

# La conception d'observateur d'un système mécanique dans le domaine d'automobile par l'approche graphique

Frih Abderrahim      Zakaria Chalh      Mostafa Mrabti      Mohamed Ouahi      Mohammed Alfdi  
LIPI, ENS B.P 5206      LISA,ENSAF. B.P 72, QI Ain      LIPI, ENS B.P 5206      LISA,ENSAF. B.P 72, QI Ain      LISIS, ENSAF. BP 72, QI Ain  
Bensouda-Fés Maroc.      Chkef Bensouda-Fés, Maroc.      Bensouda-Fés Maroc.      Chkef Bensouda-Fés, Maroc.      Chkef Bensouda-Fez, Morocco.  
abderrahim.frih@usmba.ac.ma      zakaria.chalh@usmba.ac.ma      mostafa.mrabti@yahoo.fr      mohamed.ouahi@usmba.ac.ma      alfdi\_mohammed@yahoo.fr

**Abstract**—An observer can reconstruct or estimate in real time the current state of a real system using available measures, without prior knowledge of the initial conditions, to have complete and accurate information on system status. In addition, it allows estimating the unmeasurable states of a system, also replace expensive or difficult to maintain sensors. For example the slip sensor....

For this, we will conceive an observer Luenberger (proportional observer) complete order on a linear mechatronic system using a graphical approach to model it and that will be easy to handle thereafter, the causal properties and structural analysis of the bond graph tool are implemented for the synthesis of the observer. As a result, the calculation of the gain of the Luenberger observer is based on graphical procedures. Also to give a comparison between the measured values and estimate to demonstrate the importance and efficiency of the proposed approach. Simulation tests on a mechanical system in the automobile field shows the performance of the observer Luenberger linear graph developed in order to measure and estimate the state unmeasurable.

**Key-Words:** bond graph; Luenberger observer; automobile mechanical system; performance; estimate.

## I. INTRODUCTION

les systèmes d'assistance au conducteur sont actuellement développés pour la sécurité active afin de minimiser les accidents et d'aider le conducteur à contrôler son véhicule. Parmi ces systèmes, on cite, ABS (Système antiblocage des roues), ESP (Régulation de comportement dynamique), ASR (Régulation anti-patinage), BAS (Freinage d'urgence assisté), 4-ETS (contrôle électronique de motricité),.... Ces systèmes mécatroniques basés sur le calcul des mesures de capteurs (accéléromètres, gyroscopes mètres, angle du volant, capteurs de position des roues ...). En outre, certaines variables sont inaccessibles à mesurer (accélération longitudinale, angle de glissement latéral forces pneu/route ...). Il existe certains observateurs qui peuvent être faits pour estimer ces variables [1],[2]. Donc la connaissance du système est essentielle pour le contrôle. Mais le manque d'instrumentations en ligne (les variables d'état ne sont pas entièrement accessibles aux mesures) nécessite la synthèse des observateurs dont le rôle est

d'estimer la totalité ou une partie de l'état. Pour les systèmes linéaires déterministes, l'observateur Luenberger est le plus utilisé [3]. Ce type d'observateur linéaire est conçu de telle sorte que la différence entre les états du système et ceux estimés converge asymptotiquement vers zéro. L'approche basée sur les observateurs est l'une des techniques les plus utilisées pour déterminer les états non mesurables.

Dans ce papier nous allons utiliser l'outil Bond graph [4] [5] [6] [7] [8], pour la synthèse de l'observateur Luenberger dans le cas de systèmes linéaires, d'ailleurs, on a déjà travaillé sur cette approche [9] [10] [11] [12]. Beaucoup de recherches sont basées sur la construction du modèle de Bond Graph de l'observateur, sauf le calcul de gain qui est déterminé par des méthodes classiques utilisant les équations d'état.

Karnopp [13] a utilisé Bond Graph pour construire l'architecture de l'observateur et de calculer les équations d'état. Le calcul du gain de cet'observateur est effectué en utilisant les équations d'état et les techniques traditionnelles de placement de pôles [14]. En 2004, Pichardo Almarza [15] a proposé une approche graphique bond graph pour la synthèse des observateurs qui sont destinés à la commande des systèmes linéaires (proportionnelle intégrale, un grand gain). Autres recherches développées par Hadji et Rahmani [16], suggèrent un observateur de commande complet de Luenberger pour un robot omnidirectionnel mobiles (Robotino). Cette méthode nécessite une analyse structurelle (observabilité, la redondance, les lois structurelles) et un calcul formel.

Dans cette première étude, un modèle de bicyclette du véhicule [17] est utilisé pour concevoir l'observateur. La vitesse longitudinale du véhicule est supposé constant, les efforts de contact Pneumatiques/chaussées latérale sont linéaire par rapport à l'angle de dérive et les mouvements de masse suspendue sont négligeables. Ce type de modèle est valable pour une faible dynamique latérale.

La première partie de cet'article présente la modélisation du véhicule, la deuxième partie présente la définition d'observateur d'ordre complet (Luenberger) et la conception d'un observateur Bond Graph, la troisième partie présente l'étude de la conception d'un observateur de Luenberger pour le modèle bicyclette. Enfin, une comparaison entre notre étude et l'étude de [18], sachant que l'observateur est testé et confronté à des données issues du simulateur de véhicule Callas distribué par la société Oktal.

## II. MODÈLE DE VÉHICULE

### A. modélisation mathématique du véhicule

Le modèle bicyclette [17] est notamment utilisé dans les travaux relatifs au contrôle des trajectoires d'une automobile [19], [20]. Ce modèle est également utilisé pour les estimations des efforts latéraux d'interaction entre le pneumatique et la chaussée [21] et [1] ou dans l'estimation des variables caractéristiques du comportement latéral du véhicule [22]. Le modèle bicyclette suppose un véhicule plan et symétrique simplifié par deux roues virtuelles placées au milieu de chaque essieu (figure 1).

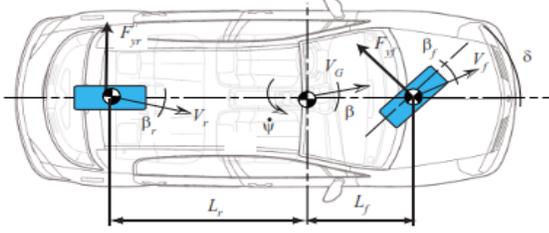


Figure 1. modèle de bicyclette

Le modèle bicyclette est commandé par l'angle de braquage de la roue virtuelle avant ( $\delta$ ). Il permet de décrire les mouvements de lacet ( $\dot{\psi}$ ) ainsi que la direction de la vitesse du centre de gravité du véhicule représentée par la dérive ( $\beta$ ). Il s'écrit à partir du principe fondamental de la dynamique en considérant des efforts latéraux avant ( $F_{yf}$ ) et arrière ( $F_{yr}$ ). En supposant que la norme de la vitesse du centre de gravité du véhicule  $V_G$  est constante, il vient:

$$\begin{cases} \ddot{\psi} = \frac{1}{I_{zz}}(L_f F_{yf} - L_r F_{yr}) \\ \dot{\beta} = \frac{1}{V_G M_G}(F_{yf} + F_{yr}) \end{cases} \quad (1)$$

Les paramètres du modèle sont la masse du véhicule  $M_G$ , l'inertie de lacet  $I_{zz}$  et la position du centre de gravité par rapport aux essieux avant  $L_f$  et arrière  $L_r$ .

Dans cette section, nous allons aborder la reconstruction du braquage à l'aide d'un modèle bicyclette en supposant un modèle linéaire de pneumatique.

#### Modélisation des efforts

En supposant de faibles dynamiques, une vitesse constante et en posant l'hypothèse de petits angles de dérive, il est possible de considérer les efforts latéraux linéaires avant et arrière comme proportionnels aux dérivées avant et arrière.

$$\begin{cases} F_{yf} = D_f \beta_f \\ F_{yr} = D_r \beta_r \end{cases} \quad (2)$$

A partir de relations cinématiques il est possible d'exprimer les angles de dérive avant et arrière à partir des caractéristiques de la vitesse du centre de gravité et de la vitesse de lacet du véhicule.

$$\begin{cases} \beta_f = \delta - \beta + \frac{L_f \dot{\psi}}{V_G} \\ \beta_r = \beta + \frac{L_r \dot{\psi}}{V_G} \end{cases} \quad (3)$$

En remplaçant les expressions des dérivées avant et arrière dans l'équation 2, on obtient le modèle d'effort suivant :

$$\begin{cases} F_{yf} = D_f(\delta - \beta + \frac{L_f \dot{\psi}}{V_G}) \\ F_{yr} = D_r(\beta + \frac{L_r \dot{\psi}}{V_G}) \end{cases} \quad (4)$$

En introduisant le modèle de pneumatique linéaire l'équation 4 dans les équations de la dynamique du châssis équation 1, nous obtenons l'équation d'évolution "classique" du modèle bicyclette linéaire.

$$\begin{cases} \ddot{\psi} = \frac{1}{I_{zz}}(L_f D_f(\delta - \beta - \frac{L_f \dot{\psi}}{V_G}) - L_r D_r(-\beta + \frac{L_r \dot{\psi}}{V_G})) \\ \dot{\beta} = \frac{1}{V_G M_G}(D_f(\delta - \beta - \frac{L_f \dot{\psi}}{V_G}) + D_r(-\beta + \frac{L_r \dot{\psi}}{V_G})) \end{cases} \quad (5)$$

En considérant que le braquage est connu et que nous disposons de la mesure de la vitesse de lacet, le système se met sous la forme d'un système linéaire à entrée connue, s'écrit sous la forme suivante:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B\delta \\ y = Cx \end{cases} \quad (6)$$

Le vecteur d'état  $x$  est constitué de la dérive et de la vitesse de lacet au centre de gravité  $x = \begin{pmatrix} \psi \\ \beta \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2$ . L'entrée connue est le braquage  $\delta \in \mathbb{R}$  et le vecteur de sortie est composé de la vitesse de lacet  $y = \begin{pmatrix} \dot{\psi} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}$ . La matrice d'état s'écrit

$$A = \begin{pmatrix} \frac{-L_f^2 D_f - L_r^2 D_r}{I_{zz} V_G} & \frac{-L_f D_f + L_r D_r}{I_{zz} V_G} \\ \frac{-D_f L_f - D_r L_r}{V_G M_G} & \frac{-D_f - D_r}{V_G M_G} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}, \text{ la matrice de commande associée à l'entrée connue est } B = \begin{pmatrix} \frac{L_f D_f}{I_{zz} V_G} \\ \frac{D_f}{M_G V_G} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}.$$

la matrice de sortie est  $C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ .

### B. Construction du modèle bond graph bicyclette

Le modèle bond graph du modèle «bicyclette» est obtenu en suivant la procédure de construction de modèle donné dans [8]. Une jonction 1 est associée à chaque variable de vitesse (longitudinale, transversale et de lacet) du véhicule. La vitesse longitudinale étant considérée constante, on ne lui associe pas d'inertir. Des transformateurs sont utilisés pour représenter le passage de vitesse de translation en vitesse de rotation et les jonctions 0 pour les relations entre vitesses données équation 1. Les sources ajoutées pour compléter le modèle bond graph représenté par la figure 2.

Les efforts latéraux linéaires sont générés par les résistances  $R_f$  et  $R_r$ , dont les expressions données les équations 6, 8.

$$R_f = \frac{D_f}{V_G} \quad (7)$$

$$R_r = \frac{D_r}{V_G} \quad (8)$$

## III. OBSERVATEUR D'ORDRE COMPLET (LUENBERGER)

Pour les systèmes linéaires déterministes, un des observateurs les plus utilisés est celui de Luenberger[Luenberger, 1964]. Ce type d'observateur linéaire est conçu tel que la différence entre les états du système actuel et ceux de l'observateur convergent vers zéro quelles que soient les conditions initiales  $x(0)$ , l'entrée  $u(t)$

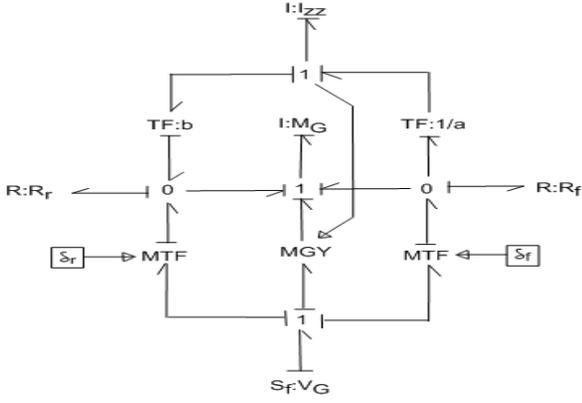


Figure 2. modèle bond graph de bicyclette

eu  $\hat{x}(0)$  estimé.

L'observateur de Luenberger pour la construction d'observateurs d'ordre complet considère un modèle linéaire invariant dans le temps modélisé par l'équation suivante:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (9)$$

avec  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times p}$ ,  $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ;  $y$  regroupe les sorties mesurées du système.

L'observateur de Luenberger (figure 3) pour le modèle 9 est de la forme:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (10)$$

où le terme  $K(y - \hat{y})$  représente une injection linéaire de la sortie. Le modèle dynamique de l'erreur d'estimation,  $e =$

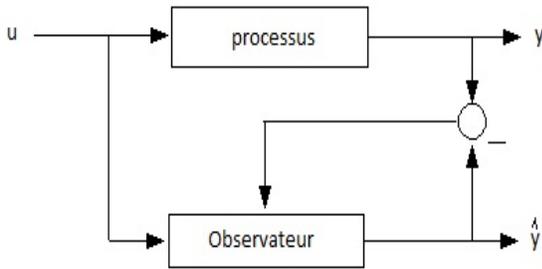


Figure 3. Diagramme de l'observateur de Luenberger

$x - \hat{x}$ , obtenu pour cet observateur est alors:

$$\dot{e} = (A - KC)e \quad (11)$$

Donc, le problème de conception de l'observateur se résume au calcul des valeurs de gain  $K$  telles que la dynamique de l'erreur.

#### IV. CONCEPTION D'UN OBSERVATEUR BOND GRAPH

Cette section décrit la procédure à synthétiser l'observateur de Luenberger en utilisant une approche Bond Graph. L'algorithme est défini comme suit:

– **Étape 1:** vérifier l'existence de sorties redondantes

l'existence de sorties redondantes est la première condition à vérifier pour la construction d'observateur. L'intérêt de cette étape est d'éviter ou d'éliminer les sorties redondantes afin de diminuer les calculs. En effet, la sélection des sorties non redondant permet le calcul du gain  $K$  avec la taille minimale. Cette condition peut être vérifiée par le calcul des lignes de la matrice d'observation  $C$  ( la différence entre le nombre de détecteurs  $D_e$  et  $D_f$ , et les détecteurs qui ne peuvent pas être réalisées dans le Bond Graph en causalité intégrante.

– **Étape 2:** vérification de l'observabilité du modèle structurel

vérification de l'observabilité proposé par Sueur et Dauphin-Tanguy [23], Un modèle bond graph est structurellement observable en état si et seulement si les conditions suivantes sont respectées:

1) sur le modèle bond graph BGI, il existe un parcours causal entre tous les éléments dynamiques  $I$  et  $C$  en causalité intégrale et un détecteurs  $D_e$  ou  $D_f$ .

2) tous les éléments dynamiques  $I$  et  $C$  admettent une causalité dérivée sur le modèle bond graph BGD. Si des éléments dynamiques  $I$  ou  $C$  restent en causalité intégrale, la dualisation de détecteurs  $D_e$  ou  $D_f$  doit permettre de les mettre en causalité dérivée.

– **Étape 3:** Injection linéaire de la sortie: ajout du terme  $K_i(y - \hat{y})$  dans les éléments dynamique du modèle de l'observateur.

Le modèle bond graph de l'observateur est composé du modèle initial du système dans laquelle le terme  $K_i(y - \hat{y})$  est ajouté. Ce dernier est défini en utilisant des sources de flux à modulation pour un élément sources modulées  $I$  et d'effort pour un élément  $C$  (fig 7 et fig 5).

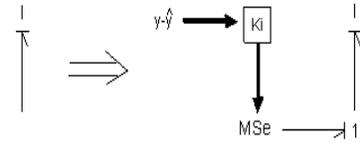


Figure 4. Injection linéaire de la sortie dans l'observateur de Luenberger: Cas de l'élément I

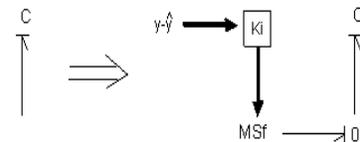


Figure 5. Injection linéaire de la sortie dans l'observateur de Luenberger: Cas de l'élément C

– **Étape 4:** Calcul du gain de l'observateur

Le calcul du gain d'observateur peut être fait en utilisant deux techniques. La première consiste sur le calcul de les équations d'état du modèle de graphe de liaisons et de la détermination du gain  $K$  par les méthodes classiques [13]. La deuxième est basée sur le calcul formel du polynôme caractéristique  $P(A-KC)$  directement à partir du modèle bond graph de l'observateur en utilisant les chemins causaux et les boucles [15].

Le gain d'observateur de Luenberger est obtenu en identifiant le polynôme caractéristique de l'observateur  $P(A-KC)$  et le polynôme désiré  $P_d(s)$  pour fixer les pôles de l'observateur.

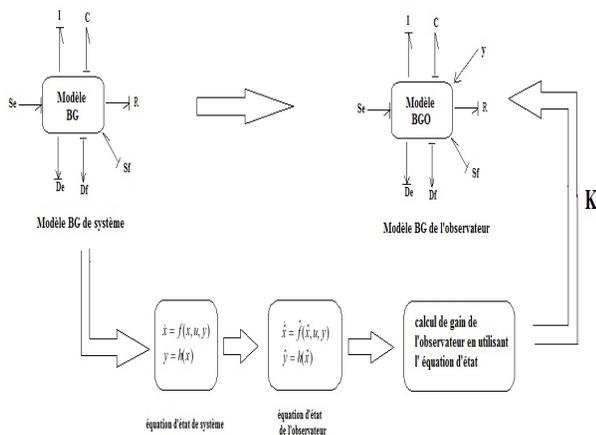


Figure 6. Algorithme pour la construction et calcul du gain des observateurs à partir des modèles bond graphs

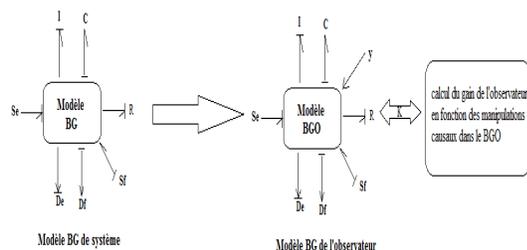


Figure 7. Méthode basée sur l'utilisation directe de la BGO.

## V. ÉTUDE DE LA CONCEPTION D'UN OBSERVATEUR DE LUENBERGER POUR LE MODÈLE BICYLETTE

Pour la conception d'un observateur Bond Graph (OBG), les étapes ci-dessous doivent être vérifiées:

**Étape 1:** Vérification de l'existence de sorties redondantes: L'intérêt d'éliminer les sorties redondantes est d'éviter les calculs inutiles, mais cette étape est annulé dans ce cas d'étude, puisque le modèle ne dispose que d'un seul détecteur.

**Étape 2:** Vérification d'observabilité structurelle: Le modèle bon graph en causalité intégrale (BGI) et le modèle bond graph en causalité dérivé (BGD) sont présentés, respectivement, dans les figures 8 et 9. Comme il est

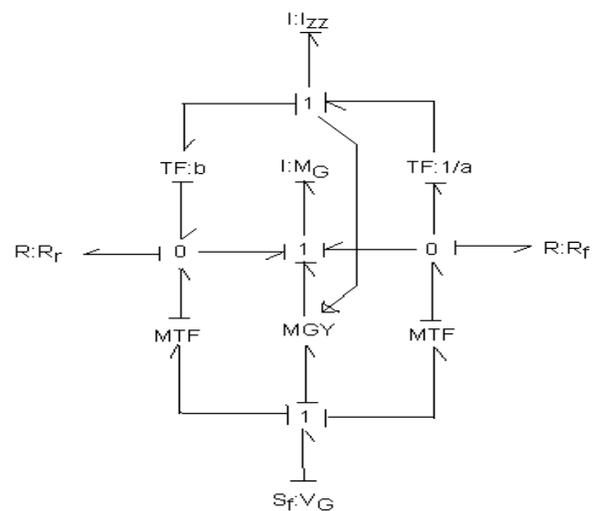


Figure 8. Méthode Bond Graph de bicyclette en causalité intégrale.

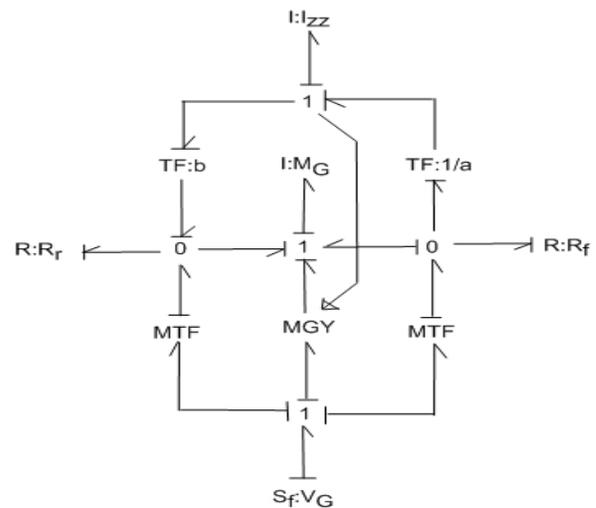


Figure 9. Méthode Bond Graph de bicyclette en causalité dérivée.

mentionné précédemment, l'observabilité structurelle peut être obtenue facilement par l'analyse structurale du modèle bond graph. on note que, sur le modèle BGD, tous les éléments dynamiques admettent une causalité dérivé, donc le modèle est structurellement observable.

**Étape 3:** Construction de l'observateur basé sur le bond graph (BGO): Le modèle Bond Graph de l'observateur est obtenu à partir du modèle bond graph initiale avec une injection de sortie linéaire, appliquée en ajoutant  $K_i(y - \hat{y})$  dans les éléments dynamiques du modèle d'observateur (voir figure 10) Les deux MSe sont des sources modulé d'effort pour l'élément  $I$ .

**Étape 4:** Calcul du gain: Les variables d'état pour ce système (la figure 9), sont associés à deux éléments inductifs  $I$  dans la causalité intégrale. L'ordre de modèle est donc égal à 2. Le polynôme caractéristique de la matrice d'état ( $A$ ) est extraite du calcul de gain à partir de l'équation d'état (6). Ainsi, le polynôme caractéristique associé à la matrice  $A$  de

## VI. SIMULATION

Les conditions initiales des états du modèle BG dans la causalité intégrale sont considérées comme nulles. Des essais de simulation ont été mise en oeuvre dans le logiciel 20 – sim et les valeurs des paramètres [18] sont définis dans le table I.

$M_G = 1683$ (Kg)
$I_{zz} = 3015$
$L_f = 1.1824$ (m)
$L_r = 1.5176$ (m)
$D_f = 96000$ (N/rad) pour 2 pneus
$D_r = 69500*2$ (N/rad) pour 2 pneus
$V_G = 40/3.6$ (m/s)
$R_f = \frac{D_f}{V_G} = 8640.0086$
$R_r = \frac{D_r}{V_G} = 12510.0125$

Table I. LES VALEURS DES PARAMÈTRES DU MODÈLE BICYCLETTE

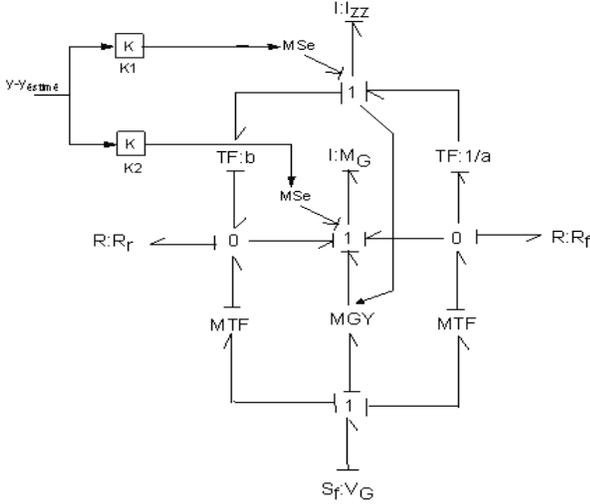


Figure 10. Méthode Bond Graph d'observateur "bicyclette".

ce modèle est défini par:

$$P_A(s) = \det(sI - A) = S^2 + \left[ \left( \frac{L_f^2 D_f + L_r^2 D_r}{I_{zz} V_G} \right) + \left( \frac{D_f + D_r}{V_G M_G} \right) \right] S + \left( \frac{L_f^2 D_f + L_r^2 D_r}{I_{zz} V_G} \right) \left( \frac{D_f + D_r}{V_G M_G} \right) - \frac{D_f L_f + D_r L_r}{V_G^2 M_G} + \frac{-L_f D_f + L_r D_r}{I_{zz}} \quad (12)$$

Les pôles du modèle sont respectivement:

$$\begin{aligned} S_1 &= -16.9925 \\ S_2 &= -9.1405 \end{aligned} \quad (13)$$

Pour calculer le gain K (la figure 10), on choisit les pôles de l'observateur pour être un peu plus rapide que ceux du modèle. Les valeurs des pôles souhaités ou désirés sont respectivement:

$$\begin{aligned} S_{1_d} &= -19 \\ S_{2_d} &= -11 \end{aligned} \quad (14)$$

Ce qui donne le polynôme caractéristique désiré suivant:

$$P_d(S) = S^2 + 30S + 209 \quad (15)$$

La détermination du gain K de l'observateur de Luenberger basée sur les coefficients du polynôme caractéristique  $P_{(A-KC)}$  obtenu en appliquant le théorème [24] sur le modèle bond graph de l'observateur.

### Théorème 1

La valeur de chaque coefficient  $\alpha_i$  du polynôme caractéristique  $P_A(S)$ ,

$$P_A(S) = S^n + \alpha_i S^{n-i} + \dots + \alpha_{n-i} S + \alpha_n \quad (16)$$

est égale au terme constant (sans l'opérateur de Laplace s) du gain total des familles de cycles causaux d'ordre i dans le modèle bond graph. Le gain de chaque famille de cycles causaux intervenant doit être multiplié par  $(-1)^d$  si la famille est constituée de d cycles causaux disjoints.

$$P_{(A-KC)}(S) = P_d(S) = S^2 + 30S + 209 \quad (17)$$

L'identification terme à terme de  $P_d(S)$  et  $P_{(A-KC)}(S)$  conduit aux valeurs des gains de l'observateur  $K1 = -11655.6$  et  $K2 = 3014.34$ .

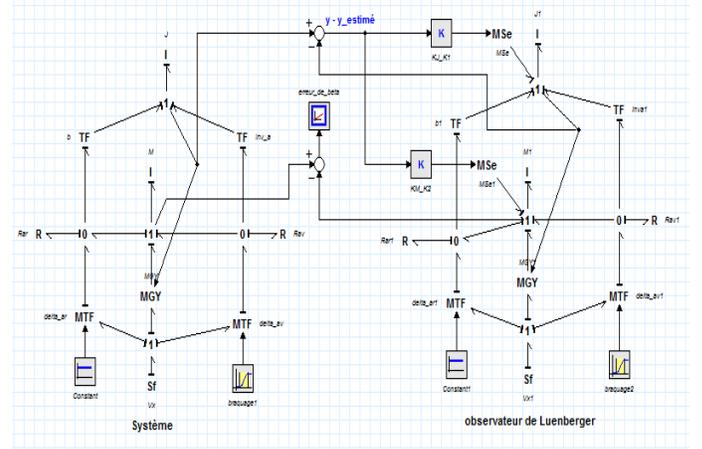


Figure 11. Méthode Bond Graph du bicyclette et son observateur (20-Sim)

\* **vitesse longitudinale  $V_G=40$  Km/h** [18]

Le véhicule est lancé en ligne droite à une vitesse longitudinale constante ( $V_G = 40 \text{ Km/h}$ ), on applique un angle de braquage au roue avant [18] (figure 12 )

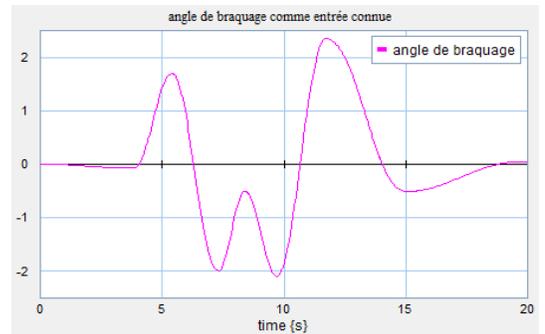


Figure 12. angle de braquage (20-Sim)

Les figures 13 et 14 montrent une précision claire de l'estimation des variables d'état du système. Nous observons, également, que l'harmonie des variables d'états estimées (l'angle de dérive et la vitesse de lacet) sont indiscernables.

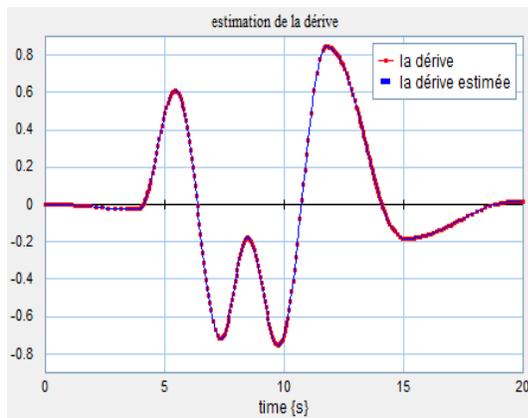


Figure 13. estimation de la dérive (20-Sim)

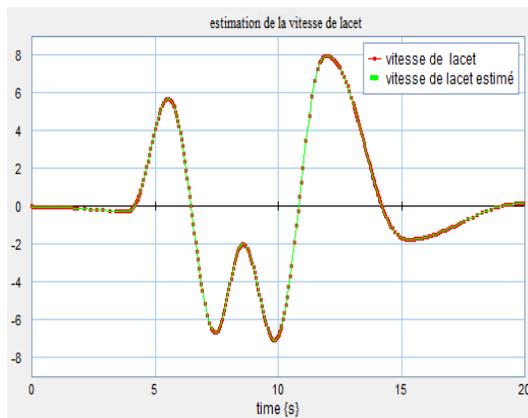


Figure 14. estimation de la vitesse de lacet (20-Sim)

Les erreurs d'estimation sont nulles comme il est montré sur les figures 15 et 16. Par conséquent, il permet d'améliorer le rendement et l'efficacité de l'observateur bond graph.

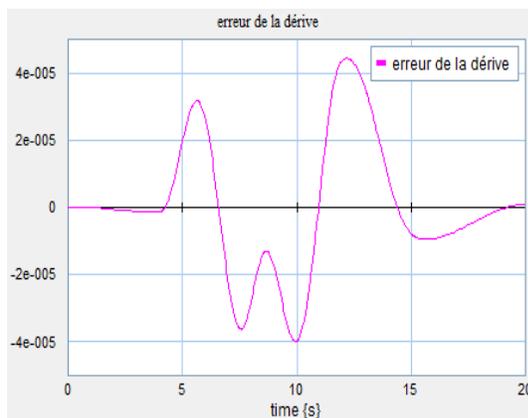


Figure 15. erreur de la dérive (20-Sim)

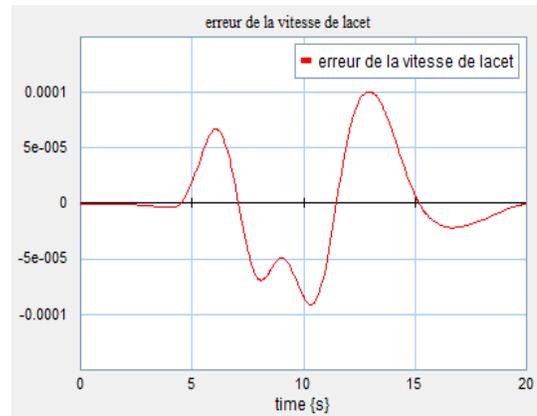


Figure 16. erreur de la vitesse de lacet (20-Sim)

à partir de la mesure de la vitesse de lacet nous avons estimé l'angle de dérive, en outre, nous avons constaté que nos résultats sont plus fiables par rapport aux résultats de [18], puisque il a estimé l'angle de dérive et la vitesse de lacet à partir des mesures des efforts latéraux.

## VII. CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons présenté l'observateur de Luenberger à entrée connue (angle de braquage) basé sur le Bond Graph qui a été utilisé. Cette méthode est appliquée pour la construction d'un observateur d'ordre complet dans le cas de systèmes linéaires. Il est basé exclusivement sur la manipulation de causalité exploitée sur une représentation bond graph. L'intérêt majeur de cette approche sur un modèle bond graph est un vrai sens physique et donne accès à de nombreuses variables de flux et d'effort. L'observateur proposé est basé sur un modèle de véhicule plan sur plan qui suppose une répartition des masses symétriques. nous avons vu la conception d'observateur lorsque le modèle d'effort latéral était linéaire en fonction de la dérive. La comparaison de l'analyse de notre travail et celui de Ouahi montre que l'observateur a donné presque les mêmes résultats de l'état (la dérive et la vitesse de lacet). En raison graphique, l'observateur de Luenberger est limité, les travaux de futurs se concentrent sur la synthèse d'un observateur à entrée inconnue et proportionnel intégral afin d'assurer plus de robustesse contre les perturbations.

## REFERENCES

- [1] Baffet.G, Charara.A, and Lechner.D, "Estimation of vehicle side slip, tire force and wheel cornering stiffness," *Control Engineering Practice*, vol. 17, N°11, pp. 1255–1264, 2009.
- [2] Stéphant.J, Charara.A, and Meizel.D, "Evaluation of a sliding mode observer for vehicle side slip angle," *Control Engineering Practice*, vol. 17, pp. 803–812, 2007.
- [3] D. Luenberger, "Observers for multivariable systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. n°:11, pp. 190–197, 1966.
- [4] Paynter.M, "Analysis and design of engineering systems," *MIT Press, Cambridge, MA, U.K.*, 1961.
- [5] Karnopp.D.C and Rosenberg.R.C, "System dynamics : A unified approach," *John Wiley, New York, USA*, 1975.

- [6] Breedveld.P, "Essential gyrators and equivalence rules for 3-port junction," *Journal of The Franklin Institute*, vol. 318, no. 2, pp. 77–89, 1984.
- [7] Dauphin-Tanguy.G, Borne.P, and Lebrun.M, "Order reduction of multi-time scale systems using bond graph, the reciprocal system and the singular perturbation method," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 319, no. 1/2, pp. 157–171, January/February 1985.
- [8] Dauphin-Tanguy.G, "Les bond graphs," *Hermès Science Editor*, 2000.
- [9] Frih.A, Chalh.Z, Mrabti.M, and Alfidi.M, "Graphical approach for the analysis of LTV systems," *6th Conference on Computational Engineering in Systems Applications, CESA 2015 Proceedings*, 2015.
- [10] Chalh.Z, Andaloussi.C, Hih.H, and Frih.A, "Approche graphique pour l'analyse des systèmes LTV," *Colloque International sur le Monitoring des Systèmes Industriels, Proceedings CIMS I 2014*, 2014.
- [11] Frih.A, Chalh.Z, Mrabti.M, and Alfidi.M, "Modélisation par l'approche bond graph: Application et simulation sur le système photovoltaïque," *Congrès International de Génie Industriel et Management des Systèmes, Proceedings CIGIMS 2015*, 2015.
- [12] Chalh.Z, Frih.A, Mrabti.M, and Alfidi.M, "Bond graph methodology for controllability of LTV systems," *International Journal of Modelling, Identification and Control*, vol. 24, N°3, pp. 257–265, 2015.
- [13] D. Karnopp, "Bond graphs in control: Physical state variables and observers," *Journal of The Franklin Institute*, vol. 308 (3), pp. 221–234, 1979.
- [14] Rahmani.A, Sueur.C, and Dauphin-Tanguy.G, "Pole assignment for systems modelled by bond graph," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 331, N°3, pp. 299–312, 1994.
- [15] C. Pichardo-Almarza, A. Rahmani, G. Dauphin-Tanguy, and M. Delgado, "Bond graph approach to build reduced order observers in linear time invariant systems," *Proceedings of 4th MATHMOD, Fourth International Symposium on Mathematical Modeling*, 2003.
- [16] N. Hadji and A. Rahmani, "Observer for an omnidirectional mobile robot," *ICBGM, April*, 2010.
- [17] Segel.M.L, "Theoretical prediction and experimental substantiation of the response of the automobile to steering control. in proc." *automobile division of the institut of mechanical engineers*, vol. 7, pp. 310–330, 1956.
- [18] Ouahi.M, Stéphant.J, and Meizel.D, "Redefining automotive supervision using new sensor technology," *international Symposium on Advanced Vehicle Control*, 2010.
- [19] Solmaz.S, Akar.M, Shorten.R, and Kalkkuhl.J, "real-time multiple-model estimation of center of gravity position in automotive vehicles," *Vehicle system dynamics*, vol. 46, N°9, pp. 763–788, 2008.
- [20] Marino.R and Scalzi.s, "asymptotic sideslip angle and yaw rate decoupling control in four-wheel steering vehicles," *Vehicle system dynamics*, vol. 48, N°9, pp. 999–1019, 2010.
- [21] Baffet.G, "Développement et validation expérimentale d'observateurs des forces du contact pneumatique/chaussée d'une automobile," *doctorat de l'université de technologie de compiègne, Université de Technologie de Compiègne*, 2007.
- [22] Stéphant.J, "Contribution à l'étude et à la validation expérimentale d'observateurs appliqués à la dynamique du véhicule," *doctorat de l'université de technologie de compiègne, Université de Technologie de Compiègne*, 2004.
- [23] Sueur.C and Dauphin-Tanguy.G, "Structural controllability and observability of linear systems represented by bond graphs," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 326, pp. 869–883, 1989.
- [24] A. Rahmani, "Etude structurelle des systmes linaires par l'approche bond graph," *thèse*, 1993.