5 :

