
TP Interaction Fluide-Structure (IFS)

Noms Prénoms

Groupe

INTRODUCTION

Assez tôt dans l'histoire de l'aviation (dès que les monoplans ont été suffisamment rapides), sont apparues des instabilités dynamiques des ailes (flottement) pouvant conduire à la perte de l'appareil. De nombreux accidents expliquent en grande partie le développement dans les années 50-60 des méthodes expérimentales d'analyse modale pour la prédiction et l'analyse du phénomène. De nos jours, tout nouveau modèle d'avion n'est qualifié par les autorités de certification qu'après validation des études de conception (théoriques, numériques et expérimentales sur maquette) par des essais sur prototype (1) au sol puis (2) en vol. La détection d'un phénomène de flottement au cours des essais sur un avion civil impliquerait l'abandon immédiat du projet ! Chez Airbus, les moyens d'excitations de l'avion en vol (impulseur, tip-vanne, commande gouverne) modifient la masse et/ou l'aérodynamique. D'autres méthodes ne nécessitant pas de dispositif spécifique (jugé coûteux et perturbant le système) basées sur l'excitation naturelle de la turbulence sont à l'étude. C'est ce type d'approche que nous allons illustrer dans ce TP.

Des phénomènes de vibrations instables d'une structure souple dans un écoulement apparaissent sur des câbles électriques soumis au givre (cf annexe) et dans bien d'autres applications industrielles (génie civil, tube d'échangeur, éoliennes, vannes,...).

OBJECTIF DU TP

Le dispositif proposé est constitué d'un cylindre fixé sur une lame souple encastrée, excitée par un écoulement turbulent obtenu par un ventilateur. Reprenant la stratégie industrielle des avionneurs, nous nous fixons comme objectif de comparer un modèle de comportement établi avec les relations de filtrage (Wiener-Lee) pour une étude :

- de la structure seule, étude dite « en laboratoire »,
- de la structure placée dans l'écoulement d'un ventilateur, étude dite « in situ ».

L'identification « en laboratoire » sera l'occasion de revoir rapidement l'analyse de Fourier d'un signal déterministe transitoire. Les bases de traitement des signaux aléatoires nécessaires à l'identification « sur site » seront rappelées au cours de l'étude préalable d'un signal de synthèse de type « bruit blanc » puis « bruit blanc + sinus ».

Les signaux issus des capteurs sont conditionnés puis numérisés par une chaîne d'acquisition (filtrage anti-repliement et de réjection de la composante continue, carte d'acquisition) et de traitement (PC muni du logiciel MATLAB/Simulink avec le « Toolbox Signal Processing » et « signal processing blockset ») en temps réel.

Ce document est à remplir et à rendre à la fin de la séance de TP.

PREMIERE PARTIE

PRE-REQUIS : Analyse des signaux turbulents

Dans cette première partie, on utilisera le générateur de signaux analogiques pour étudier successivement un « bruit blanc » et un « bruit blanc + sinus ». Le programme d'acquisition et de traitement est « *Analyseur de spectre* ». Dans cette partie on ne s'intéressera qu'à des fréquences inférieures à $F_{max}=250 \text{ Hz}$.

A- Analyse d'un Bruit Blanc

- *Commuter le bouton du générateur analogique sur l'option « Bruit ».*
- *Connecter les éléments de la chaîne de métrologie pour l'analyse du signal (utiliser les deux voies de l'oscillo pour visualiser et comparer les signaux analogiques filtrés et non-filtrés).*
- *Ajuster la fréquence de coupure du filtre anti-repliement et la fréquence d'échantillonnage.*
- *Initialiser le nombre de points dans le plan temporel ($N_{wind} = 128$) et dans le plan fréquentiel ($NFFT=1024$)*
- *Prendre Hanning pour fenêtre de troncature*

1. Etude par le périodogramme élémentaire.

- *Décocher l'option cumul de périodogramme.*
 - *Compiler le programme et lancer la simulation temps-réel.*
- Quel est le problème du périodogramme élémentaire pour étudier le contenu fréquentiel dans le cas d'un signal aléatoire ? Augmenter la durée d'observation ($N_{wind} = 256$) et renouveler la simulation. Asymptotiquement cette augmentation permettrait-elle de régler le problème ?
- Rappeler l'intérêt dans certains cas de prendre $NFFT > N_{Wind}$.
Par la suite on conservera $NFFT=1024$

Comme tout analyseur de spectre (digne de ce nom), celui-ci propose un choix sur le type d'estimateur : *Puissance* ou *Densité Spectrale de Puissance*. En fait on calcule systématiquement une puissance sur une certaine largeur de bande spectrale BW (band width) qui est fonction des paramètres choisis pour l'estimation. On choisit d'afficher la puissance P ou la densité spectrale de Puissance qui sont liées par la relation $P = \int_{BW} DSP .df$

- Compléter le tableau suivant avec un niveau de précision « acceptable » (ne pas attendre la convergence de l'estimateur cumulé pour relever la valeur !).

Tableau 1 : Estimateur Puissance et Densité

<i>Nwind=256</i>		<i>Nwind=128</i>	
<i>P</i> (<i>V</i> ²)	<i>DSP</i> (<i>V</i> ² / Hz)	<i>P</i> (<i>V</i> ²)	<i>DSP</i> (<i>V</i> ² / Hz)

Au vu de l'influence de la durée d'observation et compte tenu de la classification énergétique du signal traité, commenter la pertinence des estimateurs de type Densité (DSP) et Puissance (P).

- *Cocher l'option « effectuer les opérations statistiques ».*
- *Compiler le programme et lancer la simulation temps-réel.*
- Estimer la puissance totale du signal « Bruit Blanc Filtré » de trois manières différentes et vérifier la cohérence des résultats.

- Faire des traitements en dégradant la qualité de l'estimateur (pour cela réduire le nombre de point $N_{Wind} = 32$ par exemple). Pourquoi l'autocorrélation est complémentaire du spectre pour mettre en évidence une composante périodique dans un signal aléatoire?

DEUXIEME PARTIE

IDENTIFICATION MODALE D'UN SYSTEME DYNAMIQUE

A. Etude « en laboratoire »

Conditions opératoires pour obtenir la réponse impulsionnelle (percussionnelle)

- *Brancher à la chaîne d'acquisition le signal issu du pont d'extensométrie, associé à la jauge de déformation.*
 - *Lancer l'interface d'acquisition et de traitement en « temps différé »*
 - *Régler le zéro du pont d'extensométrie et désactiver le PH de la carte de filtrage*
 - *Appliquez une impulsion à la structure; vérifiez le déclenchement de l'acquisition, (modifiez la valeur du TRIGGER le cas échéant).*
- Préciser le protocole et donner le choix des paramètres (fenêtre, *Nwind*, *NFFT..*) vous permettant de procéder à l'analyse modale par un essai percussif. Pourquoi faut-il désactiver le filtre PH de la carte de filtrage ?

- Identifier les valeurs des paramètres physiques (amortissement et fréquence propre) du premier mode de flexion de la lame.

B. Etude « in situ »

Nous supposons avoir déjà réalisé une analyse de la fonction de cohérence et de l'interspectre entrée-sortie, pour valider la méthode de l'autospectre que nous allons mettre en œuvre dans cette partie.

a. Analyse de l'excitation

Il faudrait caractériser le contenu fréquentiel de la force qui sollicite la structure. N'ayant pas de capteur adapté à cette mesure difficile, on considère une mesure de vitesse en amont de l'obstacle en supposant que le contenu fréquentiel est représentatif de cette force (à condition d'élever la vitesse au carré pour être homogène à une pression)

Conditions opératoires pour obtenir le signal issu de l'anémomètre fil chaud

- a) Brancher à la chaîne d'acquisition le signal de sortie de l'anémomètre fil chaud.
- b) Mettez **FUNCTION** sur **OPERATE** sur l'anémomètre (uniquement lorsque le fil est à température, sinon vous risquez de le casser).
- c) Alimentez le ventilateur avec une tension de commande de $-5V$.
- d) Activer le filtre PH pour supprimer la composante continue
- e) Adaptez le filtre et réalisez un périodogramme cumulé.

- Une pré-analyse serait nécessaire pour déterminer la durée $\theta = N_{wind} * T_e$.
En justifiant, dites comment il faudrait la choisir par rapport :
- au temps de corrélation caractéristique de la partie aléatoire du signal ?

- à l'évolution des moments statistiques en fonction du temps ?

- Discutez les résultats obtenus : l'accent sera mis sur la nature des signaux et l'origine des phénomènes physiques.

- En quoi le comportement aux basses fréquences va faciliter une procédure d'identification basée sur la première relation de Wiener-Lee?

b. Analyse de la réponse du système

Conditions opératoires pour obtenir la réponse de la lame

- *Brancher à la chaîne d'acquisition le signal issu du pont d'extensométrie associé à la jauge de déformation*
 - Adaptez le filtre et réalisez un périodogramme cumulé avec $F_{\max}=100$ puis $F_{\max}=25$.
-
- Discutez le résultat obtenu : l'accent sera mis sur la nature des signaux et l'origine des phénomènes physiques. Identifier un modèle de comportement du premier mode de flexion.

Annexe : Instabilité d’un cylindre, mécanisme de galop (flottement à un degré de liberté)

Introduction : Une structure souple en interaction avec un écoulement uniforme peut vibrer selon différents mécanismes (effet de la turbulence, accrochage en fréquence, flottement). Nous illustrons ici un **flottement** à un degré de liberté également appelé **galop**, instabilité qui affecte classiquement les tabliers et câbles de pont suspendu. Le célèbre accident du pont de Tacoma en 1940 survenu malgré un vent modéré de 60 km/h résulte très probablement d’un galop en torsion. On le rencontre également sur les lignes à haute tension, dont le profil devient asymétrique lorsque le givre se dépose. Il peut prendre quasiment la forme d’un demi-cylindre, comme illustré sur la figure 1, qui selon la direction du vent peut être stable ou instable comme nous allons le montrer.



Figure 1 : Givrage sur des câbles haute-tension

Modélisation de principe : Pour simplifier nous allons considérer le problème plan d’un cylindre de section quelconque pouvant se déplacer selon un degré de liberté en translation comme illustré par la figure 2. Nous supposons des déplacements de faible amplitude pour linéariser les équations.

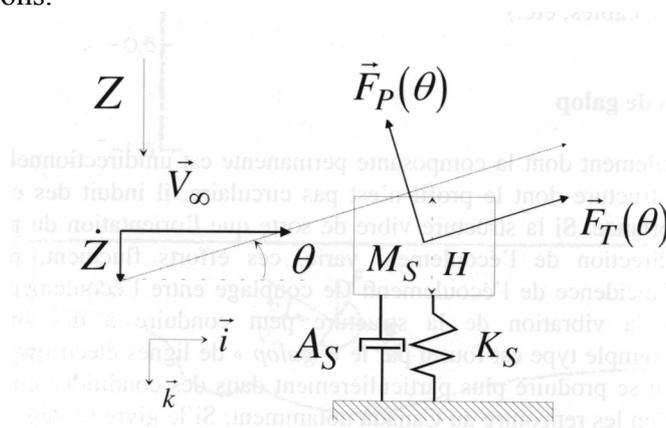


Figure 2 : Schéma de l’oscillateur harmonique

L’équation de la dynamique s’écrit :

$$M_S \ddot{Z} + A_S \dot{Z} + K_S Z = F_z(t)$$

où M_s , A_s , K_s représentent respectivement la masse, l’amortissement et la raideur mécanique et $F_z(t)$ la force d’excitation. On peut décomposer cette force en la modélisant par la somme des forces indépendantes du mouvement (effets de la turbulence) et des forces qui dépendent

directement du mouvement (forces aéro-élastique). Le schéma fonctionnel ci-dessous présente l'interaction fluide-structure sous forme d'un système asservi. La stabilité de ce système bouclé va dépendre de la forme des forces induites par le mouvement. L'intensité de cet effort est fonction du carré de la vitesse de l'écoulement qui modifie donc le gain de boucle. Selon cette valeur, le système peut être stable (atténuation des vibrations induites par la turbulence) ou instable (amplification des vibrations induites par la turbulence).

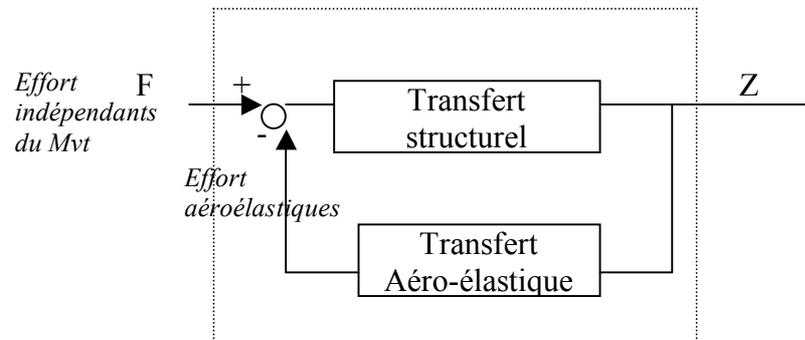


Figure 3 : Schéma fonctionnel de l'interaction fluide-élastique

Expression de la force « aéro-élastique »:

Le profil est soumis à des forces aérodynamiques de traînée et de portance qui sont fonction de la vitesse de déplacement du profil et donc de l'incidence du vent relatif, caractérisé par l'angle d'incidence dynamique (cf figure 2) qui au premier ordre s'exprime :

$$\theta(t) = \frac{\dot{Z}(t)}{V_\infty}$$

Il est tout à fait légitime dans la plupart des situations de faire une hypothèse « quasi-statique » pour estimer ces efforts en considérant qu'à chaque instant le corps se déplace à une vitesse constante égale à sa vitesse instantanée. Ainsi les polaires statiques sont à la base du calcul des efforts instantannés.

Cette hypothèse est justifiée lorsque le mouvement du profil est beaucoup plus lent que celui du fluide, c'est-à-dire lorsque la fréquence réduite

$$f_R = \frac{f_p H}{V_\infty} = \frac{T_A}{T_P} \ll 1$$

qui s'interprète comme un rapport de deux échelles caractéristiques

Temps caractéristique d'advection (H longueur de référence): $T_A = \frac{H}{V_\infty}$

Temps caractéristique des vibrations du profil : $T_P = \frac{1}{f_p}$ où f_p est la fréquence propre des oscillations.

Application numérique : Dans le TP les échelles caractéristiques sont les suivantes

$$H = 0.1 \text{ m}$$

$$f_p = 5 \text{ Hz}$$

$$V_\infty = 5 \text{ m/s}$$

$$f_R \approx 0.1$$

Des essais en soufflerie (ou des calculs) pour lequel le profil d'incidence réglable est soumis à un écoulement permanent permettent de calculer la polaire statique du profil et les efforts qui

s'expriment en fonction de l'angle d'incidence statique θ_s et du nombre de Reynolds (cf figure 4) :

$$F_p = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 H C_p(\theta_s, \text{Re})$$

$$F_T = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 H C_T(\theta_s, \text{Re})$$

En notant C_p et C_T les coefficients adimensionnels de portance et de traînée du profil par unité de longueur.

L'hypothèse quasi-statique consiste alors à remplacer l'incidence statique par l'incidence dynamique dans l'expression de la force fluctuante agissant sur le profil.

Dans la direction de déplacement du profil la force s'exprime donc par la relation :

$$F_z = -F_T \sin \theta - F_p \cos \theta = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 H C_z(\theta, \text{Re})$$

$$\text{avec } C_z(\theta, \text{Re}) = -[C_T(\theta) \sin \theta + C_p(\theta) \cos \theta]$$

Analyse de stabilité : Afin de procéder à l'analyse de stabilité, on linéarise autour de la position $\theta=0$, ce qui donne :

$$C_z(\theta, \text{Re}) = - \left[C_p(0) + \theta \left\{ C_T(0) + \frac{\partial C_p}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0} \right\} \right]$$

Sans perte de généralité, on peut considérer le cas d'un profil symétrique à l'instant initial et donc $C_p(0) = 0$ et on notera la force aéroélastique sous la forme.

$$F_z(t) = -\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 H \theta C_G = -\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 H \dot{Z} C_G$$

$$\text{avec } C_G = \left\{ C_T(0) + \frac{\partial C_p}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0} \right\}$$

que l'on appelle coefficient d'amortissement du galop car l'équation de la dynamique écrite sous la forme :

$$\boxed{M_s \ddot{Z} + \left[A_s + \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 H C_G \right] \dot{Z} + K_s Z = 0}$$

montre que le couplage fluide-structure stabilise ou déstabilise l'oscillateur selon que C_G est positif ou négatif. On constate que l'amortissement peut devenir négatif pour une vitesse critique

$$V_\infty^c = \frac{2A_s}{\rho H |C_G|} \quad \text{avec} \quad C_G = \left\{ C_T(0) + \frac{\partial C_p}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0} \right\} < 0$$

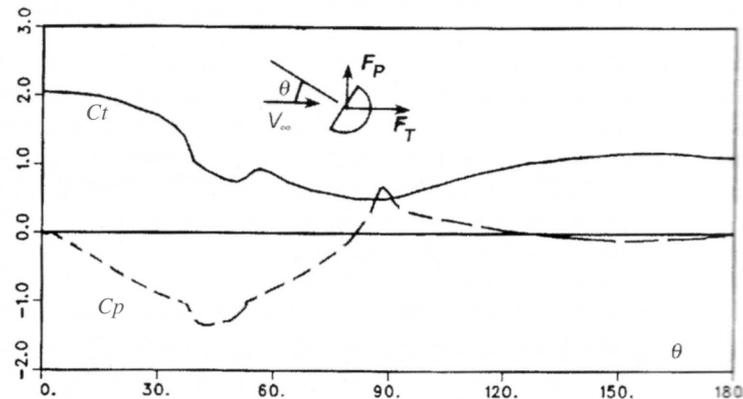


Figure 4 : Efforts statiques du demi-cylindre dans un écoulement uniforme

Le coefficient de traînée étant positif, on constate qu'une condition nécessaire (mais pas suffisante) au déclenchement de l'instabilité est que la portance diminue avec l'angle d'incidence. C'est le cas d'un certain nombre de profil dont le demi-cylindre (cf. figure 3) mais c'est également le cas pour un profil d'aile au moment du décrochage. Pour le demi-cylindre en incidence cela se comprend aisément en considérant la dissymétrie des tourbillons générés par le profil.

On souligne que (1) le nombre de Reynolds et l'intensité de turbulence peuvent modifier de façon importante les efforts et inverser la conclusion quant à la stabilité d'un même profil, (2) la réponse d'une structure au phénomène de galop ne conduit pas généralement à une instabilité divergente mais sera saturée par les non-linéarités pour de grands déplacements.

Références :

- Vibrations des structures couplées avec le vent, Pascal Hémon, Ecole Polytechnique
- Vibrations sous écoulements, François Axisa, Hermès