

Diagnostic à base de modèles et aide à la prise de décision robuste par une approche ensembliste

Nizar Chatti¹, Rémy Guyonneau¹, Laurent Hardouin¹

¹ LARIS EA7315, ISTIA, Université d'Angers
nizar.chatti@univ-angers.fr

Abstract

L'un des enjeux les plus importants des technologies impliquées dans l'ingénierie des systèmes complexes concerne aujourd'hui le diagnostic temps réel. Cette discipline repose principalement sur les algorithmes de détection et de localisation de défauts. Dans le présent papier, nous présentons une méthode générique permettant d'améliorer la robustesse de la procédure de détection de défauts. Cette méthode procède en deux étapes distinctes. Dans un premier temps, l'approche des Bond Graphs est utilisée pour générer, sur la base d'un modèle graphique, un ensemble d'indicateurs de défauts appelés résidus. Dans un second temps, les seuils de détectabilité permettant d'évaluer ces résidus sont déterminés grâce à l'analyse par intervalles et aux techniques de satisfaction de contraintes dans le but de réduire au maximum le taux de fausses alarmes et de non détection. Les performances de la méthode proposée sont démontrées par des données expérimentales provenant d'un robot omnidirectionnel.

Mots clés: diagnostic, Bond Graph, analyse par intervalles, prise de décision robuste, Robotique.

1 Introduction

Les systèmes automatisés sont de plus en plus complexes et doivent répondre à des enjeux majeurs de sécurité et de sûreté de fonctionnement afin de garantir leurs bons fonctionnements. Ainsi, l'élaboration de méthodes de diagnostic, de surveillance et d'aide à la prise de décision devient primordiale dès la phase de conception du système afin de connaître à chaque instant et le plus finement possible son état de fonctionnement et sa disponibilité opérationnelle. Le diagnostic a pour rôle de détecter les défauts et de localiser le ou les composants pouvant être à l'origine des écarts entre le comportement prévu du système et celui observé.

Les premières approches de diagnostic furent basées sur la redondance matérielle qui consiste à dupliquer des capteurs et/ou des actionneurs dans le but d'obtenir des informations supplémentaires sur l'état du système. Néanmoins, ce type de diagnostic se limite à la surveillance des éléments redondants et il arrive que certaines variables à surveiller ne soient pas accessibles à la mesure ou tout simplement que l'ajout de capteurs et/ou actionneurs se révèle coûteux et difficile à réaliser.

Pour pallier à cette problématique, différentes approches de diagnostic ont été proposées. Elles reposent sur l'élaboration d'un modèle comportemental de nature quantitative ou qualitative, sur l'exploitation de données historiques ou sur la connaissance de l'expert. Ainsi, on distingue deux communautés différentes et en l'occurrence la communauté de l'Automatique, connue sous le nom de la communauté FDI (Fault Detection and Isolation) qui se base principalement sur des approches

quantitatives et la communauté de l'intelligence artificielle connue sous le nom de la communauté DX qui propose des approches qualitatives (Voigt et al., 2014), (Zhao et al., 2009).

Dans cet article, on s'intéresse aux approches quantitatives basées sur l'exploitation des Relations de Redondances Analytiques (RRA) pouvant être extraites d'un modèle (graphique ou analytique). Ces RRA sont des contraintes déduites à partir d'un sous-système observable et surdéterminé (le nombre de variables inconnues est inférieur au nombre de relations qui les lient) et exprimées en termes de variables connues. L'existence d'une RRA est conditionnée par la capacité à extraire des relations liant différentes variables à partir d'un modèle ainsi que la capacité à substituer dans ces relations les variables inconnues par les données disponibles (entrées, mesures...). Parmi les approches de diagnostic dites à base de génération de résidus, on peut citer les approches par observateurs (Pierri et al., 2008), (Narasimhan et al., 2008), par espace de parité (Odendaal et al., 2014), par estimation paramétrique (Mulumba et al., 2014), par Bond Graph Signé (Chatti et al., 2014) (Chatti, 2013)...

Le choix de l'approche de génération de RRA dépend principalement du type de modèle disponible pour représenter le processus mais aussi du type de défaut que l'on veut détecter. Une fois les RRA générées, elles sont évaluées en ligne puis une procédure d'aide à la décision est appliquée en vue de déterminer le défaut qui est survenu. La différence entre la valeur mesurée et la valeur estimée s'appelle résidu ou indicateur de défaut. A chaque défaut, correspond un ensemble de résidus dont la valeur est différente de zéro. C'est sa signature. On parle ainsi de Matrice de Signature de Défauts (MSD) qui regroupe en colonnes l'ensemble des résidus et en ligne les défauts qui leur sont sensibles. En théorie, en l'absence de défauts, la valeur d'un résidu doit être égale à zéro. En pratique, parce que les signaux sont bruités, ou parce que les paramètres de modélisation ne sont pas parfaitement identifiés, la valeur d'un résidu est rarement nulle. Les premières solutions furent basées sur la comparaison du résidu à des seuils prédéfinis prenant en considération les incertitudes de mesures des capteurs. Au delà de ces seuils, la présence d'un défaut est confirmée.

Il paraît donc clair que l'étape d'évaluation des résidus est primordiale pour l'ensemble de la procédure de diagnostic et pour la pertinence des résultats qui en résultent. En effet, il convient de trouver un compromis entre le taux de non détection qu'engendrent des seuils trop grands et le taux de fausses alarmes qui peut être dû à des seuils trop petits comme l'illustre la figure 1.

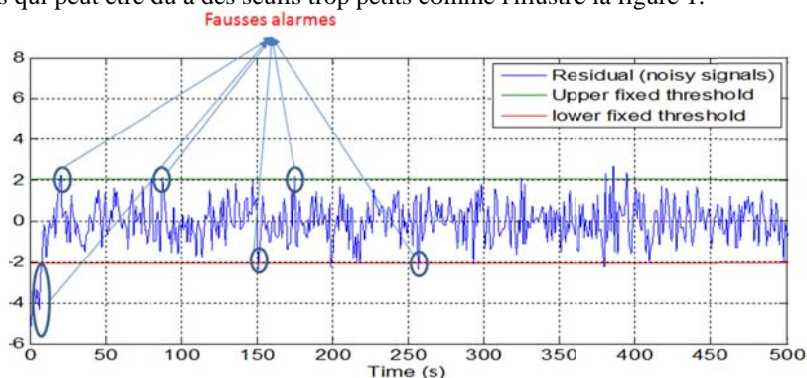


Figure 1: Illustration des limites de la procédure d'évaluation des résidus à base de seuils fixes

D'autres approches d'évaluation des résidus ont été proposées dans la littérature et s'appuient sur des tests statistiques en établissant des fonctions de décision qui dépendent de la nature du résidu. Parmi ces tests, on trouve le test du maximum de vraisemblance ou test GLR (de l'anglais Generalized Likelihood Ratio) qui prend en compte les perturbations stochastiques (Coluccia et al., 2013), le test de Page-Hinkley qui considère la valeur moyenne du résidu sur une fenêtre de détection par rapport à

un seuil prédéfini (Borne et al., 1990). Néanmoins, ces approches requièrent la connaissance des distributions statistiques des résidus en fonctionnement défaillant, ce qui n'est pas évident pour des applications réelles.

Il apparaît alors plus judicieux de considérer les bornes (intervalles) de certaines variables plutôt que de supposer la connaissance de la distribution de probabilité de celles-ci. Ainsi, différents travaux se sont focalisés sur l'exploitation des approches ensemblistes, notamment l'analyse par intervalles, dans le contexte de la détection de défauts comme par exemple les travaux de (Blesa et al., 2012). Récemment, de nouvelles approches ont été proposées visant à utiliser l'analyse par intervalles pour l'amélioration des tests de consistance pour des systèmes dynamiques en exploitant les incertitudes paramétriques des paramètres disponibles (Puig et al., 2008, 2013). Néanmoins, ces approches ne sont associées qu'à des classes particulières de systèmes comme par exemple les systèmes plats (Jaulin et al., 2013), (Seydou et al., 2013), ce qui limite le champs des applications plausibles.

Dans cet article, on s'intéresse à cette problématique en proposant une méthode générique permettant de pallier à ces limites en vue d'améliorer les performances du module de diagnostic par le biais de la génération de seuils adaptatifs.

La méthode proposée consiste à faire une modélisation sous la forme d'un problème de satisfaction de contraintes (CSP: Constraint Satisfaction Problem). Dans le CSP proposé, les contraintes correspondent aux résidus et les variables sont celles utilisées pour le calcul des résidus. Néanmoins, un problème se pose quant à la mise en oeuvre de l'algorithme de résolution du CSP et en l'occurrence l'évaluation des intervalles des dérivées des mesures lorsque celles-ci interviennent dans l'expression du résidu, ce qui est souvent le cas pour les résidus générés à partir des RRA déduites du BG. Pour résoudre ce problème, on a proposé un différentiateur par modes glissants qui permet d'estimer ces dérivées tout en fournissant les intervalles requis pour la résolution du CSP.

Le papier est organisé comme suit. Dans les sections 2 et 3, nous présentons brièvement l'approche du BG ainsi que la procédure de génération de RRA à partir du BG. La section 4 est consacrée à l'approche proposée pour l'amélioration de la robustesse de la procédure de diagnostic. Dans la section 5, nous illustrons cette approche sur un système de traction d'un robot mobile omnidirectionnel nommé Robotino et la section 6 conclut le papier en mettant en exergue les points forts de l'approche proposée.

2 Modélisation par Bond Graph

Le BG est un outil de modélisation basé sur l'échange de puissance et sur l'analogie entre les différents domaines de la physique (Thoma, 1975) et (Borutzky, 2006). De plus, il possède des propriétés structurelles et causales permettant de générer d'une façon systématique des indicateurs de fautes associés aux composants. Les procédures de génération du système de surveillance sont automatisées dans un outil logiciel FDIpad. Nous rappelons ici, la définition élémentaire des BG.

Définition:

un modèle BG est un graphe linéaire orienté $G(H, B, J)$ où $H \cup J$ sont les sommets et B est l'ensemble des arcs.

- $H = \{h\}$ est l'ensemble des éléments multi-port représentant les processus énergétiques fondamentaux. Il regroupe les éléments génériques suivants:
 - SE et SF qui représentent respectivement une source d'effort et une source de flux associées à des sources d'énergie. Par exemple un générateur de courant, une pompe sont des sources de flux et un générateur de tension est une source d'effort. On trouve également des sources d'effort modulées MSE et des sources de flux modulées MSF .

- I qui représente l'élément inductif associé à un phénomène dynamique de stockage d'énergie cinétique comme par exemple une masse, une bobine, une inertie...
- C qui représente l'élément capacitif associé à une fonction de stockage d'énergie comme par exemple un condensateur, un réservoir, un ressort...
- R qui représente l'élément résistif associé à des éléments qui dissipent de l'énergie comme par exemple une résistance électrique, un frottement, une vanne...
- TF (TransFormateur) et GY (GYrateur) qui sont associés à des fonctions de transformation. Par exemple un levier, une poulie, un transformateur électrique peuvent être représentés par un élément TF et un gyroscope, un capteur à effet Hall peuvent être représentés par un élément GY.
- De et Df qui représentent respectivement un détecteur d'effort et un détecteur de flux, qui sont associés à des fonctions de mesure.
- $B = \{b\}$ est l'ensemble des liens orientés représentant la transmission de puissance. Chacun d'entre eux est défini par $b_{ij} = \{n_i, n_j\}$ où $n_i \in \{H \cup J\}$ est le nœud d'origine et $n_j \in \{H \cup J\}$ est le nœud de destination. Deux variables sont associées à chaque lien b_{ij} : l'effort instantané e_i et le flux instantané f_i . La puissance est ainsi obtenue par la relation: $p_i = e_i \times f_i$.
- $J = \{j\}$ est l'ensemble des jonctions représentant la loi de conservation d'énergie. Chacune d'elles est représentée par un ensemble d'éléments $\{b_{in_1}, b_{in_2}, \dots, b_{out_1}, \dots, b_{out_m}\}$ où $\{b_{in_1}, b_{in_2}, \dots, b_{in_n}\}$ est l'ensemble des liens arrivant sur la jonction et $\{b_{out_1}, b_{out_2}, \dots, b_{out_m}\}$ est l'ensemble des liens partant de la jonction. On distingue deux types de jonctions:
 - *jonction 0* : Au niveau de cette jonction, on a une sommation des efforts et une égalité des flux c.-à-d. $e_i = e_j$ et $\sum_{i=1}^n f_i = \sum_{j=1}^m f_j \quad \forall b_{in_i}, \forall b_{out_j}, i = 1 \dots n, j = 1 \dots m$,
 - *jonction 1* : Au niveau de cette jonction, on a une sommation des flux et une égalité des efforts c.-à-d. $f_i = f_j$ et $\sum_{i=1}^n e_i = \sum_{j=1}^m e_j \quad \forall b_{in_i}, \forall b_{out_j}, i = 1 \dots n, j = 1 \dots m$,

Prenons l'exemple du système électrique de la figure 2 (a), le modèle BG correspondant est donné par la figure 2 (b). Les capteurs de courant et de tension sont représentés respectivement par les éléments Df et De . La *jonction 1* est associée aux éléments U , R_1 et L_1 car il y a une égalité de flux (courant électrique) qui traverse ces éléments mais une différence des efforts (tensions électriques), contrairement à la *jonction 0* qui est connectée aux éléments R_2 et C_1 où l'on a la même tension aux bornes de ces éléments mais une différence de courants électriques. La notion de causalité est représentée à l'aide d'un trait causal placé perpendiculairement à la demi flèche. Le trait causal est placé près de l'élément pour lequel l'effort est connu, et loin de l'élément pour lequel le flux est connu. La causalité est une propriété permettant de parcourir le BG comme un graphe et d'écrire systématiquement les équations pour chaque composant. Une description des règles d'affectation de la causalité sur les différents éléments peut être trouvée dans (Borutzky, 2006).

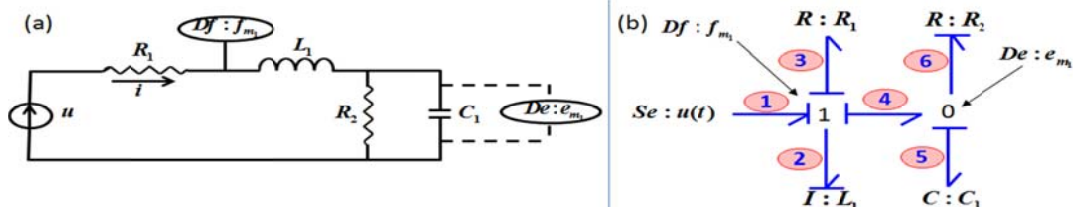


Figure 2: (a) Système électrique et (b) Modèle BG associé

3 Génération des relations de redondances analytiques

Pour générer les RRA, on construit le BG du système électrique (figure 2 (a)) en causalité dérivée comme l'illustre la figure 3 (a) pour s'affranchir des conditions initiales inconnues. Un BG avec des causalités correctement placées signifie que l'on peut résoudre le système d'équations correspondant et que par conséquent l'ensemble des variables inconnues peut être calculé en parcourant les chemins causaux (en allant des variables inconnues vers celles connues) si les contraintes structurelles des jonctions le permettent. L'algorithme permettant la génération automatique des RRA est implémenté moyennant le logiciel FDIpad. Une RRA est de la forme $f(D_e, D_f, S_e, S_f, MS_e, MS_f, \theta_m)$ où θ est l'ensemble des paramètres du processus. Ainsi une RRA conduit à la génération d'un résidu qui s'écrit sous la forme $r - f(D_e, D_f, S_e, S_f, MS_e, MS_f, \theta_m) = 0$. Les chemins causaux permettant de déduire les RRA sont donnés par la figure 3 (b).

Par la suite, une matrice de signature de défauts peut être obtenue à partir des résidus (représentant les lignes de la matrice) et des défauts (représentant les colonnes de la matrice). Cette matrice booléenne vise à évaluer les possibilités du système à détecter et à isoler les défauts. Les résidus générés doivent être évalués pour déterminer la présence des défauts. Cette évaluation est faite par l'utilisation de seuils fixes ou adaptatifs pour éviter les fausses alarmes. Un défaut est isolable s'il a une signature unique (distincte des autres signatures). Ainsi, toute la procédure de diagnostic est basée sur la robustesse durant la phase d'évaluation de résidus d'où l'intérêt de l'approche que nous proposons dans ce qui suit.

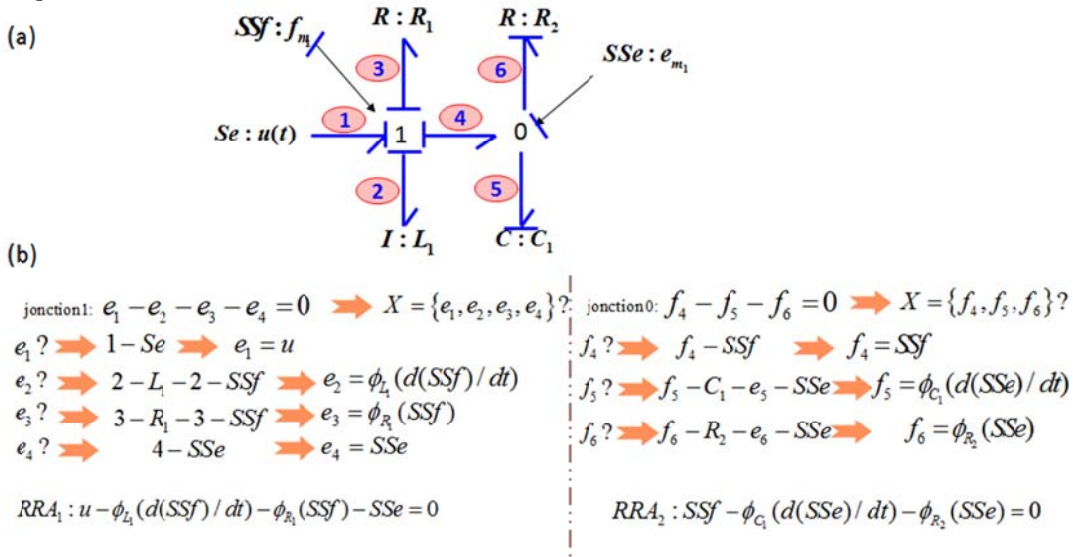


Figure 3: (a) BG en causalité dérivée et (b) déduction des RRA en parcourant les chemins causaux sur le BG

4 Approche proposée

La procédure proposée pour l'évaluation robuste des résidus est basée sur l'exploitation des incertitudes (paramétriques et de mesures). L'idée sous-jacente est la formulation du problème d'évaluation des résidus sous forme d'un CSP (section 4.1). La résolution de ce dernier consiste à

réduire les domaines en éliminant les valeurs inconsistantes avec les contraintes. Cette technique s'appelle la propagation de contraintes. Dans notre étude, les contraintes représentent les résidus dont on cherche à déterminer les intervalles optimaux.

Sachant qu'un résidu est censé évoluer autour de zéro en l'absence de défauts, un test d'inclusion est alors effectué une fois les domaines optimaux générés. Pour un résidu donné, si le zéro n'est pas inclus dans l'intervalle contracté, alors cela signifie qu'un défaut est détecté et que par conséquent le résidu prend la valeur booléenne "1" dans la matrice de signature de défaut. Ainsi le défaut peut être localisé et le mode de fonctionnement du système peut être identifié.

Néanmoins, un problème reste à résoudre et en l'occurrence la détermination des intervalles sur les dérivées des mesures indispensables pour la formulation du problème sous forme d'un CSP. Ces dérivées sont celles impliquées dans le calcul des résidus. Pour y parvenir, on a proposé l'utilisation d'une méthode de différentiation numérique par modes glissants qui offre d'une part une grande robustesse aux perturbations et d'autre part la possibilité de construire des bornes (précision) sur les estimées des dérivées. L'approche proposée est décrite par la figure 4.

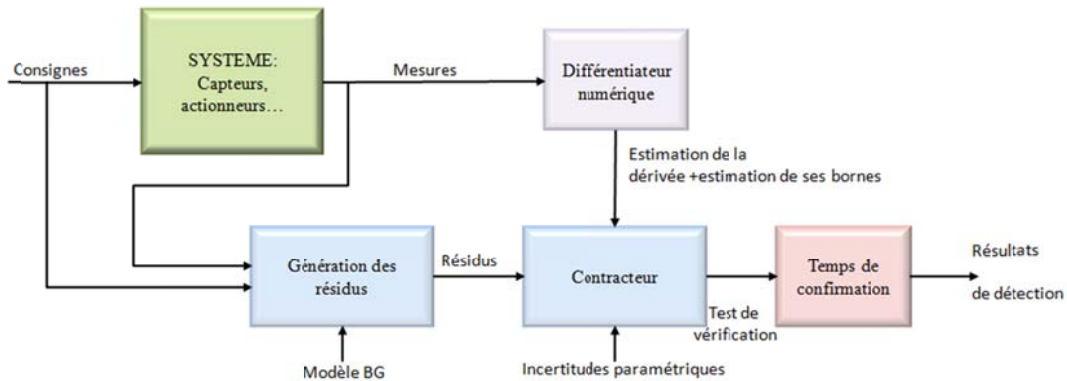


Figure 4: Description de l'approche proposée

4.1 Problème de satisfaction de contraintes

Un CSP est défini par 3 ensembles. Un ensemble de variables V , l'ensemble des domaines D de ces variables et l'ensemble des contraintes C liant ces variables entre elles. Prenons l'exemple du CSP suivant:

$$\left\{ \begin{array}{l} V = \{x_1, x_2, x_3\} \\ D = \{x_1 \in [7, +\infty], x_2 \in [-\infty, 2], x_3 \in [-\infty, 9]\} \\ C = \{x_1 = x_2 + x_3\} \end{array} \right\}$$

La résolution du CSP consiste à réduire les domaines en supprimant les valeurs inconsistantes avec les contraintes. Le CSP peut être résolu en s'appuyant sur l'arithmétique des intervalles (Rossi et al., 2006). Pour l'exemple précédent:

$$\begin{aligned} x_1 = x_2 + x_3 &\Rightarrow x_1 \in [x_1] \cap ([-\infty, 2] + [-\infty, 9]) \Rightarrow x_1 \in [7, +\infty] \cap [-\infty, 11] = [7, 11] \\ x_2 = x_1 - x_3 &\Rightarrow x_2 \in [x_2] \cap ([7, 11] - [-\infty, 9]) \Rightarrow x_2 \in [-\infty, 2] \cap [-2, +\infty] = [-2, 2] \\ x_3 = x_1 - x_2 &\Rightarrow x_3 \in [x_3] \cap ([7, 11] - [-2, 2]) \Rightarrow x_3 \in [-\infty, 9] \cap [5, 13] = [5, 9] \end{aligned}$$

Les solutions de ce CSP sont donc les domaines contractés suivants $[x_1]^* = [7, 11]$, $[x_2]^* = [-2, 2]$ et $[x_3]^* = [5, 9]$. Dans cet exemple, une méthode de propagation de contraintes

backward/forward est utilisée pour contracter les domaines. La propagation forward correspond à la contraction de $[x_1]$, puis l'information obtenue est propagée (propagation backward) aux domaines $[x_2]$ et $[x_3]$. Dans l'approche proposée pour la détection de défauts, nous avons adapté le CSP de la façon suivante:

* V: correspond aux variables énergétiques du BG (variables d'effort et de flux et leurs dérivées respectives.

* D: correspond aux intervalles de ces différentes variables

* C: correspond aux résidus générés à partir du BG en suivant la procédure décrite dans la section précédente.

Lorsque la résolution du CSP ne fournit aucune solution i.e. le domaine contracté $[d^*] \in D$ est l'ensemble vide, alors un défaut est détecté. Donc à chaque instant t_i , nous considérons l'intervalle fourni par l'algorithme de propagation de contraintes et nous effectuons un test d'inclusion pour vérifier que l'intervalle obtenu vérifie bien les contraintes. Néanmoins, la résolution du CSP requiert la connaissance des intervalles des dérivées impliquées dans le calcul des résidus. Pour y parvenir, nous avons proposé un différentiateur par modes glissants qu'on explicitera dans ce qui suit.

4.2 Différentiateur numérique

Le problème de la différentiation numérique a été largement étudié dans la littérature en raison de son importance dans de nombreux domaines de l'ingénierie et notamment dans les applications de diagnostic de défauts. Dans ce papier, on a utilisé un différentiateur par modes glissants d'ordre 1 pour estimer les dérivées qui sont impliquées dans le calcul des résidus en fournissant également une estimation de leurs intervalles respectifs. Ces intervalles représentent la précision de l'estimation. Dans ce qui suit, on décrit le différentiateur numérique utilisé et ces propriétés.

Le différentiateur d'ordre 1 proposé permet, en connaissant uniquement le signal bruité, l'estimation en temps réel d'un signal mesuré et de sa dérivée d'ordre 1. On considère un signal numérique à dériver :

$$y = y_0 + \varepsilon$$

où ε est un bruit borné et y_0 est un signal de base non bruité ayant sa n-ième dérivée lipschitzienne de constante $L > 0$ tel que:

$$|y_0^{(n)}(k) - y_0^{(n)}(k-1)| \leq L \cdot \Delta t$$

Les équations du différentiateur numérique à modes glissants d'ordre un proposé dans ce papier sont alors comme suit:

$$\begin{cases} \dot{z}_0 = -\alpha_1 \cdot \sqrt{|z_0 - y(t)|} \cdot \text{Sign}(z_0 - y(t)) + z_1 \\ \dot{z}_1 = -\alpha_0 \cdot \text{Sign}(z_0 - y(t)) \end{cases}$$

où z_0 et z_1 représentent respectivement l'estimation du signal y et de sa première dérivée \dot{y} et les coefficients α_i sont des gains positifs représentant les paramètres de réglage de la méthode et variant en fonction de la constante de Lipschitz L . L'intérêt de l'utilisation de ce différentiateur par modes glissants est qu'il permet également d'évaluer la précision de l'estimation de la dérivée du signal mesuré. Cette précision calculée comme suit: $\varepsilon_1 = \mu_1 \cdot \sqrt{L} \cdot (\bar{\varepsilon})^{\frac{-1}{2}}$

où $\mu_1 \geq 1$ (dépend uniquement de α_0 et α_1) et $\bar{\varepsilon}$ correspond à la valeur maximale du bruit.

Ainsi, l'intervalle d'appartenance (bornes) de la dérivée peut être estimée par le différentiateur de la façon suivante: $\dot{y} \in [\dot{y}_{\text{est}} - \varepsilon_1, \dot{y}_{\text{est}} + \varepsilon_1]$ tel que $\dot{y}_{\text{est}} = z_1$ est l'estimation de la première dérivée du signal y

Proposition

Considérons $e_0(t)$ comme étant l'erreur entre la variable estimée z_0 et sa valeur mesurée y . Si un régime glissant d'ordre 1 existe induisant $e_0(t) = \dot{e}_0(t) = 0$ alors z_1 fournit l'estimée de \dot{y} en considérant le différentiateur proposé.

Preuve

Considérons l'équation différentielle $\dot{x}(t) = g(t, x)$ telle que la sortie mesurée $y(t) = x(t)$ en fonctionnement normal. On définit $e_0(t) = z_0 - y(t)$, l'équation du différentiateur proposé devient:

$$\begin{cases} \dot{e}_0 = -\alpha_1 \cdot \sqrt{|e_0(t)|} \cdot \text{sign}(e_0(t)) + z_1 - g(t, x) \\ \dot{z}_1 = -\alpha_0 \cdot \text{sign}(e_0(t)) \end{cases}$$

Considérons maintenant un nouveau changement de variable $e_1(t) = z_1(t) - g(t, x)$, le système d'équations précédent peut être réécrit comme suit:

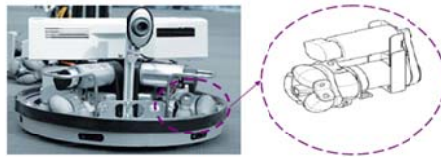
$$\begin{cases} \dot{e}_0 = -\alpha_1 \cdot \sqrt{|e_0(t)|} \cdot \text{sign}(e_0(t)) + e_1(t) \\ \dot{e}_1 = -\alpha_0 \cdot \text{sign}(e_0(t)) - \dot{g}(t, x) \end{cases}$$

Le comportement dynamique du différentiateur est essentiellement conditionné par le voisinage de la surface de glissement lorsque celui-ci (le voisinage) est atteint. On dit que le système est en régime glissant. La surface de glissement est définie par la contrainte $e_0(t) = \dot{e}_0(t) = 0$.

En considérant le système d'équations précédent, lorsque $e_0(t) = \dot{e}_0(t) = 0$ alors on a $e_1(t) = 0 \Rightarrow z_1(t) = g(t, x)$. Par conséquent, z_1 fournit une estimation de $\dot{x}(t)$ i.e. $\dot{y}(t)$.

5 Application

Dans cette section, l'approche proposée pour améliorer les performances de détection de défauts, est appliquée à un système de traction d'un robot mobile nommé Robotino (voir figure 3). Il s'agit d'un système omnidirectionnel composé de trois moteurs roues avec deux capteurs par moteur (un capteur pour la mesure du courant et un encodeur pour la mesure de la vitesse angulaire) et de trois roues omnidirectionnelles assurant un mouvement dans toutes les directions. Notre étude s'est portée sur le système de traction électromécanique du Robotino composé d'un moteur à courant continu, de deux capteurs et d'une roue. Pour démontrer la consistance et la cohérence de notre approche, nous avons appliqué différents types de défauts au niveau du système de traction.



$$\begin{aligned} L_a &= 8.9\text{mH} \quad ; \quad m = 43.1\text{mV} \quad ; \quad J_s = 63 \times 10^{-3} \text{Kg.m}^2 \\ R_a &= 8.13 \Omega \quad ; \quad r = 16 \quad ; \quad R_s = 0.02 \text{Nm.sec.rad}^{-1} \\ R_e &= 47 \mu\text{Nm.sec.rad}^{-1} \quad ; \quad J_e = 7.95 \times 10^{-6} \text{Kg.m}^2 \end{aligned}$$

Figure 3. Système de traction d'un robot omnidirectionnel Robotino

5.1 Modélisation par Bond Graph

Le modèle BG du système de traction du Robotino en causalité intégrale (resp. en causalité dérivée) est donné par la Fig.5 (resp. Fig.6). La partie électrique du moteur est considérée comme une source d'effort qui transmet un couple à la partie mécanique. Elle est composée d'une source de tension électrique U en série avec une résistance R_a et une inductance L_a . Le courant électrique circulant dans cette partie est mesuré par le capteur $Df_1 : i$. Le gyrateur GY caractérise la transformation de la puissance électrique en une puissance mécanique. Cette puissance mécanique provoque la rotation de l'arbre du moteur à une vitesse $\dot{\theta}_m$. La partie mécanique est caractérisée par le frottement R_e , l'inertie J_e et le capteur de vitesse $Df_2 : \dot{\theta}_m$. Le réducteur qui lie la partie mécanique à la roue est représenté par un transformateur TF . La roue est caractérisée par l'inertie J_s , le frottement R_s et la force de contact F_x qui est calculée à partir du modèle de Pacejka appelé "formule magique" qui permet d'estimer les forces de contact longitudinales et latérales (Pacejka, 1991).

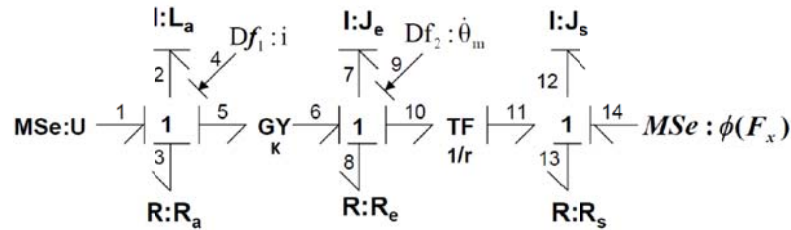


Figure 5: Modèle Bond Graph en causalité intégrale

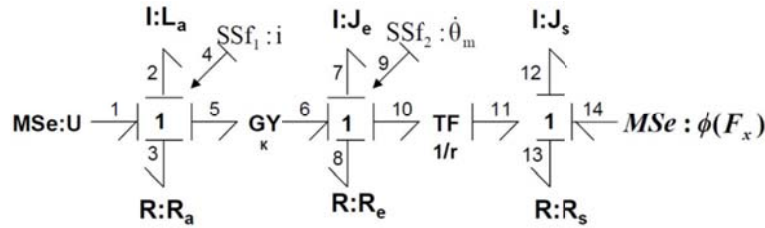


Figure 6: Modèle Bond Graph en causalité dérivée

5.2 Génération des RRA à partir du modèle BG

A partir du modèle BG de la Fig. 6, les équations suivantes sont générées:

- Equations de structure liées aux jonctions, au transformateur et au Gyrateur:

$jonction\ 1_1 \begin{cases} e_2 = e_1 - e_3 - e_5 \\ f_4 = f_1 = f_2 = f_3 = f_5 \end{cases}$	$jonction\ 1_2 \begin{cases} e_7 = e_6 - e_8 - e_{10} \\ f_9 = f_7 = f_8 = f_{10} = f_6 \end{cases}$
$jonction\ 1_3 \begin{cases} e_{11} = e_{12} + e_{13} - e_{14} \\ f_{11} = f_{12} = f_{13} = f_{14} \end{cases}$	$Gyrateur\ GY:k \begin{cases} e_6 = \frac{1}{k} \cdot f_5 \\ e_5 = \frac{1}{k} \cdot f_6 \end{cases}$
$Transformateur\ TF:r \begin{cases} e_{11} = \frac{1}{r} \cdot e_{10} \\ f_{10} = \frac{1}{r} \cdot f_{11} \end{cases}$	

- Equations de comportement liées aux éléments BG (R, C et I) :

Elément R: R_a $e_3 = R_a \cdot f_3$	Elément I: L_a $f_2 = \frac{1}{L_a} \cdot \int e_2 dt \rightarrow e_2 = L_a \cdot \dot{f}_2$
Elément R: R_e $e_8 = R_e \cdot f_8$	Elément I: J_e $f_7 = \frac{1}{J_e} \cdot \int e_7 dt \rightarrow e_7 = J_e \cdot \dot{f}_7$
Elément I: J_s $f_{12} = \frac{1}{J_s} \cdot \int e_{12} dt \rightarrow e_{12} = J_s \cdot \dot{f}_{12}$	Elément R: R_s $e_{13} = R_s \cdot f_{13}$

- $K = \{U, \Phi(F_x), i, \dot{\theta}_m\}$ est l'ensemble des variables connues. A partir de cet ensemble, les équations suivantes sont introduites :

Source $MS_e: U$ $e_1 = U$	Détecteur $SSf_1: i$ $f_4 = i$
Détecteur $SSf_2: \dot{\theta}_m$ $f_9 = \dot{\theta}_m$	Source $MS_e: \Phi(F_x)$ $e_{14} = \Phi(F_x)$

A partir des équations précédentes, on obtient les deux RRA suivantes :

$ARR_1: U - R_a \cdot i - L_a \cdot \frac{d(i)}{dt} - k \cdot \dot{\theta}_m = 0 \Rightarrow R_1 = 0$ (Résidu 1)
$ARR_2: k \cdot i - J_e \cdot \frac{d(\dot{\theta}_m)}{dt} - R_e \cdot \dot{\theta}_m - \frac{J_s}{r^2} \cdot \frac{d(\dot{\theta}_m)}{dt} - \frac{R_s}{r^2} \cdot \dot{\theta}_m + \frac{1}{r} \cdot \phi(F_x) = 0 \Rightarrow R_2 = 0$ (Résidu 2)

La matrice de signature de défauts (Table 1) est déduite des deux équations précédentes. Les deux dernières colonnes correspondent respectivement à l'état de détectabilité (M) et d'isolabilité (I) du défaut de chaque paramètre. Ainsi, les défauts pouvant être détectés sont ceux dont les paramètres (capteurs et/ou actionneurs) interviennent dans le calcul de l'expression du résidu.

	R_1	R_2	M	I
L_e	1	0	1	0
R_a	1	0	1	0
MS_e	1	0	1	0
m	1	1	1	0
SSf_1	1	1	1	0
SSf_2	1	1	1	0
R_e	0	1	1	0
J_e	0	1	1	0
J_s	0	1	1	0
R_s	0	1	1	0
F_x	0	1	1	0

Table 1: Matrice de signatures de défauts

5.3 Résultats expérimentaux

La procédure proposée est appliquée en utilisant des données expérimentales du Robotino. Les signaux d'entrée/sorties sont fournies sur la figure 7. La tension d'entrée ne pouvant pas être mesurée directement, nous l'avons estimée (hors ligne), en se basant sur la vitesse désirée du robot et celle mesurée et en simulant le comportement du contrôleur PI incorporé dans le système. Nous avons également estimé expérimentalement la force de contact (F_x) en considérant la tension d'entrée minimale nécessaire pour avoir le mouvement des roues sur une surface homogène. Les RRA générées sont testées en fonctionnement normal et les résidus sont évalués, dans un premier temps, en

utilisant des seuils fixes (voir figure 8). La première phase de tests a consisté à vérifier que l'approche proposée ne détériore pas les performances en fonctionnement normal par rapport à l'approche classique à base de seuils fixes. Nous notons sur la figure 8 que le résidu R1 présente initialement une valeur supérieure aux seuils pouvant générer de fausses alarmes durant le régime transitoire, cela s'explique par les dérivées des mesures qui ne sont pas prises en compte dans le calcul des seuils.

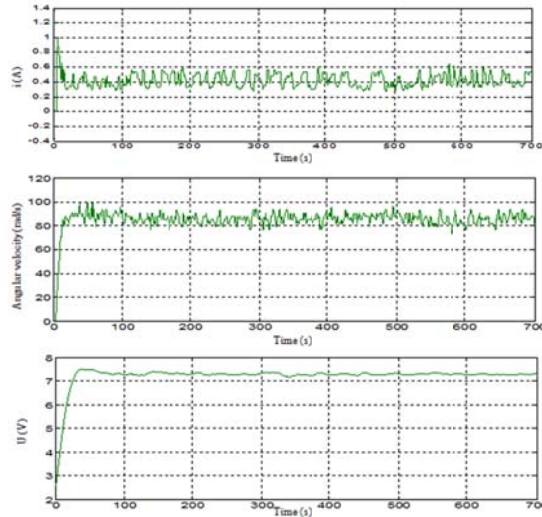


Figure 7: Données expérimentales (entrées/sorties) du Robotino en fonctionnement normal

Ce problème a été résolu moyennant l'approche proposée car les intervalles prennent en considération les bornes sur les dérivées (celles-ci étant déterminées grâce au différentiateur par modes glissants).

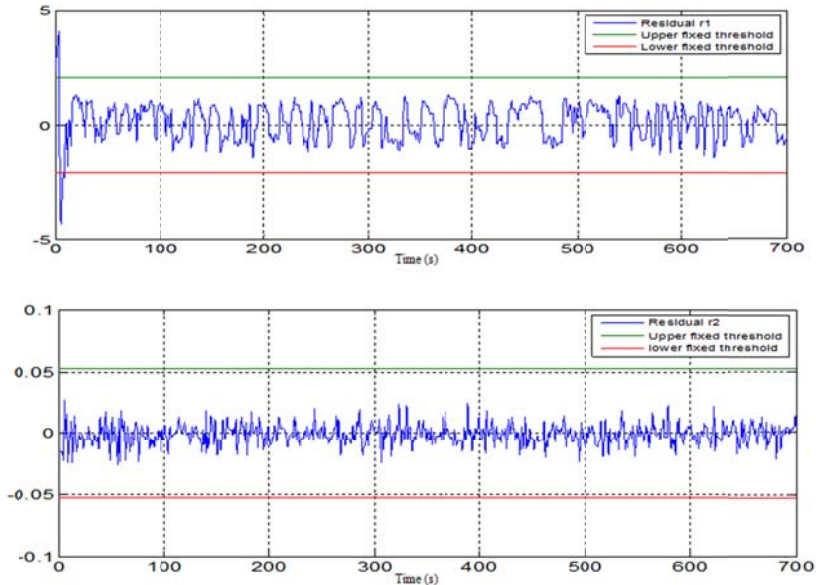


Figure 8: Evaluation des résidus en fonctionnement normal par des seuils fixes

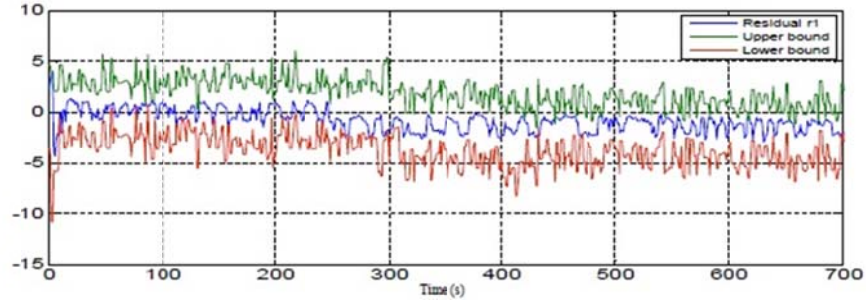


Figure 9: Evaluation du résidu R1 par l'approche proposée

Ce problème est résolu en ayant recours à l'approche proposée comme le montre la figure 9. Le différentiateur par modes glissants du 1^{er} ordre proposé (voir figure 10) permet d'estimer les dérivées du courant électrique et de la vitesse angulaire. On obtient ainsi respectivement les intervalles suivants:

$$\frac{di}{dt} \in \left[\frac{di}{dt}_{(estimée)} - \varepsilon_1, \quad \frac{di}{dt}_{(estimée)} + \varepsilon_1 \right] \text{ et } \frac{d\theta}{dt} \in \left[\frac{d\theta}{dt}_{(estimée)} - \varepsilon_2, \quad \frac{d\theta}{dt}_{(estimée)} + \varepsilon_2 \right]$$

Avec:

$$\varepsilon_1 = 1 \times (0.002)^{\left(\frac{1}{2}\right)} \times (4)^{\left(-\frac{1}{2}\right)} = 0.0223607$$

$$\varepsilon_2 = 1 \times (0.002)^{\left(\frac{1}{2}\right)} \times (0.01)^{\left(-\frac{1}{2}\right)} = 0.4472136$$

Nous avons introduit différents types de défauts avec différentes amplitudes pour valider notre approche. La figure 11 montre l'évaluation des résidus moyennant les seuils fixes pour la première courbe et moyennant les seuils adaptatifs (pour la seconde) qui représentent les intervalles générés par la résolution du CSP. Nous avons introduit un défaut à l'instant t=470s en s'appuyant sur les données expérimentales et en rajoutant un bloc correspondant à un défaut additif sur la résistance Ra. On observe qu'à partir de l'instant t=420s, le '0' n'appartient plus à l'intervalle sur le résidu R1 et donc un défaut est détecté. On observe également que le problème de fausses alarmes qui se manifeste par le dépassement des seuils fixes entre t=0 et t=9s a été résolu par notre approche.

Finalement, il convient de préciser que le résidu R2 n'a pas réagi au défaut alors que c'est le cas pour le résidu R1. Néanmoins, il n'est pas possible de localiser l'élément défaillant car la signature (1,0) n'est pas unique dans la matrice de signature de défauts de la table 1. Pour pallier cette problématique, une solution a été proposée dans (Chatti et al., 2014).

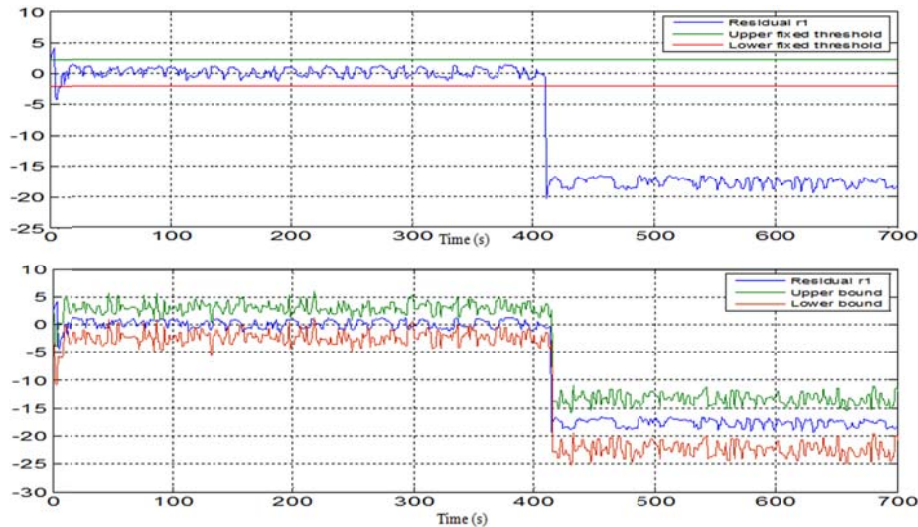


Figure 10: Evaluation des résidus par seuils fixes et par l'approche proposée

6 Conclusion

Dans cet article, une approche pour la prise de décision robuste dans le but d'améliorer la détection de défauts quand ils surviennent, a été élaborée et mise en œuvre sur un système électromécanique en l'occurrence le Robotino. La contribution principale de cette étude concerne la proposition d'une nouvelle méthode générique pour l'amélioration de la robustesse de la prise de décision pour la détection de défauts en ayant recours à un modèle comportemental et en l'occurrence le Bond Graph (BG) et à une approche ensembliste basée sur la propagation des contraintes. Pour atteindre cet objectif, nous avons formulé le problème sous forme d'un CSP en proposant un différentiateur par modes glissants à même de nous fournir les intervalles des dérivées des mesures. Ces dérivées étant requis pour la résolution du CSP et donc pour l'obtention des intervalles optimaux des résidus à évaluer. Les résultats de l'application de la méthode proposée sur des données expérimentales d'un système électromécanique à savoir le Robotino, montrent l'apport et l'intérêt de celle-ci. Finalement, un des verrous qui reste à lever concerne la condition de Lipschitz qui doit être satisfaite pour que le différentiateur par mode glissants puisse converger en temps fini et fournir une bonne approximation des intervalles de la dérivée du signal à mesurer. C'est ce que nous proposons d'étudier dans les prochains travaux tout en considérant un système dynamique plus complexe.

References

- Voigt, T., Flad, S. and Struss, P. (2014). *Model-based fault localization in bottling plants*, Advanced Engineering Informatics, pages 1-14.
- Zhao, X., Zhang, L., Ouyan, D. and Jiao, Y. (2009). *Deriving all minimal consistency-based diagnosis sets using sat solvers*, Progress in Natural Science, pages 489-494.
- Pierrri, F., Paviglianiti, G., Caccavale, F. and Mattei, M. (2008). *Observer-based sensor fault detection and isolation for chemical batch reactors*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, pages 1204-1216.

- Narasimhan, S., Vachhani, P. and Rengaswamy, R. (2008). *New nonlinear residual feedback observer for fault diagnosis in nonlinear systems*, Automatica, pages 2222-2229.
- Odendaal, H. and Jones T. (2014). *Actuator fault detection and isolation: An optimised parity space approach*, Control Engineering Practice, pages 222-232.
- Mulumba, T., Afshari, A., Yan, K., Shen, W. and Norford, L. (2014). *Robust model-based fault diagnosis for air handling units*, Energy and Buildings, pages 698-707.
- Chatti, N., Ould-Bouamama, B., Gehin, A.-L. and Merzouki, R. (2014). *Signed bond graph for multiple faults diagnosis*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, pages 134-147.
- Chatti, N. (2013). *Contribution à la supervision des systèmes dynamiques à base des Bond Graphs*, Rapport de thèse de doctorat à l'université de Lille1.
- Coluccia, A., D'Alconzo, A. and Ricciato, F. (2013). *Generalized Likelihood Ratio Distribution-based anomaly detection via generalized likelihood ratio test: A general Maximum Entropy approach*. Computer Networks, pages 3446-3462.
- Borne P., Dauphin-Tanguy G., Richard J.-P., Rotella F., Zambettakis I. (1990). *Automatique : commande et optimisation des processus*, Editions Technip, Méthodes et Techniques de l'Ingénieur.
- Blesa, J., Puig, V. and Saludes, J. (2012). *Set-membership parity space approach for linear uncertain dynamic systems*, 8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, pages 1287-1292.
- Puig, V and Montes de Oca, S. (2013). *Adaptive threshold generation in robust fault detection using interval models: time-domain and frequency-domain approaches*, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, pages 873-901.
- Puig, V., Quevedo, J., Escobet, T., Nejjar, F. and De las Heras, S. (2008). *Passive robust fault detection of dynamic processes using interval models*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, pages 1083-1089.
- Jaulin, L. (2013). *Combining interval analysis with flatness theory for state estimation of sailboat robots*, Mathematics in Computer Sciences, pages 347-359.
- Seydou, R., Raissi, T. and Efimov, D. (2013). *Actuator fault diagnosis for flat systems: a constraint satisfaction actuator*, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, pages 171-181.
- J. Thoma (1975), *Bond graphs : introduction and applications*, E. Science, Ed.
- Borutzky, W., Orsoni, A. and Zobel, R. (2006). *Bond graph modelling and simulation of mechatronics systems an introduction into the methodology*, in Proceedings of the 20th European Conference on Modelling and Simulation, pages 17-24.
- Rossi, F., Beek, P. and Walsh, T. (2006). *Handbook of constraint programming (foundations of artificial intelligence)*, Elsevier Science Inc.
- Levant, A. (2001). *Universal SISO sliding-mode controllers with finite-time convergence*, IEEE Transactions on Automatic Control, pages 1447-1451.
- Pacejka, H.-B. and Sharp, R.-S. (1991). *Shear Force Developments by Pneumatic Tires in Steady State Conditions. A Review of modelling Aspects*. Vehicle Systems Dynamics, pages 121-176.