DM 1 – Performances des systèmes asservis

PCSI/MPSI 2026–2027 · Sciences Industrielles de l'Ingénieur

Erratum du 20/10/2026 *: nouvelle réponse indicielle de la boucle de courant (Figure B.7 et* **Document réponse - Question B-8***). Pour l'asservissement de vitesse, on retient désormais* $k_H = 9{,}3 \cdot 10^3$ *et* $\tau_c = 0{,}028\,\text{s}$.

A C'est la classe !

- Objectif

L'objectif de cet exercice est de mettre en évidence le lien entre la classe de la boucle ouverte d'un système (de type Linéaire, Continu et Invariant) asservi et l'écart entre la réponse du système et la consigne.

On considère un système d'entrée $e(t)$, de sortie $s(t)$ et de fonction de transfert $F(p)$ dans le domaine de Laplace. On souhaite asservir ce système afin de pouvoir le commander avec une consigne $s_c(t)$ de même dimension que la sortie $s(t)$.
On note respectivement $E(p)$, $S(p)$ et $S_c(p)$ les transformées de Laplace des grandeurs $e(t)$, $s(t)$ et $s_c(t)$.
On modélise notre système asservi et sa commande par le schema-bloc générique présenté dans la Figure A.1. $A(p)$ est appelé la fonction d'adaptation, $C(p)$ la fonction de transfert du correcteur, et $G(p)$ est la fonction de transfert du capteur qui permet d'assurer la fonction « acquérir », donnée par la documentation constructeur.

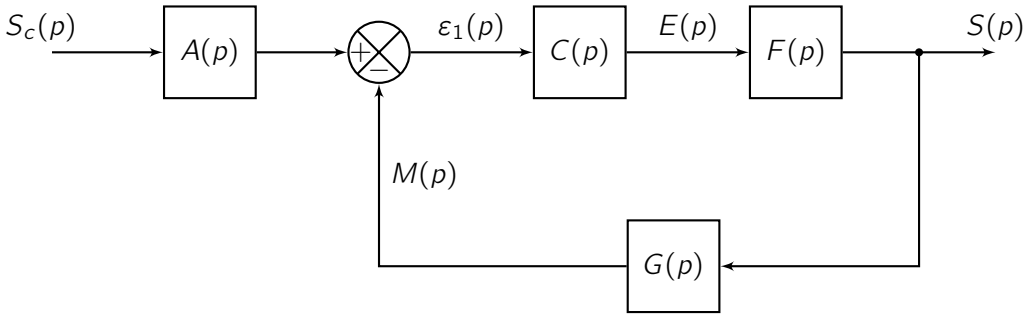


Figure A.1 – Représentation générique d'un système en boucle fermée

Question A-1	**Donner** l'expression de $A(p)$ pour avoir un système bien asservi.
Question A-2	**Montrer** alors que le schéma-bloc de la Figure A.1 peut se mettre sous la forme du schéma-bloc de la Figure A.2, et **donner** $H(p)$ en fonction des précédentes fonctions de transfert.
Question A-3	Que peut-on **dire** de $H(p)$ et de la fonction de transfert de la boucle ouverte $M(p)/\varepsilon_1(p)$? ($M(p)$ est le signal défini dans la Figure A.1)

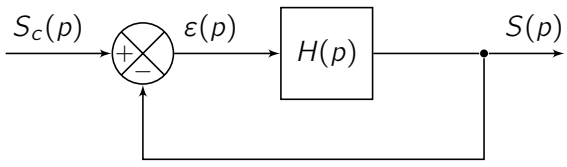


Figure A.2 – Boucle à retour unitaire



Remarque

On peut montrer que tout SLCI asservi peut se modéliser en schéma-blocs avec la forme proposée dans la Figure A.2.
$H(p)$ s'exprime alors sous forme canonique :

$$H(p) = \frac{K \cdot \left(1 + b_1 \cdot p + \ldots + b_m \cdot p^m\right)}{p^\alpha \cdot \left(1 + a_1 \cdot p + \ldots + a_{n-\alpha} \cdot p^{n-\alpha}\right)}$$

avec $m \leq n$ pour respecter le principe de causalité.

Question A-4 **Montrer** que $\varepsilon(p) = \dfrac{S_c(p)}{1 + H(p)}$. *Vous n'utiliserez en aucun cas la formule de Black.*

Pour la suite de l'exercice, vous considérerez

$$H(p) = \frac{K \cdot \left(1 + b_1 \cdot p + \ldots + b_m \cdot p^m\right)}{p^\alpha \cdot \left(1 + a_1 \cdot p + \ldots + a_{n-\alpha} \cdot p^{n-\alpha}\right)}$$

avec $m \leq n$ pour respecter le principe de causalité.

A.1 Entrée de type échelon

On considère $s_c(t) = s_0 \cdot u(t)$, avec $u(t)$ la fonction de Heaviside.

Question A-5 **Donner** $\lim\limits_{t\to\infty} \varepsilon(t)$ pour
- $\alpha = 0$;
- $\alpha \geq 1$.

A.2 Entrée en rampe

On considère $s_c(t) = s_1 \cdot t \cdot u(t)$, avec $u(t)$ la fonction de Heaviside.

Question A-6 **Donner** $\lim\limits_{t\to\infty} \varepsilon(t)$ pour
- $\alpha = 0$;
- $\alpha = 1$;
- $\alpha \geq 2$.

A.3 Bilan

Question A-7 **Compléter** alors le Tableau 1 donnant l'erreur en fonction du type d'entrée (échelon ou rampe) et de la classe de la fonction de transfert en boucle ouverte.

Classe de $H(p)$	**Échelon** : $s_c(t) = s_0 \cdot u(t)$	**Rampe** : $s_c(t) = s_1 \cdot t \cdot u(t)$
$\alpha = 0$		
$\alpha = 1$		
$\alpha \geq 2$		

Tableau 1 – Erreur (statique ou de trainage) $\lim\limits_{t\to\infty} \varepsilon(t)$ en fonction de la classe de $H(p)$ et du type d'entrée

B Asservissement en courant de l'EGTS

Contexte

Pour réduire la consommation des avions, les avionneurs développent « l'avion plus électrique ». Dans cette optique, Safran et Honeywell ont conçu l'*Electric Green Taxiing System* (EGTS), présenté au salon du Bourget en 2013. Cet actionneur électromécanique est monté sur les roues des trains principaux d'un Airbus A320 (Figure B.1). Alimenté par le groupe auxiliaire de puissance (APU), il permet à l'avion de se déplacer au sol sans utiliser ses réacteurs : c'est la phase de « taxiage ».



Figure B.1 – Prototype de l'EGTS monté sur un train d'atterrissage principal

Les principaux avantages attendus sont :

- une réduction d'environ 4 % de la consommation de carburant sur un vol, et des émissions au sol ;
- une meilleure manœuvrabilité de l'avion (plus besoin de tracteur pour le recul) ;
- moins de nuisances sonores et d'usure des freins et des réacteurs.

Une vidéo présentant les essais de l'EGTS réalisés par Honeywell et Safran est accessible par le QR code ci-contre.

Synoptique de l'EGTS

Le synoptique fonctionnel de l'EGTS est présenté dans la Figure B.2. Il met en évidence les principales unités du système et les échanges d'énergie et d'information entre elles.

Unité interface pilote : ce sous-système est une interface Homme-machine. Il permet au pilote d'activer (ou désactiver) le mode EGTS et de commander le mouvement désiré de l'avion (vitesse de déplacement et sens avant ou arrière).

Unité commande EGTS : ce sous-système reçoit les informations du pilote et les convertit en ordre pour l'électronique de puissance.

Unité contrôleur actionneur roue (WACU) : le WACU commande l'actionneur de roue (moteur électrique) en fonction de la commande du pilote délivrée par l'unité de commande EGTS.

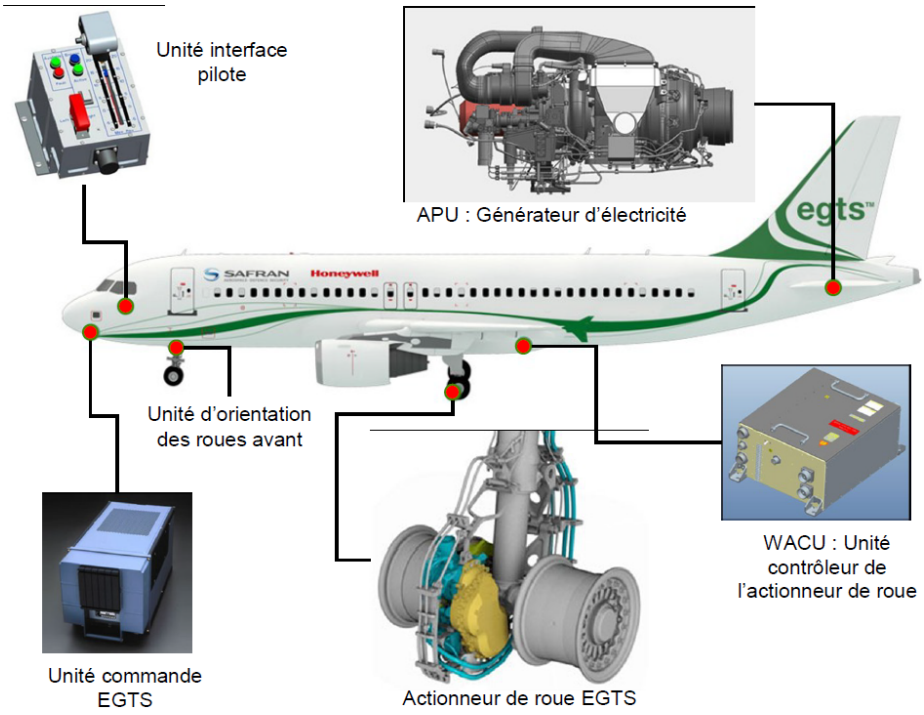


Figure B.2 – Synoptique de l'EGTS

Actionneur de roue EGTS : ce sous-système composé d'un moteur électrique, d'un réducteur et d'un embrayage, convertit l'énergie électrique issue du WACU en énergie mécanique transmise à la roue.

APU Générateur : il alimente en énergie l'avion et en particulier l'EGTS. L'APU (Auxiliary Power Unit ou groupe auxiliaire de puissance) présent sur les avions a dû être modifié pour générer la puissance supplémentaire nécessaire pour alimenter les EGTS.

Actionneur de roue EGTS

La chaîne de transmission de puissance de l'EGTS comporte :

- un moteur électrique PMSM (fourni par Honeywell) ;
- un premier étage de réduction (appelé Gearbox 12 – GB12) ;
- un embrayage ;
- une transmission (appelée Gearbox 3 – GB3) en liaison avec la roue de l'avion.

La vue d'ensemble de l'actionneur de roue est présentée dans la Figure B.3.

B.1 Description structurelle de l'EGTS

Question B-1 À partir des données techniques de l'EGTS, **proposer** un schéma chaîne d'information/puissance de l'EGTS, en précisant la nature des flux échangés (information, énergie électrique, énergie mécanique). On y placera les éléments suivants :

- ceux du synoptique de la Figure B.2 : unité interface pilote, unité de commande EGTS, WACU, actionneur de roue EGTS et APU générateur ;
- ceux de l'actionneur de roue EGTS, qui détailleront ce dernier bloc : moteur électrique PMSM, réducteur GB12, embrayage, transmission GB3 et roue de l'avion.

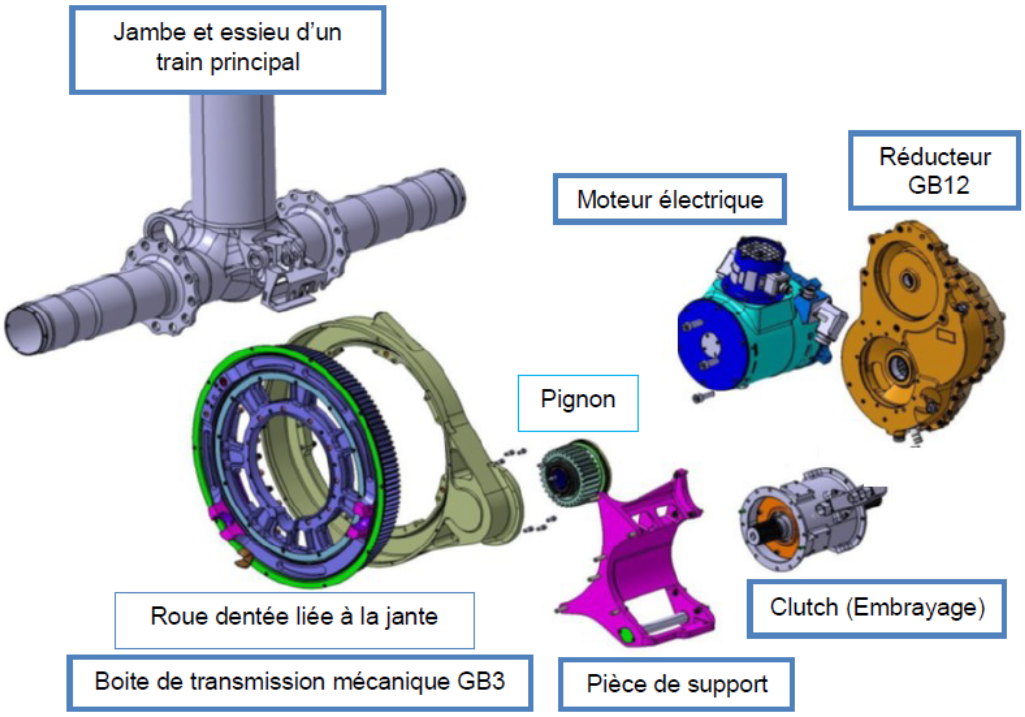


Figure B.3 – Actionneur de roue EGTS

Chaque train principal reçoit un actionneur dont le moteur électrique est une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Le pilote fixe la vitesse de l'avion, qui est convertie en consigne pour la motorisation. Le couple fourni par la machine étant proportionnel au courant qui la traverse, **piloter le couple revient à piloter le courant**.

- Objectif

L'objectif de cet exercice est de modéliser la machine, puis d'étudier l'asservissement en courant qui permet de maîtriser le couple fourni par l'EGTS, afin de vérifier que la boucle de courant est suffisamment rapide pour être considérée comme instantanée dans l'asservissement de vitesse. On étudie enfin l'intérêt d'un estimateur du couple résistant pour rejeter cette perturbation.

Remarque

La variable de Laplace est notée p. Toutes les conditions initiales sont supposées nulles. Les fonctions de transfert seront présentées sous leur forme canonique.

Nous allons, dans un premier temps, étudier l'asservissement en courant de la machine qui a pour modèle le schéma structurel de la Figure B.4.

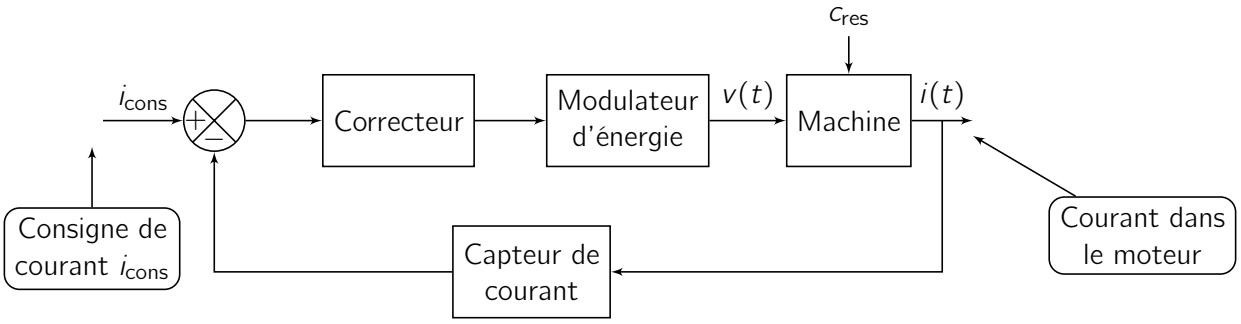


Figure B.4 – Structure de l'asservissement en courant de la machine

Dans un second temps, l'étude portera sur l'analyse de la performance de la boucle de courant intégrée à la régulation de vitesse.

B.2 Modélisation de la machine

On modélise une phase de la machine par le circuit de la Figure B.5, associé à l'inertie J_a de l'avion ramenée sur l'arbre moteur. On note :

- $v(t)$ la tension d'alimentation et $i(t)$ le courant dans la phase ;
- $e(t)$ la force contre-électromotrice, avec $e(t) = K \cdot \omega_{mot}(t)$;
- $c_{mot}(t)$ le couple moteur, avec $c_{mot}(t) = K \cdot i(t)$;
- $c_{res}(t)$ le couple résistant ramené sur l'arbre moteur, et $\omega_{mot}(t)$ la vitesse de rotation du rotor.

Les données numériques sont :

- $K = 0{,}45\,\mathrm{V \cdot s \cdot rad^{-1}}$, soit $0{,}45\,\mathrm{N \cdot m \cdot A^{-1}}$;
- $R = 0{,}007\,\Omega$ et $L = 3\,\mathrm{mH}$;
- $J_a = 2\,700\,\mathrm{kg \cdot m^2}$.

Le modèle équivalent de la machine synchrone est représenté sur la Figure B.5.
L'équation du moment dynamique appliqué à l'arbre moteur et la loi des mailles nous donnent respectivement :

$$J_a \cdot \frac{\mathrm{d}\omega_{mot}(t)}{\mathrm{d}t} = c_{mot}(t) - c_{res}(t) \qquad L \cdot \frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t} + R \cdot i(t) + e(t) = v(t)$$

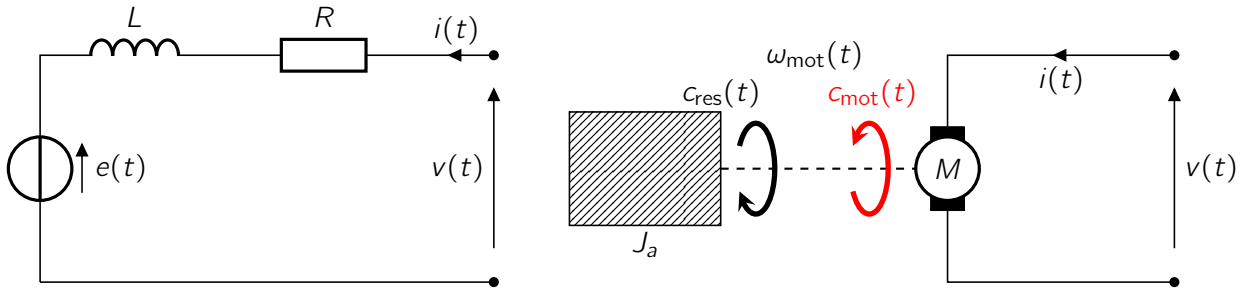


Figure B.5 – Modèle proposé dans le cadre de nos hypothèses

Question B-2 **Exprimer** les quatre équations de la machine électrique dans le domaine de Laplace.

Question B-3 **Montrer** que le courant peut s'écrire

$$I(p) = H_1(p) \cdot V(p) + H_2(p) \cdot C_{res}(p)$$

avec

$$H_1(p) = H_0 \cdot \frac{\dfrac{p}{\omega_1}}{1 + \dfrac{2\xi}{\omega_n} p + \dfrac{p^2}{\omega_n^2}} \quad \text{et} \quad H_2(p) = \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{1 + \dfrac{2\xi}{\omega_n} p + \dfrac{p^2}{\omega_n^2}}.$$

Donner les expressions de H_0, ω_1, ω_n et ξ en fonction de R, L, K et J_a.

Prenez d'abord $C_{res}(p) = 0$. Vous trouverez dans un premier temps la dimension (ou l'unité) de H_0, considérant que p/ω_1 est sans dimension, puis son expression littérale. Ensuite, vous pourrez identifier ω_1, ω_n, ξ puis K.

Question B-4 **Calculer** les valeurs numériques de H_0, ω_n et ξ. **Conclure** sur la nature du régime transitoire de la machine seule (oscillant ou apériodique).

Question B-5 Pour $\xi > 1$, le dénominateur $1 + \dfrac{2\xi}{\omega_n} p + \dfrac{p^2}{\omega_n^2}$ se factorise en $(1 + \tau_e\, p)(1 + \tau_{em}\, p)$ avec $\tau_{em} \gg \tau_e$. **Montrer** que $\tau_{em} \approx \dfrac{2\xi}{\omega_n}$ et $\tau_e \approx \dfrac{1}{2\xi\, \omega_n}$, puis **exprimer** ces deux constantes de temps en fonction de R, L, K et J_a. **Calculer** leurs valeurs numériques et **donner** leur signification physique (l'une est liée au circuit électrique, l'autre au mouvement de l'avion).

Vous développerez le produit $(1 + \tau_e\, p)(1 + \tau_{em}\, p)$ et identifierez les coefficients de p et p^2 avec ceux du dénominateur $1 + \dfrac{2\xi}{\omega_n} p + \dfrac{p^2}{\omega_n^2}$. On utilisera l'hypothèse $\tau_{em} \gg \tau_e$ pour simplifier les expressions.

Question B-6 Le moment d'inertie J_a dépend de la masse de l'avion (à vide ou en charge). **Exprimer** ξ en fonction de J_a et **déterminer** la valeur de J_a en dessous de laquelle le régime deviendrait oscillant. Le caractère apériodique de la machine dépend-il de la charge de l'avion ?

B.3 Asservissement en courant

Pour maîtriser le couple, on asservit le courant $i(t)$ à une consigne $i_{cons}(t)$. Le modèle de l'asservissement est donné par le schéma-blocs de la Figure B.6. Le couple résistant $c_{res}(t)$ y apparaît comme une perturbation.
Le capteur de courant et l'ensemble {correcteur + modulateur d'énergie} sont modélisés par des gains purs : $k_i = 10^{-4}$ et $k_c = 10^3\,\mathrm{V}\cdot\mathrm{A}^{-1}$.

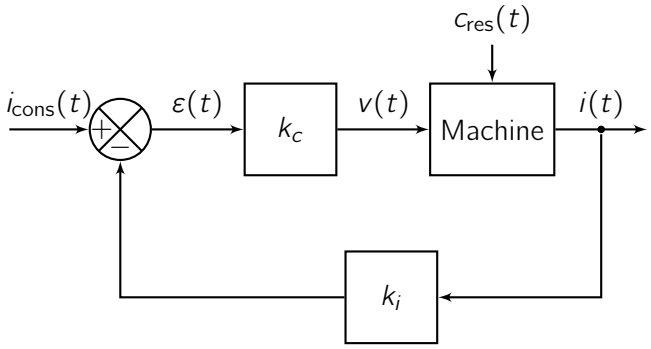


Figure B.6 – Asservissement en courant de la machine

On cherche la fonction de transfert $H_{cons}(p) = \dfrac{I(p)}{I_{cons}(p)}$ pour $C_{res}(p) = 0$ (théorème de superposition).

Question B-7 **Exprimer** $H_{cons}(p)$ en fonction de k_c, k_i, $H_1(p)$, puis **montrer** qu'elle peut se mettre sous la forme

$$H_{cons}(p) = k_{cons} \cdot \frac{\dfrac{p}{\omega_1}}{1 + \dfrac{2\xi'}{\omega_n}\,p + \dfrac{p^2}{\omega_n^2}}.$$

Donner les expressions littérales de k_{cons} et de ξ' en fonction de k_c, k_i, H_0, ξ, ω_n et ω_1, puis **calculer** leurs valeurs numériques.

Une modélisation dans un logiciel de simulation causal (type Matlab/Simulink) nous donne la réponse temporelle de la boucle de courant à un échelon de consigne $i_{cons}(t) = i_0 \cdot u(t)$, avec $i_0 = 10\,\mathrm{A}$, représentée dans la Figure B.7 (une copie est fournie sur le **Document réponse - Question B-8** pour les constructions). Cette dernière est tracée sur un temps très court, correspondant à la dynamique de la boucle de courant.

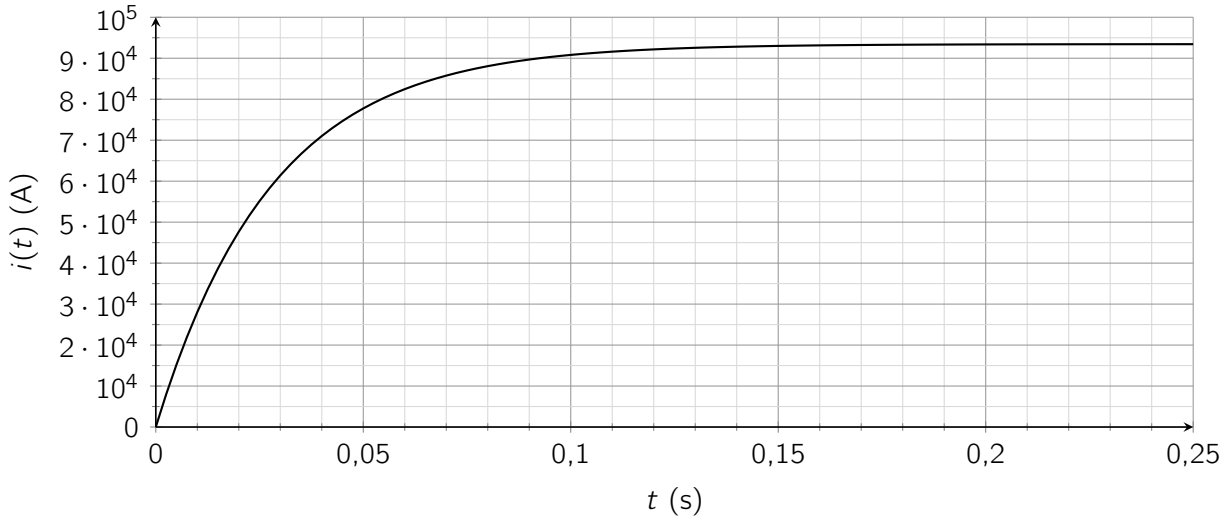


Figure B.7 – Réponse temporelle de la boucle de courant à un échelon de consigne

Question B-8 **Justifier** la modélisation de la boucle de courant par un système du premier ordre : $H_{\text{cons}}(p) \approx \dfrac{k_H}{1+\tau_c\, p}$. **Relever** sur le **Document réponse - Question B-8** le gain statique k_H et la constante de temps τ_c, en faisant apparaître les constructions sur la figure.

Question B-9 Pour $\xi' \gg 1$, **montrer** que le dénominateur de $H_{\text{cons}}(p)$ se factorise approximativement sous la forme

$$1+\frac{2\xi'}{\omega_n}\,p+\frac{p^2}{\omega_n^2} \approx \left(1+\frac{2\xi'}{\omega_n}\,p\right)\left(1+\frac{p}{2\xi'\,\omega_n}\right).$$

En simplifiant $1+\frac{2\xi'}{\omega_n}\,p$ par $\frac{2\xi'}{\omega_n}\,p$, en **déduire** que, dans ces conditions, $H_{\text{cons}}(p)$ se met sous la forme $\dfrac{k_H}{1+\tau_c\, p}$. **Donner** les expressions littérales de k_H et de τ_c en fonction de k_{cons}, ω_1, ω_n et ξ', puis **calculer** leurs valeurs numériques et les **comparer** à celles relevées.

Question B-10 En **déduire** le temps de réponse à 5 % de la boucle de courant, puis **conclure** : peut-on considérer que le courant suit sa consigne de façon quasi instantanée à l'échelle de l'accélération de l'avion, qui dure plusieurs dizaines de secondes ? **Donner** enfin l'ordre de grandeur de la durée au-delà de laquelle ce modèle du premier ordre cesse d'être valable.

Question B-11 **[Bonus]**

1. Mettre $H_{\text{cons}}(p)$ sous la forme :
$$H_{\text{cons}}(p) = k_{\text{cons}} \cdot \frac{\dfrac{p}{\omega_1}}{(1+\tau_1\, p)\,(1+\tau_2\, p)}$$
et donner les valeurs numériques de τ_1 et τ_2 (on prendra $\tau_1 < \tau_2$).
2. Calculer la transformée de Laplace inverse de $i(t)$ de $I(p) = H_{\text{cons}}(p) \times I_{\text{cons}}(p)$ pour une entrée échelon de courant de valeur i_0 et **montrer** ainsi l'expression littérale de la réponse temporelle $i(t)$:
$$i(t) = i_0 \cdot \frac{k_{\text{cons}}}{\omega_1\,(\tau_2-\tau_1)} \cdot \left(\mathrm{e}^{-t/\tau_2} - \mathrm{e}^{-t/\tau_1}\right) \cdot u(t)$$
avec $u(t)$ la fonction de Heaviside.
3. En prenant $\tau_2 \gg \tau_1$, et pour des temps t tels que $\tau_1 < t \ll \tau_2$, **montrer** que l'on peut approximer la réponse temporelle par une fonction du premier ordre, et en **déduire** les expressions littérales de k_H et τ_c. On pourra utiliser l'approximation $e^x \approx 1$ pour $x \to 0$.
4. Comparer les valeurs numériques de k_H et τ_c obtenues par cette méthode avec celles obtenues par les méthodes précédentes.

B.4 Asservissement de vitesse : un système du second ordre

On étudie dans un premier temps la boucle de vitesse **sans estimateur de couple**. La boucle de courant est modélisée par le premier ordre de la **Question B-8**, $H_{\text{cons}}(p) \approx \dfrac{k_H}{1+\tau_c\, p}$. Pour la suite, on retiendra $k_H = 9{,}3 \cdot 10^3$ et $\tau_c = 0{,}028\,\text{s}$, et on prend $k_\Omega = 1$. Le schéma-blocs est donné sur la Figure B.8. Le couple résistant $c_{\text{res}}(t)$ est pris nul dans toute cette partie.

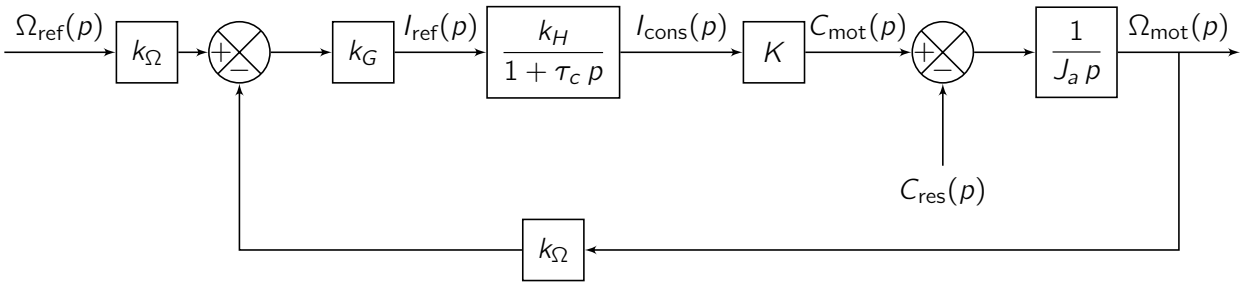


Figure B.8 – Asservissement de vitesse sans estimateur de couple

Question B-12 **Montrer** que la fonction de transfert en boucle ouverte de l'asservissement de la Figure B.8 s'écrit $\frac{K_v}{p\,(1+\tau_c\,p)}$ avec $K_v = \frac{K\,k_H\,k_G\,k_\Omega}{J_a}$. En **déduire** que, pour $C_{res}(p) = 0$, la fonction de transfert $H_\Omega(p) = \frac{\Omega_{mot}(p)}{\Omega_{ref}(p)}$ est un second ordre de forme canonique

$$H_\Omega(p) = \frac{1}{1 + \frac{2\xi_v}{\omega_v}\,p + \frac{p^2}{\omega_v^2}},$$

puis **identifier** ω_v et ξ_v en fonction de K_v et de τ_c.

Le gain k_G est le seul paramètre de réglage de la boucle de vitesse.

Question B-13 **Calculer** K_v, puis ω_v et ξ_v sous la forme d'expressions numériques en fonction de k_G seul. **Donner** ensuite la condition sur k_G pour que la réponse indicielle soit apériodique.

Question B-14 Le cahier des charges impose que le premier dépassement D_1 de la réponse à un échelon de consigne reste inférieur à 5 % (soit 0,05 sur l'abaque). À l'aide de l'abaque du **Document réponse - Question B-14**, **déterminer** la valeur minimale de ξ_v. En **déduire**, avec l'expression de ξ_v de la question précédente, la valeur maximale de k_G.

Question B-15 Pour cette valeur de k_G, **calculer** ω_v, **relever** sur l'abaque du **Document réponse - Question B-15** le temps de réponse réduit $T_{r,5\%} \cdot \omega_v$, puis **en déduire** le temps de réponse à 5 % de la boucle de vitesse.

Question B-16 Si l'on néglige τ_c, c'est-à-dire si l'on confond $H_{cons}(p)$ avec son gain statique k_H, on obtient le premier ordre $H_\Omega(p) = \frac{1}{1 + \frac{p}{K_v}}$. **Calculer** son temps de réponse à 5 % pour la même valeur de k_G et le **comparer** à celui de la question précédente. **Conclure** : peut-on négliger la dynamique de la boucle de courant dans ce cas ?

La consigne est maintenant une rampe $\omega_{ref}(t) = a \cdot t \cdot u(t)$, avec $C_{res}(p) = 0$.

Question B-17 **Donner** la classe de la fonction de transfert en boucle ouverte, puis **déterminer** l'erreur de traînage $\varepsilon_T = \lim_{t\to\infty} (\omega_{ref}(t) - \omega_{mot}(t))$ en fonction de a et K_v (on pourra utiliser le résultat de l'Exercice A).

Question B-18 **Conclure** : peut-on réduire cette erreur en augmentant k_G ? **Préciser** le prix à payer sur le dépassement.

B.5 Asservissement de vitesse avec estimateur de couple

On se place désormais dans le cas d'une boucle de vitesse lente (valeur de k_G faible, $K_v\,\tau_c \ll 1$) : la boucle de courant est alors très rapide devant la dynamique mécanique et on la confond avec son gain statique, $H_{cons}(p) \approx k_H \approx 9{,}3 \cdot 10^3$. Ce choix évite d'augmenter k_G, ce qui dégraderait l'amortissement (partie précédente) : ce sera l'estimateur, et non le gain k_G, qui limitera l'effet du couple résistant $c_{res}(t)$ (frottements, pente de la piste, etc.), qui n'est pas mesuré. Pour en limiter l'effet sur la vitesse, la commande de vitesse est complétée par un **estimateur** qui reconstitue un courant $i_{est}(t)$ image de ce couple. Le schéma-blocs complet est donné dans la Figure B.9, où k_Ω, k_G, k_1 et τ_3 sont des constantes réelles positives.

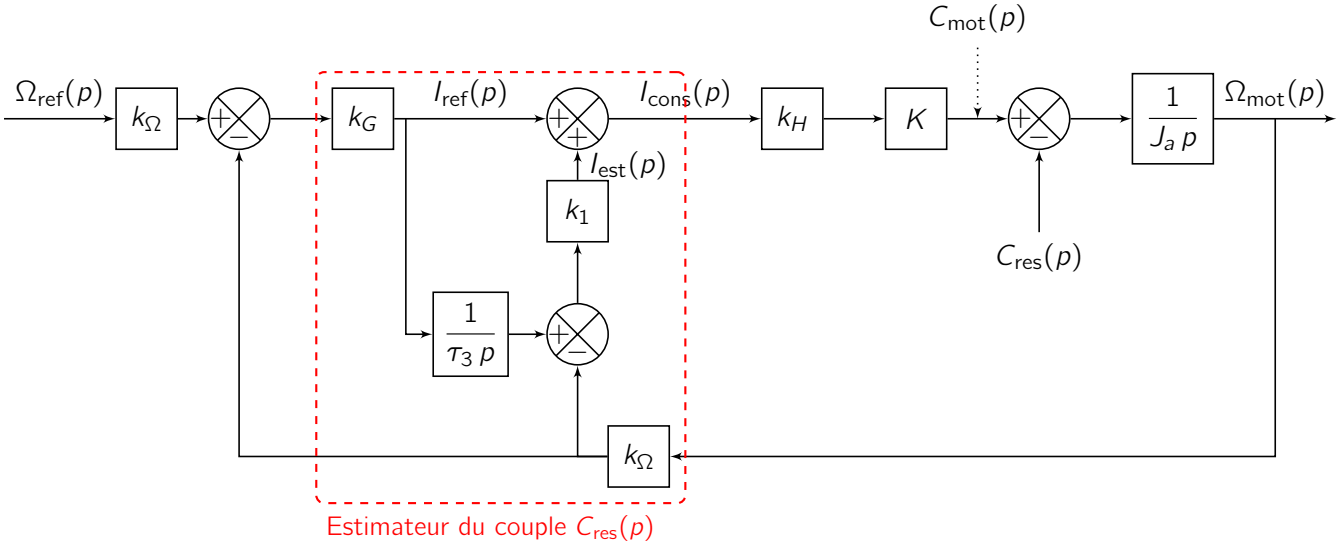


Figure B.9 – Asservissement de vitesse avec estimateur du couple résistant

On rappelle $C_{mot}(p) = K \cdot I(p)$ et $I(p) = k_H \cdot I_{cons}(p)$.

Question B-19 À partir de la Figure B.9, **exprimer** $I_{est}(p)$ en fonction de $I_{ref}(p)$, $\Omega_{mot}(p)$ et des constantes k_Ω, k_1 et τ_3.

Question B-20 **Écrire** l'équation du comparateur qui donne $I_{cons}(p)$ en fonction de $I_{ref}(p)$ et $I_{est}(p)$. En **déduire** une relation entre $I_{cons}(p)$, $I_{ref}(p)$ et $\Omega_{mot}(p)$.

Question B-21 En utilisant l'équation mécanique (remonter la chaîne sur le schéma-bloc), **exprimer** $I_{cons}(p)$ en fonction de $\Omega_{mot}(p)$ et $C_{res}(p)$. En **déduire** la relation

$$I_{est}(p) \cdot \left(1 + \frac{k_1}{\tau_3\,p}\right) = \left(\frac{J_a\,k_1}{K\,k_H\,\tau_3} - k_1\,k_\Omega\right) \cdot \Omega_{mot}(p) + \frac{k_1}{K\,k_H\,\tau_3\,p} \cdot C_{res}(p).$$

Question B-22 **Montrer** que pour $\tau_3 = \dfrac{J_a}{K\,k_H\,k_\Omega}$, la fonction de transfert $\dfrac{I_{est}(p)}{C_{res}(p)}$ est du premier ordre. **Donner** son gain statique et sa constante de temps. **Conclure** : en quoi $i_{est}(t)$ est-il une estimation du couple résistant ?

Lorsque la condition précédente est vérifiée, on admet que la vitesse du moteur s'écrit

$$\Omega_{mot}(p) = \frac{1}{1 + \dfrac{\tau_3}{k_G}\,p} \cdot \left(\Omega_{ref}(p) - \frac{1}{K\,k_H\,k_G\,k_\Omega} \cdot \frac{\dfrac{\tau_3}{k_1}\,p}{1 + \dfrac{\tau_3}{k_1}\,p} \cdot C_{res}(p)\right).$$

La consigne correspond au profil de vitesse du roulage : une rampe de pente a pendant la durée T d'accélération, puis un palier. Celle-ci est représentée sur la Figure B.10.

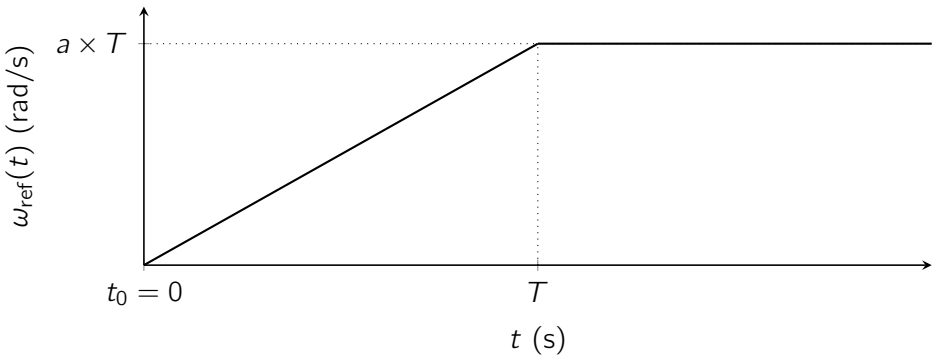


Figure B.10 – Profil de vitesse $\omega_{\text{ref}}(t)$ en fonction du temps lors de son déplacement sur la piste

Question B-23 **Montrer** que la transformée de Laplace de $\omega_{\text{ref}}(t)$ s'écrit

$$\Omega_{\text{ref}}(p) = \frac{a}{p^2}\left(1 - \mathrm{e}^{-Tp}\right).$$

- rampe + rampe inverse = ??
- y'a une histoire de ...

On suppose le couple résistant constant : $c_{\text{res}}(t) = C_0 \cdot u(t)$.

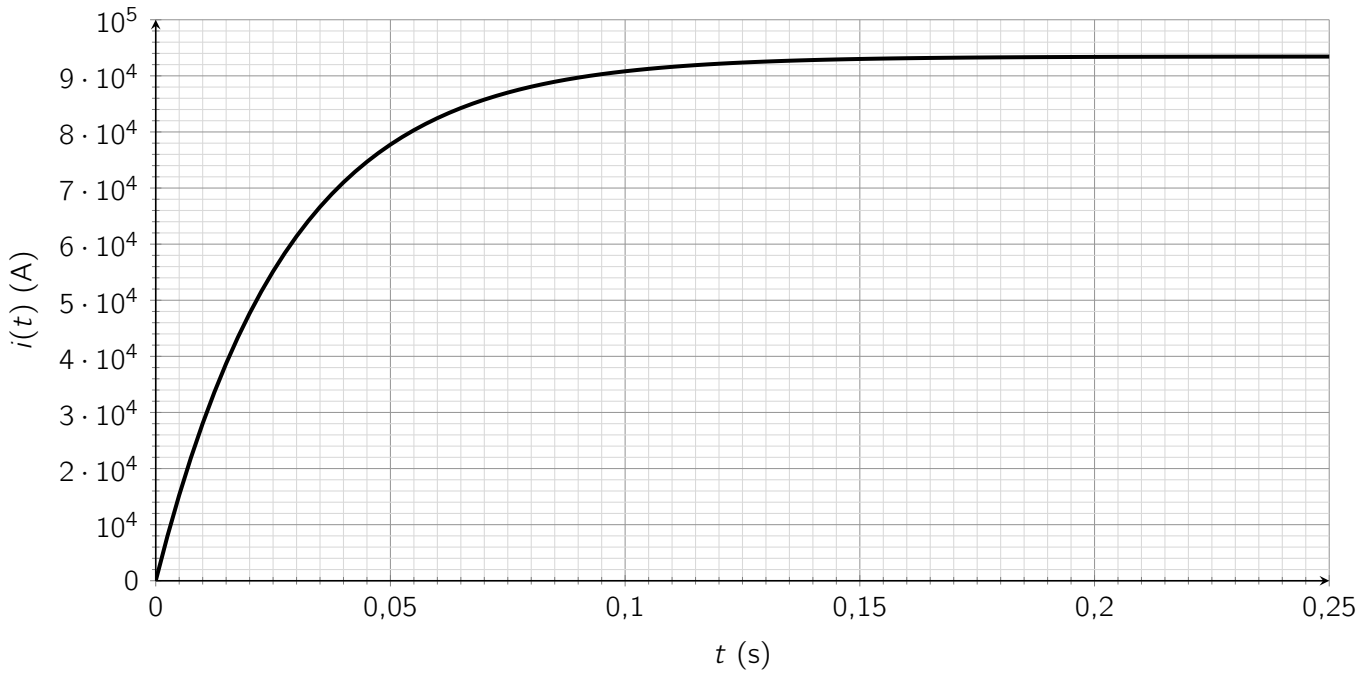
Question B-24 **Déterminer** la vitesse du moteur en régime établi $\lim\limits_{t\to\infty} \omega_{\text{mot}}(t)$:

- sans estimateur ($k_1 \to 0$) ;
- avec estimateur ($k_1 \neq 0$).

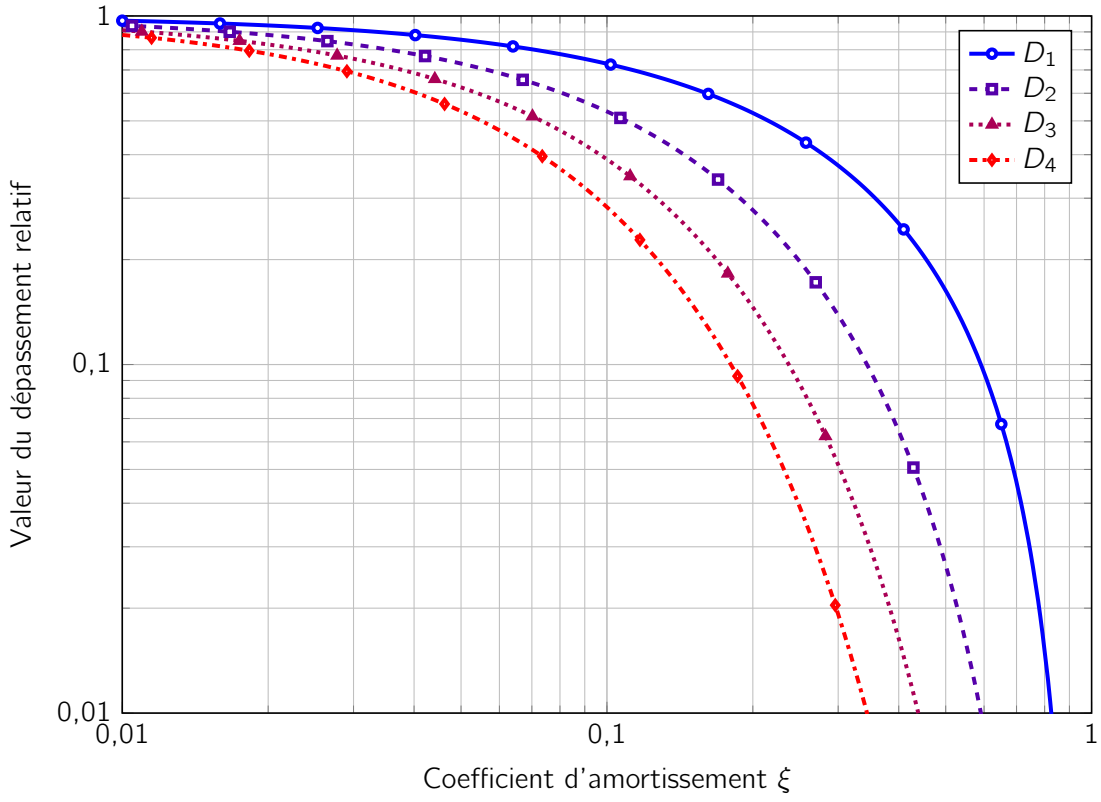
Discuter alors les performances de l'architecture de commande proposée.

C Documents réponses

Document réponse - Question B-8



Document réponse - Question B-14



Document réponse - Question B-15

