

**République Algérienne démocratique et Populaire**

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

---

Université des Sciences et de la Technologies d'Oran « Mohamed Boudiaf »



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE

Département d'Automatique

**Travaux Pratiques Machine Electrique**

Modélisation et régulation d'un  
moteur <<Brushless >>

*Réalisé par :*

- *Rahmoun Lokmane Nour El Islam.*
- *Kabouche Bacim.*

*Supervisé par :*

*-Mme SEDDINI.*

*Année universitaire 2019/2020*

## Table des matières

---

### Table des matières

-Table des matières.....	2
<b>Chapitre 1</b>	
1-Introduction :.....	2
2-Définition d'un moteur Brushless :.....	2
3-Fonctionnement d'un moteur Brushless :.....	3
4-La différence entre un BLDC et un PMSM :.....	4
5-Contrôle d'un BLDC en mode sensored et sensorless :.....	5
6-Avantages d'utilisation d'un moteur Brushless :.....	6
7-Les désavantages d'utiliser un BLDC:.....	7
<b>Chapitre 2</b>	
1-Mise en équations du modèle :.....	8
1-1-Équations électriques et mécaniques :.....	8
2-Régulateur PID (proportionnel-intégral-dérivé) :.....	11
3-Caractéristiques des contrôleurs Proportionnel, Intégral et Dérivé.....	11
4-Détermination des paramètres du régulateur PID : .....	12
4-1-Méthode de Ziegler-Nichols :.....	12
4-2-Exploitation de la réponse indicielle :.....	12
4-3Réglage du régulateur PID :.....	13
5-Conclusion :.....	15
-Bibliographie.....	16

# Chapitre 1

Le chapitre suivant est théorique sur les moteurs BLDC et sa modélisation mathématique. Il présente également les référentiels utilisés dans ce travail, et définit le fonctionnement de ce moteur d'une façon générale.

## 1-Introduction :

Les moteurs Brushless jouent un rôle crucial dans la recherche et les expériences de laboratoire en raison de sa simplicité et de son faible coût. Dans cette présentation on est amené à modéliser et réguler un moteur Brushless dans MATLAB dans le but d'étudier son fonctionnement.

## 2-Définition d'un moteur Brushless :

Le moteur CC sans balais (BLDC) est un moteur électrique synchrone qui, du point de vue de la modélisation, ressemble à un moteur CC. Il présente une relation linéaire d'une part entre le courant et le couple, et d'autre part entre la force contre électromotrice et la vitesse de rotation. Il s'agit d'un système de commutation à commande électronique, tandis que les moteurs à balais ont une commutation mécanique. De plus, les électroaimants ne bougent pas et les aimants permanents tournent. Un schéma du moteur BLDC est illustré, sur la figure 1 :

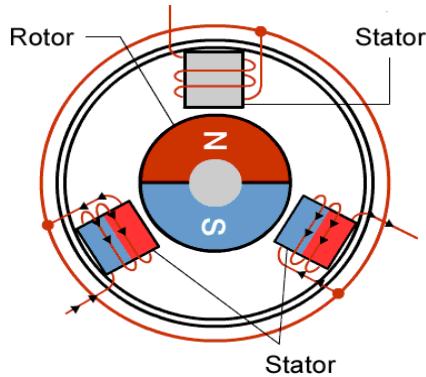


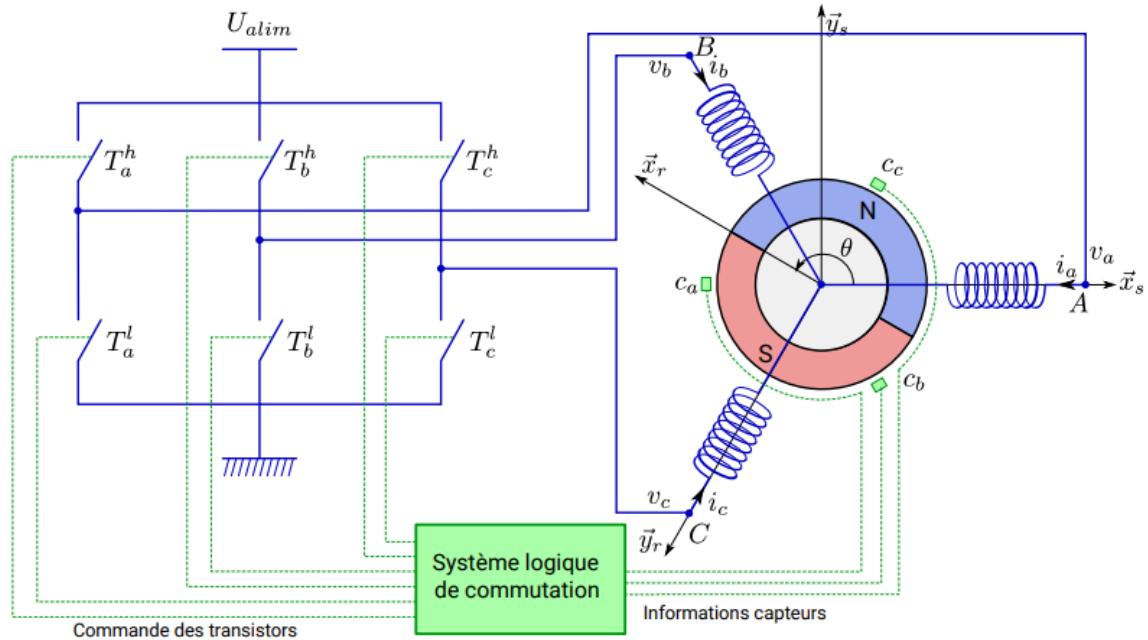
Figure 1 : illustration d'un moteur Brushless à aimant permanent.

Il est construit avec un rotor à aimant permanent et un stator en acier laminé empilés pour transporter des enroulements. L'énergie électrique est convertie en énergie mécanique par les forces d'attraction magnétique entre le rotor à aimant permanent et un champ magnétique tournant induit dans le stator. Par conséquent, le fonctionnement du moteur est basé sur l'attraction ou la répulsion entre les pôles magnétiques.

## 3-Fonctionnement d'un moteur Brushless :

Le moteur Brushless fonctionne à partir de trois sources de tensions variables, fournies par un

onduleur, et permettant de générer un champ magnétique tournant. Le rotor, généralement équipé d'un aimant permanent, tend à suivre le champ magnétique tournant. La figure 2 montre l'architecture du moteur et de son onduleur.



*Figure 2: Fonctionnement de l'onduleur et du moteur Brushless.*

Dans le cas simple du moteur BLDC, à chaque commutation, deux phases sont reliées respectivement à la tension l'alimentation et à la masse, et une phase n'est pas connectée. Prenons l'exemple de la figure 3, la phase A n'est pas reliée, la phase B est reliée à la tension d'alimentation et la phase C est reliée à la masse. Un courant parcourt les bobines de B vers C et génère un champ magnétique statorique  $\vec{B}_s$  dans le moteur dirigé suivant  $\vec{y}_s$ . Le rotor supporte un aimant dont le moment magnétique  $\vec{m}$ , orienté du sud vers le nord, tend à s'aligner avec le champ magnétique statorique en tournant dans le sens trigonométrique.

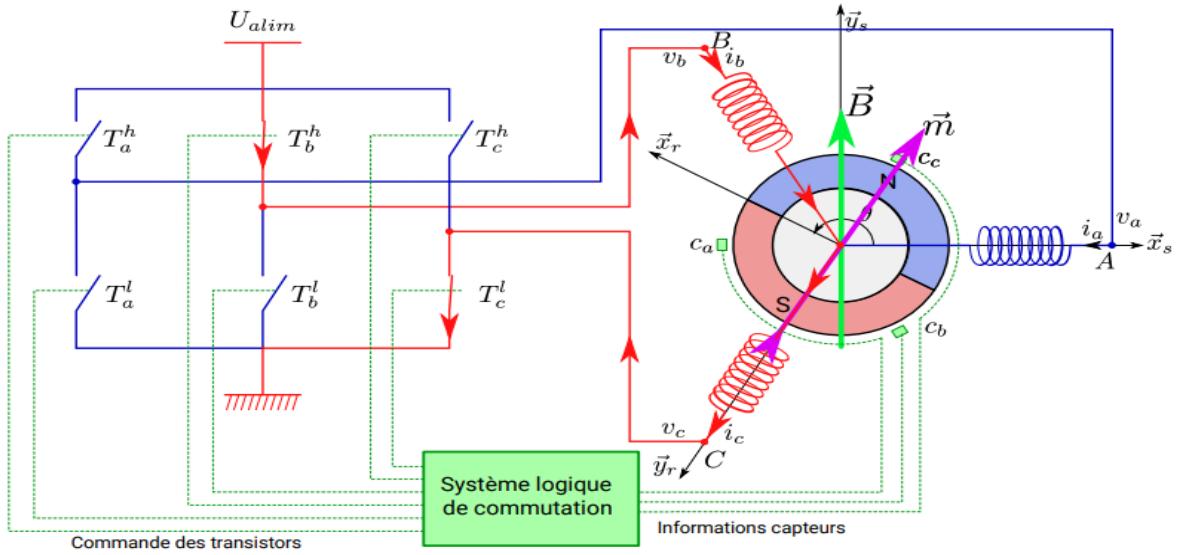


Figure 3: Exemple de situation de commutation.

Dès que le rotor s'approchera de  $\vec{y}_s$ , la commutation sera modifiée pour faire circuler le courant de B vers A, le champ magnétique statorique  $B^\rightarrow$  tourne de  $\pi/6$ , de façon à attirer le rotor et poursuivre la rotation dans le sens trigonométrique. L'angle entre  $\vec{m}$  et  $B^\rightarrow$  conduit à un couple magnétique  $C^\rightarrow$   $m = \vec{m} \wedge \vec{B}$ .

#### 4-La différence entre un BLDC et un PMSM :

Il existe deux types de moteurs à courant continu à aimant qui dépendent de leurs formes d'ondes de la force contre électromotrice. Le premier type à bobinage qui est enroulé par voie trapézoïdale produit une forme d'onde trapézoïdale (six étapes) de contre-FEM (force électromotrice arrière). L'autre a un enroulement sinusoïdal distribué avec contre-FEM sinusoïdal. Parfois, le premier est appelé moteur BLDC tandis que le second est appelé PMSM (Moteur synchrone à aimant permanent). Les moteurs à enroulement en étoile avec des formes d'onde sinusoïdales sont examinés ci-après, mais les moteurs BLDC et PMSM seront utilisés de manière interchangeable pour désigner ce type de moteurs.

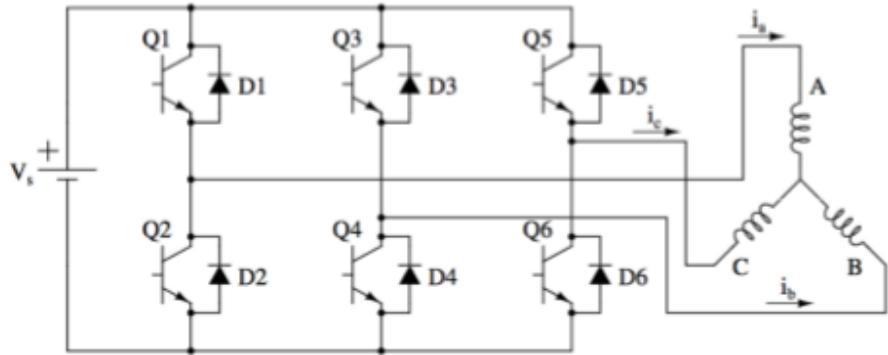
#### 5-Contrôle d'un BLDC en mode sensored et sensorless :

Le contrôle des moteurs BLDC peut être effectué en mode capteur ou sans capteur. L'avantage de la commande de moteur BLDC sans capteur est que la partie de détection peut être omise, et donc les coûts et la taille globaux peuvent être réduits. Cependant, les inconvénients du contrôle sans capteur sont les exigences plus élevées pour les algorithmes de contrôle et l'électronique plus compliquée et le faible couple au démarrage de moteur.

Pour obtenir une opération sans bruit, un couple constant est souhaité. Le couple du moteur BLDC est toujours influencé par la forme d'onde arrière (la tension induite dans l'enroulement du stator en raison du mouvement du rotor) et un moteur sinusoïdal produit un couple électromagnétique plus

doux qu'un moteur trapézoïdal. De plus, il peut être démontré que même s'il y a un déphasage entre la tension et la contre-intensité, le couple est une constante en régime permanent.

Un onduleur triphasé est utilisé pour entraîner le moteur BLDC triphasé comme illustré sur la figure2.



*Figure 4 : Circuit de commande du moteur BLDC.*

Elle est en effet commutée électriquement par des interrupteurs de puissance au lieu de balais. La façon la plus simple de commuter un moteur BLDC est la commutation trapézoïdale. Le couple généré a une ondulation de couple considérable qui se produit à chaque étape de la commutation trapézoïdale (ou à six niveaux). La commutation en six étapes active généralement deux enroulements de phase du moteur à n'importe quelle séquence de commutation. Il utilise 6 étapes distinctes (soit 6 positions par 360 degrés électriques), chacune selon un angle de 60 ° d'angle de rotation électrique. Le contrôle est basé sur le retour de position. Selon la position du rotor, l'onduleur n'est pas compatible avec 6 états. Le principal avantage du schéma de commutation trapézoïdal est sa simplicité. L'inconvénient est une ondulation de couple, surtout à basse vitesse.

Une alternative à la simple commutation trapézoïdale consiste à alimenter les trois phases avec des courants sinusoïdaux. Cela signifie que les pics plats qui apparaissent dans la forme d'onde actuelle avec une commutation trapézoïdale sont remplacés par des formes d'onde en forme de sinusoïde. De plus, les trois phases sont alimentées en continu, tandis qu'avec la commutation trapézoïdale, une phase est toujours désactivée. Cela donne une génération de couple beaucoup plus fluide et permet un contrôle plus précis. Cependant, pour générer une forme d'onde de courant proche de la sinusoïdale, un calcul de position continu est nécessaire. Une résolution plus fine que les 60° qui suffit pour la commutation trapézoïdale est nécessaire. En effet, une résolution de l'ordre d'un degré est raisonnable mais plus la résolution est fine, plus le contrôle est précis.

#### 6-Avantages d'utilisation d'un moteur Brushless :

Les moteurs BLDC présentent de nombreux avantages par rapport aux moteurs à courant continu à balais et aux moteurs à induction. De meilleures caractéristiques de vitesse par rapport au couple, une réponse dynamique élevée, une efficacité et une fiabilité élevées, une longue durée de vie et un

fonctionnement silencieux sont certains de leurs avantages.

Les moteurs sans balais sont plus efficaces car leur vitesse est déterminée par la fréquence à laquelle le courant est fourni, et non par la tension. La perte d'énergie mécanique due au frottement est moindre, ce qui améliore l'efficacité.

Il n'y a pas d'étincelles et beaucoup moins de bruit pendant le fonctionnement.

Plus d'électroaimants pourraient être utilisés sur le stator pour un contrôle plus précis.

Les moteurs BLDC accélèrent et décélèrent facilement car ils ont une faible inertie du rotor, Il s'agit d'un moteur haute performance qui fournit un couple élevé par pouce cube sur une vaste plage de vitesses.

Les moteurs BLDC n'ont pas de balais qui le rendent plus fiable, une durée de vie élevée et un fonctionnement sans entretien.

#### **7-Les désavantages d'utiliser un BLDC:**

Le moteur BLDC coûte plus cher qu'un moteur CC à balais.

La puissance élevée limitée pourrait être fournie au moteur BLDC, sinon, trop de chaleur affaiblit les aimants et l'isolation du bobinage peut être endommagée.

Difficulté de la réalisation du circuit de commande électronique.

## Chapitre 2

1-Mise en équations du modèle :

1-1-Équations électriques et mécaniques :

La commande par commutation définie précédemment conduit à n'avoir toujours qu'une seule phase à la tension d'alimentation, une phase reliée à la masse et une phase non reliée (donc d'intensité nulle). Les trois bobines sont reliées au point N appelé neutre, si bien que la somme des courants convergeant vers le neutre est toujours nulle :  $i_a + i_b + i_c = 0$ .

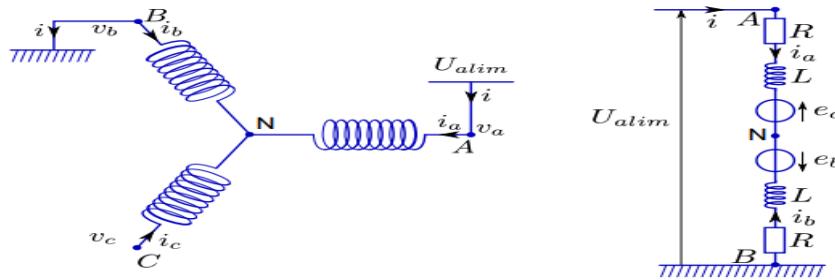


Figure 5: schéma électrique équivalent d'un moteur Brushless.

$$\begin{cases} V_e(t) = 2 * (R * i(t) + L * \frac{di(t)}{dt} + E(t)) & \dots \textcircled{1} \\ 2 * T_e(t) = F * \omega(t) + J * \frac{d\omega(t)}{dt} + T_l(t) & \dots \textcircled{2} \end{cases}$$

Et on a :

$$\begin{cases} E(t) = K_e * \omega(t) & \dots \textcircled{3} \\ T_e(t) = K_t * i(t) & \dots \textcircled{4} \end{cases}$$

Remplaçons  $\textcircled{3}$  dans  $\textcircled{1}$  et  $\textcircled{4}$  dans  $\textcircled{2}$  on obtient :

$$\begin{cases} V_e(t) = 2 * (R * i(t) + L * \frac{di(t)}{dt} + K_e * \omega(t)) \\ 2 * K_t * i(t) = F * \omega(t) + J * \frac{d\omega(t)}{dt} + T_l(t) \end{cases}$$

$T_l = 0 \rightarrow$  (couple résistant) (théorème de superposition --- system linéaire on calcule la réponse d'une seule sortie)

On fait la transformé de Laplace des deux équations précédent :

$$\begin{cases} \frac{V_e(s)}{2} = R * I(s) + L * S * I(s) + K_e * \Omega(s) \\ 2 * K_t * I(s) = F * \Omega(s) + J * S * \Omega(s) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{Ve(s)}{2} = I(s) * (R + L * S) + Ke * \Omega(s) & \dots \textcircled{5} \\ I(s) = \frac{F * \Omega(s) + J * S * \Omega(s)}{2 * Kt} & \dots \textcircled{6} \end{cases}$$

Remplaçons  $\textcircled{5}$  dans  $\textcircled{6}$  :

$$\Rightarrow Ve(s) = \frac{F * \Omega(s) + J * S * \Omega(s)}{Kt} * (R + L * S) + 2 * Ke * \Omega(s)$$

$$\Rightarrow Ve(s) = \left( \frac{(F + J * S) * (R + L * S)}{Kt} + 2 * Ke \right) * \Omega(s)$$

Mettons la sortie sur l'entrée on trouve la fonction de transfert :

$$\Rightarrow \frac{\Omega(s)}{Ve(s)} = \frac{Kt}{((F + J * S) * (R + L * S) + 2 * Kt * Ke)}$$

$$\Rightarrow \frac{\Omega(s)}{Ve(s)} = \frac{Kt}{(L * J * S^2 + (J * R + L * F) * S + 2 * Kt * Ke)}$$

Après la mise en équation et l'obtention de la fonction transfert il faut remplacer par les valeurs des constantes. Pour cela dans ce projet on a choisi d'utiliser un moteur du Groupe Maxon « EC 45 flat 45mm » qui a les caractéristique suivante :

$R = 1.2 \text{ ohm.}$

$L = 0.56 \text{ mH.}$

$J = 9.25 \text{ e-6 kg.m}^2.$

$Kt = 25.5 \text{ mNm/A.}$

$Ke = 0.0763 \text{ V.s/rad.}$

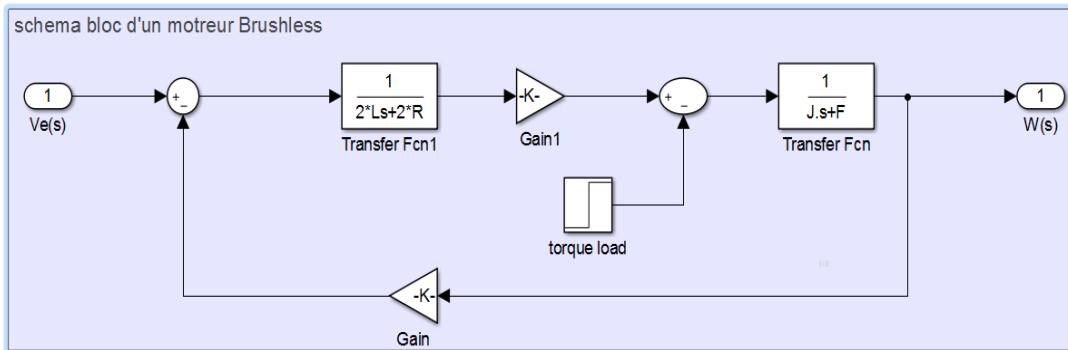


Figure 6 : vue réel sur le moteur Maxon EC 45.

En remplaçons dans la fonction de transfert par les paramètres précédents on va obtenir:

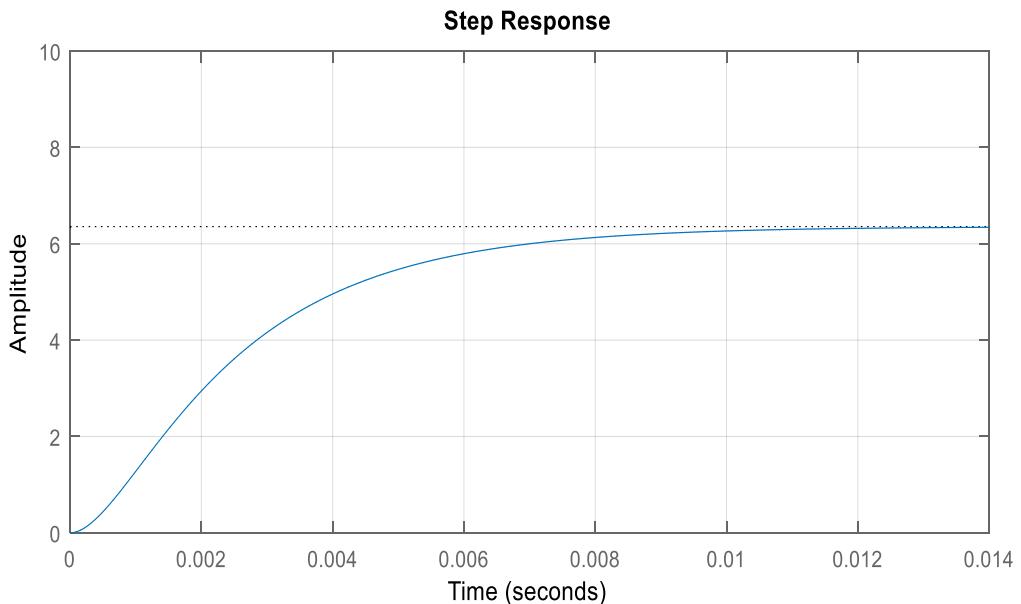
$$\Rightarrow G(s) = \frac{0.0255}{5.18e - 09 * S^2 + 1.116e - 05 * S + 0.004011}$$

Notre moteur est modélisé sur Simulink comme montre la figure suivante :



*Figure 7 : modélisation Du BLDC sur SIMULINK.*

La réponse indicielle du moteur sur matlab est comme indique la figure suivante :



*Figure 8 : réponse indicielle du moteur à un échelon.*

Après l'obtention de cette réponse on a besoin d'utiliser un régulateur PID pour obtenir la réponse désirée.

## 2-Régulateur PID (proportionnel-intégral-dérivé) :

C'est un contrôleur largement utilisé dans les systèmes de contrôle industriels et dans diverses autres applications nécessitant un contrôle modulé en continu. Un contrôleur PID calcule en permanence une valeur d'erreur  $e(t)$  en tant que différence entre une valeur de consigne souhaitée (SP) et une variable de processus mesurée (PV) et applique une correction basée sur la proportionnelle, les termes intégraux et dérivés (notés respectivement P, I et D).

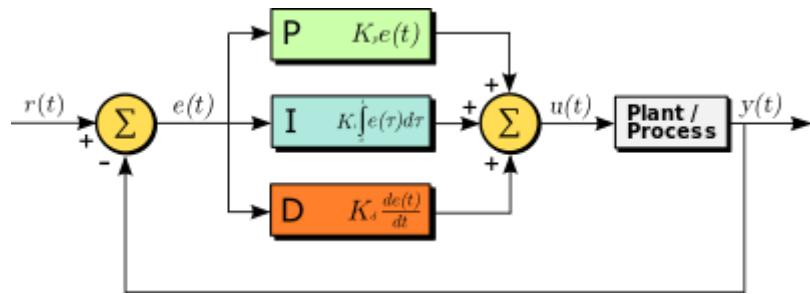


Figure 9: régulateur PID dans une boucle fermée.

## 3- Caractéristiques des contrôleurs Proportionnel, Intégral et Dérivé:

Un contrôleur proportionnel ( $K_p$ ) aura pour effet de réduire le temps de montée et réduira mais n'éliminera jamais l'erreur en régime permanent. Une commande intégrale ( $K_i$ ) aura pour effet d'éliminer l'erreur d'état d'équilibre, mais elle risque d'aggraver la réponse transitoire. Un contrôle dérivé ( $K_d$ ) aura pour effet d'accroître la stabilité du système, de réduire les dépassements et d'améliorer la réponse transitoire. Les effets de chacun des contrôleurs  $K_p$ ,  $K_d$  et  $K_i$  sur un système en boucle fermée sont résumés dans le tableau ci-dessous :

paramètres	TEMPS DE MONTÉE	dépassemant	Temps d'établissement	erreur
Kp	démunie	Augmente	Petit changement	démunie
Ki	démunie	Augmente	augmente	éliminé
Kd	Petit changement	démunie	démunie	Petit changement

TABLE 1 : caractéristiques des paramètres du régulateur PID.

#### 4-Détermination des paramètres du régulateur PID :

##### 4-1-Méthode de Ziegler-Nichols :

Ziegler et Nichols ont proposé deux approches expérimentales destinées à fixer rapidement les paramètres des régulateurs P, PI et PID. La première nécessite l'enregistrement de la réponse indicielle du système à régler, alors que la deuxième exige d'amener le système en boucle fermée à sa limite de stabilité. On va utiliser la première, cette méthode est basée sur l'observation de la réponse du processus et la connaissance de la structure du correcteur. Le modèle supposé du système à commander est :

$$F(S) = \frac{Ke^{-Ts}}{S}$$

On va régler en boucle ouverte :

- Le gain proportionnel à 1.
- l'action intégrale à  $\infty$ .
- L'action dérivée à 0.

##### 4-2-Exploitation de la réponse indicielle :

Sur l'enregistrement de la réponse indicielle, on trace le mieux possible la tangente au point d'inflexion Q de la courbe. On mesure ensuite le temps Tu correspondant au point d'intersection entre l'axe des abscisses et la tangente ainsi que le temps Ta « temps de montée de la tangente ».

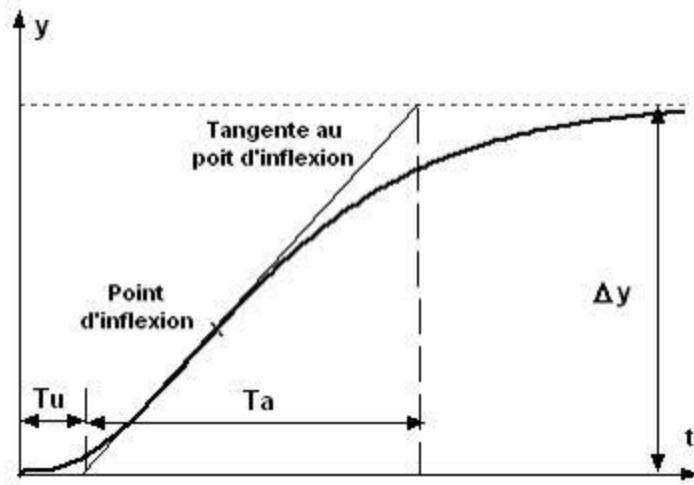


Figure 10 : illustration de la méthode du point d'inflexion.

Sur matlab on va écrire un programme pour déterminer automatiquement le point d'inflexion, le point obtenu est le suivant :

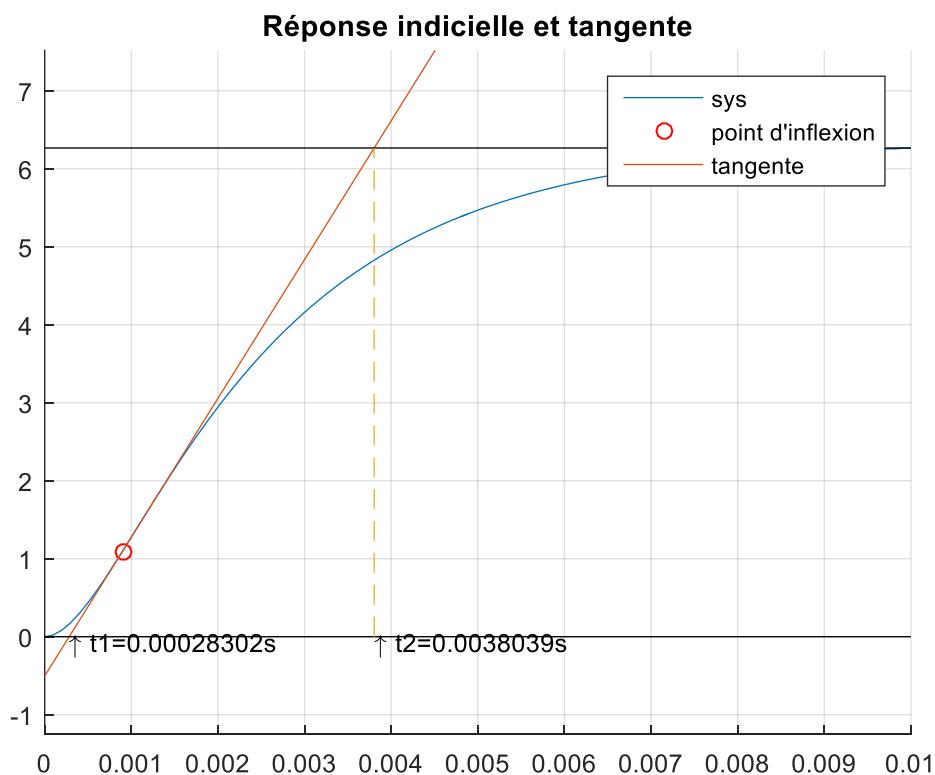


Figure 11: Détermination du point d'inflexion sur matlab.

4-3Réglage du régulateur PID :

Ziegler & Nichols proposent de calculer les paramètres du régulateur P, PI ou PID à l'aide des recommandations suivantes.

Régulateur	Réglage
P	$K_p = T_a / T_u$
PI	$K_p = 0.9 T_a / T_u, K_i = T_u / 0.3$
PID	$K_p = 1.27 T_a / T_u, K_i = 1/2 T_u, K_d = 0.5 T_u$

Tableau 2 : Paramètres PID en boucle ouverte.

Après les calculs on va obtenir :

$$K_p = 11.1963,$$

$$K_i = 9.4341 \times 10^{-4},$$

Dans simulink on va ajouter un bloc spécial du PID alors notre modèle devient :

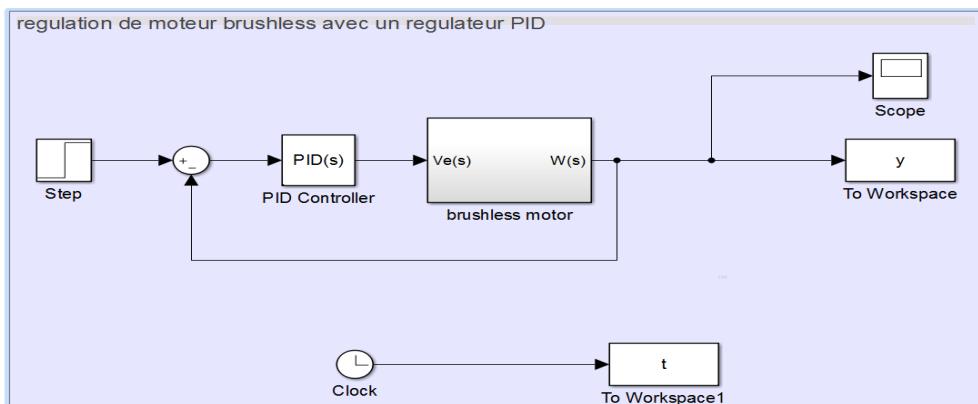
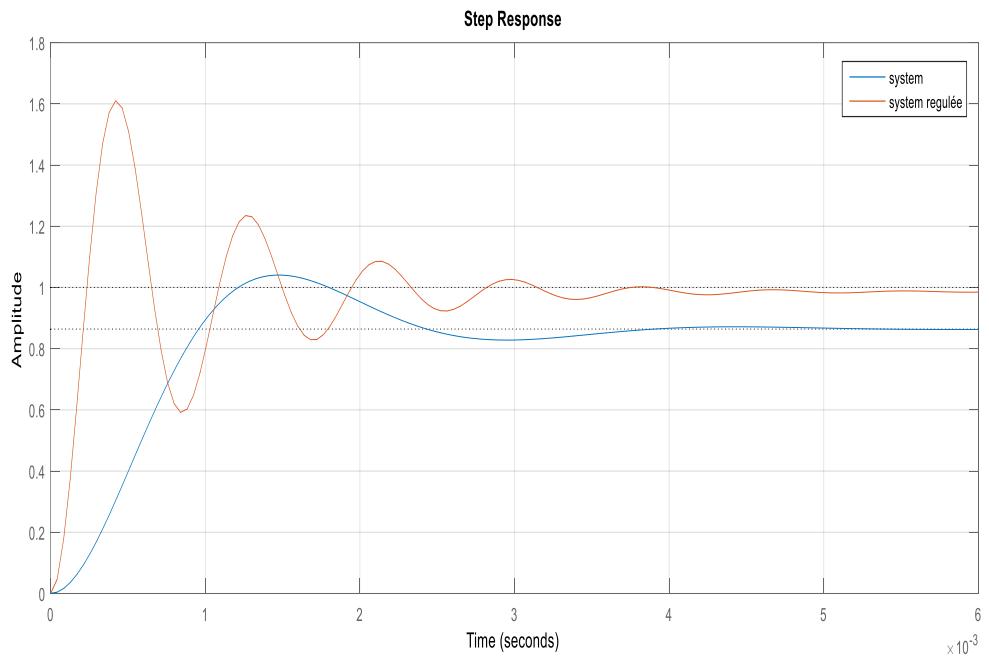


Figure 12 : modélisation Du BLDC sur SIMULINK avec PID.

On utilise les paramètres calculé du régulateur la réponse de notre système devient stable et performé.



*Figure 13 : illustration montre la différence entre la réponse régulé et non régulé.*

## 5-Conclusion :

Dans ce mini projet on a compris le fonctionnement d'un moteur Brushless et sa constitution.

On a pu faire la modélisation mécanique et électrique de ce moteur.

Grace à logiciel matlab on a pu étudier le fonctionnement du BLDC en observant l'évolution de sa réponse indicielle.

La méthode de Ziegler-Nichols est efficace pour déterminer les paramètres du régulateur PID.

Nous avons pu appliquer ce que nous avons appris en théorie dans le cours d'Asservissement.

Les moteurs BLDC n'ont pas de balais qui les rendent plus fiables, une durée de vie élevée et un fonctionnement sans entretien.

## Bibliographie

---

### Bibliographie

- << BLDC Motor Modeling and Control –A Matlab /Simulink Implementation >>, Master Thesis work by “Stefan Baldursson” –May, 2005.
- Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends.URL:  
[https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3231115/?fbclid=IwAR3fZjefkkUGTMCem-tB3FcZ9Pex\\_to4aBAhlijgt4vrCzwPf6eapiCSeJ0](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3231115/?fbclid=IwAR3fZjefkkUGTMCem-tB3FcZ9Pex_to4aBAhlijgt4vrCzwPf6eapiCSeJ0).
- << LE CONTROLE PID D’UN MOTEUR BRUSHLESS >>. Mémoire de master présenté par : « AMANI Ahmed Amine ».
- << Tuning of PID Controllers>>. Article scientifique publié par « Hari Om Bansal ». URL :  
[https://www.researchgate.net/publication/268802558\\_Tuning\\_of\\_PID.Controllers\\_using\\_Simulink](https://www.researchgate.net/publication/268802558_Tuning_of_PID.Controllers_using_Simulink).
- Livre « Automatique - Systèmes linéaires, non linéaires - 2e édition Cours et exercices corrigés », Edition DUNOD, Auteur : Yves Granjon.
- Livre « Moteurs électriques pour la robotique 3e Edition », Edition DUNOD, Auteur : Pierre Mayé.