

# Développement d'un outil logiciel dédié à l'analyse de la chaîne de traction d'un véhicule électrique ou électrique hybride

Xiaofeng LIU

LGEP/SPEE Labs; CNRS UMR8507; Supelec; Univ Pierre et Marie Curie-P6; Univ Paris Sud-P11; F-91192 Gif-sur-Yvette

**Résumé**—L'objectif de cet article est de présenter les premiers résultats obtenus dans le développement d'un outil logiciel – sous l'environnement Matlab-Simulink pour aider le concepteur dans le choix, le dimensionnement et l'analyse de la chaîne de traction d'un véhicule électrique (VE) ou hybride (VEH). L'outil s'appuie sur une bibliothèque de modèles des différents constituants (sources et dispositifs de stockage d'énergie électrique et machines électrique par exemple) ainsi que des lois de contrôle et de gestion du flux d'énergie dans le véhicule. Une méthodologie de conception basée sur un cahier des charges permet d'extraire les principales caractéristiques des constituants, de les associer selon l'architecture choisie et d'analyser grâce aux résultats de simulation les performances de la chaîne de traction. Les résultats (performances dynamiques et consommation) obtenus avec deux motorisations (asynchrone et synchrone) sur une architecture de type hybride parallèle ont permis de tester l'outil. Ils sont prometteurs et permettent d'envisager la poursuite du développement de la plate forme logicielle.

## I. INTRODUCTION

La propulsion électrique est une des technologies clés pour le Véhicule Electrique Hybride (VEH). De nombreux chercheurs ont travaillé sur la sélection de Machine Electrique (ME) pour le VEH. L'auteur de [1] indique que le choix de la ME dépend de sa plage de vitesse, de son rendement, ainsi de la dynamique du véhicule et l'architecture du système choisi. De plus, Selon [2], l'attente du conducteur, les contraintes du véhicule et la source d'énergie sont les trois critères importants pour le choix du ME. D'après une étude exhaustive dans [2], ils ont montré que, même si la Machine Asynchrone (MAS) remplit mieux les principales exigences de la propulsion électrique, la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP) est toujours très compétitif. En outre, la conception d'un tel système complexe, impliquant de nombreux phénomènes (mécanique, thermique, magnétique, électrique) dans le domaine automobile où le temps de mise sur le marché est critique, est une question clé. D'où la mise en place d'un outil logiciel permettant le choix, le dimensionnement et l'analyse de la chaîne de traction est intéressante.

Avec une étude comparative en utilisant respectivement une MAS et une MSAP dans une même chaîne de traction de type hybride parallèle prétransmission [3], nous allons présenter dans ce travail les premiers résultats obtenus dans le développement d'un outil logiciel. Le papier est organisé

de la manière suivant, premièrement, le système entier est décrit. Etant alimenté le même paquet de batterie, les caractéristiques de couple-vitesse de deux machins électriques sont extraites en utilisant les techniques de défluxage dans leurs commandes afin de remplir les conditions d'une grande plage de vitesse de fonctionnement. Deuxièmement, la procédure numérique de conception, qui est le principe de l'outil logiciel, est également décrite. Dans la troisième partie, des résultats de simulation en utilisant deux cycles d'entraînement différents sont présentés permettant d'analyser les performances des deux chaînes. Enfin, quelle que conclusion est donnée dans la dernière partie.

## II. ARCHITECTURE DE LA CHAÎNE DE TRACTION

Le logiciel proposé est évalué par une chaîne de traction hybride. Dans une configuration parallèle, le moteur thermique (MT) ou la ME seul peut fournir la puissance de propulsion; quand la demande est grande, le MT ne peut pas lui seul satisfaire cette demande, la ME fournit donc une puissance d'assistance, l'addition de ces deux puissances se fait par un couplage mécanique. La ME peut fonctionner également comme un générateur pour recharger la batterie en récupérant l'énergie de freinage.

La figure 1 présente la configuration de la chaîne utilisée dans cette étude, qui consiste en le moteur thermique avec l'embrayage permettant de découpler le MT et la ME, la machine électrique avec la batterie associée et la boîte de vitesse. Le MT et la ME sont couplés sur le même arbre, donc ils ont la même vitesse de fonctionnement, la boîte de vitesse permet d'adapter le couple de l'ensemble du GMP (Group MotoPropulseur) au couple résistant de l'arrêt au déplacement du véhicule.

La dynamique du véhicule, les composants principaux de la chaîne de traction et aussi leurs modèles sont brièvement présentées ci-dessous :

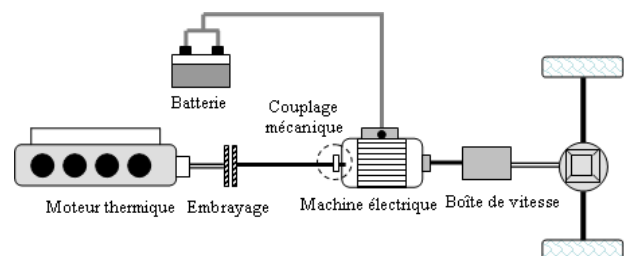


Fig 1 : Chaîne de traction parallèle de type prétransmission

A. Dynamique du véhicule

Le véhicule choisi dans ce travail est du type segment M1 (Peugeot 307, Citroën Xsara et Honda Civic), dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 1

$M_{veh}$ : Masse du véhicule	1300 kg
$R_{roue}$ : Rayon des roues	0,32 m
$A_f$ : Surface frontale	2,61 m <sup>2</sup>
$C_r$ : Coefficient de résistance au roulement	0,0133
$C_x$ : Coefficient de résistance aérodynamique	0,32

TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES DU VEHICULE

Le véhicule est simplement modélisé comme une masse en déplacement selon l'axe longitudinal, soumis à la force de traction  $F_{TR}$  développé par le groupe motopropulseur et à différents efforts de résistance liés à l'environnement  $F_R$ , tel que  $f_{ro}$ ,  $f_{ao}$  et  $f_g$  [4] [5], comme les montre dans la figure 2.

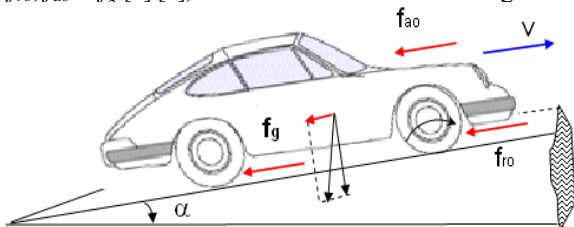


Fig. 2 : Différentes forces résistants sur le véhicule

-  $f_{ro}$  est l'effort de résistance au roulement qui s'oppose au déplacement, son expression est donnée par :

$$f_{ro} = sign(V_{veh}) \cdot M_{veh} \cdot g \cdot C_r \quad (1)$$

Où  $g$  est l'accélération gravitationnelle et  $V_{veh}$  est la vitesse du véhicule

-  $f_{ao}$  est l'effort de résistance aérodynamique qui s'oppose aussi au déplacement, son expression est :

$$f_{ao} = \frac{1}{2} \cdot sign(V_{veh}) \cdot \rho_{air} \cdot A_f \cdot C_x \cdot V_{veh}^2 \quad (2)$$

-  $f_g$  est l'effort de résistance de montée en côte, son expression est :

$$f_g = M_{veh} \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (3)$$

Où  $\alpha$  est la pente en radian.

En appliquant le principe fondamental de la dynamique, on peut déduire la vitesse  $V_{veh}$  :

$$V_{veh}(t) = \frac{1}{M_{veh}} \cdot \int_0^t (F_{TR} - F_R) \cdot du \quad (4)$$

B. Moteur thermique

Dans un véhicule hybride, le moteur thermique est considéré comme la première source de propulsion. Donc le critère de dimensionnement est le maintien de la vitesse de croisière demandée [6]. En effet, la machine électrique est réservée pour les phases de démarrage et vient assister le thermique lorsque la demande de puissance augmente. Dans ce travail, un moteur de 55 kW a été choisi. Il est capable de maintenir une vitesse de croisière de 140 km/h. Le moteur thermique est un système très compliqué, on le considère simplement comme un générateur de couple, et le représente par sa cartographie de couple-vitesse issue de mesures expérimentales. La figure 3 représente la caractéristique du

moteur thermique utilisé. On voit aussi les courbes iso-puissance et iso-rendement

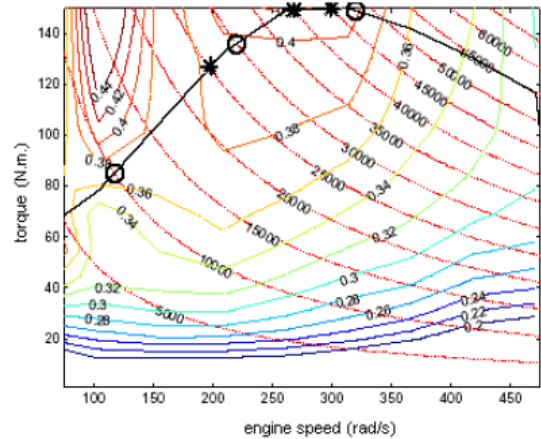


Fig. 3 : caractéristiques du couple-vitesse du moteur thermique [7]

C. Batterie

La batterie choisie est du type Nickel Métal Hydrure (Ni-MH), dont les spécifications pour un module de 6 cellules sont données dans le Tableau 2

Tension nominale	7,2 V
Capacité nominale	6,5 Ah
Puissance spécifique	1300 W/kg
Energie spécifique	46 Wh/kg
Masse	1030 g
Dimensions	19,6 (W) × 106 (H) × 285 (L) cm

TABLEAU 2 : SPECIFICATIONS DE LA BATTERIE NI-MH

Le pack de batterie consiste en  $N_{sb}$  éléments en série et  $N_{pb}$  en parallèle, comme le montre la figure 4.

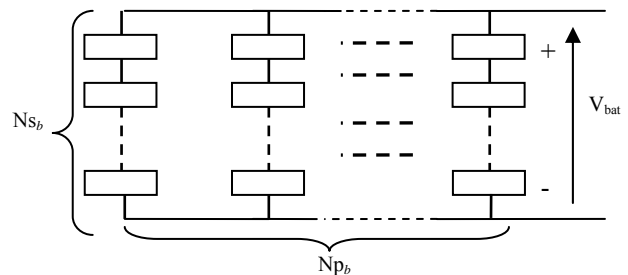


Fig. 4 : Configuration de pack de batterie

Un élément de batterie est modélisé par une force électromotrice interne ' $E_{bat}^{elem}$ ' en série avec une résistance interne ' $R_{bat}^{elem}$ ', toutes les deux étant fonction de l'état de charge *soc* (en anglais State Of Charge). La tension sortie d'un élément de batterie est donnée par (5)

$$V_{bat}^{elem} = E_{bat}^{elem}(soc) - R_{bat}^{elem}(soc) \cdot I_{bat}^{elem} \quad (5)$$

Où  $I_{bat}^{elem}$  est le courant dans un élément de batterie.

L'état de charge *soc* est déterminé par (6)

$$soc(t) = soc(t=0) - \frac{\int I_{bat}^{elem} \cdot dt}{C_{bat}^{elem} \cdot 3600} \quad (6)$$

Où  $C_{bat}^{elem}$  est la capacité nominale de la batterie.

Afin de prolonger la durée de vie de la batterie (nombre de cyclage), il est préférable de respecter la limitation technique de la batterie, c'est-à-dire, de maintenir l'état de charge entre 0,7 et 0,95.

**D. Machine électrique**

Pour étudier les performances des différentes machines électriques pour la même chaîne de traction, nous avons utilisé deux types de machine électrique sont utilisés dans ce travail : MAS et MSAP. Le critère pour le dimensionnement est d'accélérer le véhicule de 0 à 50 km/h en propulsion électrique pur, ceci correspond environ à une puissance de 35 kW. Finalement deux machines commercialisées de même puissance nominale (37 kW) LS 225 ST-Leroy Sommer et HVA40 JG sont retenues, dont les caractéristiques sont données dans l'annexe.

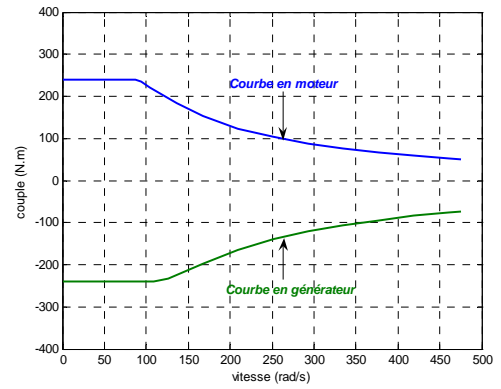
Les machines sont commandées en couple dans le référentiel de Park (d,q). Du fait que la vitesse de fonctionnement de la machine électrique est imposée par le moteur thermique, nous avons intégré les techniques de défluxage dans les contrôleurs de la machine afin d'étendre la plage de vitesse jusqu'à la vitesse maximale du moteur thermique [8] [9] [10].

Pour extraire les caractéristiques couple-vitesse des deux machines électriques, nous avons les alimentés par le même pack the batterie dans le cas plus défavorable, c'est-à-dire, avec soc égale à 0,7, qui est la limite inférieure. Les courbes couple-vitesse pour deux modes de fonctionnement (Générateur et moteur) sont présentées la figure 5. Pour la même gamme de puissance, la MAS fournit un couple maximal plus grand que celui de la MSAP.

La figure 6 présente les courbes de puissance vitesse, les puissances maximales de la MAS en mode générateur et moteur sont 37 kW et 30 kW, 35 kW et 25 kW pour le cas de la MSAP.

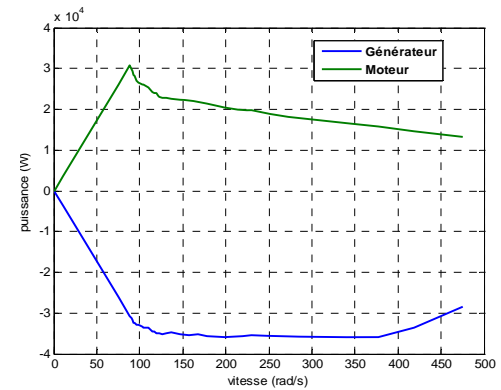
**E. Boîte de vitesse**

La boîte de vitesse dans l'exemple traité propose plusieurs rapports de réduction qui permet d'adapter les régimes de fonctionnement entre les deux arbres primaire et secondaire. Une boîte de vitesse de 5 rapports a été choisie dans ce travail, elle est modélisée par des valeurs discrètes k. Nous supposons que la perte dans la boîte de vitesse est négligeable.

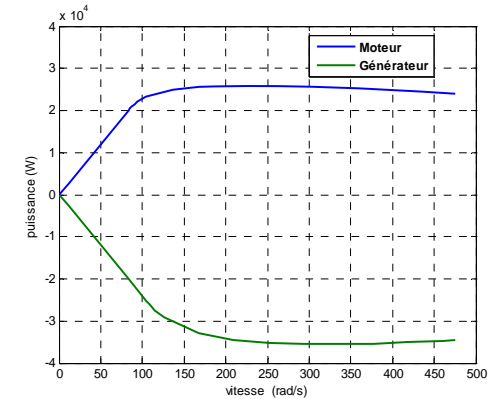


(b) MSAP

Fig. 5 : Caractéristiques couple-vitesse

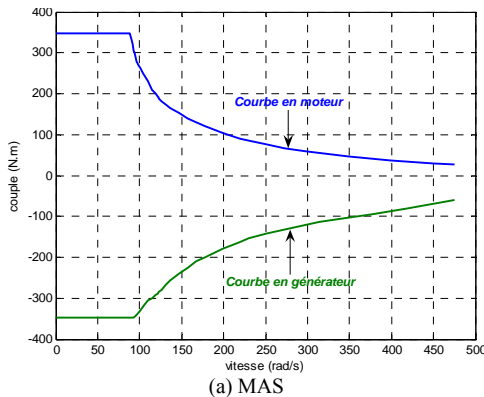


(a) MAS



(b) MSAP

Fig. 6 : Caractéristiques puissance-vitesse



(a) MAS

**F. Contrôleur logique floue**

Afin d'améliorer le rendement du MT et de réduire la consommation de carburant, un contrôleur de gestion d'énergie permettant de répartir les puissances entre les sources de manière optimale a été développé, comme le montre la figure 7.

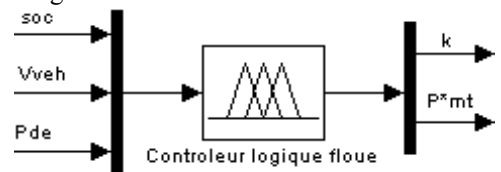


Fig. 7 : Contrôleur logique floue

Le contrôleur retenu utilise la technique logique floue qui est une solution appropriée pour les problèmes non linéaires [11]. Trois paramètres: l'état de charge de la batterie (soc), la

vitesse actuelle du véhicule ( $V_{veh}$ ), et la puissance demandée ( $P_{de}$ ) sont définis comme les entrées du contrôleur, et les sorties sont la puissance référence du moteur thermique  $P_{mt}^*$  et le rapport de transmission  $k$ . la référence de la puissance de la machine électrique est la différence entre la puissance demandée et la puissance du moteur thermique [5], comme présente par (7).

$$P_{me}^* = P_{de} - P_{mt} \tag{7}$$

### III. PRINCIPE DE L'OUTIL LOGICIEL DE CONCEPTION

L'objectif est de développer un outil logiciel qui permettra au concepteur de sélectionner, simuler et analyser la chaîne de traction d'un VE ou VEH. Une procédure numérique de conception est proposée et décrite dans la figure 8.

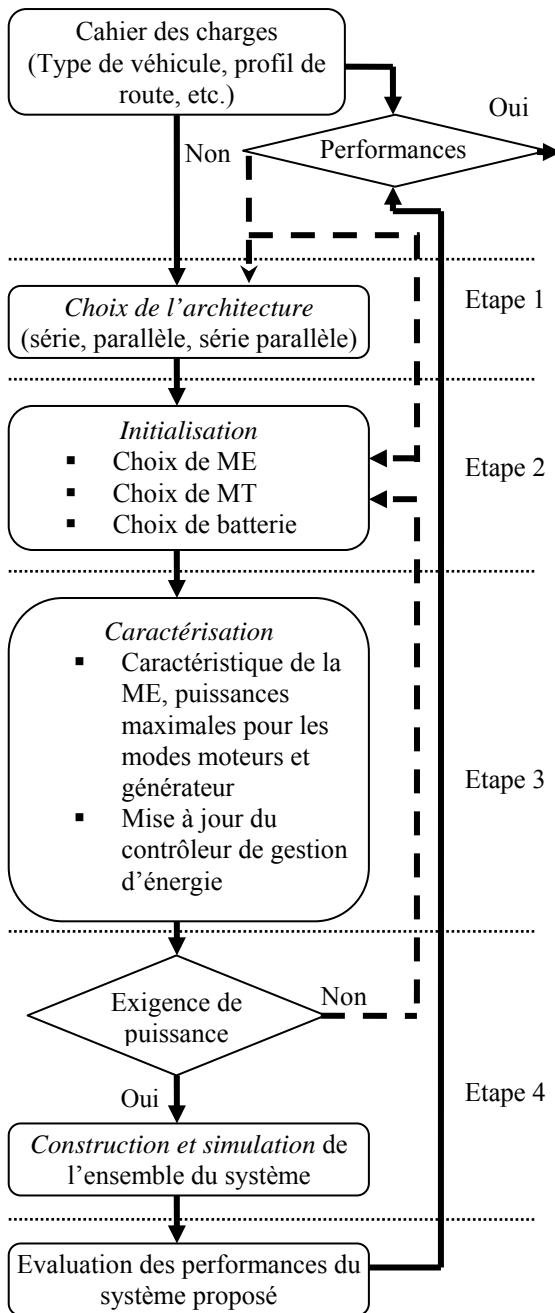


Fig. 8: Procédure numérique de conception

Cette procédure se divise en 4 étapes principales. A partir d'un cahier des charges donné, une sélection de l'architecture se fait dans la première étape, ensuite on dimensionne les différents composants de la chaîne, par exemple le choix du moteur thermique et de la machine électrique, le nombre de l'élément de la batterie. La troisième étape est une étape où on connecte certains composants pour vérifier l'exigence du système. Par exemple on relie la batterie et la ME pour évaluer la capacité de puissance en mode générateur et en moteur. Un retour vers l'étape précédente est possible si la vérification n'est pas satisfaisante. Dans la dernière étape, on construit et simule l'ensemble du système avec le contrôleur de gestion d'énergie. Après une comparaison entre les performances du système proposé et le cahier des charges, on peut retenir le système proposé ou refaire les étapes 1 ou 2 jusqu'on trouve un résultat satisfaisant.

### IV. RÉSULTATS DE SIMULATION

Nous avons conçu la chaîne de traction présentée dans la figure 1 avec deux ME différentes selon la procédure. Le système est validé avec des cycles de fonctionnement, et différents modes de fonctionnement ont été observés, tel que :

- Le MT ou la ME fournit seule la puissance totale de propulsion ;
- Le MT et la ME fournissent ensemble la puissance totale de propulsion ;
- Le MT fournit une puissance supérieure à la demande, et l'excès permet de charger la batterie si nécessaire ;
- La batterie récupère l'énergie de freinage via la ME fonctionnant en générateur.

Le premier cycle de fonctionnement est l'European Urban Driving Cycle (EUDC) représenté sur la figure 9.

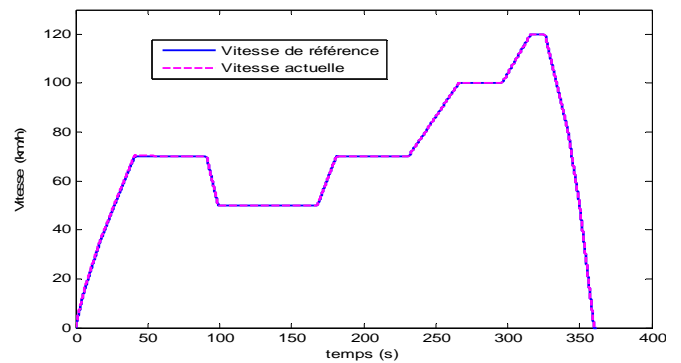


Fig. 9: Vitesse de référence (EUDC) et vitesse actuelle

La figure 10 présente la distribution de puissance. Lorsque la puissance demandée est inférieure à 10 kW, ME seule propulse le véhicule, et la MT est au repos. Le MT est activée dès que la puissance demandée est supérieure à 10 kW. Dans cette étude, il est admis que la ME récupère 65% de la puissance de freinage pour recharger la batterie.

Les points de fonctionnement (couple-vitesse) du MT dans le cas de l'hybridation et du non hybridation et la courbe optimale, qui correspond aux meilleurs rendements, sont présentés dans la figure 11. On note une nette amélioration du rendement du fait de l'hybridation même si le respect des contraintes de fonctionnement ne permet pas de rester en permanence sur la courbe optimal.

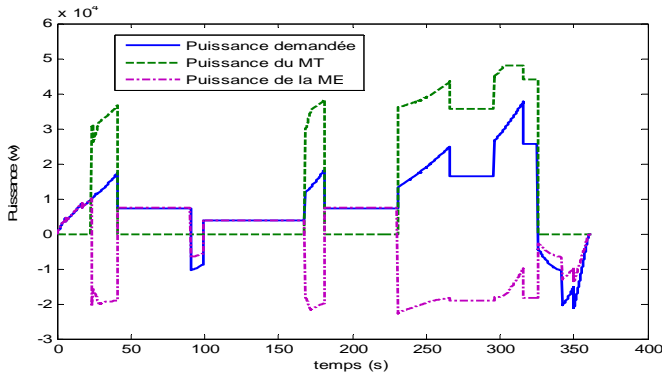


Fig. 10: Puissance demandée et les puissances du MT et de la ME pour  $soc_{(t=0)}=0,8$  (EUDC)

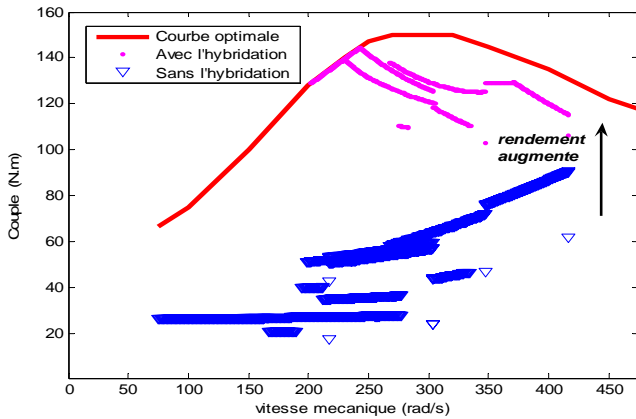


Fig. 11: Points de fonctionnement du MT pour le cas sans hybridation et avec hybridation pour  $soc_{(t=0)}=0,8$

La figure 12 montre la variation de l'état de charge de la batterie à partir de différentes valeurs initiales de soc pour les deux groupes motopropulseur. Les formes d'onde sont semblables, mais la batterie est mieux chargée dans la chaîne de traction avec MSAP par rapport au cas avec MAS.

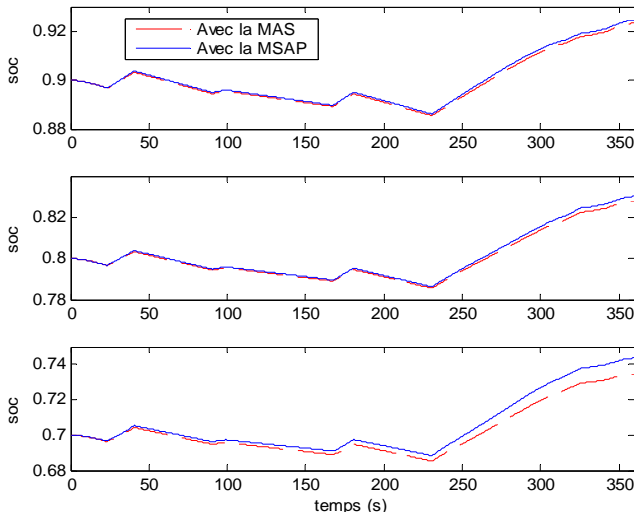


Fig. 12: Etats de charge de la batterie pendant EUDC

Dans le premier cycle, on n'a pas observé le mode de fonctionnement, où le MT et la ME fournissent simultanément l'énergie de propulsion. Et donc le deuxième cycle a été employé pour illustrer cette configuration bi-propulsion. Le profil de vitesse est présenté sur la figure 13. La figure 14 montre les courbes de puissance, le MT et la

ME participant à la propulsion simultanément quand la puissance demandée dépasse 54 kW ce qui est la puissance maximum qui peut délivrer le MT. La figure 15 présente la variation de l'état de charge avec une valeur de départ 0,8.

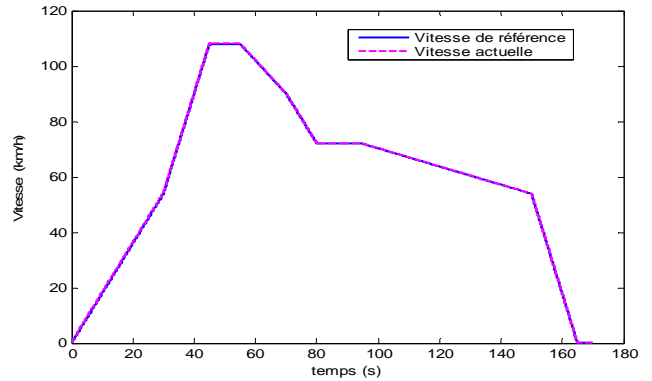


Fig. 13: Vitesse de référence (Bi-propulsion cycle) et vitesse actuelle

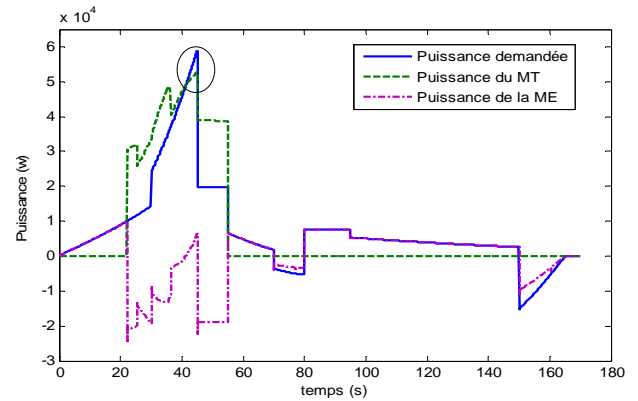


Fig. 14: Puissance demandée et les puissances du MT et de la ME pour  $soc_{(t=0)}=0,8$  (Bi-propulsion cycle)

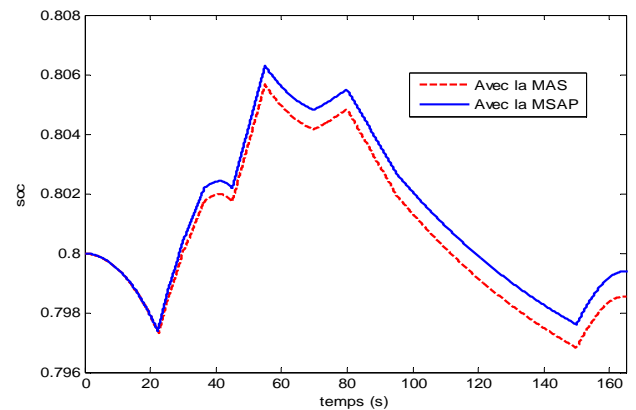


Fig. 15: Etats de charge de la batterie pendant le cycle Bi-propulsion avec  $soc_{(t=0)}=0,8$

## V. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons présenté les premiers résultats obtenus avec un logiciel dédié à la conception et l'analyse de la chaîne de propulsion d'un VE ou VEH. Deux chaînes de traction ont été conçues, testées et mis en œuvre incluant la batterie, les moteurs électriques et leurs contrôleurs, la boîte de vitesse et la dynamique du véhicule. Le choix a été fait d'évaluer l'outil sur un exemple d'un

véhicule hybride de type parallèle. Une stratégie de gestion d'énergie basée sur la logique floue est également introduite afin d'optimiser les points de fonctionnement du MT et réduire donc les émissions de CO<sub>2</sub>.

Sur la base des exigences d'un VEH, cinq caractéristiques sont extraites pour évaluer le MAS et le MSAP. Chacune d'entre elles de 1 à 5, 5 étant le meilleur des cas. Le tableau 3 résume les principaux résultats de la comparaison. En conclusion nous pouvons dire que, dans cette application, la MSAP est plus approprié. Classé sur une échelle de 1 à 5.

Type de propulsion électrique	MAS	MSAP
Densité de puissance	2,5	5
Plage de vitesse	5	5
Contrôlabilité	5	5
Soc de la Batterie	4	5
Coût	5	4
Total	21,5	24

TABLE 3: EVALUATION DE DEUX PROPULSIONS ELECTRIQUES

## ANNEXE

## CARACTERISTIQUES DE LS 225 ST-LEROY SOMER [12]

Puissance nominale	37 kW
Vitesse de base	1475 tr/mn
Courant nominale	67 A
Nombre de pôle	4
(Id/In)	6,8
Résistance du stator $R_s$	85.1 mΩ
Résistance du rotor $R_r$	65.8 mΩ
Inductance magnétisante $L_m$	29,1mH
Poids	205 Kg

## CARACTERISTIQUES DE HVA40JG – PARVEX [13]

Puissance nominale	37 kW
Couple en rotation lente	240 N.m
Vitesse de base	1480 tr/mn
Nombre de pôle	20
F.E.M entre deux phases (1000 tr/mn)	268 V
Courant en rotation lente	138 Â
Résistance du bobinage (25°C)*	0,105 Ω
Inductance entre phases	3,09 mH
Poids	110 kg

## REFERENCES

- [1] Z. Rahman, M. Ehsani, K.L. Butler, "An investigation of electric motor drive characteristics for EV and HEV propulsion systems" *SAE Technical paper series*, paper #2000-01- 3062.
- [2] M. Zeraoulia, M.E.H. Benbouzid, D. Diallo, "Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative study" *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Vol. 55, Issue 6, pp.1756 – 1764, Nov 2006.
- [3] M. Ehsani, Y. Gao, S.E. Gay, A. Emadi, "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles," ©2005 by CRC Press LIC
- [4] M.Ehsani, K.M.Rahman, H.A.Toliyat, "Propulsion system design of electric and hybride vehicle application", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 44, pp. 19-27, Feb. 1997
- [5] H. Hannoun, D. Diallo, C. Marchand, "Energy management strategy for a parallel hybrid electric vehicle using fuzzy logic," *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2006*. pp. 229 – 234, May, 23rd - 26th, 2006
- [6] G. Paganelli, "Conception et commande d'une chaîne de traction pour véhicule hybride parallèle thermique et électrique," *Thèse de doctorat de l'université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis* 1999.
- [7] N.A Kheir, M.A. Salman, N.J. Schouten, "Emissions and fuel economy trade-off for hybrid vehicles using fuzzy logic," *Mathematics and Computers in simulation* 66, pp. 155-172, 2004
- [8] C.T. Pan and J.H. Liaw, "A Robust Field-Weakening Control Strategy for Surface-Mounted Permanent-Magnet Motor Drives," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 20, no. 4, December 2005
- [9] J.J. Chen, K.P. Chin, "Minimum Copper Loss Flux-Weakening Control of Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 18, no. 4, July 2003
- [10] W. Leonhard, "Control of electrical drives," *Springer Verlag* 1985
- [11] X. He, M. Parten and T. Maxwell, "Energy Management Strategies for a Hybrid Electric Vehicle," *IEEE Vehicular power electronics and propulsion conference, CD ROM*, pp. 536-540, September 2005, Chicago, IL.
- [12] Disponible sur le site : [http://www.leroy-somer.com/catalogueindustrie-en/1\\_MotAC/A02\\_LS-tri/Cadres.html](http://www.leroy-somer.com/catalogueindustrie-en/1_MotAC/A02_LS-tri/Cadres.html)
- [13] Disponible sur le site : <http://www.parvex.fr/fichesmot/francais/hv/-hva40jg.pdf>