HAL
open science

Maintenance prédictive appliquée aux systèmes électroniques embarqués

Samir Ghelam, Zineb Simeu-Abazi, Jean Pierre Derain, Christian Feuillebois

To cite this version:

Samir Ghelam, Zineb Simeu-Abazi, Jean Pierre Derain, Christian Feuillebois. Maintenance prédictive appliquée aux systèmes électroniques embarqués. 3ème Colloque International Performances et Nouvelles Technologies en Maintenance - PENTOM, Jul 2007, Mons, Belgique. hal-00185497

HAL Id: hal-00185497

https://hal.science/hal-00185497

Submitted on 6 Nov 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Maintenance prédictive appliquée aux systèmes électroniques embarqués

Samir Ghelam-Allah, Zineb Simeu-Abazi*, Jean-Pierre Derain, Christian Feuillebois

EUROCOPTER
E-mail :samir.ghelam@eurocopter.com,
jean-pierre.derain@eurocopter.com
christian.feuillebois@eurocopter.com
*Laboratoire GSCOP(CNRS-INPG-UJF) –
E-mail : Zineb.Simeu-Abazi@g-scop.inpg.fr

RESUME : Cet article présente deux approches différentes permettant de réaliser un pronostic de pannes sur des sous ensembles électroniques embarqués : l'approche « model-based » et l'approche « signal-based ». L' approche « model-based » est basée sur un modèle de dégradation reposant sur la physique de la défaillance des cartes électroniques et en particulier des attaches et fixations des composants des cartes étudiées. L'approche « signal-based » est basée sur l'observation et l'interprétation de mesures de courants internes pouvant véhiculer la signature d'un état de santé d'une carte.

ABSTRACT: This article presents two different approaches to realize a failure predictions on embedded electronics: the approach «model-based " and the approach "signal-based ". The model-based approach is based on a degradation model of the physics of failure of the electronic boards and in particular of the fixings of the components of the studied boards. The second approach 'signal-based" is based on the observation and the interpretation of internal measurements of currents being able to give the signature of a health of a board.

MOTS CLES : Maintenance proactive, diagnostic, surveillance, avionique

KEYWORDS: Proactive maintenance, diagnostic, monitoring, avionics

1. Introduction

Dans le secteur aéronautique, la maintenance représente à ce jour la charge la plus onéreuse dans le cycle de vie d'un aéronef [KON 05-1]. De plus en plus de constructeurs aéronautiques s'impliquent dans des projets de recherche qui élaborent des solutions techniques et technologiques visant la réduction des coûts [GHE 06] de maintenance de l'appareil. La ligne directrice commune de ces projets est l'amélioration de la disponibilité opérationnelle des machines. Les utilisateurs finaux d'hélicoptères sont divers et variés mais ils ont tous une exigence commune : la machine doit être opérationnelle à tout moment. C'est une exigence que l'on retrouve chez différents types d'utilisateurs. Nous pouvons d'abord citer comme exemple les clients « offshore » (comme Bristow Helicopters ou Heli-Union) qui assurent des liaisons entre le continent et des plates formes pétrolières pour le compte de sociétés d'exploration et de production pétrolières et gazières comme Exxonmobil, BP ou Chevron. L'hélicoptère est le moyen logistique idéal pour se rendre sur les plates-formes situées en mer ou plus généralement dans des endroits isolés ou difficiles d'accès.

Figure 1. mission offshore

L'équipage y est notamment chargé de l'exploitation de l'hélicoptère, et notamment de la sécurité des vols. Les mécaniciens assurent l'entretien des appareils afin d'assurer la navigabilité pour répondre aux exigences des usagers. Un ensemble de raisons structurelles ou organisationnelles comme des pièces de rechanges indisponibles, des pannes non localisées, des outils peu adaptés, des opérations de maintenance non programmées peuvent conduire directement à une immobilisation

de l'appareil. Cette non maîtrise des plannings maintenance conduit très souvent à des missions retardées voire annulées, ce qui engendre une perte financière significative. Parfois même la perte peut devenir bien plus que financière quand il s'agit d'une mission de secours : la sécurité civile est par exemple impliquée dans des missions de transport d'équipes de secours et de matériel spécialisé dans l'assistance à des personnes en danger. Une indisponibilité de l'appareil ne peut en aucun cas être envisagée dans ce cas précis puisque des vies humaines peuvent être en jeu.

Figure 2. mission ems (emergency medical service)

La maintenance est donc une préoccupation de premier ordre pour la plupart des utilisateurs d'hélicoptères. La satisfaction du client passe ainsi par la maîtrise de la connaissance de la santé de l'appareil à tout instant. Cela passe notamment par l'amélioration des performances de l'architecture de maintenance embarquée [GHE 05] et par la mise en place de nouveaux concepts de maintenance. Ces nouveaux concepts de maintenance doivent contribuer à améliorer le design de maintenance à bord de l'appareil mais aussi enrichir les moyens de maintenance au sol. En opérationnel, ces nouveaux concepts doivent aussi faire en sorte de minimiser les temps d'intervention, de faire en sorte d'éviter les fausses déposes, et aussi d'effectuer le bon diagnostic en un minimum de temps. Pour parvenir à de telles améliorations, l'opérateur de maintenance doit disposer d'un maximum d'information de maintenance en avance de phase, voire même d'anticiper une panne avant son occurrence. C'est ce qu'on appelle la maintenance prédictive. La suite de l'article sera dédiée à l'implémentation de cette maintenance prédictive aux systèmes avioniques[BAI 04].

2. Implémentation d'une fonction de maintenance prédictive appliquée aux systèmes électroniques embarqués

La maintenance prédictive appliquée aux systèmes avioniques n'existe pas à ce jour. Notre contribution consistera à implémenter et à appliquer une nouvelle méthode de surveillance en continu de la santé des équipements avioniques. Réaliser un suivi de tendance de l'état de santé des équipements embarqués revient à anticiper une panne sur des sous ensemble électroniques. Nous allons développer dans ce chapitre deux approches totalement différentes et dissociées pour réaliser cette fonction :

- Une approche « model-based» basée sur un modèle structurel de la carte qui consiste à mesurer l'impact des sollicitations externes sur le hardware et de calculer les dégradations induites par ces contraintes environnementales. Cette approche PoF (Physics of Failure) se concentre plus sur la connaissance de l'origine de la panne. (Cycles thermiques et perturbations vibratoires essentiellement)

- Une approche « signal-based » qui consiste à suivre les valeurs de paramètres intrinsèques comme des mesures de courants qui circulent au sein de la carte. Cette approche consiste à observer les signatures de la carte et se concentre davantage sur le suivi de tendance des paramètres révélateurs d'un état de santé.

Nous verrons que les deux approches n'utilisent pas les mêmes modèles et nécessitent des moyens de captation différents. Néanmoins elles doivent aboutir au même résultat : une estimation de la santé avant l'apparition d'une panne. En effet, la fonction de surveillance en continu de la santé des systèmes permet de détecter la détérioration de l'état d'une carte afin d'obtenir une estimation de la durée de vie restante avec un degré de confiance significatif. Notre développement s'est axé sur l'approche signal-based.

3. Développement de l'approche « signal-based »

Dans ce paragraphe nous allons développer une technique de calcul de dégradation de l'état d'une carte basée sur l'observation de signaux intrinsèques (courants et température) mesurés dans la carte à l'aide de sondes spécifiques. Nous choisissons de développer une approche PCSM (Pronostic par Classification de Signaux Mesurés). Nous allons notamment tenter de prouver qu'il existe un lien entre un vecteur d'observation donné et un état de santé donné. Le vecteur d'observation (X1,…,Xn) doit nous permettre de retranscrire un état de bon fonctionnement ou de mauvais fonctionnement de la carte. Nous devons alors être capables de corréler la mesure de signaux et l'état de la carte. Nous allons donc construire dans ce paragraphe une telle fonction de corrélation basée sur un réseau flou [BAR 05] qui devra être capable de classifier un état de santé en fonction d'une mesure donnée.

Nous devrons prouver que la fonction logique floue converge vers une estimation unique, ce qui permettra d'établir qu'à une mesure quelconque on associe bien un état de santé unique.

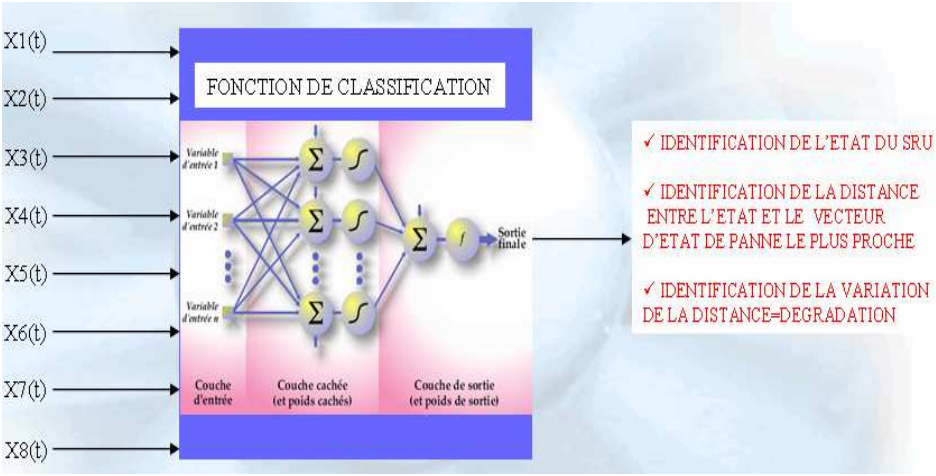


FIGURE 37 CLASSIFICATION DE MESURES DE SIGNAUX POUR L'EVALUATION DE LA SANTE D'UNE CARTE

La distance entre l'état de panne et l'état estimé doit aussi être quantifié. L'évolution de cette distance nous permettra d'émettre un pronostic si l'état estimé se rapproche de l'état de panne (estimé en amont lors de la phase d'apprentissage). La constitution de l'approche « signal-based » est divisée en deux phases :

- une première phase de caractérisation du module en état nominal puis en état de panne. Il s'agira d'observer les symptômes de la carte dans ses différents états en mesurant des signaux à des endroits judicieusement choisis. D'abord nous définirons les points à observer en fonction de leur aptitude à retranscrire un état de santé. Nous nous plaçons ensuite successivement dans différents scénarios de bon fonctionnement puis de panne. Nous récupérons le pool d'entrée sortie correspondant. Nous utilisons ensuite le pool d'entrée sortie précédemment obtenu pour enrichir la phase d'apprentissage du réseau flou. A l'issue de cette phase nous obtenons une fonction BIHM capable de calculer un état de santé en fonction des mesures de courants.
- Une deuxième phase d'exploitation pendant laquelle la fonction BIHM est intégrée dans la carte et utilisée pour émettre un pronostic sur la santé de cette carte. Le BIHM étant basé sur une fonction type fuzzy-logic est capable s'enrichir par exploitation du retour d'expérience.

a- Phase de caractérisation

La caractérisation du circuit surveillé est réalisée à l'aide d'une fonction « fuzzy logic ». La fuzzification (« action de rendre flou ») est le passage de grandeurs physiques (déterminées, théoriques ou mesurées) à des variables linguistiques, ou

variables floues, qui peuvent être alors traitées par les règles de la logique floue. Cette dernière, permettant de modéliser des connaissances imprécises ou vagues (à température=0°C on associe la variable linguistique « froid » et à température = 40°C on associe la variable linguistique « chaud »).
Par opposition au régulateur/système multivariable classique, un régulateur ou un système flou ne traite pas directement des relations mathématiques bien définies, mais utilise notamment des variables linguistiques et des règles d'inférence pour calculer le signal de commande/sortie. Nous proposons une structure générale du système/régulateur flou illustrée par la figure suivante :

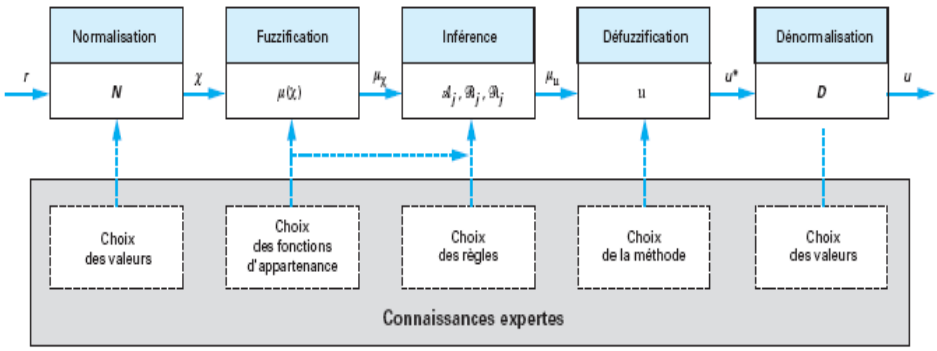


Figure 3. overview de l'approche fuzzy-logic

Le circuit étudié est un pont redresseur double alternance. Nous tentons ici sur un circuit simple de corréler une mesure et un état de santé.

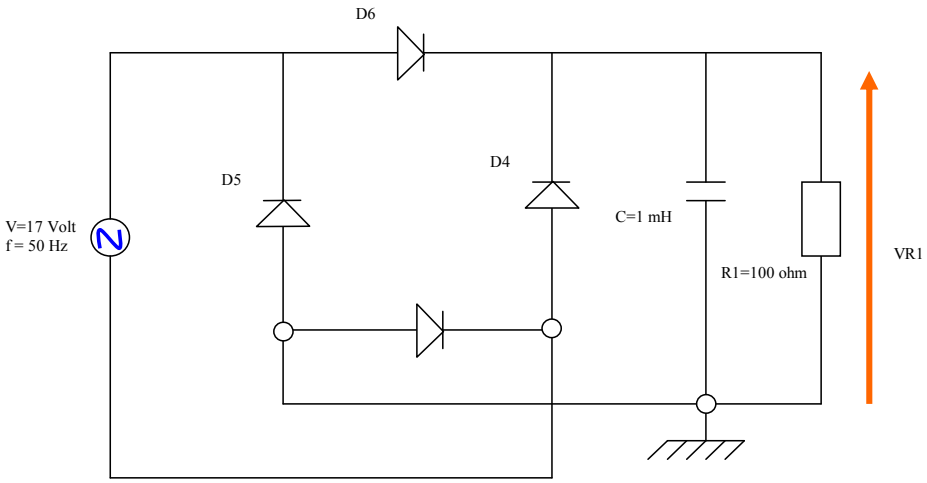


Figure 4. schema du pont redresseur double alternance

La prochaine étape consistera à effectuer une estimation de la valeur de VR1 en fonction de différents points d'observation sur le circuit.
La tension VR1 sera reproduite et estimée par une fonction de type floue que nous avons construite. Le vecteur d'observation est constitué par trois valeurs d'entrée :

- Vin à l'instant k
- la tension aux bornes de la diode VD1 à l'instant k
- VR1=Vout à l'instant k-1.

De plus, à chaque instant k l'erreur $\varepsilon_{k-1} = V_{estimé\ à\ l'instant\ k-1} - V_{mesuré\ à\ l'instant\ k-1}$ est connue et permet d'optimiser la valeur $V_{estimé\ à\ l'instant\ k}$
La méthode développée est dénommée EFM (evolving fuzzy model). Elle nous permettra de calculer $V_{estimé\ à\ l'instant\ k}$ en fonction du vecteur d'observation défini ci-dessus. La méthode ici développée répond aux différents critères attendus :

- transparente et aisée à mettre en œuvre
- utilisable pour tout système mono sortie ayant un nombre arbitraire d'entrée
- faisant appel à du calcul récursif peu gourmand en temps de calcul et en mémoire.
- Robuste en cas de données bruitées.

La figure ci après montre la phase d'apprentissage lorsque l'on présente à EFM la totalité des données correspondantes aux différentes valeurs de température considérées. On superpose sur la figure Vin (rouge), Vd(vert) et Vout (bleu foncé) et $V_{estimé\ à\ l'instant\ k}$ (cyan)

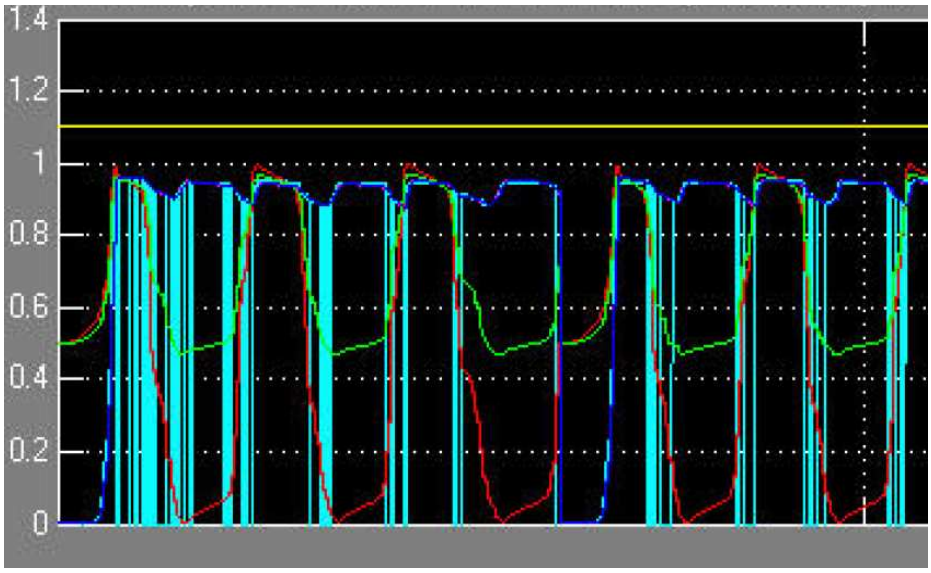


Figure 5. representation graphique de vd, vin et vout en fonction du temps

La première interprétation à faire concerne les courbes de l'axe supérieur qui montre les données normalisées utilisées et produites par EFM. En particulier, nous pouvons constater que le début de courbe $V_{estimé\ à\ l'instant\ k}$ (courbe cyan) présente de nombreux fronts raides qui illustrent bien que l'EFM tente de s'ajuster au signal Vout (bleu marine).

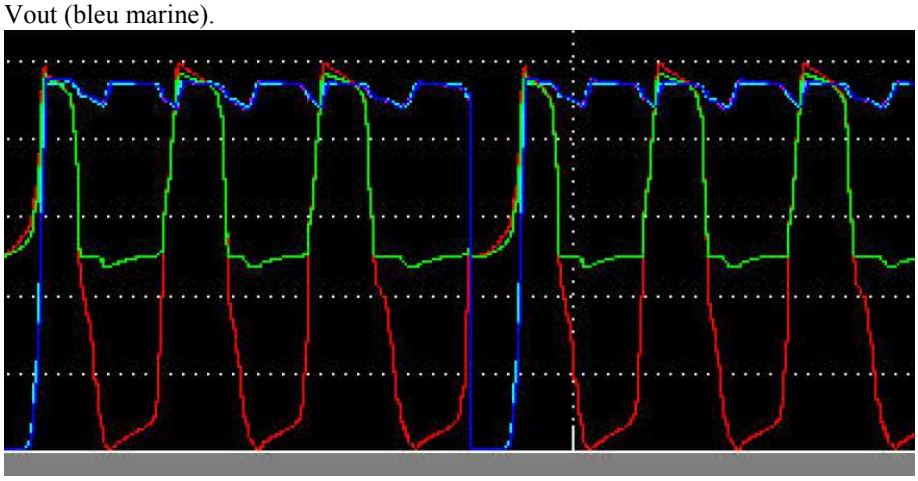


Figure 6. representation graphique de vd, vin et vout en fonction du temps ; convergence de l'EFM

Le schéma ci-dessus illustre la convergence d l'EFM vers une bonne estimation de Vout. Au bout d'un certain temps l'EFM parvient à mieux estimer $V_{estimé\ à\ l'instant\ k}$ si bien que la courbe cyan se superpose à la courbe bleue marine (Vout). La figure suivante illustre les résultats obtenus pour l'erreur ε_k .

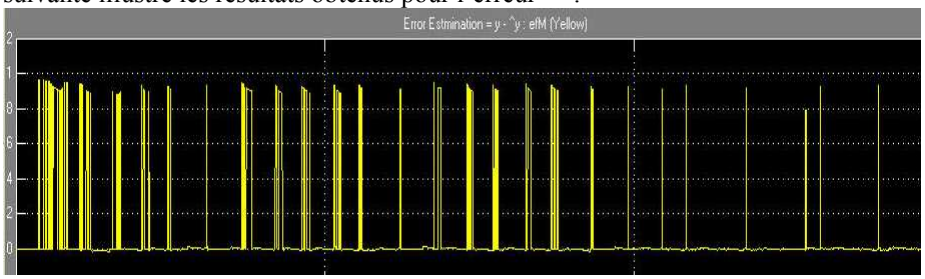


Figure 7. representation graphique de l'erreur ε_k en fonction du temps

On constate que cette erreur diminue avec le temps jusqu'à ce que l'EFM parvient à s'aligner au signal Vout. Enfin le dernier graphe représente l'évolution du nombre total de règles ou lois comportementales créées par EFM (courbe jaune). Nous avons superposé aussi sur le schéma suivant les dernières règles ajoutées (courbe magenta) ainsi que dernière règle qui a été généralisée pour représenter un ensemble plus vaste de valeurs de Vk.

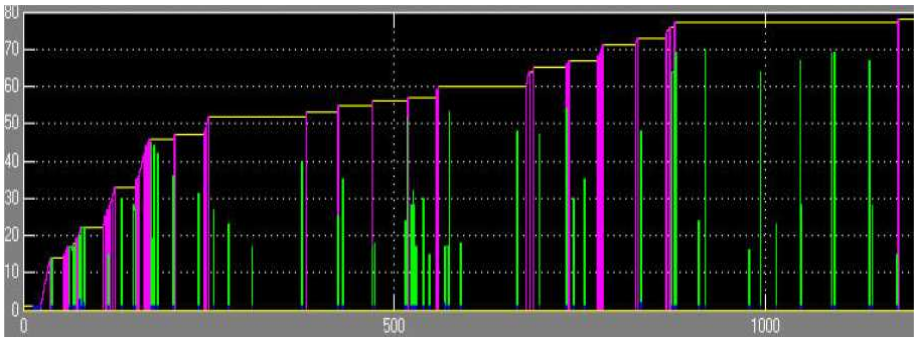


Figure 8. representation graphique du nombre de regles créees par l'EFM

On constate que le nombre total de règles tend vers une valeur constante puisque l'EFM arrive au bout d'un certain temps à un nombre suffisant de règles pour représenter fidèlement le signal Vout.

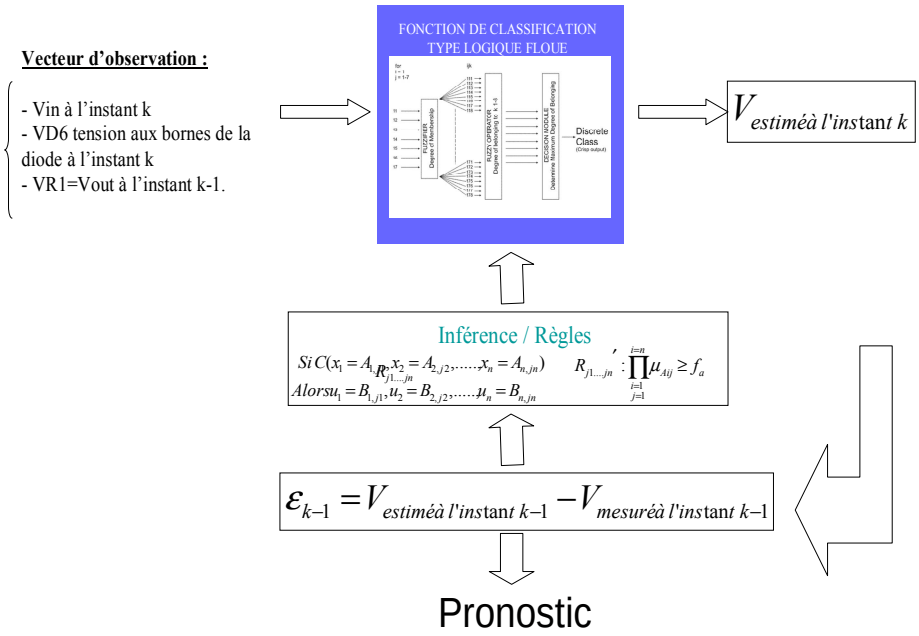
Figure 9. convergence de l'efm lorsque $t \to \infty$

Au bout d'un certain temps, l'EFM parvient à recréer le signal de sortie Vout par apprentissage. Il est parvenu à générer un nombre de loi (80 règles) qui sont apparemment suffisantes pour générer le signal Vout. L'erreur estimée devient alors quasi nulle (inférieure à 1% !) comme le montre le schéma ci-dessus.

b- Phase d'exploitation

Une fois l'apprentissage réalisé, la fonction de classification de type logique floue est capable de traiter les mesures d'entrée, des mesures de sortie, de mesures aux bornes de la diode et est capable d'extraire une signature de la carte par mesure de signaux intrinsèques à travers l'estimation de l'état de sortie. C'est par comparaison avec la valeur mesurée que l'on est capable d'observer une déviance par rapport à l'état nominal.

C'est par ce dispositif que le pronostic est réalisé. Un ensemble de capteurs doit être intégré à la carte. Cet ensemble de capteurs ne doit pas dégrader la fiabilité globale de la carte. C'est la raison pour laquelle l'équipementier doit être intégré pleinement à la démarche.



4. Conclusions

Nous venons de présenter une méthodologie permettant de réaliser un pronostic de pannes sur des sous ensembles électroniques. Dans un premier temps nous avons dressé le contexte de l'étude, un contexte lié à de forts objectifs de disponibilité machine. Ces besoins de se déclinent naturellement vers l'amélioration des processus de surveillances des systèmes avionnés. Le pronostic permettant d'un point de vue opérationnel d'éviter les interruptions de missions et les dépenses en termes de ressources et de coûts qui sont associés. Nous avons mis en avant deux approches « signal-based » et « model-based ». Nous avons continué la démarche par le développement d'une approche signal-based basée sur les résultats d'une fonction d'apprentissage de type « fuzzy-logic ». Les résultats très satisfaisants avec une convergence de l'EFM quasi-parfaite présentant une erreur inférieure à 1% au bout de 80 règles floues. Cependant, si l'on souhaite implémenter cette approche « signal based » à plus grande échelle, une grande quantité de sondes/capteurs seront nécessaires et peuvent avoir un coût important. D'autant plus que l'ajout de tels capteurs ne doit pas dégrader la fiabilité globale du système. La masse d'information associée peut aussi croître de façon exponentielle si l'on souhaite observer un équipement à plusieurs emplacements différents, il faudra notamment pouvoir disposer de processeurs capables de traiter une telle quantité d'information. L'amélioration de cette fonction pourrait consister à s'intéresser davantage à la pertinence du point d'observation. La qualité du point d'observation retranscrivant le pattern de l'équipement, prévaut donc sur la quantité de points d'observation.

Lors de nos prochains travaux, un effort pourrait être consenti à ce niveau. L'amélioration de la testabilité des équipements pourra contribuer à limiter le nombre de points d'observation. Un prototype dédié à l'approche « signal-based » pourra par la suite être développé pour illustrer ces améliorations.

Références

[BAR 05] Jean Camille de Barros Systèmes et régulateurs flous - Définition et cognition Université d'Oxford. 2005. www.techniques-ingenieur.fr/dossier/systemes_et_regulateurs_flous_definition_et_cognition/S7440

[KON 05-1] Christos Konstantinidis. Identification of strengths and weaknesses of current maintenance processes Document interne au projet européen TATEM Techniques And Technologies for nEw maintenance concepts Mars 2005

[BAI 04] Carine Bailly, Patrick Levesque, Ghelam Samir. Maintenance processes and procedures for avionics systems., Document interne au projet européen TATEM Techniques And Technologies for nEw maintenance concepts Decembre 2004.

[GHE 05] S. Ghelam-Allah, Z. Simeu-Abazi, J.P. Derain, C. Feuillebois, S. Vallet : "Architecture de surveillance et diagnostic pour la maintenance des systèmes avioniques" 2ème Colloque International Francophone Performance et Nouvelles Technologies en Maintenance, PENTOM 2005, Marrakech, Maroc, Avril 2005.

[GHE 06] Estelle Scanff, Samir Ghelam-Allah, Peter Sandborn, A decision support method for health management. Microelectrinics & reliability Journal to be published in 2007.