

# Stabilité de la nage serpentiforme sur la surface de l'eau : réponse harmonique et instabilité paramétrique

Xiao XIE<sup>1</sup>, Johann Herault<sup>1</sup>, Vincent Lebastard<sup>1</sup> et Frédéric Boyer<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> IMT Atlantique, LS2N, 4 Rue Alfred Kastler, 44300, Nantes, France  
xie.xiao@imt-atlantique.fr

Lors de la nage serpentiforme sur la surface de l'eau, les robots serpentiformes rencontrent une instabilité de roulis provoquée par les forces de flottabilité. Or, certains serpents semi-aquatiques ont développé d'extraordinaires capacités de stabilisation sur l'eau. Afin de comprendre et reproduire ce comportement, nous avons conçu un nouveau robot serpent bio-inspiré : *Natrix* [1] (cf. Fig. 1, gauche), dont l'actionnement permet de contrôler la stabilité et la nage indépendamment. Dans cette étude, nous explorerons numériquement la stabilité de ce robot grâce à un modèle dynamique Newton-Euler. Le robot effectue une nage ondulatoire assurée par une onde de courbure, dont les commandes articulaires suivent la loi :  $Q_i(t) = \alpha \sin(ki - 2\pi Ft)$ . Afin de simplifier l'analyse, seuls les effets hydrodynamiques et inertiels du système multi-corps sont pris en compte. Nous étudierons la stabilité du robot dans l'espace paramétrique donnée par l'amplitude  $\alpha$  et la fréquence  $F$  de l'onde de courbure.

A basse et haute fréquences, le mouvement de roulis  $\theta$  se résume à une réponse de l'oscillateur non-linéaire (Fig. 1, région hachuré). Lorsque la fréquence  $F$  s'approche de la fréquence propre du système, le roulis devient paramétriquement instable (région étoilée). Entre les 2 régions, il existe une zone d'accrochage où le roulis décrit des battements (région à point), confirmant ainsi la présence de la résonance paramétrique. Pour décrire ce phénomène, on montre que le mouvement de roulis est décrit par un oscillateur Mathieu-Duffing-forcé

$$\ddot{\theta} + \omega_0^2(1 + \delta \sin(2\Omega t) + \beta\theta^2)\theta = \Gamma e^{i\Omega t} + c.c. \quad (1)$$

Ayant identifié les paramètres grâce aux simulations, la région d'instabilité peut être raisonnablement prédite par la simulation de l'équation 1 (région bleu). Quant à l'estimation théorique prenant en compte les couplages non-linéaires, elle tend à sous-estimer la région d'instabilité (région rouge) suggérant la possibilité d'une instabilité sous-critique. En conclusion, nous avons produit un modèle réduit pour décrire le comportement du roulis, ouvrant la voie vers des stratégies de contrôle ou de stabilisation efficaces pour la nage du robot serpent.

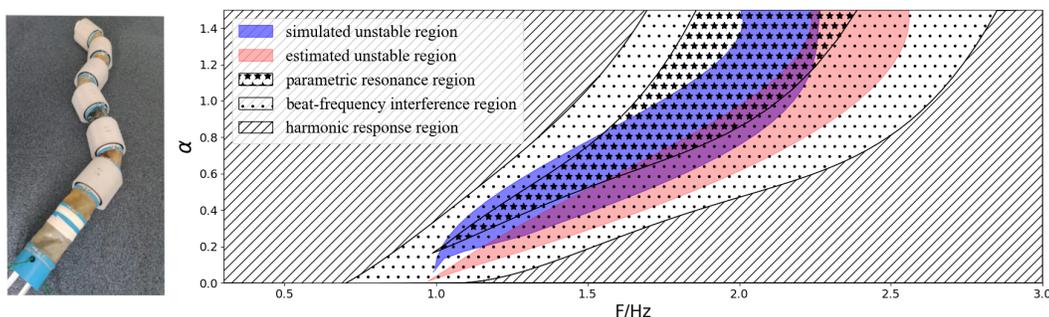


Figure 1. Gauche : robot *Natrix* ; Droite : la région d'instabilité dans l'espace paramétrique  $F - \alpha$

## Références

1. X. XIE, J. HERAULT, É. CLEMENT, V. LEBASTARD, F. BOYER "Quasi-static motion of a new serial snake-like robot on a water surface : a geometrical approach", 2021 IROS, pp. 7372-7377, 2021