Méthodologie pour la sécurisation en vol d'un aéronef sans ajout de capteur

Julien Marzat
ONERA-DPRS, Châtillon
Supélec, Gif-Sur-Yvette

julien.marzat@onera.fr

Sous la direction de : Eric Walter (Supélec),
Hélène Piet-Lahanier (ONERA),
Frédéric Damongeot (ONERA)

Résumé

L'objectif de la thèse est la mise au point d'une méthodologie de détection de défauts en vol pour un véhicule aéronautique existant. Ce diagnostic s'appuiera uniquement sur le jeu de capteurs embarqués ainsi que les mesures relevées au cours de l'évolution de l'aéronef. L'idée de base est donc de confronter le comportement réel de l'engin avec celui fourni par un modèle du système basé sur les équations de la physique et/ou une base de connaissances. La méthode développée devra remplir un cahier des charges strict, notamment en ce qui concerne les erreurs de détection et la robustesse aux incertitudes de modélisation et aux erreurs de mesure.

1 Introduction

La sûreté de fonctionnement a toujours été considérée comme une phase essentielle de la conception des systèmes aéronautiques. Les aéronefs civils (avions, lanceurs, hélicoptères, ...) ou militaires (missiles, drones...) ont ainsi acquis un niveau de fiabilité très élevé au cours des dernières années. Toutefois, il est fréquent d'avoir recours à la redondance matérielle (multiplication des équipements) pour assurer la détection de défauts (capteurs ou actionneurs), ce qui engendre une augmentation des coûts et une réduction de l'autonomie du véhicule. Une alternative à cette méthode est l'utilisation de la redondance analytique, à savoir l'exploitation de relations existant entre les différentes grandeurs mesurées ou estimées. C'est cette approche qui est privilégiée dans le cadre de la thèse.

Comme nous le verrons dans la suite de cet article, le problème de la détection et de l'isolation de défauts a été abordé sous divers angles par une large communauté de chercheurs. Cependant le principe du processus reste le même et peut se représenter schématiquement comme proposé en Figure 1. Dans un premier temps, il s'agit d'effectuer une étape de traitement des signaux issus du système réel sous forme de mesures directes ou d'estimation d'état voire de paramètres. S'ensuit une étape de comparaison de ces caractères à des valeurs simulées grâce au modèle dont on dispose (ou à des valeurs de référence) dans le but de détecter une anomalie dans

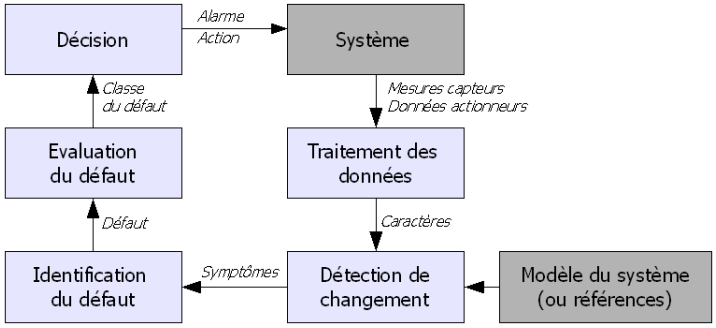

FIGURE 1 – Schéma de principe du diagnostic de défauts

le système, ce qui se traduit par la génération de symptômes. L'étape suivante consiste alors à localiser le défaut à partir de connaissances a priori et de déterminer éventuellement sa cause, cette étape étant suivie d'une phase d'évaluation de la gravité du défaut. Enfin, le bloc de décision doit générer une alarme (dans le cas où le système est supervisé par un opérateur humain) ou prendre les actions qui s'imposent en cas de supervision automatisée [Isermann, 1997].

2 Position du problème

Le problème que l'on se pose est de développer une telle méthodologie de diagnostic pour un aéronef donné. Il s'agit donc de concevoir une algorithmie exploitant les capteurs préexistants pour détecter et identifier en vol les défauts affectant les actionneurs ou les capteurs de manière rapide et sûre.

Un des problèmes majeurs de la détection et de l'isolation de défauts est la fiabilité des règles de décision. En effet, pour pouvoir entreprendre les actions de sécurisation adéquates, il est important que le système de diagnostic fournisse une alarme le plus rapidement possible et sans erreur d'identification du défaut. Il y a donc un compromis à trouver entre non détection et fausse alarme lors de la conception de ces règles [Patton, 1991], on pourra également chercher à garantir un certain délai de détection.

Un autre point important est la robustesse de la méthode proposée. Le diagnostic s'appuyant sur une représentation du système, il peut y avoir des imprécisions de modélisation, au

niveau du processus même mais également au niveau des défauts, auxquelles il faut être le plus insensible possible. Par ailleurs, il faut toujours tenir compte des bruits et incertitudes de mesures dont on ne peut s'affranchir.

Enfin, le caractère embarqué du processus impose la minimisation de la charge de calcul de la méthode et l'utilisation d'un nombre restreint de mesures.

3 État de l'art en diagnostic de défauts

La problématique de détection et isolation de défauts a été largement abordée sous différents angles. On peut classer les approches suivant de nombreux critères, le plus simple étant de différencier les méthodes venant du domaine de l'automatique de celles issues du domaine de la reconnaissance des formes.

3.1 Approche à base de modèles

Basées sur une représentation mathématique à partir des équations de la physique, le principe de base de ces méthodes est la génération de résidus qui doivent être nuls en l'absence de défauts et les caractériser lorsque ceux-ci surviennent. On peut citer comme principales techniques [Witczak, 2007][Venkatasubramanian *et al.*, 2003b] :

- l'estimation d'état déterministe (toute la famille des observateurs) ou stochastique (filtres de Kalman, processus gaussiens, filtrage particulaire),
- l'estimation paramétrique,
- l'approche par espace de parité [Staroswiecki et Comtet-Varga, 2001].

Une fois les résidus générés à l'aide de l'une de ces méthodes, l'analyse s'effectue généralement en faisant appel à la théorie de la décision statistique [Basseville et Nikiforov, 1993].

3.2 Approche par reconnaissance des formes

Cette classe de méthodes est basée sur une connaissance a priori disponible sous forme de base de données. Le diagnostic revient alors à une procédure de classification pour déterminer dans quel état se trouve le système : en bon fonctionnement ou subissant un défaut déterminé. On citera les méthodes suivantes [Venkatasubramanian *et al.*, 2003a] :

- les outils d'analyse de données (Analyse en composantes principales (ACP), K-ppv, arbre de classification...)
- les méthodes connexionistes (réseaux de neurones, séparateurs à vaste marge (SVM), ...)

L'ensemble de ces études peut s'appliquer dans un cadre bayésien (probabiliste), non bayésien (méthodes géométriques) voire flou (possibiliste).

On notera qu'il existe également des techniques à base de modèles a événements discrets (Arbre des fautes, physique qualitative...), celles-ci ne s'appliquant toutefois pas au problème que l'on se pose. De même, on écartera les systèmes experts, trop spécifiques à un système donné et donc beaucoup trop restrictifs dans le cadre du développement d'une méthodologie générique.

4 Déroulement envisagé

La suite du travail consistera tout d'abord à définir un modèle de simulation réaliste, d'un engin de type missile. On effectuera tout d'abord un choix de capteurs embarqués présentant une certaine généricité pour cette classe d'appareils. En particulier, on considérera une centrale inertielle, un éventuel autodirecteur ou une antenne réceptrice. La phase de vol étudiée s'effectuera a priori en milieu endo-atmosphérique avec des actionneurs aérodynamiques. Il est toutefois possible d'envisager une extension de la démarche à des trajectoires exo-atmosphériques. On concevra alors plusieurs scénarios cohérents d'anomalies en vol qui serviront de cas-test pour la suite de l'étude. Les méthodes ne convenant pas conceptuellement au problème seront écartées et l'on approfondira la connaissance des méthodes candidates restantes. Il s'agira alors de valider (ou d'invalider) les approches qui semblent pertinentes sur le modèle puis de se poser les problèmes de robustesse et de complexité voire de décision post-diagnostic.

Références

[Basseville et Nikiforov, 1993] M. Basseville et I.V. Nikiforov. *Detection of abrupt changes : theory and application*. Prentice Hall, 1993.

[Isermann, 1997] R. Isermann. Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods : An introduction. *Control Engineering Practice*, 5(5) :639–652, 1997.

[Patton, 1991] RJ Patton. Fault detection and diagnosis in aerospace systems using analyticalredundancy. *Computing & Control Engineering Journal*, 2(3) :127–136, 1991.

[Staroswiecki et Comtet-Varga, 2001] M. Staroswiecki et G. Comtet-Varga. Analytical redundancy relations for fault detection and isolation in algebraic dynamic systems. *Automatica*, 37(5) :687–699, 2001.

[Venkatasubramanian *et al.*, 2003a] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S.N. Kavuri, et K. Yin. A review of process fault detection and diagnosis Part III : Process history based methods. *Computers and Chemical Engineering*, 27(3) :327–346, 2003.

[Venkatasubramanian *et al.*, 2003b] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, et S.N. Kavuri. A review of process fault detection and diagnosis Part I : Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, 27(3) :293–311, 2003.

[Witczak, 2007] M. Witczak. *Modelling and Estimation Strategies for Fault Diagnosis of Non-Linear Systems : From Analytical to Soft Computing Approaches*. Springer Verlag, 2007.