Concours Centrale-Supélec, France

Session 2012, filière MP

Option sciences industrielles de l'ingénieur

Durée : 4 heures

Ce que traite le sujet

- Partie I : pertinence de la récupération d'énergie au freinage
- Partie II : solution à freinage mixte électrique et par friction
- Partie III : modèle de connaissance du véhicule et des actionneurs en freinage
- Parties IV et V : limite du filtrage, amortissement actif et conclusion

Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années :
prepahelp.com/annales/centrale/mp/2012/si

Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

CONCOURS CENTRALE•SUPÉLEC

S2I

MP

2012

4 heures

Calculatrices autorisées

Récupération d'énergie au freinage sur véhicules électriques

Pour réduire l'empreinte carbone du secteur transport des particuliers, plusieurs constructeurs automobiles développent des véhicules électriques avec des systèmes de récupération d'énergie au freinage. Le principe de récupération d'énergie est identique chez tous les constructeurs mais la réalisation et les algorithmes diffèrent quelque peu. Le support utilisé comme illustration de ce principe innovant est la Renault « Fluence Zéro Émission » commercialisée courant 2012 en Europe. Afin de respecter la confidentialité du développement de ce véhicule, les données ont été modifiées pour les besoins de ce sujet et les cas d'usage étudiés sont limitatifs.

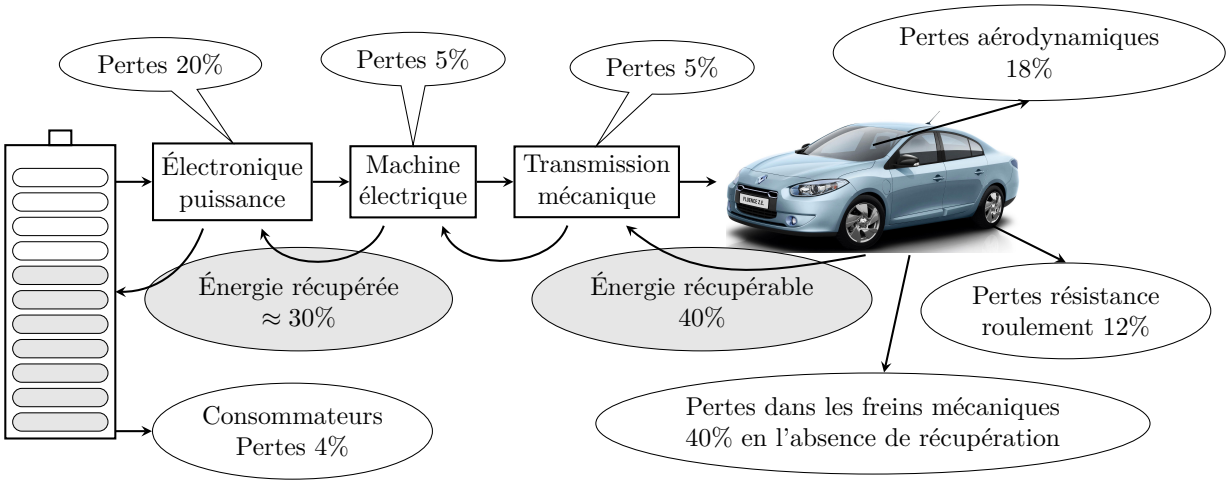


Figure 1 Bilan énergétique d'un véhicule électrique

Les chiffres de la **figure 1** correspondent à un point de fonctionnement moyen pour un cycle de roulage donné et ne doivent pas être généralisés.

I Pertinence de la récupération d'énergie au freinage

Objectif

Valider la pertinence d'un système de récupération d'énergie au freinage et mettre en évidence les limites d'un freinage purement électrique.

I.A – Analyse fonctionnelle externe

Afin de minimiser la consommation électrique des véhicules électriques, une solution consiste à récupérer l'énergie cinétique et/ou potentielle du véhicule lors des phases de freinage. Pour cela, on exploite la réversibilité de la chaîne d'énergie électrique en faisant fonctionner l'actionneur électrique de la chaîne de transmission en mode générateur.

Le système de récupération d'énergie lors des freinages obéit au cahier des charges suivant :

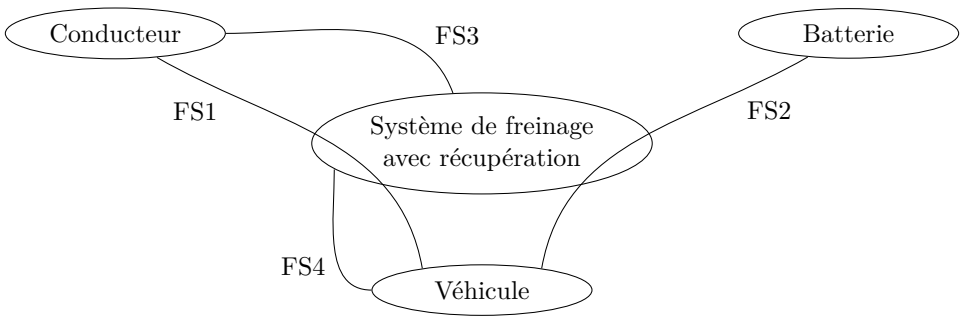


Figure 2 Diagramme des interacteurs

BY-NC-SA

Fonctions	Énoncé	Critères	Niveaux
FS1	Assurer la décélération du véhicule imposée par le conducteur	Freinage nominal en cycle urbain	Route horizontale
		Vitesse initiale	$50\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
		Distance d'arrêt	50 m
FS2	Récupérer une quantité optimale d'énergie dans la batterie	Minimum d'énergie économisée par rapport à un véhicule électrique traditionnel sur une *séquence urbaine type*	25% d'énergie économisée
FS3	Assurer le confort du conducteur et de ses passagers	Décélération en régime permanent à la levée du pied	$2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
		Limitation des à-coups	Premier dépassement en décélération inférieur à 50% de la valeur en régime permanent, lors d'un freinage nominal
		Limitation des vibrations	Moins de 5 oscillations en décélération en dehors de la bande ±5% autour de la courbe gabarit
FS4	Arrêter le véhicule en toute sécurité	Mode freinage mécanique privilégié lors d'un freinage d'urgence	Pour une vitesse initiale de $50\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, la distance d'arrêt maximale doit être de 15 m

On appelle *séquence urbaine type*, un trajet entre deux feux tricolores, en ligne droite, sur une route horizontale et composé :

- ⋆ d'une phase d'accélération de 0 à $50\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ (durée $t_1 - t_0 = t_a$),
- ⋆ d'un parcours de 500 m à une vitesse constante de $V_0 = 50\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ (durée $t_2 - t_1$),
- ⋆ puis d'une phase de décélération (durée $t_3 - t_2 = t_f$) avec arrêt au feu à l'instant t_3 en respectant la situation de freinage nominal évoquée précédemment.

La décélération commandée par la levée du pied de la pédale d'accélérateur correspond au « frein moteur » d'un véhicule thermique. Pour des raisons de confort et d'habitude de conduite, elle est choisie proche de $2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Cette valeur est légèrement supérieure à celle obtenue par le frein moteur d'un véhicule thermique. De plus, cette décélération a l'avantage d'être très reproductible, contrairement à celle d'un véhicule thermique qui est fonction notamment de la vitesse engagée. Sur un véhicule électrique, le compte-tours est remplacé par un compteur dédié aux informations relatives à l'autonomie, en particulier le niveau de charge de la batterie.



Figure 3

Q 1. Indiquer trois raisons incitant les usagers des véhicules électriques à décélérer sans utiliser la pédale de frein, par rapport aux habitudes de conduite d'un véhicule thermique.

I.B – Étude de la séquence urbaine type

On adopte un modèle ramené dans le plan $(\vec{x}, \vec{y})$, dans la mesure où l'on considèrera que le véhicule se déplace en ligne droite horizontale.



Figure 4 Paramétrage

On note :

- ⋆ $\vec{V}_{\text{véhicule/sol}} = -V_h(t)\vec{x}$ la vitesse du véhicule par rapport au sol et
- ⋆ $\vec{\gamma}_{\text{véhicule/sol}} = -\gamma(t)\vec{x}$ l'accélération du véhicule par rapport au sol.

Q 2. Dans le cas d'un freinage nominal, $\gamma(t) = \gamma_n = -2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, déterminer la distance parcourue en partant d'une vitesse initiale $V_0 = 50\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$. Conclure au regard des critères du cahier des charges.

Pour simplifier, on considère que la phase d'accélération de 0 à $50\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ se fait avec l'accélération $\gamma(t) = -\gamma_n = 2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.

BY-NC-SA

Q 3. Tracer l'évolution temporelle de la vitesse $V_h(t)$ du véhicule par rapport au sol en fonction du temps sur la séquence urbaine type et définir son expression en fonction de γ_n, V_0 et t_2 sur chaque intervalle de temps $[t_0, t_1]$, $[t_1, t_2]$ et $[t_2, t_3]$. Donner les valeurs numériques des durées $t_1 - t_0 = t_a$, $t_2 - t_1$ et $t_3 - t_2 = t_f$.

I.C – Pertinence de la récupération d'énergie au freinage

I.C.1) Paramétrage des sources dissipatrices d'énergie

Pour valider la pertinence d'un système de récupération d'énergie au freinage, on se propose d'évaluer la quantité d'énergie fournie par la batterie puis restituée à la batterie au cours d'une séquence urbaine type.

Le véhicule étudié a une masse $M = 1600$ kg. La chaîne d'énergie est constituée d'une électronique de puissance, d'une machine électrique et d'une transmission mécanique.

La puissance perdue par la chaîne d'énergie utilisée en mode traction du véhicule s'exprime sous la forme $P_{\text{perdue directe}} = -(1-\eta)P_{\text{élec}}$ où $P_{\text{élec}}$ ($P_{\text{élec}} > 0$) est la puissance électrique fournie par la batterie et η le facteur de perte avec $\eta = 0{,}7$.

Pour cette même chaîne d'énergie utilisée en mode récupération de l'énergie au freinage (tout électrique), la puissance perdue s'exprime sous la forme $P_{\text{perdue inverse}} = (1/\eta - 1)P_{\text{élec}}$ où $P_{\text{élec}}$ ($P_{\text{élec}} < 0$) est la puissance électrique récupérée par la batterie.

On suppose par ailleurs qu'un effort résistant de type visqueux, correspondant d'une part aux frottements aérodynamiques, et d'autre part à la résistance au roulement, s'oppose à l'avancement du véhicule et que sa norme s'exprime sous la forme $fV_h(t)$, avec $f = 16\ \text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$.

I.C.2) Énergie fournie par la batterie pendant la phase d'accélération

Q 4. En précisant clairement le théorème utilisé et les hypothèses considérées, déterminer l'expression de la puissance fournie par la batterie, $P_{\text{élec}}(t)$, pour accélérer le véhicule de 0 à $V_0 = 50\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ en fonction de M, f, η, $V_h(t)$ et γ_n.

Q 5. En déduire l'expression de l'énergie fournie par la batterie pendant cette phase d'accélération en fonction de M, f, η, V_0 et γ_n. Faire l'application numérique.

I.C.3) Énergie fournie par la batterie pendant la phase à vitesse constante

Q 6. En utilisant la même démarche, déterminer l'énergie fournie par la batterie pendant la phase à vitesse constante $V_0 = 50\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$.

I.C.4) Énergie récupérable par la batterie pendant la phase de freinage

Pour le modèle avec effort résistant de type visqueux, l'énergie récupérée dans la batterie si on exploite la réversibilité de la chaîne de transmission lors d'un freinage nominal, est égale à $E_{50-0\text{élec}} = -103$ kJ.

Pour un modèle sans effort résistant de type visqueux, l'énergie récupérée dans la batterie, si on exploite la réversibilité de la chaîne de transmission lors d'un freinage nominal, est égale à $E'_{50-0\text{élec}} = -108$ kJ.

Q 7. Comparer ces deux résultats et conclure.

I.C.5) Conclusion

Q 8. En déduire alors la pertinence du système de récupération d'énergie électrique.

I.D – Limites du freinage électrique

On note :

- $\vec{C_F} = -C_F(t)\vec{z}$, le couple de freinage uniquement exercé sur la paire de roues avant du véhicule. La chaîne d'énergie du véhicule étudié entraine uniquement l'essieu avant. En phase de freinage $C_F(t) > 0$.
- R_r, le rayon des quatre roues, $R_r = 0{,}3$ m.

Hypothèses :

- on négligera l'inertie des roues pour cette pré-étude ;
- on suppose que les roues ne glissent pas par rapport au sol ;
- l'effort résistant de type visqueux sera désormais négligé pendant la phase de freinage.

Q 9. En précisant bien le(s) théorème(s) utilisé(s) et les hypothèses considérées, déterminer le couple de freinage $C_F(t)$ lors d'un freinage nominal. Faire l'application numérique.

Dans une situation de freinage nominal, le couple de freinage électrique demandé à la machine électrique est assimilé à un échelon afin de représenter la soudaineté des situations classiques de freinage.

Dans la phase de conception du système de récupération d'énergie au freinage, les ingénieurs réalisent des essais sur un véhicule électrique, exploitant la réversibilité de la chaîne d'énergie de traction électrique. Au cours de ces essais, il est possible d'acquérir la mesure de l'accélération du véhicule lorsqu'on impose une variation en échelon du couple de freinage au niveau du moteur électrique. La courbe d'essai **figure 5** a été obtenue lors d'une décélération d'environ $-2\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

BY-NC-SA

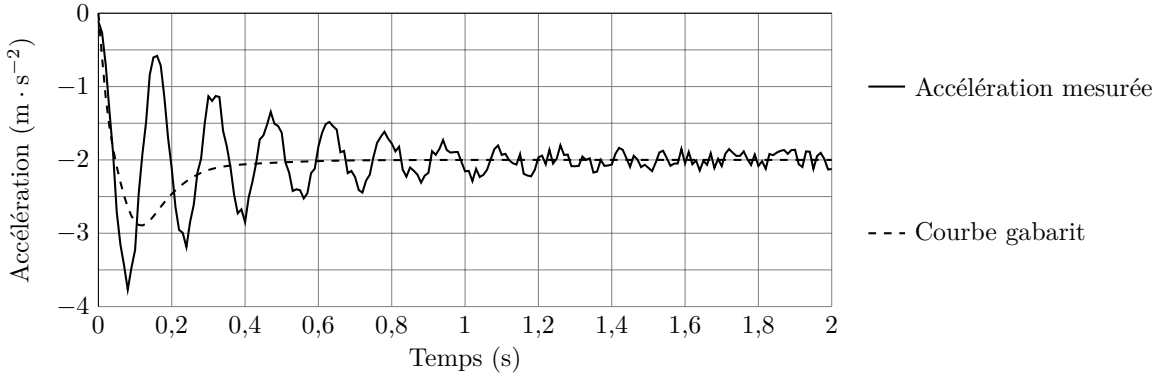


Figure 5 Mesure de la décélération longitudinale d'un véhicule freiné (tout électrique)

Q 10. À partir de la courbe de la **figure 5**, analyser les performances du système de freinage électrique, sans commande adaptée, et les comparer à celles du cahier des charges.

Pour le véhicule étudié et pour la phase de freinage nominale, la composante verticale de la résultante de l'action du sol sur l'ensemble des deux roues avant s'exprime sous la forme $F_{AV} = M(-0{,}26\gamma_n + 0{,}48g)$, avec g la constante gravitationnelle. Le facteur d'adhérence au contact des pneumatiques avec le sol est d'environ 0,9.

Q 11. Vérifier que le véhicule peut s'arrêter sans glisser lors d'un freinage nominal.

On peut montrer que le cahier des charges impose une décélération du véhicule $\gamma(t) = \gamma_u = -6{,}43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ en freinage d'urgence.

Q 12. Vérifier que le véhicule ne peut pas s'arrêter sans glisser lors d'un freinage d'urgence.

Conclusion : le système de freinage électrique doit être complété par une commande adaptée et par des freins à disque sur les quatre roues afin de satisfaire les exigences du cahier des charges.

Remarque : il n'est pas possible de se dispenser des freins à disque pour deux autres raisons : la première est que la batterie peut être pleine ; la deuxième est qu'à bas régime la capacité de freinage de la machine électrique est insuffisante.

II Validation d'une solution utilisant un freinage mixte électrique et friction

Objectif

Analyser la structure de la chaîne d'énergie de freinage mixte électrique et friction et discuter de sa pertinence.

II.A – Structure de la chaîne d'énergie envisagée

Objectif

Analyser la structure du dispositif de récupération d'énergie lors d'un freinage.

Afin de satisfaire aux exigences du CdCF, le véhicule comporte une chaîne de conversion d'énergie réversible et un système classique de freinage par friction, actionné électriquement. Ce dernier équipe chacune des quatre roues du véhicule et sera simplement désigné dans la suite par le terme « système de freinage par friction ».

Lors de la phase de traction électrique, la chaîne d'énergie électrique se met sous la forme donnée **figure 8**.

Q 13. Compléter sur le document réponse, la structure de la chaîne d'énergie lors du freinage du véhicule électrique muni d'un système de récupération d'énergie associé à des freins dissipatifs à disque. Pour simplifier, considérer que le véhicule se déplace sur une route horizontale.

Conclusion : la structure de la chaîne d'énergie mettant en œuvre les deux actionneurs (machine électrique et freins à disque) étant connue, il est maintenant nécessaire de déterminer la loi de commande permettant de satisfaire les exigences du CdCF.

BY-NC-SA

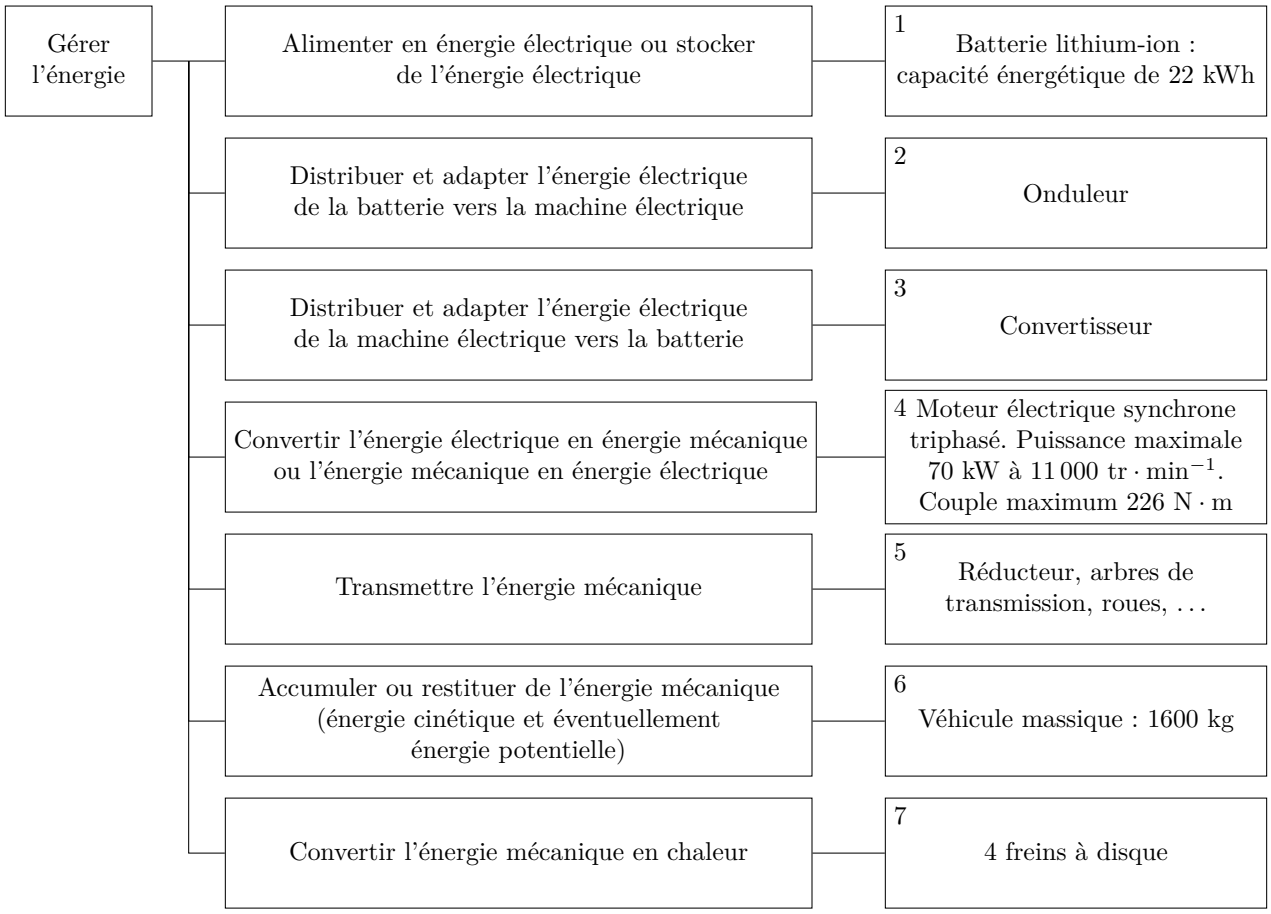


Figure 6 Diagramme FAST de la fonction « gérer l'énergie »

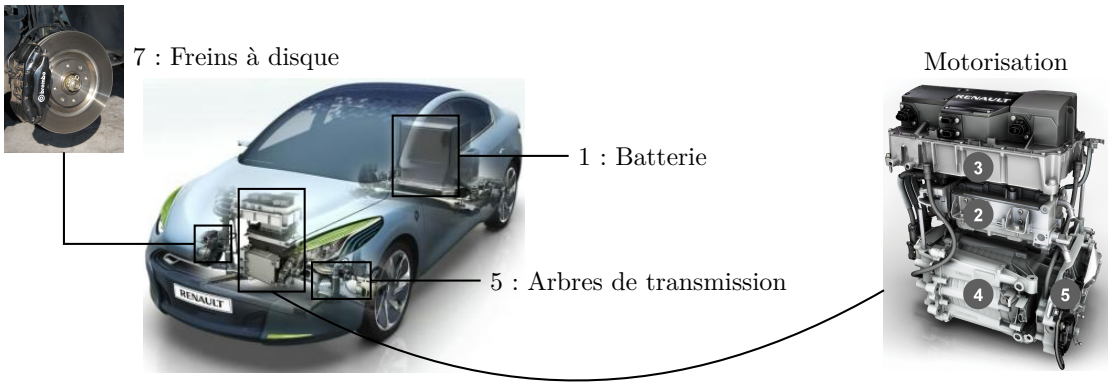


Figure 7 Chaîne de conversion énergétique de la Renault Fluence Z.E.

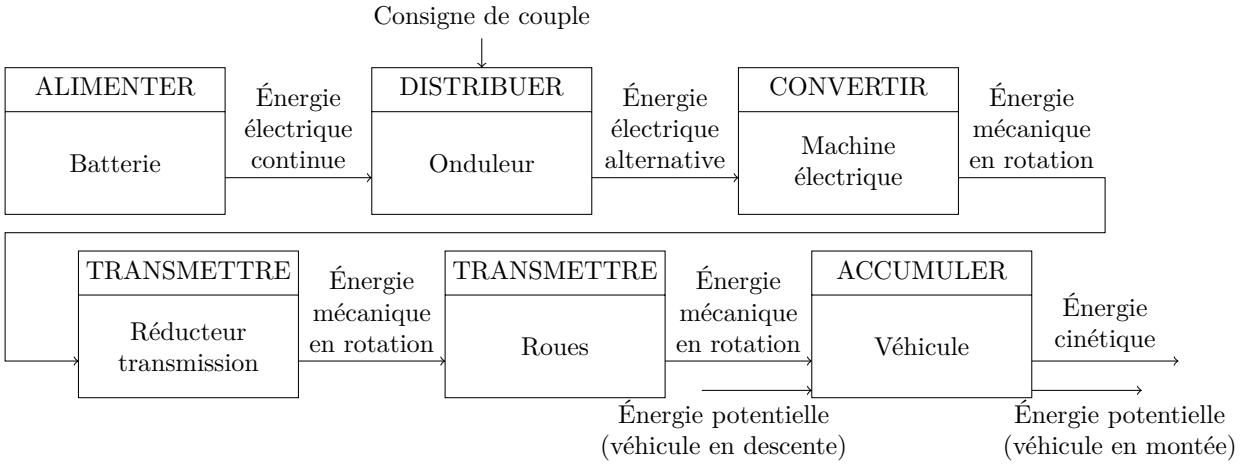


Figure 8 Chaîne d'énergie d'un véhicule électrique en phase de traction

BY-NC-SA

II.B – Loi de mise en œuvre des deux actionneurs

En vue de respecter les performances liées au confort du conducteur et de ses passagers, il est nécessaire de mettre en place une structure de commande qui assure la réalisation de la totalité de l'effort de freinage souhaité par le conducteur tout en optimisant l'énergie récupérée, voir **figure 9**.

Objectif

Comprendre l'influence du filtrage sur la récupération d'énergie.

On note :

- ⋆ C_{fc} la consigne de couple de freinage total ;
- ⋆ C_{ec} la consigne de couple imposée au système de freinage électrique ;
- ⋆ C_{fric} la consigne de couple imposée au système de freinage par friction.

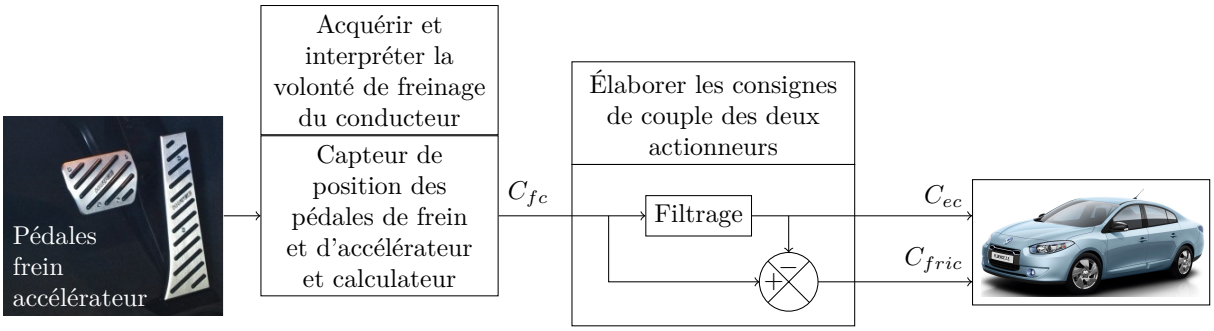


Figure 9 Structure de commande à deux actionneurs

Le filtrage proposé est un filtre du premier ordre, dont la fonction de transfert dans le domaine de Laplace s'écrit : $H_{\text{filtrage}}(p) = \dfrac{1}{1+\tau_1 p}$ avec τ_1 en seconde.

La décélération nominale conduit à une expression du couple de freinage au niveau des roues, à répartir entre les deux actionneurs, sous la forme : $C_{fc}(p) = C_F/p$, C_F constante en $\text{N}\cdot\text{m}$.

Q 14. Déterminer les expressions, dans le domaine de Laplace, des consignes de couples théoriques $C_{ec}(p)$ et $C_{fric}(p)$ en fonction de C_F, puis donner l'expression temporelle de C_{ec}.

Notations :

- ⋆ $\vec{C_e} = -C_e\vec{z}$ le couple exercé par le système de freinage électrique sur la paire de roues avant du véhicule. En phase de freinage $C_e > 0$;
- ⋆ $\eta = 0{,}7$ le facteur de perte de la chaîne d'énergie de freinage électrique ;
- ⋆ $\vec{\Omega}_{\text{roue/véhicule}} = \omega_r(t)\vec{z}$, avec $\omega_r(t) > 0$ en freinage et défini par la loi temporelle suivante lors du freinage nominal :
  - – à $t = 0$ s : $\omega_r = \omega_{r0}$ avec $\omega_{r0} = 45{,}5\ \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$;
  - – pendant la phase de freinage de durée $t_f = 7$ s : $\omega_r(t) = \omega_{r0} - \varpi t$ avec $\varpi = 6{,}5\ \text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$.

Hypothèses :

- ⋆ les quatre roues tournent à la même vitesse à chaque instant ;
- ⋆ le système de freinage électrique impose parfaitement le couple de consigne C_{ec} sur la paire de roues avant du véhicule, c'est-à-dire $C_e(t) = C_{ec}(t)$.

Q 15. En déduire l'expression de l'énergie électrique récupérée dans la batterie, lors d'un freinage nominal, en fonction de τ_1, C_F, ϖ et t_f.

L'évolution de l'énergie récupérée dans la batterie en fonction de la constante de temps du filtrage τ_1 est donnée **figure 10**.

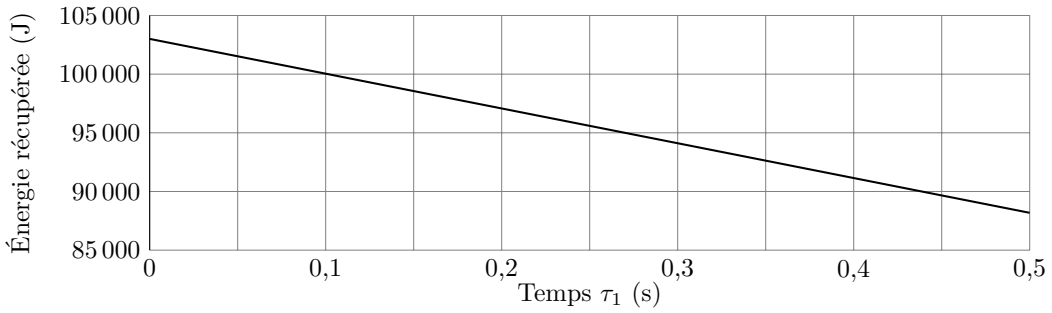


Figure 10 Évolution de l'énergie récupérée en fonction de τ_1

BY-NC-SA

Q 16. En utilisant la courbe de la **figure 10**, déterminer la valeur maximale de τ_1 permettant de satisfaire le cahier des charges en terme de récupération d'énergie au freinage, dans la mesure où l'énergie consommée sans récupération est de 389 kJ.

Conclusion : il est maintenant nécessaire de vérifier la pertinence de cette structure de commande sur la limitation des à-coups et des vibrations pour valider les critères du cahier des charges.

III Détermination d'un modèle de connaissance du véhicule et des actionneurs en phase de freinage

Objectif

Déterminer et valider un modèle de connaissance du véhicule et des actionneurs afin de l'utiliser pour prévoir le comportement du système de freinage muni des deux actionneurs.

III.A – Paramétrages

III.A.1) Schéma de la transmission

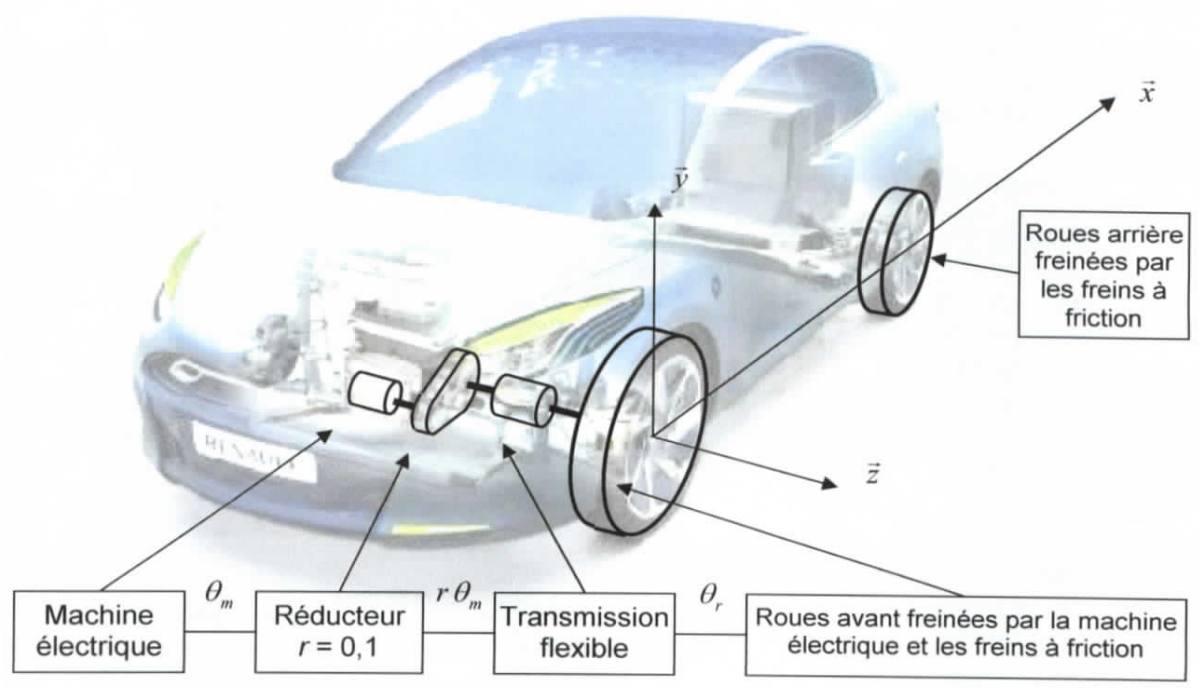


Figure 11 Modélisation de la transmission à deux types d'actionneurs

III.A.2) Paramétrage cinématique

Grandeur	Notation	Valeur
Angle de rotation du rotor de la machine électrique par rapport au stator	$\theta_m(t)\vec{z}$ avec $\theta_m(t) > 0$	En général $\theta_r(t) \neq r\theta_m(t)$ compte tenu de la flexibilité de la transmission
Angle de rotation des roues par rapport au châssis du véhicule	$\theta_r(t)\vec{z}$ avec $\theta_r(t) > 0$	
Décélération du véhicule	$-\gamma(t)\vec{x}$ avec $\gamma(t) > 0$	
Rapport de réduction du réducteur	r	0,1
Rayon des roues	R_r	0,3 m
Vitesse du véhicule par rapport au sol	$-V_h(t)\vec{x}$ avec $V_h(t) > 0$	

III.A.3) Paramétrage des masses et inerties

Grandeur	Notation	Valeur
Masse totale du véhicule (incluant l'ensemble de la transmission)	M	1600 kg
Inertie du rotor de la machine électrique autour de son axe de rotation	J_m	0,034 kg · m^2
Inertie de deux roues d'un même essieu autour de leur axe de rotation	J_r	1,5 kg · m^2
Masses et inerties de la transmission flexible et du réducteur	négligées	

BY-NC-SA

III.A.4) Paramétrage des actions mécaniques

Grandeur	Notation	Valeur
Couple imposé par le stator de la machine électrique sur le rotor (rechargeant la batterie)	$-C_{me}\vec{z}$ avec $C_{me} > 0$	
Couple de freinage de friction imposé par les freins à disque sur l'ensemble des deux roues avant	$-C_{fri}\vec{z}$ avec $C_{fri} > 0$	
Couple de freinage de friction imposé par les freins à disque sur l'ensemble des deux roues arrière	$-\alpha C_{fri}\vec{z}$ avec $\alpha > 0$, rapport du répartiteur de freinage	α est constant pour une décélération constante

La transmission ayant un comportement élastique, elle sera modélisée par un dispositif ressort-amortisseur. Elle est donc caractérisée par :
- ⋆ un coefficient de raideur en torsion k ramené sur l'arbre des roues ;
- ⋆ un coefficient d'amortissement en torsion β ramené sur l'arbre des roues.

Le couple imposé par la transmission flexible sur le réducteur vaut alors :

$$\vec{C}_{\text{Transmission flexible}\to\text{Réducteur}} = C_{TF\to R}\vec{z} \quad \text{avec} \quad C_{TF\to R} = k(\theta_r - r\theta_m) + \beta(\dot{\theta}_r - r\dot{\theta}_m)$$

On rappelle par ailleurs que dans la phase de freinage considérée :
- ⋆ le véhicule se déplace en ligne droite sur une route horizontale ;
- ⋆ les actions aérodynamiques de type visqueux exercées par l'air sont négligées.

III.B – Modèle de connaissance en phase de freinage

Objectif

Déterminer un modèle de connaissance du véhicule et de la transmission.

Q 17. En expliquant la démarche, c'est-à-dire le ou les ensembles isolés, le bilan des actions mécaniques et en énonçant clairement le ou les théorèmes utilisés, montrer que l'on peut obtenir l'équation :

$$J_m\ddot{\theta}_m = -C_{me} + r\left(k(\theta_r - r\theta_m) + \beta(\dot{\theta}_r - r\dot{\theta}_m)\right) \qquad \textbf{(III.1)}$$

On note Σ l'ensemble du véhicule et des éléments en rotation.

Q 18. Déterminer l'énergie cinétique galiléenne de l'ensemble Σ et en déduire l'inertie équivalente J_{eq} telle que :

$$T(\Sigma/R_g) = \frac{1}{2}J_{eq}\omega_r^2 + \frac{1}{2}J_m\omega_m^2$$

Q 19. Faire le bilan (aucun calcul n'est demandé dans cette question) des puissances des efforts extérieurs à l'ensemble Σ par rapport au référentiel galiléen et des puissances des inter-efforts.

Q 20. Déterminer alors l'expression littérale de la puissance totale des actions mécaniques sur l'ensemble Σ. On s'aidera du schéma de la **figure 11**.

Q 21. En appliquant le théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble Σ, en déduire une deuxième équation (notée **III**.2) en fonction de θ_m et ses dérivées, θ_r et ses dérivées, k, r, β, α, J_{eq}, J_m, C_{fri} et C_{me}.

III.C – Traduction du modèle de connaissance sous la forme d'un schéma bloc

Le modèle de connaissance précédent a permis d'obtenir les équations **III**.1 et **III**.3, combinaison des équations **III**.1 et **III**.2, dans lesquelles les paramètres β et k restent inconnus :

$$J_m\ddot{\theta}_m = -C_{me} + r\left(k(\theta_r - r\theta_m) + \beta(\dot{\theta}_r - r\dot{\theta}_m)\right) \qquad \textbf{(III.1)}$$

$$J_{eq}\ddot{\theta}_r = -(1+\alpha)C_{fri} - \left(k(\theta_r - r\theta_m) + \beta(\dot{\theta}_r - r\dot{\theta}_m)\right) \text{ avec } J_{eq} = 147 \text{ kg}\cdot\text{m}^2 \qquad \textbf{(III.3)}$$

Q 22. Compléter alors le schéma bloc de la transmission et du véhicule sur le document réponse.

Conclusion : à ce stade, les coefficients k et β de la transmission restent inconnus et doivent être identifiés grâce à des essais.

BY-NC-SA

III.D – Identification d'un modèle de comportement

Objectif

Identifier les paramètres d'un modèle de comportement proche du modèle de connaissance.

Afin d'identifier les coefficients de raideur et d'amortissement en torsion de la transmission, on utilise la réponse expérimentale du système à un échelon de couple de freinage au niveau de la machine électrique, présentée dans la première partie.

Q 23. Dans le cas où $C_{fri} = 0$, déterminer la fonction de transfert $H_{FE}(p) = \gamma(p)/C_{me}(p)$, puis exprimer cette fonction numériquement, uniquement en fonction de β et k, sous forme canonique.

La réponse expérimentale en accélération à un échelon d'amplitude inconnue en couple est rappelée **figure 12**, avec un zoom sur le régime transitoire.

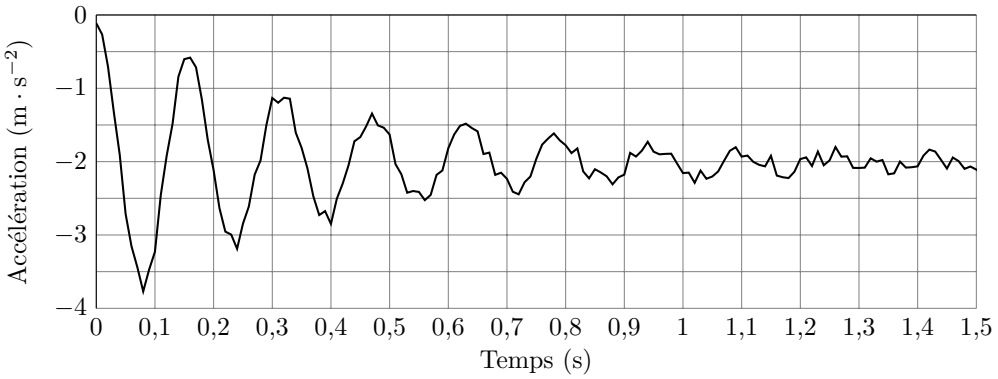


Figure 12 Zoom de la mesure de la décélération longitudinale du véhicule

Q 24. Dans un premier temps, en assimilant ce système à un système du second ordre du type

$$H_{FE\ \text{simplifiée}}(p) = \frac{K_{FE}}{1 + \frac{2\xi_{FE}}{\omega_{0FE}}p + \frac{p^2}{\omega_{0FE}^2}}$$

et en se servant de l'abaque du document réponse, proposer des valeurs identifiées de ω_{0FE} et de ξ_{FE} puis en déduire les valeurs de k et de β.

III.E – Validation du modèle de connaissance

Objectif

Valider les coefficients identifiés par un retour sur le modèle de connaissance.

On affine le modèle avec la forme complète de $H_{FE}(p)$ trouvée à la **question 23** et on prend en compte la dynamique de la machine électrique, qui peut être modélisée sous la forme d'un premier ordre de constante de temps $\tau_{me} = 20$ ms. Après quelques itérations, on optimise les valeurs de k et de β puis on procède à une simulation.

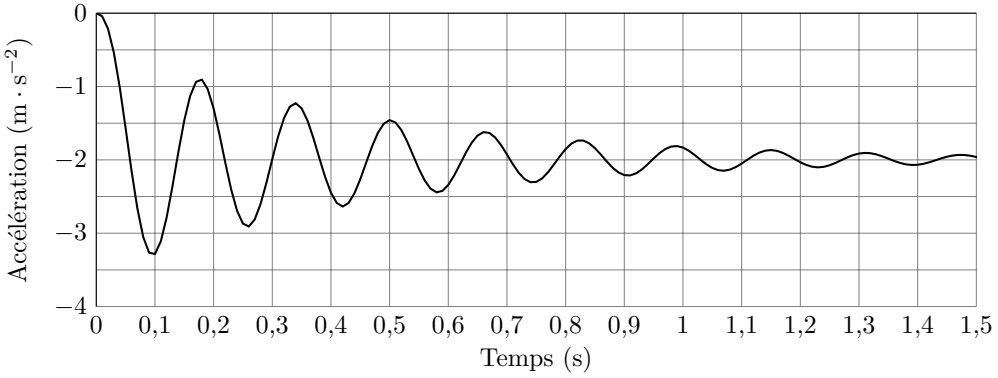


Figure 13 Simulation de la décélération longitudinale du véhicule pour un modèle sans les freins à disque

Q 25. Valider le modèle de connaissance identifié à partir des figures **12** et **13**.

Conclusion : on dispose maintenant d'un modèle de connaissance du comportement dynamique du véhicule en phase de freinage. Ce modèle permet de procéder à une simulation pour déterminer une commande du système de freinage.

BY-NC-SA

IV Limite du filtrage et mise en place d'une correction par amortissement actif

IV.A – Limite du filtrage

Objectif

Mettre en évidence les limites de l'action de filtrage.

On procède à une simulation, à l'aide du modèle dynamique et de la structure de commande rappelée **figure 14**. La dynamique du système de freinage à friction est prise en compte sous la forme d'un premier ordre de constante de temps $\tau_{fri} = 40$ ms. On note C_{mec} la consigne de couple imposée à la machine électrique.

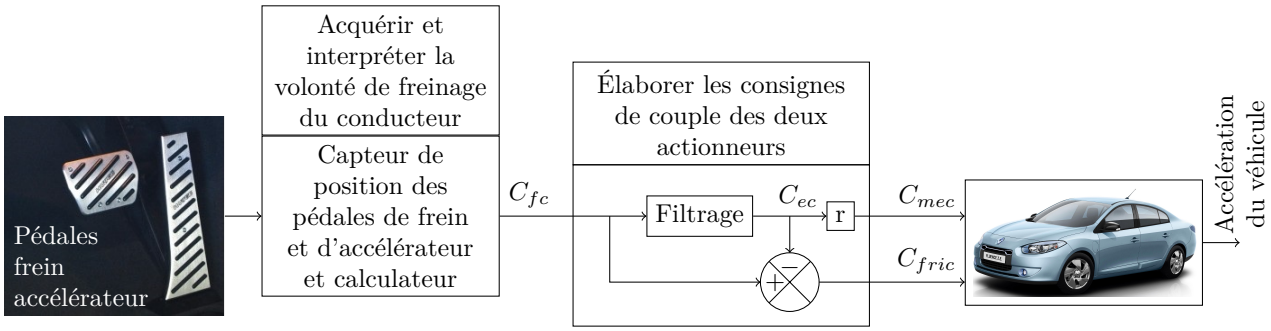


Figure 14 Structure de commande des deux actionneurs

En freinage nominal et pour les constantes de temps de filtrage $\tau_1 = 0{,}1$ s, 0,2 s et 0,3 s, la **figure 15** décrit :

- ⋆ les décélérations simulées ;
- ⋆ les écarts entre la décélération simulée et la courbe gabarit.

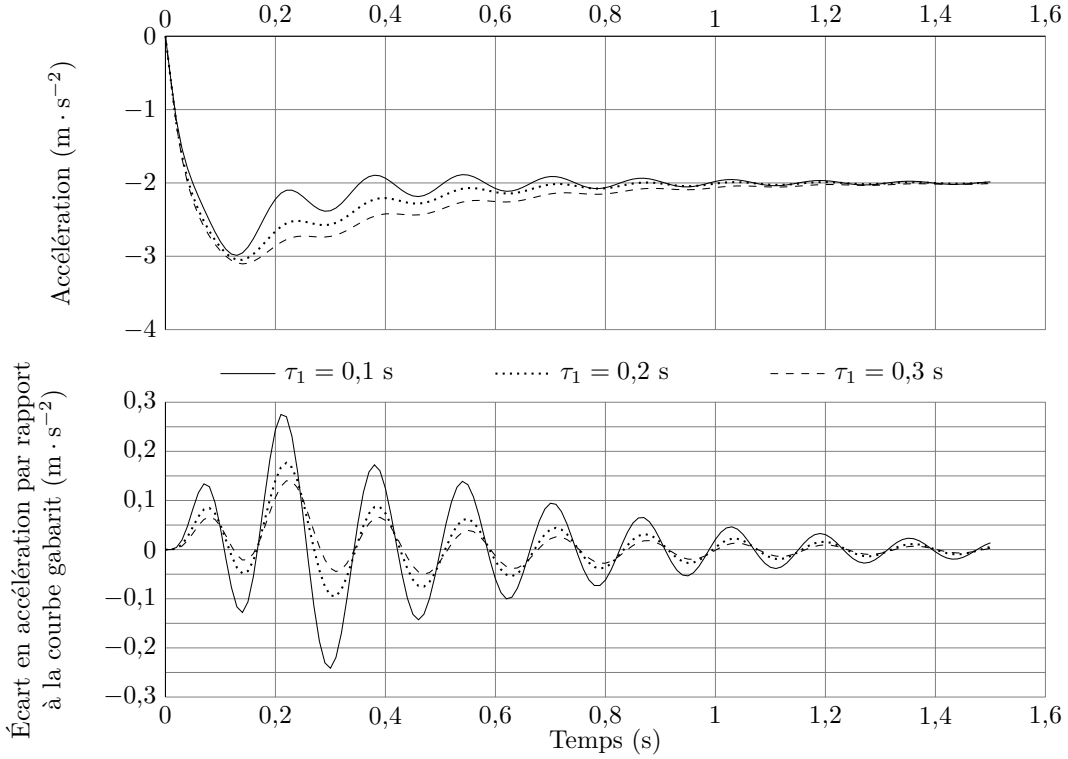


Figure 15 Simulations de l'accélération en fonction de la constante τ_1

Q 26. Quelle est la condition sur τ_1 permettant de respecter le cahier des charges en terme de vibrations ? En se référant à la réponse de la **question 16**, que peut-on dire de l'effet de τ_1 sur les performances des fonctions de service FS2 et FS3 ?

On choisit définitivement pour la suite une constante de temps pour le filtrage $\tau_1 = 0{,}1$ s.

BY-NC-SA

IV.B – Implantation d'un asservissement de la vitesse angulaire de la machine électrique

Afin de limiter les vibrations et de respecter les performances associées à la fonction de service FS3, la commande proposée précédemment est enrichie. Dans cette commande évoluée, les actionneurs sont commandés par une régulation de la vitesse angulaire de la machine électrique, comme le montre la structure de la **figure 16**.

IV.B.1) Cahier des charges de l'asservissement

Les performances associées à la fonction de service FS3 sont désormais traduites en terme de spécifications dédiées à l'asservissement :

FS3	Assurer le confort du conducteur et de ses passagers	Limitation des à-coups	Premier dépassement en décélération inférieur à 50% de la valeur en régime permanent, lors d'un freinage nominal	
		Limitation des vibrations	Amortissement des différents modes de vibrations en Boucle Fermée	$\xi \geqslant 0{,}3$
			Marge de gain en Boucle Ouverte	$M_G \geqslant 20$ dB

IV.B.2) Insuffisance de l'amortissement sans asservissement

Objectif

Confirmer l'insuffisance de l'amortissement en l'absence de régulation en vitesse du moteur électrique à l'aide des spécifications d'asservissement.

En l'absence d'asservissement en vitesse, il est possible de calculer les pôles de la fonction de transfert : $FTBF_{\text{sans correction}} = \gamma(p)/C_{fc}(p)$. Les résultats de ce calcul sont :

$$p_1 = p_2 = -1000 \qquad p_3 = -50 \qquad p_4 = -25 \qquad p_5 = -10 \qquad p_{61} = -1{,}96 + j40 \qquad p_{62} = -1{,}96 - j40$$

On rappelle que pour les pôles complexes conjugués, il est possible de calculer le facteur d'amortissement ξ_i et la pulsation ω_{0i} associée, en utilisant la propriété : $p_i = -\xi_i\omega_{0i} \pm j\sqrt{1-\xi_i^2}\,\omega_{0i}$, p_i pôles complexes conjugués.

Q 27. Justifier que le système non asservi est stable et calculer le facteur d'amortissement ξ_6 associé aux pôles complexes conjugués p_{61} et p_{62}. Conclure quant au respect du cahier des charges.

IV.B.3) Élaboration de la commande asservie en vitesse

Objectif

L'insuffisance de l'amortissement en l'absence de régulation étant confirmé, on se propose de rechercher une correction appropriée.

Afin d'amortir correctement les modes oscillants, et en optimisant la récupération d'énergie, on décide de ne compenser que les variations de couple de décélération. La structure de cette commande est donnée **figure 16**.

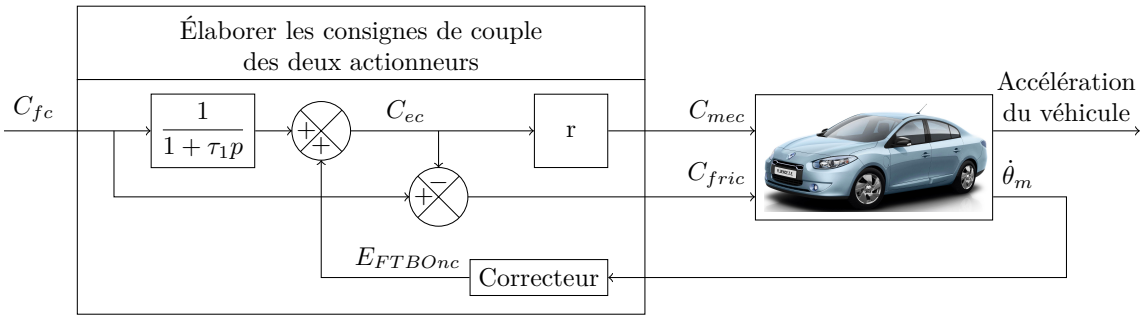


Figure 16 Structure de la commande asservie

Dans la mesure où le système comporte deux entrées et deux sorties, on admettra que la Fonction de Transfert en Boucle Ouverte Non Corrigée vis-à-vis de la vitesse de rotation du moteur s'écrit : $FTBO_{nc}(p) = -\dfrac{p\theta_m(p)}{E_{FTBO_{nc}}}$.

Après calcul, simplifications et factorisations, l'expression numérique de cette Fonction de Transfert est :

$$FTBO_{nc}(p) = -\frac{0{,}46}{p(1+0{,}02p)}\,\frac{(1-0{,}22p)(1+0{,}18p)}{(0{,}00068p^2+0{,}0028p+1)}$$

Les diagrammes de Bode (b1) de cette fonction de transfert en Boucle Ouverte sont tracés sur le document réponse.

BY-NC-SA

Un correcteur du type « double dérivée filtrée » est alors envisagé. Sa fonction de transfert s'écrit $C(p) = K\dfrac{p^2}{(1+\tau_2 p)^2}$.
On choisit $\tau_2 = 0{,}1$ s.

Q 28. Tracer, sur le document réponse, les diagrammes de Bode (b2) asymptotiques du correcteur, en prenant $K = 1$.

Q 29. Les deux diagrammes de Bode (b1 et b2) permettent alors de tracer le diagramme de Black de la fonction de transfert en Boucle Ouverte Corrigée, avec $K = 1$, fourni sur le du document réponse. À partir de ce tracé, déterminer la condition sur le gain K permettant de satisfaire le critère du cahier des charges en terme de stabilité en Boucle Ouverte. Pour cela, on utilisera le critère du revers dans le plan de Black, au niveau des deux points critiques repérés A et B. Proposer alors une valeur de K possible.

IV.C – Validation de l'effet du correcteur en Boucle Fermée

À partir de la commande déterminée précédemment, il est possible de calculer les pôles de la fonction $FTBF_{\text{avec correction}} = \dfrac{\gamma(p)}{C_{fc}(p)}$ et de simuler la réponse temporelle en accélération du système, sans correction et corrigée (**figure 17**). Les pôles sont alors :

$$p_1 = -5000 \qquad p_2 = -1000 \qquad p_3 = -22{,}6 \qquad p_4 = -10 \qquad p_5 = -7{,}8$$
$$p_{61} = -20 + j50 \qquad p_{62} = -20 - j50 \qquad p_{71} = -14 + j14 \qquad p_{72} = -14 - j14$$

Q 30. Vérifier que la commande ainsi réglée devrait permettre de satisfaire les exigences du cahier des charges pour la fonction de service FS3.

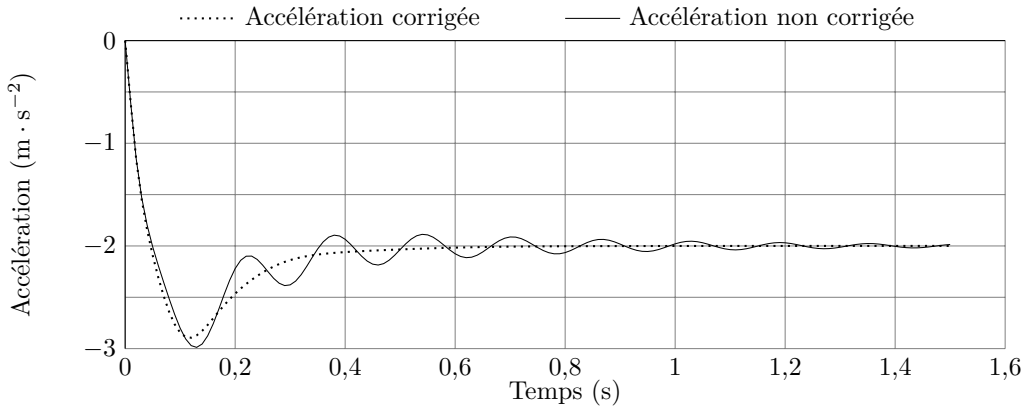


Figure 17 Simulation de l'accélération, avec et sans correction

V Conclusion de l'étude

Le graphe de la **figure 18** est l'enregistrement temporel expérimental de la décélération obtenue pour un véhicule prototype équipé d'une structure de commande avec correcteur anti-à-coup proche de celle déterminée précédemment.

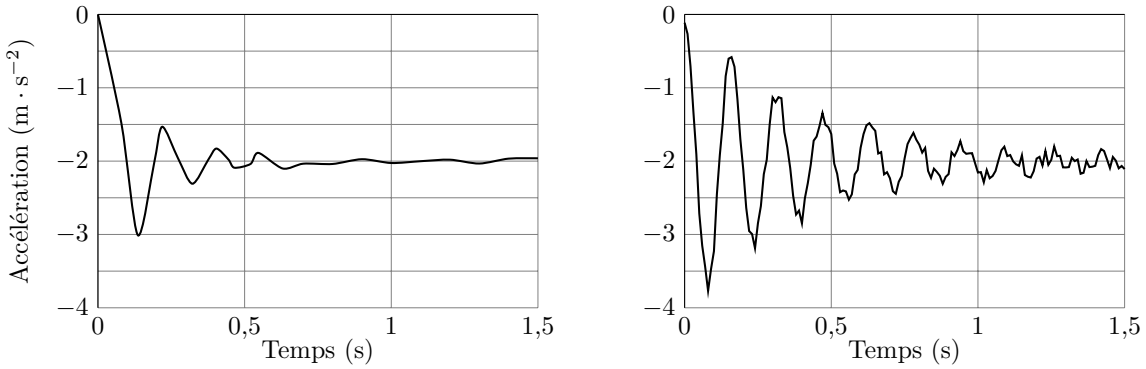


Figure 18 Réponses en accélération expérimentales, avec et sans correction

Q 31. Vérifier que le système de récupération d'énergie au freinage satisfait les exigences du cahier des charges pour la fonction de service FS3.

Q 32. Proposer une synthèse de l'ensemble de la démarche utilisée pour concevoir la structure optimale du système de récupération d'énergie au freinage sur un véhicule électrique.

• • • FIN • • •

BY-NC-SA

Concours Centrale-Supélec 2012

NOM : _____ PRÉNOMS : _____

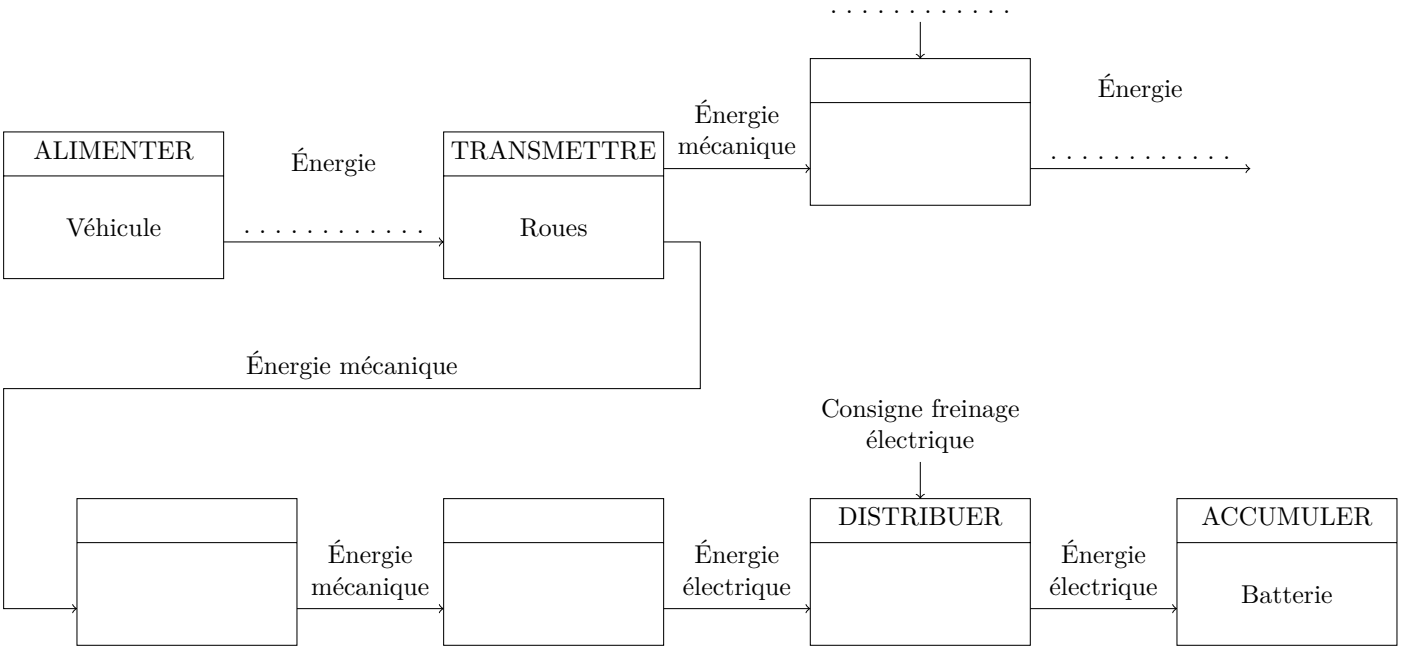
Signature :

Composition de **S2I** Filière **MP**

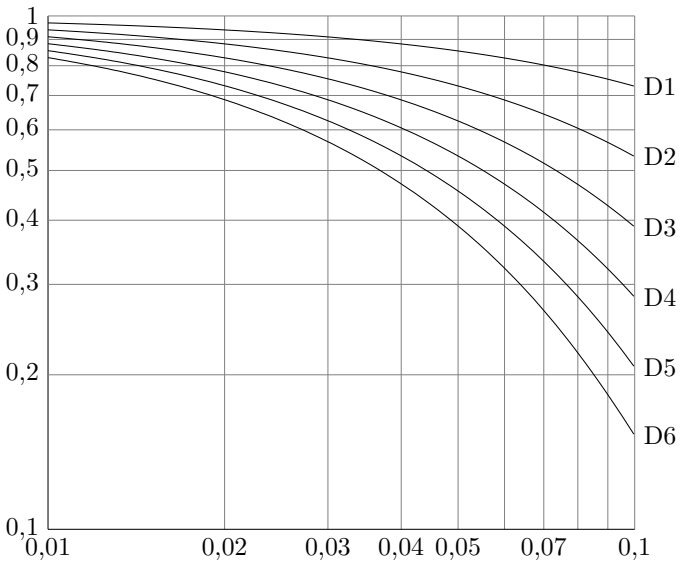
Ne rien porter sur cette feuille avant d'avoir rempli complètement cet en-tête

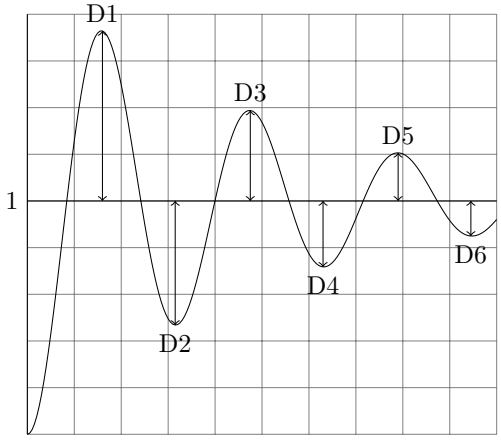
NUMÉRO DE PLACE

Question 13



Question 24

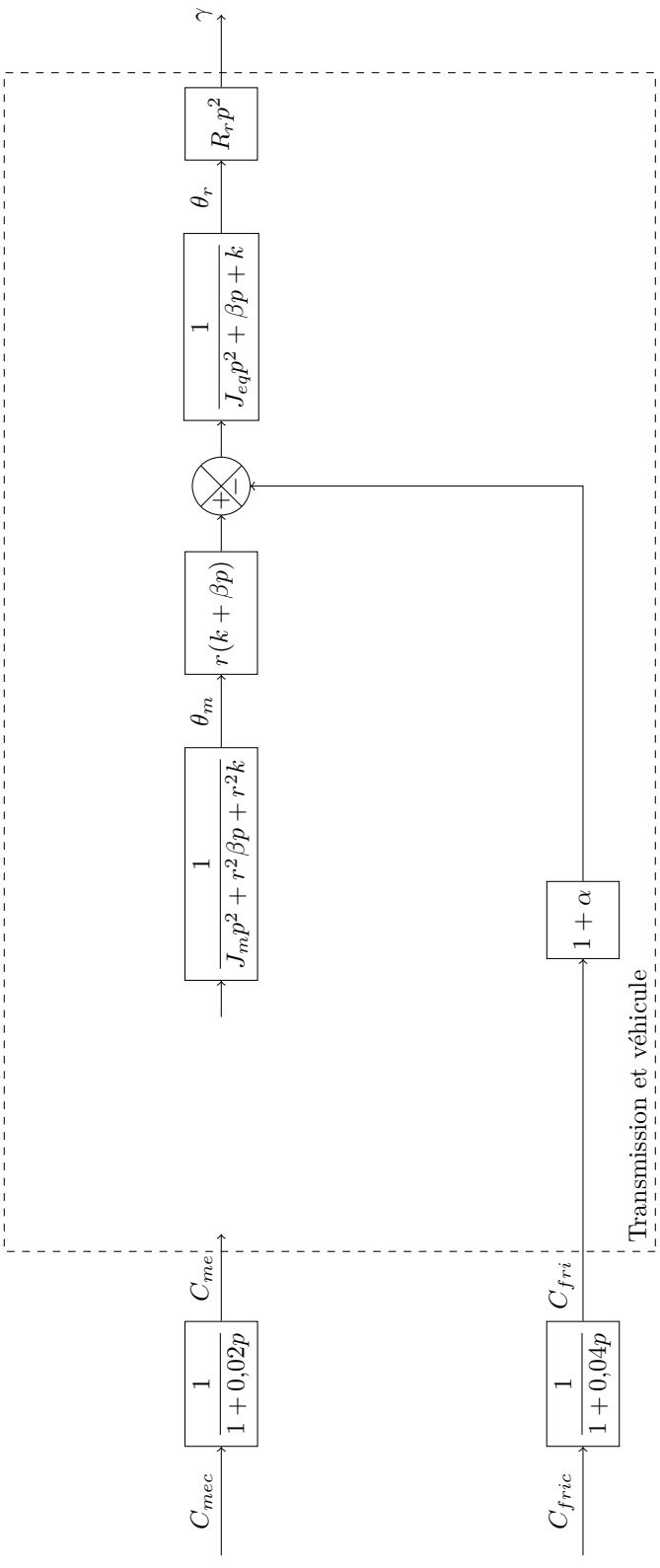




Évolution des différents dépassements en fonction de l'amortissement pour un système du second ordre

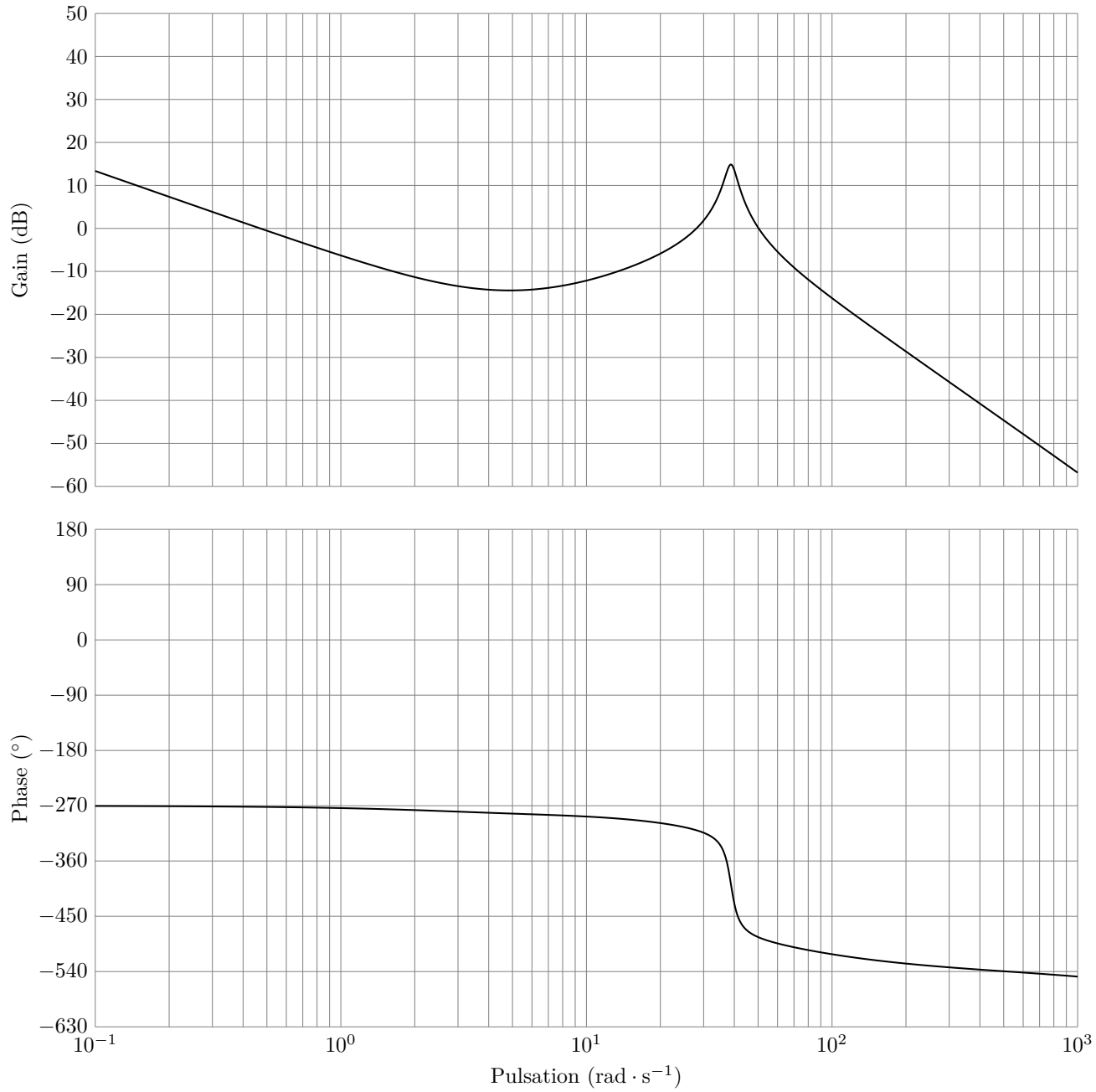
Ne rien écrire dans la partie barrée

Question 22



Ne rien écrire dans la partie barrée

Question 28



Diagrammes de bode b1

Ne rien écrire dans la partie barrée

Question 29

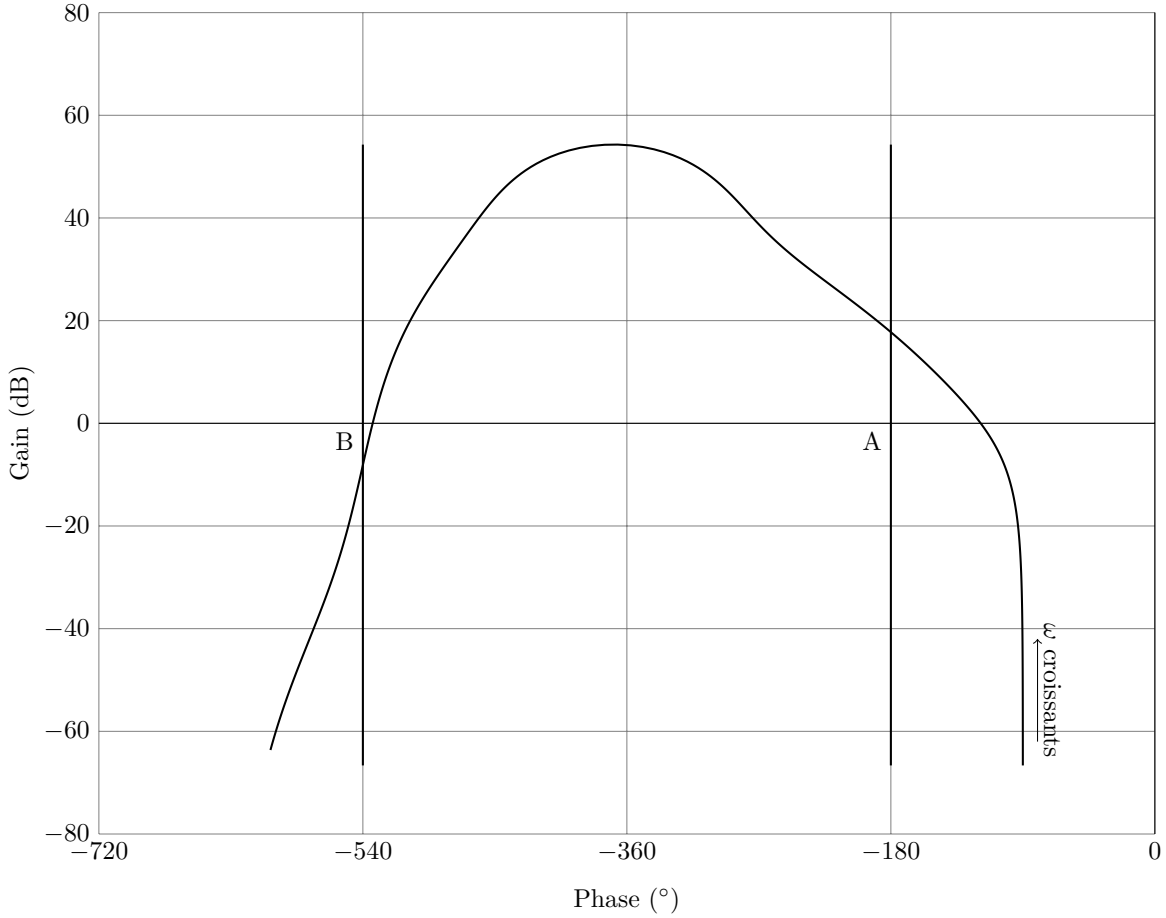


Diagramme de Black de la FTBO corrigée avec $K = 1$

Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de MP chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

Chapitres liés à ce sujet

- Énergétique : puissances, théorème de l'énergie cinétique, rendement
- Modélisation des actions mécaniques : modèles local et global, frottement, torseurs des liaisons
- Dynamique des systèmes de solides : principe fondamental, stratégie d'isolement, équilibrage
- Description et paramétrage du mouvement d'un point
- Architecture fonctionnelle et structurelle : chaînes d'information et de puissance
- Modèles de comportement et réponse temporelle : premier ordre, second ordre, identification
- Modélisation des systèmes asservis : structure, SLCI, transformée de Laplace, schéma-blocs
- Cinétique : torseurs cinétique et dynamique, énergie cinétique, inertie équivalente

Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

prepahelp.com/#essai

Une question sur le concours ou sur ta filière : **écrire sur WhatsApp**

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/centrale/mp