

Détection de pannes oscillatoires dans le système de commande de vol d'avion civil.

Do Hieu TRINH¹, Benoît MARX¹, Philippe GOUPIL², José RAGOT¹

¹Centre de Recherche en Automatique de Nancy,
UMR 7039 – Nancy-Université, CNRS

²EDYC-CC Flight Control System, AIRBUS Operations S.A.S



CIFA, Nancy 3 Juin 2010

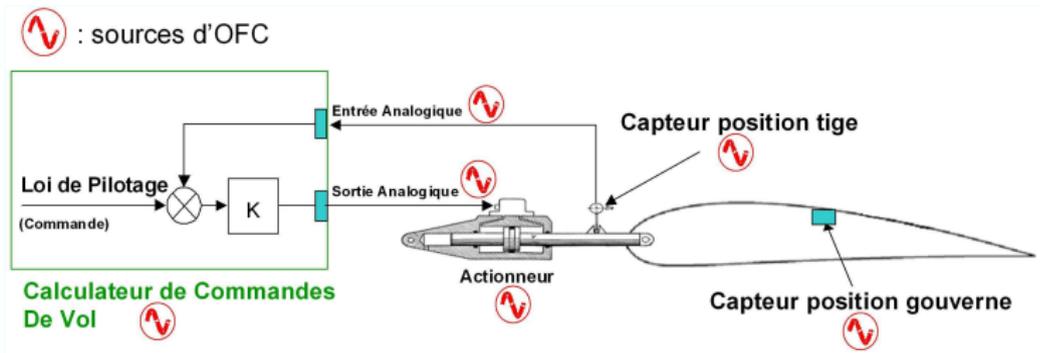
Plan

- 1 Formulation du problème de surveillance
- 2 Génération de résidus
- 3 Détection et isolation de panne par test d'écart type
- 4 Détection et isolation de la panne par test de corrélation
- 5 Conclusions

Formulation du problème de surveillance

1.1 Panne oscillatoire

- Les sources probables de la panne oscillatoire



- Nécessité de détection précoce de la panne oscillatoire

- elle engendre des charges supplémentaires sur la structure d'avion
- elle peut exciter un phénomène de résonance
- c'est une réglementation aéronautique.

- Cahier des charges

1.2 Les deux types de panne

- Modélisation de la panne :

$$S_{def}(t) = A \cdot \sin(\omega t + \phi)$$

- La panne persiste pendant une fenêtre de temps :

$$[t_{pan} : t_{pan} + t_{per}]$$

- Panne solide : signal perturbateur remplace le signal de commande U_{in}

$$\begin{aligned} \forall t \notin [t_{pan} : t_{pan} + t_{per}] & : U_{out}(t) = U_{in}(t) \\ \forall t \in [t_{pan} : t_{pan} + t_{per}] & : U_{out}(t) = S_{def}(t) \end{aligned}$$

- Panne liquide : signal perturbateur s'ajoute au signal de commande U_{in}

$$\begin{aligned} \forall t \notin [t_{pan} : t_{pan} + t_{per}] & : U_{out}(t) = U_{in}(t) \\ \forall t \in [t_{pan} : t_{pan} + t_{per}] & : U_{out}(t) = U_{in}(t) + S_{def}(t) \end{aligned}$$

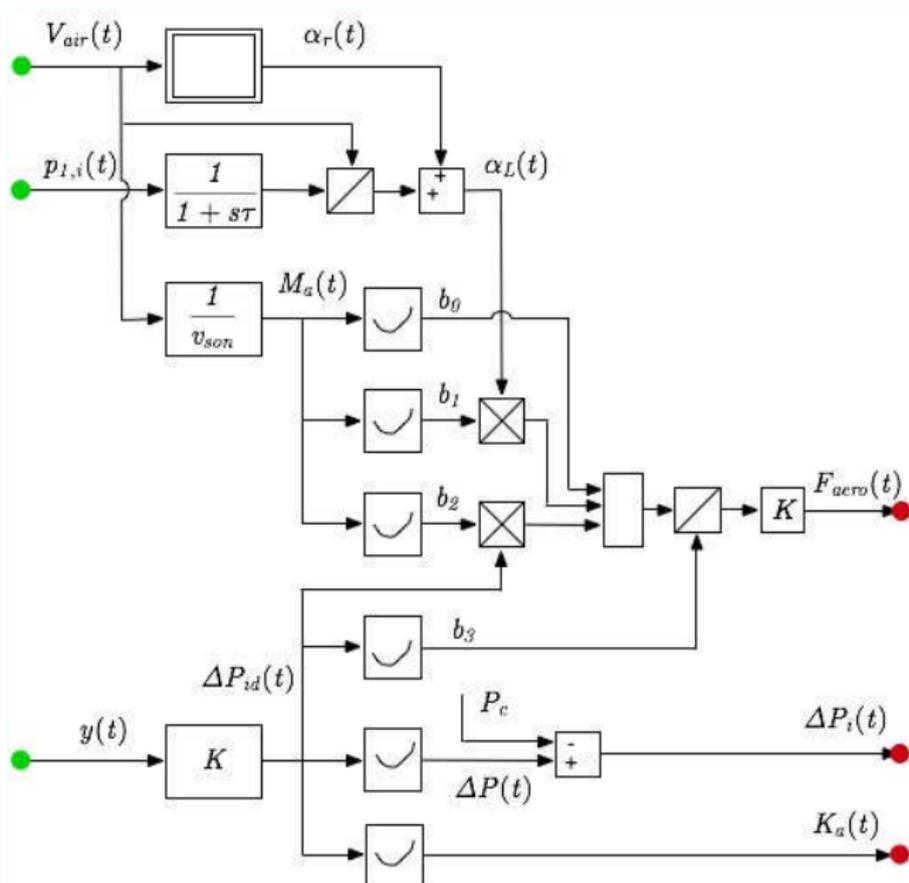
1.3 Modélisation du système

- Modèle de bon fonctionnement du système

$$M_b = \begin{cases} \dot{x}_b(t) &= V_0(t) \sqrt{\frac{S\Delta P_i(t) + \text{sign}(V_0(t))F_a(t)}{S\Delta P_{ref} + K_a(t)V_0^2(t)}} \\ V_0(t) &= K(u(t) - x_b(t - \tau)) \\ \Delta P_i(t) &= f_1(x_d(t)) \\ K_a(t) &= f_2(x_d(t)) \\ F_a(t) &= f_3(M_a(t), x_d(t), V_{av,x}(t)) \\ x_d(t) &= f_4(x_b(t), \tau) \end{cases}$$

- Défaut $S_{def}(t)$ intervient sur $V_0(t)$
- Détection de défaut en présence de perturbations $K_a(t)$, $\Delta P_i(t)$, $F_a(t)$:
 - $F_a(t)$: force aérodynamique appliquée à la gouverne
 - $\Delta P_i(t)$: différence de pression hydraulique aux bornes de l'actionneur
 - $K_a(t)$: coefficient d'amortissement de l'actionneur adjacent

1.4 Les perturbations



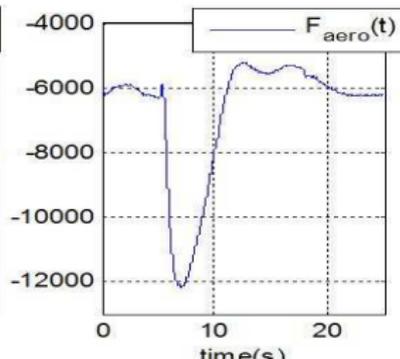
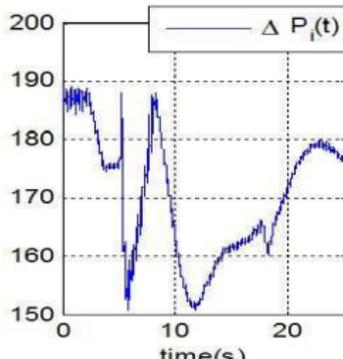
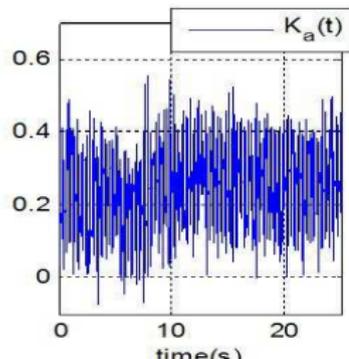
1.4 Les perturbations

Dépendent de :

- Position de l'aile, scénario de vol, variables environnementales,...
- Difficiles à identifier en ligne

Mais . . .

- Leurs valeurs sont bornées
- Peuvent-être estimées par des essais particuliers
- Valeurs nominales connues dans certains cas



1.5 Modèles de bon et mauvais fonctionnement simplifiés

Simplification :

- Fixer les perturbations $K_a(t)$, $\Delta P_i(t)$, $F_a(t)$ à des valeurs fixes nominales
- Simplifier certaines relations non linéaires par l'approximation
- Établir les modèles qui correspondent à différents modes de fonctionnement.

Modèles simplifiés

$$M_b : \dot{x}_b(t) = V_0(t) \sqrt{\frac{S\Delta P_b + \text{sign}(V_0(t))F_{ab}}{S\Delta P_{ref} + K_{ab}V_0^2(t)}}; \quad V_0(t) = K(u(t) - x_b(t - \tau))$$

$\Delta P_b = 187, K_{ab} = 0.22, F_{ab} = -12000$

$$M_s : \dot{x}_s(t) = V_{0,s}(t) \sqrt{\frac{S\Delta P_s + \text{sign}(V_{0,s}(t))F_s(t)}{S\Delta P_{ref} + K_s V_{0,s}^2(t)}}; \quad V_{0,s}(t) = S_{def,s}(t)$$

$\Delta P_s = 197, K_s = 0.22, F_s = 0$

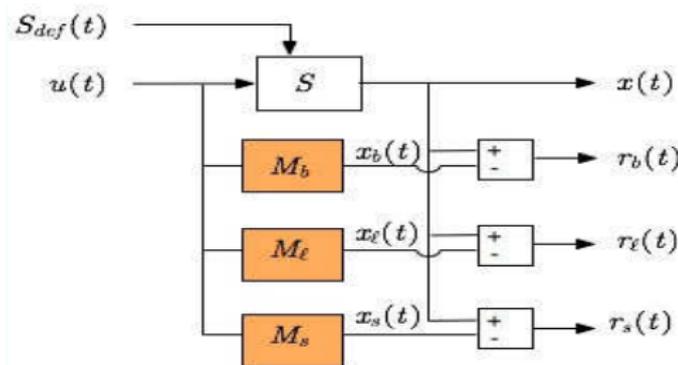
$$M_\ell : \dot{x}_\ell(t) = V_{0,\ell}(t) \sqrt{\frac{S\Delta P_\ell + \text{sign}(V_{0,\ell}(t))F_\ell}{S\Delta P_{ref} + K_\ell V_{0,\ell}^2(t)}}; \quad V_{0,\ell}(t) = K(u(t) - x_\ell(t - \tau)) + S_{def,\ell}(t)$$

$\Delta P_\ell = 165, K_\ell = 0.22, F_\ell = -6000$

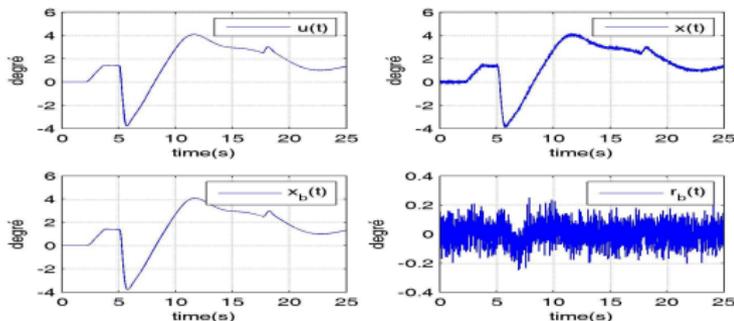
Génération de résidus

2.1 Génération de résidus

- Génération des résidus

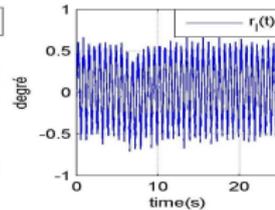
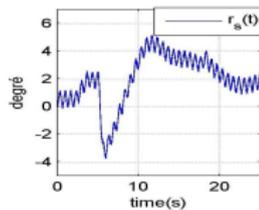
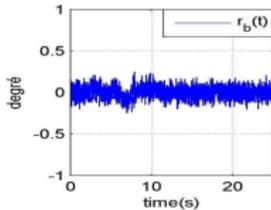


- Exemple : cas sans défaut



2.2 Exemple de résidus

- Situation sans défaut

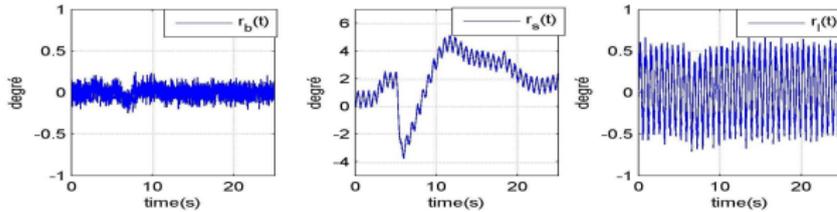


- Panne liquide de fréquence 1.5Hz, entre 5 s et 10 s

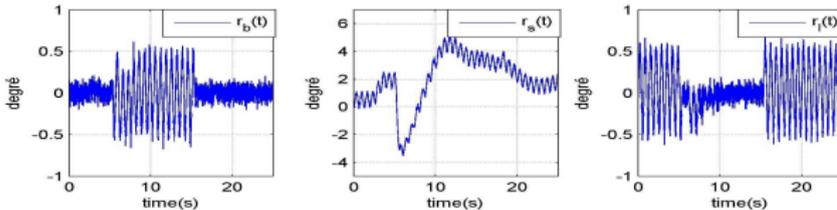
- Panne solide de fréquence 1.5Hz, entre 5 s et 10 s

2.2 Exemple de résidus

- Situation sans défaut



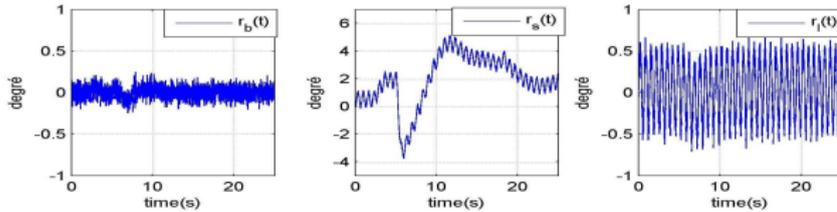
- Panne liquide de fréquence 1.5Hz, entre 5 s et 10 s



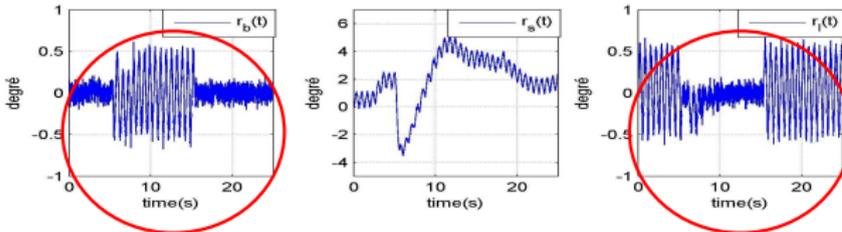
- Panne solide de fréquence 1.5Hz, entre 5 s et 10 s

2.2 Exemple de résidus

- Situation sans défaut



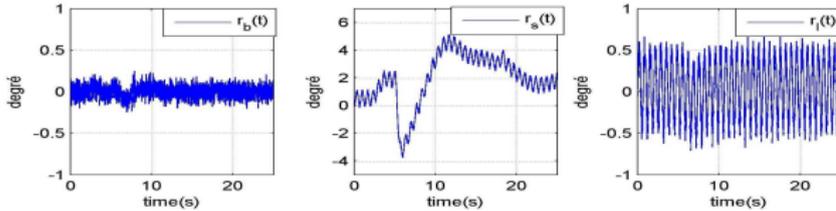
- Panne liquide de fréquence 1.5Hz, entre 5 s et 10 s



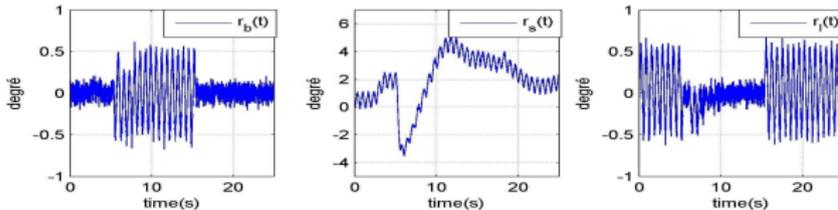
- Panne solide de fréquence 1.5Hz, entre 5 s et 10 s

2.2 Exemple de résidus

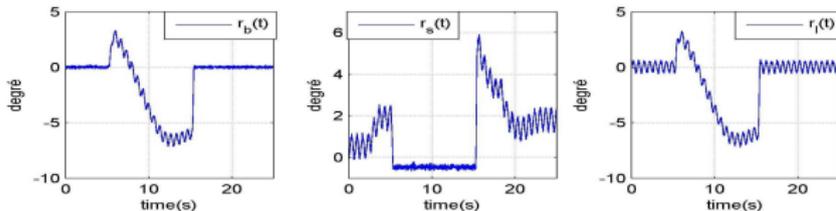
- Situation sans défaut



- Panne liquide de fréquence 1.5Hz, entre 5 s et 10 s

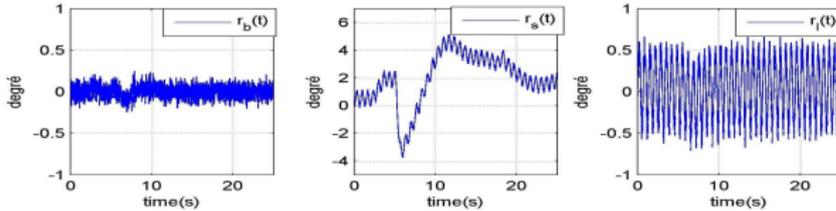


- Panne solide de fréquence 1.5Hz, entre 5 s et 10 s

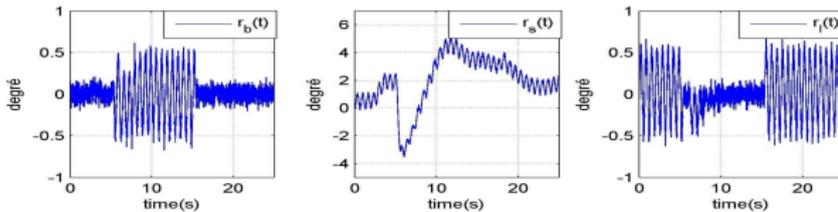


2.2 Exemple de résidus

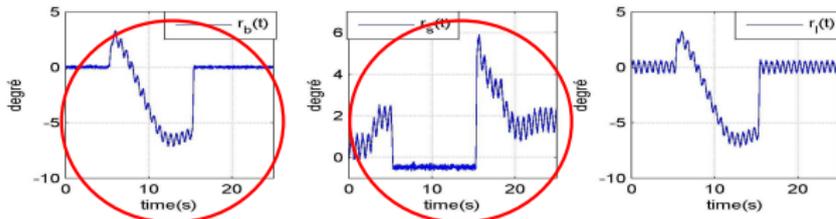
- Situation sans défaut



- Panne liquide de fréquence 1.5Hz, entre 5 s et 10 s



- Panne solide de fréquence 1.5Hz, entre 5 s et 10 s



Détection et isolation de panne par test d'écart type

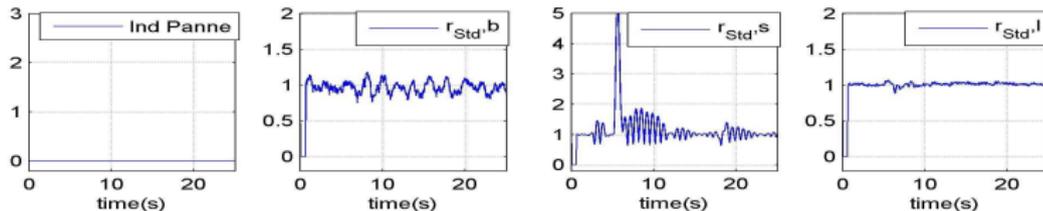
3.1 Algorithme de détection et d'isolation

Principe : test d'écart-type des résidus sur des fenêtres glissantes

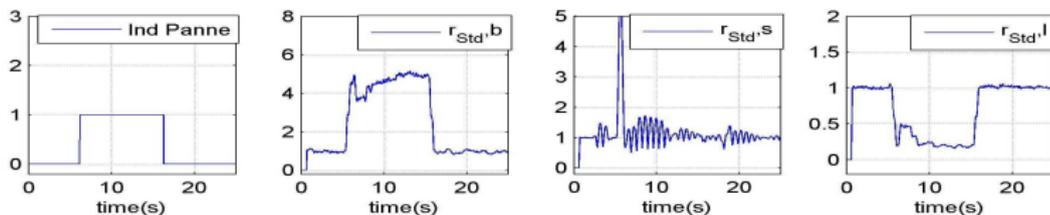
- Calculer les écart-types initiaux des trois résidus σ_{rb0} , $\sigma_{r\ell0}$ et σ_{rs0}
- Comparer les écart-types, calculés sur des fenêtres glissantes de dimension appropriée, des résidus $r_b(t)$, $r_\ell(t)$ et $r_s(t)$ par rapport aux écart-types initiaux.
- Si l'écart-type de $r_b(t)$ est supérieur à $2.\sigma_{rb0}$ et l'écart-type de $r_\ell(t)$ est inférieur à $2.\sigma_{r\ell0}$, on détecte et identifie la panne liquide.
- Si l'écart-type de $r_b(t)$ est supérieur à $2.\sigma_{rb0}$ et l'écart-type de $r_s(t)$ est inférieur à $2.\sigma_{rs0}$, on détecte et identifie la panne solide.

3.2 Résultat de détection et d'isolation

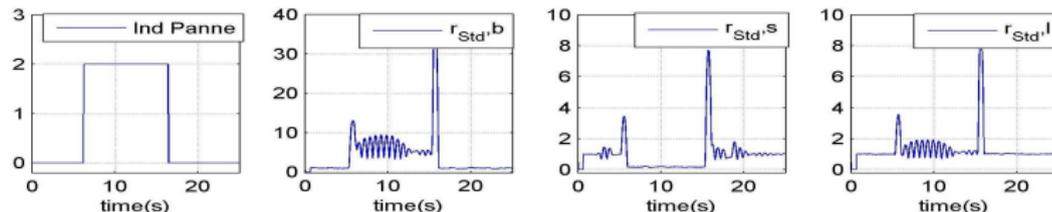
● Cas sans défaut



● Panne liquide de fréquence 1.5Hz, $t \in [5 \ 15]$



● Panne solide de fréquence 1.5Hz, $t \in [5 \ 15]$



3.3 Discussion sur l'utilisation du test d'écart type

Avantages :

- Détecte et isole rapidement n'importe quelle panne solide et liquide sur l'intervalle fréquentielle $[0.5 \dots 10.0]Hz$ et d'amplitude entre 0.5 degré et 1.0 degré pour un grand nombre de scénario de vol (cahier des charges : moins de 3 cycles de panne).
- Pour la détection (sans isolation) : utiliser uniquement le système de bon fonctionnement M_b et le test d'écart type sur $r_b(t)$. On détecte les pannes de faible amplitude (0.16 degré).

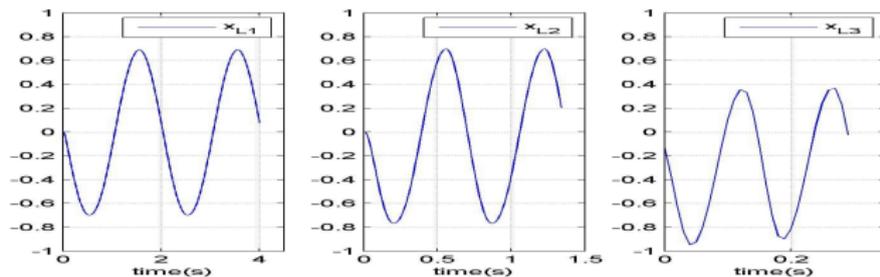
Limite :

- La détection et l'isolation nécessite d'employer un grand nombre de systèmes de dysfonctionnement \Rightarrow Détection de la panne par test de corrélation.

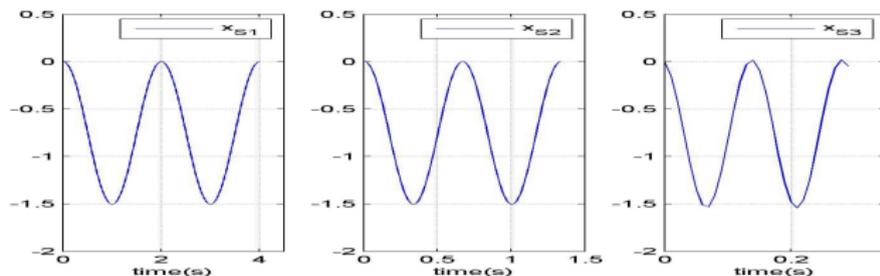
Détection et isolation de la panne par test de corrélation

4.1 Génération des formes représentatives des pannes

Formes représentatives des pannes liquides x_{L1} , x_{L2} et x_{L3} pour des fréquences de 0.5, 1.5 et 7.0 Hz

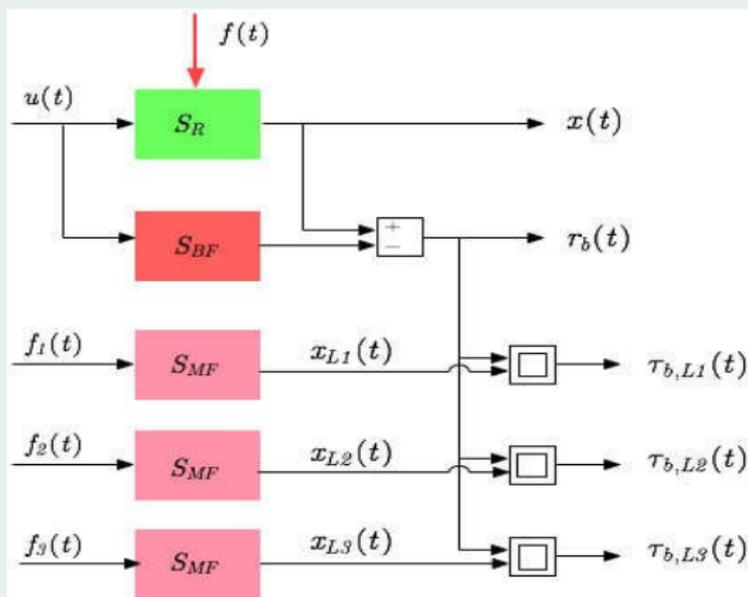


Formes représentatives des pannes solides x_{S1} , x_{S2} et x_{S3} pour des fréquences 0.5, 1.5 et 7.0 Hz



4.2 Génération des résidus

Schéma de génération des résidus pour les pannes liquides



- Résidu : $r_b(t) = x(t) - x_b(t)$

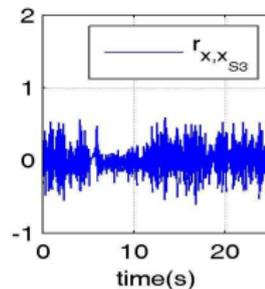
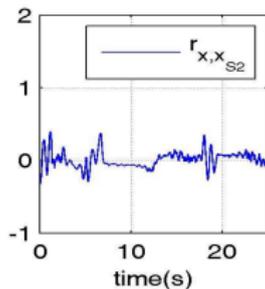
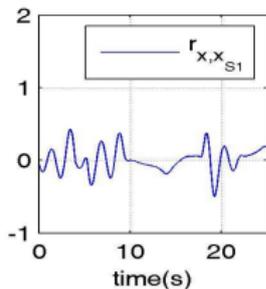
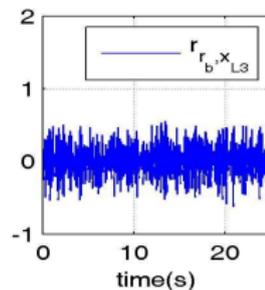
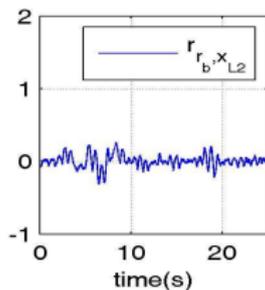
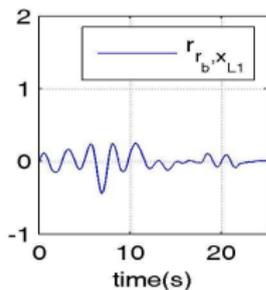
4.3 Algorithme FDI par test de corrélation

Principe : Évaluer les coefficients de corrélation sur fenêtre glissante

- 1 Calculer les coefficients de corrélation :
 - entre le résidu $r_b(t)$ et les formes x_{L1} , x_{L2} et x_{L3} ,
 - entre le résidu $r_b(t)$ et les formes x_{S1} , x_{S2} et x_{S3}
- 2 Compter les dépassements de ces coefficients de corrélation par rapport à des seuils
- 3 Déclarer la détection et l'isolation d'une panne si un certain nombre de dépassements est constaté (pour un de ces coefficients) pendant un temps donné.

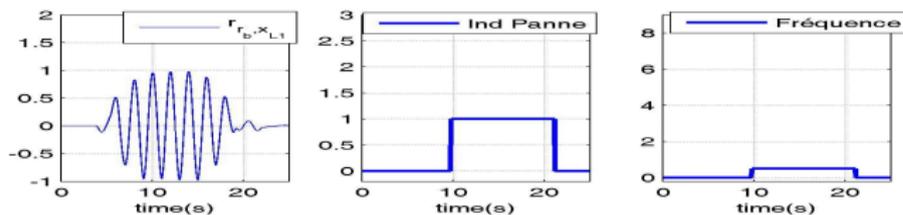
4.4.a Illustration : cas sans défaut

Les coefficients dans le cas sans défaut

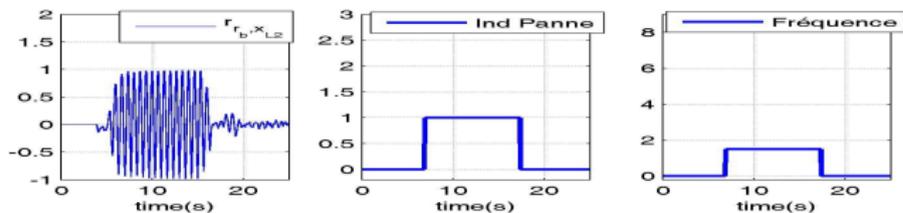


4.4.a Illustration : cas avec défaut

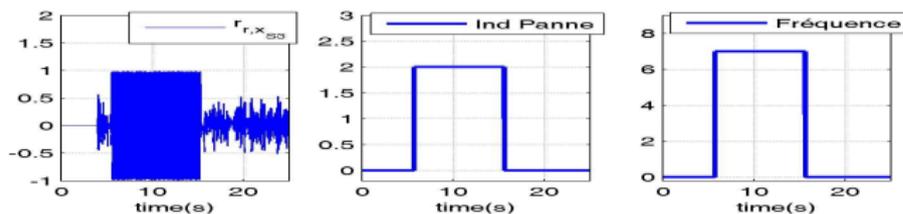
- Panne liquide de fréquence 0.5Hz



- Panne liquide de fréquence 1.5Hz



- Panne solide de fréquence 7.0Hz



4.5 Discussion sur l'utilisation du test de corrélation

Avantages :

- Détecter et isoler rapidement n'importe quelle panne solide et liquide sur l'intervalle fréquentielle $[0.5 \dots 10.0]Hz$ et même faible amplitude (0.16 degré) pour un grand nombre de scénario de vol.
- Nécessite d'embarquer seulement le modèle de bon fonctionnement M_b pour la génération de $x_b(t)$. Les formes représentatives sont calculées hors ligne et stockées.
- Le nombre modéré de tests de corrélation (deux tests pour chaque fréquence de panne à surveiller).

Limite :

- L'amplitude de la panne ne peut pas être identifiée directement.

Conclusions

- Deux méthodes de FDI à base d'un modèle simplifié :
 - ① Par test d'écart type : détecter rapidement n'importe quelle panne solide et liquide sur l'intervalle fréquentiel $[0.5 \dots 10.0]Hz$ et même de faible amplitude (0.16 degré)
 - ② Par test d'écart type : détecter et isoler les pannes d'amplitude entre 0.5 et 1.0 degré.
 - ③ Par test de corrélation : détecter et isoler rapidement n'importe quelle panne solide et liquide sur l'intervalle fréquentiel $[0.5 \dots 10.0]Hz$ et même de faible amplitude (0.16 degré).

Et pour la suite ...

- Evaluation de la complexité, puissance de calcul nécessaire.
- Paramétrage des algorithmes pour les autres scénarios de vol.
- Réduction du nombre de modèles de fonctionnement.
- Robustesse du test de corrélation pour les pannes de fréquences avoisinantes des fréquences choisies.