

Modélisation et synthèse d'un autopilote robuste pour un bateau cargo

RASOAMANANA R. A.¹, RANDRIAMITANTSOA P. A.², RANDRIAMITANTSOA A. A.³

Laboratoire de Recherche en Télécommunication, Automatique, Signal et Images

(LR-T.A.S.I)

Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation

(ED-STII)

Ecole Supérieure Polytechnique Antananarivo

Université d'Antananarivo

BP 1500, Ankatso – Antananarivo 101 – Madagascar

¹*rasoamananaradoniaina@gmail.com*, ²*rpauguste@gmail.com*, ³*andriau23@gmail.com*

Résumé : Cet article utilise une extension non linéaire du modèle de Nomoto pour la modélisation du bateau. Notre objectif est de synthétiser une loi de commande robuste pour l'autopilotage d'un bateau cargo. Une technique de backstepping avec approximation des fonctions non linéaires par des réseaux de neurones artificiels est utilisée.

Mots clés : Autopilotage, Bateau, commande robuste, Backstepping, réseau de neurone

Abstract: This article uses a nonlinear extension of Nomoto model for ship modeling. Our goal is to synthesize a robust control law for the autopiloting of a cargo ship. A backstepping technique with approximation of the nonlinear function by artificial neural networks is used.

Keywords: Autopilot, Boat, robust control, Backstepping, neural network

1. Introduction

De nos jours, la nécessité de la commande automatique ou autopilotage s'avère utile. Alors, nous allons contribuer à la synthèse d'une loi de commande robuste pour l'autopilotage d'un bateau cargo en manœuvre. Une extension non linéaire du modèle de Nomoto du premier ordre est choisie de par sa

simplicité et de sa fidélité au comportement réel du bateau cargo. De nombreuses simulations d'une manœuvre en maintien de cap et en virage du bateau cargo seront présentées dans cet article.

2. Bateau cargo

Un cargo ou navire de charge [1] est un navire de commerce ou navire marchand dont le rôle

consiste à transporter des marchandises sous diverses formes en utilisant la voie maritime.

Les bateaux cargos peuvent être classifiés selon le type de marchandises qu'ils transportent, et leur façon de les transporter. La principale distinction se fait entre ceux qui transportent :

- une cargaison « sèche »
- une cargaison « liquides »

Comme tous bateaux classiques, les cargos possèdent 6 degrés de liberté qui sont : le **cavalement**, l'**embarquée**, le **pilonnement**, le **roulis**, le **tangage** et le **lacet**.

Les 6 degrés de liberté d'un bateau sont exprimés par la **figure 1** ci-dessous.

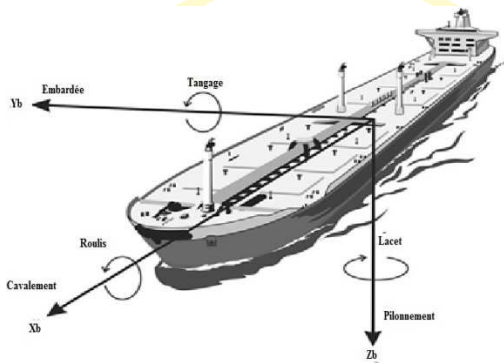


Figure 1 : Degrés de liberté d'un bateau

Remarque 1 :

Dans cet article, nous nous intéresserons principalement à l'autopilotage c'est-à-dire à la commande de l'angle de lacet.

3. Modèle autopiloté de Nomoto [2]

3.1. Modèle de Nomoto du second ordre

Le modèle d'autopilotage linéaire à vitesse constante u_0 est défini par :

$$M\dot{v} + N(u_0)v = b\delta \quad (1)$$

Avec $v = [v, r]^T$ est le vecteur d'état

δ est l'angle du gouvernail

$b = \begin{bmatrix} -Y_\delta \\ -N_\delta \end{bmatrix}$ est une matrice de coefficient hydrodynamique

$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}} \\ mx_g - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$ est la matrice d'inertie

$N(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r \\ -N_v & mx_g u_0 - N_r \end{bmatrix}$ est la somme du terme centripète de Coriolis et de l'amortissement linéaire

Le taux de lacet r est choisi comme sortie tel que :

$$\dot{\psi} = r \quad (2)$$

$$r = c^T v, \quad c^T = [0, 1] \quad (3)$$

La transformée de Laplace de l'équation (1) donne :

$$\frac{r}{\delta}(s) = \frac{K(1 + T_3 s)}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} \quad (4)$$

La représentation dans le domaine temporel du modèle de second ordre donne :

$$T_1 T_2 \psi^{(3)} + (T_1 + T_2) \ddot{\psi} + \dot{\psi} = K(\delta + T_3 \dot{\delta}) \quad (5)$$

En combinant l'équation (2) et (5), on a :

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K(\delta + T_3 \dot{\delta}) \quad (6)$$

3.2. Modèle de Nomoto du premier ordre

Le modèle de Nomoto du premier ordre est obtenu en calculant la constante de temps équivalente par :

$$T = T_1 + T_2 - T_3 \quad (7)$$

Tel que

$$\frac{r}{\delta}(s) = \frac{K}{(1 + Ts)} \quad (8)$$

La représentation dans le domaine temporel du modèle de Nomoto du premier ordre donne :

$$T\dot{\psi} + \psi = K\delta \quad (9)$$

En combinant l'équation (2) et (9), on a :

$$T\dot{r} + r = K\delta \quad (10)$$

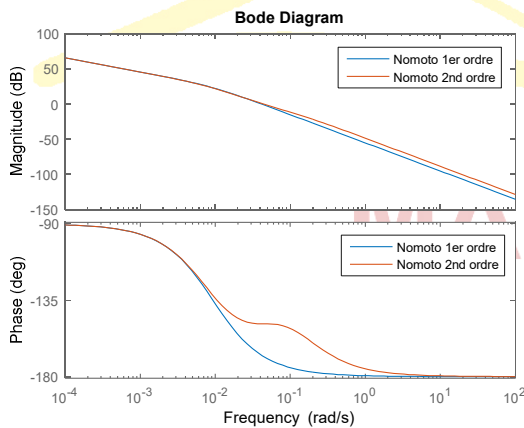


Figure 2 : Réponse en fréquence du bateau cargo

La réponse en fréquence représentée par la **figure 2** nous montre que le modèle autopiloté

de Nomoto du premier ordre d'un bateau cargo est assez précis en très basse fréquence. La différence entre le modèle du premier ordre et du second ordre se situe autour de la fréquence 0.1 rad/s. Ceci est due à l'annulation de la dynamique de l'embarquée. Le modèle du premier ordre est donc très utilisé pour la modélisation d'un bateau cargo en manoeuvre qui travaille en très basse fréquence.

3.3. Extension non linéaire du modèle de Nomoto

Le modèle de Nomoto linéaire peut être élargi pour inclure les effets non linéaires en ajoutant une non linéarité statique décrivant les caractéristiques de manoeuvre.

3.3.1. Extension non linéaire du modèle de Nomoto du premier ordre

Dans [3], le modèle du premier ordre suivant est proposé :

$$T\dot{r} + H_n(r) = K\delta \quad (11)$$

Avec

$$H_n(r) = n_3 r^3 + n_2 r^2 + n_1 r + n_0 \quad (12)$$

Le modèle linéaire équivalent défini par l'équation (10) est obtenu pour $H_n(r) = r$.

3.3.2. Extension non linéaire du modèle de Nomoto du second ordre

Dans [4], une extension non linéaire du modèle de Nomoto du second ordre est proposée :

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + H_B(r) = K(\delta + T_3 \dot{\delta}) \quad (13)$$

Avec

$$H_B(r) = b_3 r^3 + b_2 r^2 + b_1 r + b_0 \quad (14)$$

Le modèle linéaire équivalent défini par l'équation (6) est obtenu pour $H_B(r) = r$.

4. Synthèse de l'autopilote [5][6][7]

Le schéma bloc en autopilotage est donné par la **figure 3** suivante :

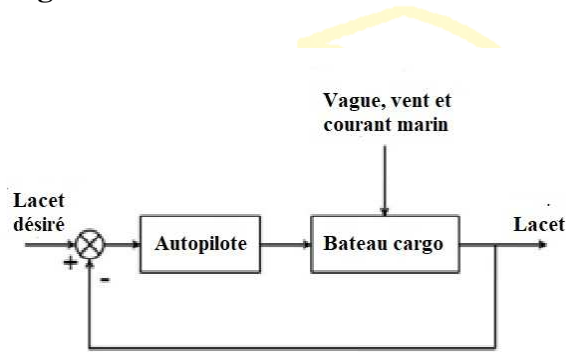


Figure 3 : Autopilotage d'un bateau cargo

4.1. Commande backstepping nominale

Considérons le modèle nominal du premier ordre non linéaire suivant :

$$\dot{\psi} = r \quad (15)$$

$$T\dot{r} + H_N(r) = K\delta \quad (16)$$

Sous la forme retroactive stricte, on a :

$$\dot{\psi} = r \quad (17)$$

$$\dot{r} = \frac{1}{T} [K\delta - H_N(r)] \quad (18)$$

L'autopilotage consiste à la poursuite de l'angle de lacet désiré ψ_d par l'angle de lacet ψ .

Etape 1 : On définit la variable d'erreur $e_1 = \psi - \psi_d$. Sa dérivée est :

$$\dot{e}_1 = \dot{\psi} - \dot{\psi}_d = r - \dot{\psi}_d \quad (19)$$

Considérons la fonction de contrôle de Lyapunov suivante :

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (20)$$

Sa dérivée donne alors :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 \quad (21)$$

Donc

$$\dot{V}_1 = e_1 (r - \dot{\psi}_d) \quad (22)$$

Pour assurer la convergence de e_1 , la dérivée de la fonction de contrôle de Lyapunov doit être définie négative donc,

$$r - \dot{\psi}_d = -k_1 e_1 \quad (23)$$

Donc,

$$r_d = -k_1 e_1 + \dot{\psi}_d \quad (24)$$

Et

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 \quad (25)$$

Etape 2 : On définit la variable d'erreur $e_2 = r - r_d$. Sa dérivée est :

$$\dot{e}_2 = \dot{r} - \dot{r}_d = -\frac{H_N(r)}{T} + \frac{K}{T} \delta - \dot{r}_d \quad (26)$$

La fonction non linéaire $-\frac{H_N(r)}{T}$ composant le modèle est parfois difficile à implémenter en

pratique. Avec son approximation par un réseau de neurone artificiel $\theta^T \xi(r)$, l'équation (26) donne :

$$\dot{e}_2 = \theta^T \xi(r) + \frac{K}{T} \delta - \dot{r}_d \quad (27)$$

Considérons la fonction de contrôle de Lyapunov suivante :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (28)$$

Sa dérivée donne :

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 + e_2 \dot{e}_2 \quad (29)$$

Donc

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 + e_2 (\theta^T \xi(r) + \frac{K}{T} \delta - \dot{r}_d) \quad (30)$$

Pour assurer la convergence de e_2 , la dérivée de la fonction de contrôle de Lyapunov doit être définie négative donc,

$$\theta^T \xi(r) + \frac{K}{T} \delta - \dot{r}_d = -k_2 e_2 \quad (31)$$

Donc, la loi de commande nominale de l'angle du gouvernail est donnée par :

$$\delta = \frac{T}{K} [-\theta^T \xi(r) + \dot{r}_d - k_2 e_2] \quad (32)$$

4.2. Commande backstepping nominale « performante »

Pour augmenter la performance du système [8], nous allons utiliser le terme $\tanh(\cdot)$ défini par la **figure 4** ci-dessous.

Etape 1 : L'équation (23) devient alors :

$$r - \dot{\psi}_d = -k_1 e_1 - \beta_1 \tanh(\alpha_1 e_1) \quad (33)$$

Avec $\beta_1 > 0$ et $\alpha_1 > 0$

Donc,

$$r_d = -k_1 e_1 + \dot{\psi}_d - \beta_1 \tanh(\alpha_1 e_1) \quad (34)$$

Et

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 - \beta_1 e_1 \tanh(\alpha_1 e_1) < 0 \quad (35)$$

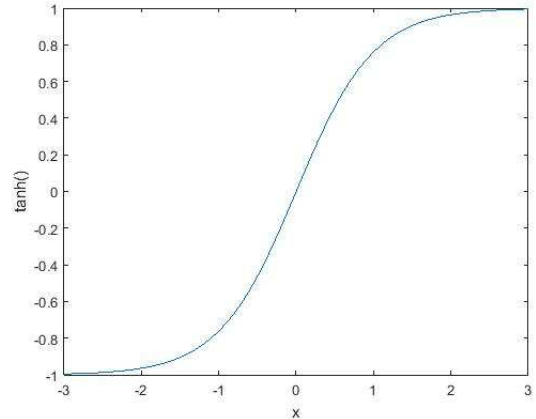


Figure 4 : fonction tangente hyperbolique

Etape 2 : L'équation (31) devient alors :

$$\theta^T \xi(r) + \frac{K}{T} \delta - \dot{r}_d = -k_2 e_2 - \beta_2 \tanh(\alpha_2 e_2) \quad (36)$$

Donc la loi de commande nominale « performante » de l'angle du gouvernail est donnée par :

$$\delta = \alpha_1 = \frac{T}{K} [-\theta^T \xi(r) + \dot{r}_d - k_2 e_2 - \beta_2 \tanh(\alpha_2 e_2)] \quad (37)$$

Remarque 2 :

La commande Backstepping « performante » permet de :

- augmenter la performance du système nominal

- garantir une stabilité asymptotique globale dans le cas d'un système avec une perturbation externe bornée ou constante

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (43)$$

Sa dérivée donne alors :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 \quad (44)$$

Donc

$$\dot{V}_1 = e_1(r - \dot{\psi}_d) \quad (45)$$

Pour assurer la convergence de e_1 , la dérivée de la fonction de contrôle de Lyapunov doit être définie négative, alors

$$r - \dot{\psi}_d = -k_1 e_1 - \beta_1 \tanh(\alpha_1 e_1) \quad (46)$$

Avec $\beta_1 > 0$ et $\alpha_1 > 0$

Donc

$$r_d = -k_1 e_1 - \beta_1 \tanh(\alpha_1 e_1) + \dot{\psi}_d \quad (47)$$

Et

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 - \beta_1 e_1 \tanh(\alpha_1 e_1) < 0 \quad (48)$$

Etape 2 : On définit la variable d'erreur $e_2 = r - r_d$. Sa dérivée est :

$$\dot{e}_2 = \dot{r} - \dot{r}_d = -\frac{H_N(r)}{T} + \frac{K}{T} \delta + \frac{w(t, \psi, r)\Delta}{T} - \dot{r}_d \quad (49)$$

Mettant l'équation (38) et (39) sous la forme retroactive stricte, donc on a :

$$\dot{\psi} = r \quad (40)$$

$$\dot{r} = \frac{1}{T} [K\delta + w\Delta - H_N(r)] \quad (41)$$

Avec $H_N(r)$ est une fonction non linéaire connue.

Posons ψ_d la sortie désirée du système.

Etape 1 : On définit la variable d'erreur $e_1 = \psi - \psi_d$. Sa dérivée est :

$$\dot{e}_1 = \dot{\psi} - \dot{\psi}_d = r - \dot{\psi}_d \quad (42)$$

Considérons la fonction de contrôle de Lyapunov suivante :

La fonction non linéaire $-\frac{H_N(r)}{T}$ composant le modèle est parfois difficile à implémenter en pratique. Avec son approximation par un réseau de neurone artificiel $\theta^T \xi(r)$, l'équation (49) donne :

$$\dot{e}_2 = \theta^T \xi(r) + \frac{K}{T} \delta + \frac{w(t, \psi, r)\Delta}{T} - \dot{r}_d \quad (50)$$

Considérons la fonction de contrôle de Lyapunov suivante :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}e_2^2 \quad (51)$$

Sa dérivée donne :

$$\dot{V}_2 = -k_1e_1^2 - \beta_1e_1 \tanh(\alpha_1e_1) + e_2\dot{e}_2 \quad (52)$$

Donc

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -k_1e_1^2 - \beta_1e_1 \tanh(\alpha_1e_1) + \\ & e_2(\theta^T \xi(r) + \frac{K}{T}\delta + \frac{w(t,\psi,r)\Delta}{T} - \dot{r}_d) \end{aligned} \quad (53)$$

La méthode de l'amortissement non linéaire permet de calculer la commande qui assure des trajectoires bornées de (41), même en présence des incertitudes, donc :

$$\delta = \alpha_1 + \varsigma \quad (54)$$

Donc l'équation (53) donne :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -k_1e_1^2 - \beta_1e_1 \tanh(\alpha_1e_1) - \\ & k_2e_2^2 - \beta_2e_2 \tanh(\alpha_2e_2) + e_2(\frac{K}{T}\varsigma + \\ & \frac{w(t,\psi,r)\Delta}{T}) \end{aligned} \quad (55)$$

car la commande nominale de l'angle du gouvernail est donnée par l'équation (37).

Avec

$$\varsigma = -m_1e_2w^2 \quad (56)$$

Où $m_1 > 0$ est un paramètre de synthèse.

Donc l'équation (55) devient alors :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -k_1e_1^2 - \beta_1e_1 \tanh(\alpha_1e_1) - \\ & k_2e_2^2 - \beta_2e_2 \tanh(\alpha_2e_2) - \frac{Km_1e_2^2w^2}{T} + \\ & \frac{e_2w\Delta}{T} \end{aligned} \quad (57)$$

Où

$$\begin{aligned} -\frac{Km_1e_2^2w^2}{T} + \frac{w\Delta e_2}{T} = & -\frac{Km_1}{T} \left[e_2w - \frac{\Delta}{2Km_1} \right]^2 + \\ & \frac{\Delta^2}{4KTm_1} \end{aligned}$$

Comme Δ est bornée par Δ_0 et que $KT > 1$, alors

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & -k_1e_1^2 - \beta_1e_1 \tanh(\alpha_1e_1) - \\ & k_2e_2^2 - \beta_2e_2 \tanh(\alpha_2e_2) + \frac{\Delta_0^2}{4m_1} \end{aligned} \quad (58)$$

Ce résultat implique que \dot{V}_2 est négative à l'extérieur d'un certain plan, et que e_1 et e_2 sont bornées (la borne dépend de Δ_0 et de m_1), malgré la présence des incertitudes.

5. Simulation

Hypothèse 1:

- Le terme non linéaire connu w composant la perturbation externe est une fonction rampe de pente égale à 2
- Le terme non linéaire incertain est borné par $\Delta_0 = 4$ donc $|\Delta| < 4$
- La vitesse de service du bateau cargo est constante

5.1. Manoeuvre en maintien de cap

5.1.1. Commande Backstepping nominale

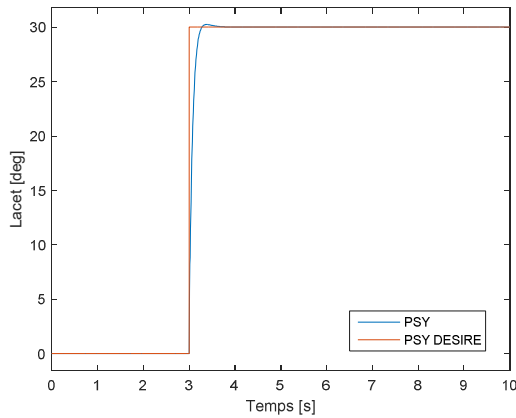


Figure 5 : Réponse du système nominal à une consigne fixe

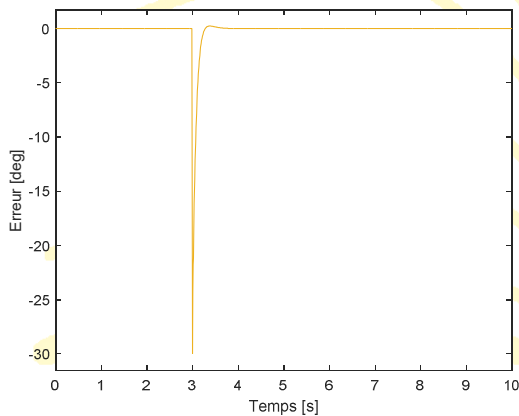


Figure 6 : Signal d'erreur du système nominal à une consigne fixe

La **figure 5** nous montre le résultat de la simulation en maintien de cap d'un bateau cargo autopiloté non linéaire nominal avec la loi de commande du gouvernail définie par l'équation (32). Le système non linéaire nominal possède une grande précision en maintien de cap car en régime permanent,

l'écart entre la consigne ψ_d et la sortie ψ est nul comme le montre la **figure 6**. Le système est aussi très rapide car le temps de montée, qui se définit comme le temps mis pour que le système atteigne 90% de la valeur finale, est d'environ 0.2s. Il présente cependant un très léger dépassement au point de saut de la consigne.

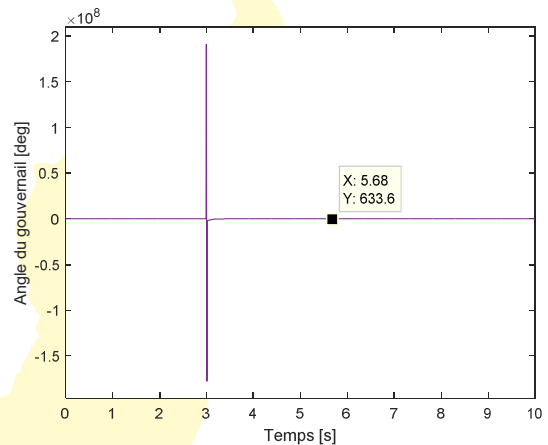


Figure 7 : Angle du gouvernail δ

L'angle du gouvernail δ est donné par la **figure 7**. En régime permanent et avant le saut à l'instant $t = 3s$, on constate que le signal de commande du gouvernail a une valeur constante de 633.6 deg. De plus, on peut apercevoir une impulsion alternative au point de saut de la consigne. Ceci est dû à la variation brusque de la consigne qui présente une tangente infinie au temps $t = 3s$.

5.1.2. Commande Backstepping nominale « performante »

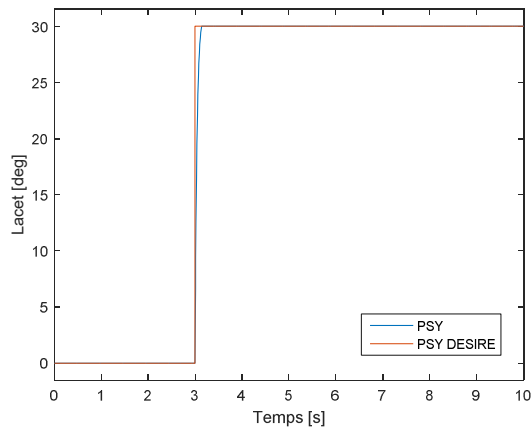


Figure 8 : Réponse du système nominal performant à une consigne fixe

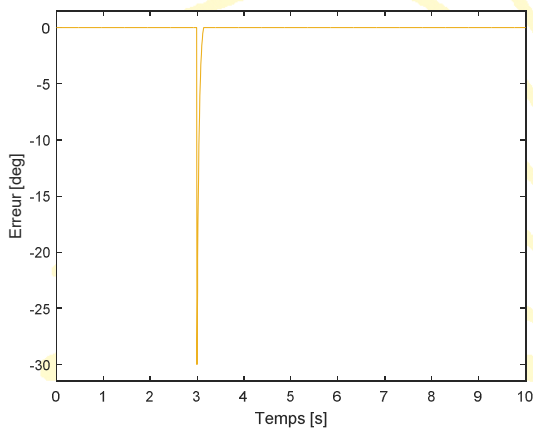


Figure 9 : Signal d'erreur du système nominal performant à une consigne fixe

La **figure 8** nous montre le résultat de la simulation en maintien de cap d'un bateau cargo autopiloté non linéaire nominal « performant » avec la loi de commande du gouvernail définie par l'équation (37). Le système non linéaire nominal « performant » possède une grande précision en maintien de

cap car en régime permanent, l'écart entre la consigne ψ_d et la sortie ψ est nul comme le montre la **figure 9**. Le système est aussi très rapide car le temps de montée, qui se définit comme le temps mis pour que le système atteigne 90% de la valeur finale, est d'environ 0.1s.

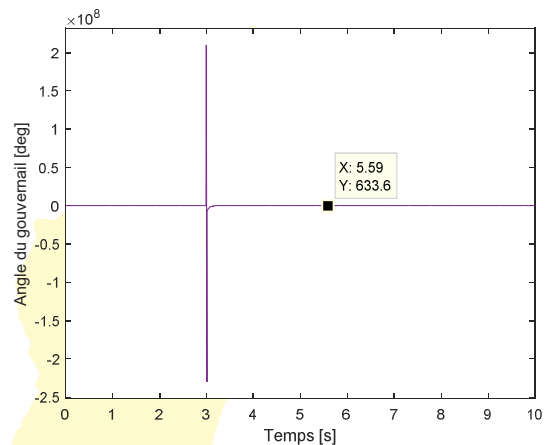


Figure 10 : Angle du gouvernail δ

L'angle du gouvernail δ est donné par la **figure 10**. En régime permanent et avant le saut à l'instant $t = 3s$, on constate que le signal de commande du gouvernail a une valeur constante de 633.6 deg. Par contre, on peut apercevoir une impulsion alternative au point de saut de la consigne. Ceci est dû à la variation brusque de la consigne qui présente une tangente infinie au temps $t = 3s$.

Remarque 3 :

On remarque une augmentation de la performance du système nominal en maintien

de cap avec l'utilisation du terme de performance $\tanh(\cdot)$ car :

- Il y a disparition du dépassement
- Le temps de montée est passé de 0.2s à 0.1s

5.1.3. Commande Backstepping robuste

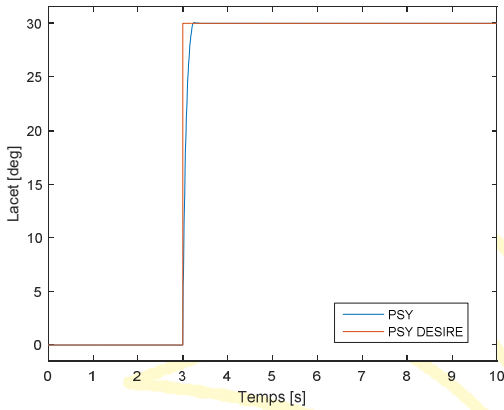


Figure 11 : Réponse du système robuste à une consigne fixe

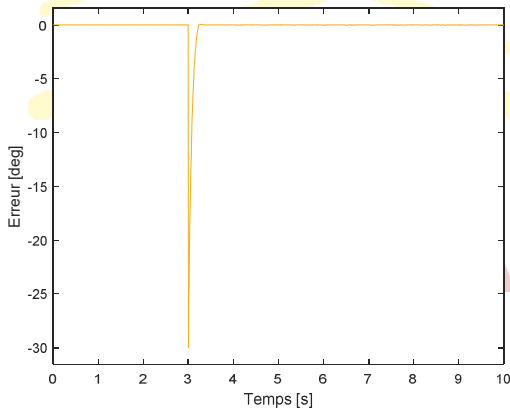


Figure 12 : Signal d'erreur du système robuste à une consigne fixe

La figure 11 nous montre le résultat de la simulation en maintien de cap d'un bateau cargo autopiloté non linéaire robuste avec la

loi de commande du gouvernail définie par l'équation (54). Le système non linéaire robuste possède une grande précision en maintien de cap car en régime permanent, l'écart entre la consigne ψ_d et la sortie ψ est nul comme le montre la figure 12. Le système est aussi très rapide car le temps de montée, qui se définit comme le temps mis pour que le système atteigne 90% de la valeur finale, est d'environ 0.1s.

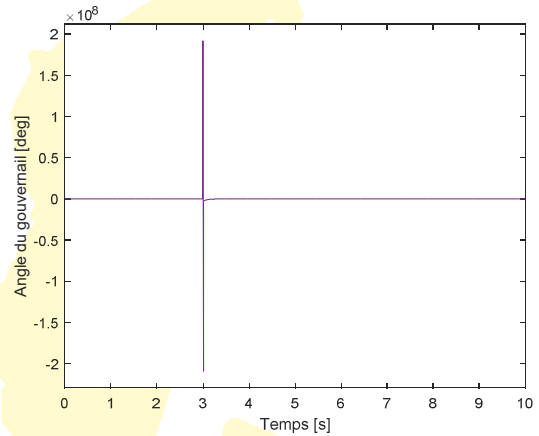


Figure 13 : Angle du gouvernail pour $t \in [0,10]$

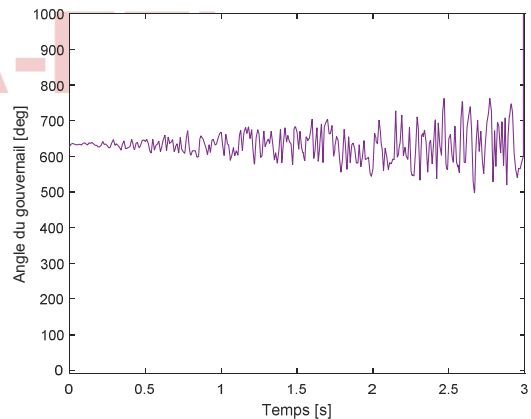


Figure 14 : Angle du gouvernail δ pour $t \in [0,3]$

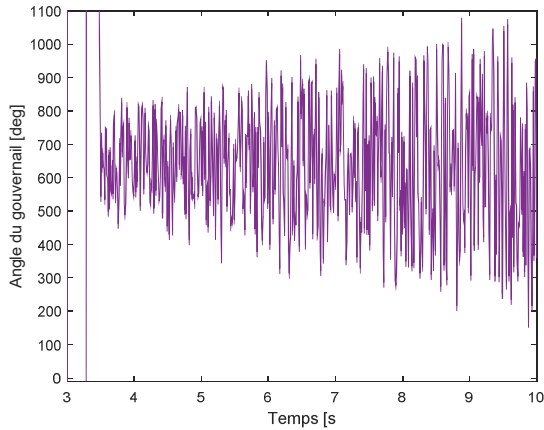


Figure 15 : Angle du gouvernail δ pour $t \in [3,10]$

L'angle du gouvernail δ est donné par les figures 13, 14 et 15. Au point de saut $t = 3s$, l'angle du gouvernail présente une impulsion alternative comme le montre la figure 13. Ceci est dû à la variation brusque de la consigne qui présente une tangente infinie au temps $t = 3s$. Avant l'instant de saut, l'angle du gouvernail est donné par la figure 14. Et après le saut, la figure 15 nous montre l'évolution de l'angle du gouvernail.

Remarque 4 :

On peut constater que la perturbation externe est bien rejetée par le système robuste en maintien de cap.

5.2. Manoeuvre en virage

5.2.1. Commande Backstepping nominale

La figure 16 nous montre les résultats de la simulation en virage d'un bateau cargo autopiloté non linéaire nominal avec la loi de

commande du gouvernail définie par l'équation (32). On peut apercevoir que le système autopiloté suit très bien la consigne sinusoidale. L'écart entre la consigne ψ_d et l'angle de lacet ψ est sinusoidal avec une amplitude de 0.51 deg comme le montre la figure 17.

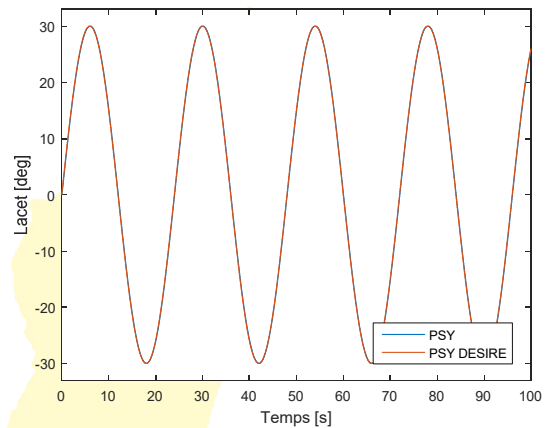


Figure 16 : Réponse du système nominal à une entrée sinusoidale

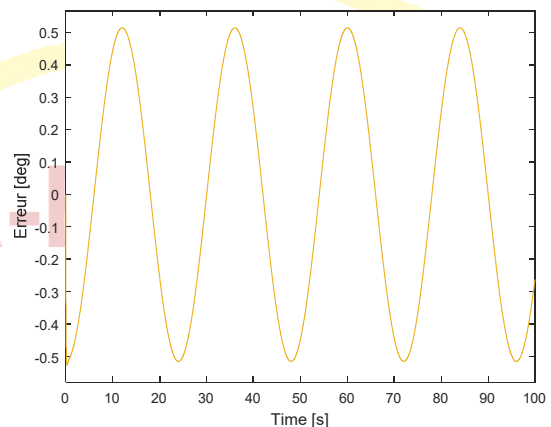


Figure 17 : Signal d'erreur du système nominal à une entrée sinusoidale

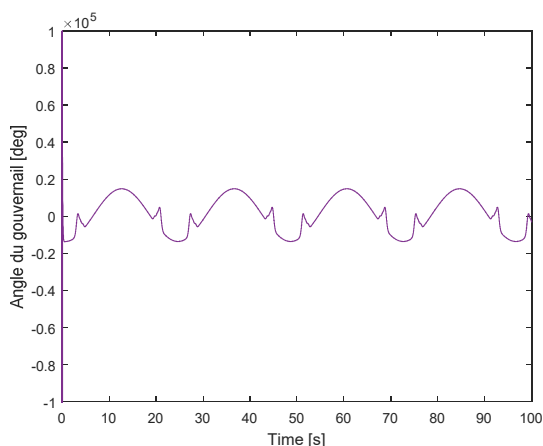


Figure 18 : Angle du gouvernail δ

Le signal de commande δ du gouvernail est donné par la **figure 18**. Il est périodique avec une valeur maximale avoisinant la valeur de 1.5×10^4 deg et de même fréquence que la consigne égale à 15 deg/s.

5.2.2. Commande Backstepping nominale « performante »

La **figure 19** nous montre les résultats de la simulation en virage d'un bateau cargo autopiloté non linéaire nominal « performant » avec la loi de commande du gouvernail définie par l'équation (37). On peut apercevoir que le système autopiloté suit très bien la consigne sinusoidale. L'écart entre la consigne ψ_d et l'angle de lacet ψ est sinusoidal de même fréquence que la consigne avec une amplitude d'environ 0.15 deg comme le montre la **figure 20**.

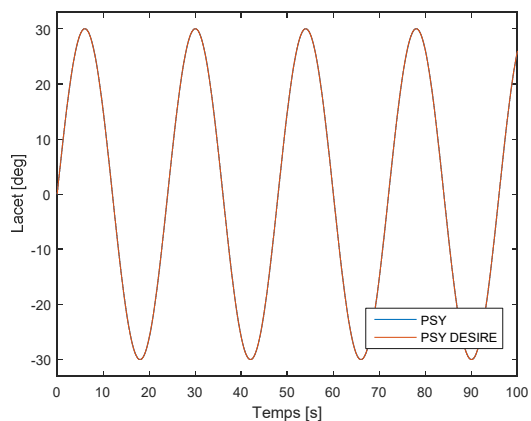


Figure 19 : Réponse du système nominal performant à une entrée sinusoidale

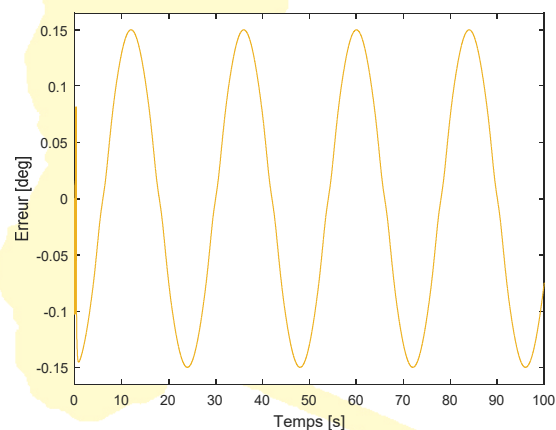


Figure 20 : Signal d'erreur du système nominal performant à une entrée sinusoidale

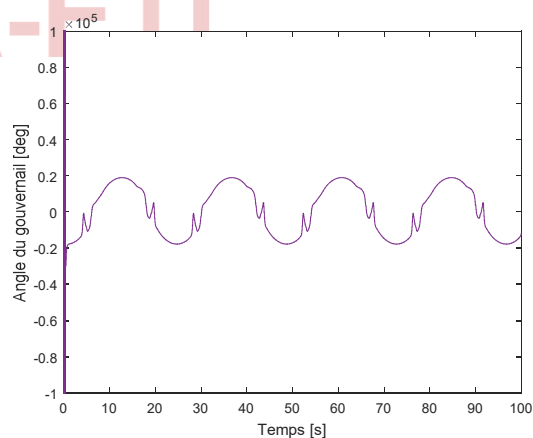


Figure 21 : Angle du gouvernail δ

Le signal de commande δ du gouvernail est donné par la **figure 21**. Il est périodique avec une valeur maximale avoisinant la valeur de 1.9×10^4 deg et de même fréquence que la consigne égale à 15 deg/s.

Remarque 5 :

On remarque une augmentation de la performance du système nominal en virage car l'écart entre la consigne ψ_d et l'angle de lacet ψ est passé de 0.51 deg à 0.15 deg

5.2.3. Commande Backstepping robuste

La **figure 22** nous montre les résultats de la simulation en virage d'un bateau cargo autopiloté non linéaire robuste avec la loi de commande du gouvernail définie par l'équation (54). On peut apercevoir que le système autopiloté robuste suit très bien la consigne sinusoidale malgré la présence de perturbation environnementale incertaine. L'écart entre la consigne ψ_d et l'angle de lacet ψ est donné par la **figure 23** avec une valeur maximale de 0.18deg.

Le signal de commande δ du gouvernail est donné par la **figure 24**. Il présente plusieurs impulsions positives et négatives.

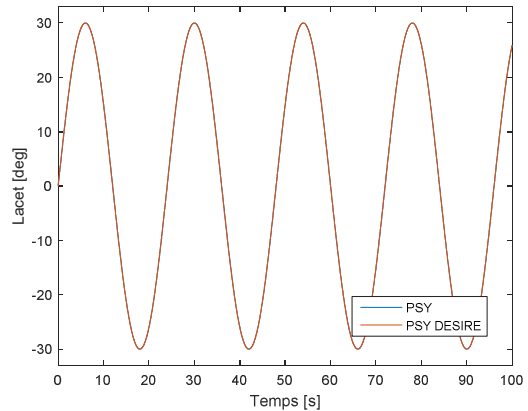


Figure 22 : Réponse du système robuste à une entrée sinusoidale

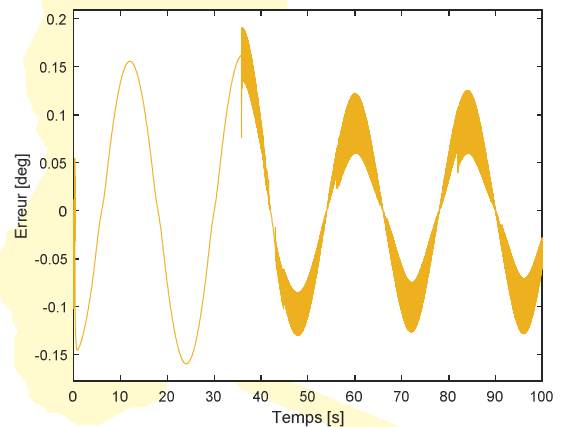


Figure 23 : Signal d'erreur du système non linéaire robuste pour une entrée sinusoidale

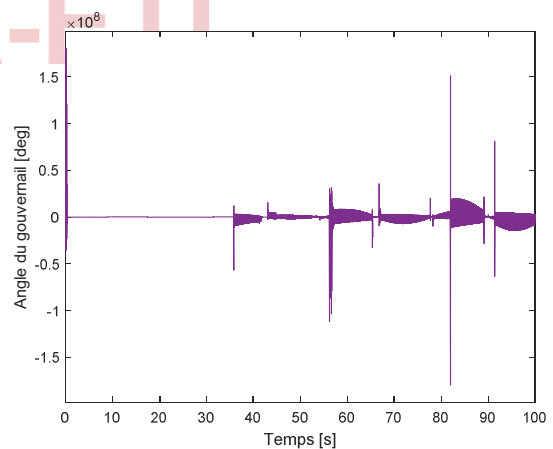


Figure 24 : Angle du gouvernail δ

6. Conclusion

La synthèse d'un autopilote robuste garantit une performance élevée en autopilotage d'un bateau cargo. Il permet d'annuler l'influence des perturbations externes au système et d'assurer la fonction de manœuvre du bateau cargo en maintien de cap et en virage.

7. Bibliographies

- [1] www.fr.wikipedia.org/wiki/Navire_de_charge, 15 Octobre 2020
- [2] K. Nomoto, T. Taguchi, K. Honda, S. Hirano, « *On the steering qualities of ships* », International Shipbuilding Progress, 1957
- [3] N.H.Noorbin, « *On the design and analyse of the zig zag test on base of quasi linear frequency response* », Suede, 1963
- [4] M.I.Bech et S.Wagner, « *Analogue simulation of ship maneuvers* », hydro and aerodynamics laboratory, Danemark, 1969
- [5] M. Krstic, I. Kanellakopoulos, P. V. Kokotovic, « *Nonlinear and Adaptive Control Design* », New York, 1995
- [6] I. Kanellakopoulos, P. V. Kokotovic, A. S. Morse, « *Systematic design of adaptive controller for feedback linearizable systems* », IEEE, 1991.
- [7] R. R. Rasoamanana, P.A. Randriamitantsoa, A.A. Randriamitantsoa, « *Synthèse d'une loi de commande non*

linéaire par la méthode backstepping intégrateur d'un système de suspension hydraulique d'un véhicule », Mada-ETI, 2017

- [8] Y. Li, S. Qiang, X. Zhuang, O. Kaynak, « *Robust and adaptive backstepping control for nonlinear systems using RBF neural network* », IEEE, 2004