

Effet d'un amortisseur non linéaire accordé sur un profil d'aile en flottement

GDR DyNoLin 2016

A. Malher¹, C. Touzé¹, O. Doaré¹, G. Habib² et G. Kerschen²

11 Octobre 2016

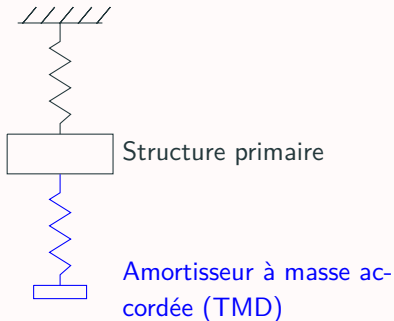
¹IMSIA, ENSTA ParisTech, Université Paris-Saclay

²LTAS-S3L, Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Université de Liège



Introduction

Amortisseurs à masse accordée



- Les TMDs sont efficaces pour des systèmes primaires linéaires sur une faible gamme fréquentielle.
- Ces limitations peuvent être dépassées à l'aide d'amortisseurs purement non linéaires appelés NES, mais les NESs ne sont efficaces qu'à partir d'un seuil d'énergie.
- Un amortisseur combinant un NES et un TMD, appelé NLTVA, a été étudié¹ et a montré son efficacité sur différents systèmes primaires non linéaires.



Hermann Frahm

1909



Jacob Pieter Den Hartog

1934

¹ R. Vigié et G. Kerschen (2009). *Journal of Sound and Vibration*

Instabilité de flottement

Exemples de flottement d'aile



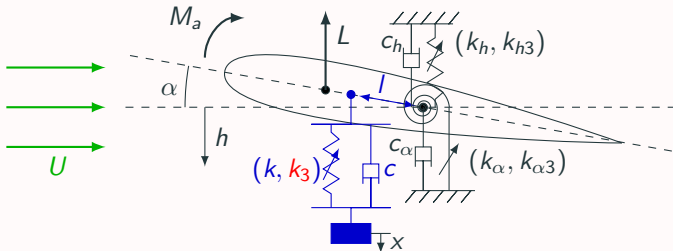
Table des matières

1. Introduction
2. Modèle aéroélastique
3. Analyse de stabilité linéaire
4. Régime post-critique
5. Conclusion

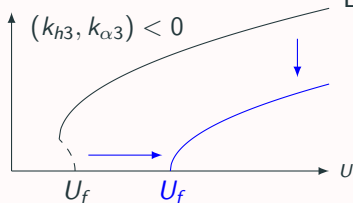
Modèle aéroélastique

Couplage entre le profil et le NLTVA

On considère que les cycles limites proviennent de non linéarités structurelles



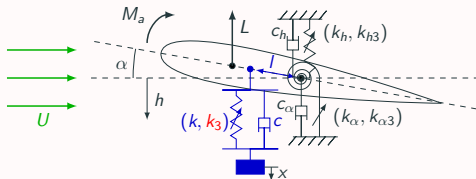
Amplitude des cycles limites



Effets désirés du NLTVA

- ▶ Décaler la vitesse de flottement U_f
- ▶ Diminuer l'amplitude des cycles limites
- ▶ Assurer la supercriticalité

Équations du système couplé Profil-NLTVA



Équations du mouvement

$$\begin{bmatrix} M & S_\alpha & 0 \\ S_\alpha & I_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{h} \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_h + c & -cl & c \\ -cl & c_\alpha + c l^2 & cl \\ -c & cl & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{h} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \\
 \begin{bmatrix} k_h + k & -kl & -k \\ -kl & k_\alpha + k l^2 & kl \\ -k & kl & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ \alpha \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L \\ M_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{h3} h^3 + k_3 (h - x - l\alpha)^3 \\ k_{\alpha 3} \alpha^3 + k_3 l (x - y + l\alpha)^3 \\ k_3 (x - h + l\alpha)^3 \end{bmatrix}$$

Avec $L = \rho S U^2 \pi (\alpha + \dot{h}/U)$ et $M_a = eL$

Paramètres du NLTVA

Paramètres linéaires

- Rapport de masse $\epsilon = m/M$ -> choisi égal à 5 %
- Position du NLTVA l -> au bord d'attaque
- Fréquence réduite du NLTVA $\gamma = \omega^2/\omega_\alpha^2$ -> paramètre de contrôle
- Taux d'amortissement du NLTVA $\zeta = c/m\omega_\alpha$ -> paramètre de contrôle

Paramètre non linéaire

- Raideur cubique réduite du NLTVA $\xi = k_3/(m\omega_\alpha^2)$ -> paramètre de contrôle

Objectifs

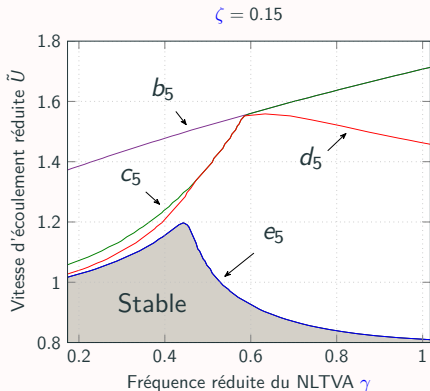
- Décaler la vitesse de flottement U_f
- Assurer la supercriticalité de la bifurcation
- Réduire l'amplitude des cycles limites

S_α/Mb	$\sqrt{l_\alpha/Mb^2}$	$\rho S\pi/M$	$\rho Se\pi/M$	ω_h/ω_α	$c_\alpha/Mb^2\omega_\alpha$	$c_h/M\omega_\alpha$
0.2	0.5	0.2	0.08	0.5	0.01	0.01

Analyse de stabilité linéaire

Analyse de stabilité linéaire

- α , h et x de la forme $\exp(z t)$ -> le déterminant des équations du mouvement vaut $\det(\mathbf{B}(z)) = a_6 z^6 + a_5 z^5 + a_4 z^4 + a_3 z^3 + a_2 z^2 + a_1 z + a_0$
- Le système est stable ssi les racines de $\det(\mathbf{B})$ ont une partie réelle négative
- Le critère de Routh-Hurwitz est utilisé pour déterminer leur signe



$$b_5 = (a_5 a_4 - a_6 a_3) / a_5 > 0,$$

$$c_5 = b_5 a_3 - a_5 b_4 > 0,$$

$$d_5 = c_5 b_4 - c_4 b_5 > 0,$$

$$e_5 = d_5 c_4 - d_4 c_5 > 0,$$

avec

$$b_4 = (a_5 a_2 - a_6 a_1) / a_5,$$

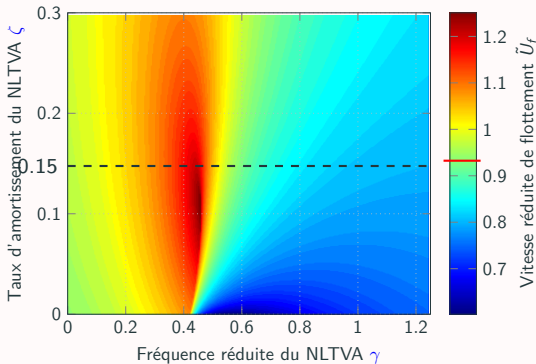
$$b_3 = a_0,$$

$$c_4 = (b_5 a_3 - b_3 a_5) / b_5,$$

$$d_4 = b_3.$$

Analyse de stabilité linéaire

- L'analyse de stabilité est réalisée pour différents γ et ζ .



- ▶ Sans NLTVA, $\tilde{U}_f = 0.93 \rightarrow \tilde{U}_f$ est augmentée au maximum de 34.5 % avec le NLTVA

Régime post-critique

Analyse de criticalité

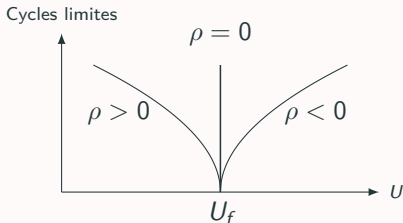
But

Déterminer analytiquement la criticalité de la bifurcation et l'évolution des cycles limites autour de \tilde{U}_f

- Réduire le système à sa dynamique locale lorsque \tilde{U} est dans le voisinage \tilde{U}_f .

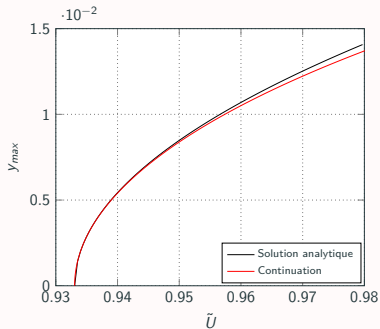
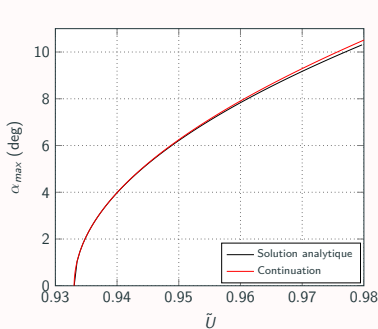
Forme normale d'une bifurcation de Hopf

$$dr/dt = \lambda_\alpha(\tilde{U} - \tilde{U}_f)r + \rho(\xi_\alpha, \xi_h, \xi)r^3$$



Validation de la solution analytique

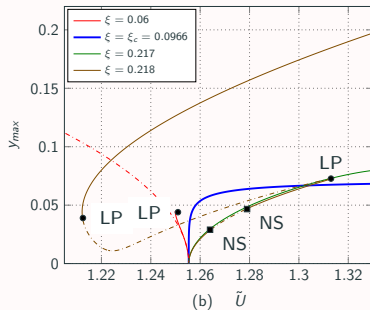
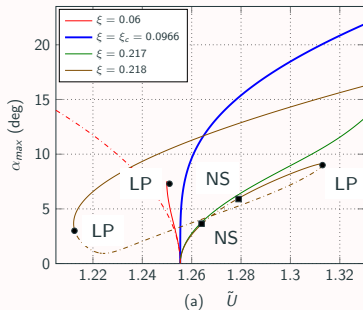
Profil d'aile sans amortisseur, non-linéarité raidissante



- $\tilde{U}_f = 0.933$, la bifurcation est supercritique

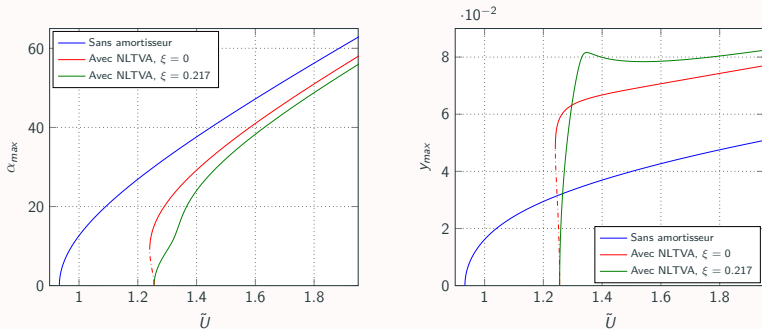
Influence de la nonlinéarité du NLTVA

Profil avec NLTVA



Régime post-critique

- Influence du NLTVA pour un profil raidissant



- Vitesse de flottement U_f décalée, amplitude des cycles limites diminuée et supercriticalité assurée

Conclusion

Travail réalisé

- Analyse de stabilité
 - Optimisation des paramètres de contrôle linéaires
- Étude non linéaire
 - Règle d'accordage pour le paramètre non linéaire du NLTVA
 - Influence du NLTVA sur le régime post-critical

Perspectives

- Inclure un modèle aérodynamique plus réaliste
- Valider expérimentalement¹ les résultats trouvés

¹ S. Benacchio et al. (2015). *Nonlinear Dynamics*

Merci de votre attention.