

IV.1 Introduction

Après l'application de la commande par mode glissant (SMC) sur le drone quadrotor, on va réaliser une simulation avec trois entrées (Échelon, Sinus, Trajectoire), Ces simulations sont réalisées en utilisant un simulateur basé sur le modèle mathématique à 6ddl du Drone de Type Quadrotor, pour évaluer la méthodologie de commande proposée.

IV.2 Modèle mathématique du drone

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \\ \dot{x}_{11} \\ \dot{x}_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ a_1 x_4 x_6 + a_2 x_2^2 + a_3 \Omega_r x_4 + b_1 u_2 \\ x_4 \\ a_4 x_2 x_6 + a_5 x_4^2 + a_6 \Omega_r x_2 + b_2 u_3 \\ x_6 \\ a_7 x_2 x_4 + a_8 x_6^2 + b_3 u_4 \\ x_8 \\ a_9 x_8 + \frac{u_x}{m} u_1 \\ x_{10} \\ a_{10} x_{10} + \frac{u_y}{m} u_1 \\ x_{12} \\ a_{11} x_{12} - g + \frac{\cos x_1 \cos x_3}{m} u_1 \end{pmatrix}$$

$$a_1 = \frac{(I_y - I_z)}{I_x}, a_2 = -\frac{K_{fax}}{I_x}, a_3 = -\frac{J_r}{I_x}, a_4 = \frac{(I_z - I_x)}{I_y}, a_5 = -\frac{K_{fay}}{I_y}, a_6 = -\frac{J_r}{I_y},$$

$$a_7 = \frac{(I_x - I_y)}{I_z}, a_8 = -\frac{K_{faz}}{I_z}, a_9 = -\frac{K_{ftx}}{m}, a_{10} = -\frac{K_{fty}}{m}, a_{11} = -\frac{K_{ftz}}{m},$$

$$b_1 = \frac{d}{I_x}, b_2 = \frac{d}{I_y}, b_3 = \frac{1}{I_z}$$

IV.3 Les paramètres de la simulation

Paramètre	Valeur désirée	Paramètre	Valeur désirée
ϕ	2°	x	1 m
θ	2°	y	2 m
ψ	1°	z	2 m

λ_i		k_i	
λ_1	100	k_1	1000
λ_2	100	k_2	10000
λ_3	1000	k_3	800
λ_4	10	k_4	50
λ_5	10	k_5	50
λ_6	10	k_6	50

Tableau IV.1 paramètres de simulation.

IV.4 Résultats de simulation

Pour la visualisation de suivi de Trajectoire en position et en attitude du Quadrotor avec et sans perturbation avec les entrées Echelon, sinus, et trajectoire, nous avons ajouté un bruit blanc sur les signaux issus des capteurs pour le test de la robustesse et de la sensibilité.

➤ Entrée échelon

- Sons bruits

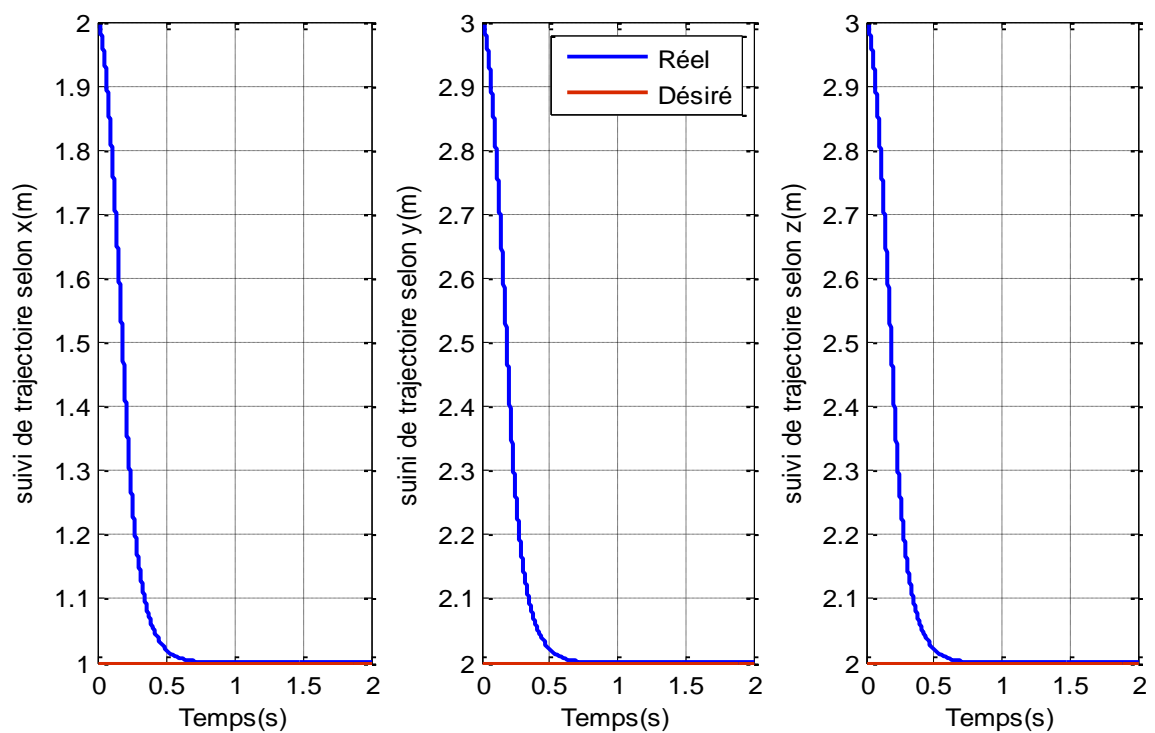


Figure IV.1 suivi de trajectoire en position(x, y, z) pour une consigne échelon

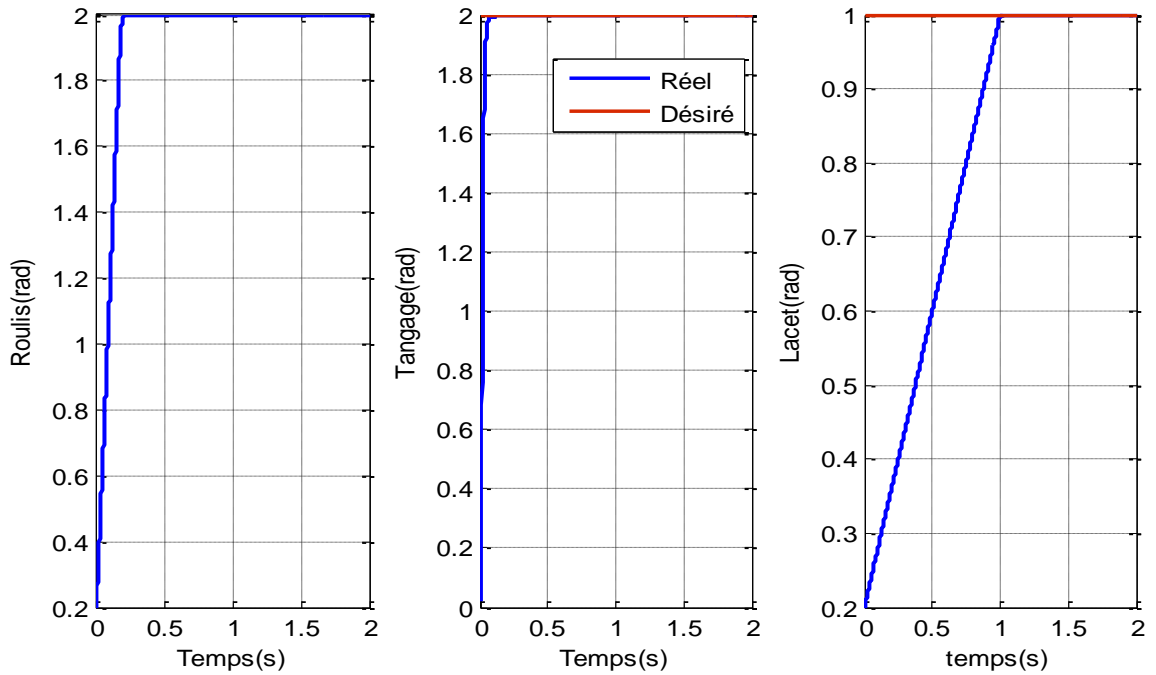


Figure IV.2 Suivi de trajectoire en attitude (ϕ, θ, ψ) pour une consigne échelon

Commentaire : pour l'entrée échelon sans bruits, on a le suivi de trajectoire selon les trois axes de position (x, y, z), et l'attitude (ϕ, θ, ψ), on remarque la position initial (2, 3, 3) converge vers la position désiré (1, 2, 2), avec temps de réponse de 0.7s, et l'attitude initial ($0.2^\circ, 0^\circ, 0.2^\circ$) converge aussi vers l'attitude désiré ($2^\circ, 2^\circ, 1^\circ$), avec temps de réponse ($\phi \rightarrow 0.2s, \theta \rightarrow 0.1s, \psi \rightarrow 1s$).

- Avec bruits

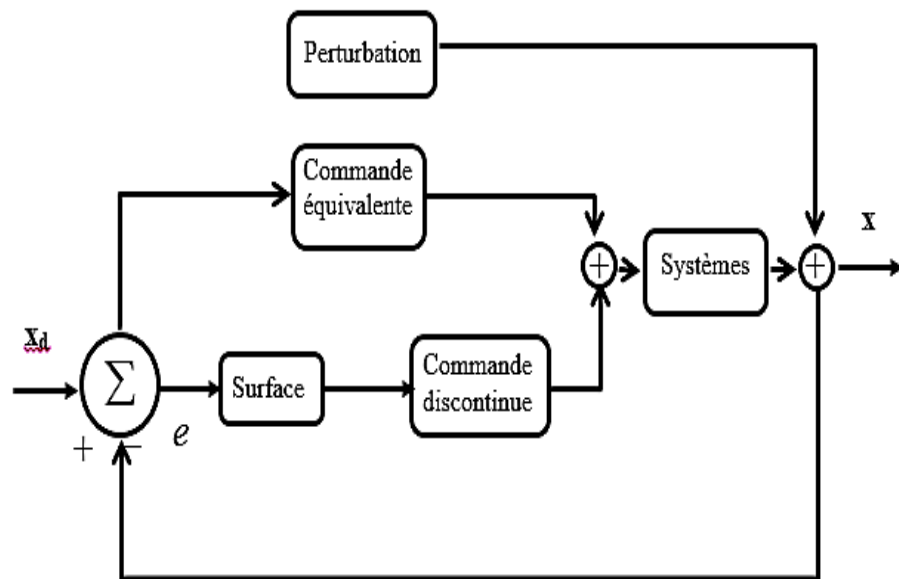


Figure IV.3 Schéma global de la commande en présence de perturbation.

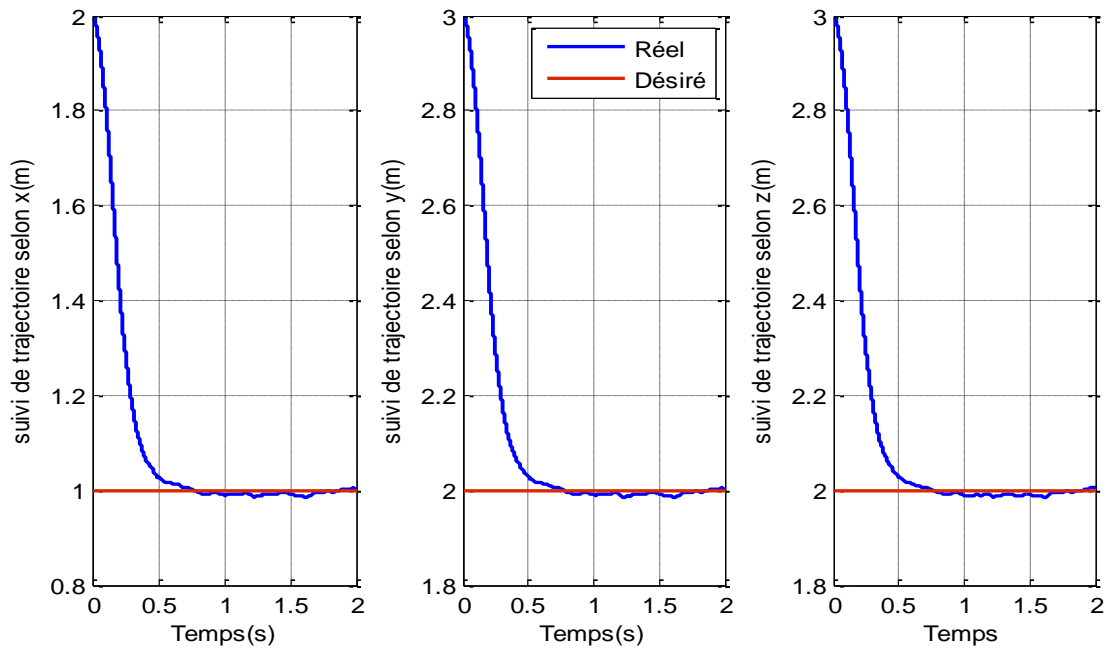


Figure IV.4 Suivi de Trajectoire en position (x, y, z) pour une consigne échelon avec perturbation

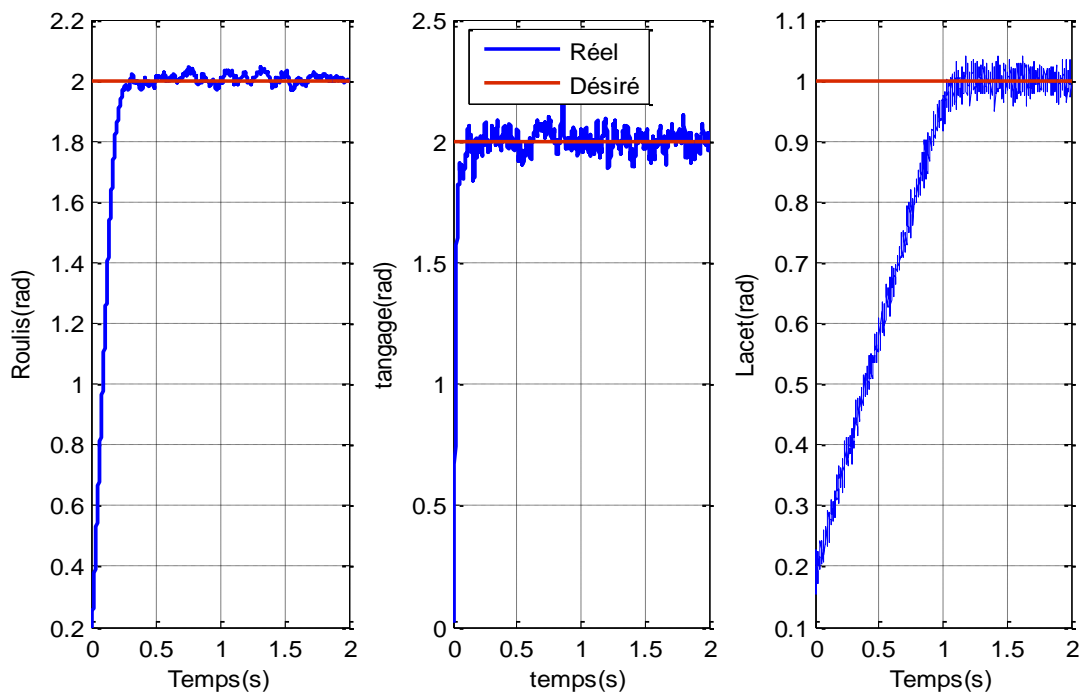
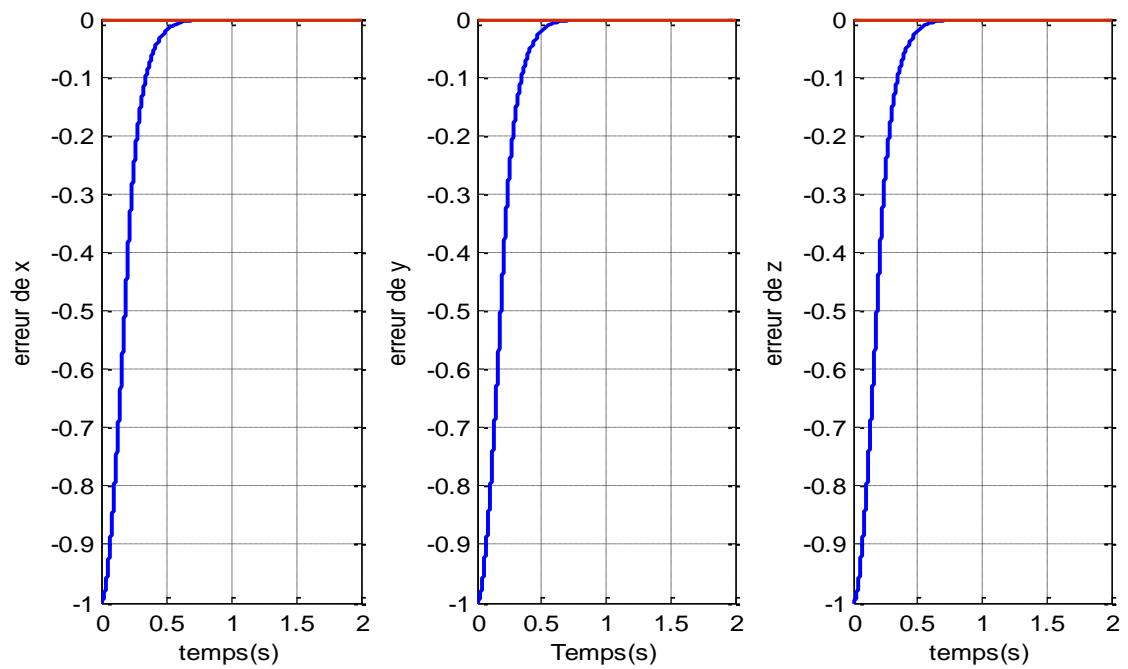
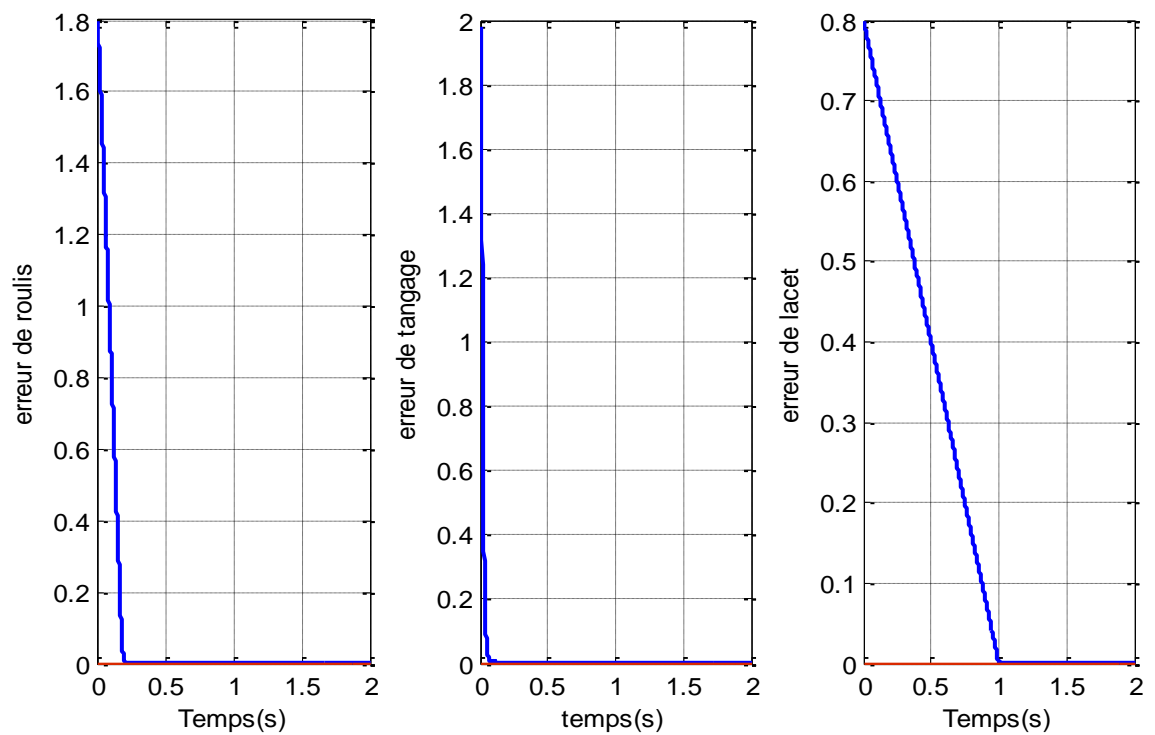


Figure IV.5 Suivi de Trajectoire en attitude (ϕ , θ , ψ) pour une consigne échelon avec bruits

Commentaire : pour l'entrée échelon, on a le suivi de trajectoire selon les trois axes de position (x, y, z) et l'attitude (ϕ , θ , ψ), même en incluant la perturbation (bruit blanc gaussien), avec le même temps de réponse de l'entrée échelon sans bruits.

• Les erreurs

**Figure IV.6** Erreur de position (x, y, z)**Figure IV.7** Erreur d'attitude

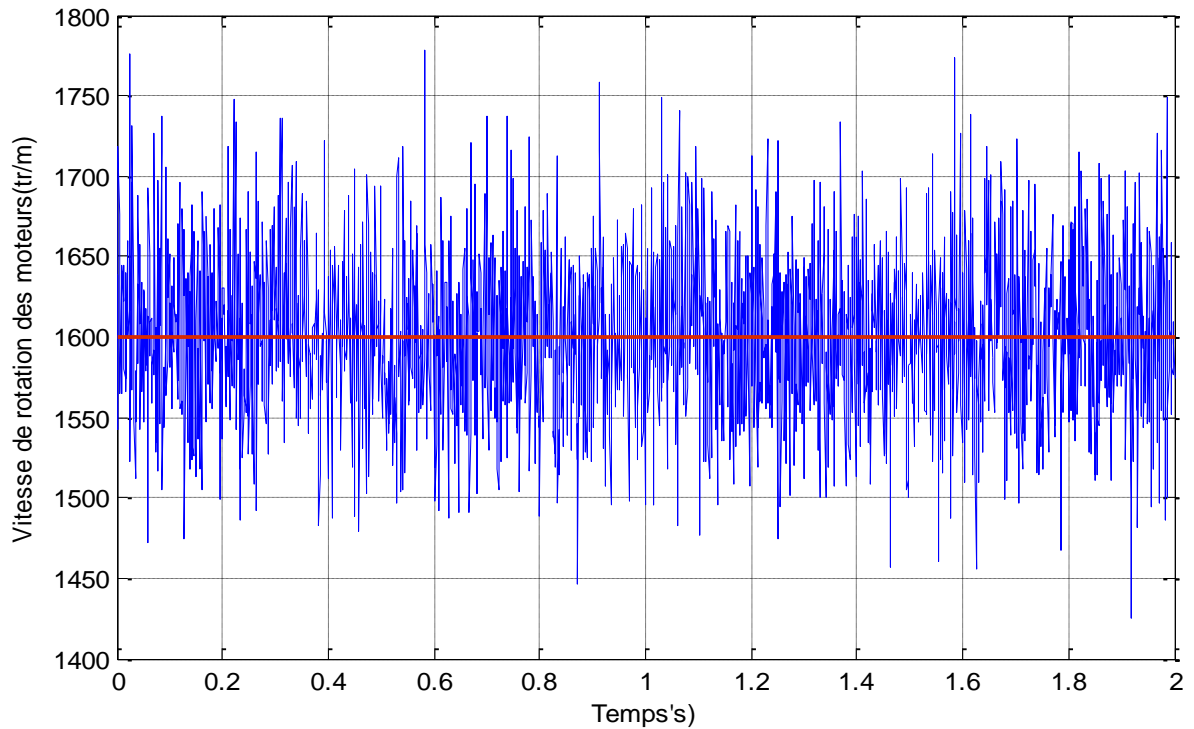


Figure IV.8 Perturbation sur les Actionneurs (Vitesses des moteurs)

➤ **Entrée Sinus**

- Sans bruits

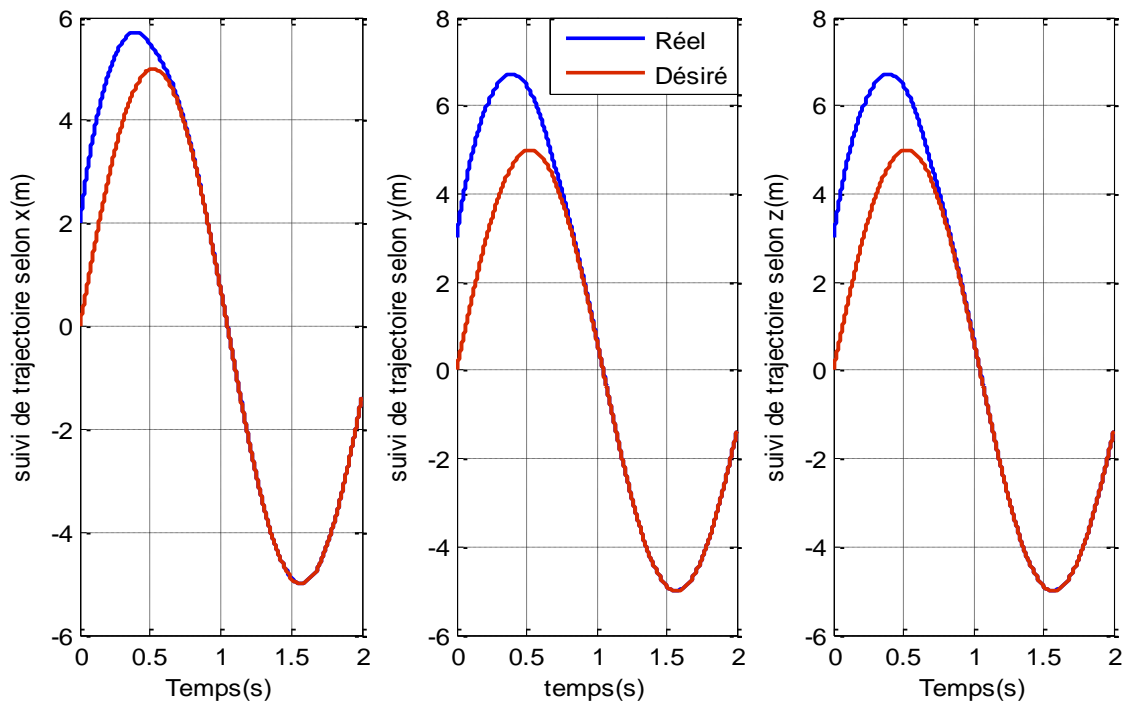


Figure IV.9 Suivi de Trajectoire en position (x, y, z) pour une entrée Sinus

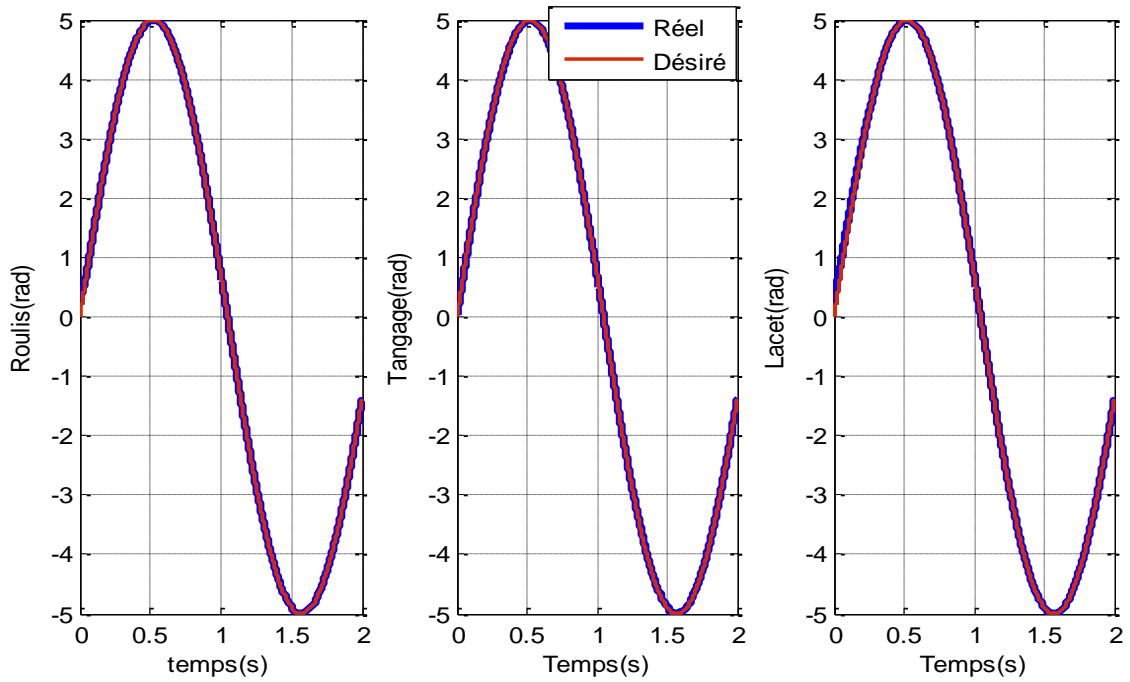


Figure IV.10 Suivi de Trajectoire en attitude (ϕ, θ, ψ) pour une entre sinus

Commentaire : pour l'entrée 'Sinus' sans bruits, on a le suivi de trajectoire selon les trois axes de position (x, y, z) et l'attitude (ϕ, θ, ψ), nous pouvons remarque que le temps de réponse de la position égale à 0.7s, et l'attitude très petit.

- Avec bruits

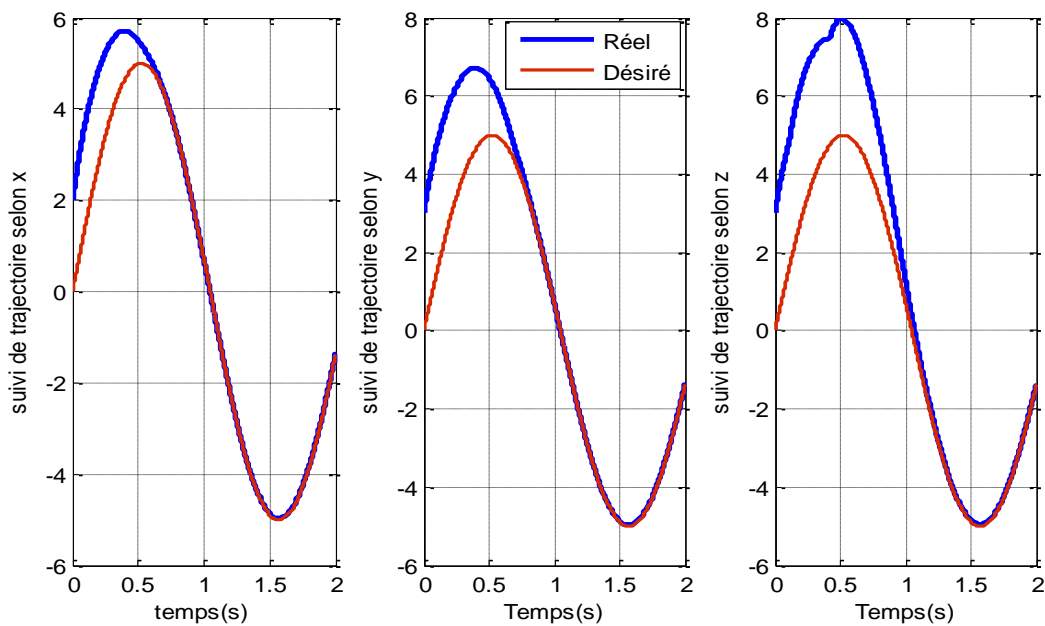


Figure IV.11 Suivi de Trajectoire en position (x, y, z) pour une entrée sinus avec bruits

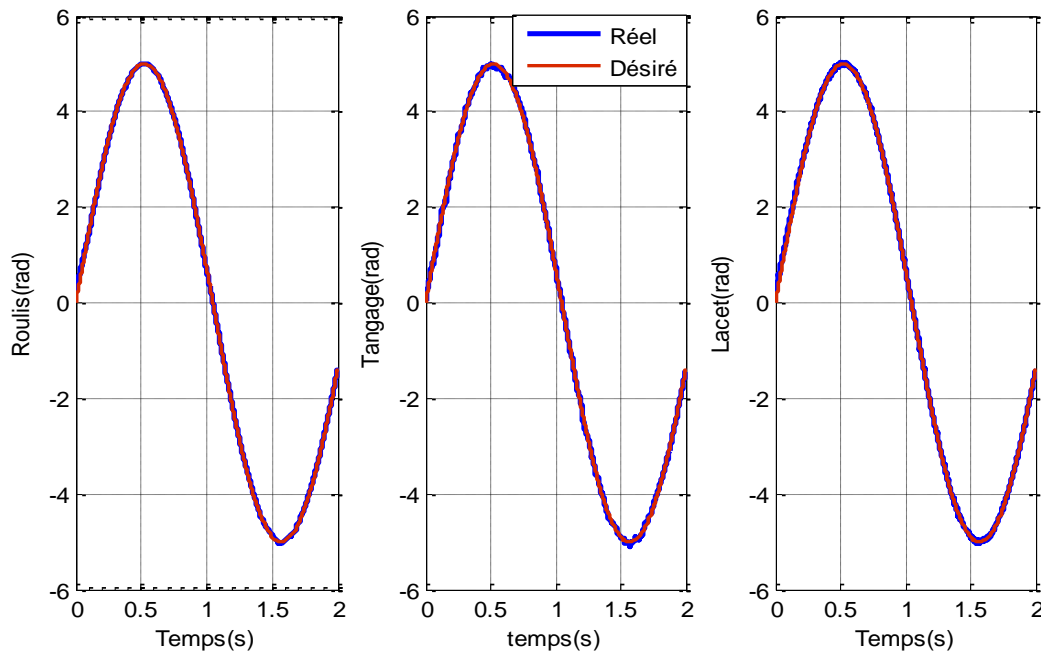


Figure IV.12 Suivi de Trajectoire en attitude (ϕ , θ , ψ) pour une entrée sinus avec bruits.

Commentaire : pour l'entrée 'Sinus', on a le suivi de trajectoire selon les trois axes de position (x , y , z) et l'attitude (ϕ , θ , ψ), même en incluant la perturbation (bruit blanc gaussien), avec le même temps de réponse de l'entrée sinus sans bruits.

- **Les erreurs**

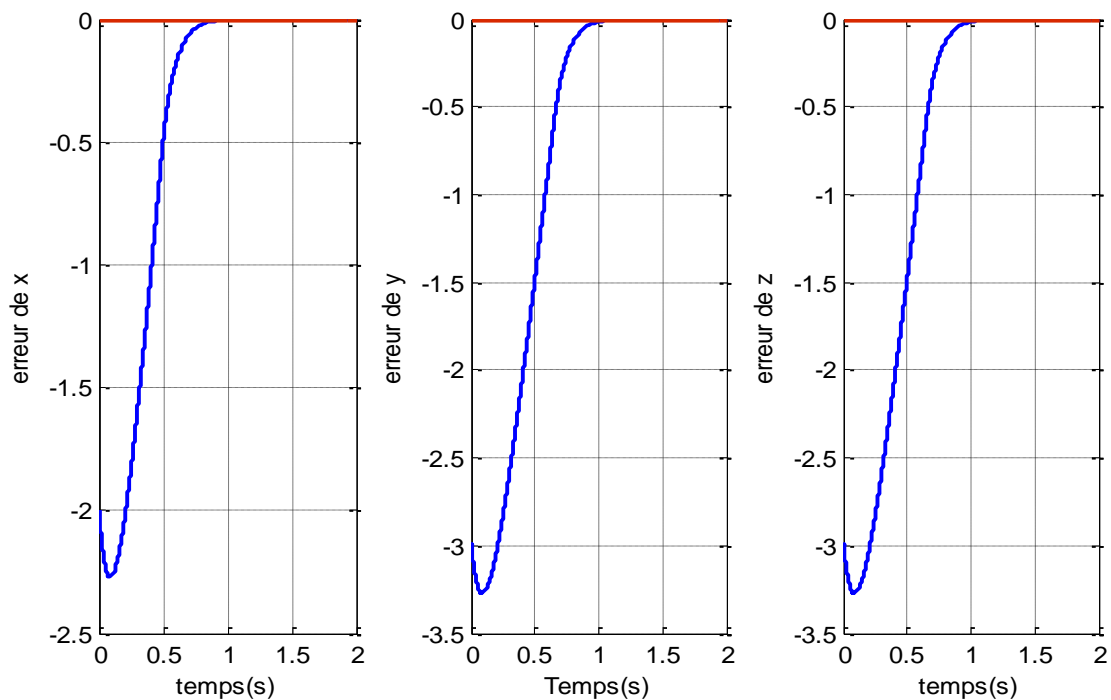


Figure IV.13 Erreur de position(x , y , z)

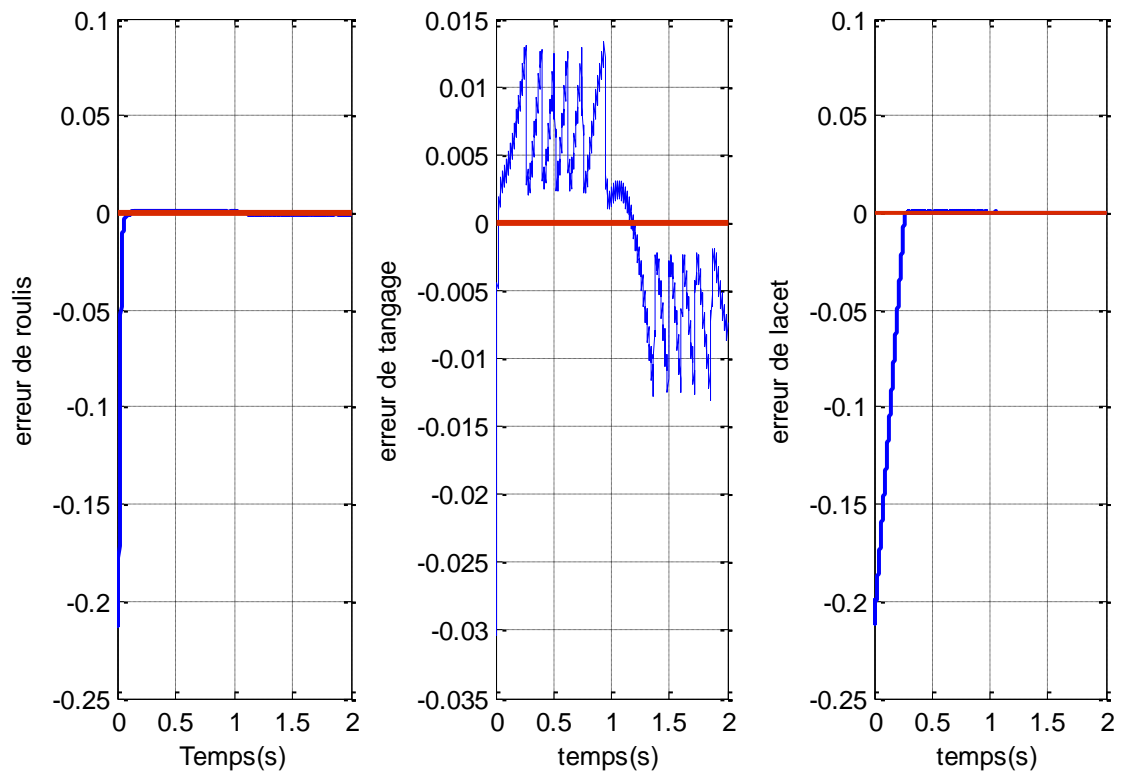


Figure IV.14 Erreur d'attitude (ϕ , θ , ψ)

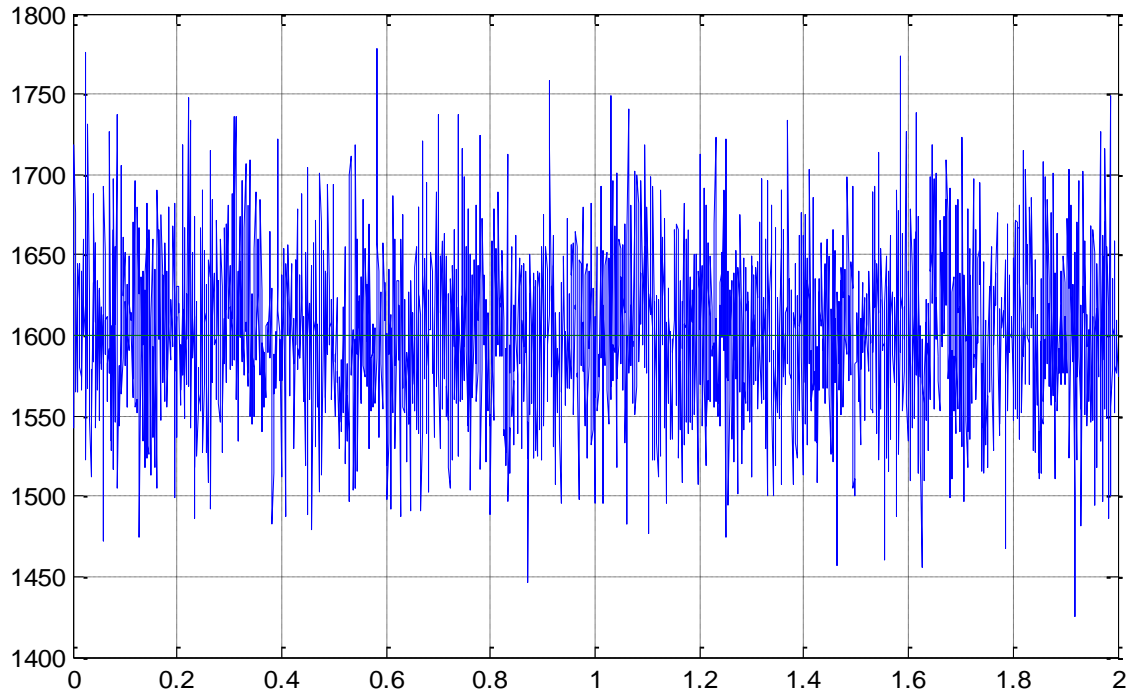


Figure IV.15 Perturbation sur les Actionneurs (Vitesses des moteurs)

➤ **Entrée trajectoire**

- Sans bruits

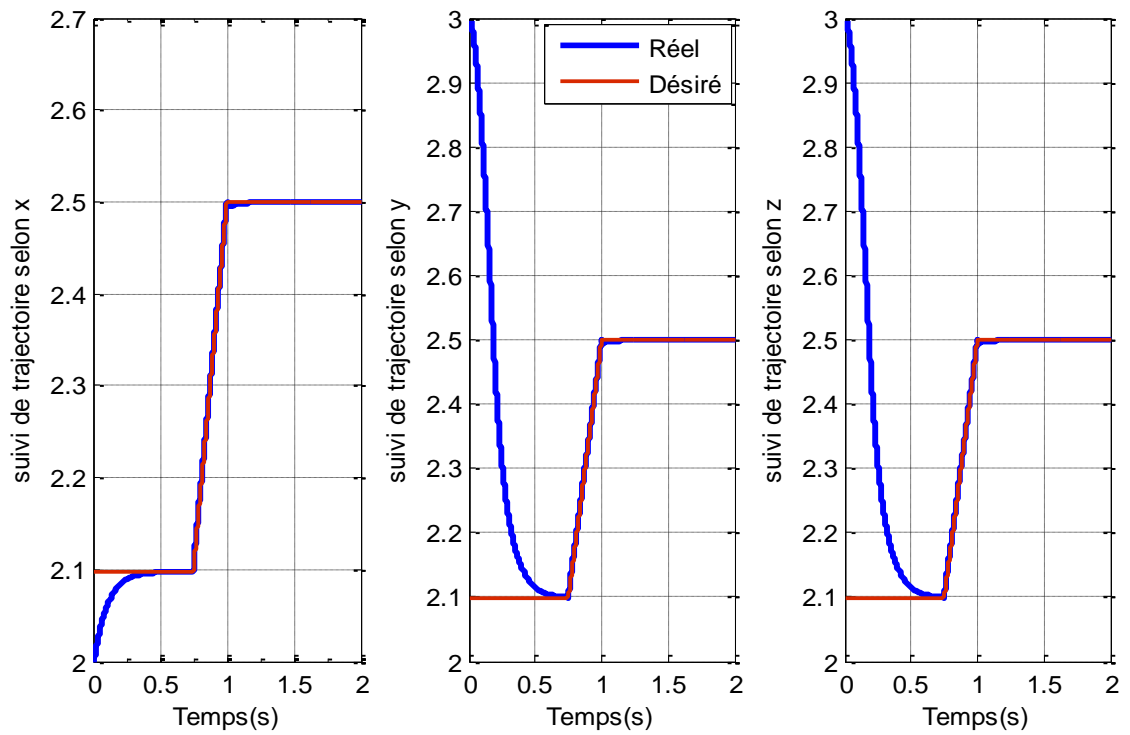


Figure IV.16 Suivi de Trajectoire en position (x, y, z) pour l'entrée trajectoire sans bruits

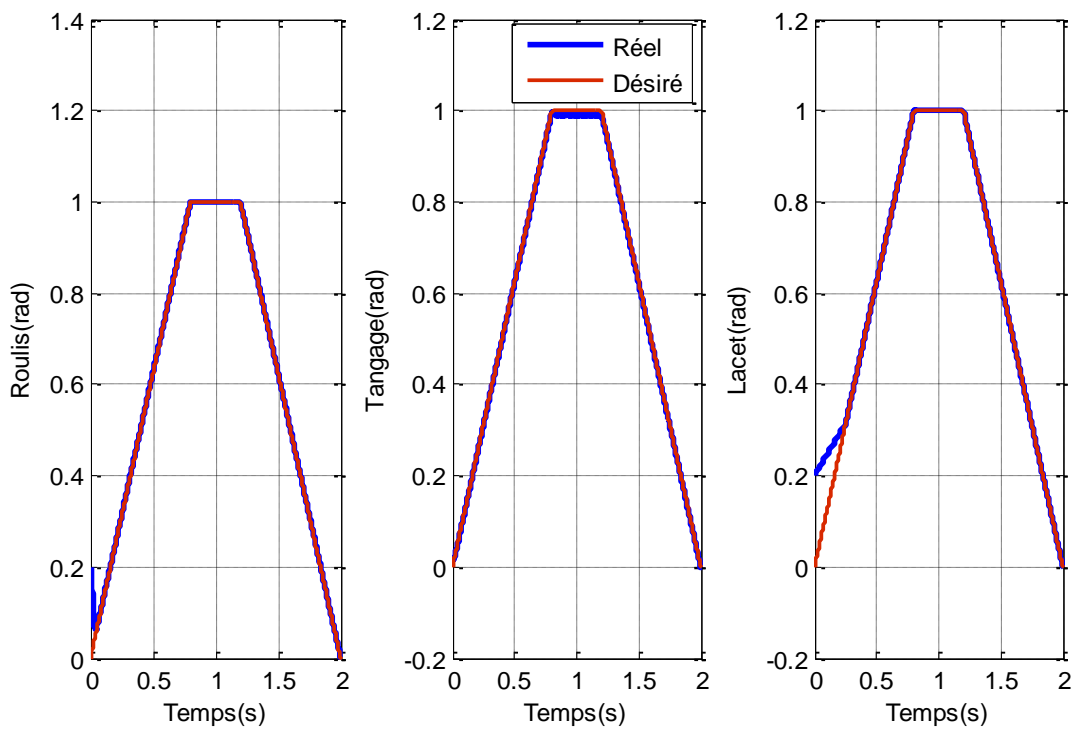


Figure IV.17 Suivi de Trajectoire en attitude (ϕ , θ , ψ) pour l'entrée trajectoire sans bruits

Commentaire : pour l'entrée 'trajectoire' sans bruits, on a le suivi de trajectoire selon les trois axes de position (x, y, z) et l'attitude (ϕ , θ , ψ), nous pouvons remarquer que le temps de réponse de la position (x) égale à 0.4s et la position (y), (z) égale à 0.7s, et l'attitude très petit.

- Avec bruits

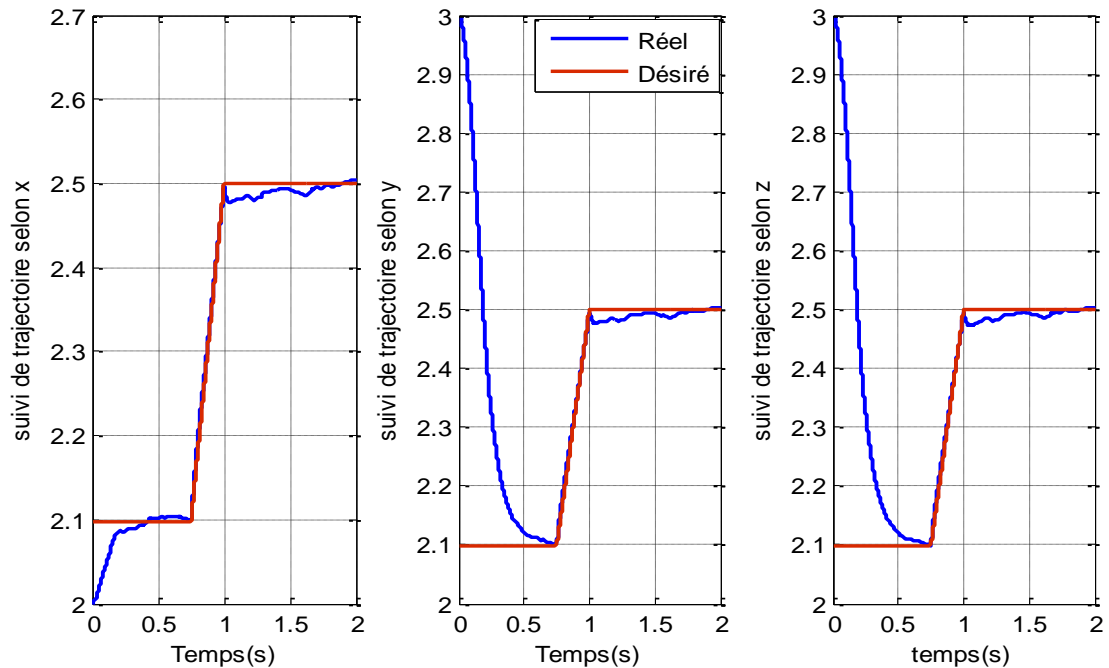


Figure IV.18 Suivi de Trajectoire en position (x, y, z) pour l'entrée trajectoire avec bruits.

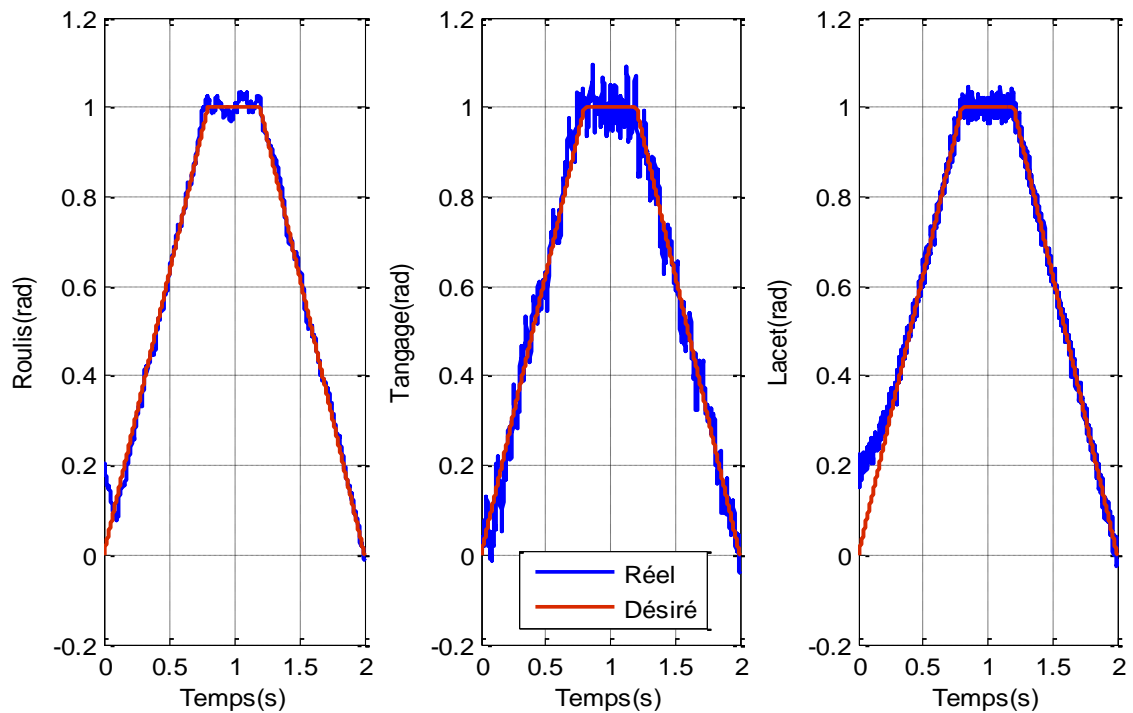


Figure IV.19 Suivi de Trajectoire en attitude (ϕ , θ , ψ) pour l'entrée trajectoire avec bruits.

Commentaire : pour l'entrée 'Trajectoire', on a le suivi de trajectoire selon les trois axes de position (x, y, z) et l'attitude (ϕ , θ , ψ), même en incluant la perturbation (bruit blanc gaussien) avec le même temps de réponse de l'entrée trajectoire sans bruits.

- Les erreurs

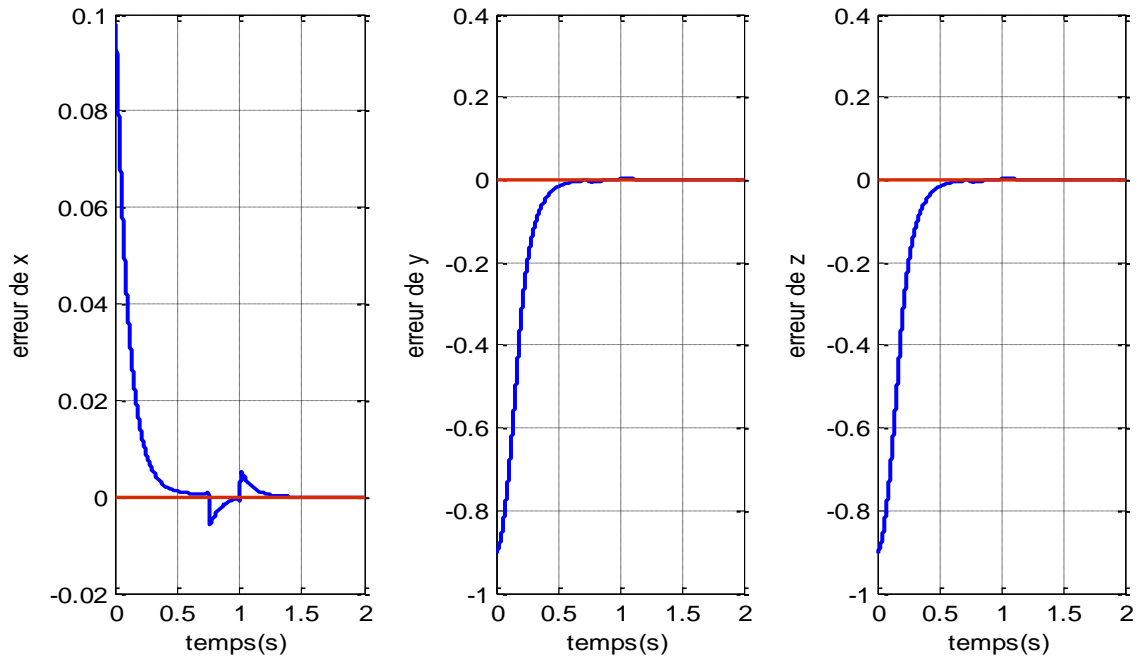


Figure IV.20 Erreur de Position(x, y, z)

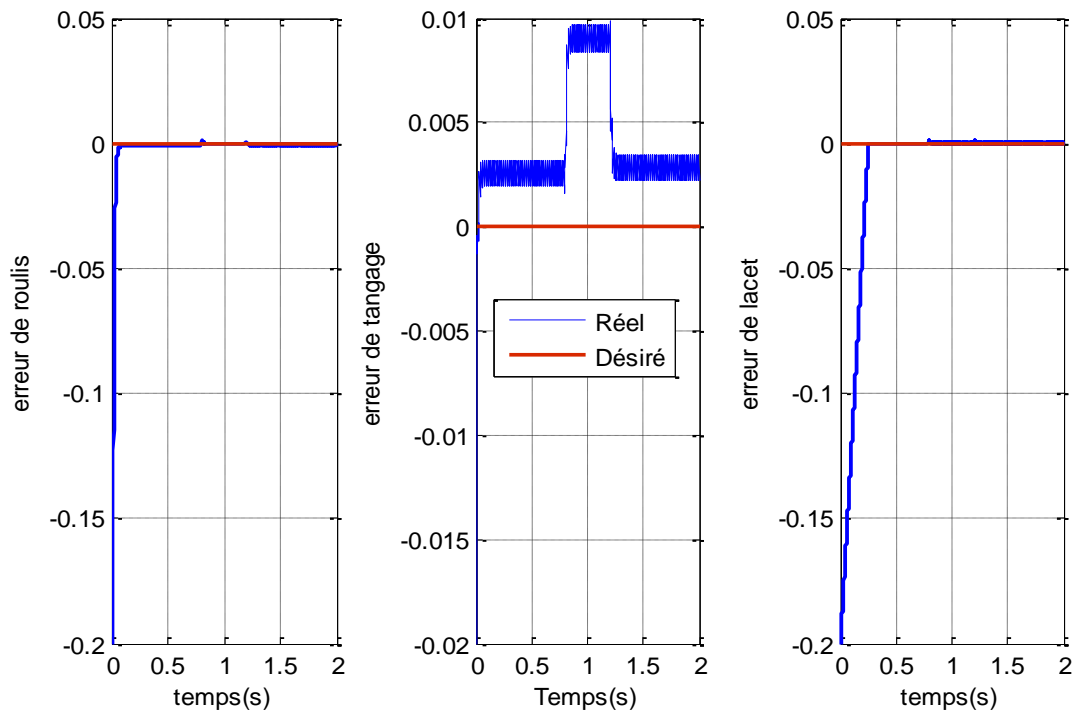


Figure IV.21 Erreur d'attitude (ϕ , θ , ψ)

variables	Echelon	Sinus	Trajectoire
X	$3.149*10^{-4}$	$5.76*10^{-4}$	$8.691*10^{-5}$
Y	$3.149*10^{-4}$	$5.628*10^{-4}$	$6.258*10^{-5}$
Z	$3.149*10^{-4}$	$5.628*10^{-4}$	$6.258*10^{-5}$
Phi (ϕ)	$4.293*10^{-4}$	$4.214*10^{-4}$	$5.301*10^{-4}$
Thêta (θ)	$4.536*10^{-3}$	$7.428*10^{-3}$	$2.192*10^{-3}$
Ksi (ψ)	$1.131*10^{-4}$	$4.63*10^{-4}$	$2.995*10^{-4}$

Tableau IV.2 Les valeurs des erreurs pour les trois entrées (échelon, sinus, trajectoire).

Commentaire : après avoir les graphes et la mesure des erreurs de position et l'attitude (différence entre la valeur désirée et la valeur mesurée), l'erreur est presque négligeable.

Commande	Energie (w)
U_1	$1.304*10^4$
U_2	241.1
U_3	$2.405*10^4$
U_4	64.3
U_x	$4.539*10^{-2}$
U_y	$4.539*10^{-2}$

Tableau IV.3 Consommation d'énergies des commandes de système

IV.5 Conclusion

A travers Ce chapitre, nous avons montré la simplicité et la richesse de la commande à structure variable par mode glissant avec une surface de commutation non linéaire. Nous nous sommes intéressés de plus près à l'application de cette commande sur le quadrotor. En considérant le modèle simplifié non-linéaire obtenu dans le deuxième chapitre.

La commande par mode glissant a donné de bonnes performances dynamiques et une grande capacité de poursuite (Suivi de Trajectoire) de la consigne désirée, de rejet de la perturbation et d'insensibilité vis-à-vis des variations de mesures issues des capteurs.