

IV.1 INTRODUCTION

Ce chapitre traite le réglage de la position et la vitesse du moteur à courant continu (MCC) alimenté par un convertisseur statique. L'induit du moteur à courant continu est alimenté par un convertisseur de courant bidirectionnel, c'est le hacheur en pont H, ce qui permet le freinage électrique ou une inversion du sens de rotation.

Dans le contexte de ce travail, On considère que les paramètres mécaniques et électriques de la machine sont inconnus. Alors, les méthodes de calcul des régulateurs à base de modèle ne nous serviront plus. Nous allons donc, faire recours à une méthode empirique très répandue en pratique. On développera une commande en cascade de la MCC, où deux grandeurs d'état sont à régler, il s'agit de la vitesse mécanique du rotor dans la boucle interne et la position angulaire du rotor dans la boucle externe.

Après une description succincte du concept de l'asservissement et des différentes actions du régulateur PID, on passe, dans ce qui suit, aux différentes expériences en simulation pour l'identification de la fonction de transfert de l'association moteur/convertisseur. Le régulateur dimensionné par la méthode de ZIEGLER-NICHOLS sera testé en boucle fermée.

IV.2 Généralité sur les systèmes asservis :

Le principe d'un système asservi est donné par le schéma suivant :

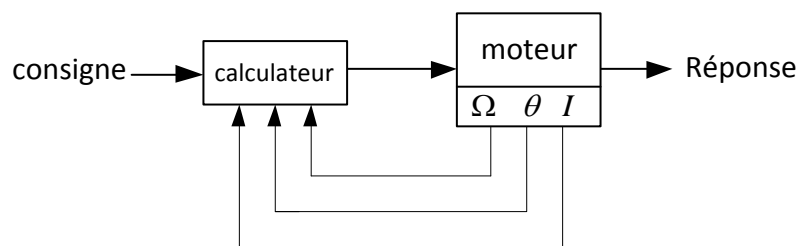


Figure 4.1 : schéma d'un système asservi.

Un système asservi doit être suffisamment robuste pour garantir trois niveaux des performances :

- Sa stabilité.
- Une bonne précision statique.
- Une rapidité suffisante.

Stabilité

Le correcteur doit assurer la stabilité du système. Ceci exige que les réactions du système de régulation soient énergétiques sans être disproportionnées avec l'erreur à corriger.

Précision

La précision est définie, à partir de l'erreur entre la grandeur de consigne et la grandeur de sortie.

En régulation, la précision est obtenue par l'implantation d'intégration dans la boucle .

Rapidité

En général, le système doit répondre rapidement à la variation de sa consigne et des Perturbation. Il a une rapidité satisfaisante s'il se stabilise à son niveau constant en un temps jugé Satisfaisant [3].

IV.2.1 Les Régulateurs PID : (P: Proportion, I : Intégration et D : Dérivation)

Ce genre de correcteurs se trouve souvent dans l'industrie dû à son efficacité dans le quasi-totalité des boucles de commande ainsi que pour sa simplicité de mise en œuvre.

IV.2.1.a Régulateur proportionnel (P): Il est de loin le plus utilisé car sa conception est simple (amplificateur) et facile à mettre en œuvre. Le rôle de l'action P est de réduire l'erreur de réglage. On utilise un régulateur P lorsque la précision n'est pas importante. Le réglage par exemple du niveau d'eau dans un réservoir de stockage. L'action P est souvent suffisante pour régler plusieurs systèmes dans l'industrie. Néanmoins, il subsiste toujours un écart appelé écart de statisme. Cet écart n'est pas et ne peut pas être corrigé par ce régulateur. Il est simple à réaliser (simple amplificateur) d'où son grand avantage. Dans l'industrie tous les processus annexes (utilités, stockage etc.) sont conduits par des régulateurs P (pneumatiques en général)

$$U(t) = K_p e(t) . \quad (4.1)$$

$$U(p) = K_p . E(p) \quad (4.2)$$

$$C(p) = K_p \quad (4.3)$$

IV.2.1.b Régulateur proportionnel et Intégral (PI) : Le rôle principal de l'action intégrale est d'éliminer l'erreur statique. Toutefois l'augmentation de l'action intégrale produit une instabilité. Dans l'industrie, on utilisera l'action I chaque fois que nous avons besoin, pour des raisons technologiques, d'avoir une précision parfaite. Exemple : la régulation de la pression ou température dans un réacteur nucléaire. De plus, il faut souligner que l'action I est un filtre donc il est intéressant de l'utiliser pour le réglage des paramètres très dynamiques tels que la pression.

$$U(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt \quad (4.4)$$

$$U(p) = K_p.E(p) + \frac{K_I.E(p)}{P} \quad (4.5)$$

$$C(p) = K_p.(1 + \frac{1}{\tau_I.P}) \quad (4.6)$$

IV.2.1.c Régulateur proportionnel, intégral et dérivé (PID): L'action dérivée compense les effets du temps mort du processus tant que celui-ci ne dépasse pas la moitié de la constante de temps du procédé. Elle a un effet stabilisateur. La présence de l'action dérivée permet donc d'augmenter la rapidité du système. Dans l'industrie, l'action D n'est jamais utilisée seule mais en général avec l'action intégrale. On recommande de l'utiliser pour le réglage des paramètres lents tels que la température [1].

$$U(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4.7)$$

$$U(p) = K_p.E(p) + \frac{K_I.E(p)}{P} + K_D.E(p).p \quad (4.8)$$

$$C(p) = K_p.(1 + \frac{1}{\tau_I.P} + \tau_D.p) \quad (4.9)$$

IV.2.2 Discrétisation des actions du régulateur PID:

Pour l'implantation des régulateurs PID sur ordinateur, nous devrions passer à leurs versions numériques. Pour ce faire une discrétisation des actions précédentes est considérée dans le paragraphe suivant [5].

IV.2.2.a Discrétisation de la dérivée :

$$\frac{\partial x}{\partial t}(KT_e) \approx \frac{X(k) - X(k-1)}{T_e} \quad (4.10)$$

D'où on approchera la dérivée par

$$Z \left[\frac{\partial x}{\partial t}(KT_e) \right] \approx \frac{1}{T_e} (1 - z^{-1}) X(z) \quad (4.11)$$

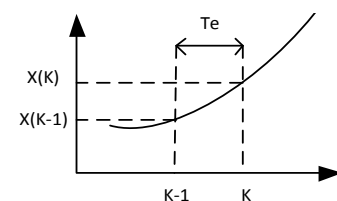


Figure 4.2 : approche numérique au dérivé.

IV.2.2.b Discretisation de l'intégrale:

$$\text{Soit : } I(t) = \int_0^t X(u) . du$$

En domaine de Laplace on écrit :

$$I(p) = \frac{1}{p} X(p) \quad (4.12)$$

$$X(p) = p . I(p) \quad (4.13)$$

D'après l'équation 4.10, on écrit :

$$I(k) = I(k-1) + T_e . X(k) \quad (4.14)$$

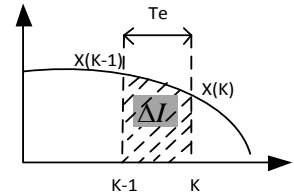


Figure 4.3 : approche à l'intégrale.

D'où on approchera l'intégrale par :

$$I(z) = z^{-1} . I(z) + T_e . X(z) \quad (4.15)$$

IV.3 PRINCIPE DE LA REGULATION D'UNE MACHINE DC :

La boucle de commande est généralement en cascade (boucle imbriquée) et elle est montée par la figure ci-dessous. Dans certaines applications par exemple la robotique, deux grandeurs doivent être contrôlées : la boucle de vitesse et la boucle de position. La réponse de commande de vitesse est rapide par rapport à la réponse de commande de position. Les régulateurs utilisés sont de type PID:

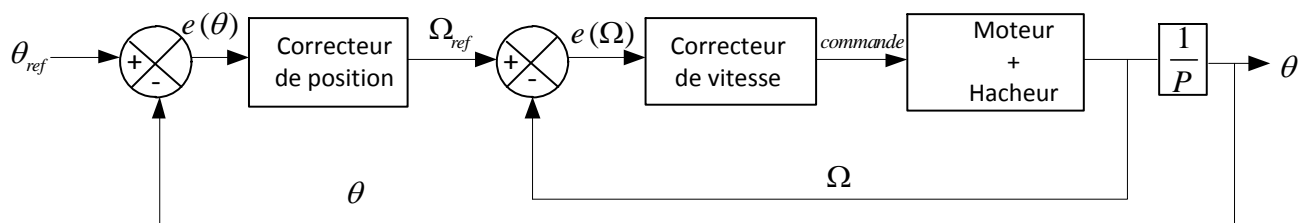


Figure 4.4 : commande en cascade d'un moteur DC.

IV.3.1 Méthode adoptée :

Le modèle de la machine DC qu'on veut commander est donné par le schéma suivant. Pour calculer un régulateur adéquat nous devrions disposer des valeurs des différentes constantes mécaniques et électriques du modèle. Malheureusement ces valeurs sont considérées inconnues.

Il existe plusieurs méthodes empiriques de calcul des paramètres du régulateur PID et sont basées sur les spécifications temporelles (Méthodes empiriques de Ziegler et Nicols, Méthodes paramétriques) et les spécifications fréquentielles (Diagramme de Bode, Nyquist, lieux des pôles..), dans ce travail on a utilisé la méthode empirique de Ziegler et Nichols [1].

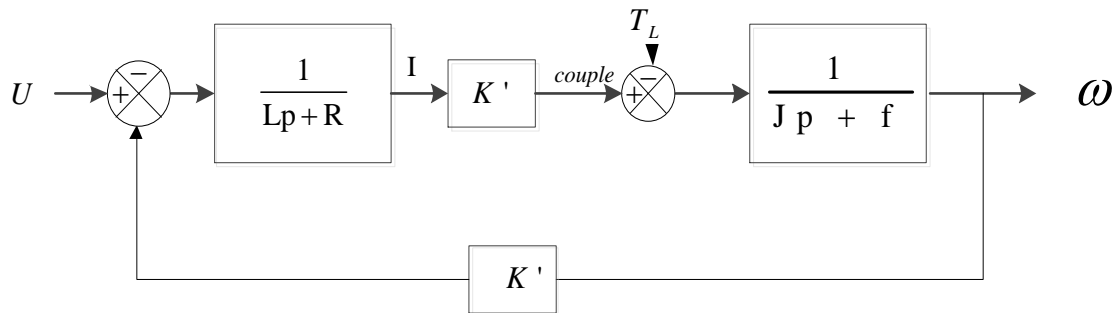


Figure 4.5 : modèle d'un moteur DC.

Cette méthode classique permet de calculer les paramètres du correcteur directement (expérimentalement). Elle a été introduite par Ziegler et Nichols en 1942 et elle est basée sur les caractéristiques dynamiques du système, donc les paramètres du régulateur sont calculés directement avec des formules simples :

Pour les systèmes du 1^{er} ordre, la réponse en boucle ouverte du système 1^{er}, est caractérisé par trois termes déduits depuis la réponse :

Le retard pure (τ).

Le gain statique (K).

Le constant du temps (T).

Sur l'enregistrement de la réponse indicielle (figure 4. 6) système à régler, on trace la tangente au point d'inflexion Q de la courbe. On mesure ensuite les temps τ correspondant au point d'intersection entre l'abscisse et la tangente ainsi que le constant du temps T ("temps de montée de la tangente") [2].

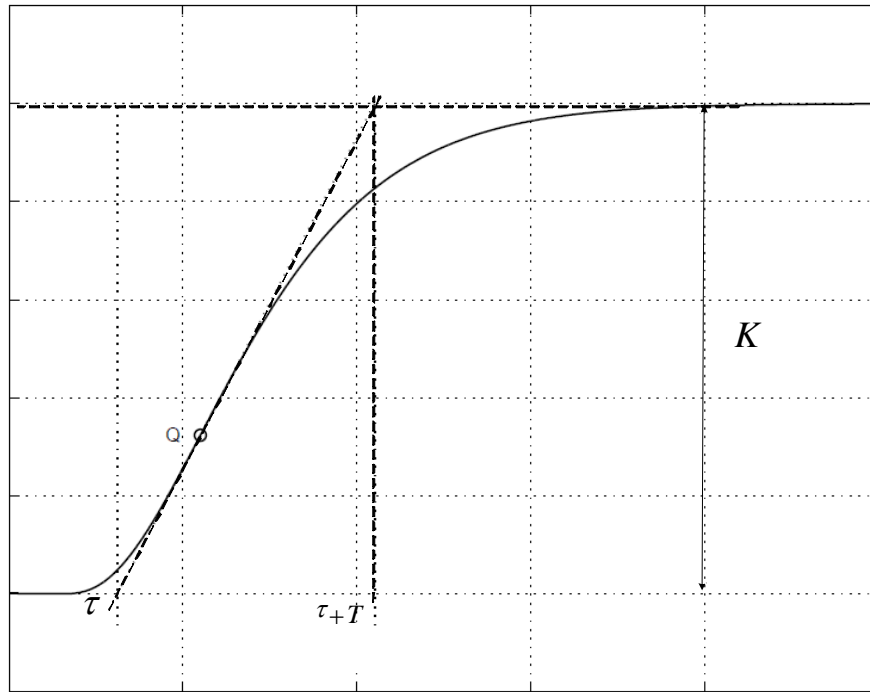


Figure 4.6 : réponse du système du 1^{er} ordre.

La fonction de transfert identifiée sera sous la forme suivante:

$$G(p) = \frac{k \exp(-\tau p)}{Tp + 1}. \quad (4.16)$$

et le correcteur est donné par l'expression suivante :

$$C(p) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_I \cdot p} + \tau_D \cdot p\right) \quad (4.17)$$

Donc, après l'obtention de la réponse du système en boucle ouverte sous l'excitation d'un échelon, on déduit directement l'équation du correcteur PID et on calcule ses paramètres à partir du tableau suivant :

correcteur	k_p	τ_I	τ_D
P	$\frac{T}{\tau}$	—	—
PI	$\frac{0.9T}{\tau}$	2τ	—
PID	$\frac{1.2T}{\tau}$	2τ	2τ

Tableau 4.1 : ajustement des paramètres du PID par 1^{er} méthode de Z-N.

Avant l'implantation du régulateur obtenu, nous devons passer impérativement par la phase de discrétisation.

Pour les systèmes 2^{ème} ordre, Ziegler et Nichols ont présenté une autre méthode :

La technique de calcul des paramètres est basée sur le calcul du gain critique K_p et le période critique T_c . Les étapes à suivre sont :

On ferme la boucle de position avec un correcteur PID dont ces paramètres initiaux sont :

1- $\tau_I = \infty$; $\tau_D = 0$

2- faire varier K_p jusqu'à avoir une réponse oscillatoire du système en boucle fermée

$$K_C = K_{p_{MAX}} \text{ jusqu'à la valeur } \frac{b}{a} = \frac{1}{4} [1].$$

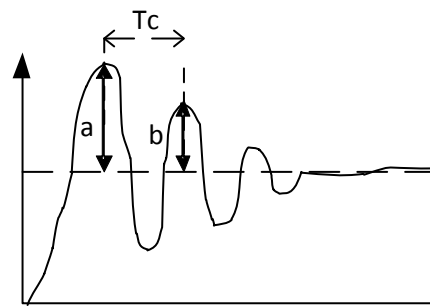


Figure 4.7 : réponse désiré par la 2eme méthode de Ziegler Nichols

Un correcteur de type PI (équation 4.6) suffit pour la commande en position, les valeurs ses paramètres sont donné par la table suivante :

correcteur	K_p	τ_I	τ_D
P	$0.5K_c$	—	—
PI	$0.45K_c$	$0.83T_c$	—
PID	$0.6K_c$	$0.5T_c$	$0.125T_c$

Tableau 4.2 : ajustement des paramètres du PID par 2^{ème} méthode de Z-N

IV.3.2 Application de la méthode adoptée:

Sous la supposition, dans ce travail, que nous n'avons pas d'informations sur les paramètres du moteur DC qu'on veut commander en vitesse ou en position. Alors, le travail est subdivisé en deux étapes : la première est l'identification et la deuxième est la commande, et ce pour les deux problèmes des régulations en vitesse et en position

IV.3.2.a La Régulation de la vitesse :

Le schéma de principe de la régulation est présenté sur la figure 4.7 :

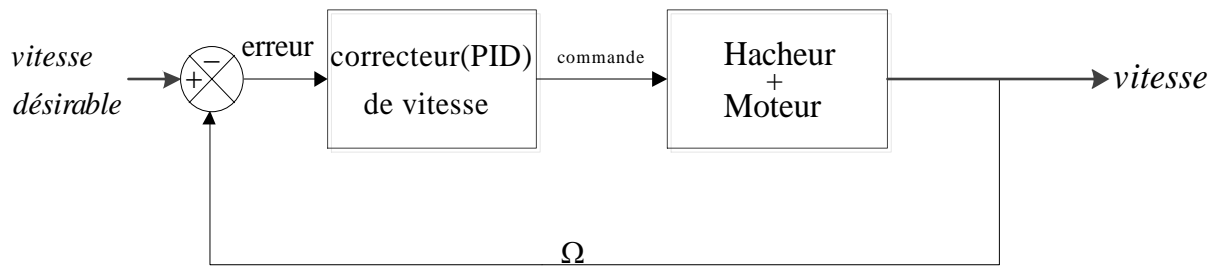


Figure 4.8: Régulateur PID de vitesse

Pour calculer la fonction de transfert du moteur associé au hacheur, on applique une tension sur le moteur et on mesure la vitesse, le résultat est donné sur la figure suivant :

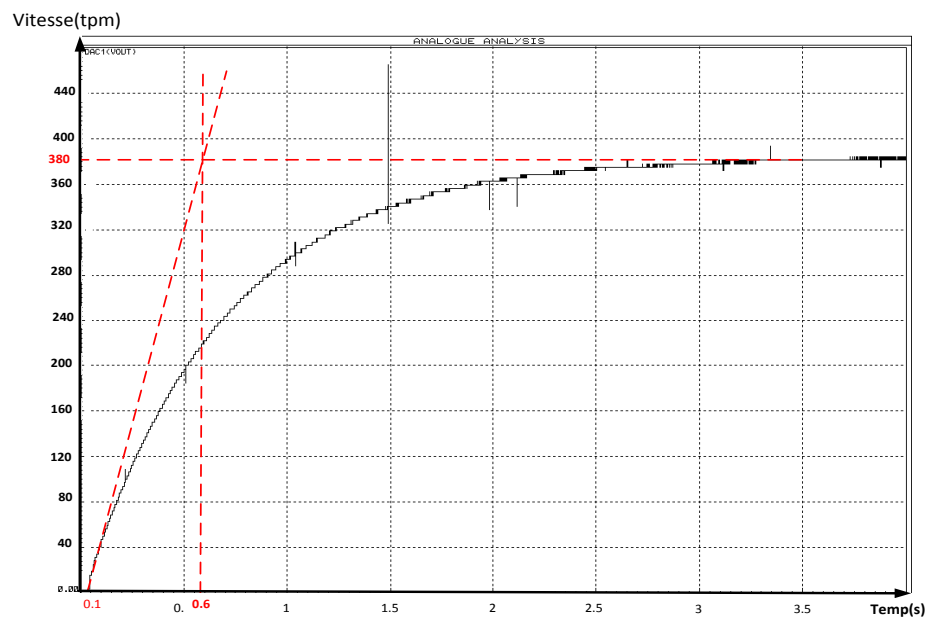


Figure 4.9 : la vitesse du moteur.

D'après la courbe :

$$\tau = 0.1$$

$$T = 0.5$$

Le gain donne par la division de la vitesse sur la tension appliquée (sortie/entrée):

$$K = \frac{280 \text{ tr / min}}{8.35 \text{ volts}} = 33.35 .$$

La fonction du transfert identifiée est la suivante :

$$G(p) = \frac{33.35 e^{-0.1p}}{(0.5p + 1)}$$

Selon la première méthode de Ziegler Nichols, les paramètres du correcteur sont:

$$K_p = \frac{1.2 \times 0.5}{0.1} = 6$$

$$\tau_I = 0.2$$

$$\tau_D = 0.2$$

Par l'équation 4.17, notre correcteur de vitesse soit:

$$C(p) = 6\left(1 + \frac{1}{0.2}p + 0.2p\right)$$

Après la discrétisation avec une période d'échantillonnage $T_e = 0.05s$, on aura la loi de commande suivante :

$$C(p) = K_p e(k) + I(k-1) + K_I T_e e(k) + K_D \cdot \frac{e(k) - e(k-1)}{T_e}$$

$$C(p) = 6e(k) + I(k-1) + 1.5e(k) + 24.[e(k) - e(k-1)]$$

En appliquant le correcteur sur le système en boucle fermée on obtient la réponse de la figure suivante:

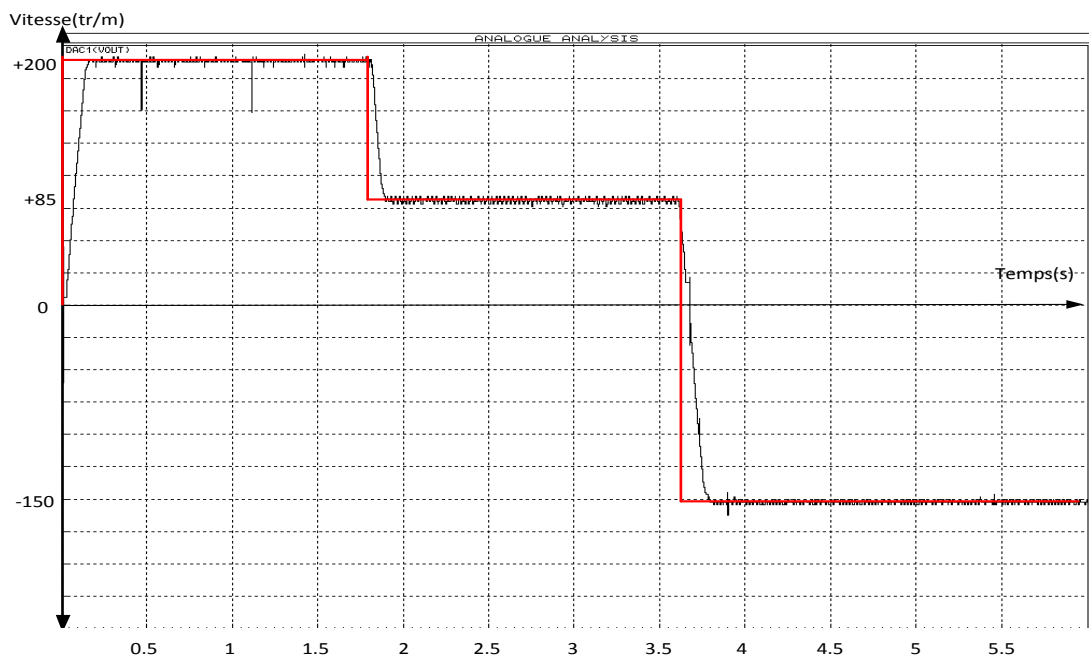


Figure 4.10 : repose en vitesse du système corrigé.

On remarque que la correction par la méthode de Ziegler-Nichols, bien qu'elle est simple, elle est très efficace, car la réponse du système corrigé est très rapide, avec une bonne précision, mais on remarque quelques oscillations dues à la précision du capteur de vitesse.

IV.3.2.b La régulation de la position :

Le schéma de principe de la régulation est présenté sur la figure 4.10 :

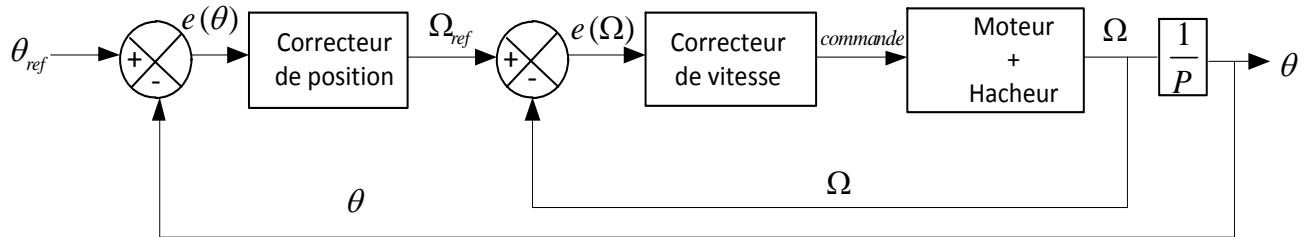


Figure 4.11 : régulation de position en boucle imbriquée.

La fonction de transfert du système à commander en boucle ouverte n'est que l'intégration de vitesse de la boucle interne déjà régulée :

$$\theta = \int \omega dt$$

$$G_{POSITION}(p) = \frac{1}{p} \cdot G_{VITESSE}(p)$$

Avec $G_{vitesse}$ est la fonction de transfert en boucle fermée de la commande en vitesse calculée dans la section précédente.

$$G_{VITESSE}(p) = \frac{C(p)G(p)}{1 + C(p)G(p)}$$

Ou :

$C(p)$: la fonction du correcteur de vitesse précédemment calculé.

$G(p)$: la fonction identifiée du système (hacheur-moteur).

Finalement on obtient:

$$G_{POSITION}(p) = \frac{1}{p} \times \frac{K e^{-\tau_p} (P.K_p + K_I + P^2.K_D)}{P(1+T.P) + K e^{-\tau_p} (P.K_p + K_I + P^2.K_D)}. \quad (4.18)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte entre la consigne et la position comme suit :

$$G(p) = \frac{1}{p} \times \frac{33.35 e^{-0.1p} (1.2P^2 + 6P + 30)}{P(0.5p + 1) + 33.35 e^{-0.1p} (1.2P^2 + 6P + 30)}$$

Nous appliquons cette méthode sur le moteur déjà régulé en vitesse, on obtiendra la courbe oscillante suivante :

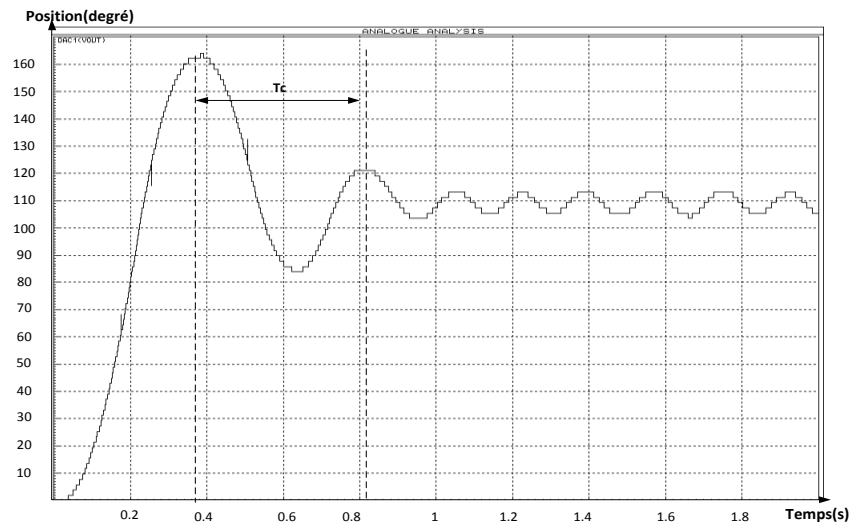


Figure 4.12 : la position du moteur en BF.

D'après le graphe on trouve :

$$K_C=9.$$

$$T_C=0.45 \text{ s.}$$

Donc les paramètres du correcteur sont :

$$K_P=4 ;$$

$$\tau_I = 0.373;$$

Donc, Le correcteur donne par l'expression suivante :

$$C(p) = 4\left(1 + \frac{1}{0.373p}\right)$$

Après la discrétisation avec une période d'échantillonnage $T_e = 0.05$, on aura la loi de commande suivante :

$$C(p) = K_P e(k) + I(k-1) + K_I T_e e(k)$$

$$C(p) = 4e(k) + I(k-1) + 0.53. e(k)$$

En appliquant le correcteur sur le système, on aura la réponse obtenue par la figure suivante :

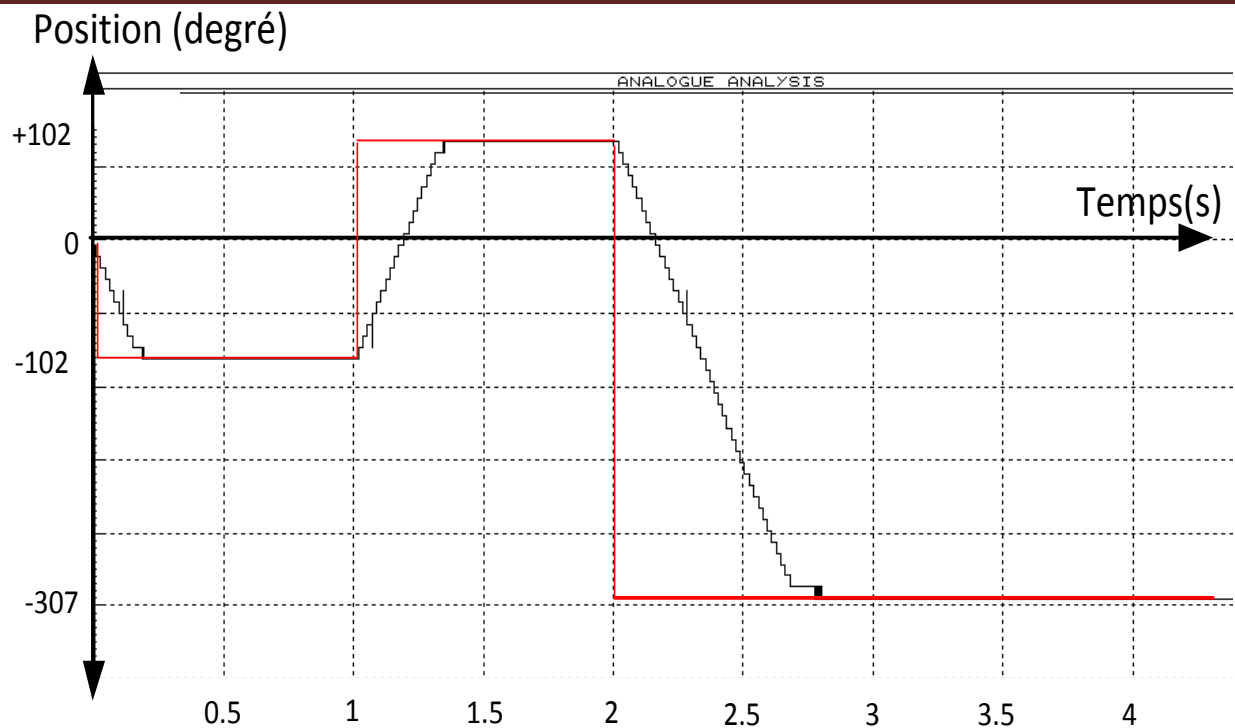
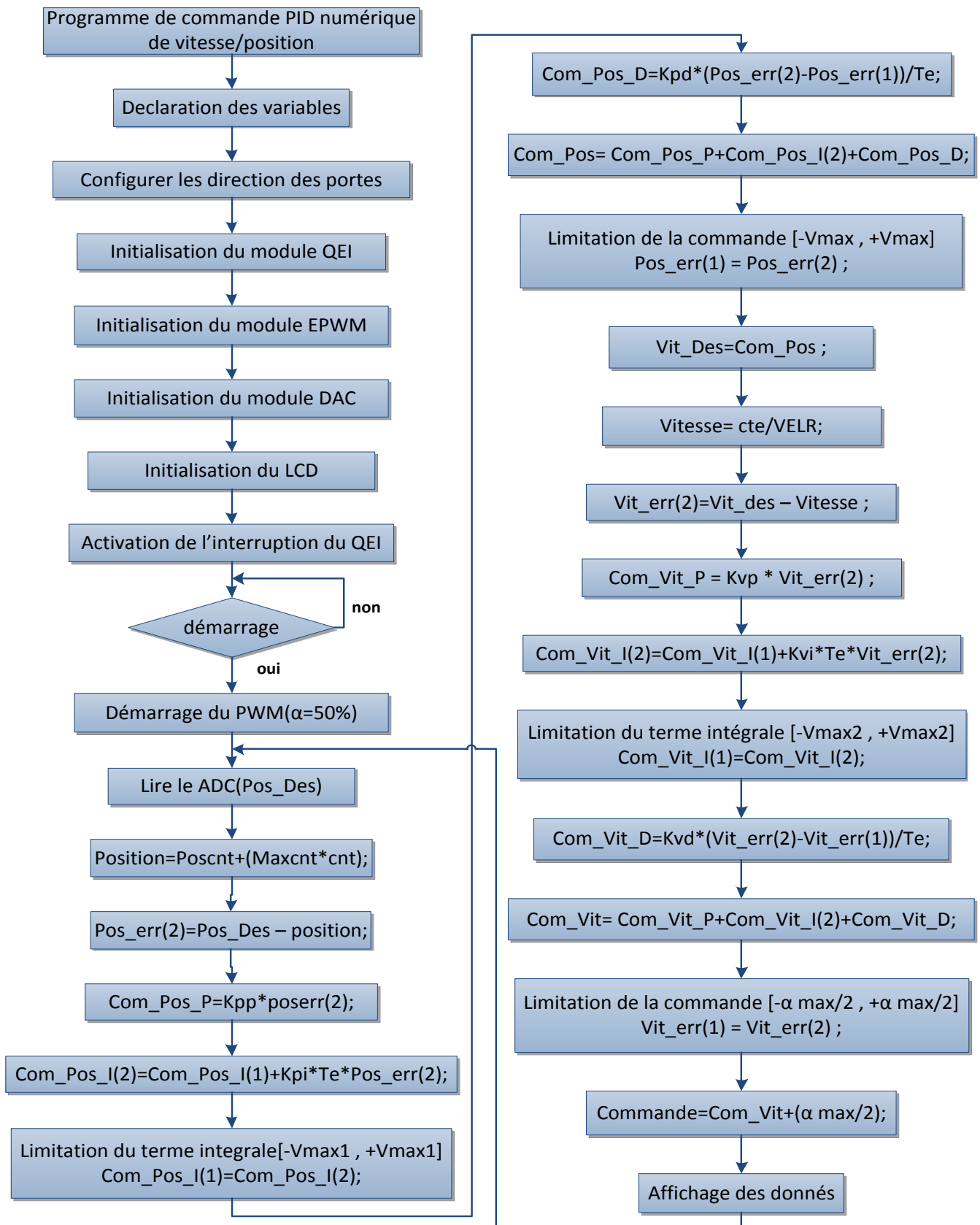


Figure 4.13 : asservissement de position.

On remarque que le système répond d'une façon rapide, avec très bon précision de l'ordre du degré, Ceci est très important surtout dans les applications robotiques, on peut dire que la deuxième méthode de Z-N est aussi efficace et valable, même avec une commande robuste telle que la position.

IV.4 ORGANIGRAMME



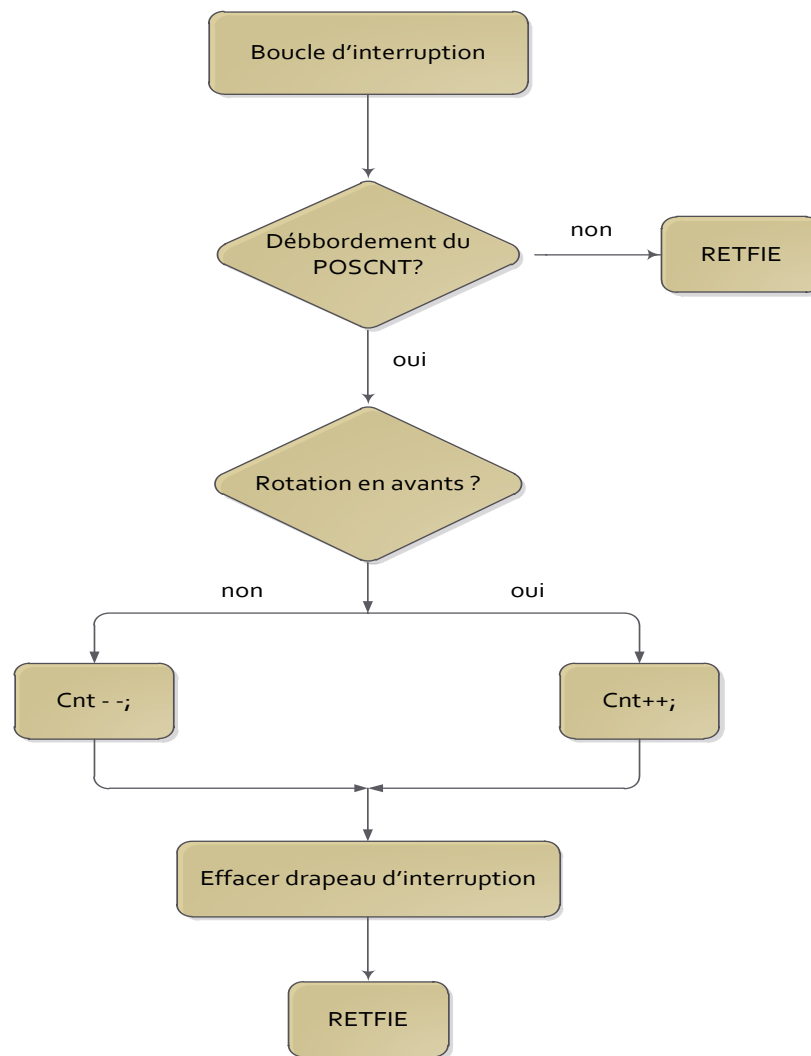


Figure 4.14 : organigramme du travail.

IV.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté un bref rappel sur les régulateurs PID ainsi que la méthode empirique de ZIEGLER-NICHOLS pour le dimensionnement de leurs paramètres. Le principe de la régulation en vitesse et en position d'une machine DC est donné tout en donnant les différents résultats de simulation obtenus.

Étant donné que la commande est basée sur un modèle identifié, et étant donné que la simulation de la commande est effectuée sur une plateforme très proche de la réalité, on peut dire que l'implantation pratique de cette commande donnera de bon résultat.