

Groupe DISCO



DIagnostic, **S**upervision et
Conduite qualitatifs

Journées 2006



Journées DISCO 2006

Lundi 13 Novembre 2006
en LAAS, Salle Europe

MATIN

9h30-9h45 - Ouverture, L. TRAVE-MASSUYES

9h45-10h30 - M. BAYOUDH

10h30-11h15 - F. PERROT

11h15-12h00 - X. PUCEL

12h00-12h45 – D. FRAGKOULIS

Mardi 14 Novembre 2006

Au Domaine du Bousquet
13, rue de la Pradelle
31610 Saint-Orens de Gameville

Matin	Après-midi
8h50-9h00 : Ouverture L. TRAVE-MASSUYES	14h00-15h20 G. ROUX C. JAUBERTHIE B. DAHOU F. MORA CAMINO K. ACHAIBOU
9h00-10h00 - E. CHANTHERY: présentation de ses travaux antérieurs et perspectives au sein de DISCO	15h20-15h45 : Pause
10h00-10h30 L. TRAVE-MASSUYES Y. PENCOLE	15h45-16h15 : Le mot des industriels
10h30-11h50 Pause	16h15-17h00 : Discussion
10h50-12h30 M. COMBACAU A. SUBIAS M.V. LE LANN A. DONCESCU J. AGUILAR MARTIN	

LOPEZ-VARELA Carmen Guadalupe
Approche basée cohérence pour le diagnostic

SOLDANI Siegfried
Diagnostic des systèmes à événements discrets appliqué au domaine de l'automobile embarqué

PUCEL Xavier
Comparaison d'approches d'analyse de diagnosticabilité, application aux services web

BAYOUDH Mehdi
Active diagnosis and reconfiguration for autonomous satellites

PERROT Fabien
Diagnostic et reconfiguration embarqués

RESSENCOURT Hervé
Diagnostic à base de modèles : collaboration multi-modèles pour la génération automatique de séquence de tests

RIBOT Pauline
Diagnostic et pronostic d'un système distribué : application aux systèmes aéronautiques

DIEZ-LLEDO Eduard
Diagnostic des équipements des moteurs d'avion, vers le pronostic d'une maintenance adaptative

KARIM Jawad
Surveillance, diagnostic et pronostic en temps réel de systèmes hybrides : application à des bancs d'essais CERTIA

MOKHTARI Aïmed
Diagnostic de systèmes dynamiques hybrides à base d'un formalisme réseaux de Petri différentiels à objets

ISAZA NARVAES Claudia Victoria
Détection de défauts par méthodes de reconnaissance de formes dans le cadre de la surveillance en ligne de systèmes dynamiques : applications dans le domaine des processus chimiques et bio

GUENOUNOU Ouahib
Méthodologie de conception de contrôleurs intelligents par l'approche génétique – application à un bioprocédé

MONTSENY Emmanuel
Modélisation, analyse et identification de certains systèmes dynamiques non-linéaires de processus biologiques

FRAGKOULIS Dimitrios
Détection et isolation de défauts provenant d'actionneurs et de capteurs dans un système non linéaire

FELLOUAH Rabah
Approche de diagnostic de pannes à base de modèle pour les systèmes dynamiques non linéaires

ZHANG Nan
Platitude différentielle et détection de fautes dans les systèmes de conduite du vol

GRISALES Victor Hugo
Modélisation et commande floue de type Takagi-Sugeno appliqués à un bioprocédé de traitement des eaux usées.

LOPEZ-VARELA Carmen Guadalupe

Approche basée cohérence pour le diagnostic

Nom: Carmen Guadalupe LOPEZ-VARELA,

Directeur de thèse : Audine SUBIAS et Michel COMBACAU

Problématique— Dans le domaine du diagnostic de défaillances à base de modèles, le problème se pose autour du modèle du système qui normalement est utilisé comme référence dans la tâche de détection et diagnostic. Une erreur dans ce modèle sera considérée comme un symptôme de défaillance et pourrait mettre en cause le bon fonctionnement du procédé alors que l'origine réelle de la défaillance se trouve au niveau du modèle qui est erroné.

I. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT

Notre travail se situe dans le cadre de la détection et du diagnostic de défaillances dans les Systèmes à Evénements Discrètes (SED). Pour ce type de systèmes, le diagnostic est généralement considéré comme un ensemble de trajectoires qui expliquent les observations. Les approches du diagnostic à base de modèles, appelés approches « diagnostiqueurs » [1], [2], [3], [4], [5], [6], s'appuient sur un modèle du système pour déterminer l'occurrence des défaillances à partir des observations issues du fonctionnement du procédé. La plupart des modèles utilisés dans ces approches, représentent le comportement normal et les défaillances du procédé. Ces travaux font l'hypothèse de l'exhaustivité dans la détermination des défaillances. Etant donné que l'anticipation des toutes les possibles défaillances pouvant affecter le système est une tâche difficile à accomplir, cette hypothèse devient une limitation importante de ces approches, les défaillances qui ne sont ni anticipées, ni représentées dans le modèle, ne pourront pas être détectées, ni diagnostiquées. Notre objectif est donc de développer une méthode de diagnostic pour les Systèmes à Evénements Discrètes basée sur un modèle distribué du système surveillé décrivant le fonctionnement normal du système. Cette approche de diagnostic a pour cible les erreurs de modélisation et certaines défaillances du procédé.

II. OBJECTIF

Nous envisageons une façon différente de traiter le problème de la détection et diagnostic de défaillances dans les SED en considérant uniquement un modèle réseau de Petri du bon fonctionnement du système surveillé. Tout comportement observé différent du comportement spécifié dans le modèle du système est traduit comme un symptôme de défaillance. Notre approche est une approche basée cohérence dans laquelle les observations sont considérées comme « saines » et seul le modèle du système est remis en cause. La détection d'un symptôme s'appuie sur un modèle des observations. Ce modèle est construit en ligne, au fur et à mesure de la réception des observations issues du procédé. Il représente en fait l'ensemble des trajectoires d'états possibles du système suite à une séquence d'observations. L'étape de détection correspond à une rupture de la cohérence entre le modèle du système et le modèle des observations. L'étape du diagnostic correspond au rétablissement de la cohérence entre les modèles, par modification du modèle du système, la Fig. 1 montre le principe de l'approche proposée. Les différentes étapes de cette approche sont décrites dans la section suivante.

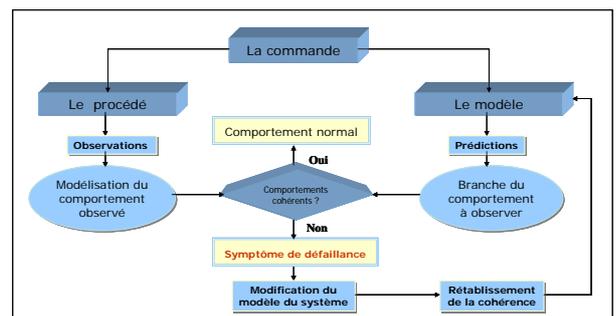


Fig. 1. Schéma de l'approche de détection et diagnostic

C. LOPEZ-VARELA. Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS-CNRS); cglopezv@laas.fr).

A. SUBIAS. Maître de Conférences à l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA-Toulouse), chercheur au LAAS-CNRS (subias@laas.fr).

M. COMBACAU. Professeur à l'Université Paul Sabatier (UPS-Toulouse), Chercheur au LAAS-CNRS : (combacau@laas.fr).

III. ETAT DES TRAVAUX

A. La Détection

Le principe de base de la détection est un test des transitions franchissables dans le modèle du système. L'observation (ou événement observé) est recherchée dans le graphe d'état déduit du modèle réseau de Petri du système comme une transition franchissable associée à l'événement correspondant à l'observation. Si cette observation n'est pas retrouvée dans le modèle du système ou si la transition associée n'est pas franchissable, il y a rupture de cohérence entre le modèle d'observations et le modèle du système et un symptôme de défaillance est détecté. Cette incohérence est perçue de deux façons : (a) comme un événement manquant dans le modèle du système ou (b) comme un événement non attendu, la Fig. 2 montre cette situation.

B. Le Diagnostic

Lorsqu'une incohérence est déterminée, le modèle du système qu'on supposait, représenter le bon comportement, est remis en cause. Pour rétablir la cohérence, ce modèle est alors modifié de manière à ce qu'il puisse représenter le nouveau comportement observé décrit dans le modèle d'observations (voir figure 3). Le résultat du diagnostic est l'ensemble des modifications réalisées permettant d'expliquer soit une erreur dans le modèle du système soit un fonctionnement anormal du procédé. Le problème principal est de savoir si l'incohérence est due à une « erreur » au niveau du modèle du système (i.e. modèle incorrect), lequel ne correspond pas au comportement réel du procédé ou si l'incohérence résulte d'un fonctionnement anormal (défaillance) du procédé :

1) Les erreurs considérées au niveau du modèle du système sont les suivantes :

- Des erreurs au niveau de l'ensemble des états accessibles du modèle, i.e. des places ou du marquage. Si l'erreur se traduit par un manque d'informations (moins d'états accessibles, moins de places ou de jetons) alors cette erreur provoquera une incohérence. Dans le cas contraire, si l'erreur se traduit dans le modèle par un surplus d'information (plus d'états, de places ou de jetons) alors cette erreur ne sera pas détectée et pourtant il n'y aura pas d'incohérence.
- Des erreurs au niveau des transitions du modèle. Une transition manquante dans le modèle du système provoquera une incohérence, mais une

transition de plus dans le modèle est une erreur qui ne provoque pas d'incohérence et qu'il ne sera pas possible de détecter.

Il y a aussi des erreurs qui sont la combinaison des deux situations précédentes et qu'il est possible de détecter seulement si elles produisent des incohérences.

2) Les types de défaillances considérés au niveau du procédé :

- Une défaillance dans la couche de capteurs, il s'agit de la panne d'un capteur lequel n'émet plus sa lecture. Les défaillances des capteurs qui provoquent des fausses lectures ne sont pas considérées dans cette approche.
- Une défaillance fonctionnelle, il s'agit d'une défaillance dans un composant du système de manufacture, transport ou stockage lequel n'accomplit plus sa fonction.

Dans notre travail nous faisons l'hypothèse qu'une défaillance est traitée avant qu'une autre défaillance ne se produise, ce qui nous permet de traiter une incohérence à la fois.

Actuellement nos travaux portent sur la partie modification du modèle. Nous étudions les différentes possibilités de modifier le modèle pour rétablir la cohérence. Notre objectif est d'exprimer ces modifications au niveau de la matrice d'incidence C. Après la détermination d'une incohérence, l'objectif est de trouver un ensemble de matrices modifiées, appelés matrices de Rétablissement de Cohérence C_{RC} , qui couvrent le nouveau comportement observé non présent dans le modèle initial du système et qui éliminent l'incohérence. Les contraintes pour ces modifications sont les suivantes :

- a) Les nouvelles matrices trouvées doivent respecter la représentation des comportements passés du procédé qui ont été trouvés comme cohérents.

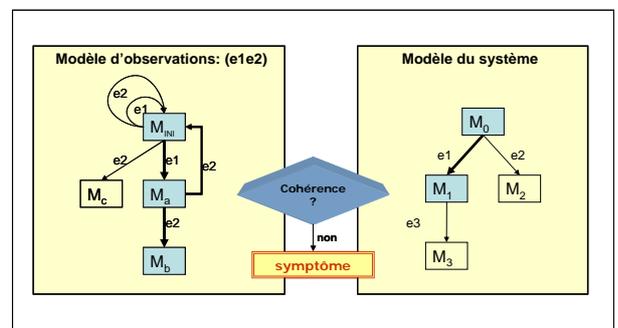


Fig. 2. Détection d'un symptôme

- b) Les modifications réalisées doivent garantir certaines propriétés du modèle réseau de Petri du système. Ces propriétés sont déterminées à partir d'une connaissance (minimale) du système surveillé. Par exemple les propriétés de réinitialisation et de vivacité.

L'ensemble des modifications possibles qui peuvent affecter la matrice d'incidence C est divisé en trois groupes :

a) *Modifications dans les coefficients de la matrice d'incidence C*

Il s'agit de modifier les poids des arcs i.e. les coefficients de la matrice d'incidence C , sans modifier la dimension de la matrice C (nombre de lignes et de colonnes), c'est-à-dire, sans changer la structure du modèle.

b) *Modification de la structure de la matrice d'incidence C*

Il s'agit de modifier le nombre de lignes et de colonnes de la matrice d'incidence en les augmentant ou en les diminuant, sans changer les coefficients de la matrice.

c) *Modification mixte*

Il s'agit de combiner les modifications de la structure et des coefficients de la matrice d'incidence.

Nous envisageons aussi des modifications au niveau du marquage [9] comme une autre possibilité pour rétablir la cohérence entre les modèles.

Les matrices résultantes de la modification contiendront possiblement de nouvelles propriétés qui n'étaient pas présentes dans le modèle initial du système. Ces matrices traduiront l'espace d'états considéré cohérent avec les observations reçues et un nouvel espace d'états qui inclut les observations trouvées comme incohérentes. Ainsi, le résultat de cette modification est l'obtention d'un modèle des comportements du système plus grand et complet, incluant le comportement normal.

PUBLICATIONS

- [1] C. G. Lopez-Varela, A. Subias et M. Combacau " An adapted FMEA-based approach for failure diagnosis in distributed architectures," *Congrès IMACS*, juillet 2005.
- [2] C. G. Lopez-Varela, A. Subias et M. Combacau, " Diagnostic Distribué à base de modèles" *Congrès EDSYS*, Mai 2006.

REFERENCES

- [3] M. Sampath, R. Sengupta, S. Lafortune, K. Sinnamohideen et D.C. Tenketzis "Diagnosticability of discrete-event systems," *IEEE Transactions on Automatic Control* 40(9), pp. 1555-1575, 1995.
- [4] R. Debouk., S. Lafortune et D. Teneketzis " Coordinates decentralized protocols for failure diagnosis of discrete event systems " *Theory and Application* 10, 33-86, 2000.
- [5] S. Genc, et S. Lafortune "Distributed diagnosis of discrete event systems using Petri nets" in *Application and Theory of Petri Nets*, (series Lecture Notes in Computer Science), Vol. 2679, pp316-336, Springer Verlag, 2003.
- [6] P. Baroni., G. Lamperti, P. Pogliano et M. Zanella, "Diagnosis of a class of distributed discrete event systems" *IEEE transaction on systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans* 30(6), 2000.
- [7] R. Su, W.M. Wonham, J. Kurien et S. Koutsoukos, "Distributed diagnosis for qualitative systems" In *Proc. Of the International Workshop on discrete event systems- WODES, IEEE Computer Society*, pp 169-174, 2002.
- [8] Y. Pencolé, "Decentralized diagnoser approach: application to telecommunications networks", In *Eleventh International Workshop on Principles of Diagnosis- DX*, pp. 185-192, 2000.
- [9] J. Cardoso, " Sur les réseaux de Petri avec marquage flou. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Octobre 1990.

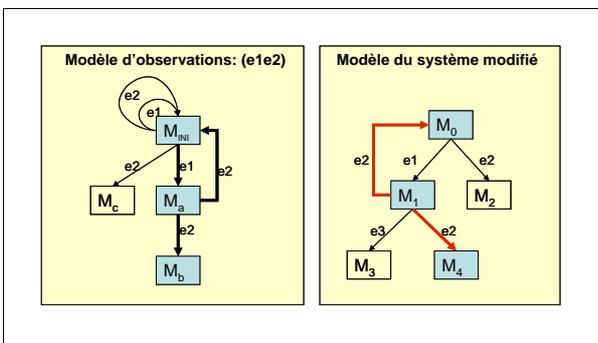


Fig.3. Diagnostic par la modification du modèle du système

SOLDANI Siegfried

Diagnostic des systèmes à événements discrets appliqué au domaine de l'automobile embarqué

Doctorant : Siegfried SOLDANI
Directeur de thèse : Michel COMBACAU
Encadrant : Audine SUBIAS

I. OBJECTIFS

Le sujet de cette thèse s'intègre dans le cadre d'une convention CIFRE entre le LAAS et la société ACTIA, qui se sont regroupés avec l'IRIT, au sein du laboratoire commun Autodiag. Ce laboratoire a pour but de définir de nouvelles approches et de nouveaux outils pour le diagnostic automobile. L'objectif de cette thèse est d'établir une nouvelle méthode de détection et de diagnostic pour les systèmes à événements discrets dans le cadre des systèmes embarqués. L'avancée technologique ne s'est malheureusement pas accompagnée de sa maîtrise. Ainsi de nombreux problèmes liés à l'électronique sont apparus, et notamment les problèmes liés aux défauts fugitifs et intermittents. A l'heure actuelle, ces problèmes ne sont pas résolus dans la mesure où les outils de diagnostic que l'on retrouve dans les différents garages sont des outils débarqués et par conséquent ils ne peuvent diagnostiquer un défaut, une panne que si elle est persistante.

L'idée est donc d'embarquer un module dans la voiture dans le but de détecter ces défauts fugitifs et intermittents, voir de les localiser si possible ou d'apporter le maximum d'informations sur le contexte d'apparition de ces défauts.

Beaucoup de travaux ont été menés sur le diagnostic à base de modèles pour des systèmes à événements discrets. Nous retrouvons les modèles à base de réseaux de Petri ([1], [2], [4], [6]), les corrélations d'alarmes ([3], [7]), l'approche diagnostiqueur ([5], [8], [9]), ... mais dans l'ensemble de ces méthodes, le système modélisé prend en compte les fautes (i.e. que le modèle intègre des états de défaillances). Généralement, cette défaillance est détectée par un capteur et l'événement associé est une alarme qui est considérée comme un événement observable.

Le système que nous considérons est constitué de différents composants reliés entre eux par l'intermédiaire d'un réseau. Notre idée est d'établir un modèle de bon fonctionnement, donc sans prendre en compte ses états de défaillances possibles, d'une fonction (ou d'une tâche) à réaliser par ce système. Nous pouvons suivre l'évolution de l'état de celle-ci au travers les échanges de messages qui circulent entre les composants sur le réseau de communication. Nous considérerons donc les messages comme

des événements observables. Nous connaissons l'état du système, les événements reçus, les événements attendus, et les états suivants liés à ces événements. Il y a détection si l'événement observé est incohérent avec ceux attendus. Dans un contexte perturbé, on peut considérer que l'événement circulant sur le réseau n'est pas intègre. Il faut alors supposer que l'événement perçu n'est pas reconnu tant qu'il n'est pas confirmé par des événements suivants. Nous pouvons ainsi définir une fenêtre comportant un certain nombre d'événements dont l'occurrence n'est pas encore confirmée. Ces événements seront remis en cause lors d'une de la détection d'une incohérence. Nous pourrions ainsi prendre en compte l'absence d'événements (ce sont des événements "potentiellement inobservables") ou bien le fait qu'un message se soit inséré de façon inopinée entre deux autres messages ou une combinaison des deux. Une autre approche pourra consister à obtenir un modèle représentant ce genre de fautes et ainsi pouvoir suivre en ligne l'évolution du comportement.

II. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT

Ce genre de problèmes apparaît sur les réseaux informatiques. Ainsi l'apparition de messages erronés sur le bus peut provoquer une défaillance du système et de son fonctionnement. On retrouve par exemple ce genre de réseaux sur le nouvel airbus A380 (réseau AFDX) ou encore sur toutes les automobiles (réseau CAN, VAN), ou autres moyen de transports, ... C'est pourquoi les trois acteurs que sont le LAAS, l'IRIT et ACTIA se sont réunis pour résoudre certains problèmes que le domaine du diagnostic automobile rencontre à l'heure actuelle. En effet, la préoccupation des constructeurs automobiles est d'accroître le confort et la sécurité dans les véhicules. Ainsi de nouvelles fonctionnalités telles que le système antiblocage des roues ou bien des sièges chauffants sont apparues pour les systèmes automobiles, ou encore la gestion de rampe d'accès pour handicapés dans les autobus. Cette augmentation des nouvelles fonctionnalités s'accompagne d'une explosion de l'électronique embarquée dans les systèmes de transport. Pour une raison évidente de coût, il a été développé un réseau standard, appelé réseau CAN (cf. figure 1) sur lequel sont reliés les différents composants électroniques du véhicule. Certains de ces composants, appelé calculateurs, dialoguent entre eux pour accomplir une "fonction" du

véhicule (e. g. la gestion de rampe d'accès pour handicapés).

Le processus de réalisation d'une fonction fait appel à plusieurs calculateurs qui interagissent et communiquent entre eux par l'intermédiaire de messages circulant sur le bus de données (i.e. le réseau CAN). Les défauts fugitifs et intermittents peuvent être la cause de messages erronés. Un modèle comportemental de ces fonctions peut être obtenu à partir des données de conceptions du constructeur. Ainsi, on peut décrire le comportement d'une fonction comme les états successifs dans lesquels elle se trouve. Ce comportement pourra être modélisé par un système à événements discrets du type réseau de Petri. Nous nous dirigerons donc vers un modèle comportemental plutôt qu'un modèle structurel qui serait basé sur l'architecture du véhicule, le but étant d'être indépendant de l'architecture matérielle en raison de son évolution constante. En outre, l'évolution de la technologie dans le domaine automobile croit fortement depuis ces dernières années, et par conséquent elle s'accompagne de l'apparition continue de nouvelles fautes. C'est pourquoi il est évident que la modélisation de fautes fugitives et intermittentes est impossible, de même que modéliser l'ensemble des fautes dues à l'électronique serait un ensemble non-exhaustif et donc non intéressant du point de vue application. Néanmoins, si un tel modèle de faute existe, il faudra le prendre en compte.

III. ETAT D'AVANCEMENT

L'objectif est donc de surveiller les messages circulant sur le bus et de les comparer à un modèle de bon fonctionnement de la fonction à surveiller.

Le modèle du comportement de la fonction décrit ses différents états. Il est dérivé des modèles utilisés lors de la conception du véhicule. Les réseaux de Petri ont été choisis car ils décrivent bien les synchronisations et les parallélismes et possèdent un formalisme rigoureux. Leur formalisme est également bien adapté pour décrire les mécanismes de détection et de diagnostic. Ensuite, pour qu'une fonction soit réalisée, elle a besoin de nombreuses informations provenant des capteurs, des calculateurs, d'autres fonctions, ... informations qui ne sont pas toutes observables. A priori, seules les informations circulant sur le bus de données seront disponibles. Nous projetons donc notre modèle sur l'ensemble des observables c'est-à-dire des messages circulant sur le bus de communication. Cette projection rend difficile la discrimination des différents états de la fonction. Nous pouvons donc discerner un état ou un groupement d'état. À partir de ce modèle et des informations reçues, nous pourrions déterminer un état (voire un ensemble d'états), et par conséquent connaître les événements précédents et les événements que l'on est supposés attendre.

La deuxième étape a consisté à formaliser le mécanisme de détection. Ce mécanisme explicite la détection d'un événement incohérent avec l'ensemble des événements attendus par le modèle que l'on a fait du système. L'événement ainsi détecté ne correspond pas nécessairement à l'événement

issu d'une défaillance. En effet, l'événement issu de la défaillance est susceptible de faire évoluer le modèle dans une autre trajectoire avant de détecter une incohérence. Ainsi, la détection d'une incohérence ne se produira qu'après avoir reçu un certain nombre d'événements. Nous supposons donc que l'événement reçu n'est pas vrai tant qu'il n'y a pas eu confirmation de la part des événements suivants. Pour cela, nous avons établi une fenêtre d'événements qui correspond aux événements reçus et non confirmés. La longueur de cette fenêtre est calculé dans un premier temps de façon hors-ligne pour chaque marquage. En ligne, cette fenêtre dépend de la longueur de la fenêtre à l'instant k et du marquage dans laquelle la fonction se trouve mais aussi dans lesquels elle se trouvait aux instants précédents.

Dans une troisième étape, après détection d'une incohérence, nous utilisons cette fenêtre d'événements pour déterminer si l'insertion ou l'absence d'un événement peut expliquer l'incohérence observée. Pour cela, nous supprimons un événement de la fenêtre et nous regardons si la nouvelle séquence obtenue (incluant l'événement incohérent) est cohérente avec une trajectoire du modèle. Nous regardons ainsi si l'insertion d'un événement n'a pas fait évoluer le marquage dans une autre trajectoire du modèle. Pour regarder si un événement est susceptible d'être absent, nous allons insérer entre chaque événement de notre fenêtre un événement qui correspondrait à cet événement absent et nous allons vérifier si la nouvelle séquence obtenue (incluant l'événement incohérent) est cohérente avec une trajectoire du modèle. Les événements de la fenêtre correspondent aux événements reçus mais également aux événements attendus par le marquage dans lequel le modèle se trouvait lors de la réception de ces événements. L'événement que l'on insère correspond donc aux autres événements de ces différents marquages, évitant ainsi d'insérer l'ensemble des événements du modèle. Nous réduisons ainsi l'ensemble des événements que l'on insère aux événements qui, par leur absence, ont une influence sur l'évolution du marquage. Les nouvelles séquences cohérentes avec le modèle fournissent une explication possible à l'incohérence observée. Trouver une explication possible, c'est mettre en cause l'intégrité d'un événement et implicitement l'intégrité du composant ou d'un ensemble de composant qui a émis ou pas cet événement. C'est là que se situe notre localisation ou plutôt notre "pré-localisation". Néanmoins, la majeure partie de nos calculs s'effectue en-ligne. Pour une application qui est sensé être appliquée au domaine embarqué, cela semble contradictoire. C'est pourquoi, actuellement nous travaillons sur une approche qui consiste à prendre en considération l'ensemble des insertions et des absences d'événements possibles et de les représenter dans un modèle. Il nous suffirait de suivre en ligne l'évolution de ce ou ces modèle(s) pour avoir de façon immédiate, lors de la détection, l'ensemble des explications possibles à l'incohérence observée. Pour ce travail, nous nous sommes dirigés vers les approches diagnostiqueurs qui utilisent des modèles de fautes. Ces modèles de fautes sont la représentation d'une ou des défaillance(s) **connue(s)** à travers les observations qui peuvent en découler. En d'autres termes,

un diagnostiqueur est une compilation de l'information de diagnostic dans une structure de données (appelée diagnostiqueur) qui relie efficacement les observations aux fautes lors du diagnostic en ligne. Ces modèles utilisent les automates comme représentation. Comme le passage de nos modèles vers les automates ne nous posait pas de problèmes particuliers car il n'existait pas de synchronisation, nous avons décidé d'utiliser ce formalisme pour étudier cette approche. Nous avons donc établi des modèles de "classe de fautes" i.e. des modèles génériques qui représentent l'insertion ou l'absence d'événement mais contrairement aux diagnostiqueurs, ces fautes ne sont pas "connues". À partir de ces modèles de classes de fautes et du modèle de bon fonctionnement, par une règle simple, en l'occurrence ici un produit synchronisé des automates, et par une transformation simple par la suite, nous obtenons un diagnostiqueur pour chaque classe de faute qui nous permet d'avoir en temps réel, l'ensemble des explications possibles des observations que l'on a reçues.

L'avantage de cette approche est d'avoir tous les calculs faits hors-ligne. La seule contrainte est de faire évoluer nos modèles au fur et à mesure que l'on reçoit des événements. Son inconvénient vient du fait que le produit synchronisé génère un grand nombre d'état ce qui pour un système un peu complexe peut rapidement devenir difficile à maîtriser.

IV. PUBLICATIONS

Auteurs : S.SOLDANI, M.COMBACAU, J.THOMAS, A.SUBIAS

Titre : *Intermittent fault detection through message exchanges : a coherence based approach*

- Rapport LAAS No06080

- 17th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX'06), Burgos (Espagne), 26-28 Juin 2006, pp.251-256

- 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS'2006), Beijing (Chine), 30 Août - 1er Septembre 2006, pp.1549-1554

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

A. Conclusion

Au cours de ces deux années, nous avons commencé par nous approprier le sujet et sa problématique afin de pouvoir fournir une solution adéquate. La modélisation et la formalisation du principe de détection terminées, nous avons pu travailler sur le mécanisme de localisation ou plutôt de pré-localisation. Nous avons axé nos recherches vers différentes voies qui nous donnent des résultats correctes mais qui restent encore insatisfaisant et peuvent être améliorés. Les approches étudiées ont leurs avantages et leurs inconvénients.

La première approche ne nécessite aucune construction de modèle mais demande un certain nombre de calculs en-ligne, ce qui, pour une application dans le domaine des systèmes embarqués, doit être évité. La seconde approche ne nécessite aucun calcul en ligne mais génère un nombre élevé d'états, ce qui peut être problématique pour des systèmes complexes tels que l'on peut en trouver dans l'automobile.

B. Perspectives

C'est pourquoi, nous devons trouver une approche qui concilie à la fois un minimum de calcul en-ligne et qui soit applicable pour des systèmes complexes. Une fois que nous aurons réussi à trouver une telle approche, nous devons étudier le cas de la réinitialisation de notre modèle une fois que le système a détecté une incohérence. Notre modèle devra également être étendu vers des aspects temporels (chien de garde,...). Le problème de l'initialisation (actuellement nous supposons l'état initial connu) de notre modèle sera étudié en parallèle avec la réinitialisation de notre modèle.

REFERENCES

- [1] S. GENC et S. LAFORTUNE. "Distributed Diagnosis of Discrete-Event Systems Using Petri Nets". Dans *ICATPN'03*, pages 316–336, 2003.
- [2] C.N. HADJICOSTIS et G.C. VERGHESE. "Monitoring Discrete Event Systems Using Petri Net Embeddings". Dans *ICATPN'99*, pages 188–207, 1999.
- [3] G. JAKOBSON et M.D. WEISSMAN. "Alarm Correlation". *IEEE Network*, 7(6) :52–59, 1993.
- [4] G. JIROVEANU et R.K. BOEL. "Petri Net Model-based Distributed Diagnosis for Large Interacting Systems". Dans *Proceedings of the 16th International Workshop on Principles of Diagnosis, DX'05*, Monterey, California (USA), June 2005.
- [5] G. LAMPERTI et M. ZANELLA. "Continuous Diagnosis of Discrete-Event Systems". Dans *Proceedings of the 14th International Workshop on Principles of Diagnosis, DX'03*, pages 105–112, Washington D.C. (USA), 2003.
- [6] D. LEFEBVRE et C. DELHERM. "Diagnosis with Causality Relationships and Directed Paths in Petri Net Models". Dans *IFAC World Congress'05*, Prague (Czech Republic), July 2005.
- [7] Y. A. NYGATE. "Event Correlation using Rule and Object Based Techniques". Dans *Proceedings of 4th Symposium on Integrated Network Management*, pages 290–301, Santa Barbara (USA), 1995.
- [8] Y. PENCOLÉ. "Diagnosability Analysis of Distributed Discrete Event Systems". Dans *Proceedings of the 16th European Conference on Artificial Intelligence -ECAI'2004*, pages 43–47, Valencia (Spain), 2004.
- [9] M. SAMPATH, S. LAFORTUNE, et D. TENEKETZIS. "Active Diagnosis of Discrete-Event Systems". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(7) :908–929, 1998.

PUCEL Xavier

Analyses de diagnosticabilité et application aux web-services

Xavier Pucel

Directeur de thèse : Louise Travé-Massuyès

PROBLÉMATIQUE

Comparaison d'approches d'analyse de diagnosticabilité, application aux services web

OBJECTIF DES TRAVAUX

Caractérisation de la diagnosticabilité des services web, et contribution à la la conception de services web diagnosticables.

Les travaux se déroulent dans le cadre du projet WS-DIAMOND ([4]) et se focalisent sur l'analyse de diagnosticabilité dans le projet. L'approche d'analyse de diagnosticabilité doit tenir compte des travaux effectués par les partenaires dans l'établissement de méthodes de diagnostic, afin de fournir une caractérisation de la diagnosticabilité des services web, des méthodes pour son analyse et pour la conception de services web diagnosticables.

CONTEXTE ET POSITIONNEMENT

Les services web sont des systèmes informatiques distribués, dont les composants peuvent appartenir à des personnes morales différentes. Cela entraîne des problèmes de confidentialité, ainsi que d'hétérogénéité des modèles des composants. Un service web implique généralement :

- des serveurs web, hébergeant des applications web ;
- ces applications web communiquent entre elles par le protocole SOAP, le plus souvent encapsulé dans les protocoles HTTP ou HTTPS (HTTP sécurisé) ;
- ces applications offrent des services sous formes de fonctions (dans le sens informatique du terme), leur interface est décrite dans un fichier écrit dans le langage WSDL ;
- les transactions entre ces applications web peuvent être supervisées par des "brokers", qui sont en outre chargés de publier un annuaire des services web surveillés. Cet annuaire est écrit dans le langage UDDI.

Les langages SOAP, WSDL et UDDI sont des langages standards permettant une couche indépendante de la plateforme physique et du protocole sous-jacent, et offrent une grande modularité pour l'ajout de fonctionnalités ou de

services.

Au niveau de l'approche de diagnostic, les services web ont plusieurs aspects particuliers :

- la consommation d'un service web est généralement accompagnée par une transaction commerciale (service physique contre paiement) ;
- l'architecture est orientée service : lorsqu'une application cliente consomme un service auprès d'une application serveur, il se peut que cette dernière soit elle aussi clientes d'autres services web, et ce de manière totalement transparente pour la première application ;
- un service web peut être consommé par de multiples clients en même temps. Cela implique qu'à chaque requête du service reçue par l'application web, le même processus sera instancié, on appelle ce processus un workflow ; toutefois, les différentes instances du processus partagent des variables persistantes (par exemple des statistiques sur la qualité de service). Cet aspect influe fortement sur les modèles convenant aux services web et sur la manière de les construire.

Nous distinguons deux cas de figure, que nous appelons l'orchestration et la chorégraphie. Dans le cas orchestré, le service orchestrateur est client de plusieurs autres services, ces derniers ne communiquent pas entre eux, contrairement au cas chorégraphié.

A cause des contraintes de l'architecture orientée services, nous nous intéressons uniquement à l'orchestrateur et à ses fournisseurs directs. Nous considérons que chaque service web dispose d'un module de diagnostic propre destiné à coopérer avec les autres modules de diagnostic, sans pour autant dévoiler le modèle du service diagnostiqué, ceci afin de respecter les contraintes de privauté du modèle, ainsi que de la possible hétérogénéité. Deux approches de diagnostic sont envisagées par les partenaires européens : une approche à base d'états, et une approche à base d'événements. L'analyse de diagnosticabilité se fera suivant une ou des approches compatibles avec les approches de diagnostic.

ÉTAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

Le workpackage consacré à la diagnosticabilité a débuté en septembre 2006, il n'y a donc pas encore de résultats au sein du projet. Toutefois, la première année de thèse a été mise à profit pour étudier deux approches d'analyse de diagnosticabilité utilisées par les partenaires européens du projet, et les comparer. La première approche, utilisée généralement pour les systèmes continus, est basée états, tandis que la deuxième approche, utilisée généralement pour les systèmes à événements discrets DES, est basée événements. La comparaison a été possible en définissant le concept de signature de faute, existant dans l'approche basée états, pour l'approche DES. Cette comparaison a permis d'établir une équivalence formelle et conceptuelle entre les deux approches, malgré des différences évidentes de résultats en pratique. Ces travaux ouvrent des perspectives pour l'analyse de la diagnosticabilité des systèmes hybrides, et peuvent également être poursuivis dans plusieurs directions :

- la comparaison d'approches décentralisées ou distribuées d'analyse de la diagnosticabilité ;
- la comparaison des définitions de la diagnosticabilité dite faible, moins intéressante d'un point de vue théorique, mais plus utile d'un point de vue pratique.

Dans le cadre du projet, les algorithmes d'analyse de la diagnosticabilité correspondant aux approches de diagnostic retenues seront implémentés. La participation de l'auteur dans le projet consistera en outre en la comparaison et l'intégration de ces deux approches dans un environnement commun, compatible avec le contexte des services web.

PUBLICATIONS

Louise Travé-Massuyès, Marie-Odile Cordier and Xavier Pucel, *Comparing Diagnosability in CS and DES*, Proceedings of IFAC SafeProcess'06

Marie-Odile Cordier, Louise Travé-Massuyès and Xavier Pucel, *Comparing Diagnosability in Continuous and Discrete-Event Systems*, Proceedings of the 17th International Workshop on Principles of Diagnosis DX'06

REFERENCES

[1] L. Ardissono, L. Concole, A. Goy, G.

Petrone, C. Picardi, M. Segnan, and D. T. Dupré, "Cooperative model-based diagnosis of web services," in *Proceedings of the 16th International Workshop on Principles of Diagnosis DX'05*, 2005.

[2] Y. Pencolé, "Diagnosability analysis of distributed discrete event systems," in *Proceedings of the 16th European Conference on Artificial Intelligence, ECAI'2004*, 2004, pp. 43–47.

[3] L. Travé-Massuyès, T. Escobet, and X. Olive, "Model-based diagnosability," *Internal Report LAAS N04080, Janvier 2004, 12p.* to appear in *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Part A*, 2004.

[4] <http://wsdiamond.di.unito.it>

BAYOUDH Mehdi

Active Diagnosis and Reconfiguration for Autonomous Satellites

Mehdi Bayouth and Louise Travé-Massuyès

I. SUBJECT

In the context of autonomy, monitoring and diagnosis tasks are very important. They allow the satellite to check permanently its state, to get required informations in order to guide reconfiguration actions, and to recover lost functionalities, in a reactive way, after a fault occurrence. A previous thesis prepared at LAAS in collaboration with CNES and ASTRIUM was based on the theory of model based logical diagnosis of AI, which was extended with concepts of automatic control to handle hybrid models of the satellite equipments, i.e. models combining discrete and continuous behaviors. This work includes the development of the formalism for modeling, the associated algorithms of hybrid diagnosis and their implementation in the Koala software written in C++. This work proposes a theoretical framework of diagnosis which must be compared to other approaches proposed in the space domain. The objective of the thesis is to lead to an integrated method of diagnosis adapted to the operational architecture of satellites, using realized work. A model of this method will be developed and its validation will be based on case study as well as a set of scenarios representative of the embedded subsystems of a space application provided by Alcatel Alenia Space. An evaluation of the method will be achieved with regard to its ability to be loaded in CPU and its compatibility with the used on-board technology (processor...). Usually, the criterion linked with the anticipated faults is their occurrence probability and the diagnosis scheme performs a research guided by these probabilities and exhibits the most probable faults. In this thesis, we will analyze the possibility of introducing the criterion of fault criticality, which could be very interesting, particularly in a context of autonomy. In addition, it is common that the on-ground operators use active diagnosis, i.e. they apply of commands in order to exhibit symptoms that appear only in certain configurations. In a context of autonomy, it is the module of high level decision, related to the planner, which can consider such actions. Active diagnosis can also be useful when the physical redundancy is not at the level of the sensors but at the level of the actuators, the successive choice of relevant subsets of actuators, can make possible to locate a fault. The reconfiguration aspects must be guided by the properties of diagnosticability of the system, topic on which LAAS has been working these last years. In this thesis, the diagnosability notion will be extended to hybrid systems, and

analyzed using the diagnoser method. When the diagnosed state of the system is ambiguous, an analysis of the diagnoser should allow us to point at reconfiguration actions that safely move the system into a mode reducing ambiguity. Thus, this thesis, proposes the addition of the active diagnosis function to the existing module of diagnosis and it will be concerned with the necessary interfacing with the module of planning.

II. ISSUE TO BE APPROACHED

- To give the definition of hybrid systems diagnosability.
- To abstract the continuous informations in the behavior automaton to perform diagnosis using Discrete Event Systems techniques.
- To give the definition of a hybrid trajectory of the system which represents both continuous and discrete dynamics. Continuous Signatures give only static information.
- To solve the problem of using diagnosability assessment for selecting the best reconfiguration action. This problem goes beyond selecting and applying a discrete action. Indeed physical constraints may require to plan sequence actions and the hybrid nature of the system may call for hybrid control.
- To define the active diagnosis algorithm guided by the diagnosability properties of the system.
- To introduce the criterion of faults criticality to perform the research of possible diagnosis after a fault occurrence.
- To analyze the ability to load diagnosis module in embedded CPU and its compatibility with the used on-board technology.

III. GOAL

- To propose a Hybrid modeling framework for Hybrid state tracking.
- To define the diagnosability of Hybrid Systems and to propose conditions (sufficient/necessary and sufficient).
- To define a framework for analyzing the diagnosability of Hybrid Systems.
- When the diagnosed state of the system is ambiguous, how to use the diagnoser to point at reconfiguration actions that safely move the system into a mode reducing ambiguity.
- To consider the on-line reconfiguration from a novel point of view, aiming at disambiguating the tracked estimated system state and achieving Active Diagnosis.
- To choose the best suited reconfiguration action(s) guided by the system's diagnosability properties.

M. Bayouth is a PhD student in DISCO Research Group in LAAS-CNRS, 7, Avenue du Colonel Roche-31077 Toulouse, France. He is supervised by Louise Travé-Massuyès. {bayouth, louise}@laas.fr.

This work is supported by Alcatel Alenia Space, France.

IV. CONTEXT AND POSITIONING

Embedded Systems found in nowadays satellites and spacecrafts are characterized by a mix of hardware and software components. They hence undergo complex hybrid dynamics. They generally require to use stochastic and/or uncertainty approaches which provide a belief state. In many cases, testing the system in line can be an interesting option to produce a more precise diagnosis. For instance, in the space domain, specific commands are often applied by the ground segment for getting more information about the state of a faulty spacecraft. In context of autonomy, those commands must be applied in an autonomous mode, to improve the current diagnosis, and to perform reconfiguration action in order to pursue the mission of the satellite [1].

V. WORK PROGRESS

The activities conducted during this period are distributed according to the following topics:

A. Model-based active diagnosis approach

After the study of several existing diagnosis approaches, it was decided to root our work in the hybrid model based diagnosis approach. The knowledge representation formalism that we selected is based on hybrid automata [2], which describe discrete evolution between both, nominal and fault modes, and corresponding continuous constraints related to each mode. The set of allowed commands in each anticipated fault mode is taken into account in the model, and can be used for active diagnosis. The continuous knowledge is abstracted in terms of events associated to the fault indicators. Fault indicators can be obtained from Analytic Redundancy Relations (as defined in the FDI community) or other fault detectors existing on the equipments.

B. Abstraction of the Continuous Dynamics in the Behavior Automaton

Relying on recent work establishing the formal equivalence of diagnosability definitions for Discrete Event systems (DES) and Continuous systems (CS) [3] [4], we propose to abstract the faulty continuous dynamics of the hybrid automaton to produce an enriched discrete automaton that accounts for fault models. Fault models are obtained from fault signatures exhibited from the continuous dynamics constraints that are interpreted in terms of events. Therefore, continuous and discrete knowledge are put together in a resulting Behavior Automaton, which allows us to analyze the diagnosability of the hybrid system by using DES criteria [5].

C. Hybrid Diagnosability Analysis

We defined the new concepts of *Mirror Mode Signature* and *Mode Signatures*. Thanks to this concept diagnosability of *Multimode Systems*, can be analyzed, and diagnosability criteria are given. This concept allows us to obtain discrete event fault models from the continuous dynamics abstracted in the parity space (in the case of linear systems [6]) and interpreted in terms of events.

Sufficient conditions for hybrid diagnosability based on the analysis of the underlying continuous system *the multimode system* on one hand, or the underlying discrete system on the other hand, have been derived. Then, a necessary and sufficient condition has been proposed, based on the Behavior Automaton. This condition can be phrased using the diagnoser (used by the DES community [7][8]), which is a deterministic finite state machine built from the discrete system model (the Behavior Automaton in our approach), as follows:

- The non-observable events are discarded (only the observable events are represented).
- States are labeled with fault information.

D. Active Diagnosis

Diagnosability results are used to decide in which configuration the system must be put to improve diagnosability and hence refine a current ambiguous diagnosis. This is called active diagnosis [9]. When the state of the system is ambiguous, an analysis of the diagnoser allows us to point at the reconfiguration actions that (safely) move the system into a reduced ambiguity mode.

E. Main achievements/results/innovations

- Sufficient conditions for hybrid diagnosability based on the analysis of the underlying continuous system on one hand, or the underlying discrete system on the other hand [10].
- Conditions (sufficient /necessary and sufficient) for the diagnosability of multimode systems and for hybrid systems[10] [11].
- A method to analyze hybrid systems diagnosability based on abstracting the continuous dynamics and using the DES diagnoser.
- The principles of a method to use hybrid diagnosability analysis to perform active diagnosis.
- A Matlab algorithm to compute the Analytic Redundancy Relations (ARRs) for linear systems, for both static and dynamic redundancy cases.

The obtained results are new. They improve the understanding of hybrid systems diagnosability and give rise to a new method for active diagnosis [5] [11].

F. Publications

M. Bayouh and L. Travé-Massuyès, “Définition d’un formalisme hybride pour l’étude de la diagnosticabilité des systèmes hybrides définition et conditions suffisantes de la diagnosticabilité,” in *Internal Report LAAS N06675*, Toulouse, 2006.

M. Bayouh, L. Travé-Massuyès, and X. Olive, “Hybrid systems diagnosability by abstracting faulty continuous dynamics,” in *Proceedings of the 17th International Workshop on Principles of Diagnosis DX’06*, Burgos, Spain, 2006, pp. 9–15.

M. Bayouh, L. Travé-Massuyès, and X. Olive, “Hybrid systems diagnosability from a discrete event abstraction of multimode parity space,” in *Internal Report LAAS, Submitted*

to the European Control Conference 2007 (ECC'07), KOS, Greece, 2007.

REFERENCES

- [1] B. C. Williams and P. P. Nayak, "A model-based approach to reactive self-configuring systems," in *Workshop on Logic-Based Artificial Intelligence, Washington, DC*, J. Minker, Ed. College Park, Maryland: Computer Science Department, University of Maryland, 1999. [Online]. Available: citeseer.ist.psu.edu/williams96modelbased.html
- [2] M. Hofbauer and B. Williams, "Hybrid estimation of complex systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B.*, vol. 34, no. 5, pp. 2178–2191, 2004.
- [3] M. Cordier, L. Travé-Massuyès, and X. Pucel, "Comparing diagnosability criterions in continuous systems and discrete events systems," in *Proceedings of the 17th International Workshop on Principles of Diagnosis DX'06*, Burgos, Spain, 2006.
- [4] L. Travé-Massuyès, T. Escobet, S. Spanache, and X. Olive, "Diagnosability analysis based on component supported analytical redundancy relations," *Rapport LAAS N04080, To appear in IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, 2004.
- [5] M. Bayouhd, L. Travé-Massuyès, and X. Olive, "Hybrid systems diagnosability by abstracting faulty continuous dynamics," in *Proceedings of the 17th International Workshop on Principles of Diagnosis DX'06*, Burgos, Spain, 2006, pp. 9–15.
- [6] V. Cocquempot, T. E. Mezyani, and M. Staroswiecki, "Fault detection and isolation for hybrid systems using structured parity residuals," *IEEE/IFAC-ASCC: Asian Control Conference*, Jul 2004.
- [7] M. Sampath, R. Sengputa, S. Lafortune, K. Sinnamohideen, and D. Teneketsis, "Diagnosability of discrete-event systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 40, pp. 1555–1575, 1995.
- [8] Y. Pencolé, "Diagnosability analysis of distributed discrete event systems," in *Proceedings of the 16th European Conference on Artificial Intelligence, ECAI'2004*, 2004, pp. 43–47.
- [9] M. Sampath, S. Lafortune, , and D. Teneketzis, "Active diagnosis of discrete-event systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 43, 1998.
- [10] M. Bayouhd and L. Travé-Massuyès, "Définition d'un formalisme hybride pour l'étude de la diagnosticabilité des systèmes hybrides définition et conditions suffisantes de la diagnosticabilité," in *Internal Report LAAS N06675*, Toulouse, 2006.
- [11] M. Bayouhd, L. Travé-Massuyès, and X. Olive, "Hybrid systems diagnosability from a discrete event abstraction of multimode parity space," in *Internal Report LAAS. Submitted to the European Control Conference 2007 (ECC'07)*, KOS, Greece, 2007.

PERROT Fabien

Diagnostic et reconfiguration embarqués

Fabien Perrot et Louise Travé-Massuyès

I. PROBLÉMATIQUE

L'importance des tâches de surveillance et diagnostic qui dotent en permanence un satellite d'une conscience de son état, en termes de modes de ses sous-systèmes et composants ainsi que de la tâche de reconfiguration qui doit lui permettre de manière réactive de retourner dans un état nominal suite à l'occurrence d'une faute ne sont plus à démontrer dans un contexte d'autonomie. Une précédente thèse effectuée au LAAS s'est basée sur la théorie du diagnostic logique à base de modèles de l'IA qui a été étendue avec des concepts d'automatique pour traiter des modèles hybrides des équipements d'un satellite, c'est-à-dire des modèles appréhendant à la fois les aspects discrets et continus de leur comportement. Le travail effectué comprend la mise au point du formalisme de modélisation, les algorithmes de diagnostic hybride associés et leur implémentation, de même qu'une étude concernant la reconfiguration à base de modèles [1] [2]. Cependant le travail n'est pas directement applicable sur un démonstrateur de satellite autonome. Il n'a pas non plus été mené en tenant compte des interactions avec une architecture décisionnelle qui peut utiliser les informations de diagnostic mises à sa disposition. Cette thèse porte donc sur l'adaptation du système de diagnostic à l'architecture décisionnelle de FDIR avec ses spécificités :

- hiérarchisation,
- reconfiguration y compris au niveau de la planification mission,
- niveaux de criticité associés aux pannes.

Les algorithmes doivent également être adaptés aux contraintes sur le temps de réaction et sur la ressource mémoire disponible à bord.

II. OBJECTIFS

- Recherche des principes de diagnostic les plus adaptés à l'architecture d'autonomie choisie, liens entre le diagnostic et la reconfiguration, les différents niveaux décisionnels de FDIR, les stratégies de reconfiguration en fonction de la criticité.
- Mise au point d'algorithmes de diagnostic embarquables répondant aux stratégies définies dans la première étape et pouvant s'intégrer dans une architecture pour l'autonomie.
- Intégration et test des algorithmes dans l'environnement d'un démonstrateur fourni par le CNES et l'ONERA.

III. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT

Cette thèse se place dans le cadre du programme AGATA de développement d'un démonstrateur de satellite autonome.

Des études sont menées à la fois sur la définition d'une architecture des logiciels embarqués qui permettent d'accroître l'autonomie des engins, et sur la cohérence des modèles utilisés au sein de ces composants logiciels.

En effet, ces nouvelles applications (telles que la planification, le diagnostic ou le contrôle d'exécution) s'appuient sur une connaissance de l'état du système et de son comportement. Cette connaissance est représentée par un modèle : lois d'évolution, caractéristiques physiques, automates d'états, ...

Les différents mécanismes de raisonnement se basent sur des types de modèles différents, aussi bien du point de vue des informations contenues que du choix d'une représentation. Ainsi, un modèle pour un planificateur comprend la liste des activités réalisables par le satellite et pour chaque activité : sa durée, ses besoins en ressources, les préconditions nécessaires pour appliquer l'activité, ses effets, etc. Il peut utiliser une représentation basée sur la logique propositionnelle, sur la logique du premier ordre, ...

Un modèle pour un système de diagnostic décrit les états possibles des composants, y compris les états de panne ainsi que les lois d'évolution nominales. Il peut utiliser par exemple une représentation basée sur des automates à contraintes.

Ces modèles partagent cependant des données communes avec des représentations différentes. Un même mécanisme de raisonnement peut également être utilisé à des niveaux d'abstraction différents. Les données contenues dans un modèle sont alors des abstractions des données contenues dans un modèle d'un autre niveau.

Dans le cadre d'un engin autonome qui requiert la collaboration de plusieurs mécanismes de raisonnement sur différents niveaux d'abstraction, on doit assurer la cohérence de l'ensemble des modèles. Des travaux sont menés conjointement par le CNES, le LAAS et l'ONERA pour :

- identifier les besoins de représentation du système aux différents niveaux de décision,
- définir les formalismes les mieux adaptés pour modéliser cette connaissance,
- déterminer la meilleure façon de garantir la cohérence globale des modèles,
- préciser les possibilités de passage d'un modèle à un autre.

Un des objectifs serait de définir un formalisme commun permettant de représenter formellement des passerelles entre les différents modèles afin de faciliter la validation globale du système.

IV. ÉTAT DES TRAVAUX

A. Travail bibliographique

La première partie du travail a été bibliographique. Elle concernait principalement les principes du diagnostic logique à base de modèles de l'IA, les systèmes hybrides [3] ainsi que les théories de l'abstraction utilisées dans les communautés du diagnostic [4], de la planification [5], de la vérification de programmes [6], et des réseaux de contraintes [7].

B. Travail spécifique au projet AGATA

L'étude de l'état de l'art concernant les architectures pour l'autonomie ainsi que les modèles utilisés dans ces architectures a donné lieu à un rapport dans le cadre du projet AGATA [8]. En parallèle, l'étude du satellite d'observation de la Terre Frankie ainsi que sa modélisation suivant plusieurs formalismes (systèmes de transitions hybrides, automates à contraintes, ...) a été menée [9].

C. Travail sur le diagnostic hiérarchique

Le diagnostic hiérarchique est un processus qui utilise plusieurs modèles d'un même système pour raisonner. Les liens entre ces différents modèles peuvent être formalisés à l'aide du concept d'abstraction. Plusieurs théories de l'abstraction ont été développées. Les définitions et propriétés qui suivent sont empruntées à la théorie sémantique des abstractions présentées dans [4].

La théorie sémantique des abstractions part du principe que la représentation des connaissances utilise des formules d'un certain langage qui capturent un « intended domain model ». Une abstraction est vue comme un processus en deux étapes : premièrement le « intended domain model » est abstrait et deuxièmement les formules qui capturent ce « domain model » abstrait sont construites. Cette théorie est suffisamment générale pour pouvoir être utilisée dans le cadre du diagnostic car elle s'applique à tout langage avec une sémantique déclarative comme la logique propositionnelle, la logique des prédicats, la logique modale, ...

Plus formellement, la théorie sémantique des abstractions repose sur les notions d'*application entre ensembles d'interprétations* et d'*abstraction MI* qui sont définies comme suit :

Définition 1 (Application entre interprétations): Soit deux théories T_0 et T_1 . Une application entre ensembles d'interprétations π associe à toute interprétation de T_0 une interprétation de T_1 .

Définition 2 (Model Increasing Abstraction): Une théorie T_1 est une abstraction MI (par rapport à π) d'une théorie T_0 ssi tout modèle de T_0 auquel on applique π est un modèle de T_1 .

Deux propriétés intéressantes en découlent :

Théorème 1 (Insatisfiabilité): Soit T_1 une abstraction MI de T_0 . Si T_1 est insatisfiable, alors T_0 est insatisfiable.

Théorème 2 (Compositionnalité): Soit T_1 et T_1' des abstractions MI respectives de T_0 et T_0' . $T_1 \cup T_1'$ est une abstraction MI de $T_0 \cup T_0'$.

En utilisant cet outil qu'est la théorie sémantique des abstractions, l'approche du diagnostic hiérarchique consiste

à résoudre le problème de diagnostic le plus abstrait et à se servir des résultats pour accélérer la résolution des problèmes moins abstraits.

Une telle approche possède plusieurs avantages :

- le raisonnement peut être stoppé au niveau d'abstraction adéquat : temps disponible limité, pas d'information supplémentaire au niveau inférieur, ...
- la recherche des solutions est accélérée si les abstractions sont bien choisies,
- les liens entre les modèles sont clairement explicités, ce qui permet d'assurer une certaine forme de cohérence.
- cette technique est indépendante des algorithmes de diagnostic à un niveau d'abstraction donné.

La construction de ces abstractions reste un problème ouvert. Une des pistes que nous envisageons s'inspire du travail de [10] qui consiste à regrouper les modes des composants pour construire des modèles abstraits et cela sans perdre d'information utile au diagnostic ; mais nous pensons plutôt définir des regroupements de composants pertinents afin de construire une hiérarchie de modèles hors-ligne.

REFERENCES

- [1] E. Benazera, L. Travé-Massuyès, and P. Dague, "State tracking of uncertain hybrid concurrent systems," in *Proceedings of the Thirteenth International Workshop on Principles of Diagnosis*, 2002, pp. 106–114. [Online]. Available : citeseer.comp.nus.edu.sg/557013.html
- [2] E. Benazera and L. Trave-Massuyes, "Identifying model-based reconfiguration goals through functional deficiencies." [Online]. Available : citeseer.ist.psu.edu/benazera04identifying.html
- [3] T. Henzinger, "The theory of hybrid automata," in *Proceedings of the 11th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS '96)*, New Brunswick, New Jersey, 1996, pp. 278–292. [Online]. Available : citeseer.ist.psu.edu/henzinger96theory.html
- [4] P. Nayak and A. Levy, "A semantic theory of abstractions," in *Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, C. Mellish, Ed. San Francisco : Morgan Kaufmann, 1995, pp. 196–203. [Online]. Available : citeseer.ist.psu.edu/nayak94semantic.html
- [5] C. A. Knoblock, "An analysis of ABSTRIPS," in *Artificial Intelligence Planning Systems : Proceedings of the First International Conference (AIPS 92)*, J. Hendler, Ed. College Park, Maryland, USA : Morgan Kaufmann, 1992, pp. 126–135. [Online]. Available : citeseer.ist.psu.edu/knoblock92analysis.html
- [6] F. Giunchiglia and T. Walsh, "A theory of abstraction," *Artificial Intelligence*, vol. 57, no. 2-3, pp. 323–389, 1992. [Online]. Available : citeseer.ist.psu.edu/article/giunchiglia92theory.html
- [7] C. Lecoutre, S. Merchez, F. Boussemart, and E. Grégoire, "A CSP abstraction framework," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1864, pp. 164–??, 2000. [Online]. Available : citeseer.ist.psu.edu/lecoutre00csp.html
- [8] F. Py, F. Perrot, Y. Pencolé, A. Orlandini, L. Travé-Massuyès, and F. Ingrand, "Projet agata. rapport de synthèse sur l'activité : études et définitions de modèles," LAAS/CNRS, Tech. Rep., 2006.
- [9] S. Lemai, F. Py, F. Perrot, A. Orlandini, and G. Verfaillie, "Exemple de satellite d'observation de la terre simplifié - entrées pour l'élaboration de modèles de planification, contrôle d'exécution et diagnostic," LAAS/CNRS, Tech. Rep., 2006.
- [10] G. Torta and P. Torasso, "Qualitative domain abstractions for time-varying systems : an approach based on reusable abstraction fragments," in *Proc 17th Workshop on Principle of Diagnosis (DX 06)*, June 2006.

RESSENCOURT Hervé

Diagnostic à base de modèles: collaboration multi-modèles pour la génération automatique de séquences de tests

Hervé Ressencourt

Directrice de thèse : Louise Travé-Massuyès

Encadrant ACTIA : Jérôme Thomas

I. PROBLÉMATIQUE

Le diagnostic est de nos jours un élément clef pour accroître la productivité et la disponibilité des systèmes complexes. C'est un thème de recherche très actif dans le domaine de l'Automatique comme dans celui de l'Intelligence Artificielle, ainsi qu'au carrefour de ces domaines. Le problème qui nous préoccupe est lié à l'automobile et plus particulièrement à la réparation en garage qui, en raison de la part croissante de l'électronique et de la multiplication des fonctionnalités embarquées, ne peut plus se réaliser sans outils d'aide au diagnostic.

La recherche de panne en garage se réalise par l'observation du système en divers points de mesure et avec la connaissance disponible sur le fonctionnement du véhicule. Pour identifier une faute de manière efficace, il est nécessaire de tirer profit de toute l'information contenu dans une observation (symptôme client, mesure physique, appréciation qualitative).

II. OBJECTIF

Le sujet de cette thèse s'intègre dans le cadre d'une convention CIFRE entre le LAAS et la société ACTIA qui se sont regroupés, avec l'IRIT, au sein du laboratoire commun *Autodiag*. L'objectif du travail de recherche consiste à mettre en œuvre une méthode à base de modèles de conception qui permette d'identifier le plus efficacement possible un composant défaillant en proposant au garagiste une séquence de tests optimale. Le critère d'optimalité doit prendre en compte le coût de réalisation de chaque test et d'autres éléments tels que la probabilité de défaillance de chaque composant ou des critères discriminants. Les tests à générer doivent pouvoir être de différente nature : mesures physiques à exécuter sur le véhicule (tension électrique, intensité, résistance équivalente), observations plus qualitative sur le comportement d'une fonction véhicule (bruit de claquement d'un relais électrique, perceptions visuelles) ou autre.

III. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT

A. Complexité des systèmes embarqués

Comportement hybrides: On appelle systèmes dynamiques hybrides, des systèmes qui font intervenir des dynamiques continues et des dynamiques discrètes. Un composant physique peut avoir, dans ce sens, un comportement à caractère hybride dans la mesure où son modèle inclut plusieurs modes décrivant les contextes opératoires. Un tel

modèle peut être représenté sous la forme d'un automate hybride. Les états de l'automate représentent les modes du composant et sont caractérisés par un ensemble de variables et de paramètres, un ensemble d'équations de comportement et une instanciation des paramètres. Les transitions peuvent être autonomes (ex: commutation d'une diode, fusion d'un fusible) ou commandée par une intervention humaine (commandes du tableau de bord du véhicule) ou par un composant logiciel (relais électrique).

Pour un système constitué de composants, les combinaisons possibles des différents modes des composants donnent lieu aux différents modes du système nommés aussi "configurations".

Complexité fonctionnelle et structurelle: La complexité des systèmes embarqués est marquée par l'interaction entre composants matériels, qui mettent en jeu des phénomènes physiques multiples, et composants logiciels qui sont implémentés dans les ECUs. L'utilisation massive d'ECUs et des architectures multiplexées a eu les conséquences suivantes sur l'architecture matérielle et fonctionnelle:

- simplification du cablage électrique.
- partage des informations via le réseau multiplexé.
- partage des équipements.

Ainsi, un même capteur peut être utilisé par plusieurs fonctions du fait que la donnée mesurée est diffusée sur le réseau CAN. La défaillance d'un capteur peut donc entraîner la défaillance de plusieurs fonctions.

B. Les mesures réalisables en garage

Trois types de mesures peuvent être réalisées en garage:

- Les mesures électriques sont en général réalisées avec un multimètre classique. Lorsqu'il est nécessaire de visualiser des signaux dynamiques, certains garagistes disposent d'une interface de mesure, qui reliée à un ordinateur, s'utilise comme un oscilloscope.
- Certaines données enregistrées ou mesurées par les ECUs sont accessibles lorsque le garagiste connecte l'outil de diagnostic au véhicule
- Les mesures sensorielles sont également des informations intéressantes à prendre en compte pour identifier le composant défaillants. Dans ces mesures, on y inclut les observations faites par le garagiste et les symptômes rapportés par le client.

C. Travaux antérieurs

Ce travail de recherche fait suite à deux thèses dans ce domaine. La première [4] aboutit à une méthode opérationnelle, nommée AGENDA (Automatic GENération of DiAgnosis trees), permettant de générer automatiquement des arbres de diagnostic à partir des données de conception fournies par les constructeurs automobiles. La solution proposée est basée sur des modèles de fautes ensemblistes et un algorithme de recherche heuristique de type AO* pour générer un arbre de diagnostic optimal. Cette optimalité tient compte de coûts dynamiques pour les tests.

Dans la deuxième thèse [8], la méthode AGENDA a été étendue afin de prendre en compte des systèmes à plusieurs modes de fonctionnement (systèmes hybrides). Une méthode d'isolation de fautes qualitative à base de cohérence a également été développée dans le but de prendre en compte les fautes de déviation ; ces dernières, non prises en compte dans AGENDA, se traduisent par un échec lors du parcours de l'arbre de diagnostic. Cette approche permet également de réaliser une session de diagnostic interactif où on laisse la possibilité au garagiste de refuser un test non réalisable.

Ces outils permettent de générer automatiquement des séquences de tests sur un circuit électrique. Cependant, la complexité accrue des architectures embarquées ainsi que les interactions entre les différentes fonctions du véhicule font que la méthode AGENDA ne peut être directement exécutée.

D. Positionnement du travail

Afin de tenir compte des différentes contraintes liées au diagnostic en garage ainsi que de la complexité des systèmes embarqués, nous avons choisi d'orienter nos travaux suivant plusieurs points:

Réalisation d'un diagnostic multi-modèle: La complexité du système à diagnostiquer et l'hétérogénéité des connaissances disponibles sur les véhicules incite à utiliser plusieurs types de modèles et notamment des modèles fonctionnels. Ces modèles, organisés de manière hiérarchique, ont plusieurs objectifs:

- réaliser des abstractions afin de simplifier le raisonnement.
- prendre en compte tous les types de mesures dans la phase de diagnostic. La hiérarchie permettra notamment d'associer un symptôme de haut niveau au comportement d'un composant matériel.
- avoir un raisonnement pouvant porter également sur les fonctions du véhicule.

Anticipation des fautes: La méthode AGENDA a permis de montrer que l'anticipation des fautes permet d'augmenter notablement l'efficacité du diagnostic. Nous souhaitons donc conserver ce cadre en l'étendant à la problématique multi-modèle et au cas des systèmes hybrides.

Choix du prochain meilleur test: Le problème d'isolation des fautes se rapporte à un problème de test où l'idée est de déterminer l'information additionnelle qui permettra de discriminer au mieux, et à coût minimal, les hypothèses de diagnostic obtenues avec les symptômes déjà présents. Le

choix des tests se fera suivant un critère de choix du prochain meilleur test.

IV. ETAT DES TRAVAUX

Les travaux qui ont été actuellement réalisés se sont essentiellement concentrés sur les deux premiers points exposés dans le paragraphe précédent car le problème de modélisation et de représentation des connaissances est le point névralgique de notre problème de diagnostic.

A. Réalisation d'un diagnostic multi-modèle

Etat de l'art du raisonnement multi-modèle: Dans la littérature, les modèles fonctionnels sont présentés comme une alternative aux modèles comportementaux. Nous avons donc fait, au cours d'une première phase, un état de l'art des différentes approches. Les approches sont nombreuses et les articles que nous avons mentionnés ici n'en sont qu'un bref aperçu [3] [5] [2] [9] [7] [6]. La plupart des auteurs s'accordent toutefois à dire qu'un modèle fonctionnel doit faire le lien entre le comportement physique du système et le but pour lequel le système a été conçu.

L'approche multi-modèle a été développée en particulier dans les travaux de Chittaro [3] pour réaliser ce lien. Elle considère qu'une tâche de raisonnement peut être réalisée suivant une coopération de plusieurs modèles dans différents types de connaissances possibles. Quatre types épistémologiques sont ainsi définis:

- La *connaissance structurelle* porte sur la topologie du système.
- La *connaissance comportementale* décrit les propriétés internes de chaque composant structurel en terme d'équations physiques, d'équations logiques ou de machines à états finis. Concernant les aspects hybrides, ceux-ci sont modélisés par des machines à états hybrides.
- La *connaissance fonctionnelle* décrit comment le comportement individuel des composants contribue à la réalisation des fonctions prévues par le concepteur du système.
- La *connaissance téléologique* spécifie les fonctions du système en terme de buts qui lui ont été assignés par son concepteur.

Définitions des concepts de base de l'approche: Pour modéliser nos systèmes embarqués, nous avons retenu l'approche de Chittaro [3] car elle apporte un cadre conceptuel relativement complet pour modéliser des systèmes réels. Le modèle téléologique permet notamment d'associer un symptôme client à une ou plusieurs fonctions du véhicule. Cependant, la méthode ne s'applique qu'à des systèmes physiques continus. Pour prendre en compte des systèmes hybrides contrôlés par des ECUs, nous avons décliné le modèle fonctionnel en trois sous-modèles:

- Le *Modèle Causal* : pour les systèmes physiques, les relations causales peuvent être déduites automatiquement à partir des équations de comportement par une méthode d'ordonnement causal [10]. Celles-ci représentent

les liens d'influence existant entre les différentes variables du système. Lorsque le comportement est hybride, un modèle causal est généré pour chaque mode opératoire (ou configuration) et est étiqueté en fonction du mode opératoire qu'il représente.

- Le Modèle des Processus : Le modèle des processus représente l'ensemble des processus physiques et logiciels qui sont en jeu dans la réalisation de la fonction. Un processus physique correspond à un seul domaine de la physique. Les processus physiques sont liés aux chemins existant dans les graphes causaux. Les processus logiciels sont liés à l'automate qui active les différents modes opératoires en fonction de la configuration du véhicule et de sa dynamique. L'activité d'un processus est testée à partir de prédicats logiques portant sur ses entrées et sur ses sorties qui sont appelées, respectivement, pré-conditions et effets.
- Le Modèle des Phénomènes : Le modèle des phénomènes agrège un ensemble de processus entre lesquels il existe des relations d'influence. Comme pour les processus, un phénomène est testé à partir de l'état de ses pré-conditions et de ses effets.

Abstractions du comportement par les prédicats logiques:

Les niveaux processus, phénomènes et téléologiques sont décrits suivant un sens causal; chaque objet de ces niveaux est décrit suivant un sens du type Entrée/Sortie. Le comportement des variables d'entrée et de sortie de ces objets sont abstraits par un ensemble de formules de la logique des prédicats que forment les *pré-conditions* et les *effets*. Pour les aspects statiques continus, ces prédicats logiques se présentent sous forme d'inégalités.

Pour les systèmes à événements discrets, le comportement peut faire apparaître des aspects séquentiels qui ne peuvent être abstraits par les opérateurs logiques classiques. Ces aspects séquentiels peuvent toutefois apparaître dans la description des fonctions du modèle téléologique car l'effet d'une fonction, c'est à dire le résultat devant être observé si la fonction est activée, peut être une séquence d'actions ou d'épisodes. Pour abstraire ce type de comportement, Bell et Snooke [1] utilisent des opérateurs de la logique temporelle.

B. Anticipation des fautes

Génération d'une matrice de signature de fautes : Un test est représenté par le quintuplet {Enoncé du test, Type de test, Configuration du véhicule, Variable observée, Modalités}. Comme les fautes sont anticipées, les modalités pour chacun des tests doivent être calculées sous l'occurrence de chacune des fautes. Cette étape était appelée "prédiction" dans la méthode AGENDA et le résultat de cette prédiction sont rassemblés dans une matrice de signature des fautes.

Dans un cadre multi-modèle, les tests réalisables ne sont plus seulement des mesures électriques; nous devons donc ajouter les autres tests disponibles en garage III-B. Par ailleurs, comme des aspects dynamiques interviennent lorsqu'on modélise des fonctions dans leur globalité, il faut envisager des tests dynamiques. La matrice de signature

des fautes sera donc remplie avec des modalités de types différents:

- Sous forme d'*intervalles* pour les mesures physiques réalisées de manière statique (mesure de résistances).
- Sous forme de *courbes de références* pour des mesures physiques réalisées en dynamique.
- Sous forme de *valeurs binaires* pour exprimer les variables booléennes se rapportant au comportement des composants logiciels.
- Sous forme de symptômes clients.

Prédiction automatique à partir des modèles de conception: Les modèles nécessaires au diagnostic sont issus des données de conception. A partir des données sur l'architecture physique du véhicule et sur le comportement de chacun des composants, il est possible de générer directement un modèle structurel et comportemental du système et donc de générer toutes les modalités relatives aux mesures physiques. La hiérarchie multi-modèle permettra d'abstraire la simulation de chaque faute au niveau structurel et comportemental en symptômes perceptibles par l'opérateur humain. Pour que cette abstraction se fasse de manière automatique, il nous reste encore à préciser certains points:

- Automatiser la construction d'une hiérarchie multi-modèle à partir d'un modèle structurel et comportemental.
- Définir clairement et de manière générique les fautes portant sur des composants logiciels.

Implémentation des modèles: Pour implémenter le modèle structurel et comportemental, nous avons choisi d'utiliser le langage Modelica. Celui-ci permet de décrire des systèmes multi-physiques et hybrides. L'autre avantage est qu'il existe un compilateur/simulateur gratuit (OpenModelica). La prochaine phase de notre travail comportera une grande partie de développement centralisée autour de cet outil.

C. Perspectives

Les perspectives pour la prochaine phase sont les suivantes:

- Automatiser la construction de la hiérarchie multi-modèle à partir d'un modèle structurel et comportemental.
- Proposer une modélisation générique des fautes se rapportant aux composants logiciels.
- Développer un prototype concernant l'étape de prédiction des tests dans un cadre multi-modèle.

V. PUBLICATIONS

Auteurs : H. RESSENCOURT, L. TRAVE-MASSUYES, J. THOMAS

Titre : HIERARCHICAL MODELLING AND DIAGNOSIS FOR EMBEDDED SYSTEMS

- Rapport LAAS No06079
- 17th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX06), Burgos (Espagne), 26-28 Juin 2006, pp.235-242

- *6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPRO-CESS2006)*, Beijing (Chine), 30 Août - 1er Septembre 2006, pp.553-558

REFERENCES

- [1] J. BELL N. SNOOKE. "Describing System Functions that Depend on Intermittent and Sequential Behavior". *18th International Workshop on Qualitative Reasoning QR'04*, Evanston, (USA), 2004.
- [2] B. CHANDRASEKARAN. "Functional Representation and Causal Processes". *Advances in Computers*, 38:73–143, 1994.
- [3] L. CHITTARO, G. GUIDA, C. TASSO, E. TOPPANO. "Functional and Teleological Knowledge in the Multimodeling Approach for Reasoning about Physical Systems: A Case Study in Diagnosis". *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23(6):1718–1751, 1993.
- [4] P. P. FAURE. "*An Interval Model-Based Approach for Optimal Diagnosis Tree Generation : Application to the Automotive Domain*". PhD thesis, LAAS-CNRS, 2001.
- [5] Y. KITAMURA, T. SANO, K. NAMBA, R. MIZOGUCHI. "A Functional Concept Ontology and Its Application to Automatic Identification of Functional Structures". *Advanced Engineering Informatics*, 16(2):145–163, 2002.
- [6] M. LIND. "Multilevel Flow Modelling of Process Plant for Diagnosis and Control". *Proc. International Meeting on Thermal Reactor Safety*, 1653–1666, Chicago (USA), 1982.
- [7] M. MODARRES S.W. CHEHON. "Function-Centered Modelling of Engineering Systems Using the Goal Tree-Success Tree Technique and Functional Primitives". *Reliability Engineering and Systems Safety*, 64:181–200, 1999.
- [8] X. OLIVE. "*Approche Intgre Base de Modles pour le Diagnostic Hors-Ligne et la Conception: Application au Domaine de l'Automobile*". PhD thesis, LAAS-CNRS, 2003.
- [9] C. PRICE N. SNOOKE. "Hierarchical Functional Reasoning". *Knowledge Based Systems*, 11:301–309, 1998.
- [10] L. TRAVÉ-MASSUYÈS R. PONS. "Causal Ordering for Multiple Mode Systems". *Proc. of the 11th International Workshop on Qualitative Reasoning QR'97*, 203–214, Cortona (Italia), 1997.

RIBOT Pauline

Diagnostic et pronostic d'un système distribué : application aux systèmes aéronautiques

Doctorante : Pauline Ribot

Directeurs de Thèse : Yannick Pencolé et Michel Combacau

I. PROBLÉMATIQUE

L'efficacité de la maintenance d'équipements aéronautiques est un enjeu économique majeur pour leur exploitation commerciale. Les principales difficultés et sources d'inefficacité résident dans le choix des actions de maintenance. Un mauvais choix peut conduire à une maintenance non satisfaisante et un surcoût. Avec la multiplication des technologies embarquées et les différentes interactions entre composants, la décision d'une action de maintenance est complexe et nécessite un diagnostic préalable. Afin de constituer un diagnostic de maintenance, deux étapes sont nécessaires. La première a lieu en vol par la mise en place d'un système automatique de surveillance en ligne du réseau de composants qui produit un rapport de diagnostic et la deuxième s'effectue au sol par l'analyse de ce rapport et le choix des actions de maintenance.

II. OBJECTIFS DES TRAVAUX

Cette thèse a pour objectifs de développer une architecture de diagnostic et de pronostic pour un système distribué afin d'aider à la maintenance de systèmes complexes. L'application de ce travail de recherche aux systèmes aéronautiques s'inscrit dans le cadre du projet de recherche ARCHISTIC en collaboration avec Airbus (AIRSYS) et l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT).

III. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT

Cette thèse a pour but d'étudier et de concevoir un système de surveillance pour le diagnostic et l'aide à la maintenance d'un réseau de calculateurs embarqués. Le premier objectif est d'étudier les différents types de raisonnement de diagnostic à base de modèle de systèmes à événements discrets afin d'évaluer les techniques les plus adaptées pour le diagnostic d'un système distribué [2][3][4][6]. Le second point porte sur l'évaluation des performances du système de surveillance par une étude de diagnosticabilité [5]. L'originalité de cette étude est dans son objectif qui consiste à établir des recommandations de spécifications pour les composants à surveiller qui, une fois implantées, garantiront un diagnostic compatible avec des actions de maintenance. Le troisième point de ce travail consiste à étendre le raisonnement diagnostic par un raisonnement de pronostic à base de modèle en vue de fournir également une aide à la décision pour la maintenance préventive [1].

IV. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

Nous avons étudié les différents documents qu'Airbus a mis à notre disposition expliquant l'actuel système de surveillance des avions cherchant à aider à la maintenance de l'équipement avionique. Ces documents ont permis de se familiariser avec la terminologie utilisée par l'entreprise. L'équipement avionique est constitué d'unités de ligne remplaçables, les LRU (Line Replaceable Unit). Un LRU est donc un composant qui peut être enlevé et remplacé en ligne par un opérateur de maintenance sur l'avion. Les processus de maintenance actuels des systèmes avioniques font appel aux résultats des BITE (Built-In Test Equipment). Les BITE sont des agents de surveillance qui envoient des messages de statut fonctionnel d'un LRU en temps réel pendant le vol. Ces informations sont ensuite rassemblées par le CMS (Centralized Maintenance System). Ces différentes entités sont illustrées sur la Figure 1.

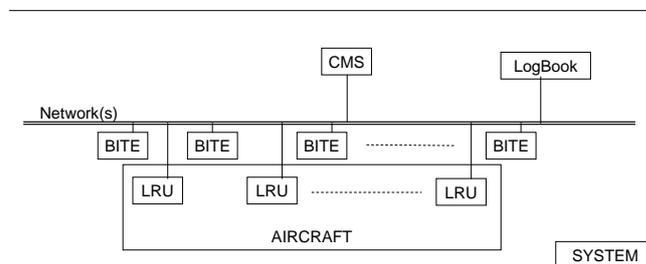


Fig. 1. Système de maintenance de l'avion

Ce système de surveillance possède des limitations. Une future architecture du système doit être envisagée tout en respectant les exigences requises par Airbus et ses sociétés de sous-traitance.

Nous avons ensuite réalisé une étude bibliographique sur les différentes approches pour le pronostic (Archistic Project, WP2 deliverable). Ces approches dépendent de la connaissance que l'on a du système (présence ou absence de capteurs, raisonnement à base de modèle, raisonnement à partir de l'expérience). Les classes de méthodes de pronostic que l'on peut repérer sur la Figure 2 sont celles utilisées pour

classifier les méthodes de diagnostic. Pour une méthode de diagnostic donnée sur un système donné et la connaissance de ce système (présence ou pas de modèle, de capteurs), une méthode de pronostic peut être définie par une extrapolation. À partir des informations données par Airbus, nous ne savons pas encore quelle méthode adopter dans notre cas.

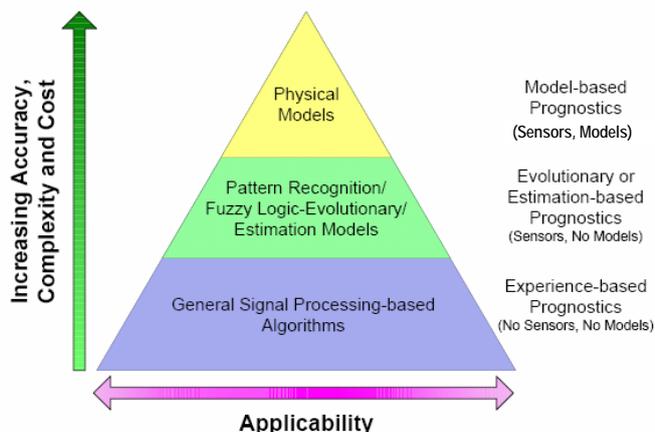


Fig. 2. Classification des approches pour le pronostic

La littérature consacrée au pronostic est encore assez restreinte (surtout dans le cas des systèmes à événements discrets). À notre connaissance, il n'existe pas encore de méthode permettant de réaliser un pronostic sur un ensemble de composants distribués et interagissants. Cette étude peut être utile pour estimer le RUL (Remaining Useful Life) d'un système à l'aide de prédictions sur ses composants. En prédisant le RUL de l'équipement (c'est-à-dire le temps au bout duquel le système ne pourra plus exercer sa fonction avec succès), le pronostic aide l'opérateur à gérer ses ressources de maintenance et recommander des actions appropriées.

V. PUBLICATIONS

- P. Ribot, Y. Pencolé et M. Combacau, Archistic Project, WP2 deliverable, Rapport technique, Airbus.
- P. Ribot, C. Jauberthie et L. Travé-Massuyès, State estimation by interval analysis for a non-linear differential aerospace model, soumis à ECC'07 .

REFERENCES

- [1] C.S. Byington, M.J. Roemer, and T. Galie. Prognostic enhancements to diagnostic systems for improved condition-based maintenance. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, pages 2815–2824, 2002.
- [2] R. Debouk, S. Lafortune, and D. Teneketzis. Coordinated decentralized protocols for failure diagnosis of discrete event systems. In *37th IEEE Conference on Decision and Control*, Tampa, Florida USA, 1998.
- [3] E. Fabre, A. Benveniste, and C. Jard. Distributed diagnosis for large discrete event dynamic systems. In *15th IFAC World Congress on Automatic Control*, Barcelona, July 2002.
- [4] Y. Pencolé and M.-O. Cordier. A formal framework for the decentralised diagnosis of large scale discrete event systems and its application to telecommunication networks. *Artificial Intelligence*, 164 :121–170, 2005.

- [5] M. Sampath, R. Sengupta, S. Lafortune, K. Sinnamohideen, and D. Teneketzis. Diagnosability of discrete event system. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(9) :1555–1575, 1995.
- [6] M. Sampath, R. Sengupta, S. Lafortune, K. Sinnamohideen, and D. Teneketzis. Failure diagnosis using discrete event models. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 4(2) :105–124, March 1996.

DIEZ-LLEDO Eduard

Diagnostic des équipements des moteurs d'avion, vers le pronostic d'une maintenance adaptative

Thésard : Diez-Lledó, Eduard

Responsable de thèse : Aguilar-Martin, Joseph

I. PROBLEMATIQUE

La maintenance des équipements des moteurs d'avion est actuellement réalisée en base aux tests de fiabilité qui fournissent les MTBF (Mean Time Between Failures) de chaque composant. Les opérations correspondantes de maintenance sont programmées en fonction de ces modèles statistiques qui indiquent la probabilité de défaillance d'un composant au bout d'un certain temps d'opération. Le problème de cette maintenance est justement la rigidité et le manque de flexibilité, qui mène à la programmation d'opérations dont le moteur n'a pas besoin ou bien à des défaillances imprévues avant l'opération programmée. Ces deux situations ont des conséquences pour les passagers, comme des retards, des annulations de vols, et aussi sur la sûreté en cas de panne imprévue importante. Toutes ces conséquences ont un effet économique sur les compagnies aériennes.

Les systèmes complexes comme les moteurs d'avion sont de plus en plus composés de sous-systèmes qui maîtrisent et gèrent le système principal. Plusieurs de ces sous-systèmes ont un fonctionnement discontinu car leur contribution au système global est nécessaire dans certaines opérations qui sont intermittentes. Autrement, ces systèmes sont surveillés par des capteurs avec l'objectif de réaliser un diagnostic en ligne. La discontinuité des données fournies par les capteurs aux algorithmes de diagnostic affecte directement leur comportement et efficacité.

En conséquence, la problématique que nous affrontons est liée au diagnostic et à la surveillance propre de ces systèmes, et aussi au pronostic du vieillissement du système qui puisse nous permettre de réaliser une maintenance adaptative.

II. OBJECTIF

Cette Thèse est encadrée dans le projet européen TATEM (Techniques And Technologies for nEw Maintenance concepts). Plus spécifiquement, dans la tâche qui nous correspond, les travaux sont développés sur la surveillance

de systèmes intégrés dans les turbines d'avion. L'objectif des travaux est de réaliser le diagnostic du fonctionnement de l'état actuel des équipements avec une attention spéciale sur les actionneurs qui sont les plus critiques dans le circuit de carburant. Ainsi, non seulement le diagnostic doit être accompli mais aussi le pronostic du système afin de prédire, avec un intervalle de confiance, les possibles états futurs sur lesquels le système peut évoluer. De cette sorte, l'objectif final du projet est le diagnostic du système (health monitoring) et le pronostic du vieillissement critique du système qui permette de programmer une maintenance flexible et adaptative aux vrais besoins du moteur.

III. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT

L'étude de la surveillance est centrée plutôt sur les actionneurs à cause de leur coût dans l'ensemble global du budget de maintenance.

Les travaux ont été d'abord basés sur le diagnostic et l'analyse des paramètres physiques, aussi bien géométriques que dynamiques, et leur influence sur la réponse du système. À partir de cette analyse préliminaire sur un simulateur fourni par une entreprise collaboratrice, on a constaté la dégradation de la réponse par rapport aux fuites internes et externes de l'actionneur comme il avait été prévu. Ensuite, l'étude a continué avec le développement d'un modèle basé sur les équations différentielles qui montrent l'influence des paramètres physiques dans la dynamique du système dont un des paramètres est relatif aux fuites. Les simulations ont montré la relation entre la dégradation de la réponse de l'actionneur et celle du paramètre relatif aux fuites, et donc avec le vieillissement de l'actionneur.

Par conséquence, l'axe de la recherche suivie en ce qui concerne le diagnostic a été l'estimation de paramètres au vu de la relation entre leur changement et la dégradation du système. En plus, il faut signaler la présence d'un comportement hybride dans le système objet de notre étude. Ce comportement tient compte d'un ensemble de sous-modèles qui représentent le système selon le mode de fonctionnement et même les transitoires.

En ce qui concerne le pronostic, l'idée initiale est de

coupler sa démarche à celle de la méthode de diagnostic. De cette façon, la méthode de pronostic peut-être basée sur les données acquises pour le diagnostic du système, car une fois l'état actuel déterminé, ces données peuvent être accumulées et interprétées pour prévoir la probabilité de défaut au long terme. Le positionnement à ce propos a été encadré dans le domaine de la théorie de la fiabilité et les fonctions de fiabilité représentent les outils pour mesurer le vieillissement d'un système. Un autre domaine exploré a été celui de la théorie de l'entropie de l'information, plus concrètement, l'entropie floue. Cette théorie nous fournit un outil de mesure de l'ordre ou du désordre de l'information, qui à son tour est donc représentative de l'ordre ou désordre du système observé. Nous essayons de faire la liaison entre ce concept ordre/désordre et le vieillissement.

IV. ETAT DES TRAVAUX

Identification de systèmes continus

Au cours de la deuxième année de thèse, concernant l'estimation de paramètres, nous nous sommes intéressés à l'estimation de paramètres de systèmes continus. Les méthodes qui nous permettent d'estimer directement les paramètres continus du système sont utilisées dans le diagnostic. Le principal avantage de ces méthodes dans le domaine du diagnostic est la liaison directe entre les paramètres estimés et les paramètres physiques du système. En plus, plusieurs auteurs considèrent ces méthodes très appropriées dans le diagnostic de défaillances lentes autour d'un point de fonctionnement normal. Cette définition de défaillance lente est très proche de ce que nous trouvons dans le vieillissement.

Les méthodes d'identification de systèmes continus peuvent être classées en algorithmes à erreur de sortie et algorithmes à erreur d'équation. Les algorithmes à erreur d'équation utilisent une 'variable instrumentale' qui filtre la sortie du système continu pour en définir ses variables d'état. En fonction du type de variable instrumentale utilisée nous distinguons les méthodes dérivatives et les intégrales. Au moyen de ces méthodes nous avons identifié les différents sous-systèmes qui composent le système hybride total de l'actionneur. L'identification de ces sous-modèles nous permet avoir un modèle plus précis du système au lieu d'un unique modèle plus complexe.

Entropie d'information et entropie floue

La théorie de l'entropie est développée par Shannon (1948) dans le domaine de la communication. Cette théorie a été largement utilisée dans d'autres domaines et il est prouvé

que cette notion est interprétable comme mesure de l'information. En suivant la théorie de Shannon, l'entropie floue est introduite par DeLuca et Termini (1972) dans le domaine des ensembles non probabilistes, tandis que la théorie initiale de Shannon est définie pour les ensembles probabilistes dont la mesure est additive et de somme unitaire.

Pour traiter le problème des systèmes intermittents nous avons utilisé la théorie de l'entropie floue pour évaluer l'information des données de l'historique avec lequel les algorithmes d'estimation travaillent. Les données de l'historique peuvent être insuffisamment informatives ou bien redondantes, affectant ainsi la qualité de la méthode d'estimation. Cet indice d'information de l'historique est utilisé pour allonger ou diminuer la durée de la fenêtre glissante qui détermine la quantité de données stockées. En plus, nous envisageons de l'utiliser pour adapter aussi l'ordre de l'estimateur. La figure ci-dessous montre un exemple d'un système intermittent où l'indice d'information augmente ou diminue en fonction de la dynamique du système lui-même.

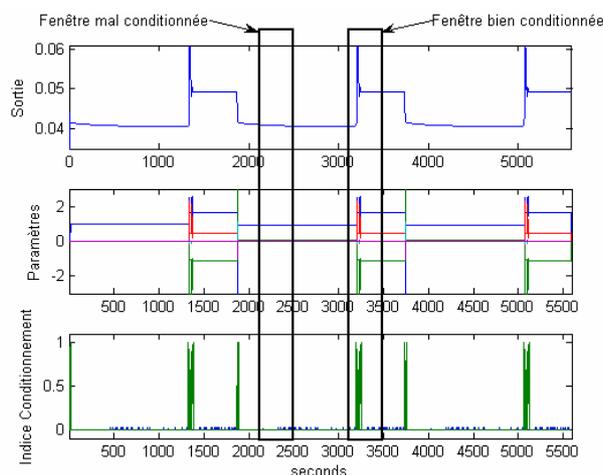


Figure 1 Index de conditionnement dans les systèmes intermittents

Dans le cadre de la prise de décisions lors de la détection de défaillances basée sur les données d'une fenêtre temporelle, nous avons aussi considéré un critère lié à l'entropie floue. L'entropie floue est, dans ce cas, utilisée comme mesure de distance entre un ensemble flou et un ensemble 'crisp' associé. Dans le cadre de la théorie d'aide à la décision le singleton représente l'ensemble le plus fiable (plus ordonné). Yager (1990) et Trillas (2005) avaient déjà défini une distance d'un ensemble flou à leur correspondant singleton. Nous avons modifié les axiomes nécessaires à la proposition d'une autre mesure de distance d'un ensemble flou à son singleton plus appropriée à la situation dans le diagnostic. Dans cette hypothèse, la mesure de distance d'un ensemble flou à son singleton nous fournit un indice de fiabilité de la décision. Ensuite, nous avons aussi proposé une fonction qui accomplit les axiomes introduits. Cette

fonction nous donne une mesure de l'entropie de l'ensemble flou (information dans l'ensemble) comme une mesure de la fiabilité en vue d'une prise de décision. La figure ci-dessous nous montre le cas dichotomique :

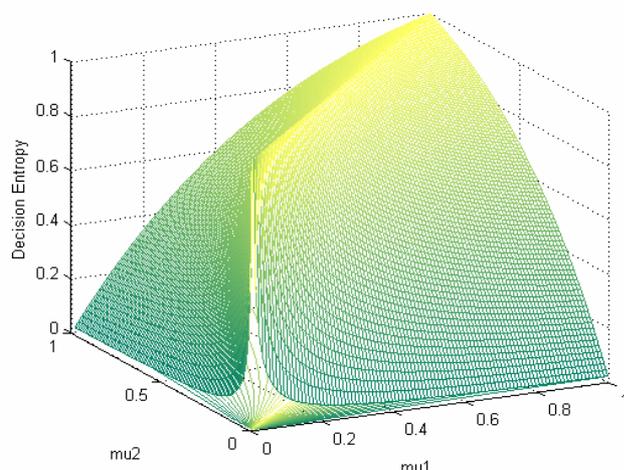


Figure 2 Surface de décision dans les cas dichotomique

Cet indice d'entropie pour la décision a été aussi appliqué dans le cadre de validation de transitions entre états sur le logiciel LAMDA avec de bons résultats par rapport aux fausses alarmes.

V. PUBLICATIONS

E. Diez-Lledó, J. Aguilar-Martin. *Estimateurs adaptatifs de systèmes dynamiques intermittents basés sur l'entropie des données*. Congrès EDSYS, Tarbes 2006.

E. Diez-Lledó, J. Aguilar-Martin. *Proposition of NON-probabilistic entropy as reliability index for decision making*. CCIA, Perpignan 2006.

E. Diez-Lledó, J. Aguilar-Martin. *Modèle flou pour la récupération de données des capteurs avec défaillance : application en temps réel sur la surveillance d'une turbine d'avion*. LFA, Toulouse 2006.

REFERENCES

[1] G. Cullman, M. Denis-Papin, L.-C. Kaufman. *Éléments du calcul informationnel*. ED. Albin Michel, 1960.
 [2] C.E. Shannon. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, vol.27, 379-423, 623-656, July, October 1948.
 [3] A. DeLuca, S. Termini. Entropy of L-fuzzy sets. *Information and control*, 24, pp.55-73 1974
 [4] A. DeLuca, S. Termini. A definition of a non probabilistic entropy in the setting of fuzzy sets theory. *Information and control*, 20, 301-312, 1972.

[5] Trillas E, Sanchis C (1979) On entropies of fuzzy sets deduced from metrics. *Estadística Española* 82-83, pp. 17-25.
 [6] E. Trillas, C. Alsina. Sur les mesures du degré du flou. *Stochastica*, vol.III pp. 81-84, 1979
 [7] Trillas E, Riera T, (1978) Entropies in finite fuzzy sets. *Information Sciences* 15, 2, pp. 159-168.
 [8] N. R. Pal and J. C. Bezdek, Several new classes of measures of fuzziness, *Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Syst.*, 928-933, Mar. 1993.
 [9] Knopfmacher, J. On measures of fuzziness. *Journal of Mathematics Analysis Applications*. 49, 529-534 (1975).
 [10] R. Capocelli, A. DeLuca. Fuzzy sets and decision theory. *Information and control*, 23 pp. 446-473, 1973
 [11] Dinhabandhu Bahandari, Nikhil R. Pal and D. Dutta Majumder. Measurements of discrimination and ambiguity for fuzzy sets. *Electronics and communication science unit. IEEE* 1992
 [12] B. Kosko. Fuzzy entropy and conditioning. *Information Sciences*, vol. 40, pp.165-174, 1986
 [13] C.R. Rao, Diversity and dissimilarity coefficients: A unified approach. *Theor. Popul. Biol.* 21, 24-43 (1982)
 [14] Botta-Dukat, Zoltan. Rao's quadratic entropy as a measure of functional diversity based on multiple traits. *Journal of vegetation science* 16, 533-540 (2005)
 [15] S.Simani, C.Fantuzzi, S.Beghelli. Identification and fault diagnosis of nonlinear dynamic process using hybrid models. 39th IEEE Conference on Decision and control. p.2621, December 2000
 [16] S.Simani, R.J.Patton. Fault diagnosis of non-linear dynamic processes using identified hybrid models. Conference on Decision and Control, p.445, December 2003
 [17] C. Fantuzzi, S. Simani, S. Beghelli, R. Rovatti. Identification of piecewise affine models in noisy environment. *International Journal of control*, vol. 75, no.18, p.1472-1485, 2002
 [18] P. Coirault, J.C. Trigeassou, J.P. Gaubert, G. Champenois. Parameter estimation of an induction machine using reinitialized partial moments. *IEEE International conference on control applications* 1995, p.979
 [19] P. Coirault, J.C. Trigeassou, J.P. Gaubert, G. Champenois. Recursive parameter identification of an induction machine using a non-linear programming method. *IEEE International conference on control applications*, September 1996, p. 644
 [20] P. Marques DaCosta, T. Poinot, J.C. Trigeassou. Identification of linear systems using overparameterized models. *American Control Conference*, June 1995 p.2913.
 [21] H. Garnier, M. Mensler, A. Richard. Continuous-time model identification from sampled data : implementation issues and performance evaluation. *International Journal of Control*, 2003, vol.76, no.13, p.1337-1357.
 [22] Louay Homssi. Outils de modélisation, identification et traitement du signal pour le diagnostique des défauts dans les systèmes continus. Thèse préparée au sein du Laboratoire d'Architecture et Analyse de Systèmes (LAAS) du CNRS, 1992
 [23] I.D. Landau, A. Besançon-Voda. *Identification des systèmes*. Ed. Hermes, 2001

KARIM Jawad

Surveillance, Diagnostic et Pronostic en Temps Réel de Systèmes Hybrides : Application à des Bancs d'Essais CERTIA.

Jawad KARIM

Directeur (s) de thèse : Michel COMBACAU et Carine JAUBERTHIE

Laboratoire d'accueil :

LAAS-CNRS Groupe DISCO
7, avenue du Colonel Roche
31077 Toulouse

Établissement d'inscription :

Université Paul Sabatier École
118, route de Narbonne
31062 Toulouse cedex 4

Entreprise d'accueil :

CERTIA
ZA La Varenne-5, rue des artisans
93196 Noisy-le-Grand cedex

Résumé—Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre des travaux de R&D au sein de CERTIA et vise à développer une démarche de conception d'un système automatique pour l'autodiagnostic et la maintenance préventive en temps réel des bancs d'essais CERTIA. La mise en œuvre de ce projet de recherche apportera une réponse appropriée aux besoins du maintien en mode opérationnel des machines tout au long de leur vie, ce qui permettra d'en améliorer la fiabilité.

Mots-clés—Détection de défaillances, diagnostic, pronostic, modèle hybride, système autonome embarqué, système temps réel.

I. PROBLÉMATIQUE

Au cours de ces dernières années, le maintien en mode opérationnel des systèmes industriels est l'un des problèmes stratégiques qui se posent à l'industriel, depuis la conception d'une machine jusqu'à son exploitation. Aussi, la complexité et les contraintes dictées par les cahiers des charges imposent de faire un saut technologique en utilisant des moyens et des méthodes performantes pour améliorer la qualité des services.

Dans ce contexte, les techniques de diagnostic et de maintenance constituent de réelles opportunités pour CERTIA de faire évoluer son offre de bancs d'essais notamment pour le secteur aéronautique, vers une offre « produit + services », intégrant des aspects liés à la télésurveillance automatisée et permanente de la machine. Il est également nécessaire de prendre en compte les besoins du diagnostic dès la phase de conception des systèmes.

La maintenance préventive concerne en particulier les interventions imprévues, les modifications à effectuer sur

la machine à surveiller, le suivi automatique des bancs d'essais difficilement accessibles ou en milieu hostile, ou encore la détection des variations de paramètres (température, pression, vibration, etc.) juste avant qu'une défaillance ne se produise. Tout ceci représente un coût, tant en termes économiques qu'en temps d'intervention.

Ainsi CERTIA souhaite automatiser l'ensemble des opérations visant à la surveillance des éléments composant le banc d'essai. Ces objectifs sont ceux visés par des techniques de traitement des défaillances en ligne : surveillance de l'installation (principaux paramètres, comportements locaux, objectifs de la mission), détection des dysfonctionnements, localisation de l'élément à l'origine du défaut et identification du défaut (causes ayant conduit à la défaillance). Ces fonctions de base sont le socle sur lequel la sécurité opérationnelle du banc peut être notablement améliorée par des techniques de reconfiguration automatiques, notamment la plus simple consistant à arrêter en douceur (smooth shutdown) le processus en cours.

II. OBJECTIF DES TRAVAUX

L'objectif de notre travail est de concevoir un système de diagnostic en temps réel (détection, isolation, et identification de fautes) fiable permettant de réduire les coûts de dépannage et ouvrir de nouveaux services tels que la maintenance préventive et prédictive, le télé-dépannage, et bénéficier du retour d'expérience sur les pannes constatées.

Les objectifs du projet sont d'ordre scientifique et industriel :

A. Objectifs Scientifiques

Notre objectif consiste à élaborer une approche de diagnostic temps réel qui tire partie des deux approches DX (communauté d'Intelligence Artificielle) et FDI

(communauté de l'Automatique) basé sur un modèle hybride d'un système dynamique complexe. En effet, le diagnostic dit à base de modèles (model-based) repose sur une modélisation comportementale et structurale du système à diagnostiquer, et son principe consiste à comparer le comportement prédit issu d'un modèle de représentation (de bon fonctionnement), au comportement réellement observé, afin de détecter les incohérences et en déduire les causes de dysfonctionnement (défauts d'instrumentation « capteurs ou actionneurs » ou défaut du processus). Le maintien d'un bon fonctionnement de l'ensemble passe donc par la mise en place d'outils de détection des défaillances éventuelles et de systèmes de commande robuste tolérante face à ces pannes. De nombreux auteurs ont abordé le domaine de la surveillance industrielle mettant ainsi en évidence l'intérêt croissant manifesté par la communauté scientifique et les industriels par rapport à cette problématique. Nous pouvons citer les travaux suivants : [4] [1] [10] [15].

B. Objectifs Industriels

Les retombées industrielles pour CERTIA sont multiples :

- développer une électronique RT (temps réel) embarquée pour le diagnostic et la commande robuste tolérante aux fautes (non critique) ;
- Garantir un support maintenance efficace des machines ;
- Commercialiser une « infrastructure de diagnostic » vers le marché des bancs d'essais aéronautique & automobile ;
- Généraliser, éventuellement, ces mécanismes à d'autres marchés.

L'ambition de CERTIA :

- Développer le marché du diagnostic et de la maintenance prédictive des bancs d'essais, après un premier prototype ;
- Convaincre que son automatisation est possible et maîtrisable.

Le plus du produit:

- Pas de modification à effectuer sur la machine à surveiller et donc une adaptation générique du produit ;
- Assurer une qualité optimale des produits CERTIA.

III. ÉTAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

Les principales étapes qui ont été franchies jusqu'à présent sont les suivantes :

Une définition des besoins de CERTIA en termes de maintenance préventive et prédictive,

Un état de l'art étendu portant sur les systèmes dynamique hybrides et leurs sûretés de fonctionnement. Elle présente les différentes méthodes utilisées et leurs applications [4] [18] [19].

J'ai rédigé, suite à cette étude, une synthèse bibliographique intermédiaire [22] composée de deux parties, la première définit le contexte des travaux et les spécifications techniques de l'électronique RT embarquée de diagnostic et de commande tolérante aux fautes. La deuxième partie est une recherche bibliographique sur les thèmes suivants : les systèmes dynamiques hybrides et leur sûreté de fonctionnement, le diagnostic à base de modèles.

A. Systèmes dynamiques hybrides (SDH)

Un système dynamique hybride (notée **SDH**) est un système caractérisé par l'interaction entre des modèles continus (régis par des équations différentielles ou aux différences), et une dynamique discrète (changements d'état dus à l'occurrence d'événements) et des composants discrets ("Marche/Arrêt" des commutateurs ou des valves, les sélecteurs rapides, etc.). De tels systèmes peuvent commuter entre différents modes de fonctionnement où chaque mode est régi par ses propres lois dynamiques caractéristiques. Le caractère hybride du système peut provenir du système lui-même ou de sa commande. C'est le cas, par exemple, de la commande tout-ou-rien d'un système continu.

L'ouvrage [1], s'inscrit dans le domaine des systèmes dynamiques hybrides et porte plus particulièrement sur la modélisation et la simulation de ces systèmes. Plusieurs applications sur des systèmes industriels y sont présentées. Les approches proposées peuvent être classées en deux familles :

- l'approche dite **intégrée** qui dans le même modèle, intègre les aspects continus et discrets, elle contient tous les modèles issus de l'extension de modèles existants. Principalement ceux qui étendent les approches continues pour intégrer du comportement discret comme les Bond Graph à commutations, et ceux issus de l'extension de modèles à événements discrets (cas des réseaux de Petri hybrides par exemple) ;
- l'approche **séparée** qui combine les approches discrètes et continues dans une même représentation en faisant coopérer deux modèles différents (Automates hybrides, Statecharts hybrides [16], réseaux de Petri Mixtes... [12]).

B. Diagnostic à base de modèles (DBM)

L'objectif de la fonction diagnostic est de rechercher les causes et de localiser les organes qui ont entraîné une observation particulière. Pour le diagnostic, on peut citer les méthodes basées sur la connaissance (AMDEC, Arbres de défaillances, systèmes experts, etc.), les méthodes basées sur l'apprentissage, et celles qui sont à base de modèles. Du fait que la conception d'un système d'auto-diagnostic reconfigurable en temps réel est fortement liée aux informations sur le système post-défaut, nous avons opté pour l'approche à base de

modèles. Le diagnostic à base de modèles (notée DBM) est un domaine de recherche pouvant apporter des solutions au problème qui nous intéresse.

Selon la connaissance du système, il est possible de définir deux formulations différentes de cette approche à base de modèles :

- *l'approche FDI (Fault Detection and Isolation)* : issue de la communauté Automatique, s'appuyant sur des modèles quantitatifs [8] [6] [14] ;
- *l'approche DX* : issue de la communauté Intelligence Artificielle, s'appuyant sur des modèles qualitatifs [15].

Le diagnostic à base de modèles, présente l'avantage de ne nécessiter aucune connaissance préalable des défauts ou symptômes possibles. Elle s'appuie uniquement sur la donnée d'un modèle de fonctionnement correct du système et procède par comparaison des comportements du modèle et du système réel (appréhendé au travers des observations fournies par les capteurs).

Modèles quantitatifs (approches FDI)

L'approche FDI suppose l'existence d'un modèle construit à partir des lois fondamentales (physique, chimie,...) et décrits par des relations mathématiques sur les entrées-sorties relatives au comportement du système. Diverses approches pour le diagnostic à partir des modèles mathématiques ont été développées depuis les années 70. Plusieurs articles de synthèse sont disponibles, notamment [5] [7] [13].

Ces méthodes dites « méthodes des résidus » comprennent deux étapes d'une part, le calcul des résidus et, d'autre part, le choix d'une règle de décision pour le diagnostic. Pour détecter l'apparition des défaillances dans le système, il faut effectuer le calcul des résidus entre le comportement réel et celui prévu par le modèle. Un synoptique de principe général pour la génération des résidus est représenté dans la figure suivante :

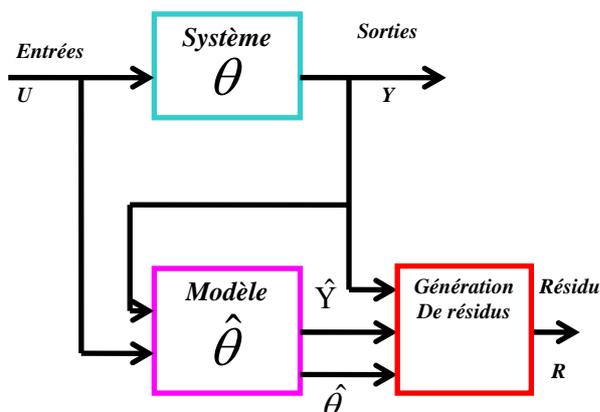


Fig.1. principe de génération des résidus.

En fonctionnement normal (absence de défaillances) le résidu entre le modèle représentatif du système et le système réel, doit avoir une valeur nulle, par contre, en présence d'un défaut, le résidu aura une valeur non nulle.

Traditionnellement on classe les techniques de détection à partir de modèles analytiques numériques en deux grandes familles :

La surveillance des variables intervenant dans la description du système :

- Relations de parité [6].
- Estimation d'état.

La surveillance des variables structurelles du système :

- Estimation paramétrique [5], [4].
- Analyse structurelle [9].

Une fois la présence d'une défaillance détectée. On doit déterminer l'organe responsable de cette défaillance. Pour localiser la faute deux approches existent :

- **Les résidus structurés** : qui utilisent la matrice de signatures Σ . Cette matrice décrit les relations entre les résidus (lignes de Σ) et les fautes (colonnes de Σ). Chaque résidu est sensible à un sous-ensemble des fautes et insensible aux autres. Un élément $\sum_{ij}=1$ si la faute de la colonne j a une influence sur le résidu de la ligne i , sinon, $\sum_{ij}=0$ [11].
- **Les résidus directionnels** : qui sont conçus de telle sorte que, lorsqu'une faute survient, le vecteur de résidus soit confiné suivant une direction particulière de l'espace des résidus.

L'inconvénient majeur des modèles quantitatifs est la nécessité d'avoir des modèles analytique numérique très spécifique, assez précis, et robustes faces à des perturbations qui peuvent engendrer des erreurs dans le modèle.

Modèles qualitatifs (approche DX)

Dans de nombreuses applications industrielles, il est très difficile, voire impossible, de disposer des connaissances complètes pour faire un modèle analytique du processus à cause d'une complexité structurelle accrue ou un comportement non-linéaire. Ce qui limite l'application des modèles quantitatifs et ouvre la voix au raisonnement qualitatif, qui est devenu un domaine de recherche à part entière de l'I.A. Une excellente synthèse de l'utilisation de modèles qualitatifs est décrite dans [10].

L'idée fondamentale de cette approche de diagnostic est de comparer le comportement prédit issu d'un modèle physique de type qualitatif, au comportement réellement observé sur le système par l'intermédiaire des capteurs, afin de détecter les incohérences et en déduire les causes

de dysfonctionnement. Les connaissances incluses dans ces modèles qualitatifs décrivent la structure du système (les éléments interconnectés ou en interaction) à diagnostiquer, et ils sont spécifiques au système en question ; les connaissances comportementales issues des lois de la physique, sont génériques et ne dépendent que du domaine (électrique, thermique, hydraulique, mécanique, etc.).

IV. CONCLUSION

Après une étude bibliographique intermédiaire des systèmes dynamiques hybrides et de leurs sûretés de fonctionnements, il m'a semblé qu'aucune des approches utilisées ne permettait de remplir entièrement nos objectifs de fiabilité et de robustesse en temps réel. Nous devons donc concevoir des méthodes de diagnostic en tirant parti de la synergie des techniques issues de FDI et de DX.

RÉFÉRENCES

- [1] J. Zaytoon et coll, "les systèmes dynamiques hybrides,". Hermes sciences Publications-Paris, 2001.
- [2] M.S. Branicky, V.S. Borkar, S.K. Mitter, "A unified framework of hybrid control: model and optimal control theory," IEEE Trans. Automatic Control, 43(1):31-45, 1998.
- [3] S.Simic, K.H.Johansson, S.Sastry, J.Lygeros, "Towards a geometric theory of hybrid systems, Hybrid Systems: Computation and Control," N.Lynch, B.H. Krogh (Eds), no.1790inLNCS, pp 421-436, Springer, 2000.
- [4] M. Basseville, M.O. Cordier, "Surveillance et diagnostic de systèmes dynamiques : approches complémentaires du traitement du signal et de l'intelligence artificielle," Publication IRISA, no. 1004, 1996.
- [5] R. Isermann, "supervision, Fault Detection and Fault-Diagnosis Methodes- An introduction," Control Eng. Practice, Vol. 5, N0 5, pp. 639-652, 1997.
- [6] J.J. Gertler, "Fault detection and diagnosis in engineering systems," Marcel Dekker Inc, New York, 1998.
- [7] J.J. Gertler, "Analytical redundancy methods in fault detection and isolation," Proc. Of TOOLDIAG Conference, Toulouse, 1993.
- [8] P.M. Frank, "Analytical and qualitative model-based fault diagnosis – A survey and some new results," European Journal of Control, Vol.2, 6-28, 1996.
- [9] J. P. Casser, M. Stroswiecki, "A structural approach for the design of failure detection and identification systems," Proceedings IFAC/IFIP/IMACS Conference on Control of Industrial Process, Belfort, France, pp. 329-334, 1997.
- [10] L. Travé-Massuyès, P. Dague, F. Guerrin , "Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur," Hermes, paris, 1997.
- [11] T. Kempowsky, "surveillance de procédés a base de méthodes de classification : conception d'un outil d'aide pour la détection et le diagnostic des défaillances," thèse de l'institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2004.
- [12] M. Bertrand, C. Jung, J. Zaytoon, "Systèmes dynamique hybrides Modélisation et simulation," Techniques de l'ingénieur.
- [13] R.J. Patton, P.M Frank, R.N Clark, (Eds), "fault detection in dynamic systems – Theory and applications," Prentice Hall International, 1989.
- [14] R.J. J. Chen, "A review of parity space approaches to fault diagnosis," IFAC SAFEPROCESS Symposium, Baden-Baden, 1991.
- [15] J. De Kleer, B.C Williams, "Diagnosing multiple faults," Artificial intelligence 32(1), p.97-130, 1987.
- [16] D. Harel, On Visual Formalisms, "Communications of the ACM 31," No. 5, 514-530 (May 1988).
- [17] M. Kinnaert, "Fault diagnosis based on analytical models for linear and nonlinear systems – A tutorial, In proc. 5th IFAC Symposium on Fault detection," Supervision and Safety of Technical Processes SAFEPROCESS'03, Washington DC, USA, 2003.
- [18] J.C. Laprie, "Sûreté de fonctionnement des systèmes informatiques et tolérance aux fautes : concept de base," TSI, 4, n°5, 419-429, 1985.
- [19] A. Villemeur, "Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Fiabilité - Facteurs Humains - Informatisation," Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France, Édition Eyrolles, Paris, 1988, No 67.
- [20] B. Dubuisson, "Diagnostic, intelligence artificielle et reconnaissance de formes," Hermès, Paris, 2000.
- [21] A. Girard, "Analyse algorithmique des systèmes hybrides," thèse de l'institut National Polytechnique de Grenoble, 2004.
- [22] J. Karim, " Synthèse bibliographiques : Surveillance, diagnostic et pronostic en temps réel de systèmes hybrides : Application à des bancs d'essais CERTIA " Rapport interne, 2006.

MOKHTARI Aïmed

Diagnostic de systèmes dynamique hybrides à base d'un formalisme réseaux de Petri différentiels à objets

Aimed MOKHTARI Marie-Véronique LE LANN

I. PROBLÉMATIQUE

Le diagnostic de défauts est aujourd'hui primordial pour la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et l'efficacité des systèmes ainsi que pour la sécurité ou la protection de l'environnement. Les méthodes de diagnostic sont nombreuses et variées car elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés. Sur un problème un peu complexe, il n'est d'ailleurs pas rare de devoir utiliser plusieurs méthodes. Les systèmes peuvent être caractérisés par des dynamiques très variables ; à une certaine échelle, ces systèmes se comportent de façon continue, mais ils peuvent être caractérisés par des zones dont les dynamiques sont très différentes. De plus, la représentation précise de ces zones n'a pas toujours d'intérêt ou peut tout simplement s'avérer impossible. Aujourd'hui, la simulation dynamique hybride est un outil d'étude privilégié lors des phases d'analyse et de conception des procédés industriels. Le développement de telles applications a largement profité de l'évolution rapide de la puissance des calculateurs mais aussi, de la mise au point de méthodes numériques robustes.

II. LE CADRE DES TRAVAUX

Notre travail consiste à développer une méthodologie de détection et de diagnostic utilisant la modélisation des systèmes dynamiques hybrides. Il rentre dans le cadre d'une collaboration avec le laboratoire de Génie Chimique LGC de Toulouse, il se fait en parallèle avec une thèse au sein de ce laboratoire. L'unification des travaux de recherche poursuivie depuis plus de 10 ans au sein du LGC a conduit au développement d'une plate forme de simulation dynamique nommée PrODHyS (*Process Object Dynamic Hybrid Simulator*). Celle-ci est construite autour d'un simulateur de systèmes hybrides s'appuyant sur le formalisme Réseau de Petri Différentiel à Objet (RdPDO). PrODHyS offre la possibilité d'une description orientée objet des procédés à l'aide d'une bibliothèque de composants généraux et réutilisables permettant de produire des modèles spécifiques plus au moins complexe. Notre

travail se concentre plus particulièrement sur le développement à partir de ce formalisme hybride, d'un outil de diagnostic intégré. Comme système d'application, nous avons opté pour un réseau hydraulique qui mêlent les aspects continus (réservoirs) et discrets (vannes, pompes, distributeurs).

III. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT

A. Formalisme à la base du modèle RDPDO

Dans un réseau de Petri différentiel à objets, le comportement hybride du système est pris en compte d'une part, en associant les variables continues aux jetons et d'autre part en associant un système algèbro-différentiel aux places permettant de faire évoluer les variables d'état continues. Un jeton mis dans une place déclenche la résolution du système différentiel correspondant et provoque ainsi l'évolution continue au cours du temps des variables d'état. De plus, deux fonctions sont rattachées à chaque transition. La première, appelée fonction de sensibilisation, définit une ou plusieurs conditions liant les variables formelles associées aux arcs d'entrée de la transition. La seconde, appelée fonction de jonction, permet de calculer, en accord avec l'état suivant, les valeurs initiales des variables associées aux jetons sortant de la transition ainsi que de leurs dérivées. Par ailleurs, pour assurer la cohérence du modèle, chaque place, chaque arc entrant et sortant d'une transition est explicitement associé aux types des variables qu'il utilise. Un premier niveau de cohérence est assuré en vérifiant que ces types sont bien cohérents avec les informations portées par les jetons qui vont transiter sur le réseau. Un exemple d'évolution d'un RdPDO est bien illustré sur la figure 2. Tout jeton situé dans une place différentielle est substitué aux variables formelles correspondantes dans le système *EDA*. Ceci induit l'évolution continue des attributs concernés ainsi que l'évaluation de la condition associée à la transition. Lorsque cette condition est atteinte, l'action est exécutée et la transition est franchie. Le marquage déclenche alors l'évolution continue du jeton selon ce nouveau système *EDA*. Évidemment, plusieurs jetons de même type peuvent marquer la place, déclenchant alors l'intégration du même

système *EDA* à partir de la date de marquage. Par ailleurs, l'instanciation du système *EDA* d'une place différentielle peut nécessiter la combinaison de jetons de même type et/ou de types différents. Dans ce cas, la cohérence de l'ensemble doit être garantie par la modélisation ou validée a posteriori par la simulation (cette dernière possibilité n'étant envisageable qu'en simulation et non en commande). L'intégration des RdPDO dans un environnement de simulation se fait à travers la plate forme *PrODHyS* (**Process Object Dynamic Hybrid Simulator**).

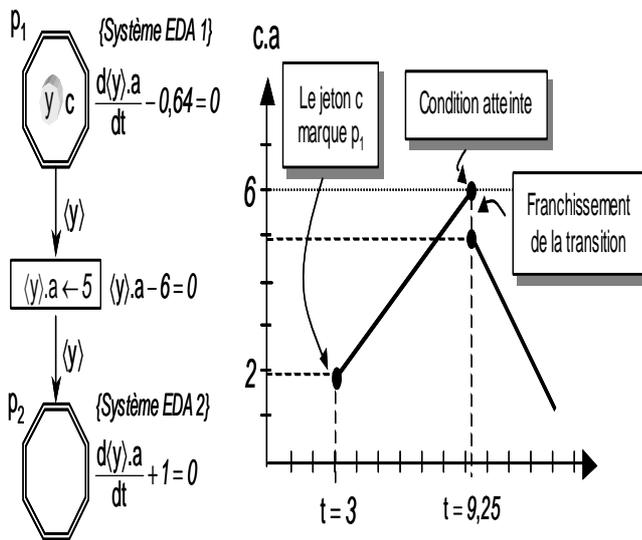


Figure 1. Règles d'évolution des RdPDO

B. Présentation de la plate forme *PrODHyS*

La plateforme *PrODHyS* est donc une bibliothèque de classes destinées à être dérivées en exploitant les mécanismes objets (polymorphisme, composition, héritage, généricité). Son développement s'appuie sur un processus de conception et de codage unifié, basé sur le formalisme *UML* et le langage objet *C++*. Elle est organisée en 2 couches fonctionnelles indépendantes. La *couche simulation* regroupe les classes correspondant au noyau de simulation (gestionnaire de simulation, formalisme *RdPDO*, intégrateurs *EDA*, solveurs *EANL*). Elle fournit donc les objets de base utiles à la simulation de tout système dynamique hybride, quel que soit le domaine d'application. Quant à la *couche modélisation*, elle rassemble les classes utilisées spécifiquement pour la modélisation des procédés. Actuellement, cette bibliothèque regroupe plus de 1000 classes réparties en 7 modules. Divers outils et *IHM* ont été développés (ou en cours de développement) selon le contexte d'utilisation de la bibliothèque (figure 2). L'objectif de ces travaux est d'inclure la fonction diagnostic dans les fonctionnalités de *PRODHY*S. Une amélioration

importante qu'il a fallu amener à la plate-forme initiale est la possibilité d'effectuer du chaînage arrière. Si cette solution est bien connue dans le cas des RdP classiques, elle l'est beaucoup moins dans le cas de RdP différentiels.

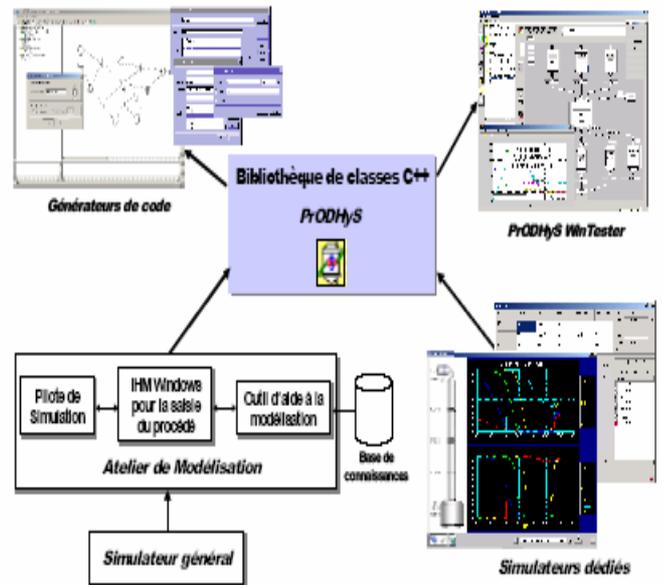


Figure 2. Architecture logicielle de *PrODHyS*

IV. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

La méthodologie de diagnostic proposée (Figure 3) s'effectue en deux étapes, la première étape consiste à évaluer la différence entre les sorties du modèle constitué par le RdP simulant un fonctionnement normal et celles du système hydraulique « réel ». Dans ce dernier cas, comme nous ne disposons pas d'un système réel, celui-ci est simulé à l'aide d'un modèle de simulation de type RdPDO qui cette fois-ci contient les états de défaillances. En cas de détection d'écarts, la deuxième phase consiste à vérifier l'évolution temporelle du système par un raisonnement arrière effectué avec *PrODHyS* - pour remonter à la cause de la défaillance-. Lorsqu'il y a plusieurs possibilités de défaillances, cette technique se heurte à explorer toutes ces possibilités. Pour éviter l'explosion des possibilités à examiner par simulation arrière, nous utilisons la classification des données (mesures issues des capteurs ou prétraitement des mesures) pour restreindre l'ensemble des possibilités à celles donnant les mêmes symptômes. La simulation arrière vient alors identifier la faute parmi celles isolées à l'étape précédente. Les résultats de cette méthodologie sont présentés dans les publications suivantes.

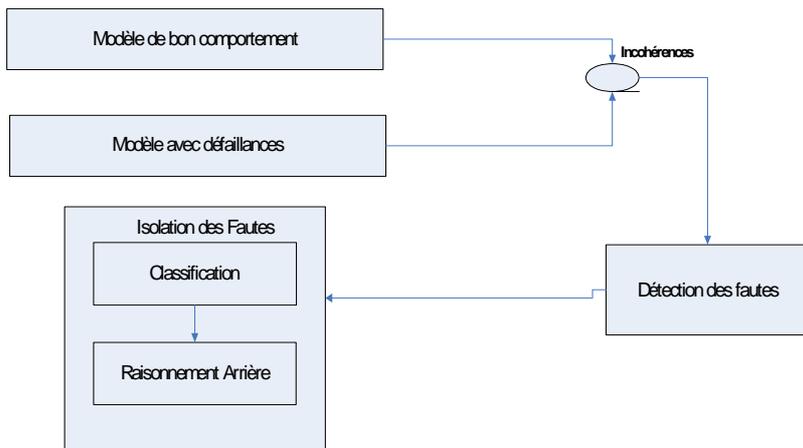


Figure 3. Méthodologie proposée

V. PUBLICATIONS

- [1] A.MOKHTARI , M.V.LE LANN , G.HETREUX , J.M.LE LANN , *A fault diagnosis approach for hybrid systems* , Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON06), 7-10 novembre 2006 Paris, 6p.
- [2] A.MOKHTARI , M.V.LE LANN , G.HETREUX , J.M.LE LANN, *Diagnostic à base de modèle des systèmes dynamiques hybrides* , SIMO 06 Systèmes d'Information, Modélisation, Optimisation et Commande en génie des procédés 11-12 octobre 2006, Toulouse.
- [3] A.MOKHTARI , M.V.LE LANN , G.HETREUX , J.M.LE LANN , *A fault diagnosis approach using ODPN simulation for hydraulic systems* , EMSS European Modelling and Simulation Symposium, 4-6 octobre 2006 Barcelone (Espagne), 8p.
- [4] A.MOKHTARI , M.V.LE LANN , G.HETREUX , J.M.LE LANN, *Approche de diagnostic par la simulation des réseaux de Petri à objets* , International Conference on Control, Modelling and Diagnosis (ICCMD'06), Annaba (Algérie), 22-24 Mai 2006, 7p.
- [5] A.MOKHTARI, *Diagnostic de systèmes dynamiques hybrides à base d'un formalisme réseaux de Petri différentiels objets* , 6ème Congrès des Doctorats de l'École Doctorat Systèmes (EDSYS), Toulouse (France), 19-20 Mai 2005, 8p.

VI. RÉFÉRENCES

- [1] Hétreux G., Perret J., LeLann J.M. 2003, Bibliothèque orientée objet pour la conception de simulateurs dynamiques hybrides , Congrès Français de Génie des Procédés, 9-11 Septembre, Saint-Nazaire.
- [2] Perret J., 2003, Intégration des Réseaux de Petri Différentiels à Objets dans une plateforme de simulation dynamique hybride : application aux procédés industriels, Thèse de Doctorat, INP, Toulouse (France).

- [3] Perret J., Hétreux G, Le Lann J.M., 2004, Integration of an object formalism within a hybrid dynamic simulation environment, Control Engineering Practice, Elsevier, Vol 12, p.1211-1233.
- [4] Zaytoon J., 2001, Systèmes dynamiques hybrides, HERMES Sciences publications.
- [5] A.MOKHTARI , M.V.LE LANN , G.HETREUX , J.M.LE LANN , *A fault diagnosis approach for hybrid systems* , Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON06), 7-10 novembre 2006 Paris, 6p.
- [6] Kempowsky T., Aguilar-Martin J., Subias A., Le Lann M.V., Classification tool based on interactivity between expertise and self-learning techniques, "IFAC-Safeprocess 2003", Washington D.C., USA, 2000.
- [7] Aguilar-Martin J., López de Mántaras R., *"The process of classification and learning the meaning of linguistic descriptors of concepts"*. Approximate Reasoning in Decision Analysis p. 165-175. North Holland, 1982
- [8] S. Khalfaoui, H. Demmou, E. Guilhem, R. Valette "An algorithm for deriving critical scenarios in mechatronic systems" IEEE SMC (System Man and Cybernetic) 2002, 6-9 october, Hammamet Tunisie
- [9] A.MOKHTARI , M.V.LE LANN , G.HETREUX , J.M.LE LANN, *Diagnostic à base de modèle des systèmes dynamiques hybrides* , SIMO 06 Systèmes d'Information, Modélisation, Optimisation et Commande en génie des procédés 11-12 octobre 2006, Toulouse.
- [10] Demongodin I. (2001). Generalised Batches Petri Net: Hybrid Model for High Speed Systems with Variable Delays, *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, Vol.11, N°1/2, p.137-162.
- [11] Cordier, M.; Dague, P.; Dumas, M.; Levy, F.; Montmain, J.; Staroswiecki, M.; and Trave-Massuyes, L. 2000. AI and automatic control approaches of model-based diagnosis: Links and underlying hypothesis. SAFEPROCESS, 274–279. Budapest, Hungary: IFAC.

ISAZA NARVAEZ Claudia Victoria

Détection de défauts par méthodes de reconnaissance de formes dans le cadre de la surveillance en ligne de systèmes dynamiques: Applications dans le domaine des processus chimiques et bio

Claudia Victoria Isaza Narvaez. Directeurs: Joseph Aguilar-Martin, Marie-Véronique LeLann

Problématique— Les processus complexes (e.g. chimiques et biochimiques) ont des dynamiques hautement non linéaires et changeantes au cours du temps. Ils se caractérisent par le fait de posséder un grand nombre de variables, qui doivent être prises en considération au moment d'effectuer la supervision. Il est donc difficile d'obtenir un modèle mathématique précis qui permette de détecter des états anormaux. La connaissance sur le système doit être extraite à partir des signaux en incluant des mécanismes d'apprentissage et la connaissance de l'expert. Les méthodes d'apprentissage et de reconnaissance de formes permettent à partir des données du processus, d'obtenir de l'information sur les états du système utile pour la surveillance. Toutefois la performance est fortement liée à la bonne sélection des paramètres de chaque algorithme [2][5][7][10][13]. Cette thèse se situe dans l'amélioration automatique de la partition de l'espace obtenue avec des méthodes de reconnaissance de formes de type flou. Nous cherchons à diminuer la dépendance aux paramètres propres à chaque algorithme d'apprentissage et à traiter le problème de la détermination du nombre de classes pour les algorithmes de classification où ceci est nécessaire a priori.

I. OBJECTIFS DES TRAVAUX

Ce travail se situe dans le cadre de la détection de défaillances et supervision en ligne de processus.

Les différents objectifs visés sont la :

- Comparaison d'algorithmes séquentiels de reconnaissance de formes avec apprentissage dans le cadre de la surveillance en ligne de systèmes dynamiques.
- Génération d'une méthode qui permet d'améliorer automatiquement la partition de l'espace effectuée par une technique de reconnaissance de formes de type flou. Cette méthode sera un complément de la technique de classification LAMDA (Learning Algorithm for Multivariate Data Analysis), elle sera aussi applicable à d'autres techniques de classification de type flou. La méthode permettra de diminuer la forte dépendance aux paramètres d'initialisation de l'algorithme d'apprentissage.

II. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT

Le diagnostic de systèmes complexes est vu comme la différenciation des états de fonctionnement en incluant les défaillances. Les méthodes de reconnaissance de formes permettent d'extraire, à partir de données et des historiques

du processus, l'information qui caractérise les états et défaillances du système, en identifiant les classes de fonctionnement que peut présenter le processus. Avec l'apprentissage supervisé, il est possible d'inclure dans l'identification des groupes, la connaissance de l'expert, et grâce à la création automatique de classes, d'identifier des situations non prévues a priori.

Ces méthodes possèdent opérations classiques en Automatique et Traitement du Signal. Dans tous les cas, un vecteur qui résume l'information accessible est fourni pour la surveillance, et le système superviseur doit décider quel est l'état fonctionnel actuel du processus.

Il y a plusieurs méthodes de classification qui permettent d'obtenir des résultats utiles pour le diagnostic. C'est dans ce contexte que ce travail de thèse doit procéder à une comparaison raisonnée des algorithmes séquentiels existants, en particulier la méthode LAMDA[1][11], d'autres approches floues [2][3][6] et neuronales [4][8][13][15], ou des méthodes statistiques [6][8][12].

Les résultats de l'étude comparative des méthodes de classification [10] avec d'autres méthodes [5][11][13][14][17] développées dans ce domaine montrent la faisabilité du diagnostic basé sur des méthodes de traitement "intelligent" des données. Toutefois nous remarquons que pour obtenir une bonne performance, il est nécessaire de faire des tests pour trouver les paramètres optimaux pour chaque cas. Les techniques de reconnaissance de formes sont fortement dépendantes des paramètres à choisir par l'utilisateur et l'influence de ces paramètres n'est parfois pas évidente à apprécier par l'expert du procédé.

Après l'obtention d'une classification par apprentissage supervisé avec des paramètres adéquates bien que non optimaux, une étape de validation et d'ajustement automatique de groupes permettrait de diminuer l'effet d'un choix inadéquat des paramètres, en rendant le diagnostic d'une part plus indépendant et en fournissant l'adaptation pour les états non prévus. Une étape de validation et d'ajustement des classes en fonction des critères de qualité de la partition d'espace de données peut être considérée comme grandement utile pour faciliter la phase d'apprentissage des méthodes de reconnaissance de formes et améliorer la performance du système de diagnostic.

Nous proposons [9] une méthodologie pour l'optimisation de la partition floue qui est indépendante des

méthodes d'apprentissage et de reconnaissance. La méthode est aussi utile dans les cas où il n'y a pas une représentation géométrique des classes. La méthodologie proposée est considérée comme un complément aux méthodes de reconnaissance de formes qui sont utilisées pour l'identification des états et de défaillances de systèmes complexes. Elle permet de diminuer la dépendance aux paramètres et à l'initialisation des algorithmes d'apprentissage.

Cette méthode comporte deux étapes, la validation de la partition et l'ajustement des classes. La qualité de la partition est mesurée par un indice qui est utilisé pour décider s'il est nécessaire ou non de modifier la partition. On fait la mise à jour des classes en utilisant l'analyse de la similitude floue entre classes. Le schéma de l'algorithme est présenté sur la Figure 1.

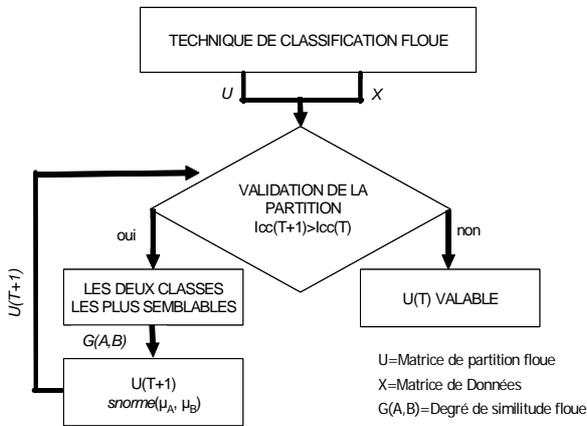


Fig. 1. Schéma de la méthode proposée

Pour la validation de la partition de l'espace de données, nous mesurons sa qualité de telle manière que la meilleure partition a les classes les plus séparées et les plus compactes. Pour cela nous utilisons un indice proposé en [7]. L'indice est donné par l'équation (1).

$$Icc = \frac{sbe}{N} \cdot D_{\min} \cdot \sqrt{K} \quad \text{où} \quad (1)$$

$$sbe = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \mu_{kn} \cdot (m_{ke} - m) \cdot (m_{ke} - m)^T$$

μ_{kn} est le degré d'appartenance de la donnée x_n , N est le nombre de données d'entraînement, K le nombre des classes, D_{\min} la distance minimale entre groupes, sbe est la valeur associée à la dispersion de la partition, m_{ke} est le prototype de la classe k et m le centre de l'ensemble des données calculé par la relation (2)

$$m_{ek} = \frac{\sum_{n=1}^N \mu_{kn} \cdot x_n}{\sum_{n=1}^N \mu_{kn}} \quad \text{et} \quad m = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N x_n \quad (2)$$

Pour effectuer l'union de deux classes, nous estimons les deux classes les plus semblables. Pour ce faire, nous avons

proposé une mesure de distance entre des classes floues. La relation (3) définit une mesure de distance du type ultramétrique entre deux sous ensembles flous A et B .

$$d^*(A, B) = 1 - \frac{M[A \cap B]}{M[A \cup B]} = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (\mu_{An} \cap \mu_{Bn})}{\sum_{n=1}^N (\mu_{An} \cup \mu_{Bn})} \quad (3)$$

$$\text{où} \quad \mu_{An} \cap \mu_{Bn} = \min(\mu_{An}, \mu_{Bn})$$

$$\mu_{An} \cup \mu_{Bn} = \max(\mu_{An}, \mu_{Bn})$$

Ceci permet d'obtenir la mesure de similitude entre classes (A, B) que nous utilisons (4).

$$G(A, B) = \frac{\sum_{n=1}^N (\mu_{An} \cap \mu_{Bn})}{\sum_{n=1}^N (\mu_{An} \cup \mu_{Bn})} \quad (4)$$

Quand on a trouvé les deux classes les plus compatibles, la matrice de partition $(U(T+1))$ est mise à jour. L'union des deux classes les plus similaires est l'union de deux ensembles flous (*S-Norme*).

La méthode a été testée sur des cas d'études employés pour estimer la performance de différents indices de qualité [7][18]. À partir d'une classification non optimale, avec un grand nombre de classes, nous avons trouvé automatiquement une meilleure partition avec le nombre adéquate de classes.

La méthode d'ajustement des classes que nous proposons est indépendante du type de méthode de reconnaissance de formes, parce que l'analyse des classes est faite uniquement à partir de la matrice de degrés d'appartenance U . Il suffit donc que le résultat de la phase d'apprentissage fournisse une partition floue. D'autre part, il n'y a pas de paramètres additionnels à choisir par l'utilisateur. La performance de l'optimisation ne change pas en fonction du nombre de variables ou de descripteurs et il n'est pas nécessaire de relancer l'algorithme de reconnaissance de formes à chaque itération.

Si la méthode d'analyse de données et l'étape d'optimisation ont une réponse plus rapide que le temps d'échantillonnage du système, il est possible de penser à une détection de défaillances non supervisée et en ligne.

III. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

Les travaux déjà effectués sont les suivants:

- Étude de différentes techniques basées sur les données et utilisées pour le diagnostic.
- Analyse des techniques qui peuvent être utilisées pour la détection en ligne de défaillances.
- Programmation des techniques de reconnaissance de formes pour estimer leur performance avec différentes *benchmarks* [16].
- Analyse comparative de différentes techniques de classification. [10]
- Étude de différentes mesures de qualité d'une

classification.

- Étude de méthodes pour l'ajustement automatique de groupes obtenus à partir de techniques de reconnaissance de formes.

- Définition théorique de la méthode de validation et d'ajustement automatique de classes.[9]

- Programmation de l'algorithme de détection de défaillances avec l'ajustement et la validation de classes.

- Application de la méthode d'amélioration de la partition à cas d'études.

Les travaux restant à effectuer sont la :

- Proposition d'autres indices de qualité de la partition de l'espace de données, utilisables comme alternatives d'arrêt des itérations pour la méthode proposée.

- Analyse de l'influence du type de s-norme et t-norme choisies pour la méthode d'optimisation.

- Application de la méthode à un cas réel (Processus BIOSEP-VEOLIA)

IV. PUBLICATIONS

- *An optimization method for the data space partition obtained by classification techniques for the monitoring of dynamic processes.* C. Isaza Narvaez, J.Aguilar Martin, M.V.Le Lann, J. Agilar, A.Rios Bolivar. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications: Artificial Intelligence Research and Development*, IOS Press, Vol. 146, ISBN 1-58603-663-7, CCIA 2006.

- *Etude comparative de la méthodologie LAMDA et autres techniques de classification basées sur la fouille de données dans le cadre du diagnostic.* C. Isaza Narvaez, T.Kempowsky, J.Aguilar Martin, M.V.Le Lann, A.Gauthier. *Soumis à la Revue des Nouvelles Technologies de l'information : Apprentissage Artificiel et Fouille de Données.* Septembre 2006

- *New procedure to estimate missing and false data of flow meters in a water distribution network based on signal analysis.* J.Quevedo, V.Puig, G.Cembrano, J.Aguilar Martin, C.Isaza Narvaez, D.Saporta, G.Benito, M.Hedo, A.Molina. *Rapport LAAS N°05135*, Mars 2005

- *Qualitative data classification using LAMDA and other soft computer methods.* C. Isaza Narvaez, T.Kempowsky, J.Aguilar Martin, A.Gauthier. *Recent advances in artificial intelligence research and development*, IOS Press, 2004, Vol.113, ISBN 1-58603-466-9

- *Clasificación cualitativa con la metodología LAMDA, comparación con dos técnicas de clasificación.* C. Isaza Narvaez, T.Kempowsky, J.Aguilar Martin, A.Gauthier. *Rapport LAAS N°04247*, Mai 2004

- [2] BABUSKA Robert, "Fuzzy Modeling for Control", *Control Engineering Technology and Systems*, Delft University of Technology, Kluwer Academic Publishers, 1998.

- [3] BEZDEK J., "Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function", Ed. Plenum Press, NY, USA, 1981

- [4] BISHOP, C. M., "Neural Networks for Pattern Recognition" New York: Oxford University Press Inc, 1995

- [5] CASIMIR Roland, "Diagnostic des Défauts des Machines Asynchrones par Reconnaissance des Formes", Thèse de Doctorat de L'Ecole Centrale de Lyon, Lyon-France, 2003.

- [6] CORNUEJOLS A., MICLET L., "Apprentissage Artificiel, Concepts et Algorithmes", Editions Eyrolles, 2003

- [7] DE FRANCO Claudia, SILVA Leonardo, OLIVEIRA Adriano "A Validity Measure for Hard an Fuzzy clustering derived from Fisher's Linear Discriminant", Universidad de Rio de Janeiro- AEP/NCE.

- [8] HAN J., KAMBER M., "Data Mining: Concepts and Techniques", Ed. Morgan Kaufmann, 2001

- [9] ISAZA C., AGUILAR-MARTIN J., LE LANN M.V., AGUILAR J., RIOS A., "An optimization method for the data space partition obtained by classification techniques for the monitoring of dynamic processes", *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications: Artificial Intelligence Research and Development*, IOS Press, Vol. 146, ISBN 1-58603-663-7, CCIA 2006.

- [10] ISAZA C., KEMPOWSKY T., AGUILAR-MARTIN J., LE LANN M.V., GAUTHIER A., "Etude comparative de la méthodologie LAMDA et autres techniques de classification basées sur la fouille de données dans le cadre du diagnostic" *Soumis à la Revue des Nouvelles Technologies de l'information : Apprentissage Artificiel et Fouille de Données.* Septembre 2006

- [11] KEMPOWSKY T., AGUILAR MARTIN J., SUBIAS A., LE LANN M.V. "Classification tool based on interactivity between expertise and self-learning techniques", 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS'2003), Washington (USA), Juin 2003

- [12] LIM S., LOH W., SHIH Y., .., "A comparison of Prediction of Accuracy , Complexity , and Training Time of Thirty-three Old and New Classification Algorithms", *Machine Learning*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2000

- [13] LURETTE Christophe, "Développement d'une technique neuronale auto-adaptative pour la classification dynamique de données évolutives. application a la supervision d'une presse hydraulique", Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences Technologies de Lille, Lille-Francia,2003.

- [14] MARIE-JOSEPH Isabelle, "Méthodologie de diagnostic appliquée à la maintenance Préventive d'unités de production d'électricité en sites isolés" Thèse de Doctorat de l'Université des Antilles et de la Guyane, 2003.

- [15] MARK J. , ORR L-, "Introduction to Radial Basis Function Networks", Centre for Cognitive Science, University of Edinburgh, 1996

- [16] MERZ, C.J., Y MURPHY, P.M. (1996), *UCI Repository of Machine Learning Databases*. Department of Information and computer science, University of California, Irvine, CA <http://www.ics.uci.edu/~mllearn/MLRepository.html>

- [17] WAISSMAN J "Construction d'un modèle comportemental pour la supervision de procédés: Application à une station de traitement des eaux", Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2000

- [18] XIE Lisa Xuanli, BENI Gerardo "A Validity Measure for Fuzzy Clustering", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol 13 No 8, 1991.

REFERENCES

- [1] AGUILAR J., LOPEZ R., "The process of classification and learning the meaning of linguistic descriptors of concepts". *Approximate Reasoning in Decision Analysis* p. 165-175. North Holland, 1982

GUENOUNOU Ouahib

METHODOLOGIE DE CONCEPTION DE CONTROLEURS INTELLIGENTS PAR L APPROCHE GENETIQUE -APPLICATION A UN BIOPROCEDE

Ouahib Guenounou, Directeurs de thèse: A. Belmehdi et B. Dahhou

I. PROBLÉMATIQUE

Dans cette thèse, la modélisation, la conduite et la supervision d'un procédé de fermentation seront étudiées par les techniques du soft computing parmi lesquelles les réseaux de neurones, la logique floue et les algorithmes génétiques.

Les réseaux de neurones sont connus grâce à leur capacité d'apprentissage et d'approximation de fonctions non linéaires. Ils peuvent fournir un outil intéressant pour la modélisation des systèmes complexes, notamment les procédés de fermentation. Ces procédés sont de nature non linéaires nécessitant pour leur conduite des techniques de commande de même classe dont la commande par logique floue fait parti. L'intérêt d'une telle commande est d'une part sa simplicité d'application sur des systèmes difficiles à modéliser ou mal définis et d'autre part la possibilité d'intégrer les connaissances des experts pour la mise au point d'une telle commande. Les algorithmes génétiques (AG), sont des algorithmes de recherche globale et parallèle. Ils peuvent être utilisés pour l'optimisation de la structure des réseaux de neurones et les paramètres des contrôleurs flous employés dans ce travail.

Le problème de supervision (diagnostic et commande tolérante aux fautes) sera étudié par réseaux de neurones selon l'approche multi-modèles. A chaque fonctionnement (sain, ou avec défauts) est associé un modèle (prédicteur) neuronal et un contrôleur flou. Un algorithme de commutation basé sur la minimisation d'un critère quadratique permettra de connaître à chaque instant le meilleur prédicteur pour appliquer au procédé le contrôleur correspondant. Le critère quadratique s'écrit souvent en fonction d'un ensemble de paramètres (facteur d'oubli, temps de maintien) qu'il faut bien choisir pour un problème donné. L'emploi des AG semble une alternative prometteuse pour ajuster les valeurs numériques de ces paramètres et pour éviter un travail par tâtonnement peu efficace.

Notre travail ne se limite pas à une étude théorique car les simulations des approches développées seront validées sur une unité pilote existante au Département de Génie

O. Guenounou du laboratoire de technologie industrielle et de l'information de l'université de Bejaia, 06000 Route de Targua Ouzemour, Algerie wguenounou@yahoo.fr

A. Belmehdi du laboratoire de technologie industrielle et de l'information de l'université de Bejaia, 06000 Route de Targua Ouzemour, Algérie albelme@yahoo.fr

B. Dahhou du LAAS-CNRS, avenue du Colonel Roche -31077 Toulouse, France dahhou@laas.fr

Biochimique et Alimentaire (DGBA) de L'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA).

II. OBJECTIFS

Les grands objectifs de cette thèse sont :

1. Développer des algorithmes à base de réseaux de neurones, de logique floue et hybrides (approche Neuro-floue) pour la des systèmes non linéaires en général et pour le procédé de fermentation (objet de l'application) en particulier.
2. Le diagnostic dans les procédés de fermentation par les techniques du soft computing.
3. Développer une méthode d'hybridation entre les techniques du soft computing pour la conception de systèmes intelligents.

III. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT

La commande et le diagnostic des systèmes complexes, caractérisés par caractérisés par des non-linéarités, une dimension très grande et une imprécision de leurs modèles mathématiques, ont conduit les chercheurs à l'utilisation des techniques sans modèles telles que la logique et les réseaux de neurones. Ces techniques se distinguent des outils classiques de l'automatique classique par le fait quelles peuvent être utilisées pour synthétiser une loi de commande ou la conception d'un système de diagnostic à partir de l'expertise de l'opérateur humain (pour l'approche par logique flou) ou à partir d'un processus d'apprentissage (pour le cas des réseaux de neurones), alors que les approches classiques consistent à élaborer une loi de commande ou un système de diagnostic à partir d'un modèle mathématique du procédé. Ces modèles (mathématique) sans souvent imprécis et difficile à obtenir. On cherchera donc à surmonter ces difficultés par l'usage des techniques sans modèles citées ci-dessus. Au s'intéressera aussi à l'hybridation entres ces techniques. Les inconvénients relatifs à ces techniques à savoir d'une par les connaissances des experts utilisées dans les systèmes flous qui sont coûteuses et d'autre part le choix de la topologie des réseaux de neurone qui s'effectue par tâtonnement seront traités. Il s'agit d'utiliser les algorithmes génétiques pour l'ajustement des paramètres intervenant dans la synthèse des systèmes flous et de rechercher la topologie optimale des réseaux de neurones en agissant sur le nombre de couches et le nombre de neurones dans chaque couche. L'association des ces technique constituera donc un moyen efficace pour mettre en commun la puissance de chaque technique à la conception des systèmes autonomes, d'une

fonctionnalité intelligente qui le but visé par les systèmes intelligents

IV. ETAT DES TRAVAUX

Durant la première année (2004), une recherche bibliographique exhaustive a été faite sur les techniques du soft computing parmi lesquelles les algorithmes génétiques (simples et hiérarchisés), la logique floue et les réseaux de neurones. Une synthèse bibliographique a été rédigée sous forme d'un rapport interne au laboratoire de technologie industrielle et de l'information (LT2I) de l'Université de Béjaia. La deuxième année (2005) a été consacrée principalement à la programmation d'algorithmes d'identification et de commande sous l'environnement Matlab. Il s'agit de:

1. Des algorithmes à base de réseaux de neurones, de logique floue et hybrides (approche Neuro-floue) ont été développés pour la commande des systèmes non linéaires en général et pour le procédé de fermentation (objet de l'application) en particulier.
2. Des algorithmes d'identification à base d'algorithmes génétiques et de réseaux de neurones pour compléter la partie commande.

Cette troisième année (2006) est consacrée d'une part, au diagnostic de fautes dans le procédé de fermentation en utilisant l'approche de diagnostic sans modèle basée sur les réseaux de neurones et la logique floue. Un rapport rentrant sur ce sujet a été réalisé et fait l'objet d'un rapport interne au laboratoire LTII. D'autre part, trois (3) articles ont été rédigés et soumis à publications dans des conférences internationales prévues en 2006 et 2007. Il s'agit de:

1. O. Guenounou, A. Belmehdi et B. Dahhou, "Optimisation de Contrôleurs Flous par AGH, Application à la Commande d'un Bioprocédé". Dans Cet article, nous avons employé les algorithmes génétiques hiérarchisés (version améliorée des algorithmes génétiques simples) pour l'optimisation des fonctions d'appartenance et les règles floues intervenantes dans la phase de conception des contrôleurs flous.

2. O. Guenounou, A. Belmehdi et B. Dahhou, "A New Neuro Fuzzy Controller Structure For Nonlinear Systems". Dans cet article une nouvelle architecture est développée pour les systèmes Neuro-flous en introduisant l'action intégrale dans la nouvelle architecture. Cette dernière est très importante pour résoudre les problèmes liés à la stabilité dans le cas pratique.

3. O. Guenounou, A. Belmehdi et B. Dahhou, "Optimization of Fuzzy Controllers by Neural Networks and Hierarchical Genetic Algorithms". Dans cet article, un algorithme hybride a été développé pour réduire la complexité de conception de contrôleurs flous. Cet algorithme se déroule en deux phase : Dans la première phase, l'algorithme de retro-propagation propre aux réseaux de neurones est utilisé pour l'optimisation des paramètres des fonctions d'appartenance

et les conclusions des règles flous d'un contrôleur de type Sugeno d'ordre zéro. Cet algorithme est précis, mais il gère mal les optimums locaux. Afin de contourner cet inconvénient nous avons introduit dans la seconde phase, un algorithme de recherche globale utilisant un algorithme génétique hiérarchisé (AGH). Cet algorithme présente une structure hiérarchique de son chromosome contient deux types de gènes (gènes de paramètres et gènes contrôle). Dans notre cas, les gènes de contrôle sont utilisés pour l'activation des règles floues ce qui a permis de réduire le nombre de règles floues dans la base du contrôleur flou alors que les gènes de paramètres sont utilisés pour une seconde optimisation des paramètres des fonctions d'appartenance. Un autre article de synthèse de l'ensemble des résultats obtenus est en voie de finalisation. Il sera soumis à une revue de renommée internationale.

V. PUBLICATIONS

1. O. Guenounou, A. Belmehdi et B. Dahhou, "Optimisation de Contrôleurs Flous par AGH, Application à la Commande d'un Bioprocédé". Cet article a été soumis à la Septième conférence internationale des Sciences et Techniques de l'Automatique 'STA'2006' qui se déroulera du 17 au 19 décembre à Hammamet Tunisie.

2. O. Guenounou, A. Belmehdi et B. Dahhou, "A New Neuro Fuzzy Controller Structure For Nonlinear Systems" soumis à International Conference on Systems Analysis and Automatic Control qui aura lieu du 19 au 22 Mars 2007, Tunisie.

3. O. Guenounou, A. Belmehdi et B. Dahhou, "Optimization of Fuzzy Controllers by Neural Networks and Hierarchical Genetic Algorithms" submitted to 'European Control Conference ECC'07, Kos, Greece 2-5 July 2007.

REFERENCES

- [1] H. X. Li, and H. B. Gatland, A New Methodology for designing a fuzzy logic control, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics.*, vol. 25, 1995, pp 505-512.
- [2] Y. S. Zhou and , L. Y. Lai, Optimal Design for Fuzzy Controllers by Genetic Algorithms, *IEEE Trans. on Industry Applications.*, vol. 36, 2000, pp 93-97.
- [3] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms +Data Structures=Evolution Programs*, Edition Springer, USA; 1996.
- [4] C.L. Karr, and E.J. Gentry, Fuzzy control of pH using genetic algorithms, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems.*, vol. 1, 1993, pp 46-53.
- [5] G. Acosta and E.Todorovich, Genetic algorithms and fuzzy control: a practical synergism for industrial applications, *Computers in Industry.*, vol 52, 2003, pp 183-195.
- [6] K. Sang, K.F. Man, Z.F. Liu, and S.K. Wong, Minimal fuzzy memberships and rules using hierarchical genetic algorithms, *IEEE Trans. on Industrial Electronics.*, vol. 45, 1998, pp 162-169.
- [7] J. S. R. Jang, and C.T. Sun, Neuro-Fuzzy Modeling and Control, *Proceeding of the IEEE.*, vol. 83, 1995, pp 378-406.
- [8] K. S. Narendra, and K. Parthasarathy, Gradient Methods for the optimization of dynamical Systems Containing Neural Networks, *IEEE Trans. on Neural networks.*, vol. 2, 1991, pp 252-262.
- [9] J. H. Holland, *Adaption in Natural and Artificial Systems* Adaption in Natural and Artificial Systems, MIT Press, Cambridge; 1975.
- [10] T. Xiang, K. F. Man, K. M. Luk, and C. H. Chan, Design of Multiband Miniature Handset Antenna by MoM and HGA, *IEEE Antennas and wireless propagation letters.*, vol. 5, 2006, pp 179-182.
- [11] T. Takagi, and M. Sugeno, Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics.*, vol. 15, 1985, pp 116-132.

MONTSENY Emmanuel

Modélisation, analyse et identification de certains systèmes dynamiques non-linéaires de processus biologiques.

E. Montseny

Sous la responsabilité de

A. DONCESCU

2006

1 Problématique

Les cellules biologiques analysées dans un environnement complexe sont capables de recevoir des informations concernant les paramètres physico-chimiques, les interactions avec d'autres cellules, l'activité métabolique propre, les détériorations de l'ADN ou de la membrane, etc.. Les cellules répondent à ces signaux par une production de protéines qui agissent au niveau microscopique et macroscopique. Pour pouvoir prédire cette production il est nécessaire de construire des modèles mathématiques qui doivent être un compromis entre la complexité et la précision, ainsi qu'une phase d'identification du modèle souhaitable pour la supervision et le diagnostic des systèmes biologiques.

2 Objectif

L'estimation de paramètres des modèles biologiques a connu un succès important dans les années 90 mais la connaissance incertaine de certains modèles et les fortes non linéarités ont limité l'utilisation des méthodes existantes dans le cas de modèle complexes comme les réseaux métaboliques. L'ambition de cette recherche est de développer des nouvelles méthodes mathématiques pour l'analyse du comportement dynamique des systèmes métaboliques. Dans ce cas-là il s'agit d'analyser la redistribution des flux dans un organisme soumis à une perturbation. Cette démarche vise à déterminer quantitativement les points-clés de l'adaptation métabolique et doit aboutir, à terme, à une capacité de prédiction particulièrement recherchée dans un contexte de génie métabolique.

Certaines méthodes originales récemment introduites et développées au LAAS, basées sur une approche opératoire des problèmes dynamiques, ont été utilisées avec succès pour la modélisation et l'identification de certains phénomènes physiques complexes (de nature répartie, fortement non linéaires). Compte tenu de nombreuses similitudes, elles devraient pouvoir lieu à une approche originale bien adaptée aux problèmes évoqués, dans l'objectif d'améliorer la maîtrise des modèles dynamiques associés aux systèmes biologiques.

3 Contexte et positionnement

D'une manière plus précise, l'approche est basée sur la perturbation du système analysé supposé en régime stationnaire par un pulse d'un métabolite présent sous forme d'une variable dans le modèle analytique. A partir de la réponse obtenue il est possible de déduire les relations entre la variable perturbée et une partie des variables internes. Pour des modèles complexes, l'inspection des pics et la pente de la réponse directement liée à la concentration du métabolite n'est pas possible. L'extraction de l'information à partir des réponses suppose la coopération de deux parties :

a) le développement d'un modèle capable d'observer la dynamique du système avec beaucoup de précision

b) les outils mathématiques qui permettent d'ajuster le modèle aux observations expérimentales

Par rapport aux modèles linéaires, par nature très limités, les modèles non-linéaires offrent une bien plus grande richesse. Ils nécessitent évidemment des approches spécifiques. Une stratégie possible est basée sur la définition et l'utilisation de formes canoniques. L'exemple classique de forme canonique est la modélisation Lotka-Volterra, dont l'origine se trouve en écologie. Cette forme s'appuie sur l'interaction entre seulement deux espèces à la fois, l'exemple type étant la dynamique prédateur-proie. L'inconvénient de cette méthode pour l'étude de certains systèmes biologiques, comme les voies métaboliques ou la fermentation alcoolique, est que le métabolite dépend fortement de plusieurs composants. Un autre exemple est l'état physiologique nommé diauxie où on se trouve en présence d'un double substrat.

La déduction d'un modèle non linéaire à partir des données expérimentales est un problème inverse dont la solution peut être cherchée par régression au sens des moindres carrés entre les données et le modèle. Cependant, les algorithmes de recherche itératifs sont souvent entravés par l'existence des minima locaux empêchant la convergence. Une amélioration a été constatée en utilisant les méthodes d'inférence Bayésiennes ou les algorithmes génétiques. Cependant, pour des systèmes non bruités et de taille réduite, et solution obtenue nécessite en général plusieurs heures de calcul sur un cluster de PC. Une autre alternative est l'estimation non-linéaire comme les NARMAX. Bien que présentant un caractère générique, ces méthodes ne peuvent pas traiter de fortes non-linéarités.

Les méthodes opératoires spécifiquement introduites au LAAS pour le traitement de problèmes non linéaires de grande dimension (tels les problèmes aux dérivées partielles) constituent une alternative originale et a priori bien adaptée à ce type de problèmes.

FRAGKOULIS Dimitrios

Nom :

FRAGKOULIS Dimitrios

Directeur de thèse :

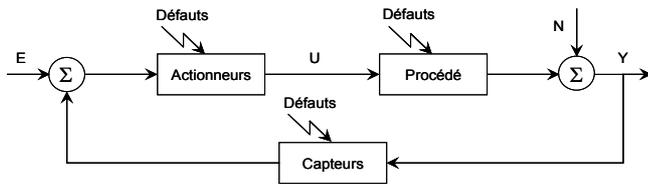
DAHOU Boutaieb et ROUX Gilles

Problématique :

Détection et isolation de défauts provenant d'actionneurs et de capteurs dans un système non linéaire.

Objectif des travaux (dans quel cadre) :

Les systèmes industriels sont devenus de plus en plus complexes avec l'automatisation de boucles de contrôle. Un fort intérêt s'est donc manifesté à propos de la sûreté de fonctionnement de ces systèmes. Cet intérêt s'est tout d'abord focalisé sur les grands systèmes comme ceux de l'aérospatial, du nucléaire et de la biotechnologie. Les raisons pour lesquelles nous nous sommes intéressés à la sûreté de fonctionnement de ces systèmes sont la sécurité (humaine et environnementale), la nécessité d'augmenter la productivité et la fiabilité. Cela s'est traduit par l'apparition des méthodes de surveillance dont le but est la détection et l'isolation des défauts (FDI).



Notre objectif est l'étude de défauts provenant des actionneurs et des capteurs. Le cas des défauts sur le procédé a été étudié dans la thèse de LI Zetao [11]. A cette fin nous allons développer des algorithmes pour la détection et la localisation de défauts en utilisant le modèle continu du système. En plus des défauts singuliers, ces algorithmes devront nous permettre de détecter et d'isoler les défauts multiples.

Ce travail est financé par une bourse d'étude doctorale du gouvernement grec.

Contexte et positionnement :

Il existe trois approches principales pour la FDI [6] : la première est basée sur des modèles quantitatifs, la deuxième sur des modèles qualitatifs et la troisième sur la connaissance du procédé. En ce qui concerne l'approche basée sur les modèles quantitatifs, les techniques des résidus sont utilisées pour la détection et l'isolation des défauts. Les méthodes les plus caractéristiques de ce groupe sont : la redondance analytique, les observateurs basés diagnostics,

les relations de parité et les filtres de Kalman. Pour l'approche basée sur des modèles qualitatifs, les méthodes les plus caractéristiques sont : les graphes signés (SDG), les arbres de décision, la simulation qualitative (QSIM), et la théorie des processus qualitatifs (QPT). Finalement dans l'approche basée sur la connaissance on a : des méthodes qualitatives, telles que les systèmes experts et les techniques d'analyse de tendance (QTA), les méthodes quantitatives, telles que les réseaux de neurones, l'analyse en composantes principales (PCA) et les classificateurs statistiques. Dans ces travaux on se focalisera sur une approche à base de modèle quantitatif et plus spécifiquement sur les méthodes utilisant des observateurs non linéaires.

Les méthodes à base d'observateurs sont assez bien développées surtout pour les systèmes linéaires. Différents types d'observateurs ont été créés en fonction de la nature des problèmes à traiter. Les observateurs basés sur l'utilisation de tout l'état du système ou seulement de la sortie mesurée et les filtres de détection pour les procédés multi sorties sont utilisés. Des travaux plus récents traitent des développements théoriques de méthodes de (FDI) pour les systèmes non linéaires. Par exemple, on trouve les observateurs en mode glissant [2, 5] et les observateurs adaptatifs [3, 4] qui sont les méthodes les plus connues dans la littérature pour les systèmes non linéaires. Dans ces méthodes, un résidu est construit en utilisant la différence entre la sortie du système non linéaire et la sortie de l'observateur.

Dans ce travail, nous proposons un observateur qui inclue les avantages des observateurs adaptatifs et les propriétés des observateurs en mode glissant. Il est nécessaire de construire autant d'observateurs que l'on a d'actionneurs et de capteurs à surveiller.

Les avantages de cet observateur sont au nombre de deux : tout d'abord, il permet la détection et l'isolation des défauts multiples, ensuite il localise les défauts rapidement par rapport aux autres méthodes. De plus cet observateur peut s'appliquer à des systèmes linéaires ou non linéaires, nous allons donc faire une étude comparative entre ces deux cas. L'inconvénient majeur est qu'il s'adresse à une classe de modèles non linéaires de la forme :

$$\dot{x} = A(x) + B(x)u$$

Où x est l'état du système, $A(x)$ est une fonction non linéaire de l'état, $B(x)$ est une matrice dont tous les éléments sont non linéaires et u est le vecteur de commande du système.

Par la suite, nous étendrons la méthodologie développée dans [11] pour l'isolation de défauts sur la dynamique du système, à l'isolation de défauts sur les actionneurs et les capteurs. Cette méthodologie est basée sur des intervalles de paramètre.

Etat d'avancement des travaux :

Nous avons fait une étude bibliographique approfondie sur les différentes méthodes de détection et d'isolation de défauts existantes dans la littérature. Elle nous a permis d'orienter nos recherches vers les approches à base de modèles. Parmi ces approches, on peut citer : celle de l'espace de parité qui a été étudiée pour les systèmes linéaires ([13], [14]) mais aussi pour les systèmes non linéaires ([15], [16]). D'autres observateurs ont été développés dans le cas linéaire et non linéaire ([9]), on peut citer les observateurs de Luenberger étendu ([8], [12]), les observateurs à entrée inconnue (UIO) ([15], [16]), les observateurs en mode glissant ([2], [5]) et les observateurs adaptatifs ([3], [4]).

Notre travail concerne le développement de méthodologies utilisant des observateurs non linéaires.

On a choisi comme modèle non linéaire, le modèle d'un procédé de traitement biologique des eaux usées [10]. C'est un modèle stable d'ordre 9 avec 4 entrées et 4 sorties. On a construit un modèle du système avec l'aide du logiciel MATLAB Simulink. Le fait d'avoir développé ce modèle sous Simulink, nous a permis d'introduire aisément des défauts sur les actionneurs et les capteurs. Ceci nous permettra de tester avec beaucoup plus de facilité la pertinence des algorithmes proposés. Afin de pouvoir appliquer la version linéaire de cet observateur, il a été nécessaire de trouver le point de fonctionnement du système et de linéariser notre système.

Dans un premier temps, nous avons limité notre étude au cas des actionneurs et comparé les résultats issus des deux versions linéaire et non linéaire. Pour cela, nous avons construit autant d'observateurs que d'actionneurs à surveiller. La forme générale de l'observateur est donnée par les expressions suivantes :

Cas linéaire :

$$\dot{\hat{x}}_i = H(\hat{x}_i - x) + Ax + \sum_{j \neq i} b_j u_j + b_i \hat{\theta}_i$$

$$\dot{\hat{\theta}} = -2\gamma \tilde{x}_i^T P b_i, \quad 1 \leq i \leq m$$

Cas non linéaire :

$$\dot{\hat{x}}_i = H(\hat{x}_i - x) + A(x) + \sum_{j \neq i} b_j(x) u_j + b_i(x) \hat{\theta}_i$$

$$\dot{\hat{\theta}} = -2\gamma \tilde{x}_i^T P b_i(x), \quad 1 \leq i \leq m$$

\hat{x} est l'état de l'observateur, $B = (b_1 \dots b_m)$ ou $B(x) = (b_1(x) \dots b_m(x))$, γ est une constante, $\tilde{x}_i^T = (\hat{x}_i - x)$, H est une matrice de Hurwitz et P est une matrice définie positive. Ces deux matrices peuvent être déterminées par l'équation :

$$H^T P + P H = -Q$$

La matrice Q est aussi une matrice définie positive.

Dans un premier temps, pour voir la validité de la méthode, nous avons utilisé une version simplifiée de notre système (seul deux actionneurs sont considérés) que nous avons linéarisé. Pour la simulation, nous avons utilisé des données réelles comme variables de commande du système. Elles sont donc entachées de bruit de mesure.

Sur les figures suivantes nous avons représenté les deux résidus issus des deux observateurs. Dans la figure 1 on constate que le résidu du premier observateur quitte le zéro au temps $t=15h$ alors que le résidu du second observateur demeure à zéro. Il est possible d'en déduire que le défaut se situe sur le premier actionneur et qu'il s'est produit au temps $t=15h$. De la même manière, la figure 2, permet de déduire qu'au temps $t=25h$, l'algorithme est capable de détecter et isoler le défaut du deuxième actionneur.

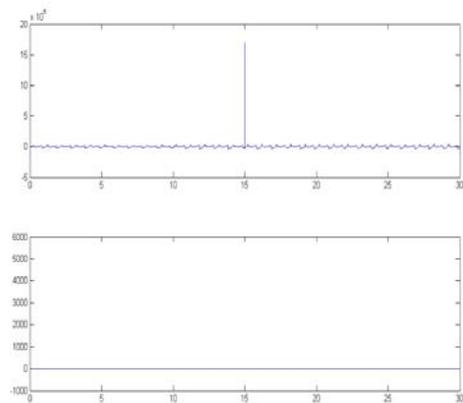


Figure 1

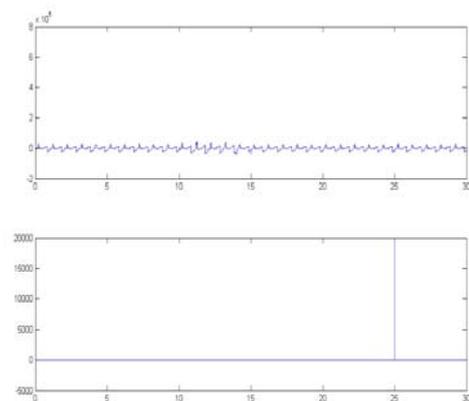


Figure 2

Afin de tester la pertinence de l'algorithme en présence des défauts multiples, nous avons introduit deux défauts : sur le premier actionneur au temps $t=15h$ et sur le deuxième actionneur au temps $t=25h$. Les résultats sont présentés sur la figure 3, on constate que le résidu résultant du premier observateur quitte le zéro au temps $t=15h$ et le résidu

résultant du second observateur quitte le zéro au temps $t=25h$.

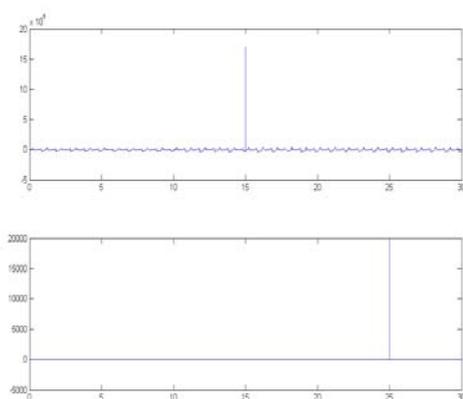


Figure 3

Cette étude sur la détection et l'isolation de défauts sur les actionneurs doit être approfondie en comparant les résultats obtenus dans le cas linéaire et non linéaire. Ensuite, nous ferons l'extension de cette méthodologie pour la détection et l'isolation des défauts issus des capteurs.

Référence:

- [1] Weitian Chen and Mehrdad Saif (2005). An Actuator Fault Isolation Strategy for Linear and Nonlinear Systems. *American Control Conference* June 8-10, 2005. Portland, OR, USA
- [2] Edwards, C. and S. Spurgeon (1994). On the development of discontinuous observers. *Int. J. Control*, vol. 59, pp.1211-1229, 1994
- [3] X. Ding & P. M. Frank, (1992). Fault Diagnosis Using Adaptive Observers. *SICICI'92*, Singapore, 1992.
- [4] Gauthier, J.P., H. Hammouri and S. Othman (1992). A simple observer for nonlinear systems applications to bioreactors. *IEEE Trans. on Automatic Control* 37(6), 875–880.
- [5] Weitian Chen, Guangqing Jia and Mehrdad Saif, (2005). Application of Sliding Mode Observers for Actuator Fault Detection and Isolation in Linear Systems. *IEEE Conference on Control Applications* Toronto, Canada, August 28-31, 2005
- [6] Venkat Venkatasubramanian, Raghunathan Rengaswamy, Kewen Yin, Surya N. Kavuri (2003). A review of process fault detection and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering* 27 (2003). 293-311
- [7] Li, Zetao and Dahhou, B. (2006). An observer based fault isolation approach for nonlinear dynamic systems. *Proceeding of Second International Symposium on Communication, Control and Signal Processing*, Marrakech-Morocco, 13-15 March, (2006).
- [8] Luenberger, D.G. (1971). An introduction to observers. *IEEE Trans. Automat. Contr.* Vol. AC-16, No. 6, 596-602, (1971).
- [9] De Persis, C., and Isidori, A. (2001). A geometric approach to nonlinear fault detection and isolation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(6), pp. 853-865.
- [10] Nejjarı F. (2001). Benchmark of an Activated Sludge Plant, Internal report. (2001), Terrassa, Spain
- [11] Li, Z (2006). Contribution a l'élaboration d'algorithmes d'isolation et d'identification de défauts dans les systèmes non linéaires. *Thèse de doctorat* INSA Toulouse France 2006.
- [12] Tarantino Rocco, Ferenc Szigeti and Eliezer Colina-Morles. (2000). Generalized Luenberger observer-based fault-detection filter design: an industrial application. *Control Engineering Practice* 8 (2000) 665-671

- [13] Li Weihua and Sirish Shah. (2002). Structured residual vector-based approach to sensor fault detection and isolation. *Journal of Process Control* 12 (2002) 429-443
- [14] Qin S. Joe and Weihua Li. (1999). Detection, Identification and Reconstruction of faulty sensors with maximized Sensitivity. *AIChE Journal*, 45, 1963-1976
- [15] Christophe, C. (2001). Surveillance des systèmes non linéaire. Application aux machines électriques. *Thèse de doctorat*. Université des sciences et technologies de Lille.
- [16] Kabbaj, N (2004) Développement d'algorithmes de détection et d'isolation de défauts pour la supervision des bioprocédés. *Thèse de doctorat*. Université de Perpignan

FELLOUAH Rabah

JOURNEE DU GROUPE DISCO

Nom : Rabah FELLOUAH

**Directeur de thèse : Félix MORA-CAMINOU
Andrei DONCESCU**

Problématique :

Depuis un peu plus de dix ans, les automaticiens ont été amenés, dans le cadre de la commande des systèmes mécaniques articulés, et plus précisément dans le cadre de la problématique du suivi de trajectoires par ce type de systèmes, à définir une nouvelle classe de systèmes, les systèmes différentiellement plats. Cette notion de platitude a été introduite par Fliess. Les états et les entrées des systèmes plats peuvent s'exprimer en fonction de sorties particulières dite « sorties plates » et de leurs dérivées successives. Cette propriété s'est avérée être particulièrement intéressante pour la synthèse de lois de guidage le long d'une trajectoire et semble aussi avoir un intérêt dans le domaine de la détection de pannes. Ainsi, cet ensemble de relations entre les sorties plates et les variables d'états d'une part et entre les sorties plates et les variables d'entrée d'autre part, constituent autant de relations potentiellement disponibles pour la mise en œuvre de redondance analytiques. Néanmoins, dans beaucoup de cas, la platitude est de type implicite et ces relations ne peuvent pas être exploitées directement pour la génération de résidus et par conséquent pour la détection de pannes. Il s'agit donc de développer des méthodes et des outils pour rendre ceci possible.

Objectif des travaux (dans quel cadre) :

Notre objectif est de développer une approche de diagnostic de pannes à base de modèle pour les systèmes dynamique non linéaires en utilisant les propriétés de platitude et les nouvelles méthodes d'estimations rapides issues de l'algèbre différentielle. Ce choix se justifie essentiellement par son application à un modèle dynamique du vol d'un avion de transport.

Les systèmes de détection et de localisation de pannes par l'approche FDI (Fault detection and Isolation) jouent un rôle de plus en plus important en raison de la complexité croissante et de la menace qu'exercent certaines installations industrielles. Leur rôle est d'assurer un diagnostic sûr et fiable où seuls les paramètres de synthèse sont donnés à l'initiative de l'opérateur. Ils incluent à la fois la détection, la localisation, l'identification des défauts. L'un des principaux centres d'intérêt de la recherche dans ce domaine consiste à utiliser un modèle de façon à établir une redondance analytique.

Cette approche utilise principalement les techniques de traitement du signal (filtrage, identification, estimation et statistique). Les fonctions de détection et de localisation de pannes sont généralement réalisées en deux étapes : génération de résidus, logique de décision.

La première étape d'un système de diagnostic à base de modèle consiste à générer des signaux qui restent identiquement nuls lors du fonctionnement normal, et qui réagissent aux fautes auxquelles ils sont sensibles. La deuxième étape consiste à évaluer les résidus en calculant la vraisemblance des résidus relatifs aux éventuelles pannes. Souvent un résidu scalaire suffit pour détecter une panne dans le système. Cependant, pour la localiser, un vecteur de résidus sensibles aux différentes pannes est nécessaire.

La génération de résidus est donc à la base de la conception d'un système de diagnostic par redondance analytique. Néanmoins, dans le cas des systèmes non linéaires dynamiques, comme c'est le cas de notre système (système de dynamique du vol), la réalisation de cette tâche avec les méthodes

classiques de l'FDI est très difficile en raison des non-linéarités, des variables non observables et des pannes non additives.

Le fil directeur de notre travail est d'une part, l'application de la notion de platitude et ses propriétés afin de dégager l'ensemble des relations analytiques nouvelles qui relient indépendamment les variables d'entrées et les variables d'états des systèmes plats à des variables particuliers dites « sorties plates » et de leurs dérivées successives. Et d'autre part, l'application des outils qu'offre aujourd'hui l'algèbre différentielle pour l'estimation de ces dérivées successives. Alors, à partir de la, on peut générer des résidus qui permettront de concevoir un système de diagnostic.

Etat d'avancement des travaux :

➤ Réalisation d'un état de l'art sur le diagnostic à base de modèle (FDI)

Un état d'art sur les approches de diagnostic à base de modèle a été fait, Nous nous sommes plus intéressés principalement aux approches les plus classiques de l'FDI (*Fault Detection and Isolation*), à savoir : Identification paramétriques, Estimation d'état (Observateurs) et Espace de parité. Ces approches issues de la communauté de l'automatique, s'appuyaient sur les modèles quantitatifs. Cette étude a été faite dans le but d'entourer notre contribution dans cette communauté avec l'introduction de la propriété de platitude partagée par de nombreux systèmes pratiques.

➤ Le modèle dynamique du vol et la platitude

Nous avons réalisé à partir du modèle dynamique globale du vol d'un avion, une structure en double tandem (figure 1) qui offre des nouvelles relations analytiques entre les entrées et sorties plates d'une part, et les variables d'états et sorties plates d'autres part. Cette structure pourra être rencontrée lorsque l'on étudie simultanément les dynamiques longitudinale et latérale d'un avion.

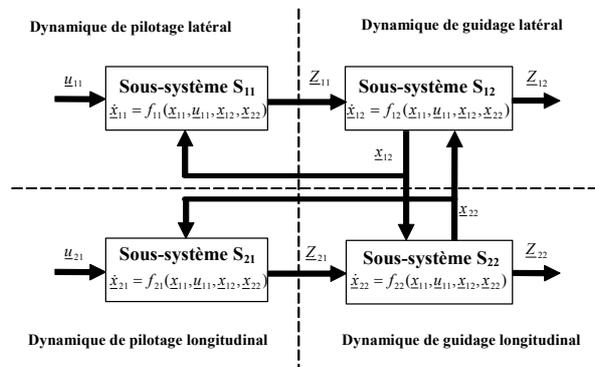


Figure 1 : structure en double tandem

➤ Diagnostic

Notre objectif est d'arriver à concevoir un algorithme de détection de pannes pour tout le système représenté par la structure double tandem. Pour le moment, nous avons opté pour la conception des algorithmes pour chaque sous-système indépendamment. Nous avons fini avec le sous-système représentant la dynamique de guidage longitudinale. Actuellement, nous travaillons sur le modèle de la dynamique de pilotage longitudinal. La prochaine étape sera consacrée à la dynamique de pilotage et de guidage latérale.

Publications

- R.FELLOUAH, W.C.LU, F.MORA CAMINO, A.DONCESCU, "Differential flatness and fault detection in flight guidance dynamics" IFAC/Safeprocess'2006, Symp. On "Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes", Beijing (Chine), 29-31 August 2006
- R. FELLOUAH, F.MORA CAMINO, "Systèmes plats et détection de pannes dans la dynamique du vol" Congrès des doctorants, Tarbes, 11 Mai 2006.

Références

- [1] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, P. Rouchon, "Flatness and Defect of Non-linear Systems: Introductory Theory and Examples", *Int. J. Control*, 1995, Vol.61, No. 6, 1327-1361.
- [2] M. Fliess, H. Sira-Ramirez, "Control via State Estimations of Some Nonlinear Systems" *Semi plenary talk. Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS-2004), Stuttgart, September 2004*
- [3] M. Fliess, H. Sira-Ramirez, "Reconstructeurs d'état", *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. I* 338 (2004).
- [4] J. Reger, H. Sira-Ramirez, M. Fliess, "On Non-asymptotic Observation of Nonlinear Systems" *In: Proc. of 44th IEEE Conference on Decision and Control, Sevilla, Spain, 12-15 December 2005.*
- [5] M. Fliess, C. Join, "An algebraic approach to fault diagnosis for linear systems", *Proc. CESA Conf., 2003.*
- [6] M. Fliess, C. Join, M. Mboup, A. Sedoglavic, "Estimation des dérivées d'un signal multidimensionnel avec application aux images et aux vidéos", *GRETSI, Louvain-la-Neuve, Belgique, 2005*
- [7] M. Fliess, C. Join, H. Sira-Ramirez, "Robust residual for linear fault diagnosis: An algebraic setting with examples", *International Journal of Control*, 200?, Vol. ??, No. ?, 1-20.
- [8] W. Lu, F. Mora-Camino, K. Achaibou, "Differential Flatness and Flight Guidance: A Neural Adaptive Approach", *AIAA, Guidance Navigation and Control Conference, San Francisco, 15-18 August 2005.*
- [9] W. Lu, F. Mora-Camino, K. Achaibou, "A Flatness Based Flight Guidance Control Using Neural Networks", *24th Digital Avionics Systems Conference, 30 October-3 November 2005. Vol. 1,*
- [10] W. Lu, « Contribution au Suivi Automatique de Trajectoire par un avion : Commande Plate et Réseaux de Neurones », *Thèse doctorale, Université Toulouse II, Toulouse, décembre 2005.*
- [11] S. L. Campbell, W. J. Terrell, "Determining Flatness for Complex Nonlinear Systems", *IEEE, Proceedings, Southeastcon '95. 'Visualize the Future', 26-29 March 1995, Page(s): 118-122.*
- [12] R. Hermann, A. J. Krener, "Nonlinear Controllability and Observability", *IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-22, No. 5, October 1977.*
- [13] R. Mattone, Alessandro De Luca, "Conditions for Detecting and Isolating Sets of Faults in Nonlinear Systems", *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005, Seville, Spain, December 12-15, 2005.*
- [14] G. Betta, A. Pietrosanto, "Instrument Fault Detection and Isolation: State of the Art and New Research Trends". *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, St. Paul, Minnesota, USA, May 18-21, 1998*
- [15] E. Y. Chow, A. S. Willsky, "Redundancy and the Design of Robust Failure Detection Systems", *IEEE Trans. Aero. Elect. Sys. 11(4), 465-473.1984*
- [16] R. Isermann, Supervision, "fault-detection and fault-diagnosis methods an introduction", *Control Engineering Practice, tome 5(5), 387-404.1997.*

- [17] R. Isermann, “[Process fault detection based on modelling and estimation](#)”. *Automatica* 20(4), 387-404, 2004.
- [18] R. N. Clark, D. C. Fosth, W. M. Walton, “[Detecting instrument malfunctions in control systems](#)”. *IEEE Trans. Aero. Elect. Sys.* 11(4), 465-473, 1975
- [19] Q. Zhang, M. Basseville, Benvenise, “[Fault detection and isolation in nonlinear dynamic: A combined input-output and local approach](#)”. *Automatica, Special Issue, tome 34(11)*, 1359-1373, 1998.
- [20] J. Gertler, “[On-line fault detection in uncertain non linear system using diagnostic observers](#)”, *A survey. Int. J. Systems SCI.*, 25(12), 2129-2154, 1988.

ZHANG Nan

Platitude Différentielle et Détection de Fautes dans les Systèmes de Conduite du Vol

Nan ZHANG

Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes-CNRS

Responsable : Félix MORA CAMINO

I. Problématique

L'important accroissement du trafic aérien durant les dernières décennies a conduit à une relative saturation de l'espace aérien, notamment au voisinage des zones aéroportuaires et des problèmes environnementaux (pollution, bruit). Les automatismes embraqués permettent aujourd'hui à l'avion de suivre de façon automatique un plan de vol prédéfini et éventuellement d'effectuer quelques manœuvres d'évitement. De nouveaux besoins sont donc apparus : manœuvre complexes d'évitement, guidage relative, vol en formation, approches et descentes continues, etc. Ainsi, si les premières lois de pilotages et guidage automatique ont adopté des modèles linéarisés de la dynamique du vol pour leur synthèse, cette approche devient insuffisante dans le cadre de manœuvres évolutives beaucoup plus complexes où la dynamique longitudinale et la dynamique latérale interagissent fortement.

La platitude différentielle, notion de géométrie différentielle, est une propriété mathématique présentée par certains systèmes dont la dynamique est décrite par des équations différentielles continues. Elle a permis récemment d'aborder de façon analytique (ou parfois simplement numérique) le difficile problème de la synthèse de lois de command pour des systèmes de dynamique non linéaire. Il a été montré que de nombreux systèmes non linéaires possèdent cette propriété qui n'est pas sans rappeler la propriété de commandabilité des systèmes linéaires. Dans le domaine aéronautique, la propre dynamique de guidage des avions de

transport, ont toutes été prouvées, dans le cadre d'hypothèses acceptables, présenter cette propriété.

Dans le cadre de l'étude des systèmes linéaires, la notion d'observabilité apparaît comme duale de celle de commandabilité, la propriété d'observabilité assurant la possibilité de construire des outils de détection et d'identification (FDI) de fautes dans ces systèmes.

II. Objectif

Dans cette recherche doctorale, on essaiera de mettre à profit la propriété de platitude différentielle, au niveau d'un système dans son ensemble, comme au niveau de ses sous systèmes, pour développer des structures de détection et d'identification de pannes dans les systèmes non linéaires, et plus particulièrement dans le cadre de la conduite du vol des aéronefs.

La platitude différentielle de la dynamique du vol, compte tenu des effets aérodynamiques qui ne sont en général pas modélisés de façon analytique, présente un caractère implicite. Ceci conduira à la construction de réseaux de neurones permettant l'inversion des relations implicites reliant entrées et sorties globales ou intermédiaires du système. Ceci constituera une partie importante du travail. On s'intéressera aussi naturellement à la commande tolérante aux fautes, basée sur cette même propriété de platitude différentielle.

L'étude doctorale utilisera les moyens de simulation de la dynamique du vol du Laboratoire LARA du département de Transport Aérien de l'ENAC.

III. Références

- [1]. Andrés Marcos, Gary J. Balas & Jozsef Bokor, "Integrated FDI and Control for Transport Aircraft", AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 15-18 August 2005, San Francisco, California. AIAA 2005-5937.
- [2]. Basappa & Ravindra V. Jategaonkar, "Evaluation of Recursive Methods for Aircraft Parameter Estimation", AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit 16-19 August 2004, Providence, Rhode Island. AIAA 2004-5063.
- [3]. Colin N. Jones & Pembroke College, "Reconfigurable Flight Control First Year Report", Control Group Department of Engineering University of Cambridge, March 4, 2005.
- [4]. Edward Wilson & Robert W. Mah, "Automatic Balancing and Intelligent Fault-tolerance for a Space-Based Centrifuge", AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 15-18 August 2005, San Francisco, California. AIAA 2005-6377.
- [5]. Girija Gopalratnam, Christoph Zorn & Andreas Koch, "Multi Sensor Data Fusion for Sensor Failure Detection and Health Monitoring", AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 15-18 August 2005, San Francisco, California. AIAA 2005-5843.
- [6]. Jin Jiang, "Fault-Tolerant Control System Design and Analysis", Department of Electrical and Computer Engineering the University of Western Ontario London, Ontario N6A 5B9 Canada. January 2005.
- [7]. Jong-Yeob Shin, "Gain-Scheduled Fault-Tolerance Control under False Identification", AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 15-18 August 2005, San Francisco, California. AIAA 2005-5940.
- [8]. Kwang Hoon Kim & Jang Gyu Lee, "Extension of Parity Space Approach for Two-Faults Detection and Isolation", AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 15-18 August 2005, San Francisco, California. AIAA 2005-6138.
- [9]. Mogens Blanke, Marcel Staroswiecki & N. Eva Wu, "Concepts and Methods in Fault-Tolerant Control", Tutorial at American Control Conference, June 2001.
- [10]. Michael M. Madden & Paul C. Sugden, "Extending a Flight Management Computer for Simulation and Flight Experiments", AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 15-18 August 2005, San Francisco, California. AIAA 2005-6100.
- [11]. N. Eva Wu & Oguz A. Aydin, "Reliability-Based Modeling & Analysis of Fault-Tolerant Flight Control Systems", Binghamton University, Binghamton, NY 13902-6000.
- [12]. ROBERT S. EICK, "A Reconfiguration Scheme for Flight Control Adaptation to FIXED-POSITION Actuator Failures", University of Florida, 2003.

GRISALES Victor-Hugo

Modélisation et commande floues de type Takagi-Sugeno appliquées à un bioprocédé de traitement des eaux usées

Victor-Hugo GRISALES¹

Directeurs du travail : Alain GAUTHIER² et Gilles ROUX³

Problématique

La conduite automatisée des procédés d'épuration biologique est encore peu fréquente dans une bonne part des installations industrielles. La commande est souvent basée sur schémas peu performantes et/ou sur la connaissance des opérateurs experts. Des contraintes d'opération à chaque fois plus sévères.

Hypothèse

L'approche floue, en particulier la modélisation de type Takagi-Sugeno à partir de données et le calcul des lois de commande correspondantes, sont un des possibilités pour l'amélioration de performance.

Mots-clés: procédés biologiques, traitement des eaux usées, identification des systèmes, modèle flou Takagi-Sugeno, clustering, commande floue, commande optimale, compensation parallèle distribuée.

I. OBJECTIFS DES TRAVAUX

Ce travail de thèse a pour objectif l'application d'outils de l'automatique aux bioprocédés de traitement des eaux usées et s'articule autour de deux points qui sont la modélisation et la commande flou du type Takagi-Sugeno appliqués à un modèle d'un réacteur biologique. Le type de procédé considéré est caractérisé par des phénomènes de type physique, chimique et biologique qui ne sont pas totalement maîtrisés. Le but est d'une part, la proposition d'un modèle dynamique pour le bioréacteur en utilisant l'approche floue, à la fois suffisamment précis sur le plan théorique, et relativement simple en vue d'une exploitation expérimentale. D'autre part, à partir de ce modèle, en utilisant l'approche floue, calculer la loi de commande non linéaire pour garantir de bonne performance pour ce système.

II. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT

Actuellement une attention spéciale est portée aux travaux de recherche développés dans le but de conserver les ressources naturelles, en particulier l'eau, dû à son importance vitale. Une des méthodes les plus utilisées pour

le traitement d'eaux résiduelles est le traitement biologique [DOC01]. La modélisation et l'identification d'un réacteur biologique sont des tâches complexes si l'on utilise les techniques traditionnelles de l'automatique. Ceci est dû à la présence d'incertitudes et de non linéarités élevées dans le processus. La logique floue présente donc une alternative prometteuse pour les systèmes caractérisés par des dynamiques complexes, comme c'est le cas pour les systèmes chimiques et biologiques.

A. Le traitement biologique des eaux usées

Il est composé de plusieurs étapes : *prétraitements* (physiques), pour l'élimination des déchets grossiers, *traitements primaires* (physiques), pour l'élimination des matières en suspension, *traitements secondaires* (biologiques), pour l'élimination des matières organiques et *traitements tertiaires* (biologiques, physico-chimique et chimique), pour l'élimination des nutriments, micropolluants et désinfection.

Malgré tout l'intérêt qu'a suscité le problème de dépollution ces dernières décennies, les axes de recherches pour le développement et l'optimisation des procédés d'épuration restent encore ouverts [GIR86] [DUQ98]. Bien que la question du contrôle des procédés d'épuration biologique ait été abordée depuis des années 70, leur conduite automatisée est encore peu fréquente, contrairement au cas des autres industries telles que les procédés chimiques par exemple. L'automatisation de ce type des procédés s'impose comme une étape importante dans les unités de traitements et c'est dans cette direction que le travail de recherche se dirige.

B. La modélisation floue de type Takagi-Sugeno

L'approche de modélisation floue de type Takagi-Sugeno [TAK85] permet de décomposer un système dynamique non linéaire comme un ensemble concaténé de sous systèmes linéaires. La commutation entre ces modèles se fait graduellement en fonction du degré d'appartenance qui décrit la validité de chacun de ces sous modèles. Cette approche donne une interprétabilité à un niveau local et la possibilité d'exploiter des techniques de la commande linéaire ainsi que d'incorporer plus naturellement la connaissance donnée par les experts [YAG94].

Dans le modèle flou de type Takagi-Sugeno, la conclusion de la règle R_i est un modèle mathématique classique, donc non floue, fonction des entrées du modèle :

$$R_i : \text{Si } x_1 \text{ est } A_{i1} \text{ et } x_2 \text{ est } A_{i2} \text{ et, } \dots, \text{ et } x_p \text{ est } A_{ip}$$

$$\text{alors } y_i = f_i(x), \quad i = 1, 2, \dots, K.$$

¹V.H. Grisales is on doctoral studies at Universidad de los Andes, Colombia, and Université Paul Sabatier, Laboratory LAAS-CNRS, France, on leave from Laboratorio de Automática, Microelectrónica e Inteligencia Computacional - LAMIC, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital FJDC, Bogotá, Colombia (e-mail: vhggrisales@ieee.org).

²A. Gauthier is with the Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia (e-mail: agauthie@uniandes.edu.co).

³G. Roux is with the Laboratory LAAS-C.N.R.S. and Centre de Bioingénierie Gilbert Durand, Toulouse, France (e-mail: roux@laas.fr).

où $x \in \mathfrak{R}^p$ est la variable d'entrée et $y \in \mathfrak{R}$ désigne la variable de sortie. R_i est l' i ème règle et K est le nombre de règles. A_i est l'ensemble flou de l' i ème règle, défini par une fonction d'appartenance $\mu_{A_i} : \mathfrak{R}^p \rightarrow [0,1]$. Les fonctions f_i ont la même structure pour chaque règle, seuls les paramètres varient. Une forme de paramétrisation souvent utilisée est la forme affine linéaire :

$$y_i = a_i^T x + b_i$$

où a_i est un vecteur de paramètres et b_i un scalaire. Ce modèle est appelé le modèle *affine* Takagi-Sugeno (TS). Les conclusions des règles sont alors des hyperplans dans l'espace produit d'entrée-sortie $\mathfrak{R}^p \times \mathfrak{R}$. La prémisse de chaque règle définit une région de validité pour le modèle linéaire de la conclusion. Pour la modélisation cette paramétrisation est souhaitable puisqu'elle permet de décomposer un comportement non linéaire en sous modèles locaux linéaires. La figure 1 est un exemple illustratif d'une fonction d'une seule variable $y=f(x)$ représentée par trois règles affines de type TS:

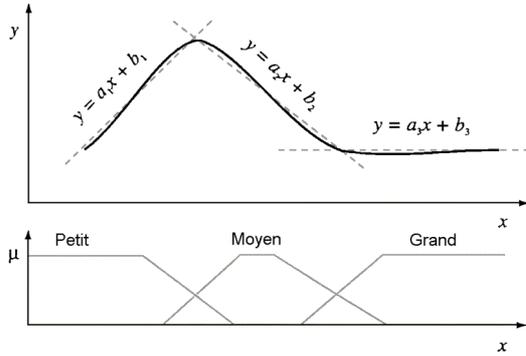


Fig.1. Approximation linéaire à segments adoucis par trois règles floues de type TS $y=a_i x+b_i$.

L'antécédent de chaque règle définit une région floue de validité pour le modèle linéaire affine du conséquent correspondant. Le modèle global est formé par la concaténation des modèles locaux et il peut être vu comme une approche continue à segments adoucis par une surface non linéaire.

Le modèle global est la concaténation par le mécanisme d'inférence des modèles linéaires locaux. Pour avoir la sortie du modèle global, il faut d'abord calculer le degré d'activation de chaque règle $\beta_i(x)$. On obtient donc la sortie comme une simple somme pondérée :

$$y = \frac{\sum_{i=1}^K \beta_i(x) y_i}{\sum_{i=1}^K \beta_i(x)}$$

qu'on peut exprimer comme un modèle global linéaire dont les paramètres dépendent des entrées :

$$y = \left(\sum_{i=1}^K \lambda_i(x) a_i^T \right) x + \sum_{i=1}^K \lambda_i(x) b_i = a^T(x) x + b(x)$$

$$\text{avec } \lambda_i(x) = \beta_i(x) / \sum_{j=1}^K \beta_j(x).$$

L'expression précédent peut être appliquée pour le cas des systèmes non linéaires en temps discret sous la forme non linéaire autorégressive NARX :

$$\hat{y}(k+1) = F(y(k), \dots, y(k-n_y+1), u(k-n_d+1), \dots, u(k-n_d-n_u+2))$$

où k représente les échantillons en temps discret, n_u et n_y sont des entiers associés à l'ordre du système, n_d est le retard en nombre d'échantillons et F est un modèle flou du type TS avec des règles de la forme :

R_i : Si $x(k)$ est A_{i1} et $x(k-1)$ est A_{i2} et, ..., et $x(k-n_x+1)$ est A_{in_x} alors

$$x(k+1) = f_i(x(k), x(k-1), \dots, x(k-n_x+1)), i = 1, 2, \dots, K.$$

Pour obtenir le modèle flou de type Takagi-Sugeno on a utilisé des techniques de *clustering* [BEZ81] [BAB98]. L'objectif de l'analyse par cluster (groupe) est la classification d'objets en accord avec une ressemblance mathématique, définie au moyen d'une norme de mesure de la distance entre les vecteurs de données qui représente les caractéristiques des objets. Les méthodes de *clustering* flou permettent l'appartenance d'objets aux divers groupes de manière simultanée, avec des niveaux d'appartenance différents.

Pour des données issues de l'observation de processus physiques avec n variables et N observations, une matrice de données $Z_{n \times N}$ est construite. Dans le cas de la modélisation et de l'identification de systèmes dynamiques, les colonnes de Z contiennent les échantillons des variables physiques observées dans le système au cours du temps (position, vitesse, température, etc.). Pour représenter la dynamique du système, il est nécessaire d'inclure typiquement les valeurs passées des variables dans la matrice Z . Par exemple, pour le cas d'un système représenté par un modèle NARX discret du premier ordre $y(k+1)=F(y(k), u(k))$, la matrice Z a une structure qui correspond à l'expression suivante :

$$Z = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \dots & y(N-1) \\ u(1) & u(2) & \dots & u(N-1) \\ y(2) & y(3) & \dots & y(N) \end{bmatrix}$$

C. La méthode de clustering flou

La plupart des algorithmes analytiques de *clustering* flou sont basés sur l'optimisation de la fonction objectif *fuzzy c-means* (FCM). Celle-ci est formulée comme suit :

$$J(Z; U, V) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^N (\mu_{ik})^m \left\| z_k - v_i \right\|_A^2$$

L'algorithme de *clustering* FCM est un processus itératif où la matrice de partition floue U est initialisée aléatoirement, V est le vecteur des centres du cluster, Z est l'ensemble des données. Pour cet algorithme, il est nécessaire de sélectionner un nombre de clusters ($1 < c < N$) et de définir l'exposant de pondération $m > 1$ (qui permet

d'avoir des clusters de plus grand ou de plus petit niveau). Il faut aussi choisir la tolérance d'arrêt ($\epsilon > 0$) du processus itératif et la matrice de la norme induite \mathbf{A} . Dans le cas FCM cette matrice est habituellement l'identité. La mesure de la distance est alors Euclidienne et les groupes sont des hyper sphères dans l'espace n -dimensionnel. Le processus se répète jusqu'à ce que $\|\mathbf{U}^{(l)} - \mathbf{U}^{(l-1)}\| < \epsilon$.

Clustering avec matrice de covariance floue (Gustafson-Kessel)

Gustafson et Kessel [GUS79] ont étendu l'algorithme standard FCM en utilisant une norme adaptative de la distance pour la détection de clusters de différentes formes géométriques dans l'ensemble de données. Chaque groupe a sa propre matrice de norme induite \mathbf{A}_i , qui produit la norme de produit interne suivante:

$$\mathbf{D}_{ikA_i}^2 = (\mathbf{z}_k - \mathbf{v}_i)^T \mathbf{A}_i (\mathbf{z}_k - \mathbf{v}_i)$$

Les matrices \mathbf{A}_i , sont utilisées comme variables d'optimisation dans les fonctionnelles *c-means*, afin que chaque groupe adapte sa norme de distance à la structure topologique locale des données. En utilisant la méthode des multiplicateurs de Lagrange et en optimisant la forme des clusters de telle sorte que leur volume reste constant ($|\mathbf{A}_i| = \rho_i$), l'expression suivante est obtenue pour \mathbf{A}_i :

$$\mathbf{A}_i = [\rho_i \det(\mathbf{F}_i)]^{1/n} \mathbf{F}_i^{-1}$$

où \mathbf{F}_i est la matrice de covariance floue de l' i ème groupe défini par:

$$\mathbf{F}_i = \frac{\sum_{k=1}^N (\mu_{ik})^m (\mathbf{z}_k - \mathbf{v}_i)(\mathbf{z}_k - \mathbf{v}_i)^T}{\sum_{k=1}^N (\mu_{ik})^m}$$

L'algorithme de clustering de Gustafson-Kessel (GK) peut être résumé comme :

Répéter pour chaque itération l jusqu'à $\|\mathbf{U}^{(l)} - \mathbf{U}^{(l-1)}\| < \epsilon$:

Pas 1: Calculer les prototypes du cluster : \mathbf{v}_i

Pas 2: Calculer les matrices de covariance du cluster : \mathbf{F}_i

Pas 3: Calculer les distances $\mathbf{D}_{ikA_i}^2$

Pas 4: Actualiser la matrice de partition floue \mathbf{U} : actualiser $\mu_{i,k}$

Du point de vue de l'identification des systèmes dynamiques, l'algorithme GK permet une interprétation géométrique car la structure propre de la matrice de covariance de chaque groupe fournit de l'information sur la forme et l'orientation de chaque groupe. Cette caractéristique est utilisée pour l'approximation par hyperplans ellipsoïdaux des surfaces qui représentent les dynamiques des systèmes non linéaires. C'est ainsi qu'en notant Φ_i le plus petit vecteur propre de l' i ème cluster et en considérant la matrice de données comme $\mathbf{Z}^T = [\mathbf{X}^T, \mathbf{y}]$. Les paramètres du conséquent des règles floues pour le modèle affine de type TS peuvent être déterminés en utilisant la méthode des moindres carrés, à partir de l'expression:

$$y = \underbrace{\frac{-1}{\phi_i^y} (\phi_i^x)^T \mathbf{X}}_{\mathbf{a}_i} + \underbrace{\frac{1}{\phi_i^y} \phi_i^T \mathbf{v}_i}_{\mathbf{b}_i}$$

D'où ils résultent les valeurs des paramètres \mathbf{a}_i et \mathbf{b}_i :

$$\mathbf{a}_i = \frac{-1}{\phi_i^y} \phi_i^x = \frac{-1}{\phi_i^y} [\phi_{i1}, \phi_{i2}, \dots, \phi_{ip}]^T ;$$

$$\mathbf{b}_i = \frac{1}{\phi_i^y} \phi_i^T \mathbf{v}_i$$

D. La commande floue de type Takagi-Sugeno

Traditionnellement, la technique de gain préprogrammé a été considérée comme l'approche la plus communément utilisée pour la commande des systèmes non linéaires au niveau pratique. Le système de commande peut être considéré comme un ensemble de plusieurs contrôleurs locaux qui sont appliqués aux différents régimes d'opération. Cette approche inclut les modèles de type Takagi-Sugeno ou il existe une interpolation entre les sous modèles locaux linéaires. La figure 2 montre la structure typique d'un système de commande de type gain préprogrammé :

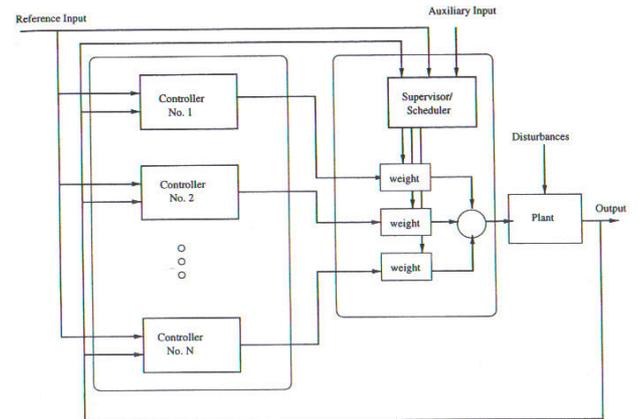


Fig. 2. Structure typique d'un système de commande de type gain préprogrammé

Pour le cas de systèmes flous de type Takagi-Sugeno, nous avons appliqué la philosophie de commande du type compensation parallèle distribuée (PDC)¹ [WAN95] pour le bio procédé benchmark considéré dans le projet FAMIMO² [ROU99]. La commande PDC consiste à calculer une loi de commande linéaire par retour d'état, pour chaque sous modèle du modèle flou. La détermination d'une loi de commande revient à déterminer pour chaque modèle local des gains matriciels, par exemple en utilisant une synthèse quadratique ou des inégalités linéaires matricielles (LMI). La figure 3 illustre le concept de commande de type PDC. Ce type de commande a pour but d'intégrer dans une seule loi de commande globale les lois de commande individuelles

¹ PDC: *Parallel Distributed Compensation*

² Waste-water Benchmark, in Fuzzy Algorithms for the Control of Multiple-Input, Multiple Output Processes (FAMIMO) project, funded by the European Commission (Esprit LTR 21911)

issues de l'approche multi-modèle. La partie antécédente des règles reste la même que pour le modèle flou Takagi-Sugeno tandis que la partie conséquente est remplacée par une loi de commande par retour d'état. Dans ce contexte, chaque sous modèle d'un modèle flou de type Takagi-Sugeno est stabilisé localement par une loi linéaire. La loi globale de commande, qui en général est non linéaire, est une fusion floue des lois de commande linéaires. Pour l'application de la commande du type PDC il est nécessaire que tous les sous modèles linéaires soient stabilisables. L'accomplissement de cette condition est supposé dans toute la suite.

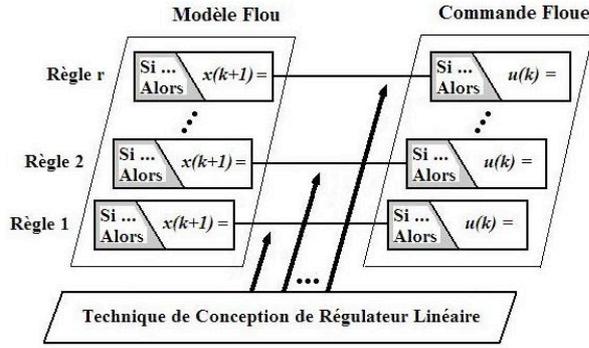


Fig.3. Représentation du concept de compensation parallèle distribuée (PDC)

Typiquement le calcul des gains de retour d'état peut se faire par exemple par positionnement de pôles ou par minimisation d'un critère quadratique. Nous nous sommes intéressés ici à cette dernière approche. La minimisation d'un critère quadratique constitue l'un des moyens de parvenir à la détermination d'une structure de commande par retour d'état pour les systèmes linéaires multidimensionnels. En utilisant cette approche, il semble intéressant d'élargir les résultats classiques de la commande optimale pour les sous modèles qui constituent le modèle Takagi-Sugeno *affine*, comme on le développera par la suite. On parle dans cette section de commande sous optimale par retour d'état car la loi de commande n'est optimale que pour chacun des sous modèles linéaires.

Commande LQR pour des modèles affines à temps discret

On considère ici un modèle sous forme d'état qui représente un système non linéaire en temps discret³ décrit par l'équation :

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k)$$

où l'indice $k = 0, 1, \dots, N$ indique le temps d'échantillonnage, x_k est le vecteur d'état à l'instant k ($x_k \in \mathfrak{R}^n$), u_k est le vecteur de commande à l'instant k ($u_k \in \mathfrak{R}^m$) et x_0 est la condition initiale. Le système ainsi représenté est approximé par un modèle flou *affine* Takagi-Sugeno composé par la concaténation de sous modèles linéaires discrets de la forme :

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + d_k$$

$$y_k = C_k x_k$$

où $y_k \in \mathfrak{R}^p$ représente le vecteur de sortie, $A_k \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $B_k \in \mathfrak{R}^{n \times m}$, $C_k \in \mathfrak{R}^{p \times n}$ et $d_k \in \mathfrak{R}^n$ est un vecteur constant, propre au modèle affine.

La détermination de la commande optimale des sous modèles linéaires par minimisation d'un critère quadratique peut être traitée en utilisant plusieurs théories, comme la programmation dynamique et le Principe du Maximum de Pontryagin basé sur des méthodes variationnelles. Dans ce document nous nous sommes focalisés sur cette deuxième approche. Afin d'avoir plus de détail sur la première approche, le lecteur peut se reporter à la référence [FOU79] qui considère diverses cas avec systèmes linéaires affines.

Dans ce contexte, la position du problème du régulateur linéaire quadratique (LQR)⁴, consiste à trouver la loi de commande permettant de faire évoluer le sous-système linéaire affine à partir de l'état initial x_0 en minimisant le critère quadratique suivant [NAI03]:

$$J = \frac{1}{2} x_N^T S_N x_N + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^T Q_k x_k + u_k^T R_k u_k)$$

où $S_k \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $Q_k \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ sont des matrices symétriques semi définies positives et $R_k \in \mathfrak{R}^{m \times m}$ est symétrique définie positive. La matrice S_k pondère l'état final, Q_k pondère l'évolution de l'état et R_k pondère l'énergie de commande. Pour pouvoir optimiser le critère, J doit être convergente. Pour cela, chaque sous-système linéaire doit être stable. Le but de l'optimisation est d'obtenir la séquence de commande u_0, u_1, \dots, u_{N-1} que minimise le critère quadratique. Dans ce cas, le Hamiltonien est donné par :

$$\mathcal{H}(x_k, u_k, \lambda_{k+1}) = \frac{1}{2} (x_k^T Q_k x_k + u_k^T R_k u_k) + \lambda_{k+1}^T (A_k x_k + B_k u_k + d_k)$$

En suivant la théorie de la commande optimale basée sur le calcul des variations, on considère les expressions suivantes :

Equation d'état

$$x_{k+1} = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \lambda_{k+1}} = A_k x_k + B_k u_k + d_k$$

Equation de co-état

$$\lambda_k^* = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial x_k} = Q_k x_k^* + A_k^T \lambda_{k+1}^*$$

Equation de stationnarité

$$0 = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial u_k} = R_k u_k^* + B_k^T \lambda_{k+1}^*$$

alors, la loi de commande optimale en boucle ouverte est donnée par :

$$u_k^* = -R_k^{-1} B_k^T \lambda_{k+1}^*$$

Comme R_k est définie positive, ceci assure son inversibilité. En remplaçant u_k^* dans l'équation d'état on obtient :

³ Dans cette section, la notation a été changée par simplicité : $x(k)$ a été remplacée par x_k .

⁴ LQR: Linear Quadratic Regulator

$$x_{k+1}^* = A_k x_k^* - B_k R_k^{-1} B_k^T \lambda_{k+1}^* + d_k$$

Condition de contour

On considère ici le cas où l'état finale x_N est libre. Par conséquent, la condition correspondante de contour est donné par :

$$\lambda_N = \frac{\partial}{\partial x_N} \left(\frac{1}{2} x_N^T S_N x_N \right) = S_N x_N$$

Afin d'obtenir une loi de commande optimale en boucle fermée, il est nécessaire d'exprimer la fonction de co-état λ_{k+1}^* dans la commande optimale en termes de la fonction d'état x_k^* . La condition finale ainsi que la présence du terme affine dans l'équation d'état, nous amène à proposer pour le terme λ_k^* l'expression suivante :

$$\lambda_k^* = P_k x_k^* + q_k$$

où la matrice $P_k \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ et le vecteur $q_k \in \mathfrak{R}^n$ doivent être déterminés. On arrive à des solutions qui nécessitent une résolution itérative en remontant le temps à partir de la condition finale. Une procédure similaire s'applique pour le calcul de q_k . Puisque les relations de récurrence sont définies en temps inverse, une réalisation pratique de la commande telle qu'elle a été précédemment définie, nécessite de précalculer la matrice P_k et le vecteur q_k pour tous les instants de l'horizon considéré. Cela supposerait donc de reprendre les calculs et d'en mémoriser tous les résultats avant chaque changement de consigne. Il est évident que cela peut constituer une contrainte importante pour l'implémentation dans un ordinateur couplé au procédé. Il est donc particulièrement intéressant, pour la majorité des applications pratiques en milieu industriel, de considérer l'horizon d'optimisation comme infini, ou tout au moins comme très grand par rapport à l'échelle de temps des phénomènes physiques considérés. Le critère à minimiser est alors de la forme :

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} (x_k^T Q_k x_k + u_k^T R_k u_k)$$

Dans le cas particulier d'un système stationnaire ($A_k = A$, $B_k = B$, $d_k = d$, $C_k = C$) et avec les conditions imposées aux matrices Q et R , lorsque N tend vers l'infini, il est montré que les équations récurrentes **Erreur! Source du renvoi introuvable.** et **Erreur! Source du renvoi introuvable.** convergent vers des solutions limites uniques P et q , respectivement, lorsque le sous modèle est commandable. Dans ce cas, il vient alors :

$$P = Q + A^T P (I + B R^{-1} B^T P)^{-1} A$$

en utilisant le lemme d'inversion matricielle on obtient l'équation algébrique discrète de Riccati (DARE)⁵:

$$A^T P A - P - (A^T P B)(R + B^T P B)^{-1} (B^T P A) + Q = 0$$

Pour le cas du vecteur q , en utilisant la solution P de l'équation précédente, il vient :

$$q = \left(I + A^T P (I + B R^{-1} B^T P)^{-1} B R^{-1} B^T - A^T \right)^{-1} (A^T P (I + B R^{-1} B^T P)^{-1}) d$$

cette expression est sous la forme

$$q = (G + F E)^{-1} F d, \text{ avec } \begin{cases} E = B R^{-1} B^T \\ F = A^T P (I + B R^{-1} B^T P)^{-1} = A^T (P^{-1} + E)^{-1} \\ G = I - A^T \end{cases}$$

d'après la commande optimale, il vient :

$$u_k^* = -R^{-1} B^T (P x_{k+1}^* + q) = -R^{-1} B^T (P (A x_k^* + B u_k^* + d) + (G + F E)^{-1} F d)$$

ce qui conduit à la commande optimale en boucle fermée suivante :

$$u_k^* = -(K x_k + N d), \begin{cases} K = (R + B^T P B)^{-1} B^T P A \\ N = (R + B^T P B)^{-1} B^T (P + (G + F E)^{-1} F) \end{cases}$$

où la matrice $N \in \mathfrak{R}^{m \times n}$, $K \in \mathfrak{R}^{m \times n}$ et le vecteur constant $d \in \mathfrak{R}^n$.

Compte tenu que le régulateur flou PDC partage les mêmes ensembles flous que le modèle Takagi-Sugeno, il garde donc les mêmes parties prémisses ainsi que les mêmes fonctions d'appartenance. Pour un modèle flou TS *affine* discret, la réalisation du régulateur flou PDC avec action intégrale comporte une loi de commande optimale u_k^* en boucle fermée ainsi déterminée pour chacun des sous modèles, de la forme :

$$u_k^* = -(\tilde{K} \tilde{x}_k + \tilde{N} \tilde{d}) = \tilde{L} r_k - (\tilde{K} x_k + \tilde{K}_v v_k + \tilde{N} d)$$

Il convient de remarquer que dans cette expression les matrices \tilde{K} et \tilde{N} ne sont pas les mêmes que les matrices K et N . Les matrices $\tilde{K} \in \mathfrak{R}^{m \times (n+p)}$ et $\tilde{N} \in \mathfrak{R}^{m \times (n+p)}$ ont été décomposées en $\tilde{K} = [\tilde{K} \quad \tilde{K}_v]$ où $\tilde{K} \in \mathfrak{R}^{m \times n}$ et $\tilde{K}_v \in \mathfrak{R}^{m \times p}$, et en $\tilde{N} = [\tilde{N} \quad -\tilde{L}]$ où $\tilde{N} \in \mathfrak{R}^{m \times n}$ et $\tilde{L} \in \mathfrak{R}^{m \times p}$. Le vecteur d'état augmenté est $\tilde{x}_k = [x_k \quad v_k]^T \in \mathfrak{R}^{n+p}$ et le vecteur lié aux entrées et termes de biais est $\tilde{d} = [d \quad \tilde{r}_k]^T \in \mathfrak{R}^{n+p}$.

Pour calculer la commande optimale u_k^* qui annule l'erreur stationnaire (entre consigne et mesure) pour chacun des sous modèles à partir de la représentation d'état augmenté, la méthodologie développée préalablement consiste à suivre la procédure suivante :

1. Trouver la matrice $\tilde{P} \in \mathfrak{R}^{(n+p) \times (n+p)}$ solution de l'équation DARE de Riccati :

$$\tilde{A}^T \tilde{P} \tilde{A} - \tilde{P} - (\tilde{A}^T \tilde{P} \tilde{B})(R + \tilde{B}^T \tilde{P} \tilde{B})^{-1} (\tilde{B}^T \tilde{P} \tilde{A}) + \tilde{Q} = 0$$

2. Calculer les matrices \tilde{E} , \tilde{F} et $\tilde{G} \in \mathfrak{R}^{(n+p) \times (n+p)}$ suivantes :

$$\begin{cases} \tilde{E} = \tilde{B} R^{-1} \tilde{B}^T \\ \tilde{F} = \tilde{A}^T \tilde{P} (I + \tilde{E} \tilde{P})^{-1} = \tilde{A}^T (\tilde{P}^{-1} + \tilde{E})^{-1} \\ \tilde{G} = I - \tilde{A}^T \end{cases}$$

où la matrice identité $I \in \mathfrak{R}^{(n+p) \times (n+p)}$.

⁵ DARE: Discrete Algebraic Riccati Equation

3. Calculer la loi de commande en déterminant les matrices $\tilde{K} \in \mathfrak{R}^{m \times (n+p)}$ et $\tilde{N} \in \mathfrak{R}^{m \times (n+p)}$ selon les expressions :

$$u_k^* = -(\tilde{K} \tilde{x}_k + \tilde{N} \tilde{d}), \text{ avec } \begin{cases} \tilde{K} = (R + \tilde{B}^T \tilde{P} \tilde{B})^{-1} \tilde{B}^T \tilde{P} \tilde{A} \\ \tilde{N} = (R + \tilde{B}^T \tilde{P} \tilde{B})^{-1} \tilde{B}^T (\tilde{P} + (\tilde{G} + \tilde{F} \tilde{E})^{-1} \tilde{F}) \end{cases}$$

On peut noter que la loi de commande optimale obtenue pour les sous modèles linéaires affines consiste en un retour d'état $-\tilde{K} x_k$, une compensation du terme de biais $-\tilde{N} d$, un terme d'anticipation lié à la consigne $\tilde{L} r_k$ et une action intégrale $-\tilde{K}_v v_k$ agissant sur l'erreur entre consignes et mesures. Par analogie avec les régulateurs classiques comportant une action « proportionnelle » et une action « intégrale », le résultat obtenu peut être vue comme une loi de commande multidimensionnelle du type P.I. avec compensation du terme de biais.

Pour un modèle flou TS *affine* discret, la réalisation du régulateur flou PDC avec action intégrale, consiste à déterminer pour les $i=1,2,\dots,r$ règles du modèle, les gains \tilde{K}_i et \tilde{N}_i du système augmenté, dans les parties conclusions, en utilisant des règles R^i sous la forme :

Si $z_1(k)$ est M_1^i et \dots et $z_p(k)$ est M_p^i alors $u(k) = -(\tilde{K}_i \tilde{x}(k) + \tilde{N}_i \tilde{d})$, $i=1,2,\dots,r$

où r est le nombre des règles. La sortie finale du régulateur flou est inférée comme suit :

$$u(k) = -\sum_{i=1}^r h_i(z(k)) (\tilde{K}_i \tilde{x}(k) + \tilde{N}_i \tilde{d}), \text{ avec } h_i(z(k)) = \frac{w_i(z(k))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(k))}$$

vérifiant pour tout k , les propriétés de somme convexe et d'activation des fonctions d'appartenance.

En prenant en compte l'expression de la commande, le schéma général de la structure de commande PDC avec action intégrale, pour les sous modèles linéaires affines, ainsi obtenu est représenté par la figure 4.

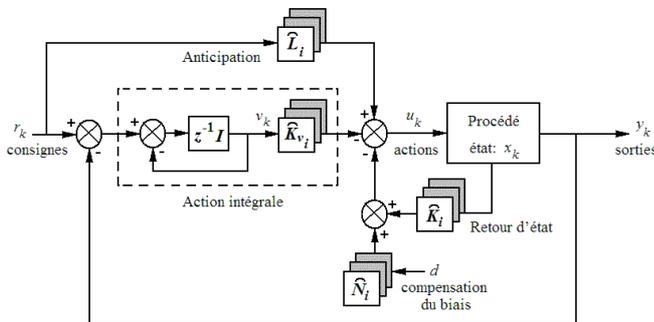


Fig.4. Schéma général de la commande PDC avec action intégrale pour des sous modèles affines

La figure 5 montre les résultats d'identification du bioprocédé en utilisant la technique de clustering flou de Gustafson-Kessel et l'algorithme RoFER [GRI05]. Le système non linéaire MIMO (avec 2 entrées et 3 sorties) a

été décomposé en 4 sous-modèles linéaires.

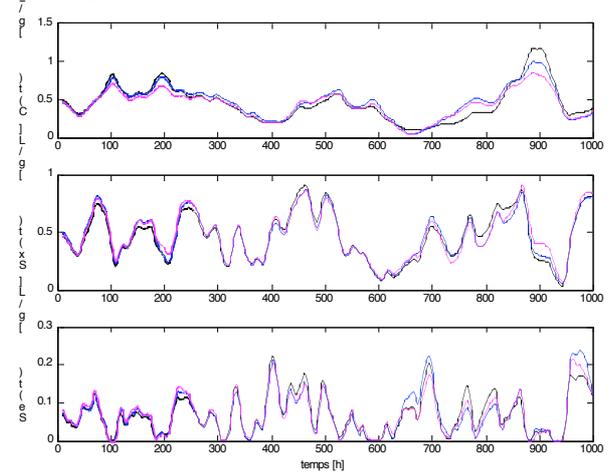


Fig.5. Sortie du procédé (ligne en trait plein), sortie du modèle avec groupement GK (ligne pleine) et sortie du modèle avec groupement RoFER (ligne pointillée)

Les gains calculés pour la loi de commande du type PDC sous optimale pour le procédé biologique sont donnés par :

$$\tilde{K}_1 = \begin{bmatrix} -0.4414 & -0.1328 & 0.1173 & 0.0120 & 0.0075 \\ -0.0464 & 0.0397 & 0.0134 & 0.0010 & -0.0070 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{N}_1 = \begin{bmatrix} -5.9468 & -0.3248 & 0.7883 & 0.3057 & -0.0168 \\ -0.6544 & 0.0420 & 0.1050 & 0.0301 & -0.0329 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{K}_2 = \begin{bmatrix} -0.2319 & -0.0200 & 0.0241 & 0.0120 & 0.0020 \\ -0.0114 & 0.0490 & -0.0040 & 0.0003 & -0.0074 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{N}_2 = \begin{bmatrix} -1.1890 & 0.0533 & 0.0798 & 0.1268 & -0.0077 \\ -0.0558 & 0.0861 & -0.0009 & 0.0046 & -0.0295 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{K}_3 = \begin{bmatrix} -0.2358 & -0.0560 & 0.0126 & 0.0114 & 0.0080 \\ -0.0320 & 0.0460 & 0.0033 & 0.0011 & -0.0069 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{N}_3 = \begin{bmatrix} -1.4694 & 0.0918 & 0.0733 & 0.1361 & -0.0014 \\ -0.1949 & 0.0976 & 0.0109 & 0.0154 & -0.0307 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{K}_4 = \begin{bmatrix} -0.1979 & -0.0188 & 0.0210 & 0.0119 & -0.0004 \\ -0.0056 & 0.0484 & 0.0059 & 0.0001 & -0.0073 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{N}_4 = \begin{bmatrix} -0.8747 & 0.0089 & 0.0791 & 0.1083 & -0.0139 \\ -0.0261 & 0.0838 & 0.0072 & 0.0018 & -0.0294 \end{bmatrix}$$

Les résultats de la commande floue basée sur le modèle Takagi-Sugeno identifié pour le bioréacteur sont indiqués dans la figure 6 [GRI06].

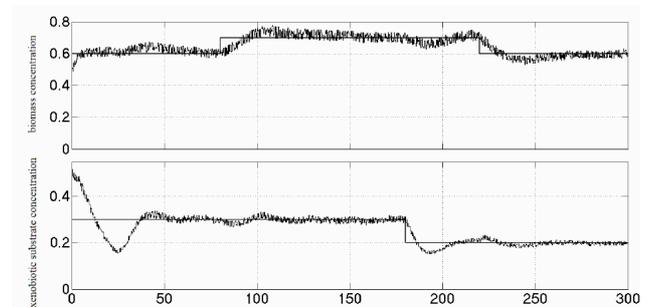


Fig.6. Commande floue basée sur le modèle Takagi-Sugeno pour le bioréacteur. En haut: commande de la concentration de la biomasse microbienne (g/L). En bas: commande de la concentration du substrat xénobiotique (g/L).

III. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

Au moment de la préparation de cet article, les travaux de recherche associés à la thèse ont été finis. On se trouve en phase de rédaction du manuscrit final, divisé en deux parties : traitement des eaux résiduaires du point de vue d'ingénierie et modélisation et commande floues avec application à un modèle d'un réacteur biologique.

Dans la première partie, nous nous focalisons sur les traitements des eaux usées, en mettant l'accent sur la modélisation dynamique des procédés biologiques. Nous privilégions l'approche de modélisation macroscopique qui considère des bilans de matière des composants principaux pour caractériser la dynamique du procédé. Nous présentons à la fin le procédé considéré qui est un bioréacteur aérobique multi-variable en mode continu pour le traitement des eaux usées issues d'une industrie papetière.

Dans la deuxième partie, nous présentons d'abord une approche structurale de la modélisation et de l'identification floues TS à partir de données entrée-sortie. Nous utilisons, d'une part, différentes méthodes de classification floue et, d'autre part, nous proposons une méthode d'« agglomération compétitive », robuste en présence de bruit. Ce type d'approche « boîte grise » permet la représentation du système dynamique comme un modèle à base de règles qui approxime la dynamique non linéaire comme une concaténation d'un ensemble de sous modèles localement linéaires sous la forme d'auto-régression non-linéaire (NARX) dans l'espace d'état. De plus, nous avons développé une *version graphique* de la boîte à outils FMID⁶ pour la modélisation floue des systèmes non linéaires. Ensuite, nous développons une commande floue TS basée sur modèle, en utilisant la philosophie de commande du type compensation parallèle distribuée (PDC). Nous nous sommes intéressés, en particulier, à la commande sous-optimale linéaire quadratique par retour d'état basée sur des modèles TS affines en temps discret. Nous proposons trois lois de commande différentes pour la conduite du procédé qui tiennent compte du terme indépendant caractéristique du modèle affine.

Enfin, nous considérons l'application de ces techniques d'identification et de commande floues TS sur le modèle du bioréacteur. Nous présentons la démarche utilisée pour construire le modèle du procédé et la loi de commande les mieux adaptés. Les résultats obtenus en simulation soulignent les caractéristiques d'applicabilité, de performance et de limitations pour l'utilisation avec succès de ces techniques sur ce type de système non linéaire multivariables.

IV. PUBLICATIONS

- [GRI02] GRISALES, V. H., GAUTHIER, A., ISAZA, C.V., VILLAMARIN, G., Identificación y Modelado Difuso Takagi-Sugeno de un Bioreactor Anaerobio, *X Congreso Latinoamericano de Control Automático (CLCA'2002)*, Guadalajara, Mexique, 3-6 décembre 2002, 6p.
- [GRI03] GAUTHIER, A., GRISALES, V.H., ISAZA, C.V.,

MARTINEZ, H., Aplicación de la Metodología LAMDA para Clasificación Basada en Información Cualitativa: Un Caso del Diagnostico del Nivel de Nutrición en Niños, *Congreso Internacional de Inteligencia Computacional 2003 (CIIC'2003)*, Medellín, Colombie, 6-8 novembre 2003, 8p.

- [GRI04] GRISALES, V. H., SORIANO, J.J., BARATO, S., GONZALEZ, D.M., Robust Agglomerative Clustering Algorithm for Fuzzy Modeling Purposes, *Proc. American Control Conference (ACC'2004)*, Boston, USA, 30 juin – 2 juillet 2004, pp.1782-1787.
- [GRI05] GRISALES, V. H., GAUTHIER, A., ROUX, G., Fuzzy model identification of a biological process based on input-output data clustering, *Proc. of the 2005 IEEE International Conference on Fuzzy Systems - FuzzIEEE*, Reno, USA, pp.927-932, 2005.
- [GRI06] GRISALES, V. H., GAUTHIER, A., ROUX, G., Fuzzy Optimal Control Design for Discrete Affine Takagi-Sugeno Fuzzy Models: Application to a Biotechnological Process, *Proc. of the 2006 IEEE World Congress on Computational Intelligence - WCCI, 2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems – FuzzIEEE*, Vancouver, Canada, pp.2369-2376, 2006.

REFERENCES

- [BAB98] BABUŠKA, R., *Fuzzy Modeling for Control*, Kluwer Academic Publishers, Mass., USA, 1998.
- [BEZ81] BEZDEK, J., *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function*, Plenum Press, NY, USA, 1981.
- [DOC01] DOCHAIN, D. *Automatique des bioprocédés*. Hermès Science Publications, Paris, 2001.
- [DUQ98] DUQUE, M., GAUTHIER, A., GIRALDO, E., Start up and control of high rate anaerobic digester for industrial waste water treatment using fuzzy logic, *World Automation Congress*, Alaska, 1998
- [FOU79] FOULARD, C., GENTIL, S. et SANDRAZ, J.P., *Commande et régulation numérique par ordinateur*. Editions Eyrolles, Deuxième édition, Paris, 1979.
- [GIR86] GIRALDO, E., OROZCO, A., *Tratamientos Anaerobios de las Aguas Residuales*, Thèse Master Génie Civil, Université des Andes, Colombie, 1986
- [GUS79] GUSTAFSON, D.E., KESSEL, W.C., Fuzzy clustering with a covariance matrix, *IEEE CDC*, 1979
- [NAI03] NAIDU, D. S. *Optimal Control Systems*. CRC Press, USA, 2003.
- [ROU99] ROUX, G., TITLI, A. (Eds.), *FAMIMO Waste-water Benchmark*, FAMIMO deliverable, Rapport LAAS-CNRS, Février, 1999.
- [TAK85] TAKAGI, T., SUGENO, M., Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol.15, n1, pp.116-132, 1985.
- [WAN95] WANG, H. O., TANAKA, K. and GRIFFIN, M., « Parallel Distributed Compensation of Nonlinear Systems by Takagi-Sugeno Fuzzy Model », *Proc. FUZZ-IEEE'95*, pp.531-538, 1995.
- [YAG94] YAGER, R., FILEV, D., *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*, John Wiley & Sons, USA, 1994.

⁶ FMID : *Fuzzy Model Identification Toolbox for Matlab®*, développé par le Prof. Robert Babuška, Delft University of Technology, The Netherlands.