

Modélisation systémique d'un système de propulsion d'un Moteur-Roue du Véhicule Electrique avec les Bond Graphs

Sihem Dridi^{#1}, Ines Ben Salem^{#2}, Lilia EL Amraoui^{#3}

[#] *Département Électrique, École Nationale d'Ingénieurs de Carthage*

Université de Carthage, Charguia II, 2035, Tunisa

¹dridi.dridi2@gmail.com

²Ines.bensalem@enicarthage.rnu.tn

³Lilia.elamroui@enicarthage.rnu.tn

Abstract—Cet article est consacré à la modélisation systémique d'un système de propulsion de type Moteur-Roue pour le véhicule électrique en utilisant l'outil graphique : le Bond Graph.

L'actionneur de la roue est de type synchrone à aimants permanents, commandé par la technique Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) de type sinus-triangle. Le modèle de l'actionneur permet de mettre à l'évidence le couplage entre les sous-modèles électriques, magnétiques et mécaniques.

Les résultats de simulations du modèle systémique développé sous l'environnement 20-Sim qui ont permis d'évaluer les performances du modèle élaboré ainsi que de montrer la haute performance et l'efficacité du système contrôle simulé.

Keywords— Approche systémique; Bond Graph, Moteur-Roue; Commande MLI; Modélisation.

I. INTRODUCTION

Les majeurs facteurs qui ont donné plus d'intérêts pour le développement des véhicules électriques sont : le facteur économique qui mène à une réduction de la consommation de carburant, le facteur environnemental en réduisant le taux de pollution [1].

En se basant sur l'implémentation du moteur de propulsion au sein d'un véhicule électrique, les architectures possibles sont catégorisées en deux classes : avec le monomoteur centralisé et celui du types Moteurs-Roues (M-R).

Dans ce papier nous intéressons à la technologie M-R du véhicule électrique. Dans cette technologie, le moteur de propulsion est intégré à l'intérieur de chacune des roues. En comparant celle-ci au véhicule électrique monomoteur les composants mécaniques (l'arbre de transmission, le différentiel, la boîte de vitesses et embrayage) sont éliminés [2]. La suppression de ces composants offre certains avantages, nous citons à titre d'exemple : la réduction du bruit, l'amélioration de la sécurité et la contrôlabilité, la diminution des pertes par frottement et une efficacité énergétique meilleure [3].

Le système de propulsion du M-R est la combinaison synergique et systémique d'un grand nombre d'éléments ou sous-systèmes (actionneur électrique, systèmes de commande, convertisseur de puissance, dynamique du véhicule, source d'alimentation (batterie)) qui sont issues de différentes sources d'énergie telles que: électriques, mécaniques, magnétiques et électrochimies, qui sont en forte interaction entre elles et avec leurs environnements.

Ce système rencontre des certaines difficultés telles que :

- L'hétérogénéité qui engendre l'accroissement du niveau de complexité du système
- La complexité de modélisation
- La diversité des composants énergétiques couplés

Ces difficultés appellent de nouvelles méthodes et de nouveaux outils de modélisation. Dans ce sens, nous avons adopté une approche systémique pour modéliser tous les phénomènes énergétiques du système de propulsion de type M-R en mettant en outre à profit le caractère unifiant de l'outil graphique : le Bond Graph. L'avantage de la modélisation systémique avec l'outil Bond Graph est d'analyser la globalité du système avec la prise en compte de leurs différentes interactions énergétiques en s'appuyant sur les aspects technologiques, phénoménologiques et structurels offants par Bond Graph.

Cet article est organisé comme suit : la section 1 présente le système de propulsion du type M-R. La modélisation du système est présentée dans la section 3, et certains résultats de simulation sont présentés puis discutés dans la section 4.

Pour une meilleure compréhension de cet article, les spécifications des éléments constituant le système de propulsion sont listées dans la table de nomenclatures.

II. PRESENTATION DU MOTEUR-ROUE ELECTRIQUE

Le M-R électrique représente un nouveau pas vers la mobilité électrique. L'intégration du moteur électrique à la roue offre le double avantage la diminution de consommation du véhicule automobile et la commande indépendante du couple ce qui améliore la sécurité du véhicule.

La motorisation de la roue est assurée par un actionneur synchrone à aimants permanents qui est implanté dans la roue. Cet actionneur est composé par des parties : le stator situé à l'essieu de la roue et le rotor à faible vitesse monté directement sur la jante de la roue.

La figure 1 présente la technologie d'un Moteur-Roue pour le véhicule électrique.

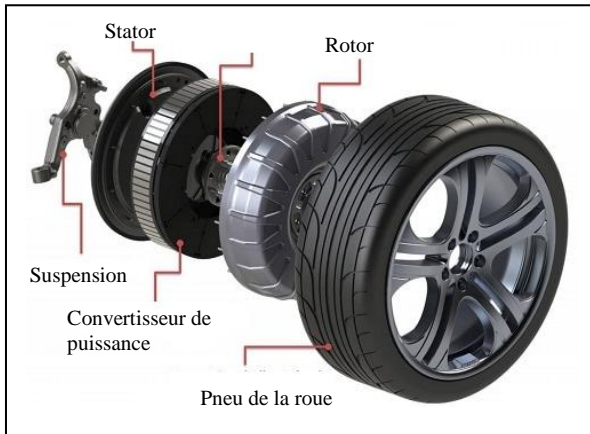


Fig. 1 Technologie du Moteur-Roue du véhicule électrique

Le choix de ce type d'actionneur est justifié par les critères significatifs suivants : une grande fiabilité et une bonne dynamique du mouvement [4].

La figure 2 présente la structure physique du système de propulsion du M-R qui est un système mécatronique. La partie mécanique présente la dynamique du véhicule. La partie électrique se compose de l'ensemble des éléments : source d'alimentation de type batterie ; actionneur synchrone à aimants permanents; convertisseur DC-AC de type onduleur de tension. En effet, l'actionneur sert à fournir le couple mécanique de la propulsion de la roue permettant l'avancement du véhicule. Il est alimenté par une batterie d'accumulateurs via un onduleur de tension. La partie électronique de commande permet de contrôler la vitesse du moteur électrique qui est équivalente à la vitesse de la roue et donc à la vitesse du véhicule. La technique adoptée pour le contrôle de la vitesse est la technique Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) de type sinus-triangle qui génère des signaux de commande à l'onduleur.

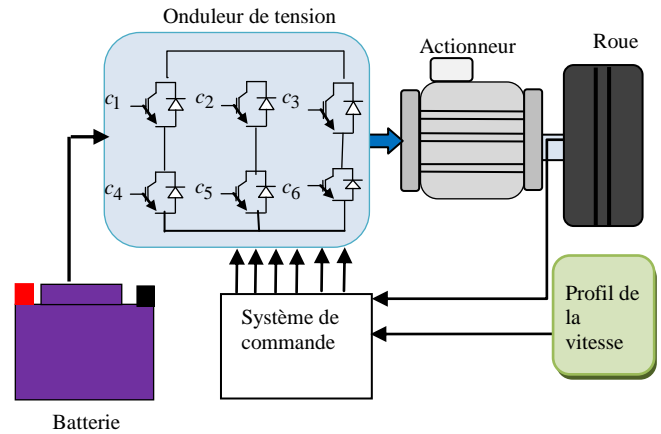


Fig. 2 Structure physique du système de propulsion du type Moteur-Roue

III. MODELISATION DU SYSTEME DE PROPULSION M-R

L'architecture physique du système de propulsion inclue de plus en plus de phénomènes physiques qui sont en forte interaction. Ces phénomènes augmentent le niveau de complexité du système proposé. Par conséquent, sa modélisation nécessite une approche et un outil de représentation de phénomènes énergétiques et leurs interactions.

Dans ce sens, l'environnement de modélisation utilisé est la combinaison de [5]:

1) Une approche systémique qui permette de faciliter la compréhension et l'analyse globale du système (choix des composants, description de leurs liens). Elle le considère comme le couplage de différents sous-systèmes. Elle met l'accent sur les fonctionnalités de chaque composant.

2) Un outil de représentation énergétique tel que le Bond Graph qui est utilisé pour l'élaboration des modèles de composants constituant le système. Le Bond Graph est un outil graphique de modélisation qui est fondé sur le transfert d'énergie au sein d'un système. Son choix est basé sur les multiples critères suivants [6]:

- La possibilité de modéliser des systèmes dynamiques multi-physiques
- La conception modulaire de modèles
- L'élaboration systématique des modèles
- L'aspect graphique unifié et propriétés causales et structurelles

A. Analyse Systémique du Système

La première étape vers l'élaboration d'un modèle systémique est l'analyse systémique qui peut être subdivisée en quatre étapes :

- L'analyse de la structure physique du système : qui consiste à définir ses principaux composants fonctionnels et leurs interactions. Le système proposé se compose des modèles : d'alimentation, d'onduleur de tension, d'actionneur et de charge
- L'identification des phénomènes physiques : qui consiste à définir les phénomènes physiques de chaque composant. Dans notre application les phénomènes physiques sont le courant-tension, couple-vitesse angulaire et force-vitesse linéaire
- La détermination des transformations : il consiste à déterminer les transformations qu'y subissent des différents phénomènes physiques pour chaque composant qui est déjà identifié dans la deuxième étape. Dans cette application, les transformations énergétiques sont: chimique-électrique, électrique-magnétique, électromagnétique-mécanique et mécanique (rotation)-mécanique (translation)
- L'établissement du bilan global du système proposé : il consiste à assembler les différents sous-modèles des composants fonctionnels avec la prise en compte des interactions

La figure 3 présente l'analyse systémique du système de propulsion avec l'outil Bond Graph à mot. Il se compose de quatre sous-modèles : batterie, actionneur, onduleur de tension et charge (contact Roue-chaussée).

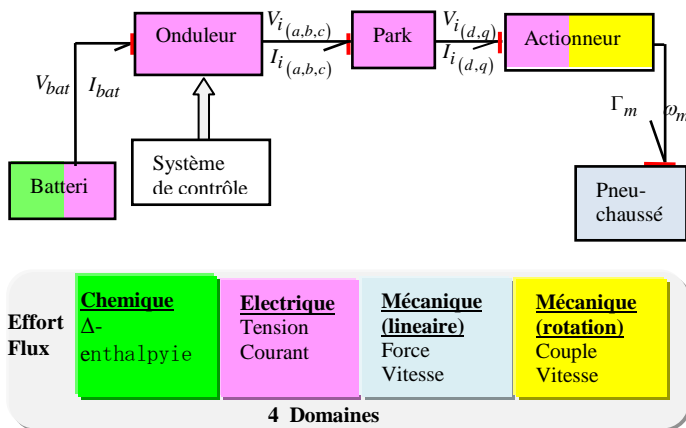


Fig. 3 Modèle systémique du système de propulsion du M-R avec Bond Graph à mot

B. Modèle Bond Graph du Système de Propulsion M-R

1) Modèle d'Actionneur Synchrones à Aimants Permanents:

L'actionneur de motorisation de la roue est composé de trois parties physiques qui interagissent entre elles. Ces parties sont exprimées par les équations (1), (2) et (3) dans le repère de Park [7].

Équation de tension de stator :

Le circuit du stator est régi par les équations différentielles de tension suivantes :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p \Omega_m L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + p \Omega_m (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (1)$$

L'expression du couple moteur est donnée par la relation suivante :

$$\Gamma_{em} = p [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (2)$$

La dynamique de l'actionneur est régie par la relation fondamentale de la dynamique :

$$\begin{aligned} \Omega_m &= \frac{d\theta_m}{dt} \\ J_m \frac{d\Omega_m}{dt} &= \Gamma_{em} - \Gamma_{res} - f_m \Omega_m \end{aligned} \quad (3)$$

Le modèle analytique de l'actionneur conduit au modèle Bond Graph représenté par la figure 4.

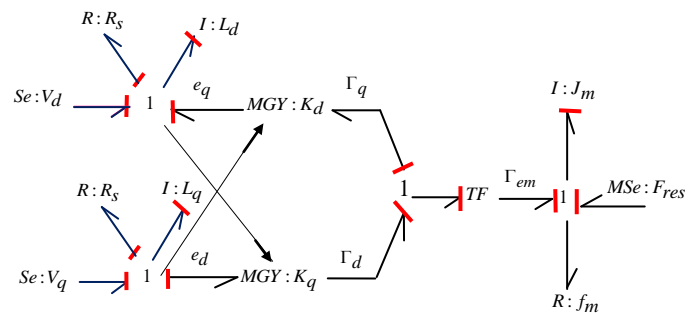


Fig. 4 Modèle systémique de l'actionneur avec Bond Graph

En se basant sur le concept de l'outil Bond Graph, les tensions d'entrées " $V_{i=(d,q)}$ ", les résistances électriques " $R_{i=(d,q)}$ ", et les inductances " $L_{i=(d,q)}$ " sont modélisées respectivement par : des sources d'efforts contrôlés, des éléments dissipation de l'énergie "R" et des éléments de stockage de l'énergie "I". Ces différents éléments partagent une même variable de flux (courant) pour cela ils sont reliés à la jonction 1.

L'inertie et le phénomène du frottement visqueux de la partie mécanique de l'actionneur sont modélisés

respectivement par un élément de stockage de l'énergie "I" et un élément de dissipation de l'énergie "R". Ces deux éléments sont reliés entre eux par la jonction 1 car ils sont traversés par la même variable de flux (vitesse angulaire).

L'élément gyrateur modulé 'MGY' représente la conversion électrique-magnétique. Le couplage entre les phénomènes énergétiques provoqués par les deux parties électrique et mécanique est modélisé par un élément de transformation 'TF'.

2) Modèle de l'onduleur de tension :

La figure 5 illustre la structure physique de l'onduleur de tension à trois cellules de commutation qui sont complémentaires.

Chaque cellule est munie de deux interrupteurs comprenant un transistor et une diode qui sont montés en antiparallèle. Les transistors sont commandés par des signaux de commande $c_{i=(1..6)}$ générés par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) [8]. Cette stratégie consiste à comparer les tensions de référence sinusoïdales à une porteuse sinus-triangulaire [9].

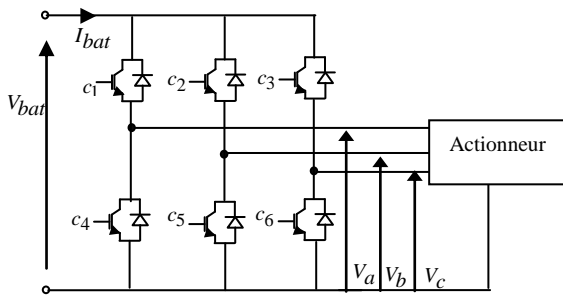


Fig. 5 Structure physique de l'onduleur de tension

Le système de tension triphasé de sortie de l'onduleur est lié aux états de conduction et la tension d'alimentation par la relation (4) :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{bat}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{bmatrix} V_{bat} \quad (4)$$

La relation (4) conduit à la représentation du modèle Bond Graph de l'onduleur présenté par la figure 6. L'onduleur est représenté par trois transformateurs modulés possédants des gains η_1, η_2 et η_3 .

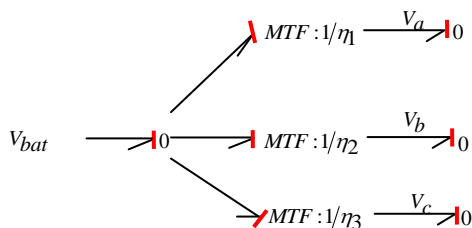


Fig. 6 Modèle systémique de l'onduleur de tension avec Bond Graph

3) Modèle de contrôle :

Le modèle de contrôle est muni d'une boucle de régulation de vitesse, qui permet de générer la référence de courant ' I_{qref} '. Le courant ' I_{dref} ' est imposé nul.

Les références des courants ' I_{qref} ' et ' I_{dref} ' sont comparées respectivement avec les courants réels de la machine ' I_q ' et ' I_d '.

Les sorties des comparateurs sont appliquées à l'entrée des régulateurs classiques du type PI. Les sorties de régulateurs génèrent les tensions de référence ' V_d ' et ' V_q '.

En utilisant une transformation (dq-abc) inverse, pour faire le passé du système de tension biphasé au système de tension triphasé. La référence de tension triphasée est envoyée au modulateur de largeur d'impulsion pour produire la séquence de commutation.

Les interactions entre les blocs du modèle de contrôle sont réalisées par des signaux d'informations contrairement aux modèles du système d'étude qui sont des signaux énergétiques.

4) Modèle de la charge :

La dynamique du véhicule est considérée comme une charge. Sa modélisation consiste à décrire le modèle mathématique de la dynamique du véhicule et de la force résistance appliquée au véhicule électrique en mouvement.

La dynamique du véhicule est donnée par l'équation suivante :

$$M_r \frac{dV_r}{dt} = F_{roue} - F_{res} \quad (5)$$

La force de résistance est la somme des forces dues à l'interaction du véhicule avec son environnement. Elle se compose de la :

- Force au roulement représente l'interaction de pneu de la roue avec la route.

$$F_{rol} = f_r M_r g \cos \alpha \quad (6)$$

- Force aérodynamique représente l'interaction de l'air avec la carrosserie du véhicule.

$$F_{areo} = \frac{1}{2} \rho C_d A_F V_r^2 \quad (7)$$

- Force de gravité

$$F_{slope} = M_r g \sin \alpha \quad (8)$$

Selon le concept de l'outil Bond Graph, la force de résistance est modélisée par une source d'effort contrôlée 'MSe'.

La figure 7 présente le modèle systémique du système de la propulsion du type M-R avec l'outil Bond Graph et son modèle de contrôle.

- Cas1: Route plate avec 10% de pente à la vitesse constante.
- Cas 2: Route plate à la vitesse variable.

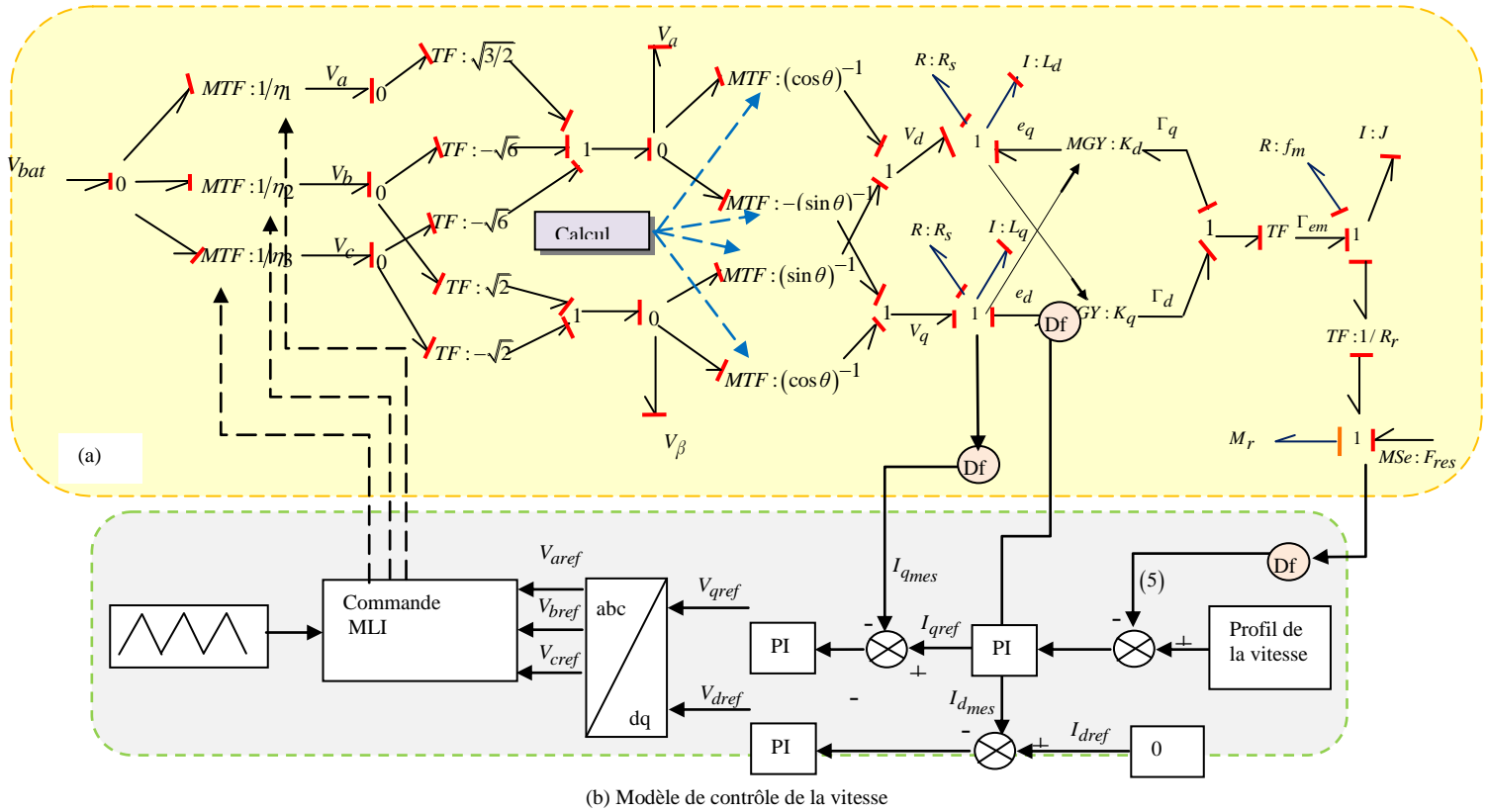


Fig. 7 Modèle systémique du système de propulsion M-R avec l'outil Bond Graph (a) ; Modèle de contrôle de la vitesse (b)

IV. RESULTATS DE SIMULATION ET ANALYSE

Le modèle systémique du système de propulsion du type M-R est simulé à l'aide du logiciel 20-Sim. Ce logiciel est dédié à l'outil Bond Graph. Ce logiciel constitue un programme d'aide à la modélisation et à la simulation du comportement dynamique des systèmes multi-physiques. Ce logiciel s'avère performant puisqu'il présente la possibilité d'affectation de causalité automatique aux ports et aux jonctions ainsi que la possibilité de conception et l'analyse des systèmes hétérogènes complexes [10].

Afin de caractériser le comportement du système et les performances de l'approche proposée, des simulations ont été effectuées en utilisant le modèle de la figure 6 (a) et (b).

Les paramètres de simulations du système de propulsion du type M-R sont donnés dans les tables I et II.

Les simulations sont réalisées pour les deux cas suivants:

TABLE I
 SPECIFICATIONS DU SYSTEME DE PROPULSION DU TYPE M-R

Symbole	Description	Valeur
J	Inertie totale	0.8e-3 Kg/m ²
L_d, L_q	Inductance axe d,q	0.2 mH
R_d, R_q	Resistance axe d,q	0.34 Ohm
Ψ_d, Ψ_q	Flux axe d,q	0.08 Wb
P	Pairs de pole	4
C_d	Coefficient aérodynamique	0.55
ρ	Densité de l'air	1.25
A_F	Front area of véhicule	1.8m ²
R_r	Rayon de la roue	0.296 m

1) Cas1: Route plate avec 10% de pente à la vitesse constante égale à 80km/h: Dans ce cas, nous avons

appliqué une vitesse constante égale à 80Km/h avec la condition que la route est inclinée de 10% à 2,5s. La figure 8 présente l'évolution de la vitesse de la roue mesurée et sa valeur de référence.

La vitesse de la roue atteint une valeur constante après un léger dépassement. À l'instant 2.5s, on note un faible dépassement, puis la vitesse est égale à la vitesse de sa référence. La pente de la route n'affecte pas le contrôle de la vitesse de la roue.

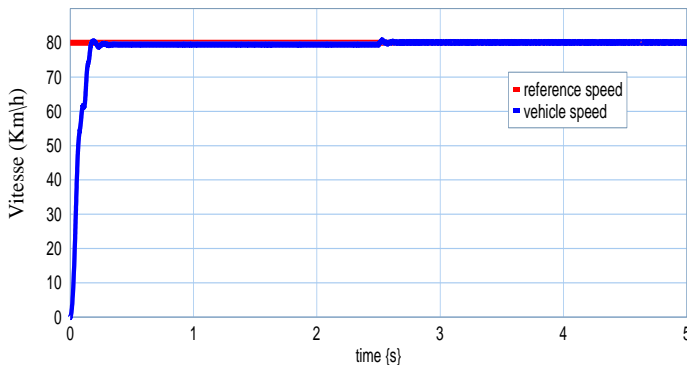


Fig.8 Évolution de la vitesse de la roue

2) *Cas2: Route plate à la vitesse variable.* La figure 9 présente l'évolution de la vitesse mesurée de la roue et sa valeur de référence. Entre 0 et 1s la vitesse est nulle, le véhicule est en arrêt ; de 1s à 4s la vitesse de la roue est égale à 20km/h ; de 4s à 6s la vitesse est augmentée à 55km/h et de 6s à 8s, la vitesse est diminuée à valeur égale à 30km/h. La vitesse mesurée est identique à celle de la référence.

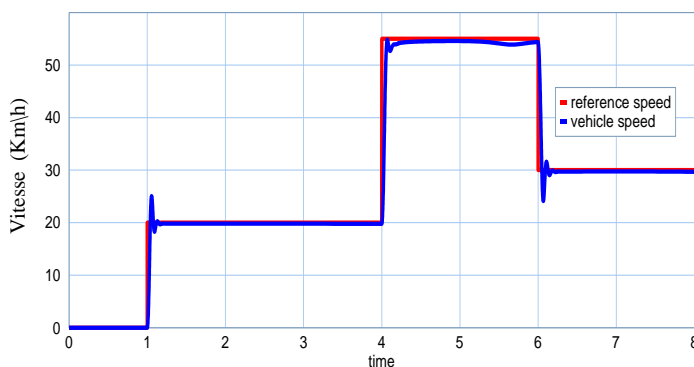


Fig.9 Évolution de la vitesse de la roue

V. CONCLUSION

Les travaux exposés dans cet article décrivent l'élaboration du modèle systémique du système de propulsion de type Moteur-Roue du Véhicule Électrique avec l'outil énergétique Bond Graph. Ce système est composé des modèles électriques, magnétiques, mécaniques et de charge. Le couplage de ces modèles est réalisé en vue de l'étude des phénomènes physiques de chaque modèle et des propriétés structurelles et énergétiques de l'outil Bond Graph.

Le modèle développé a été construit et simulé sous l'environnement 20-Sim. L'avantage de ce logiciel est la

facilité de construire des modèles hétérogènes et couplés et aussi d'analyser leur comportement dynamique.

Nous envisageons de poursuivre ces travaux essentiellement dans le sens de l'élaboration de stratégies de commande plus adaptées.

NOMENCLATURES

Symbole	Description
J	Inertie roue et motor
M_r	Masse de la roué
α	Angle de la pente
f_r	Coefficient de friction
V_{rmes}	Vitesse mesurée de la roue
$V_{aref}, V_{bref}, V_{cref}$	Tension de référence axe (a,b,c)
V_r	Vitesse linéaire de la roue
i_d, i_q	Courant axe d,q
R_r	Rayon de la roue
Γ_m	Couple moteur
Ω_m	Vitesse angulaire
V_d, V_q	Tension axe d,q
R_d, R_q	Resistance axe d,q
L_d, L_q	Inductance axe d,q
ψ_f	Flux permanent
ψ_d, ψ_q	Flux axe d,q
J_m	Inertie du rotor
Df	Detecteur du flux
I_{dref}, I_{qref}	Courant de référence axe (d, q)
V_{dref}, V_{qref}	Tension de référence axe (d, q)
I_{dmes}, I_{qmes}	Courant mesuré axe (d, q)
V_{dmes}, V_{qmes}	Tension mesurée axe (d, q)

REFERENCES

- [1] J. Liu and H. Peng, "Modeling and Control of a Power-Split Hybrid Vehicle", IEEE, vol. 16, no. 6, pp.1242-1251, Nov.2008.
- [2] C. ESPANET, *Modélisation et conception optimale de moteurs sans balais à structure inverse application du moteur-roue*, Thèse de Doctorat ; 1999.
- [3] A. Nasri, B. Gasbaoui and B. M. Fayssal, "Novel four wheel drive propulsion system control using backstepping strategy," *Science Direct*, vol. 22, pp. 509–517, Oct. 2015.
- [4] k. Jaber, B.Ben Salek, A. Fakhfakh, R.Neji, "Modeling and Simulation of Electrical Vehicle in VHDL-AMS," IEEE Conference, pp.908-911, 2009.
- [5] R. Gicquel, "Systèmes énergétiques, Volume 1", Mines Paris Tech., 2009.
- [6] M. Vergé, D. Jaume, "Modélisation structurée des systèmes avec les Bond Graphs," Editions Technip, Paris, 2004.
- [7] S.Dridi, I. B. Salem and L. E. Amraoui, "Dynamic modeling of nonlinear longitudinal automotive system using graphically based techniques", IEEE Conferences, SETIT, pp.349-354, Juin 2017.

- [8] S.Dridi, I. B. Salem and L. E. Amraoui, “Dynamic modeling of an automotive power steering graphic tool: Bond graph”, IEEE Conferences, CISTEM, pp.1-8, April, 2015.
- [9] K. Jaber, A. Fakhfakh, and R. Neji, “Comparison of SPWM and SVPWM Control of Electrical Vehicle in VHDL-AMS,” IEEE Conferences, SETIT, pp.171-176, March 2013.
- [10] J. Broenink, “20-SIM software for hierarchical bond-graph/ block-diagram models,” ELSIVER, pp. 48-492, 1999.