Etude de la partie haute pression du système « Common Rail » en vue de son diagnostic à l'aide d'observateurs à mémoire finie

Guillaume Graton, Frédéric Kratz, Jacques Fantini

Laboratoire Vision et Robotique
63, av. de Lattre de Tassigny
18020 Bourges Cedex
Prenom.Nom@bourges.univ-orleans.fr

José Ragot

Centre de Recherche en Automatique de Nancy
2, av. de la Forêt de Haye
Institut National Polytechnique de Lorraine
54516 Vandoeuvre les Nancy
Jose.Ragot@ensem.inpl-nancy.fr

Pierre Dupraz

Delphi Diesel Systems
Technical Center Blois
9, boulevard de l'industrie
41008 Blois Cedex
pierre.dupraz@delphi.com

RESUME

Après une présentation du système d'injection diesel, l'étude s'attardera sur l'écriture de sa représentation d'état. Celle-ci est issue d'équations différentielles non linéaires. Après la linéarisation des équations différentielles, l'étude s'arrêtera plus en détail sur la méthode des observateurs à mémoire finie. Enfin quelques résultats seront présentés.

Le but de ce travail vise à apporter une connaissance (la plus précise possible) sur la détection des défauts potentiels du système d'injection. Ces défauts peuvent être précurseurs de pannes intervenant sur le moteur et pouvant entraîner la détérioration du moteur ou d'organes annexes.

MOTS CLES : diagnostic, détection, défauts, observateurs, mémoire finie.

ABSTRACT

After a presentation of diesel injection system, the study will be focused on the writing of its state representation. These one result from non-linear differential equations. After the linearization of differential equations, the study will stop more in detail on the method of the finite memory observers. Finally some results will be proposed.

The aim of this work is to bring a knowledge (as specifies as possible) on the detection of the potential faults on the injection system. These faults can be precursory engine failures, which can involve the deterioration of the engine or additional components.

KEYWORDS: diagnosis, detection, fault, finite memory.

INTRODUCTION

Le diagnostic est une partie importante des stratégies mises en place sur les véhicules et essentiellement celles sur le moteur : [1], [2] mais aussi [5], [6] et [8]. Dans cet article, le diagnostic prend sa place dans une partie spéciale de la stratégie mise en place sur le moteur : le contrôle de la pollution véhicule. En effet, un grand nombre de pays dans le monde ont signé des conventions visant à réduire les émissions des polluants, la référence au protocole de Kyoto, [10] illustre ces propos. Les motoristes ont dû développer de nouveaux véhicules afin de réduire les émissions des gaz à effet de serre : le système Common Rail a ainsi été développé.

Dans la majorité des cas de défauts survenant sur le moteur, une commande robuste de l'injection de carburant suffit à contrer les augmentations de pollution dus aux défauts et contribue ainsi au bon fonctionnement du système «d'injection haute pression». Mais pour s'assurer du bon fonctionnement, il faut s'assurer souvent de la cohérence des informations disponibles et donc en particulier des mesures.

Dans le cas où le contrôle ne serait pas assez efficace ou suffisant pour réduire les émissions des gaz à effet de serre, le moteur polluera de plus en plus et dans les cas les plus critiques cela peut amener à la destruction du moteur. Pour une meilleure qualité des performances du moteur et une meilleure souplesse d'utilisation, une stratégie de surveillance doit être mise en place. Cela permettra d'être sûr que si un défaut apparaît, la stratégie de diagnostic mise en place sur le moteur sera capable de le détecter, de le localiser et de prévenir le conducteur et dans un même temps de stopper l'excès de pollution.

Dans cet article, le modèle de la partie haute pression du système « Common Rail » est connu ; une méthode de diagnostic utilisant un modèle va être appliquée et tout particulièrement des observateurs vont être implémentés afin de générer un signal indicateur de défauts (résidus).

Parmi toutes les différentes méthodes de diagnostic utilisant des observateurs, plusieurs raisons nous ont naturellement conduit à la mise en place d'observateurs à mémoire finie ainsi citons :

- la volonté d'être robuste aux variations de modèles,

- la possibilité de construire un banc d'observateur (nombre plus important d'indicateurs de défaut : les résidus)

- la volonté d'être rapide.

Trois études sur le diagnostic des systèmes à injection diesel ont déjà été réalisées : [3], [4] et [9]. Cette étude est dans la continuité de [3] et [4], sa spécificité est d'être au plus proche de la réalité c'est-à-dire de la technologie récemment développée par l'équipe Fuel Injection Equipment de Delphi.

REPRESENTATION D'ETAT

Le système Common Rail développé par Delphi a pour élément principal la rampe d'accumulation de carburant, elle est communément appelée Rampe Commune, de l'anglicisme Common Rail.

Une pompe à haute pression alimente la rampe via une vanne d'admission. Cet actionneur basse pression, appelé Inlet Metering Valve (IMV), est utilisé pour contrôler la pression rail en régulant la quantité de carburant qui est envoyée aux éléments de pompage de la pompe HP.

En aval de la rampe, se trouvent les injecteurs, qui pulvérisent la quantité voulue de carburant dans la chambre d'admission, ainsi qu'une valve haute pression (appelée HPV) de décharge qui permet la chute de la pression dans la rampe lors des décélérations. Cette décharge est réalisée par le décollement d'une bille de son assise conique, créant alors un conduit de passage pour le fluide, qui génère une fuite. La bille est soumise à différentes forces qui contribuent à son positionnement.

Le système d'équations modélisant le système Common Rail a pour écriture :

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2 \\
\dot{x}_2 &= c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + c_{23}x_3 + c_{24}x_1x_3 + c_{25}x_6 + c_{26} \\
\dot{x}_3 &= \left(c_{31}\omega_e^2 + c_{32}\omega_e + c_{33}\right)x_4 + c_{34}\omega_e u_1 + c_{35}x_1^{1.88} + \\
&\quad c_{36}x_1\sqrt{x_3} + c_{37}x_2 \\
\dot{x}_4 &= c_{41}x_5 + c_{42}x_4 + c_{43} \\
\dot{x}_5 &= c_{51}u_2 + c_{52}x_5 \\
\dot{x}_6 &= c_{61}u_3 + c_{62}x_6
\end{aligned} \qquad (1)$$

en définissant :

- un vecteur X de 6 états : x_1, x_2 position et vitesse de la bille, x_3 ou P_{rail} la pression dans le rail, x_4 ou S_{IMV} la section de l'IMV, x_5 ou I_{IMV} le courant de l'IMV et x_6 ou I_{HPV} le courant de l'HPV,

- un vecteur u de 3 entrées u_1 ou $F_{uelling}$ quantité de gasoil injecté par cycle moteur, u_2 ou U_{IMV} la tension IMV et u_3 ou U_{HPV} la tension HPV,

- la vitesse moteur : ω_e,

- les paramètres c_i .

Ce système d'équations s'accompagne de butées de position sur la bille, de remises à zéro et seuillage des états.

Seuls la pression rail : P_{rail} et le courant de l'HPV : I_{HPV} sont mesurés sur (1), l'équation de mesure s'écrit :

$$y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} X = \begin{pmatrix} x_3 \\ x_6 \end{pmatrix} \qquad (2)$$

où X est le vecteur d'état comme précédemment.

DEFINITION ET MISE EN ŒUVRE DE L'OBSERVATEUR

Le système d'équation (1) modélisant le système Common Rail est un système non-linéaire. La méthode traitée dans [7] décrit la mise en œuvre d'un observateur non linéaire, elle pourrait donc être appliquée dans ce cadre. Le principal inconvénient de cette méthode [7] est son coût et sa mise en place en temps réel sur le système Common Rail. Dans cette étude, nous lui préférerons un observateur linéaire. Pour cela, la linéarisation du modèle s'impose. De plus, pour pouvoir implémenter la méthode de diagnostic en temps réel au sein d'un calculateur, nous avons besoin d'un modèle en temps discret. La discrétisation, avec une période d'échantillonnage $T_e = 10^{-4}s$, puis la linéarisation, tangente au point de fonctionnement, du système d'équations (1), donnent la représentation d'état suivante :

$$\begin{aligned}
X(k+1) &= A(k)X(k) + B(k)u(k) + f(k) + w(k) \\
y(k) &= CX(k) + v(k)
\end{aligned} \qquad (3)$$

où $X(k) = [x_1(k) \quad x_2(k) \quad x_3(k) \quad x_4(k) \quad x_5(k) \quad x_6(k)]^T$ représente le vecteur d'état à l'instant k, $u(k) = [u_1(k) \quad u_2(k) \quad u_3(k)]^T$ le vecteur de commande, $f(k)$ le vecteur des constantes dues à la linéarisation, A et B sont respectivement les matrices d'état et de commande issues de la linéarisation de (1), elles dépendent de la vitesse moteur ω_e à l'instant k.

Pour représenter les incertitudes sur les paramètres c_i et les erreurs de modélisation, nous avons introduit un bruit d'état w. Les bruits w et v respectivement d'états et de mesures sont supposés blancs, gaussiens, non corrélés.

La relation liant l'état retardé $X(k-i)$ à l'état courant $X(k)$ peut être exprimée par l'expression suivante :

$$X(k-i) = \left(\prod_{j=i}^{1} A^{-1}(k-j)\right)X(k) - \sum_{j=1}^{i}\left(\prod_{l=i}^{j} A^{-1}(k-l)\right) \left[B(k-j)u(k-j) + f(k-j) + w(k-j)\right]$$

L'équation de mesure devient alors :

$$y(k-i)=C\left(\prod_{j=i}^{1}A^{-1}(k-j)\right)X(k)-C\sum_{j=1}^{i}\left(\prod_{l=i}^{j}A^{-1}(k-l)\right)\left[B(k-j)u(k-j)+f(k-j)+w(k-j)\right]+v(k-i) \quad (4)$$

et cela pour tout $i=1,\ldots, L$; avec $L\in\mathbb{N}$

En écrivant le système d'équation (3) sur un horizon L, c'est-à-dire de k-L à k, nous obtenons alors la relation :

$$Y(k-L)=M_L(k)X(k)-H_L(k)U(k-L)-N_L(k)F(k-L)-N_L(k)W(k-L)+V(k-L) \quad (5)$$

où les vecteurs *Y(k-L)*, *U(k-L), F(k-L), V(k-L)* et *W(k-L)* représentent la concaténation des vecteurs y, u, f, v et w sur les instants *k-L, …, k* ; ainsi nous avons, par exemple, pour *Y(k-L)*, la concaténation des mesures suivante : $Y(k\text{-}L)=[y(k)^T,\ldots, y(k\text{-}L)^T]^T$.

Chacune des lignes de M_L, H_L et N_L sont déduites de (4) pour chaque indice $i=1,..,L$; nous avons :

$$M_L(k)=\begin{bmatrix} C \\ CA^{-1}(k-1) \\ \vdots \\ CA^{-1}(k-L)\ldots A^{-1}(k-1)\end{bmatrix}$$

$$H_L(k)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ CA^{-1}(k-1)B(k-1) & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 \\ CA^{-1}(k-L)\ldots A^{-1}(k-1)B(k-1) & \cdots & CA^{-1}(k-L)B(k-L)\end{bmatrix}$$

$$N_L(k)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ CA^{-1}(k-1) & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 \\ CA^{-1}(k-L)\ldots A^{-1}(k-1) & \cdots & CA^{-1}(k-L)\end{bmatrix}$$

En isolant de (5) le vecteur de l'état courant *X(k)*, il vient :

$$M_L(k)X(k)=Z(k-L)+N_L(k)W(k-L)-V(k-L) \quad (6)$$

avec $Z(k-L)=Y(k-L)+H_L(k)U(k-L)+N_L(k)F(k-L)$.

En supposant le vecteur d'états x non corrélé avec le bruit de mesure v, la résolution de l'équation (6) va être réalisée par la minimisation suivant X de la fonctionnelle :

$$J(x)=\frac{1}{2}\left\|Z(k-L)-M_L(k)X(k)\right\|^2_{R_k^{-1}} \quad (7)$$

Cette équation est résolue par la méthode des moindres carrés, cela donne :

$$\hat{X}_L(k)=\left(M_L^T(k)R_k^{-1}M_L(k)\right)^{-1}M_L^T(k)R_k^{-1}Z_L(k) \quad (8)$$

où R_k^{-1} désigne l'inverse de la variance des bruits : $R_k=Var\left[V(k-L)-N_L(k)W(k-L)\right]$.

Remarque 1 : la condition d'existence de l'observateur est donnée par l'inversibilité de la matrice $\left(M_L^T(k)R_k^{-1}M_L(k)\right)$.

INFLUENCE DE LA LONGUEUR DE LA FENETRE

L'équation (8) nous donne une estimation de l'état à l'instant courant k , son écriture est intrinsèquement liée à la longueur de la fenêtre. La taille de la fenêtre va jouer un rôle important dans l'estimation de l'état. En effet, plus la taille de la fenêtre sera importante, plus le modèle sera riche en informations, et donc plus les erreurs seront faibles.

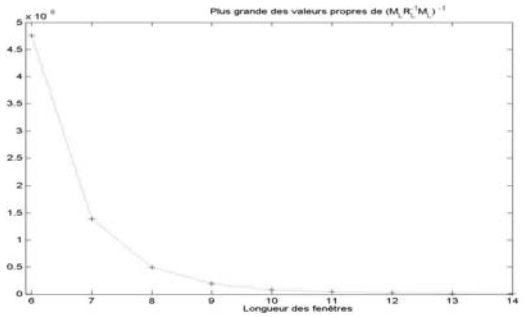


Figure 1 : Graphe de la plus grande des valeurs propres de $\left(M_L^T(k)R_k^{-1}M_L(k)\right)^{-1}$ en fonction de la longueur *L*.

Sur la figure 1, est représentée, pour chaque valeur de L, la plus grande valeur propre de la matrice $\left(M_L^T(k)R_k^{-1}M_L(k)\right)^{-1}$ qui caractérise la variance des erreurs d'estimation. Ainsi en prenant la plus grande de ces erreurs, il est facile de constater que plus la taille de la fenêtre sera importante, plus la plus grande des erreurs sera faible ; caractérisée par la convergence asymptotique sur la figure 1.

Nous constatons qu'à partir d'une certaine taille, l'erreur est sous un seuil défini à l'avance. L'apport d'information n'est plus significatif. Dans notre cas, le choix d'une fenêtre de taille *L=12* est un bon compromis. Cette taille sera prise arbitrairement comme étant la plus grande taille de fenêtre pour l'observateur. La taille minimale est donnée quant à elle par l'observabilité du système, dans notre cas cette taille minimale veut *6*.

Remarque 2 : Une légère nuance peut être apportée par rapport à ce qui a été dit dans les deux paragraphes précédents. En effet, la représentation d'état (3) est issue de la linéarisation de (1) ; la matrice A n'est pas constante,

la plus grande des valeurs propres de $\left(M_L^T(k)R_k^{-1}M_L(k)\right)^{-1}$ va donc évoluer à chaque instant *k*. Il n'en reste pas moins les généralités détaillées ci-dessus.

Remarque 3 : L'observateur ainsi défini par (7) est dit observateur à réponse pile (Deadbeat observer). La convergence de cet observateur va se faire en *L* coups. Cette propriété est illustrée dans [3].

GENERATION D'INDICATEURS DE DEFAUTS

La première étape du diagnostic passe par la création d'indicateurs de défauts couramment appelés « résidus ». Ces indicateurs sont très importants. Ils vont servir à détecter les défauts.

La construction des résidus va se faire en utilisant une relation de consistance. La construction de ces résidus a été définie de manière à assurer, dans un cas sans défaut, que les résidus soient nuls en moyenne.

Dans notre cas, le calcul des résidus commence par le choix de deux fenêtres de temps de longueurs L_1 et L_2. La méthode des observateurs à mémoire finie donne deux estimations de *X(k)*, respectivement $\hat{X}_{L_1}(k)$ et $\hat{X}_{L_2}(k)$.

La génération de résidus va se faire grâce à la relation :

$$r(k) = \hat{X}_{L_1}(k) - \hat{X}_{L_2}(k) \qquad (8)$$

avec des valeurs numériques centrées en zéro (voir preuve dans [3]).

RESULTATS

Avant de donner des résultats sur la détection des défauts, les figures 2 et 3 donnent la représentation des entrées (figure 2) et des états estimés, associés (figure 3).

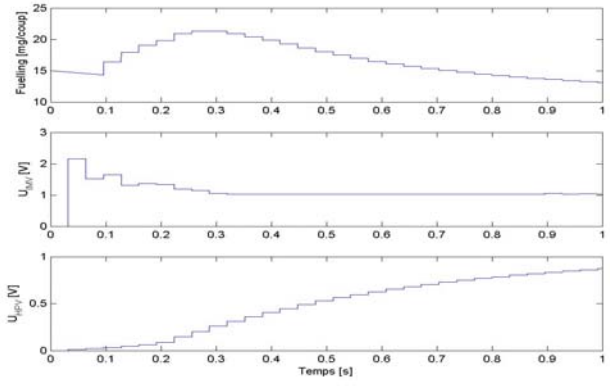


Figure 2 : Graphes des entrées.

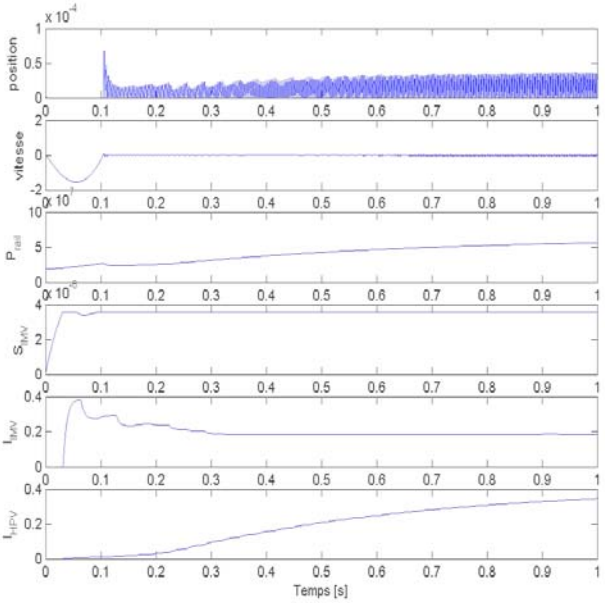


Figure 3 : Graphes des états estimés par (1)

Dans cette dernière partie, la réponse des résidus à certains défauts va être étudiée. Tout d'abord, le cas sans défaut est regardé (figure 4).

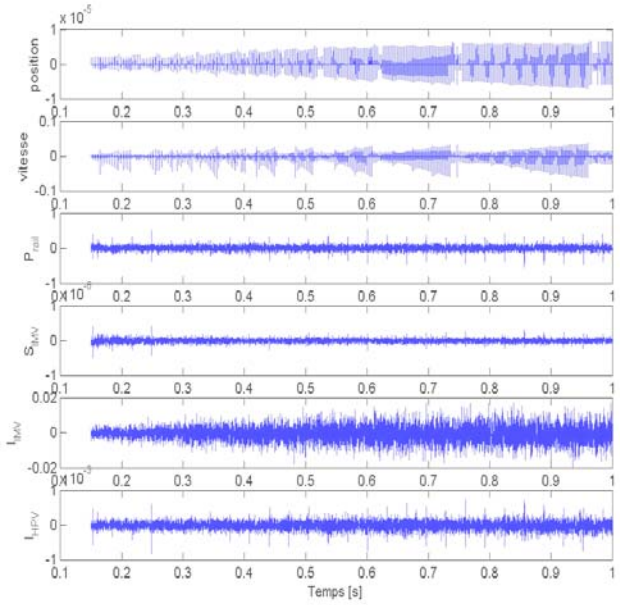


Figure 4 : Graphes des résidus dans le cas sans défaut.

Dans la figure 4, la dernière composante du résidu est nulle en moyenne. En revanche, les autres composantes sont biaisées. Ce biais est dû à la linéarisation de (1). Cette linéarisation a entaché (2) d'erreur de modélisation. Ces erreurs se sont répercutées sur le résidu *r*. Remarquons aussi que ces composantes du résidu ont une variance qui évolue au cours du temps, les raisons sont expliquées dans la remarque 2.

Regardons l'influence d'un défaut sur les composantes du résidu. Dans un premier temps, le cas d'un défaut sur le capteur de pression rail est généré par un échelon de *10%* en plus de la valeur mesurée (cf : Figure 5).

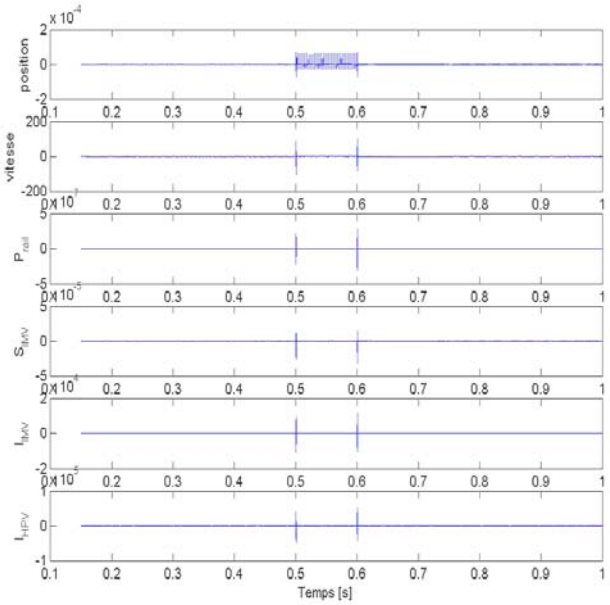


Figure 5 : Graphes des résidus en présence d'un défaut sur le capteur de pression rail.

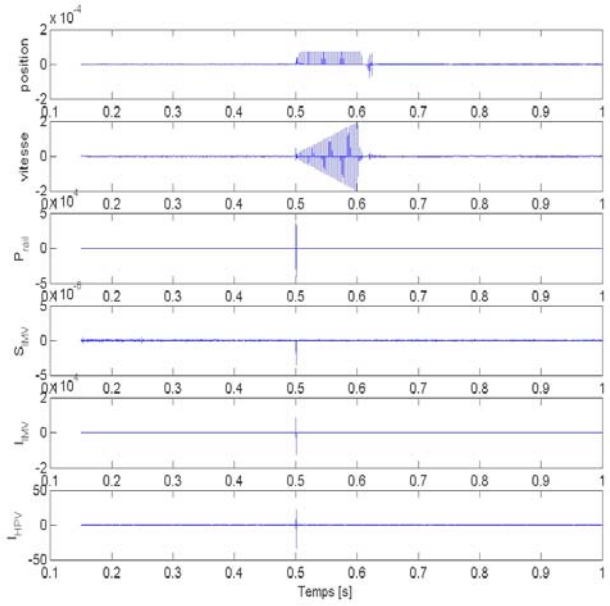


Figure 6 : Graphes des résidus en présence d'un défaut de blocage de l'HPV en position fermée.

Sur la figure 6, la modélisation du grippage de la vanne HPV est simulée en position fermée. La vanne doit être ouverte, mais elle reste en position fermée. La présence de ce défaut a alors une répercussion sur les trois premières composantes du résidu.

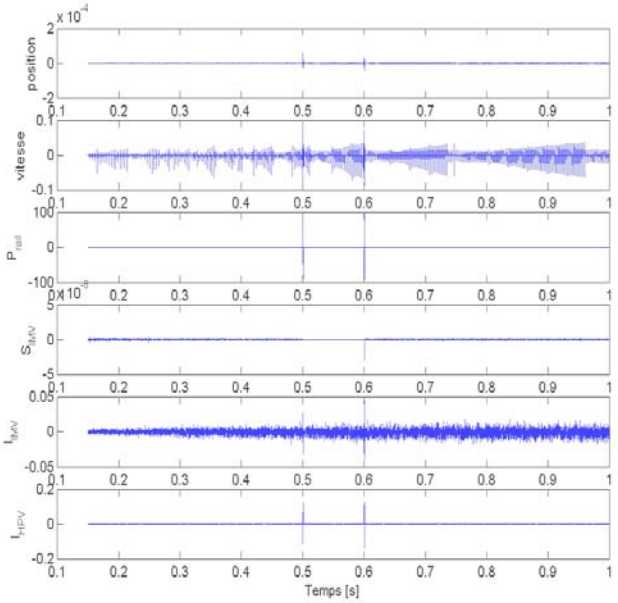


Figure 7 : Graphes des résidus en présence d'un défaut sur l'actionneur u_1.

Enfin, cette étude s'est penchée sur le cas d'un défaut actionneur tel que le défaut de tension sur l'IMV (cf : Figure 7). Le défaut généré est une coupure de connexion sur le signal. La tension de l'IMV vaut alors *0 Volt*. Ce défaut est une nouvelle fois détecté par la procédure mise en place.

Notons cependant que l'étude n'a pas été restreinte à ces trois cas. Pas souci de concision, les autres cas sont donnés sous la forme d'un tableau.

	Résidu					
	1	2	3	4	5	6
Pression rail	1	1	1	1	1	X
Courant HPV	1	0	0	1	1	1
Fuelling	1	0	0	1	1	0
Tension IMV	0	0	0	0	0	0
Tension HPV	0	0	0	1	1	0
HPV bloquée fermée	1	1	X	X	X	0
HPV bloquée ouverte	1	1	0	0	0	0
IMV bloquée fermée	X	X	X	X	X	0
IMV bloquée ouverte	X	X	X	X	X	0

Tableau 1 : Sensibilité des résidus en présence de différents défauts.

Remarque 4 : Dans le tableau 1, les signes 0, 1 et X désignent respectivement que la composante du résidu n'est pas sensible au défaut, est sensible au défaut et l'est mais dans de moindres proportions ou partiellement.

En terme de détection, le défaut sur la tension IMV n'est pas détectable, les autres le sont. Une remarque peut être faite sur le grippage de l'IMV, ce défaut est détecté par les deux premières composantes lors de la disparition et

par les trois suivantes lors de l'apparition (d'où les X dans le tableau).

En terme d'isolation, les défauts sur la pression rail, le fuelling, le grippage de l'IMV et de l'HPV (en position fermée) sont difficilement isolable. Les autres défauts sont isolables entre eux.

CONCLUSION

Cette étude fait suite aux deux premières études réalisées sur le diagnostic des systèmes d'injection diesel. Cette étude montre que la détection de défaut sur le système avec HPV est possible cependant le défaut sur la commande de Fuelling n'est pas détecté.

Toutefois, la linéarisation du système biaise les résidus sur lesquels portent cette linéarisation. En effet, dans le cas sans défaut, la composante du résidu liée à la pression rail a une moyenne non nulle. Malgré cela, la détection des défauts n'est pas altérée.

Cependant, la forte dynamique liée à l'HPV est le souci majeur de cette étude. En effet, le pas d'échantillonnage nécessaire pour simuler un tel système est de 10^{-4}. Cela représente un coût d'un point de vue temps de calcul. Malgré cela, le problème lié aux butées et aux remises à zéro de l'état de la vitesse bille est certes pratique pour la modélisation mais constitue un point difficile dans la prise en compte dans l'observateur et dégrade les performances des observateurs. Une des perspectives est la prise en compte des non-linéarités du système.

Après cette étude de faisabilité, nous allons nous orienter sur l'analyse de sensibilité des résidus, amélioration de la détection (sur les figures 6 et 7, ont voit un effet dérivateur : un calcul cumulé devrait ouvrir quelques pistes), …

REMERCIEMENTS

Ce projet a été réalisé grâce à la coopération des Fonds Européens (FEDER), à l'ANRT (Agence Nationale de Recherche et Technologie), aux fonds de l'état français (FRED) et aux fonds de la Région Centre. Ce projet a été mis en place grâce au Pôle Capteurs Automatismes de Bourges.

BIBLIOGRAPHIE

1. Berton, A., Nyberg M. and Frisk E. (2004). Improving diagnosis performance on a truck engine making use of statistical charts. In: *IFAC Advances on Automotive Control (AAC'04)*.
2. Fisher, D., Schöner H.-P. and Isermann R. (2004). Model-based fault detection for an active vehicle suspension. In: *IFAC Advances on Automotive Control (AAC'04)*.
3. Graton, G., Fantini J., Kratz F., Ragot J. and Dupraz P. (2004). Diagnosis of diesel injection system using finite memory observers. In *Proceedings of IFAC Symposium on Advances in Automotive Control*. (April 19-23, 2004, Salerno, Italy) pp. 398–403.
4. Graton, G., Fantini J., Kratz F. and Dupraz P. (2005). Diagnosis using finite memory observers on an unknown input system. In *Proceedings of 16th IFAC World Congress* (July 4-8, 2005, Prague, Czech Republic).
5. Isermann, R. (2001). Diagnosis Methods for Electronic Controlled Vehicles. In: *Vehicles System Dynamics, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, Vol. **36**, No.2-3, Sept. 2001, Sweets&Zeitlinger.
6. Kimmich, F., Schwarte A. and Isermann R. (2001). Model Based Fault Detection for Diesel Engines. *Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*. Aachen, Germany.
7. Moraal P. and Grizzle J. (1995). Observer design for nonlinear systems with discrete-time measurements. *IEEE Transactions on Automatic Control* 40(3), 395–404.
8. Nyberg, M. (1999). Model Based Fault Diagnosis: Methods, Theory, and Automotive Engine Applications. In. *Dissertations No. 591,* Department of Electrical Engineering, Linköping University, Sweden.
9. Sabeh Z., Ragot J., Kratz F. (2004). Structured hypothesis tests based diagnosis: application to a common rail diesel injection system. In *Proceedings of International Mediterranean Modeling Multiconference*, p. 3–8
10. UNFCCC (2002). The United Nations Framework Convention on Climate Change.