

POLYTECH LILLE

RAPPORT DE MI-PROJET

IRCICA - Polytech'Lille - GoTouchVR

Optimisation Énergétique de composant

Décembre 2018



Thomas HUBERT
Promo 2019

*Encadrants projets : M. Frédéric GIRAUD
& Mme. Betty SEMAIL*
Responsable École : M. Thomas VANTROYS

Sommaire

Introduction	2
1 Contexte	3
1.1 Problématique	3
1.2 Cahier des charges	4
2 Travail effectué	5
2.1 Élaboration du schéma structurel	5
2.2 Équations de la partie Batterie-capacité	5
2.2.1 Équation de la batterie	6
2.2.2 Équation de l'inductance	6
2.2.3 Équation du hacheur	7
2.2.4 Équation de la capacité tampon	7
2.3 Equations de la partie hacheur-moteur	7
2.3.1 Équation du hacheur	7
2.3.2 Équation de l'inductance moteur	8
2.3.3 Équation du couplage électro-mécanique du moteur	8
2.4 Équation de la charge mécanique	8
2.5 Définition de la REM du système	10
2.6 Asservissement de la tension de la capacité	10
2.6.1 Asservissement en courant	10
2.6.2 Asservissement en tension	14
2.7 Asservissement en position	15
2.7.1 Inversion du deuxième hacheur	15
2.7.2 Définition du système d'état	15
2.7.3 Calcul du correcteur du système d'état	17
2.7.4 Implémentation et résultats	19
3 Poursuite du projet	21
Conclusion	22

Introduction

L'objectif de ce rapport est de présenter les travaux qui ont été effectués jusqu'ici dans le cadre de mon projet de fin d'études. Ils concernent l'optimisation énergétique d'un système mécatronique, destiné à reproduire les stimulations haptiques dans des applications en réalité virtuelle. Actuellement, ce système a des défauts de design qui impliquent une mauvaise utilisation de la batterie, ce qui limite sa durée de vie et indirectement sa dynamique.

Réalisé avec l'IRCICA, cette étude a pour but d'étudier l'intérêt d'une solution imaginée par l'un des chercheurs. L'idée est d'ajouter une capacité intermédiaire entre la batterie et le moteur, afin de limiter les courants qui endommagent la batterie. L'enjeu de ce projet est de valider ou non cette hypothèse. Pour cela, l'objectif est d'abord de modéliser le système, et ensuite mettre en place un banc d'essai pour pouvoir valider l'hypothèse sur laquelle se base notre travail.

Chapitre 1

Contexte

GoTouch VR est une start-up qui commercialise des actionneurs pour la réalité virtuelle ayant pour but de reproduire les sensations de toucher pour renforcer l'immersion. Leur produit est un système embarqué miniaturisé que l'on vient fixer sur le bout des doigts, capable d'ajouter à l'expérience les informations du toucher.



FIGURE 1.1 – Vue de l'actionneur de GoTouch VR

La sensation tactile est en effet produite par la stimulation du doigt à l'aide de vibrations produites par le glissement du doigt sur la surface. Leur fréquence est inférieure à 40Hz. Le corps humain va ensuite interpréter ces vibrations comme une texture, association qu'il a appris lors de son développement sensoriel.

Le but de ce projet est d'améliorer la gestion énergétique d'un système très simple. D'un point de vue puissance, il est composé d'une batterie, qui alimente un moteur à courant continu au travers d'un hacheur. Malgré sa simplicité, le système a comme problème de provoquer des courants très élevés dans la batterie. Et donc en réduit la durée de vie puisque la durée de vie est inversement proportionnelle au carré du courant qui la parcourt.

1.1 Problématique

Le point de départ de ce projet est une étude réalisée par un chercheur de l'IRCICA. En effet, la solution imaginée d'introduire une capacité tampon. Celle-ci ne serait pas limitée en courant et sa durée de vie ne serait pas impactée. La batterie n'aurait qu'à la recharger si besoin, à courant constant dont la valeur serait maîtrisée, ce qui prolongerait sa durée de vie.

Mon rôle est ici d'évaluer la qualité de cette solution, de quantifier son intérêt et de proposer une éventuelle implémentation à la start-up GoTouch VR qui pourrait l'intégrer à la prochaine version de son produit. Concrètement, le système doit permettre de limiter le courant de la batterie à une valeur de 130mA, valeur définie par le fabricant. Il devra également permettre d'obtenir une bande passante de 40Hz pour correspondre à celle du corps humain.

1.2 Cahier des charges

Le premier point de cette étude est de réaliser une simulation du système pour vérifier sa capacité à limiter les courants de la batterie tout en fournissant au système une dynamique acceptable. Il faut donc réaliser une simulation du système sous Simulink, qui permettra d'abord de vérifier la théorie.

Basé sur la simulation réalisée, un banc d'essai sera mis en place pour vérifier la validité et la plage d'application du système sans les hypothèses simplificatrices qui accompagnent la modélisation. Cela permettra à la fois de conclure sur l'intérêt de la mise en place de cette solution, et si elle est retenue, de donner des premiers éléments pour réaliser son implémentation dans le système réel.

Chapitre 2

Travail effectué

Les tâches exécutées jusqu'ici ont exclusivement servi à l'élaboration de la simulation. Ces tâches sont :

- L'élaboration du schéma structurel du système à modéliser
- La définition des équations associées à ce schéma et les hypothèses utilisées
- La réalisation d'une Représentation Énergétique Macroscopique (REM)
- La réalisation des asservissement nécessaires
- L'implémentation du système obtenu sous Matlab-Simulink

La partie qui suit va présenter ces différents aspects du projet, et développer les différentes étapes qui ont composé l'élaboration de la modélisation.

2.1 Élaboration du schéma structurel

La première étape du projet est l'élaboration du schéma structurel, à partir des différentes informations obtenues sur le sujet.

Le système peut être décomposé en deux parties. Une partie électrique et une partie mécanique. Pour la partie électrique, elle est composée d'une batterie qui alimente une capacité au travers d'un LTC3125. Ce LTC3125 est en fait un hacheur asservi en courant et en tension. Ensuite, la capacité alimente un moteur à courant continu au travers d'un second hacheur que nous devrons contrôler. C'est ce moteur qui va ensuite pouvoir mouvoir une charge mécanique.

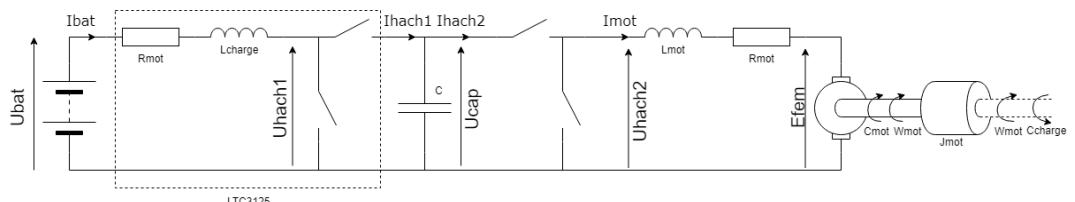


FIGURE 2.1 – Schéma électrique

Pour la partie mécanique, elle est composée d'un axe portant l'inertie du moteur ainsi que de l'inertie d'un premier réducteur. Ce réducteur attaque un autre axe, portant l'inertie d'un autre réducteur, angulaire cette fois-ci. Il attaque ensuite une poutre montée sur un axe, poutre qui introduit une inertie d'un côté et de l'autre un déplacement considéré comme linéaire, celui senti par les doigts de l'utilisateur.

Les différents frottements des réducteurs sont pour l'instant négligés, seul celui du moteur à courant continu est pris en compte. Ils seront peut-être pris en compte par la suite, si cela s'avère nécessaire pour le projet.

2.2 Équations de la partie Batterie-capacité

Cette partie du système est celle qui doit nous permettre de limiter le courant dans la batterie. Physiquement, elle sera réalisée par un LTC3125, composant chargé de limiter les courants quand il

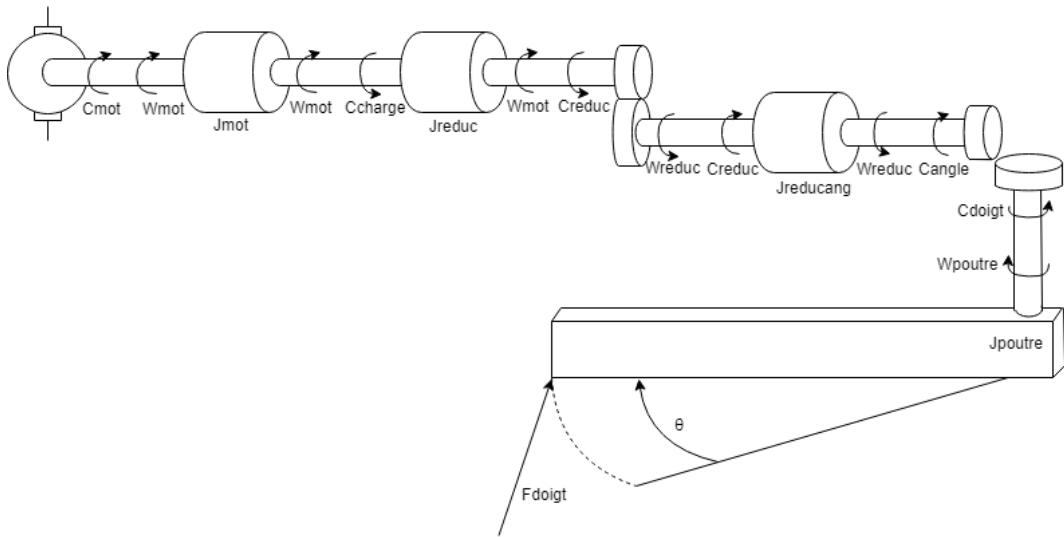


FIGURE 2.2 – Charge mécanique

fonctionne de pair avec une capacité de stockage. Donc, s'il est représenté dans notre schéma par un hacheur et une inductance, il faut que ces composants soient calibrés et contrôlés dans la modélisation pour réaliser le comportement du LTC3125.

Nous allons donc décomposer le système pour étudier les différentes équations le composant, pour pouvoir déterminer sa REM et par la suite modéliser le système.

2.2.1 Équation de la batterie

Nous pouvons donc commencer par la mise en équation de notre batterie. Nous considérerons que la tension est fixe, indépendamment du courant (Modèle idéal).

Soit :

$$U_{batterie}(t) = U_{batterieNominal}$$

2.2.2 Équation de l'inductance

Nous poursuivons par la mise en équation de l'inductance L_{charge} , pour laquelle nous considérons la résistance parasite R_{charge} . La tension aux bornes de cette inductance est donc :

$$U_{Lcharge}(t) = L_{charge} \cdot \frac{d \cdot i_{batterie}(t)}{dt} + R_{charge} \cdot i_{batterie}(t)$$

D'après la loi des mailles, nous avons :

$$U_{batterie}(t) = U_{Lcharge}(t) + U_{hach1}(t)$$

Donc :

$$U_{batterie}(t) = L_{charge} \cdot \frac{d \cdot i_{batterie}(t)}{dt} + R_{charge} \cdot i_{batterie}(t) + U_{hach1}(t)$$

Cette même équation devient dans le domaine de Laplace :

$$U_{batterie} = L_{charge} \cdot p \cdot I_{batterie} + R_{charge} \cdot I_{batterie} + U_{hach1}$$

Soit :

$$U_{batterie} - U_{hach1} = I_{batterie}(L_{charge} \cdot p + R_{charge})$$

Donc :

$$I_{batterie} = \frac{U_{batterie} - U_{hach1}}{(L_{charge} \cdot p + R_{charge})}$$

2.2.3 Équation du hacheur

Pour l'équation du hacheur, nous allons considérer les valeurs moyennes de courant et de tension comme étant instantanées. Soit α_1 le rapport de transformation de notre hacheur. Nous obtenons les équations :

$$\begin{cases} I_{hach1}(t) = \alpha_1 \cdot I_{batterie}(t) \\ U_{hach1}(t) = \alpha_1 \cdot U_{cap}(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

2.2.4 Équation de la capacité tampon

Pour la mise en équation de la capacité, nous ne considérons pas de résistance parasite de fuite. Nous avons donc l'équation :

$$i_{cap}(t) = C \frac{d \cdot U_{capacite}(t)}{dt}$$

Soit :

$$i_{cap}(t) = i_{hach1}(t) - i_{hach2}(t)$$

Donc :

$$i_{hach1}(t) - i_{hach2}(t) = C \frac{d \cdot U_{capacite}(t)}{dt}$$

Dans le domaine de Laplace, cela donne :

$$I_{hach1} - I_{hach2} = C \cdot U_{capacite} \cdot p$$

Si on rétablit la causalité, on obtient :

$$U_{capacite} = \frac{I_{hach1} - I_{hach2}}{C \cdot p}$$

2.3 Equations de la partie hacheur-moteur

2.3.1 Équation du hacheur

Pour l'équation de ce deuxième hacheur, nous considérons également les valeurs moyennes de courant et de tension comme étant instantanées. Soit α_2 le rapport de transformation de notre hacheur, nous obtenons les équations suivantes :

$$\begin{cases} U_{hach2}(t) = \alpha_2 \cdot U_{cap}(t) \\ I_{hach2}(t) = \alpha_2 \cdot I_{mot}(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

2.3.2 Équation de l'inductance moteur

Nous passons ensuite à l'inductance moteur. Nous avons :

$$U_{Lmot}(t) = L_{mot} \cdot \frac{d \cdot i_{mot}(t)}{dt} + R_{mot} \cdot i_{mot}(t)$$

D'après la loi des mailles, nous avons :

$$U_{hach2}(t) = U_{Lmot}(t) + E_{fem}(t)$$

Soit :

$$U_{hach2}(t) = L_{mot} \cdot \frac{d \cdot i_{mot}(t)}{dt} + R_{mot} \cdot i_{mot}(t) + E_{fem}(t)$$

Cette même équation devient dans le domaine de Laplace :

$$U_{batterie} = L_{charge} \cdot p \cdot I_{batterie} + R_{charge} \cdot I_{batterie} + U_{hach1}$$

Donc :

$$U_{batterie} - U_{hach1} = I_{batterie}(L_{charge} \cdot p + R_{charge})$$

Soit finalement :

$$I_{batterie} = \frac{U_{batterie} - U_{hach1}}{(L_{charge} \cdot p + R_{charge})}$$

2.3.3 Équation du couplage électro-mécanique du moteur

L'équation du couplage électro-mécanique d'un moteur est un élément de conversion multi-physique. Par conséquent son équation peut s'écrire sous la forme, avec k le rapport de transformation de notre moteur :

$$\begin{cases} C_{mot}(t) = k \cdot I_{mot}(t) \\ E_{fem}(t) = k \cdot W_{charge}(t) \end{cases} \quad (2.3)$$

2.4 Équation de la charge mécanique

Nous passons à l'étude de la charge mécanique. Mécaniquement, notre système se compose d'abord de l'inertie du moteur J_{mot} . On considère ensuite un réducteur de ratio k_{reduc} , et d'inertie J_{reduc} . Enfin, on considère une poutrelle, montée sur un axe, et qui induit à la fois un rapport de réduction noté k_{poutre} , l'inertie du réducteur angulaire $J_{reducang}$ et l'inertie de la poutrelle J_{poutre} .

Pour l'étude de la charge mécanique nous nous baserons sur son schéma (figure 2.2 page 6).

Pour en réaliser la REM, nous devons résoudre les problèmes de causalité dus aux différentes inerties en parallèle. Pour cela nous devons calculer une inertie équivalente à notre système. Et donc, nous devons donc ramener les différentes inerties séparées par des réducteurs à des inerties en parallèles sans séparation et facilement sommables. Nous commençons par ramener l'inertie de la poutre en amont du réducteur angulaire. Soit par les équations :

$$J_{equ} = J_{mot} + J_{reduc}$$

Ensuite, nous les ramenons en aval du réducteur. Pour cela, nous posons l'équation :

$$J_{equivalent1} = \frac{J_{poutre}}{k_{poutre}^2}$$

On peut donc la sommer à l'inertie imposée par le réducteur. Nous obtenons donc :

$$J_{equivalent2} = \frac{J_{poutre}}{k_{poutre}^2} + J_{reducang}$$

On ramène cette nouvelle inertie équivalente au niveau de l'inertie moteur et du réducteur.

$$J_{equivalent3} = \frac{J_{equivalent2}}{k_{reducteur}^2}$$

Soit :

$$J_{equivalent3} = \frac{\frac{J_{poutre}}{k_{poutre}^2} + J_{reducang}}{k_{reducteur}^2}$$

On somme alors les inerties ramenées en parallèle de l'inertie moteur. Ce qui nous donne :

$$J_{chargeEquivalent} = J_{mot} + J_{reduc} + \frac{\frac{J_{poutre}}{k_{poutre}^2} + J_{reducang}}{k_{reducteur}^2}$$

On peut alors définir un schéma équivalent de la partie mécanique :

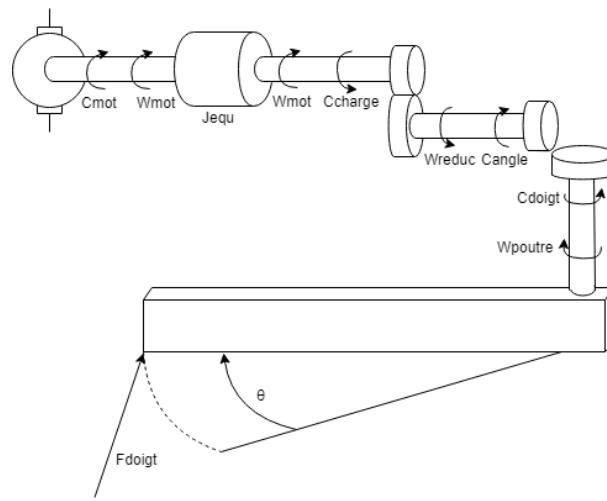


FIGURE 2.3 – Charge mécanique équivalente

On veut alors définir l'équation dynamique de l'inertie. Pour ce faire, nous rappelons l'équation d'une inertie dans le domaine temporel :

$$J_{chargeEquivalent} \frac{d\omega_{charge}(t)}{dt} = C_{mot}(t) - C_{res}(t)$$

On choisit de modéliser le couple résistif comme proportionnel à la vitesse de rotation, soit :

$$C_{res}(t) = F_{equivalent} \cdot \omega_{charge}(t)$$

On a donc :

$$J_{chargeEquivalent} \frac{d\omega_{charge}(t)}{dt} = C_{mot}(t) - F_{equivalent} \cdot \omega_{charge}(t)$$

Cela nous donne avec la transformée de Laplace :

$$J_{chargeEquivalent} \cdot \omega_{charge} \cdot p = C_{mot} - F_{equivalent} \cdot \omega_{charge}$$

Soit :

$$\omega_{charge} = \frac{C_{mot}}{J_{chargeEquivalent} \cdot p - F_{equivalent}}$$

On peut donc en déduire une REM de la partie mécanique, qui nous permettra d'implémenter le système facilement sous Matlab (figure 2.5 page 10).

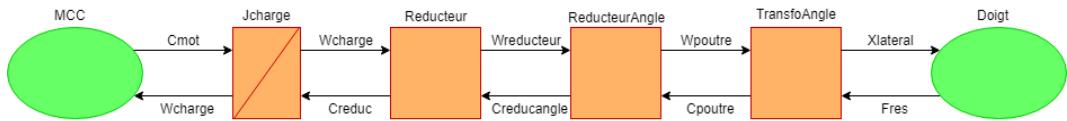


FIGURE 2.4 – REM de la partie mécanique

2.5 Définition de la REM du système

A l'aide de toutes les équations trouvées jusqu'ici, nous définissons la REM du système. Cette REM va nous permettre à la fois l'implémentation sous Matlab et la simplification de la mise en oeuvre d'asservissements dans cette REM.

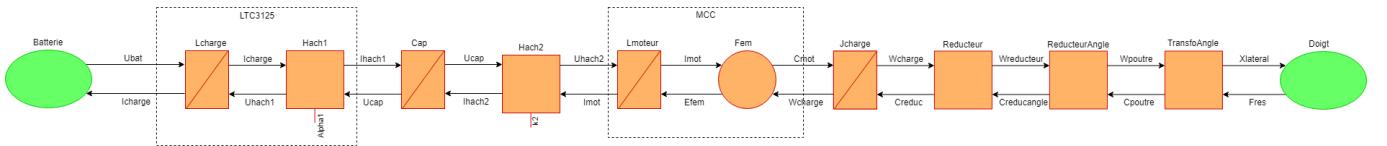


FIGURE 2.5 – REM de la partie mécanique

2.6 Asservissement de la tension de la capacité

L'asservissement de la tension de la capacité est important dans la simulation. Il a pour but de permettre le remplacement de la batterie par la capacité. En effet, tout en maintenant la tension de la capacité au plus proche de 5V, il va avoir pour rôle de limiter le courant débiteur dans la batterie. La batterie va ainsi voir ses pics de courants remplacés par un courant constant et ainsi obtenir une plus grande durée de vie.

Nous avons donc deux asservissements de prévus, l'un en courant, l'autre en tension. En effet, une fois la boucle de contrôle du courant réalisée, nous lui donnerons une consigne issue d'une boucle de contrôle en tension.

2.6.1 Asservissement en courant

Pour déterminer la stratégie d'asservissement, nous commençons par réaliser la structure maximale de commande en rajoutant à la REM une partie contrôle du courant.

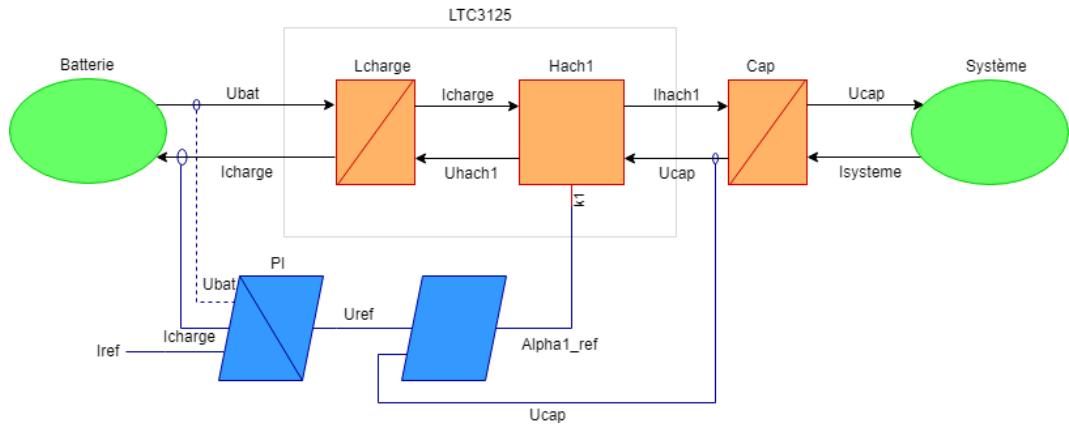


FIGURE 2.6 – REM avec la partie contrôle de courant

On décide d'utiliser un régulateur PI. Le régulateur PI est un bon compromis entre justesse et rapidité. Contrairement au régulateur P, il a une erreur statique nulle grâce à son intégrateur, et s'il est un peu moins rapide que le correcteur PID, il possède un dépassement moindre et est plus simple à paramétriser.

On décide de le paramétriser par la technique des placements de pôles. On commence par représenter le schéma du système à asservir.

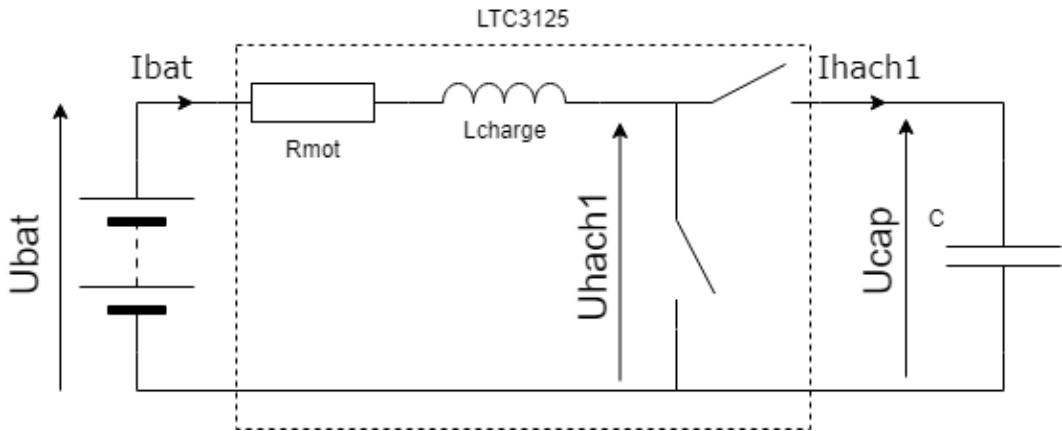


FIGURE 2.7 – Schéma structurel de la partie à asservir

Si on regarde la REM, on peut voir que le contrôle du courant se fera par le hacheur, et donc par le contrôle de la tension Uhach1 qui permet de contrôler le courant de l'inductance de charge.

On commence par inverser le hacheur, pour qu'on obtienne le rapport de hachage en fonction de la tension de référence et de celle de la capacité. On rappelle l'équation du hacheur :

$$U_{hach1}(t) = \alpha_1 \cdot U_{cap}(t)$$

Ici nous notons :

$$U_{ref}(t) = U_{hach1}(t)$$

Soit :

$$U_{ref}(t) = \alpha_1 \cdot U_{cap}(t)$$

Donc :

$$\alpha_1 = \frac{U_{cap}(t)}{U_{ref}(t)}$$

On va ensuite noter l'équation électrique de l'inductance, et on pourra considérer qu' U_{ref} est parfaitement contrôlé donc ignorer son équation ici.

Notre but va maintenant être d'asservir $I_{batterie}$.

On commence par réaliser le schéma-bloc de notre système avec le correcteur. Comme on compense U_{bat} , on peut en déduire une petite simplification (voir figure 2.8, page 12).

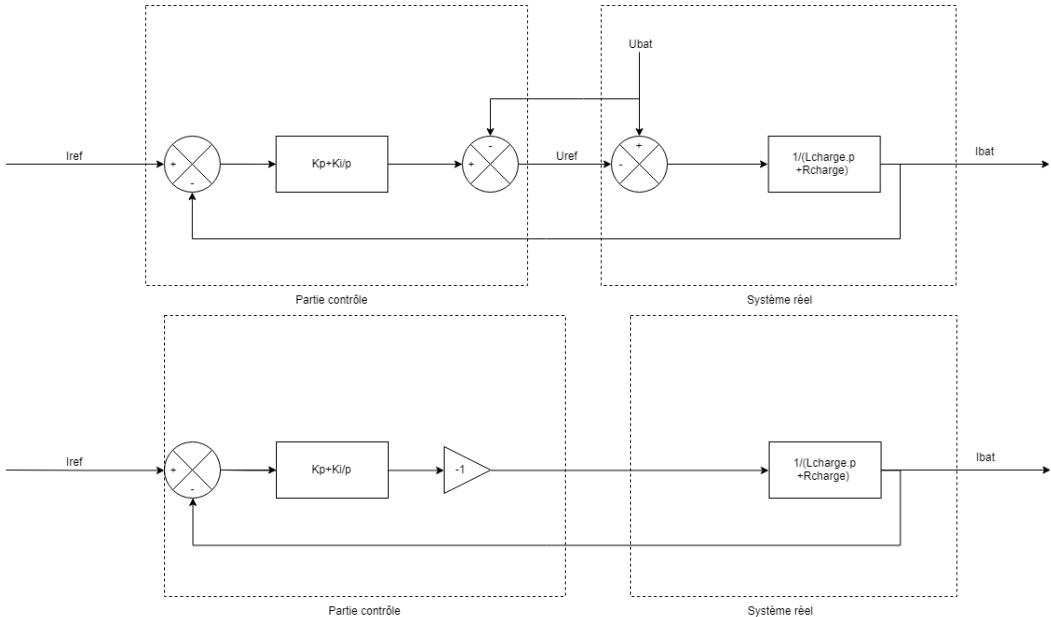


FIGURE 2.8 – Schéma-bloc du PI et son équivalent simplifié

Nous commençons par réécrire l'équation en boucle ouverte.

On rappelle la fonction de transfert de l'inductance :

$$I_{batterie} = \frac{U_{batterie} - U_{ref}}{(L_{charge} \cdot p + R_{charge})}$$

Ensuite on rappelle celle du correcteur PI :

$$C(p) = K_p + \frac{K_i}{p}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est donc :

$$FTBO(p) = (K_p + \frac{K_i}{p}) \frac{1}{(L_{charge} \cdot p + R_{charge})}$$

Il est important d'expliquer ici que le signe moins disparaît ici pour des facilités de notation, il sera pris en compte dans les gain K_i et K_p

On peut alors en déduire la fonction de transfert en boucle fermée.

$$FTBF(p) = \frac{FTBO}{1 + FTBO} = \frac{\frac{(K_p + \frac{K_i}{p})}{(L_{charge} \cdot p + R_{charge})}}{1 + \frac{(K_p + \frac{K_i}{p})}{(L_{charge} \cdot p + R_{charge})}} = \frac{(K_p + \frac{K_i}{p})}{(L_{charge} \cdot p + R_{charge}) + (K_p + \frac{K_i}{p})}$$

$$FTBF(p) = \frac{(K_p \cdot p + K_i)}{\frac{L_{charge}}{K_i} \cdot p^2 + \frac{(R_{charge} - K_p)}{K_i} \cdot p + 1}$$

On peut alors identifier les paramètres K_p et K_i .

On rappelle la forme d'une fonction de second ordre :

$$FT(p) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} \cdot p^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} \cdot p + 1}$$

On définit la fréquence de coupure du système en fonction de la bande passante désirée, ici nous choisissons $\omega_n = 2.5e2Hz$ pour que le temps de réponse soit celui du LTC3125 et le facteur d'amortissement $\zeta = 0.7$ pour limiter le dépassement, comme le fait le LTC3125.

On peut poser :

$$\frac{1}{\omega_n^2} = \frac{L_{charge}}{K_i}$$

Soit :

$$K_i = \omega_n^2 \cdot L_{charge}$$

On pose ensuite :

$$\frac{2\zeta}{\omega_n} = \frac{(R_{charge} + K_p)}{K_i}$$

soit :

$$\frac{2\zeta}{\omega_n} = \frac{(R_{charge} + K_p)}{\omega_n^2 \cdot L_{charge}}$$

Ce qui équivaut à :

$$K_p = 2\zeta \cdot \omega_n \cdot L_{charge} - R_{charge}$$

Une fois le correcteur correctement implémenté sous Simulink, nous observons la réponse impulsionnelle du système à un échelon :

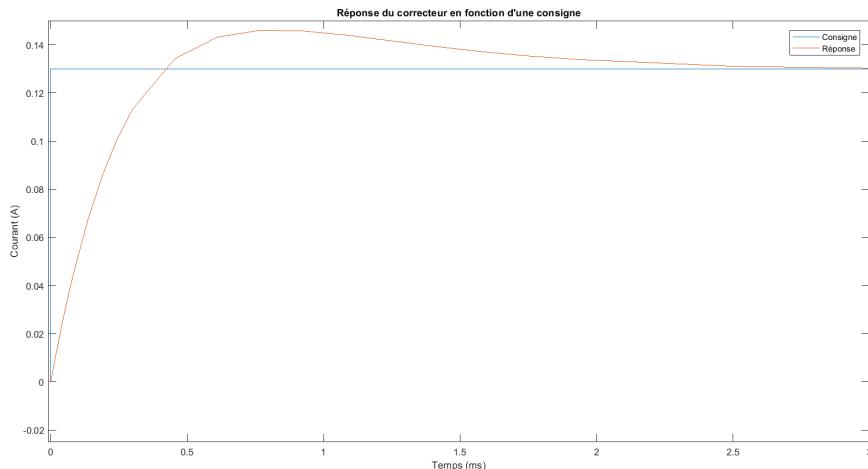


FIGURE 2.9 – Réponse impulsionnelle du courant

Nous pouvons voir ici que notre système est correctement asservi. Mais nous observons un dépassement important, supérieur à 10%, ce qui ici est indésirable puisque nous devons limiter le courant à la consigne. Ce dépassement est dû au fait que le numérateur soit de premier ordre, ce qui induit un effet intégrateur parasite. Nous décidons donc d'appliquer un filtre passe-bas sur la consigne, ce va limiter l'impact de l'intégrateur. Nous simulons notre système après l'ajout du filtre passe-bas.

Le dépassement est alors bien moindre, on peut considérer le LTC3125 comme correctement simulé. On va maintenant pouvoir réaliser l'asservissement en tension.

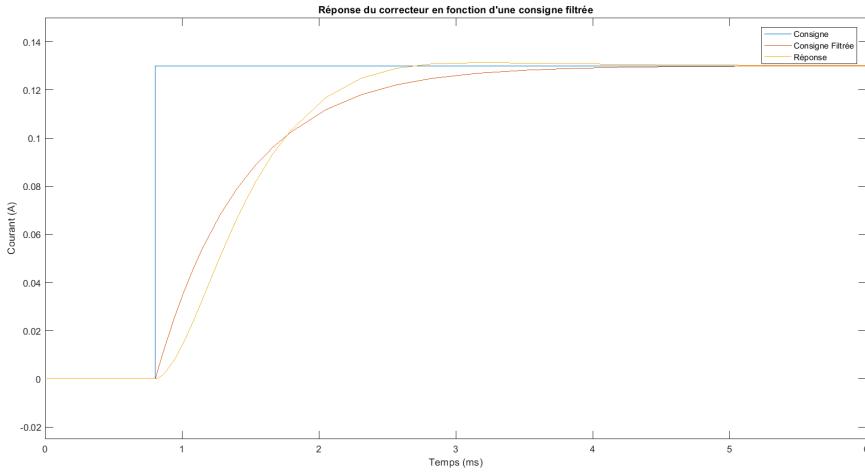


FIGURE 2.10 – Réponse impulsionnelle filtrée du courant

2.6.2 Asservissement en tension

Pour réaliser l'asservissement en tension de la capacité, le but est d'obtenir un système qui recharge la capacité quand sa tension est trop basse et arrête de la recharge quand elle est trop élevée. La tension de la capacité n'a pas besoin d'être maintenue strictement à sa valeur nominale, on supporte des fluctuations car ce qu'on veut absolument, c'est la limitation du courant qui va la recharger.

On choisit donc d'implémenter un système tout ou rien, qui va déclencher la recharge quand la tension passe en-dessous d'un seuil minimal, et l'arrêter si elle atteint un seuil maximal. Quand la recharge est activée, la valeur du courant est soit la valeur max du courant que permet la batterie, soit nulle. On implémente le système sous Simulink, et on observe le résultat (figure 2.11 page 14).

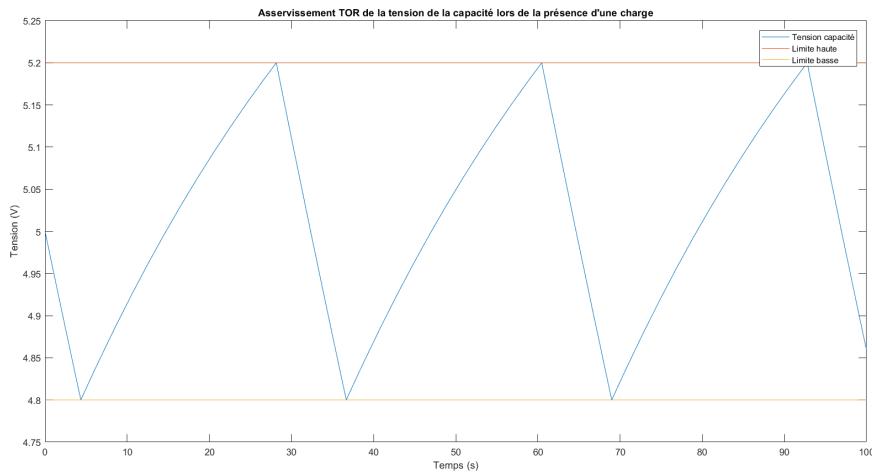


FIGURE 2.11 – Asservissement tout ou rien de la tension de la capacité

On peut observer que si la capacité est soumise à un courant de décharge, elle va se décharger jusqu'à atteindre la valeur de 4.8v, qui est notre seuil de tension bas. La recharge se déclenche alors, jusqu'à atteindre 5.2v, le seuil de tension haut. On peut donc garantir que la tension de la capacité va rester dans la plage définie par ces seuils, tant que le courant de décharge est inférieur au courant maximal autorisé dans la batterie.

2.7 Asservissement en position

Nous nous penchons ensuite sur l'asservissement de position. Nous décidons de réaliser une commande par retour d'état, qui concerne le moteur et sa charge équivalente. Cela nous donne la structure de commande suivante :

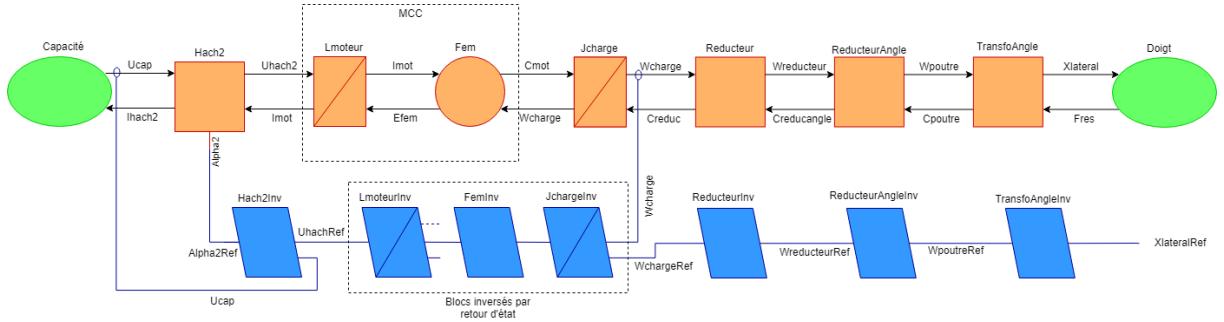


FIGURE 2.12 – Structure de commande de la position

Nous allons donc commencer par inverser le bloc du hacheur, ensuite nous établirons la commande par retour d'état, enfin nous inverserons les derniers blocs linéaires.

2.7.1 Inversion du deuxième hacheur

Pour ce deuxième hacheur, nous voulons définir α_{2ref} en fonction de la tension de la capacité U_{cap} et de la tension de consigne $U_{hachRef}$

Pour ce faire, on rappelle les équations de tension du hacheur :

$$U_{hach2}(t) = \alpha_2 \cdot U_{cap}(t)$$

Soit ici :

$$U_{hachRef}(t) = \alpha_{2ref} \cdot U_{cap}(t)$$

Donc :

$$\alpha_{2ref} = \frac{U_{hachRef}(t)}{U_{cap}(t)}$$

2.7.2 Définition du système d'état

Pour définir la commande d'état, nous commençons par définir les variables d'état que nous voulons asservir. Nous avons θ , la position du moteur, dont la référence sera fournie par l'inversion des blocs linéaires. Les autres variables asservies par le retour d'état seront la dérivée de la position, soit ω_{charge} , pour forcer l'atteinte de la consigne en position à vitesse nulle puisqu'il s'agit d'un asservissement en position, et l'intégrale de la position, γ ce qui a pour but d'éliminer l'erreur statique au sein de cet asservissement.

On cherche donc trois équations pour former un système matriciel d'équations pour modéliser le système en boucle ouverte. Il aura la forme :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU$$

Ici on a : $X = \begin{bmatrix} \gamma \\ \theta \\ \omega_{charge} \end{bmatrix}$ et $U = [U_{ref}]$

On doit donc déterminer A et B .

On cherche les équations d'état, avec comme entrées celles décrites ici et en sortie $U_{hachRef}$. Nous commençons par rappeler les équations de l'inertie équivalente :

$$J_{chargeEquivalent} \frac{d\omega_{charge}(t)}{dt} = C_{mot}(t) - F_{equivalent} \cdot \omega_{charge}(t)$$

Or, nous avons :

$$C_{mot}(t) = k \cdot I_{mot}(t)$$

On obtient donc :

$$J_{chargeEquivalent} \frac{d\omega_{charge}(t)}{dt} = k \cdot I_{mot}(t) - F_{equivalent} \cdot \omega_{charge}(t)$$

Pour l'équation de l'inductance et de la résistance du moteur, nous avons noté :

$$U_{hach2}(t) = L_{mot} \cdot \frac{d \cdot i_{mot}(t)}{dt} + R_{mot} \cdot i_{mot}(t) + E_{fem}(t)$$

Dans notre cas, nous choisissons de négliger l'inductance moteur devant sa résistance. On simplifie donc l'équation précédente par :

$$U_{hach2}(t) = R_{mot} \cdot i_{mot}(t) + E_{fem}(t)$$

Soit :

$$i_{mot}(t) = \frac{U_{hach2}(t) - E_{fem}(t)}{R_{mot}}$$

Nous obtenons donc :

$$J_{chargeEquivalent} \frac{d\omega_{charge}(t)}{dt} = k \cdot \frac{U_{hach2}(t) - E_{fem}(t)}{R_{mot}} - F_{equivalent} \cdot \omega_{charge}(t)$$

Et comme :

$$E_{fem}(t) = k \cdot \omega_{charge}(t)$$

On obtient :

$$J_{chargeEquivalent} \frac{d\omega_{charge}(t)}{dt} = k \cdot \frac{U_{hach2}(t) - k \cdot \omega_{charge}(t)}{R_{mot}} - F_{equivalent} \cdot \omega_{charge}(t)$$

Cela équivaut à :

$$\frac{d\omega_{charge}(t)}{dt} = - \frac{(F_{equivalent} \cdot R_{mot} + k^2)}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} \cdot \omega_{charge}(t) + \frac{k}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} \cdot U_{hach2}(t)$$

Cette équation est la première de nos équations d'état, elle relie $\frac{d\omega_{charge}(t)}{dt}$ et $\omega_{charge}(t)$. On cherche celles qui définissent $\frac{d\gamma(t)}{dt}$ et $\frac{d\theta(t)}{dt}$.

Or, par définition :

$$\frac{d\gamma(t)}{dt} = \theta(t)$$

Tout comme :

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_{charge}(t)$$

On a donc nos trois équations d'état, qui nous donnent le système :

$$\begin{cases} \frac{d\gamma(t)}{dt} = \theta(t) \\ \frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_{charge}(t) \\ \frac{d\omega_{charge}(t)}{dt} = -\frac{(F_{equivalent} \cdot R_{mot} + k^2)}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} \cdot \omega_{charge}(t) + \frac{k}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} \cdot U_{hach2}(t) \end{cases} \quad (2.4)$$

Notre système d'équations $\frac{dX}{dt} = AX + BU$ devient donc :

$$\frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} \gamma \\ \theta \\ \omega_{charge} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{(F_{equivalent} \cdot R_{mot} + k^2)}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \gamma \\ \theta \\ \omega_{charge} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} \end{bmatrix} \cdot [U_{ref}]$$

Soit :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{(F_{equivalent} \cdot R_{mot} + k^2)}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} \end{bmatrix}$$

Et :

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} \end{bmatrix}$$

2.7.3 Calcul du correcteur du système d'état

Nous allons maintenant chercher à définir le correcteur en fonction des pôles que nous voulons pour notre système. Nous devons d'abord calculer les pôles du système en boucle fermée.

En boucle ouverte, nous avons :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU$$

Si on ajoute un correcteur $K = [k1 \ k2 \ k3]$ chargé de poursuivre la consigne X_{ref} , on obtient en boucle fermée :

$$U = K(X_{ref} - X)$$

Soit :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BK(X_{ref} - X)$$

Soit :

$$\frac{dX}{dt} = (A - BK)X + BK(X_{ref})$$

On pose $B' = BK$, $A' = A - BK = A - B'$ et $U = X_{ref}$, et on retrouve un système de la forme :

$$\frac{dX}{dt} = A'X + B'U$$

On détermine :

$$B' = BK = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k \\ \hline R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent} \end{bmatrix} \cdot [k1 \ k2 \ k3]$$

$$B' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \hline \frac{k \cdot k1}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} & \frac{k \cdot k2}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} & \frac{k \cdot k3}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} \end{bmatrix}$$

On pose ensuite :

$$A' = A - B' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{(F_{equivalent} \cdot R_{mot} + k^2)}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \hline \frac{k \cdot k1}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} & \frac{k \cdot k2}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} & \frac{k \cdot k3}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} \end{bmatrix}$$

$$A' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \hline -\frac{k \cdot k1}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} & -\frac{k \cdot k2}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} & -\left(\frac{k \cdot k3}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} + \frac{(F_{equivalent} \cdot R_{mot} + k^2)}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}}\right) \end{bmatrix}$$

On cherche maintenant les pôles du systèmes, ce sont en fait les racines du déterminant de la matrice $pI - A'$

$$pI - A' = \begin{bmatrix} p & -1 & 0 \\ 0 & p & -1 \\ \hline \frac{k \cdot k1}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} & \frac{k \cdot k2}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} & \left(p + \frac{k \cdot k3}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} + \frac{(F_{equivalent} \cdot R_{mot} + k^2)}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}}\right) \end{bmatrix}$$

Après quelques calculs on trouve :

$$\det(pI - A') = p^3 + p^2 \frac{k \cdot k3 + F_{equivalent} \cdot R_{mot} + k^2}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} + p \frac{k \cdot k2}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} + \frac{k \cdot k1}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}}$$

On peut maintenant réaliser notre placement de pôles. On choisit trois pôles dont la valeur réelle est positive et dont la valeur imaginaire est soit nulle, soit négative et opposée à la valeur réelle, soit positive et égale à la valeur réelle. On note nos trois pôles :

$$p1 = a + ia, p2 = a, p3 = a - ia$$

On a donc :

$$(p - p1)(p - p2)(p - p3) = (p - a - ia)(p - a)(p - a + ia) = p^3 + p^2(-3a) + p(4a^2) - 2a^3$$

Par identification on obtient le système :

$$\begin{cases} -3a = \frac{k \cdot k3 + F_{equivalent} \cdot R_{mot} + k^2}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} \\ 4a^2 = \frac{k \cdot k2}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} \\ -2a^3 = \frac{k \cdot k1}{R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}} \end{cases} \quad (2.5)$$

Soit :

$$\begin{cases} k3 = \frac{-3a \cdot R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent} - F_{equivalent} \cdot R_{mot} - k^2}{k} \\ k2 = \frac{4a^2 \cdot R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}}{k} \\ k1 = \frac{-2a^3 \cdot R_{mot} \cdot J_{chargeEquivalent}}{k} \end{cases} \quad (2.6)$$

2.7.4 Implémentation et résultats

On procède ensuite à l'implémentation du système sous Simulink. Sur le schéma, on commence par récupérer les différentes variables d'état du système. On implémente ensuite le correcteur K avec les trois paramètres, que l'on aura calculé dans le fichier d'initialisation.

Pour le choix du paramètre a de nos poles, nous choisissons $a = -150*2*pi$, ce qui devrait nous donner un temps de réponse proche de $\tau = \frac{1}{150} = 0.0066s$.

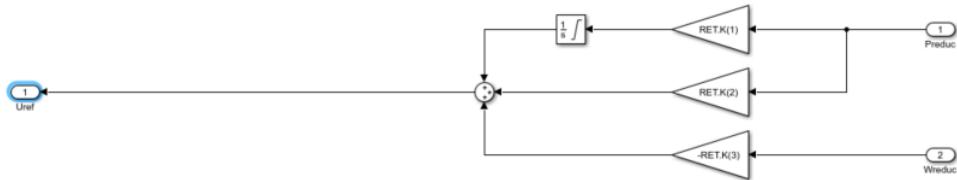


FIGURE 2.13 – Système de retour d'état

On observe alors la réponse du système pour un échelon, et on vérifie que le temps de réponse soit bien celui calculé.

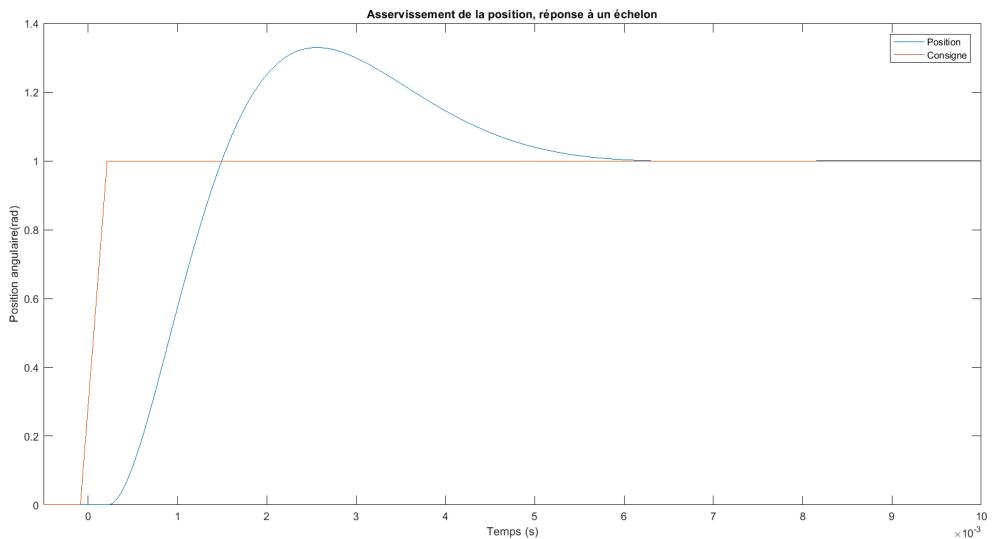


FIGURE 2.14 – Asservissement en position, pour une consigne en échelon

On remarque immédiatement un dépassement de 30%, qui n'est pas vraiment gênant car la priorité est surtout d'avoir un système dynamique. Concernant le dynamisme du système, on remarque qu'il atteint sa consigne en 6 ms, soit une bande passante de 166Hz. On est largement au-dessus de la bande passante nécessaire (40Hz), cependant il est probable que dans des conditions réelles le système va voir ses performances dégradées.

On observe la réponse du système à une consigne sinusoïdale de 50Hz (figure 2.15, page 20).

On voit que le système suit la consigne, avec cependant un léger déphasage et un dépassement assez conséquent. On peut tolérer ces écarts, parce qu'à haute dynamique, l'essentiel est la perception de la vibration au niveau du doigt, pas réellement la position.

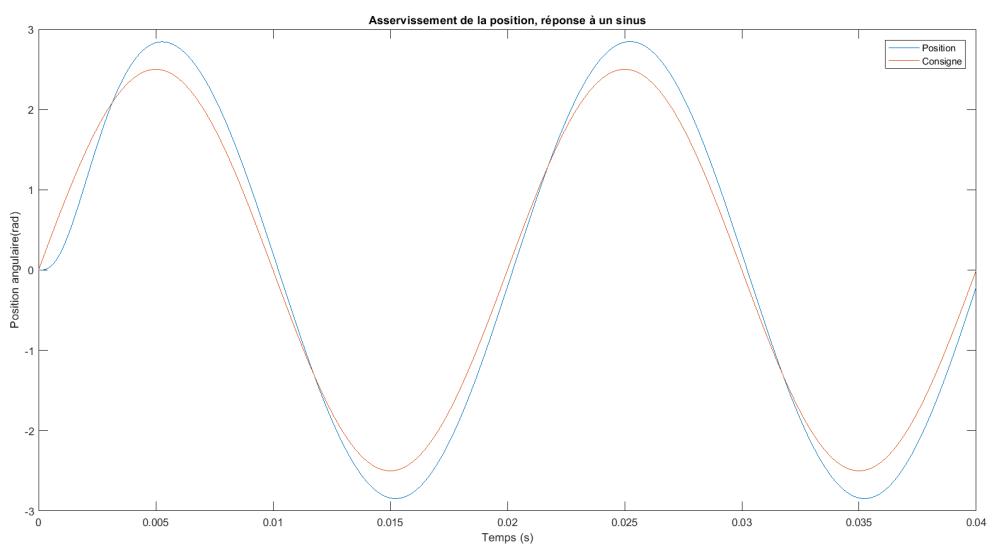


FIGURE 2.15 – Asservissement en position, pour une consigne sinusoïdale de 50Hz

Chapitre 3

Poursuite du projet

Pour ce qui est de la simulation, elle semble maintenant satisfaisante. Il reste cependant des tâches mineures :

- D'abord quelques modifications comme la simulation d'une pression sur le doigt de l'utilisateur
- Ensuite l'implémentation d'un système pour quantifier la durée de vie de la batterie

Nous passerons ensuite à la seconde grosse étape du projet, celle qui concerne la réalisation d'un banc d'essai pour le système. Le banc d'essai va être réalisé sur la base d'un microcontrôleur Nucleo F-401RE. Il contrôlera un driver de moteur IHM013A1 qui permettra d'exploiter le moteur. Le F-401RE sera programmé à l'aide de Matlab, principalement pour profiter des facilités d'implémentation et de modification de boucles d'asservissement, mais aussi et surtout pour permettre une exploitation des résultats des tests.

Dans ce but il faudra :

- Prendre en main la suite logicielle pour programmer le F-401RE
- Comprendre le fonctionnement du driver moteur pour pouvoir commander le moteur à souhait
- Concevoir l'électronique du banc de test
- Concevoir la mécanique du banc de test
- Trouver une solution pour mettre en place la mécanique de l'actionneur

Et enfin, il faudra continuer à développer la documentation sur le travail effectué, dans le but de permettre son éventuelle implantation dans la future gamme de produit.

Conclusion

Ce projet, s'il a eu ses difficultés comme toute entreprise humaine, a été l'occasion d'approfondir ou même de re-découvrir des concepts d'automatique, d'électronique, de mécanique. En un mot, il m'a permis de continuer la découverte maintenant bien entamée du métier d'ingénieur, métier qui ne se limite pas à un savoir-faire, mais s'étend à tous les besoins que peut nécessiter un projet et qui sont parfois loin des domaines pour lesquels nous nous formons.

De plus, il m'a fait sortir de ma zone de confort, me remettant en question sur ma capacité à tenir une démarche scientifique rigoureuse, et par là m'a permis d'améliorer mes méthodes de travail.