

Université de Toulon

IUT de Toulon

Département Génie Electrique et Informatique Industrielle (GEII)

Électronique Spécialisé

Mathlab MCCSimu

écrit le 26 janvier 2025

par

Bruno HANNA

Encadrant universitaire : Valentin GIES



Table des matières

Introduction	1
1 Pilotage en asservissement de position et de vitesse de la MCC	2
1.1 Boucle de vitesse	2
1.2 Calcul de la fonction de transfert en boucle ouverte	2
1.2.1 Effet d'un régulateur proportionnel	4
1.2.2 Analyse fréquentielle : Diagrammes de Bode	4
1.2.3 Réglage du régulateur PID	5
1.2.4 Réglage du gain K_{ppos} pour la position	6
1.2.5 Analyse d'un profil trapézoïdal	8
1.2.6 Mesure de l'énergie consommée pour un profil trapézoïdal	10
1.2.7 Étude de la consommation énergétique pour 10 radians avec différentes valeurs de K_{ppos}	11
1.2.8 Visualisation de la puissance instantanée pour différentes valeurs de K_{ppos}	13
1.3 Étude de l'impact de K_{pos} sur la stabilité et le suivi de la consigne	14
1.3.1 Analyse des résultats	16
1.3.2 Consommation d'énergie avec et sans limiteur de courant	16
2 Impact de l'implantation hardware des boucles de contrôle	18
2.1 Boucle de vitesse	18
2.1.1 Modélisation de l'échantillonnage	18
2.1.2 Analyse de la stabilité	18
2.1.3 Implantation sur PC ou microcontrôleur embarqué	19
2.1.4 Conclusion	20
2.2 Boucle de Position	20
2.2.1 Modélisation avec Échantillonnage	20
2.2.2 Effet de l'Échantillonnage sur la Stabilité	20
2.2.3 Analyse et Conclusion	21
Conclusion	23

Introduction

Dans le cadre de ce projet, il a été étudié et simulé le pilotage d'une machine à courant continu (MCC) en utilisant des boucles d'asservissement en vitesse et en position. L'objectif principal est d'évaluer les performances de ces boucles, tant en mode continu qu'échantillonné, en tenant compte des contraintes liées à une implantation matérielle (microcontrôleur ou PC). Les simulations ont été réalisées à l'aide de Simulink pour analyser les effets des différents paramètres, notamment les gains proportionnels (K_p et K_{pos}) et l'échantillonnage. il a également été étudié la consommation énergétique et la stabilité du système, ainsi que l'impact d'un limiteur de courant pour préserver les composants électriques.

Données initiales

Les paramètres utilisés pour les calculs sont :

$$\begin{aligned} J &= 0.28 & b &= 8.5 \times 10^{-3} \\ K &= 0.5093 & R &= 0.13 \\ L &= 1.6 \times 10^{-3} & C_r &= 0 \end{aligned}$$

Calculs des constantes

1. Constante de temps électro-mécanique (τ_{em}) :

$$\tau_{em} = \frac{JR}{K^2} \quad (1.1)$$

En substituant les valeurs :

$$\tau_{em} = \frac{0.28 \times 0.13}{(0.5093)^2} = \frac{0.0364}{0.2594} \approx 0.14 \text{ s} \quad (1.2)$$

2. Constante de temps électrique (τ_e) :

$$\tau_e = \frac{L}{R} \quad (1.3)$$

En substituant les valeurs :

$$\tau_e = \frac{1.6 \times 10^{-3}}{0.13} \approx 0.0123 \text{ s} \quad (1.4)$$

3. Gain statique (K_0) :

$$K_0 = \frac{1}{K} \quad (1.5)$$

En substituant les valeurs :

$$K_0 = \frac{1}{0.5093} \approx 1.96 \quad (1.6)$$

Fonction de transfert du système

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$H(s) = \frac{K_0}{(1 + \tau_{em}s)(1 + \tau_es)} \quad (1.7)$$

En remplaçant les valeurs calculées :

$$H(s) = \frac{1.96}{(1 + 0.14s)(1 + 0.0123s)} \quad (1.8)$$

Interprétation

- Cette fonction de transfert présente deux pôles stables correspondant aux constantes de temps τ_{em} (dominante) et τ_e .
- Le système peut être analysé pour sa stabilité, sa réponse fréquentielle (diagrammes de Bode) ou sa réponse temporelle.

1.2.1 Effet d'un régulateur proportionnel

Lorsqu'on introduit un régulateur proportionnel dans la boucle de contrôle, cela a pour effet de réduire l'erreur entre la consigne et la sortie. Cependant, un régulateur purement proportionnel présente une erreur statique non nulle. Dans notre cas, cette erreur statique a été mesurée à 4 unités.

La figure ci-dessous illustre cette erreur statique lors de l'application d'une consigne fixe à l'entrée du système :

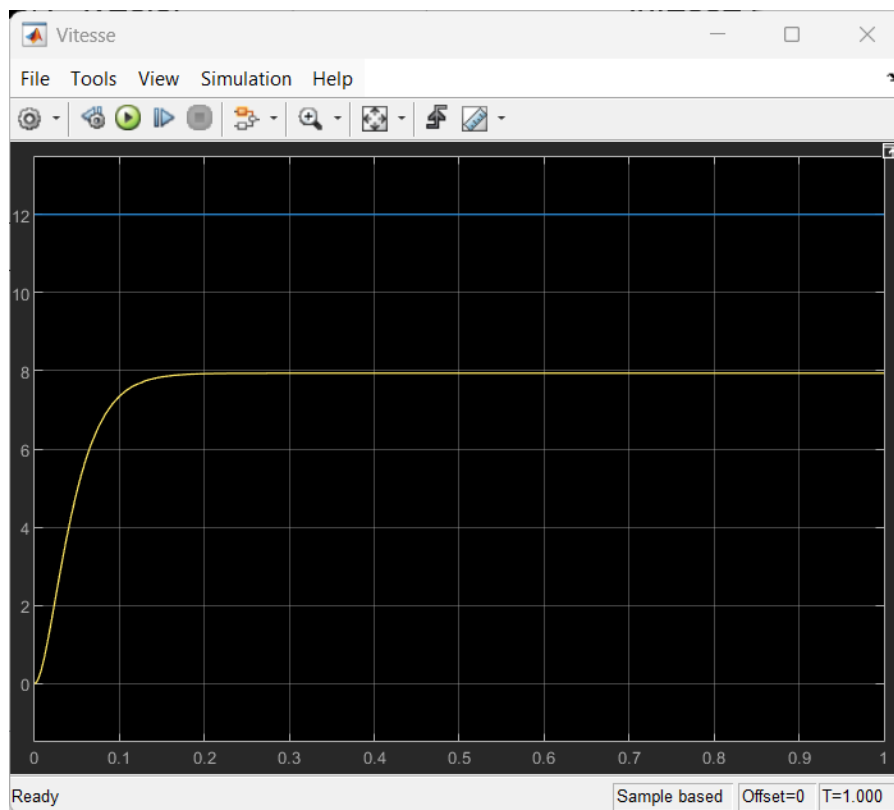


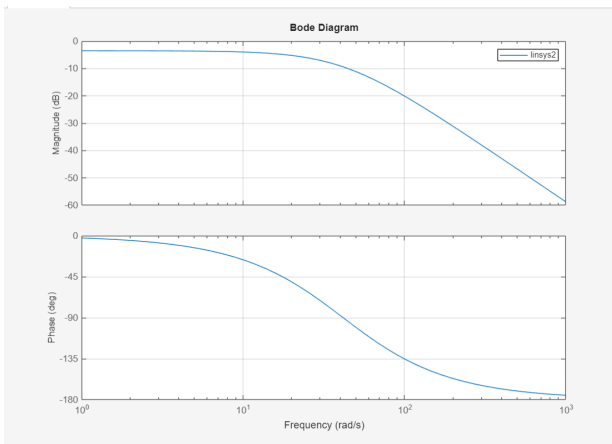
Figure 1.2 – Erreur statique avec un régulateur proportionnel

1.2.2 Analyse fréquentielle : Diagrammes de Bode

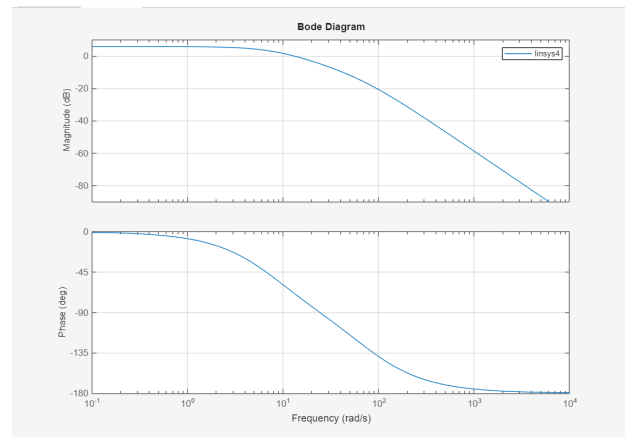
Pour analyser le comportement fréquentiel du système, les diagrammes de Bode en boucle ouverte et en boucle fermée ont été tracés.

Boucle ouverte : Le diagramme de Bode en boucle ouverte permet de visualiser la réponse fréquentielle du système sans rétroaction. Ce diagramme est présenté ci-dessous

Boucle fermée : Avec la boucle fermée, on observe que le comportement fréquentiel reste globalement similaire à celui de la boucle ouverte. Cela est dû à la faible influence du régulateur proportionnel sur la réponse fréquentielle. Le diagramme de Bode en boucle fermée est présenté ci-dessous :



(a) Diagramme de Bode en boucle ouverte



(b) Diagramme de Bode en boucle fermée

Figure 1.3 – Comparaison des diagrammes de Bode en boucle ouverte et fermée

Observation

En comparant les deux diagrammes de Bode, on constate que les courbes de magnitude et de phase sont très proches. Cela indique que l'introduction d'un régulateur proportionnel dans la boucle fermée n'affecte que légèrement le comportement fréquentiel global. Toutefois, en régime temporel, cela améliore partiellement le suivi de consigne, bien qu'une erreur statique persiste.

1.2.3 Réglage du régulateur PID

Pour améliorer la performance du système et réduire l'erreur statique observée avec un régulateur proportionnel simple, un régulateur PID a été introduit. Le réglage du PID a été réalisé en suivant la méthode de Ziegler-Nichols, qui consiste à déterminer les paramètres K_p , K_i , et K_d en fonction des caractéristiques dynamiques du système.

Méthode de réglage

La méthode de Ziegler-Nichols repose sur l'identification du point critique où le système oscille avec un gain proportionnel K_u et une période critique T_u . Les paramètres du PID sont ensuite calculés à l'aide des formules suivantes :

$$K_p = 0.6 \cdot K_u, \quad K_i = \frac{2 \cdot K_p}{T_u}, \quad K_d = \frac{K_p \cdot T_u}{8} \quad (1.9)$$

Valeurs obtenues

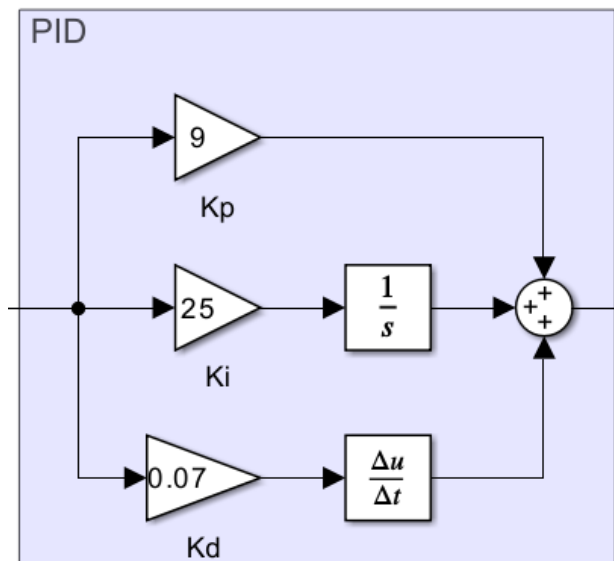
Après application de cette méthode, les paramètres du PID sont les suivants :

$$K_p = 9, \quad K_i = 25, \quad K_d = 0.07 \quad (1.10)$$

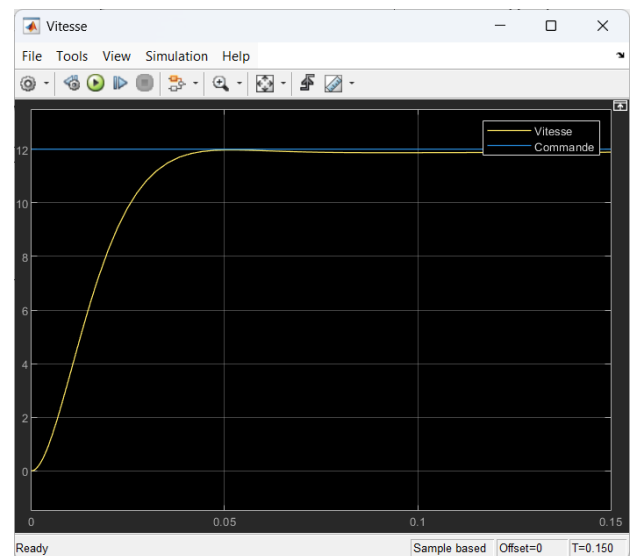
Ces valeurs permettent d'assurer un bon compromis entre rapidité, stabilité et minimisation de l'erreur de suivi.

Structure et performances du régulateur PID

La structure du régulateur PID implémentée dans Simulink et sa réponse temporelle en boucle fermée sont présentées ci-dessous :



(a) Structure du régulateur PID avec les paramètres réglés



(b) Réponse en vitesse avec un régulateur PID réglé

Figure 1.4 – Structure et performances du régulateur PID implémenté dans le système

Analyse des performances

Avec le régulateur PID, le système présente :

- Une réduction notable de l'erreur statique ;
- Une réponse rapide avec un temps de montée court (< 0.1 s) ;
- Un dépassement modéré et une stabilité assurée.

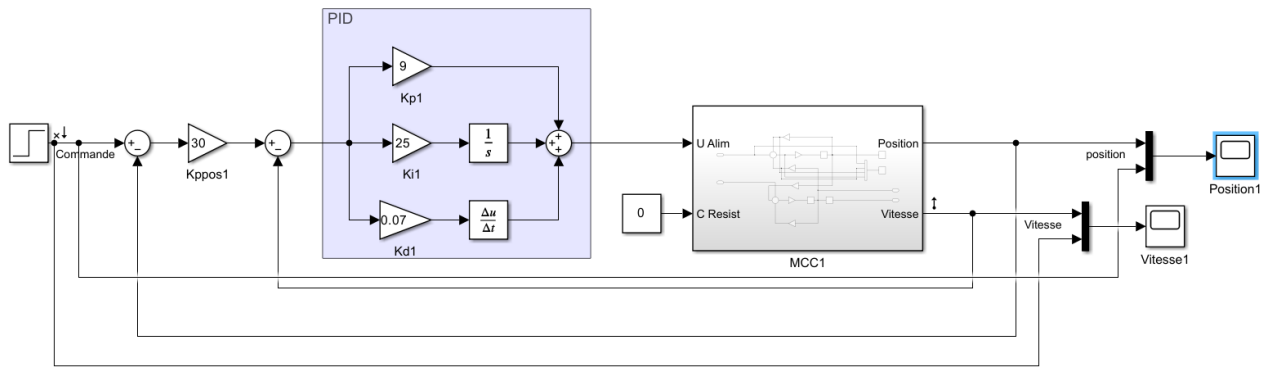
Le réglage PID s'avère ainsi adapté pour atteindre les objectifs de performance fixés pour ce système.

1.2.4 Réglage du gain $K_{p_{pos}}$ pour la position

Dans cette partie, l'effet du gain $K_{p_{pos}}$ a été étudié dans le régulateur position-vitesse. Ce gain détermine la rapidité avec laquelle le système atteint la position et la vitesse désirées.

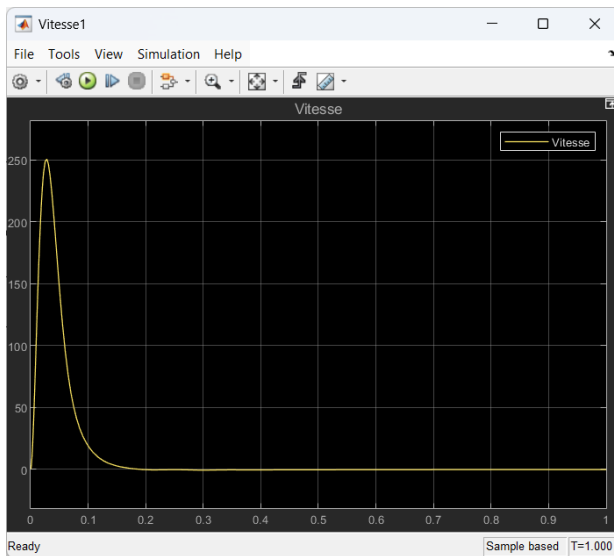
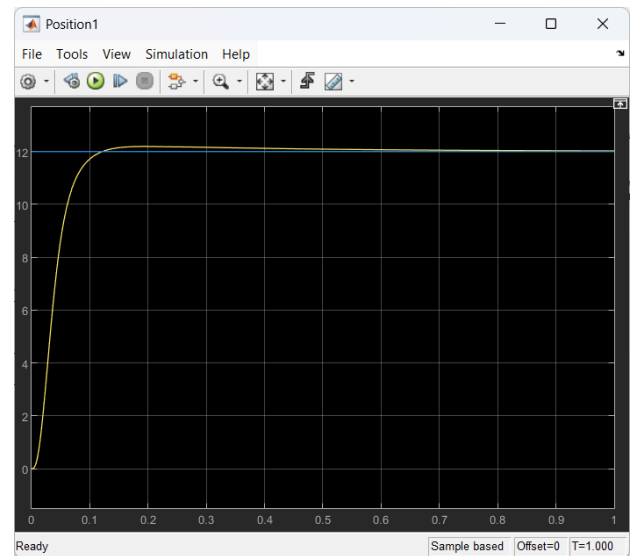
Schéma du système position-vitesse

Le schéma du système Simulink utilisé pour ces tests est présenté ci-dessous. Il intègre un régulateur PID réglé pour la position et la vitesse, avec un gain $K_{p_{pos}}$ ajustable.

Figure 1.5 – Schéma Simulink pour le régulateur position-vitesse avec réglage de Kp_{pos}

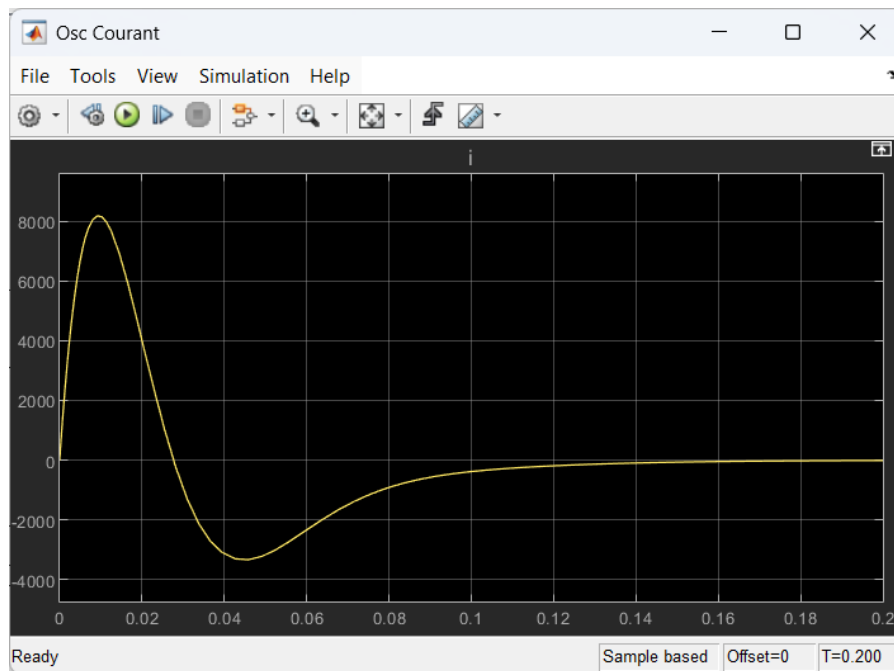
Optimisation avec $Kp_{pos} = 30$

Pour améliorer les performances, le gain Kp_{pos} a été réglé à une valeur de 30. Ce réglage permet au système de converger rapidement vers la position cible en environ 1 seconde, tout en atteignant la vitesse correcte de manière rapide et stable. Les réponses temporelles de la vitesse et de la position sont illustrées ci-dessous.

(a) Réponse en vitesse avec $Kp_{pos} = 30$ (b) Réponse en position avec $Kp_{pos} = 30$ Figure 1.6 – Réponses en vitesse et position du système avec $Kp_{pos} = 30$

Courant à l'intérieur du moteur

Le réglage de Kp_{pos} à une valeur de 30 impacte également le courant dans le moteur. Comme on peut le voir sur la figure ci-dessous, le courant présente une oscillation initiale importante avant de se stabiliser. Ces oscillations sont dues à l'effort initial fourni par le moteur pour atteindre rapidement la position désirée.

Figure 1.7 – Courant à l'intérieur du moteur pour $Kp_{pos} = 30$

Analyse des performances

Avec le réglage $Kp_{pos} = 30$, le système présente les performances suivantes :

- Un temps de montée rapide (environ 1 seconde) pour atteindre la position cible ;
- Une vitesse stabilisée rapidement avec peu ou pas de dépassement ;
- Une réduction notable du temps de réponse par rapport à $Kp_{pos} = 1$;
- Une stabilité globale adéquate sans oscillations excessives.

Le gain $Kp_{pos} = 30$ s'avère être un compromis optimal entre rapidité et stabilité pour répondre aux exigences de ce système.

1.2.5 Analyse d'un profil trapézoïdal

Proposition d'un profil pour parcourir 10 radians en 0.3s

Pour parcourir une distance angulaire de 10 rad en 0.3s, un profil trapézoïdal a été conçu et implémenté à l'aide du composant Repeating Sequence de Simulink. Les paramètres choisis pour ce profil sont :

- Temps de montée et de descente : $t_r = t_f = 0.3\text{ s}$;
- Amplitude maximale de la vitesse : $v_{\max} = 10\text{ rad/s}$.

Ces valeurs garantissent que l'aire sous la courbe (correspondant à $\int v(t)dt$) est égale à 10 rad. Le profil résultant est illustré ci-dessous :

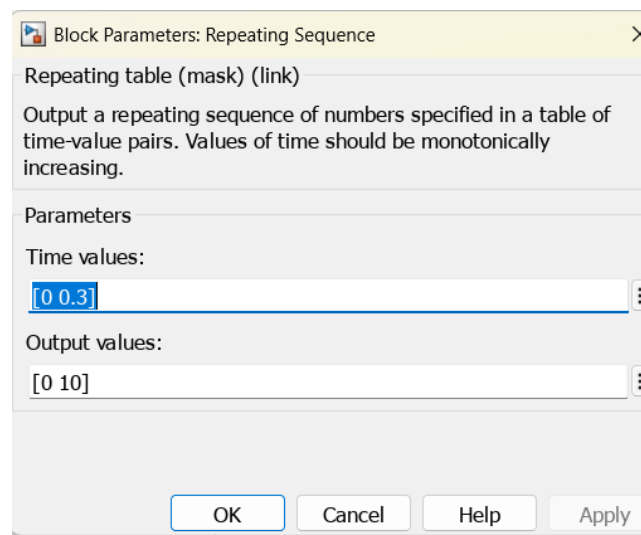


Figure 1.8 – Profil de vitesse trapézoïdal

Observation des variations de courant

En variant les paramètres du profil (temps de montée/descente et amplitude maximale), les changements observés sont significatifs dans la réponse du courant moteur. Le graphique ci-dessous montre le courant mesuré pour les paramètres choisis :

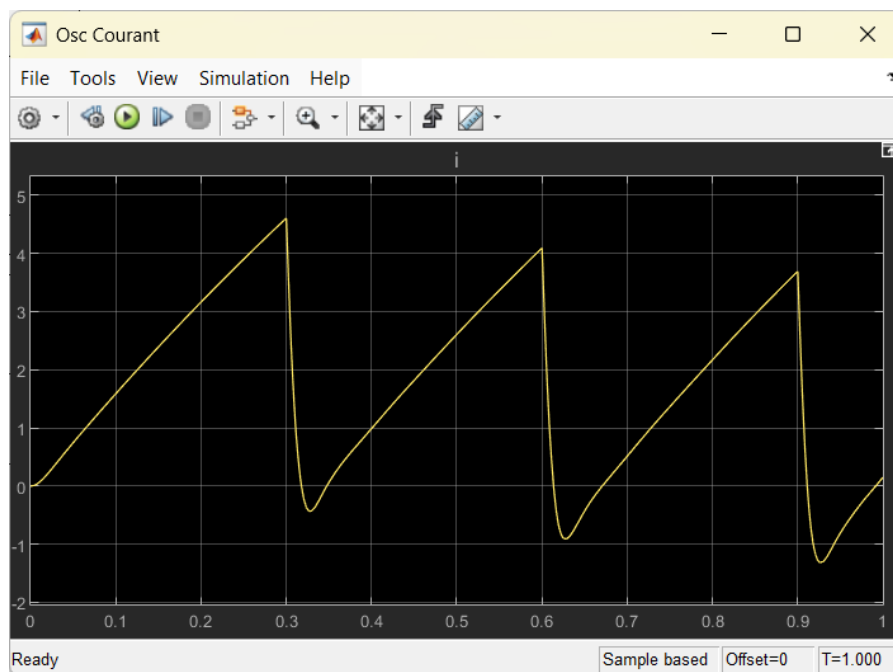


Figure 1.9 – Variation du courant moteur pour le profil trapézoïdal proposé

Analyse des variations : 1. Temps de montée/descente (t_r et t_f) : - Une augmentation de t_r et t_f réduit les pics de courant, rendant la commande plus douce et protégeant le moteur. - Une diminution de ces temps entraîne des variations rapides et des pics plus élevés, augmentant le risque de stress mécanique et électrique.

2. Amplitude maximale (v_{\max}) : - Une amplitude élevée entraîne des pics de courant plus im-

portants. - Une amplitude réduite diminue les pics, mais allonge la durée totale pour atteindre la position cible.

Les oscillations visibles dans le courant (voir figure 1.9) correspondent aux transitions entre les phases de montée, de plateau, et de descente du profil.

Intérêt d'une commande trapézoïdale

Le profil trapézoïdal offre plusieurs avantages pour le pilotage du moteur :

- Réduction des contraintes électriques et mécaniques : Les transitions progressives entre les phases de montée, plateau, et descente réduisent les à-coups, préservant les composants du système.
- Précision et fluidité : Le profil permet un contrôle précis de la position tout en minimisant les oscillations et les dépassements.
- Adaptabilité : En ajustant les paramètres (t_r, t_f, v_{\max}) , il est possible de trouver un compromis optimal entre rapidité et protection du système.

Les commandes trapézoïdales, combinées à un régulateur PID, sont particulièrement efficaces dans les applications industrielles.

1.2.6 Mesure de l'énergie consommée pour un profil trapézoïdal

Pour évaluer l'énergie consommée par la machine à courant continu (MCC) pour avancer de 10 radians en suivant un profil trapézoïdal, il a été mis en place un dispositif basé sur l'intégration de la puissance électrique au cours du temps.

Dispositif de mesure

L'énergie consommée (E) est calculée en intégrant la puissance électrique ($P(t)$) délivrée au moteur sur la durée totale du mouvement (T). La puissance est donnée par :

$$P(t) = U(t) \cdot i(t) \quad (1.11)$$

où $U(t)$ est la tension d'alimentation et $i(t)$ est le courant mesuré.

L'énergie totale est ensuite calculée comme :

$$E = \int_0^T P(t)dt = \int_0^T U(t) \cdot i(t)dt \quad (1.12)$$

Pour réaliser cette intégration, il a été utilisé un bloc intégrateur dans Simulink, configuré pour intégrer le produit de $U(t)$ et $i(t)$ sur la durée totale de $T = 0.3$ s.

Résultat de la mesure

Le graphique ci-dessous montre la position atteinte par la MCC en suivant le profil trapézoïdal, confirmant que la consigne de 10 radians est bien respectée. Simultanément, la mesure de l'énergie consommée a été réalisée.

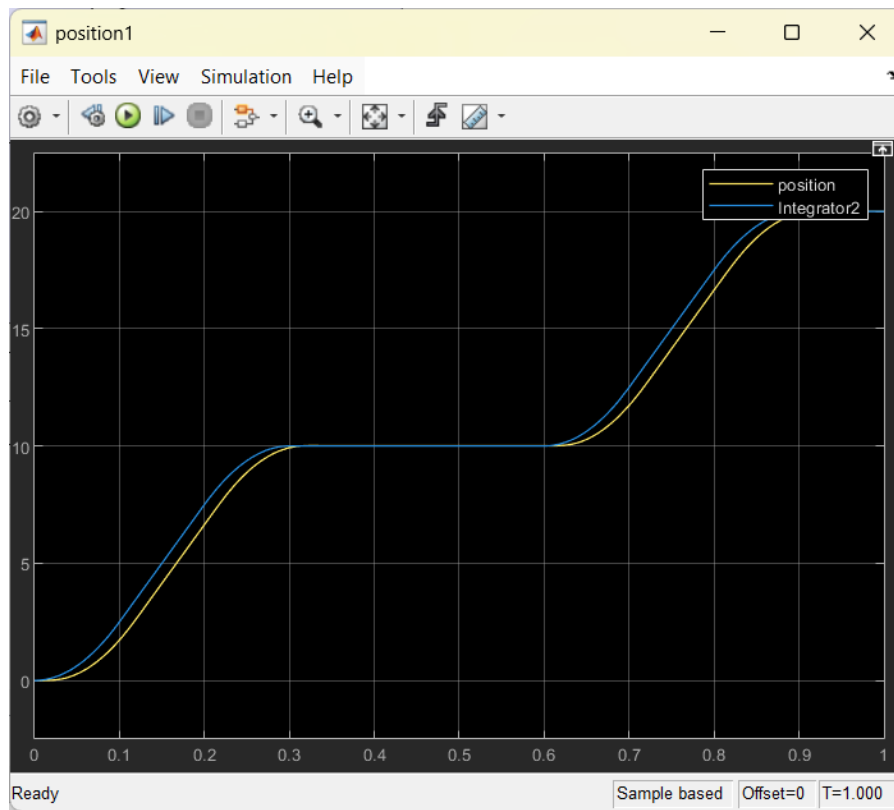


Figure 1.10 – Position atteinte pour un profil trapézoïdal et mesure de l'énergie consommée

Analyse des résultats

En suivant le profil trapézoïdal, l'énergie consommée est influencée par :

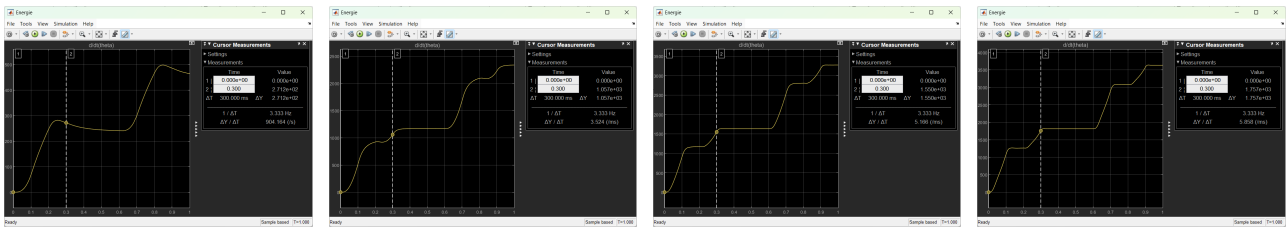
- Le courant ($i(t)$) : Les pics de courant pendant les phases de montée et de descente augmentent l'énergie consommée.
- La durée des phases (t_r, t_c, t_f) : Une phase constante plus longue (t_c) réduit les variations rapides de courant et optimise la consommation énergétique.
- L'amplitude de la vitesse (v_{\max}) : Une vitesse plus élevée consomme plus d'énergie.

1.2.7 Étude de la consommation énergétique pour 10 radians avec différentes valeurs de $K_{p_{pos}}$

Pour analyser l'impact de $K_{p_{pos}}$ sur la consommation énergétique, des essais ont été réalisés avec différentes valeurs du gain $K_{p_{pos}}$, permettant de comparer la rapidité du système et l'énergie consommée pour parcourir 10 radians.

Comparaison pour $K_{p_{pos}} = 5, 20, 40, 60$

Les graphiques suivants présentent les énergies consommées pour quatre valeurs intermédiaires de $K_{p_{pos}}$:



(a) $Kp_{pos} = 5 : 271.2 \text{ J}$ (b) $Kp_{pos} = 20 : 1057 \text{ J}$ (c) $Kp_{pos} = 40 : 1550 \text{ J}$ (d) $Kp_{pos} = 60 : 1757 \text{ J}$

Figure 1.11 – Énergie consommée pour $Kp_{pos} = 5, 20, 40, 60$.

Analyse des résultats

Les observations pour les différentes valeurs de Kp_{pos} sont les suivantes :

- $Kp_{pos} = 5$:
 - Faible consommation énergétique (271.2 J).
 - Temps de réponse long et faible réactivité du système.
- $Kp_{pos} = 20$:
 - Consommation énergétique modérée (1057 J).
 - Temps de réponse équilibré, avec un bon compromis entre rapidité et consommation.
- $Kp_{pos} = 40$:
 - Consommation énergétique élevée (1550 J).
 - Temps de réponse rapide, mais avec des pics de courant plus importants.
- $Kp_{pos} = 60$:
 - Consommation énergétique très élevée (1757 J).
 - Temps de réponse très rapide, mais des contraintes mécaniques et électriques plus significatives.

Conclusion sur le compromis rapidité-consommation

L'analyse met en évidence un compromis entre rapidité et consommation énergétique :

- Faibles valeurs de Kp_{pos} : Réduction de la consommation énergétique, mais au prix d'une lenteur du système.
- Valeurs élevées de Kp_{pos} : Meilleure réactivité et temps de réponse plus courts, mais une consommation accrue et des pics de courant plus importants.
- Valeurs intermédiaires ($Kp_{pos} \approx 20 - 40$) : Un compromis idéal entre rapidité et consommation énergétique, adapté aux applications nécessitant des performances équilibrées.

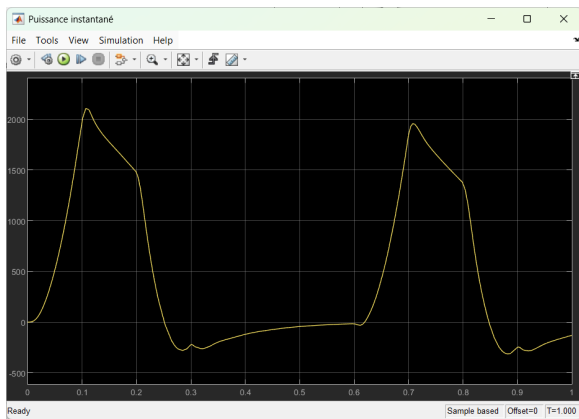
Ces résultats montrent que le choix de Kp_{pos} doit être effectué en fonction des exigences spécifiques de l'application, en tenant compte de la rapidité et de l'optimisation énergétique. À partir de $Kp_{pos} = 60$, les bénéfices en termes de rapidité deviennent marginaux par rapport à l'augmentation de la consommation énergétique.

1.2.8 Visualisation de la puissance instantanée pour différentes valeurs de $K_{p_{pos}}$

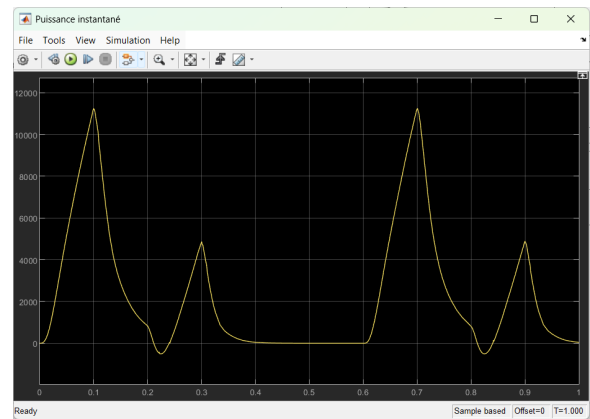
Pour chaque valeur de $K_{p_{pos}}$ étudiée ($K_{p_{pos}} = 5, 20, 40, 60$), la puissance instantanée consommée par la MCC a été mesurée et visualisée. Cela permet d'évaluer l'impact du gain $K_{p_{pos}}$ sur le comportement énergétique de la machine, en particulier lors des phases de freinage.

Graphiques de la puissance instantanée

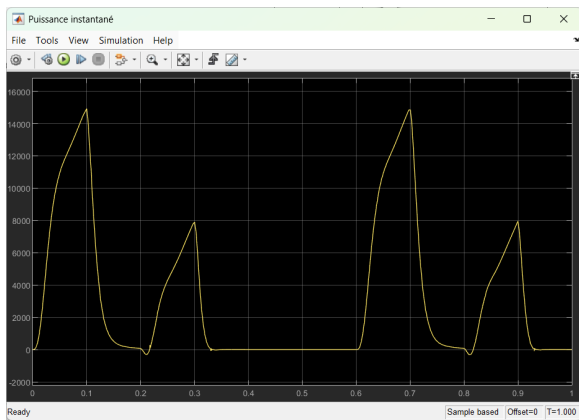
Les graphiques suivants montrent la puissance consommée pour chaque valeur de $K_{p_{pos}}$:



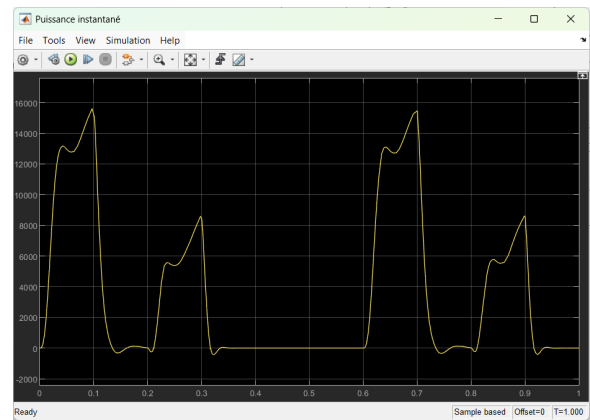
(a) $K_{p_{pos}} = 5$



(b) $K_{p_{pos}} = 20$



(c) $K_{p_{pos}} = 40$



(d) $K_{p_{pos}} = 60$

Figure 1.12 – Puissance instantanée consommée pour différentes valeurs de $K_{p_{pos}}$.

Analyse des résultats

- $K_{p_{pos}} = 5$:
 - La puissance est faible et les pics sont modérés.
 - L'énergie renvoyée lors du freinage est significative, indiquée par des valeurs négatives.
- $K_{p_{pos}} = 20$:
 - Les pics de puissance augmentent, en particulier lors des transitions.

- L'énergie renvoyée diminue mais reste présente.
- $K_{p_{pos}} = 40$:
 - Les pics de puissance sont élevés.
 - La quantité d'énergie renvoyée devient négligeable.
- $K_{p_{pos}} = 60$:
 - Les pics de puissance atteignent des valeurs très élevées.
 - Il n'y a plus d'énergie renvoyée par la MCC lors du freinage.

Seuil de renvoi d'énergie

À partir de $K_{p_{pos}} = 40$, l'énergie renvoyée par la MCC lors du freinage devient négligeable. Pour $K_{p_{pos}} = 60$, la machine ne renvoie plus aucune énergie, ce qui s'explique par une commande plus agressive qui entraîne une dissipation totale de l'énergie en interne, sans restitution au réseau ou au freinage.

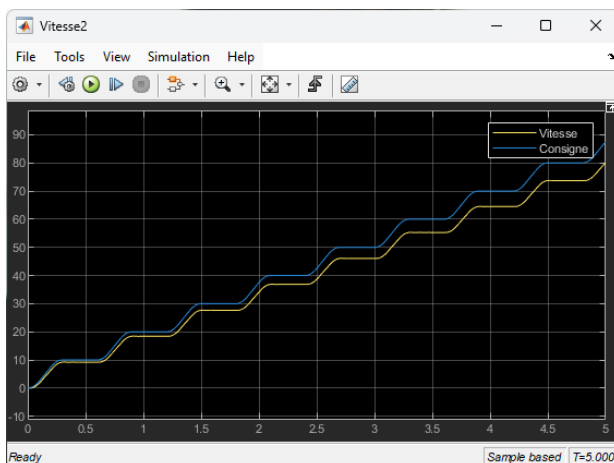
Ce comportement indique qu'un gain $K_{p_{pos}}$ élevé favorise une réponse rapide, mais au détriment de l'efficacité énergétique globale. Le choix de $K_{p_{pos}}$ doit donc prendre en compte cet effet pour éviter des pertes excessives.

1.3 Étude de l'impact de K_{pos} sur la stabilité et le suivi de la consigne

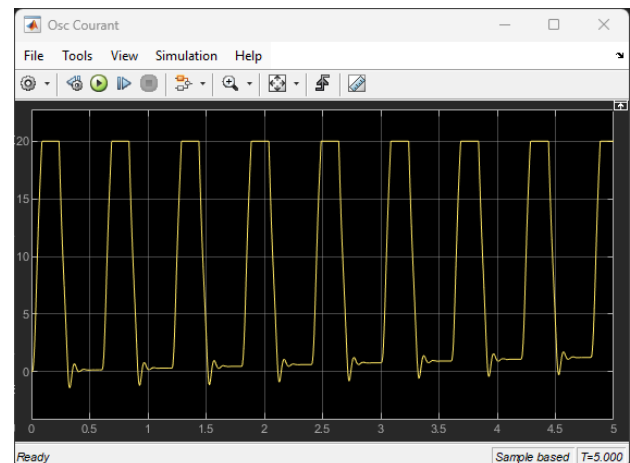
Cas $K_{pos} = 6$

Vitesse : Le profil de vitesse suit parfaitement la consigne trapézoïdale. Pas d'instabilité observable dans le système.

Courant : Le courant reste stable et ne montre pas de variations importantes ou de pics significatifs.



(a) Vitesse pour $K_{pos} = 6$

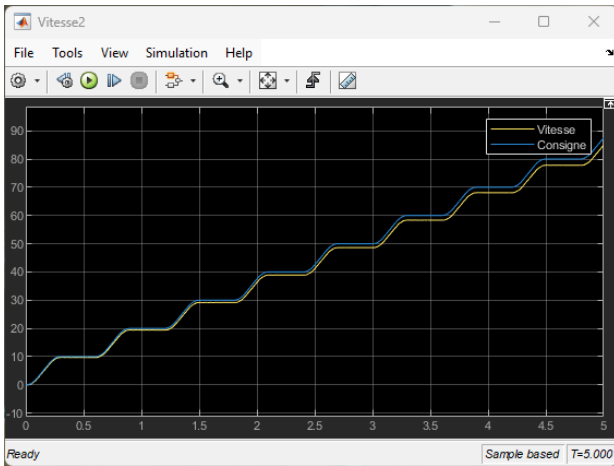


(b) Courant pour $K_{pos} = 6$

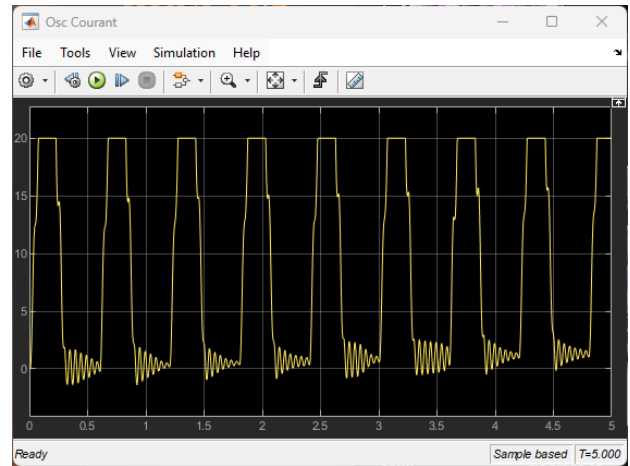
Cas $K_{pos} = 18$

Vitesse : Le système commence à montrer des petites oscillations autour de la consigne, mais le suivi reste acceptable.

Courant : On observe une augmentation des variations du courant avec des oscillations plus prononcées.



(a) Vitesse pour $K_{pos} = 18$

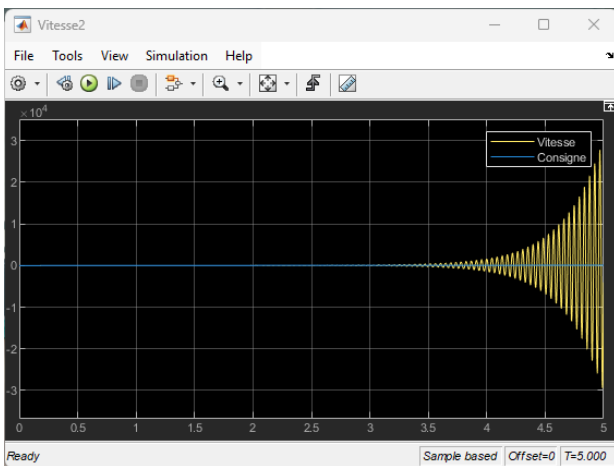


(b) Courant pour $K_{pos} = 18$

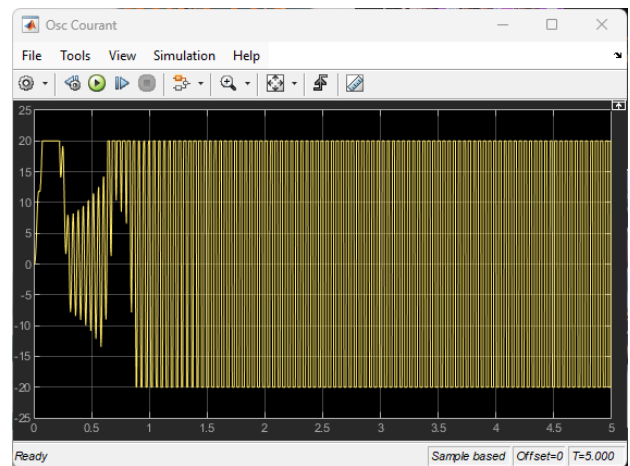
Cas $K_{pos} = 20$

Vitesse : À partir de cette valeur de K_{pos} , les oscillations deviennent plus importantes et une différence notable apparaît entre la consigne et le profil de vitesse. La stabilité commence à être compromise.

Courant : Le courant présente des pics élevés et des oscillations significatives, indiquant un comportement potentiellement instable du système.



(a) Vitesse pour $K_{pos} = 20$



(b) Courant pour $K_{pos} = 20$

1.3.1 Analyse des résultats

Stabilité : Le système reste stable pour des valeurs de K_{pos} faibles (≤ 6). À partir de $K_{pos} = 18$, la stabilité est partiellement compromise, bien que le suivi reste correct. À $K_{pos} = 20$ et au-delà, le système devient instable, avec des écarts notables entre la consigne et la vitesse réelle.

Courant : Les pics de courant augmentent de manière proportionnelle à K_{pos} . Ces oscillations de courant peuvent entraîner une surcharge du hacheur ou des risques pour la machine à courant continu.

Consigne vs Vitesse : À $K_{pos} > 20$, le système est incapable de suivre la consigne correctement, avec des oscillations accrues et un retard plus important sur les transitions trapézoïdales.

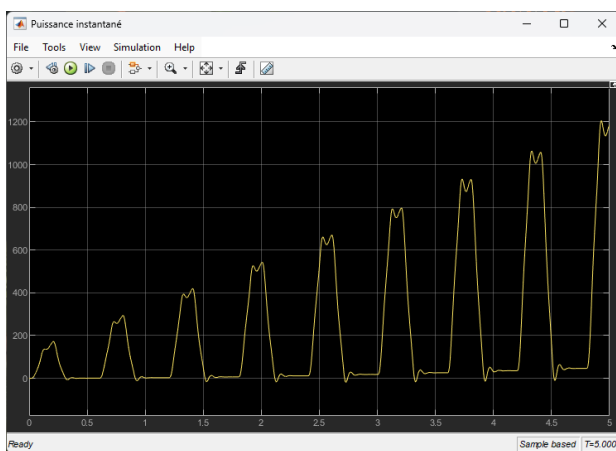
Impact de K_{pos} sur la stabilité : Des valeurs élevées de K_{pos} (≥ 20) rendent le système instable, en raison des oscillations amplifiées et des pics de courant.

Impact sur la performance : Les faibles valeurs de K_{pos} garantissent une bonne stabilité et un suivi fidèle de la consigne, au prix d'une réponse plus lente.

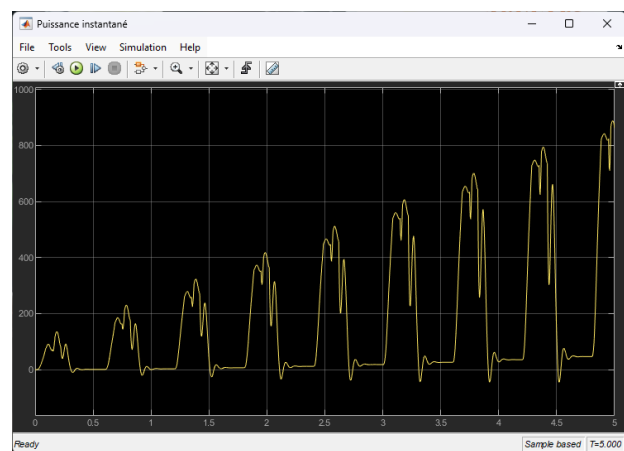
Conclusion : Choisir un K_{pos} modéré (autour de 6 à 18) pour assurer un compromis entre stabilité et rapidité. L'ajout d'un limiteur de courant est essentiel pour protéger le système contre des pics dangereux observés à des K_{pos} élevés.

1.3.2 Consommation d'énergie avec et sans limiteur de courant

Les graphiques suivants comparent la puissance instantanée consommée par le système dans deux configurations : sans limiteur de courant et avec un limiteur de courant actif.



(a) Sans limiteur de courant.



(b) Avec limiteur de courant

Sans limiteur de courant :

Dans le cas sans limiteur, la puissance instantanée reste relativement stable, mais des oscillations modérées apparaissent avec des valeurs positives constantes.

Avec limiteur de courant :

Avec le limiteur de courant actif, on observe des phénomènes marqués :

- De fortes chutes de puissance instantanée, qui atteignent des valeurs négatives importantes avant une remontée.
- Une amplitude de puissance instantanée significativement plus élevée.

Ces variations sont dues au fait que le limiteur de courant force la réduction de l'intensité, ce qui impacte directement la puissance fournie au système. Les variations négatives traduisent également des phases de freinage où l'énergie est renvoyée au système.

Conclusion :

Bien que le limiteur introduise des variations importantes, il protège le système des surcharges de courant en limitant sa valeur maximale. Cette protection garantit que le hacheur et la MCC ne subissent pas de dommages, mais au prix d'une dynamique énergétique plus instable.

Impact de l'implantation hardware des boucles de contrôle

2.1 Boucle de vitesse

Dans cette section, la présentation de l'effet de l'échantillonnage et la faisabilité d'implanter l'asservissement de vitesse sur un microcontrôleur embarqué ou sur un PC.

2.1.1 Modélisation de l'échantillonnage

La boucle d'asservissement en vitesse est réalisée à temps discret, échantillonnée à une fréquence de 250 Hz, avec un temps de calcul de 2 ms. Pour simuler ce comportement, un bloc de délai (*Transport Delay*) a été intégré au modèle.

Le schéma général du modèle est présenté ci-dessous :

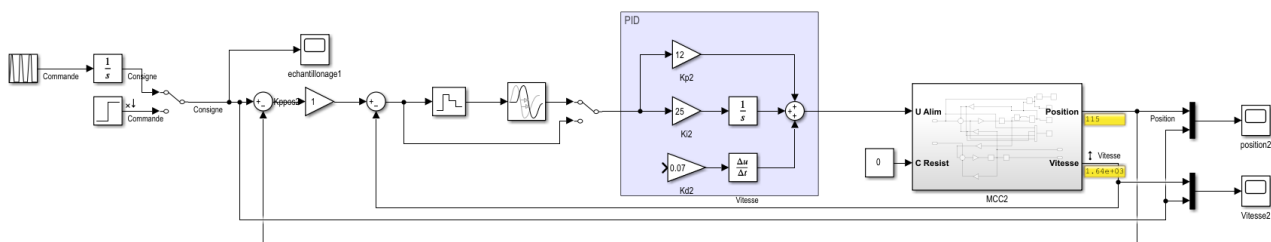


Figure 2.1 – Schéma de la boucle de vitesse avec échantillonnage

2.1.2 Analyse de la stabilité

Pour évaluer l'effet de l'échantillonnage sur la stabilité, le gain proportionnel a progressivement été augmenté K_p et comparé les comportements dans les cas échantillonné et non échantillonné.

Cas non échantillonné

Dans le cas non échantillonné, le système reste stable pour des valeurs de K_p élevées. Les réponses pour $K_p = 9$ et $K_p = 12$ sont présentées ci-dessous :

Cas échantillonné

Dans le cas échantillonné, le système devient instable pour $K_p > 12$. On observe des oscillations croissantes et une dégradation de la performance. Les réponses pour $K_p = 9$ et $K_p = 12$ sont

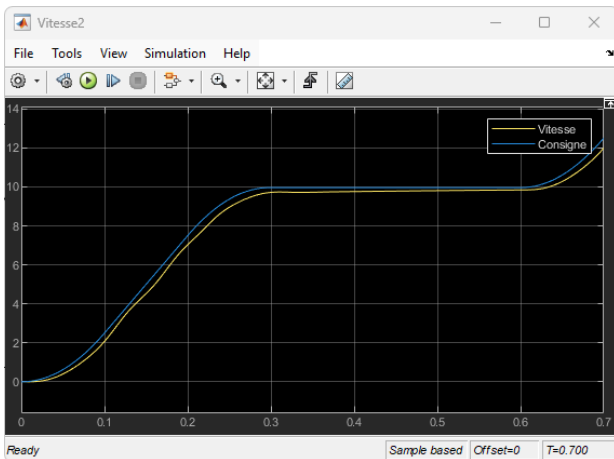
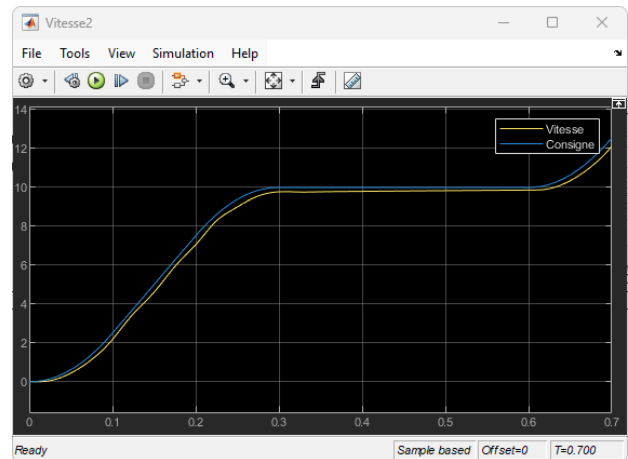
(a) $K_p = 9$ (b) $K_p = 12$

Figure 2.2 – Réponses pour le cas non échantillonné

illustrées ci-dessous :

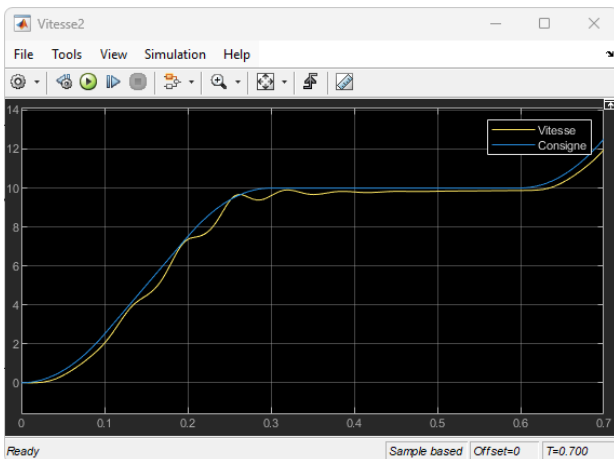
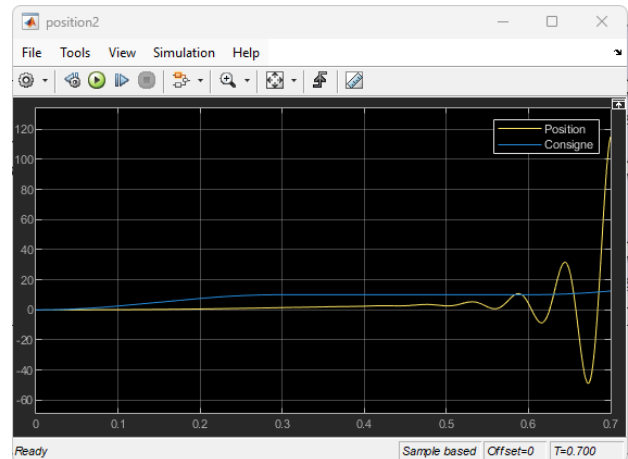
(a) $K_p = 9$ (b) $K_p = 12$

Figure 2.3 – Réponses pour le cas échantillonné

2.1.3 Implantation sur PC ou microcontrôleur embarqué

Microcontrôleur embarqué

L'implémentation sur un microcontrôleur embarqué avec une fréquence d'échantillonnage de 250 Hz et un temps de calcul de 2 ms est faisable et garantit des performances acceptables pour des valeurs raisonnables de K_p ($K_p \leq 12$). Cependant, des ressources limitées du microcontrôleur peuvent imposer des contraintes supplémentaires (mémoire, temps de calcul, etc.).

PC

Dans le cas d'un asservissement déporté sur un PC, la fréquence d'échantillonnage peut être limitée par les délais de communication et de transmission. Ces délais peuvent être non constants, entraînant des instabilités ou une perte de performance. Une modélisation additionnelle des délais dans Simulink (via le bloc permet d'évaluer ces effets.

2.1.4 Conclusion

- Microcontrôleur embarqué : L'implantation est faisable avec un K_p raisonnable et une fréquence d'échantillonnage élevée (≥ 250 Hz).
- PC : L'implantation est moins adaptée en raison des délais variables de communication. Une fréquence d'échantillonnage constante et élevée est difficile à maintenir.
- Fréquence minimale d'échantillonnage : Une fréquence d'au moins 250 Hz est nécessaire pour garantir la stabilité et éviter les oscillations.

2.2 Boucle de Position

Dans cette section, il a été étudié la boucle d'asservissement en position, réalisée en temps discret avec un échantillonnage à 250 Hz et un temps de calcul d'environ 2 ms. Voici les résultats de cette étude :

2.2.1 Modélisation avec Échantillonnage

Une modélisation a été effectuée pour prendre en compte l'échantillonnage à 250 Hz et le délai de calcul. Le schéma suivant illustre cette configuration :

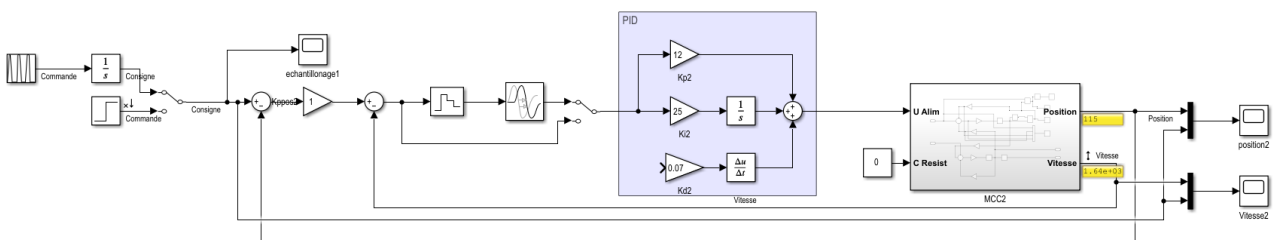


Figure 2.4 – Modèle avec échantillonnage pour la boucle de position

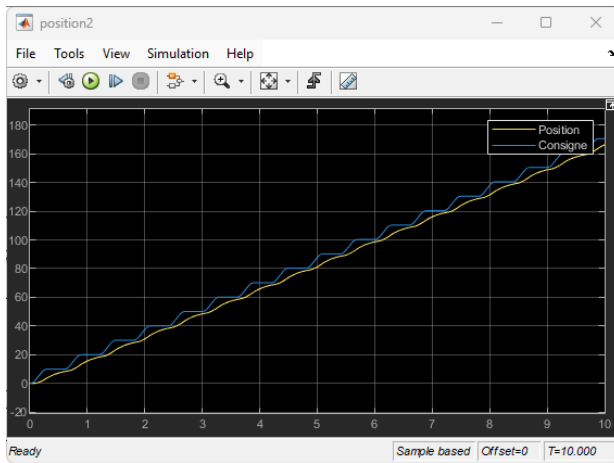
2.2.2 Effet de l'Échantillonnage sur la Stabilité

Les tests ont été réalisés avec des valeurs progressives de $K_{p\text{pos}}$ dans les cas suivants :

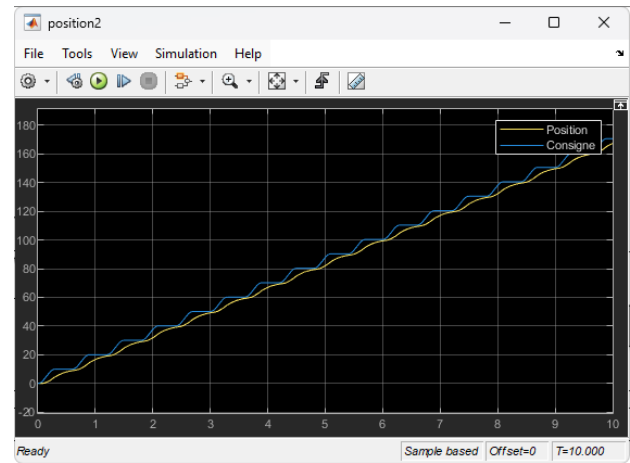
- Non-échantillonné avec $K_{p\text{pos}} = 4$ et $K_{p\text{pos}} = 5$;
- Échantillonné avec $K_{p\text{pos}} = 4$ et $K_{p\text{pos}} = 5$.

Résultats Non-Échantillonnés

Pour la configuration non-échantillonnée, même avec une augmentation de K_p , la stabilité de la boucle reste satisfaisante. Les résultats sont présentés ci-dessous :



(a) Non-échantillonné avec $K_{pos} = 4$

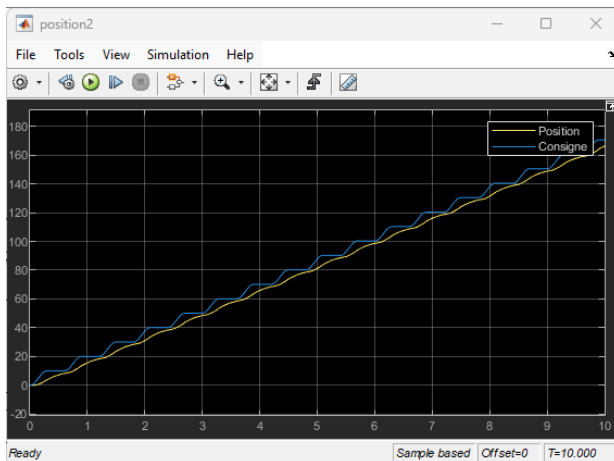


(b) Non-échantillonné avec $K_{pos} = 5$.

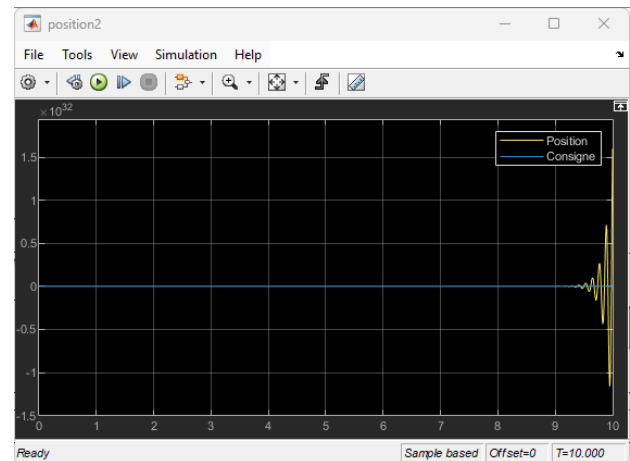
Figure 2.5 – Résultats pour le système non-échantillonné

Résultats Échantillonnés

Dans la configuration échantillonnée, une augmentation du gain K_{pos} au-delà de 4 conduit à des oscillations importantes et une instabilité accrue. Les résultats sont illustrés ci-dessous :



(a) Échantillonné avec $K_{pos} = 4$



(b) Échantillonné avec $K_{pos} = 5$

Figure 2.6 – Résultats pour le système échantillonné

2.2.3 Analyse et Conclusion

Non-échantillonné :

- Augmenter K_p n'a pas d'impact significatif sur la stabilité. Les performances restent acceptables.

Échantillonné :

- Avec $K_{p\text{pos}} = 4$, le système reste stable.
- Avec $K_{p\text{pos}} = 5$, des oscillations significatives apparaissent, et le système devient instable.

Ces résultats montrent que l'échantillonnage réduit la tolérance du système à une augmentation du gain $K_{p\text{pos}}$, ce qui impose des limites plus strictes sur la conception des contrôleurs en mode discret.

Conclusion sur l'implantation :

L'implantation de l'asservissement de position sur le PC est possible, mais les limitations dues à l'échantillonnage doivent être soigneusement prises en compte. Une fréquence d'échantillonnage élevée et une minimisation des délais de calcul et de transmission sont nécessaires pour assurer la stabilité du système. Sur l'embarqué, ces contraintes sont plus facilement respectées grâce à des temps de réponse plus courts et une meilleure intégration matérielle.

Conclusion

Cette étude a permis de démontrer l'importance du choix des paramètres de contrôle dans les boucles d'asservissement en vitesse et en position, ainsi que l'impact de l'échantillonnage et des contraintes matérielles sur les performances globales du système.

Les résultats principaux peuvent être résumés comme suit :

- Les systèmes échantillonnés présentent des limitations en termes de stabilité, notamment pour des valeurs élevées des gains proportionnels (K_p et K_{pos}). À partir de seuils critiques, des oscillations apparaissent, compromettant les performances.
- Les systèmes non échantillonnés sont globalement plus tolérants à des variations de paramètres et restent stables pour des gains plus élevés, bien qu'ils ne reflètent pas les contraintes réelles liées à une implantation matérielle.
- L'ajout d'un limiteur de courant permet de protéger le hacheur et la MCC, mais entraîne des variations importantes de la puissance instantanée, nécessitant une conception soignée du régulateur.
- La consommation énergétique augmente avec le gain proportionnel, ce qui impose un compromis entre la rapidité du système et son efficacité énergétique.
- En termes d'implantation matérielle, un microcontrôleur offre une meilleure intégration et une fréquence d'échantillonnage constante, adaptée pour des applications embarquées. En revanche, une implantation sur PC est plus complexe en raison des délais de transmission variables et de la nécessité de synchronisation précise.

En conclusion, le choix des paramètres de contrôle et du support matériel doit être fait en fonction des exigences spécifiques de l'application (rapidité, stabilité, efficacité énergétique).